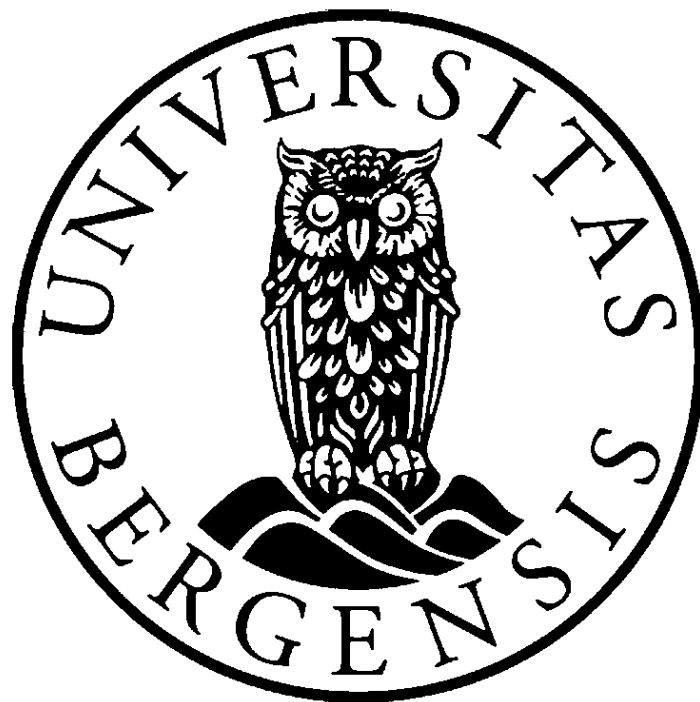


En eksperimentell studie av CO₂ lagring i sandstein og kalkstein med bruk av ulike avbildningsteknikker

Masteroppgave i reservoarfysikk

Glenn-André Dåtland Kvinge



Institutt for fysikk og teknologi

Universitetet i Bergen

November 2012

Annerkjennelse

Først og fremst vil jeg takke Professor Arne Graue, Dr. Geir Ersland og Dr. Martin Fernø ved Institutt for Fysikk og Teknologi, for god veiledning, deling av erfaring og støtte gjennom arbeidet i dette masterstudiet.

Tusen takk til MSc Knut Arne Birkedal, MSc Lars Petter Hauge, MSc Jarand Gauteplass og medstudent Thomas Mathiassen, som har vært der som gode støttespillere, gitt veiledning og gode faglige diskusjoner for det eksperimentelle arbeidet.

Takk til Thomas Ramstad ved Numerical Rocks i Trondheim for deling av erfaring og data fra simuleringer utført rettet mot CO₂ lagring.

En stor takk til alle mine medstudenter for informative diskusjoner og ikke minst de uendelig mange gode minner som sitter igjen fra tiden ved UiB.

Takk til mekanisk verksted ved UiB.

Sist men ikke minst vil jeg takke familie og venner, spesielt da mine foreldre Marianne og Stein-Inge, som alltid har vært der, støttet og motivert meg gjennom studietiden.

Tusen takk alle sammen!

Bergen, November 2012

Glenn-André Dåtland Kvinge

Sammendrag

De naturlige klimagassene sørger for at middeltemperaturen på jorda er ca. 15°C, og ikke -18°C som den ville vært uten klimagassene. De menneskeskapte (antropogene) utslippene av klimagassene CO₂, CH₄, N₂O og fluorholdige gasser gir en ytterligere oppvarming. Den globale middeltemperaturen har økt med 0,74°C de siste 100 årene. Den viktigste menneskeskapte klimagassen er CO₂, og konsentrasjonen av CO₂ er i dag høyere enn den har vært på 650 000 år [5].

Å redusere de menneskeskapte utslippene er et aktuelt og hett tema internasjonalt i dag. Det fokuseres blant annet på å lagre CO₂ i geologiske formasjoner analogt til hvordan olje- og gassressurser har vært lagret i geologiske reservoarer over millioner av år frem til produksjon. Det eksperimentelle arbeidet utført i denne oppgaven er gjort på dagbruddsbergarter, som gjenspeiler kjernemateriale i Nordsjøen. Det er lagt vekt på visualisering av CO₂-strømning ved bruk av forskjellige avbildningsteknikker. Dette masterprosjektet er det første ved Institutt for Fysikk og Teknologi (UiB) med ambisjon om å avbilde CO₂ i porøse systemer initialt mettet med vann. Det er derfor brukt betydelig tid på design og testing av eksperimentelle systemer for å optimalisere kontroll på materialbalanse og visualisering av strømning som funksjon av tid.

Væskefortrengning ved flerfasestrømning, med trykk og temperaturforhold som gir CO₂ i væskefase, er blant annet blitt avbildet på strømningsriggen ved Universitetet i Bergen. Dette ved å mette kjernematerialet med saltvann merket med radioaktivt sporingstoff (²²Na). Det radioaktive sporingstoffet vil ikke blande seg med CO₂, og vil derfor kunne gi avbildning av vannfortrengningen ettersom radioaktivitet avtar når vannet fortrenses. Injeksjon fra bunn og topp, i nærliggende vertikal retning, ble gjort for å kunne se på effekten av gravitasjon, tetthetsforskjell og mobilitetsforhold mellom CO₂ og vann i større bergartsblokker (15cm x 10cm x 5cm). For å komplimentere noe lav oppløsning ved strømningsriggen ved UiB, ble en helt ny metode for avbildning av fluidstrømning i porøse medier utprøvd i denne oppgaven. Dette ved å avbilde strømningen med en PET/CT skanner ved Haukeland Universitetssykehus. Denne kan gjennomføre skann på mindre prøver med kortere tidsintervaller, med bedre oppløsning på avbildningen, og med muligheten for å merke CO₂ direkte med sporingstoffet ¹¹C, fremfor å merke det fortrenste vannet.

For å kunne verifisere metningsdata ved CO₂-vannfortrengning i porøse medier ble forskjellige målinger utprøvd; resistivitet, materialbalanse, strålingsintensitet og massebalanse. I tillegg har det blitt gjort eksperiment med å se på muligheten for å mette CO₂ med vann og bedre alternativ for prepareringsmetoder av blokker (hvor det i dag blir brukt epoksy). Det ble ikke funnet en god metode for å mette CO₂ med vann i forkant av injeksjonsprosessene, hvor alle eksperimentene da ble injisert med ren CO₂. Avbildningsteknikken ved strømningsriggen ved UiB ga stor metningsdifferanse mellom målinger basert på strålingsintensitet og materialbalanse. Parallelle metningsmålinger gjennom resistivitet og/eller materialbalanse vil være nødvendig for å korrigere eller verifisere metningsdata basert på strålingsintensitet. Avbildning av CO₂-strømning i et porøst kjernemateriale med PET/CT skanner viste seg å være en suksess. Avbildningen gav god oppløsning og tydelig tegn til fingering som følge av ugunstig mobilitetsforholdet mellom vann og CO₂. Generelt ble det oppnådd en potensiell lagringskapasitet for CO₂ på 50 ±5 % av porevolumet i sandstein, hvor endepunktsmetningen økte ved økt kapillærtall og injeksjonsrate. Kalkstein ble funnet lite egnet som bergart og gikk i oppløsning mest sannsynlig grunnet dannelse av karbonsyre.

1 Innholdsfortegnelse

1	Teori.....	9
1.1	Porøsitet	9
1.2	Metning	10
1.3	Absolutt permeabilitet	10
1.4	Effektiv og relativ permeabilitet.....	12
1.4.1	Mobilitetsforhold	13
1.5	Blandbarhet	14
1.6	Fukt.....	15
1.7	Viskositet og tetthet	16
1.8	Kapillærtrykk	16
1.8.1	Kapillærtall.....	19
1.9	Resistivitet	20
2	CO ₂	21
2.1	Egenskaper til karbondioksid	21
2.1.1	CO ₂ -H ₂ O blanding	23
2.2	Lagring av karbondioksid.....	24
2.2.1	Fangst av CO ₂	24
2.2.2	Transport av CO ₂	25
2.2.3	Prinsipper for lagring av CO ₂	25
2.2.4	Risiko ved CO ₂ lagring.....	26
3	Avbildningsteknikker	27
3.1.1	PET/CT – Positron Emission Tomography/Computed Tomography.....	27
3.1.2	NTI – Nuclear Tracer Imaging (Radioaktiv sporing avbildning).....	30
3.1.3	Radioaktivt sporingstoff.....	32
4	Litteraturstudie.....	33
5	Eksperimentelle oppsett og prosedyrer	36
5.1	Kjernemateriale	36
5.1.1	Rørdal kalk	36

5.1.2	Bentheim Sandstein	36
5.2	Fluider.....	37
5.3	Preparering av kjerner/blokker	37
5.3.1	Porøsitetsmåling av kjerner.....	37
5.3.2	Permeabilitetsmålinger	38
5.4	Preparering av blokker	39
5.4.1	Porøsitetsmåling av blokk	40
5.4.2	Permeabilitetsmåling av blokken	41
5.5	Ekperimentelle oppsett	41
5.5.1	CO ₂ løselighet i vann.....	41
5.5.2	Blokk eksperimenter ved bruk av NTI avbildning.....	42
5.5.3	Klargjøring av kjerne for Hassler kjerneholder.....	45
5.5.4	Resistivitet	46
5.5.5	CO ₂ -fortrengning ved forskjellige rater	46
5.5.6	Relativ permeabilitet	47
5.5.7	PET/CT: CO ₂ injeksjon	48
5.5.8	Test av krympeplast for kjerner	50
6	Resultater og diskusjon	52
6.1	Kjerne analyse	52
6.2	CO ₂ løselighet i vann.....	53
6.3	Blokkeksperimenter ved bruk av NTI avbildning.....	54
6.3.1	Kalksteinsblokk	54
6.3.2	Sandsteinsblokk.....	60
6.4	Resistivitet	66
6.5	CO ₂ -vann fortrengning ved ulike injeksjonsrater	68
6.6	Relativ permeabilitet.....	74
6.7	PET/CT: CO ₂ injeksjon	77
6.8	Test av krympeplast.....	87
7	Konklusjon	90
7.1	Videre arbeid.....	91

8	Forkortelser	92
9	Referanse.....	94
A.	Vedlegg – Usikkerhetsberegninger	97
B.	Vedlegg – ²² Na datablad	100
C.	Vedlegg – Epoksy datablad.....	101

Introduksjon

Karbondioksid (CO₂) er en drivhusgass. Den har medført en løpende diskusjon som følge av effekten av økende konsentrasjon av CO₂ i atmosfæren og dens effekt for klimaendringer. I Energy Technology Perspectives (ETP) analysene fra 2010, har International Energy Agency (IEA) estimert at innen år 2050 vil det globale CO₂ utslippet være økt til 57 GtCO₂/år, hvor det i 2007 var 29 GtCO₂/år [6]. Store naturlige forekomster av CO₂ finnes naturlig i berggrunnen mange steder på Jorden. Det er dermed nærliggende å se på lagring i geologiske formasjoner for å begrense de menneskeskapte CO₂-utslippene til atmosfæren.

Fangst og lagring av klimagassen karbondioksid (CO₂) blir i dag praktisert for å redusere de menneskeskapte utslippene. I følge I. W. Wright [7], kan man kostnadseffektivt redusere opp til en fjerdedel av dagens drivhusgass problemer med den teknologien som er tilgjengelig for fangst og lagring av CO₂.

En av utfordringene med CO₂ lagring, på kort og lang sikt, er å sørge for at CO₂ ikke siver ut av formasjonen som den er injisert i. «Lang sikt» er definert av IEA-GHG for en periode fra flere hundre til flere tusen år [4]. Porøse formasjoner dypt nede i grunnen med faste, impermeable lag over seg vil derfor være velegnet som lagringsplasser.

Fire stor-skala prosjekter for lagring av menneskeskapt CO₂ er Sleipner (Norge), In Salah (Algerie), Weyburn-Midale (Canada) og Snøhvit (Norge). Av disse er Sleipner og In Salah de to mest signifikante med tanke på kumulativt volum injisert og CO₂ som er lagret [7]. Sleipner prosjektet er lokalisert offshore, hvor CO₂ blir lagret i Utsira formasjonen. Den består av 200 – 300m tykk sandstein med saltvann som formasjonsvann. I Snøhvit prosjektet blir CO₂ håndtert på land, for så å bli fraktet med rørledning ut i Barentshavet og ned gjennom en brønn til Tubåen formasjonen for lagring (sandsteinsformasjon).

På land i Norge er det få eller ingen områder som egner seg for CO₂-lagring. Norge har likevel et av vest-Europas største teoretiske lagringskapasiteter for CO₂. Dette er i saltvannsakviferene (bergarter hvor porerommene er fylt av saltvann) under kontinentalsokkelen i Nordsjøen, Norskehavet og det sørlige Barentshavet. I Gestco-prosjektet ble det beregnet at den totale lagringskapasiteten er ca. 280 000 megatonn CO₂ [8].

Norges offisielle standpunkt i de internasjonale klimaforhandlingene er at global temperatur ikke må øke mer enn to grader celsius sammenlignet med førindustrielt nivå, dersom vi skal unngå farlige klimaendringer. Med et slikt mål må klodens utslipp av klimagasser reduseres med opp mot 85 prosent innen 2050. Den norske regjeringens standpunkt om at CO₂-fangst og -lagring er nødvendig for å nå et slikt mål, støttes blant annet av FNs klimapanel (IPCC) og Det internasjonale energibyrået (IEA). IEA mener at om lag 20 prosent av de nødvendige kuttene i verdens CO₂-utslipp bør komme gjennom CO₂-håndteringsprosjekter [9].

Kostnaden ved fangst og lagring av CO₂ i sammenheng med kraftproduksjon fra fossilt brensel er en grunnleggende utfordring. Kostnaden ved å fange CO₂ fra et kraftverk utgjør om lag to tredeler av kostnadene i hele CO₂-lagringsprosessen, mens resterende prosesser; transport og deponering utgjør om lag en tredel [10]. I en pressemelding fra Olje- og energidepartementet, 08.10.2012, kom det frem at regjeringen foreslår å få tillatelse på å sette av rundt 3,4 milliarder kroner til CO₂ håndtering i

statsbudsjettet for 2013. Dette omfatter drift og videreutvikling av teknologisenteret på Mongstad (TCM), planlegging av fullskalaanlegget på Mongstad, drift av Gassnova SF, forsikring og teknologiutvikling og internasjonalt arbeid for å skape forståelse for CO₂-håndtering, som et viktig klimapolitisk tiltak [11].

Ni av de ti største enkeltutslippene i Norge kommer fra olje- og gassvirksomheten. Oljeraffineriet på Mongstad representerer det største enkeltutslippet av CO₂ [12]. I 2009 ble det besluttet å etablere selskapet «The European CO₂ Technology Center Mongstad» (TCM). Anlegget skulle få en fangstkapasitet på ca 100 000 tonn CO₂ per år. Målet med TCM var å tilby en arena for målrettet utvikling, testing og kvalifisering av teknologi på CO₂-fangst, samt bidra til internasjonal spredning av disse erfaringene slik at kostnader og risiko for fullskala CO₂-fangst kan reduseres [13]. 7. Mai 2012 åpnet statsministeren, Jens Stoltenberg, CO₂ Teknologisenteret ved Mongstad (TCM). Han uttalte da i sin tale; “Today we are opening the world’s largest and most advanced laboratory for testing carbon capture technologies” [14].

Omkring 30 millioner tonn CO₂ per år blir injisert i EOR prosjekter, hvor dette hovedsakelig er i USA og Canada [7], men her er det lite eller ingen fokus på at CO₂ blir geologisk lagret. Behovet for CO₂ i forbindelse med økt oljeutvinning, kan medføre at det med tiden kan bli aktuelt å selge CO₂ til slike prosjekter.

Lave gasspriser i USA på grunn av den økte skifergassproduksjonen har ført til at flere velger gass fremfor kull. På grunn av at det er billigere å brenne gass fremfor kull, benytter kraftselskapene seg derfor av dette. Gass slipper ut mindre CO₂ enn kull, som har bidratt til at CO₂ utslippene i USA har gått ned. I Europa, derimot, er alle utslippene fra kraftsektor underlagt kvoteplikt. I motsetning til USA, gjør lave CO₂-priser at kraftselskapene velger kull fremfor gass, selv om kull forurenses mer. Et umiddelbart tiltak for å redusere CO₂ utslipp i Europa, kan være å øke avgiften på CO₂ utslipp. Dette kan da medføre mer bruk av gasskraftverk og større fokus på fangst og lagring av CO₂. Avgiftens formål vil bidra til en kostnadseffektiv reduksjon av utslipp av klimagassen CO₂.

Med en slik økonomisk satsing Norge har på CO₂ håndtering, og med et av vest-Europas største teoretiske lagringskapasiteter, kan Norge bli blant de ledende landene i Europa med tanke på CO₂ fangst og lagring. Dermed kan Norge i fremtiden nytte økonomisk gevinst ved å importere og lagre CO₂ fra andre land forutsatt betydelig beskatning av utslipp. Det vil generelt i Europa ikke være ønskelig å lagre CO₂ reservoarer i nærheten av bebyggelse. Nordsjøen kan da være et mulig alternativ uten fare for mennesker ved eventuell lekkasje. Med fremadstormende teknologi på fangst, kan Norge med tiden kanskje også nytte CO₂ til økt utvinning av olje.

Eksperimentell forskning på lagring av CO₂ vil derfor være veldig aktuelt for at Norge skal kunne bli ledende og få en økonomisk gevinst av å håndtere CO₂. Det er i denne oppgaven blitt fokusert på forskjellige eksperimentelle oppsett for å kunne avbilde CO₂ fortregning i saltvannsformasjoner og se på potensiell lagringskapasitet i kalksteins- og sandsteins-analog til reservoarbergarter i Nordsjøen.

1 Teori

Dette kapitlet gir en introduksjon og kort oversikt over noen av basisparameterne innenfor reservoarfyssikk generelt og mer spesifikt for arbeidet utført i denne oppgaven.

1.1 Porøsitet

Sedimentære bergarter består gjerne av mineralkorn av varierende form og størrelse som er sementert sammen slik at det oppstår hulrom eller porer. Porestørrelsene varierer ofte fra 10 til 100 μm , og er ofte fylt med vann eller hydrokarboner. Porøsitet til et materiale er forholdet mellom volumet av hulrom (porevolumet) i materialet og totalvolumet (bulkvolumet). Dette gjenspeiler bergartens lagringskapasitet av en væske eller gass. Vanligvis måles porøsitet som en prosentandel av materialet, gitt som et desimaltall mellom null og én.

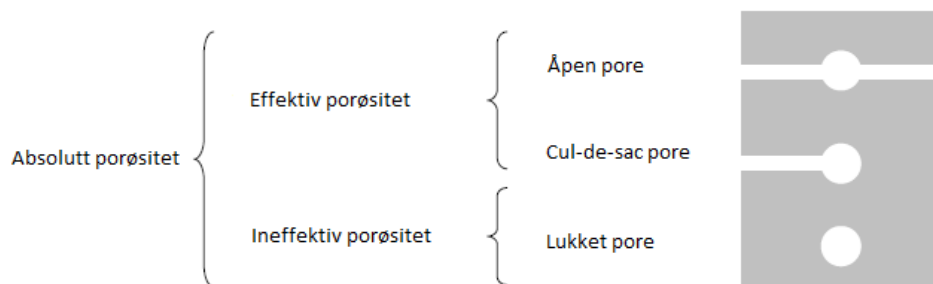
Absolutt porøsitet er definert som forholdet mellom det totale porevolumet V_{pa} av bulkvolumet V_b til kjernen. Dette uavhengig av om porene er koblet sammen eller ikke:

$$\phi_{Abs} = \frac{V_{pa}}{V_b} \quad 1)$$

Med effektiv porøsitet menes forholdet av det totale porevolumet som er sammenkoblet (består ikke av lukkede porer), V_p , i det gitte bulkvolumet til kjernen:

$$\phi_{Eff} = \frac{V_p}{V_b} \quad 2)$$

Figuren under illustrerer tre typer porer. Den absolute porøsiteten inkluderer alle poretyper, mens den effektive porøsiteten ekskluderer de lukkede porene. I dette studiet, vil det være den effektive porøsiteten som blir beregnet.



Figur 1: Inndeling av porøsitet [15]

Porøsitet avhenger av flere forskjellige faktorer som for eksempel;

- Bergartstype
- Kornstørrelse
- Kornfordeling og hvordan de er pakket i forhold til hverandre
- Sementering
- Sammensetning av leir mineraler

1.2 Metning

Metning er fraksjonen av porevolumet som er okkupert av et spesifikt fluid. En kjerne eller et reservoar vil gjerne bestå av mer enn ett fluid, som vanligvis vil være vann, olje eller gass. I dette studiet vil porene være mettet med CO₂ og/eller vann. Dette gir følgende to ligninger for metningene til henholdsvis vann og CO₂:

$$S_w = \frac{V_w}{V_p} \quad 3)$$

$$S_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_p} \quad 4)$$

Hvor V_{CO_2} og V_w er volumet av CO₂ og vann i materialet, og V_p er porevolumet. Metningen vil variere mellom 0 og 1, avhengig av en rekke ulike parametere. De såkalte endepunktsmetning for de ulike fasene i et reservoar er av spesiell interesse, både i forbindelse med kjerneanalyse og potensiell lagringskapasitet av CO₂ i saline formasjoner.

Den residuelle metningen vil si den metningen av et fluid som er immobil etter at det har blitt injisert et fortregende fluid inn i et reservoar/kjernemateriale. Med tanke på CO₂ lagring vil det å kunne finne den residuelle metningen, S_{CO_2} , være av stor interesse.

1.3 Absolutt permeabilitet

Permeabilitet er evnen et porøst materiale har til å la et fluid strømme gjennom et nettverk av sammenkoblede porer. Porøse medier med gode transportegenskaper sies å være (*høy*)permeable, mens et materiale som ikke transporterer fluid kalles *impermeabelt*. Permeabiliteten kan variere etter hvilken retning væsken eller gassen strømmer i en og samme porøs bergart. Den *absolutte permeabilitet* er konstant for et gitt porøst medium dersom uendret, uavhengig av hvilket fluid som strømmer gjennom. Absolutt permeabilitet kan finnes ved hjelp av Darcy's lov:

$$Q = A \frac{K dp}{\mu dx} \quad 5)$$

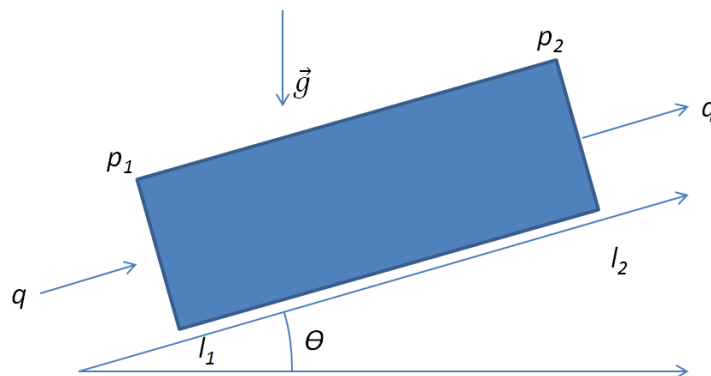
Der Q er strømningsraten til fluidet [cm^3/s], dp er trykkforskjell mellom innløp og utløp [atm], A er tverrsnitts areal [cm^2], dx lengden av materialet (parallelt med strømningsretningen) [cm], μ fluidets viskositet [cP] og K er absolutt permeabiliteten til materialet [D]. Vi finner altså permeabiliteten ved følgende formel:

$$K = Q \frac{\mu dx}{A dp} \quad 6)$$

For at denne loven skal være gjeldende må følgende kriterier tilrettelegges for materialet:

- 100% mettet av ett fluid
- Horisontal strømningsretning
- Ingen kjemisk eller fysisk reaksjon mellom fluid og materiale
- Inkompressibel fluid
- Laminær strømningsretning

Dersom materialet har en vinkel θ , altså at strømningsretningen ikke er horisontal, må gravitasjonen bli tatt med i betraktningen for å bestemme permeabiliteten. Dette er tilfelle for blokkeksperimentene ved strømningsriggen ved UiB, som forklart i kapittel 5.5.2. Avhengig av om fluidet strømmer oppover eller nedover i forhold til horisontalplanet, så vil vekten av fluidet gi enten en redusert eller økt strømnings effekt på grunn av gravitasjonen.



Figur 2: Strømning med vinkel θ i forhold til horisontalplanet gjennom en kjerne.

Strømningen til fluidet ved en gitt vinkel θ til horisontalplanet ved modifisering av Darcy's lov:

$$K = - \left(Q \frac{\mu dl}{A dp} + \rho g \sin \theta \right) \quad 7)$$

Hvor l er lengden av materialet i strømningsretningen, ρ er tettheten til fluidet og g er gravitasjonsakselerasjonen.

1.4 Effektiv og relativ permeabilitet

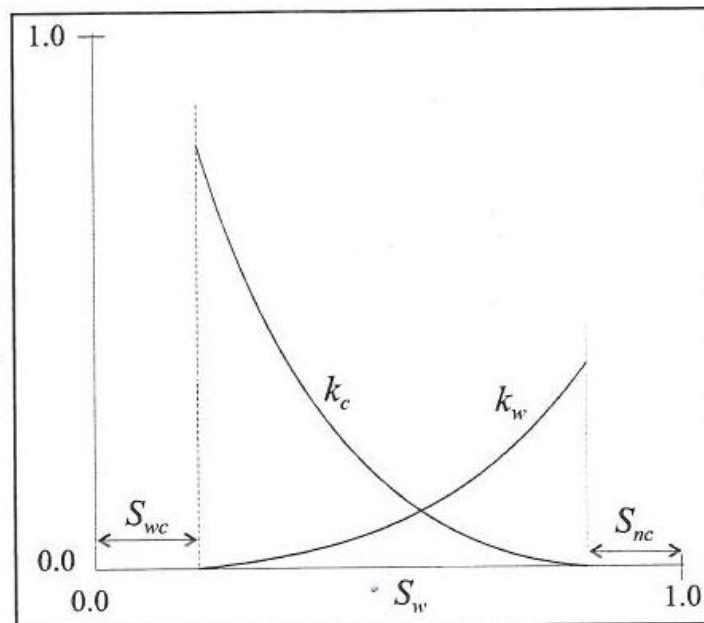
Dersom det er mer enn ett fluid som strømmer gjennom porene, vil permeabiliteten avhenge i stor grad av fluidenes relative metning. Det ene fluidet vil gjerne hindre det andre fluidets frie strømning, som vil medføre at den effektive permeabiliteten til et av fluidene vil bli lavere enn dets absolutte permeabilitet. Betegnelsen for permeabiliteten til hvert av fluidene blir her definert som den *effektive permeabilitet* [16]:

$$Q_i = K_{e,i} \frac{A dp_i}{\mu_i dx} \quad 8)$$

Hvor i fremstår som fluid fasen i , og $K_{e,i}$ er den effektive permeabiliteten. Forholdet mellom materialets effektive og absolutte permeabilitet blir kalt den relative permeabiliteten til fluidet, som er gitt ved;

$$K_{r,i} = \frac{K_{e,i}}{k} \quad 9)$$

Den relative permeabiliteten avhenger av faktorer som fluid egenskaper, metning, trykk og temperatur. I reservoarsammenheng er det ofte metningen som utgjør den største effekten for relativ permeabilitet. Ved tofasestrømning gjennom et materiale, kan følgende relativ permeabilitetskurve bli presentert som et eksempel.

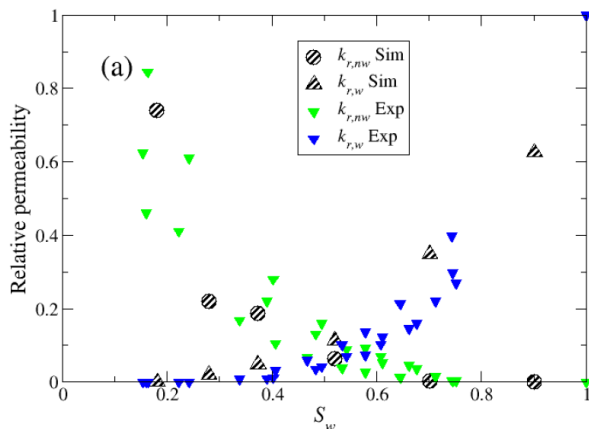


Figur 3: Prinsippskisse for relativ permeabilitet for to-fase strømning. S_w er den vætende fasen og S_n er den ikke-vætede fasen [16].

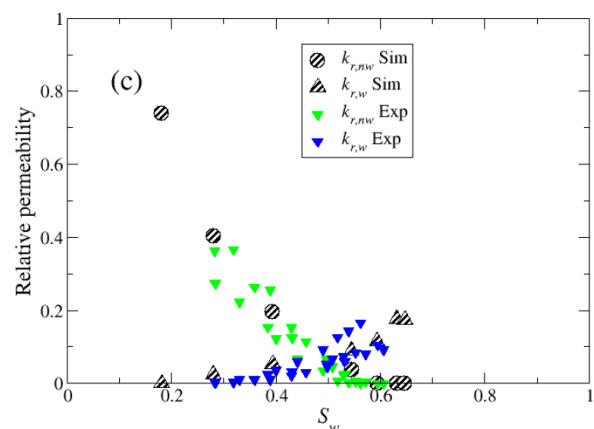
Som vist i plottet gitt i Figur 3, kan det ene fluidet nå en metning lavere enn en gitt verdi ($S_w < S_{wc}$). Da er den relative permeabiliteten for dette fluidet null og den vil være immobil. Verdierne S_{ic} , hvor $i = w, n$, er definert som residuell metning til det gitte fluidet [16]. Metning er beskrevet i kapittel 1.2. Kjerneprøvene som blir benyttet i dette studiet, er dagbruddsbergarter som er vannfuktet. Det vil si

at i dette studiet vil saltvann være den vætende fasen og CO₂ vil være den ikke-vættende fasen. Se kapittel 5.1 for nærmere innføring av kjernemateriale.

Følgende figurer viser sammenligning av relativ permeabilitetskurver, mellom simulerte og eksperimentelle data, for ikke-vættende (CO₂) fase og vættende fase (vann) for Bentheim sandstein utført ved Numerical Rocks i Trondheim. Simuleringene ble utført med et kapillær nummer $N_c = 2,0e10^{-6}$ (se kapittel 1.8.1) [1].



Figur 4: Drenering av Bentheim sandstein (a) [1].



Figur 5: Imbibisjon av Bentheim sandstein (c) [1].

1.4.1 Mobilitetsforhold

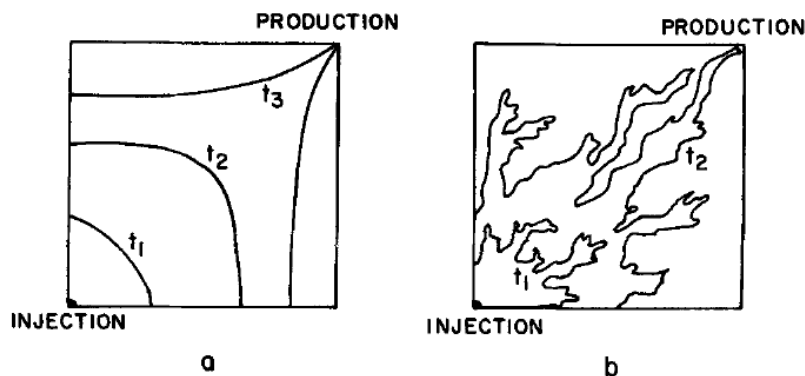
Mobilitetsforholdet (λ_i) er definert som forholdet mellom effektiv permeabilitet ($K_{e,i}$) og viskositet (μ_i) for et strømmende fluid, og er et mål på hvor lett fluidet strømmer gjennom et porøst medium:

$$\lambda_i = \frac{K_{e,i}}{\mu_i} \quad 10)$$

Mobilitetsforholdet, M , er forholdet mellom mobiliteten til henholdsvis det fortregende og fortregte fluidet:

$$M = \frac{\lambda_{(fortregende)}}{\lambda_{(fortregt)}} = \frac{k_{(fortregende)} \cdot \mu_{(fortregt)}}{k_{(fortregt)} \cdot \mu_{(fortregende)}} \quad 11)$$

For at en stabil fortregning skal finne sted må endepunkt mobilitetsforhold mellom fortregende og fortregt fluid fortrinnsvis være lik eller mindre enn én ($M^0 \leq 1$). Dette medfører at det fortregte fluidet strømmer foran en nærmest stempelformet front av det fortregende fluidet. Dersom det fortregende fluidet (CO₂) har høyere mobilitet enn det fortregte fluidet (vann), oppstår et ufordelaktig mobilitetsforhold ($M^0 > 1$), hvor det fortregende fluidet vil få gjennombrudd tidligere.



Figur 6: Sammenligning av stabil og ustabil fortregning: (a) foretrukket mobilitetsforhold (stabil fortregning); (b) ikke foretrukket mobilitetsforhold (ustabil fortregning) [17].

Den ugunstige mobilitets ratioen for karbondioksid, CO_2 , reduserer den makroskopiske fortregningseffekten av et reservoar. Surfaktant (skum) er en potensiell metode for å forbedre fortregningseffekten basert på mobilitetskontroll [18].

1.5 Blandbarhet

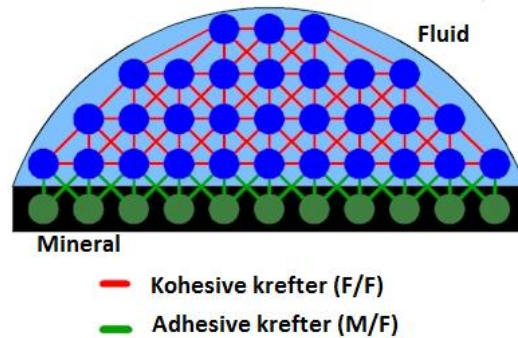
Molekylene innad i et fluid vil være tiltrukket av hverandre ved elektrostatiske (kohesive) krefter (se Figur 7). Dersom de intermolekylære kreftene i fluidet er sterkere enn de intramolekylære kreftene, vil fluidene være ikke-blandbare (som for eksempel mellom vann og gass) [16]. I motsetning vil fluidene være blandbare dersom de gradvis mikses sammen.

Grenseflaten mellom to ikke-blandbare fluider kan ansees som en overflate i likevekt, med liten eller ingen utveksling av molekyler og relativt sterke kohesive krefter mellom like molekyler [16]. De kohesive kreftene er sterkest på fluiden med høyest tetthet, som medfører en betydelig trykkforskjell mellom fluidene. Grenseflatespenningen, σ , representerer arbeidet, eller energien, som behøves for å holde fluidene separert i en tilstand av likevekt.

- $\sigma > 0$: vil si at tiltrekningskreftene til molekylene i hvert av fluidene er størst for like molekyler, som vil si at fluidene er ikke-blandbare.
- $\sigma \approx 0$: vil si at tiltrekningskreftene til molekylene er like stor for like molekyler som for ulike molekyler, som vil si at fluidene er delvis blandbare.
- $\sigma < 0$: vil si at molekylene for det ene fluidet er sterkere tiltrukket til molekylene av det andre fluidet, som vil si at fluidene er blandbare.

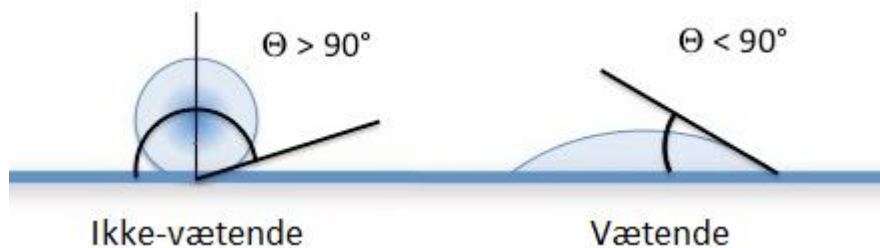
1.6 Fukt

Fukt beskriver den grad et gitt fluid har elektrostatiske krefter, kalt adhesjon, til et gitt materiale det er i kontakt med [16]. Dersom det er mer enn ett fluid tilstede i materialet, hvor fluidene er ikke-blandbare, vil den med mest adhesive krefter være den vætende fluidene og i større grad ligge langs overflaten til materialet.



Figur 7: Kjemiske krefter mellom mineral og fluid [19].

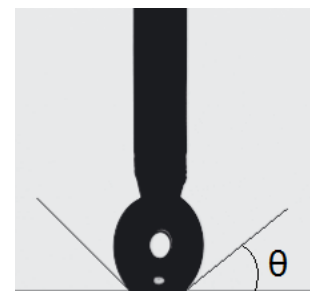
Som vi ser av figuren under (Figur 8: Vættende og ikke-vættende fluid i kontakt med en poreoverflate.), så vil en fluid som er den vættende fasen bre seg utover poreoverflaten, og i ekstremtilfeller ta opp all kontaktflaten med poreveggene. I motsetning vil en dråpe av et ikke-vættende fluid, som er i kontakt med poreoverflaten og omsluttet av vættende fluid, minimere kontaktarealet med poreoverflaten.



Figur 8: Vættende og ikke-vættende fluid i kontakt med en poreoverflate.

Det er to hovedtyper fluidfortrengning i et porøst medium; drenering og imbibisjon. Ved imbibisjon vil den vættende fasen (vann) fortrenge den ikke-vættende fasen (CO_2), mens ved drenering vil den ikke-vættende fasen fortrenge den vættende fasen.

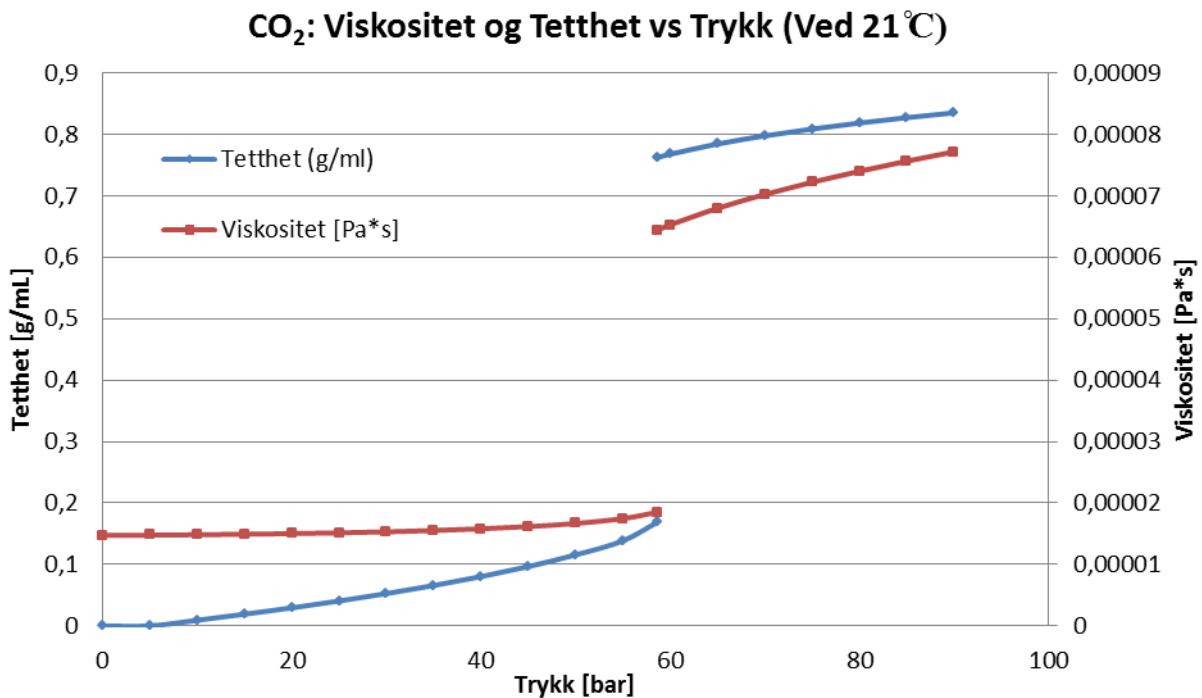
Bentheim sandstein, som er benyttet i denne oppgaven, består i hovedsak av kvarts, se kapitlet om Bentheim Sandstein. Figur 9 viser kontaktvinkel mellom CO_2 og kvarts i en saltvannsløsning:



Figur 9: CO_2 fanget dråpe på kvarts (vannvåt) i en 0,01M NaCl saltløsning ved 50 bar. Kontaktvinkel $\theta = 42$. Trippel linje diameter = 0,9 mm [4].

1.7 Viskositet og tetthet

Viskositet (μ) er den grad et fluid motsetter seg at forskjellige lag i fluidet beveger seg med forskjellige hastigheter. Væske med lav viskositet vil være tyntflytende og strømme lettere enn en væske med høy viskositet, som vil ha en mer tyktflytende konsistens. For CO₂ kan viskositeten få en nevneverdig endring ved å endre temperatur og/eller trykk (dette gjelder også for tettheten til CO₂).



Figur 10: Funksjon av viskositet og tetthet for CO₂ mot trykk ved romtemperatur (21°C) [20].

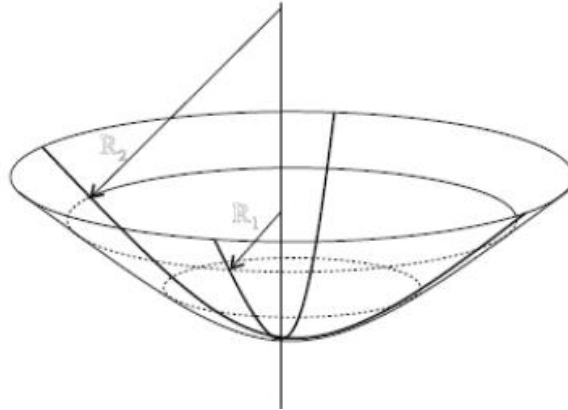
For vann vil både viskositet og tetthet være mer eller mindre stabil ved denne temperaturen og dette trykkintervallet. Henholdsvis; viskositet $\approx 9,76 \cdot 10^{-4}$ Pa*s og tetthet $\approx 1,0$ g/ml [20].

1.8 Kapillærtrykk

Kapillærtrykk (P_c) kan defineres som den molekylære trykk forskjellen på tvers av grenseflaten mellom det vætende og ikke-vættende fluidet, og er et resultat av eksterne og interne elektrostatiske krefter som virker på fluidene [16].

$$P_c = p_{iv} - p_v \quad 12)$$

Der p_{iv} og p_v representere trykket til henholdsvis ikke-vættende og vættende fluid. Når to ikke-blandbare fluider er i kontakt med hverandre i et smalt kapillærrør av glass, eller en porekanal, vil det fluidet med sterkeste adhesive krefter (vættende fluidet, vannet) føre til at grenseflaten mellom fluidene bøyes og danner en konveks asymmetrisk menisk mot denne fasen. Det blir da dannet en kontaktvinkel, θ , mellom menisken og glass- eller poreveggen. Laplace ligning uttrykker trykkforskjellen ved hjelp av krumningen til grenseflaten mellom to ikke-blandbare fluider og radius langs hovedaksene (se Figur 11):



Figur 11: Skisse av menisken mellom to ikke blandbare fluider i et kapillærrør, med hovedaksenes radius R_1 og R_2 [16].

$$P_c = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad 13)$$

Den geometriske relasjonen mellom R og radien i kapillærrøret, r_c , er:

$$R = \frac{r_c}{\cos\theta_c} \quad 14)$$

Dersom $R_1 = R_2$ kan ligning 13 skrives som følgende:

$$P_c = \frac{2\sigma}{R} \quad 15)$$

En kombinasjon av ligning 14 og 15 inkluderer kontaktvinkelen og uttrykker kapillærtrykket som følgende:

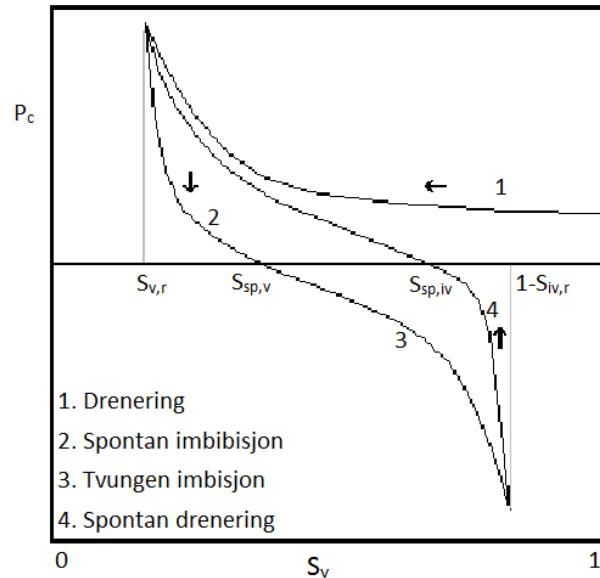
$$P_c = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r} \quad 16)$$

Der σ er grenseflatespenningen, θ er kontaktvinkelen og r er radiusen av kapillærrøret. Eksperimentelle data, gjennomgått av [21], viser at verdier for vann/ CO_2 grenseflatespenning ligger i område $20\text{-}35 \text{ mN m}^{-1}$ for trykk på $60\text{-}200 \text{ bar}$ og temperaturer under 71°C (korresponderer til et lagringsdyp på $600\text{-}2000 \text{ m}$) [4].

Kapillærtrykkkurver plottes som regel som en funksjon av den vætende fasen, og kan brukes til å definere to ulike prosesser, imbibisjon og drenering. For kjerner med ulik metning og metningshistorie vil kapillærtrykket variere for drenering og imbibisjon. Det er eksperimentelt bevist at det nødvendige arbeidet for å generere en fortrengeing er proporsjonalt med arealet under kapillærtrykkkurven [22]. Arealet er derfor størst under dreneringskurven. Mindre arbeid trengs for å fortrenge den ikke-vættende fase, mens mer arbeid trengs for at den ikke-vættende fasen skal fortrenge den vætende fasen.

Kurvenes skjæringspunkt med S_v , henholdsvis $S_{sp,v}$ og $S_{sp,iv}$, vil også være en indikasjon på fukten til materiale. Desto høyere verdier for kryssning av S_v , desto mer fuktet er materiale av den vætende fasen.

Kapillærtrykket avhenger av porestørrelsesfordeling og fukt.



Figur 12: Kapillærtrykkskurve som illustrerer første drenering, første imbibisjon og andre drenering. S_v er metning vætende fase og S_{iv} er metning ikke-vætende fase.

1. *Første drenering* starter ved $S_v = 1$, hvor trykket må økes før den ikke-vætende fasen begynner å flømme inn i kjernen. Ettersom metningen til den vætende fasen reduseres, så øker det kapillære trykket. Det vil si injeksjonstrykket må økes for å kunne produsere ut mer av den vætende fasen.
2. *Første imbibisjons* prosess starter fra endepunktet fra der første drenering avsluttes. Dette skjer ved at injeksjonstrykket på det ikke-vætende fluidet reduseres og det vætende fluidet vil spontant imbibere inn i kjernen og øke metningen S_v . Når $P_c = 0$, vætende trykk er det samme som ikke-vætende trykk, er spontant vætende fluid metning nådd ($S_{sp,v}$). For ytterligere øke S_v (tvungen imbibisjon), må injeksjonstrykket økes for det vætende fluidet, slik at P_c blir negativ, og man til slutt når $S_{iv,r}$ (residuell metning av ikke-vætende fluid). Det finnes nå kapillært fanget ikke-vætende fluid i porene, som forklarer at imbibisjonskurven ikke følger dreneringskurven. Dette kalles historieavhengighet eller hysteresis.
3. Når injeksjonstrykket avtar vil det kapillære trykket øke og det oppstår en spontan drenering.

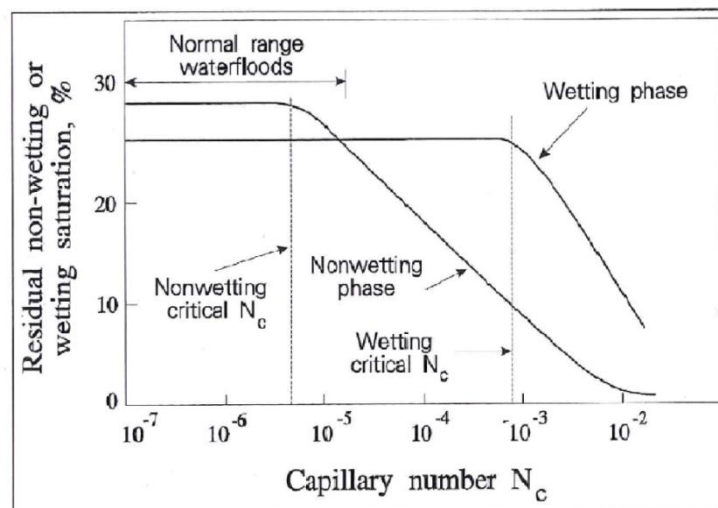
1.8.1 Kapillærtall

For en gitt fortreningsprosess vil den relative permeabiliteten avhenge av porestruktur, væting og metning. Dette endres dersom viskositetens effekt blir dominerende. Økt viskøst trykkfall kan lede til en viskøs binding og mobilisering av fanget fluid. Forholdet mellom kapillære og viskøse krefter er reflektert ved et dimensjonsløst kapillærtall som normalt blir definert ved [23]:

$$N_c = \frac{\mu(Q_{tot}/A)}{\sigma} \quad 17)$$

Hvor Q_{tot} er den totale strømningsraten av begge fasene, μ er den effektive viskositeten, A er arealet og σ er overflatespenningen. For lave kapillærtall ($N_c < 10^{-6}$) er det den kapillære kraften som er dominerende. Dersom den viskøse effekten begynner å gjøre en innvirkning på fluidtransporten, vil den relative permeabiliteten endres og etter hvert gå mot en lineær strømning med en metning som er nær den blandbare regionen mellom fluidene [24].

CDC-kurve (Capillary Desaturation Curve) gir forholdet mellom kapillærtall og residuell metning for ikke-vættende og vættende fase.



Figur 13: Funksjon av kapillærtallet for vættende og ikke-vættende fase. (Ikke vættende fluid i dette plottet er olje og er hentet fra [25])

For $N_c \leq N_{c,critical}$ vil den residuelle metningen ikke endres ved økning av kapillærtallet. Dersom $N_c > N_{c,critical}$, vil den residuelle metningen minke gradvis ettersom kapillærtallet stiger. Som man kan se av figuren over, så vil det trenges adskillig økning i kapillærtallet for å mobilisere residuell fluid av den vættende fasen.

1.9 Resistivitet

Resistivitet (Ω) er en vanlig loggemetode for å få en empirisk relasjon til vannmetning i et porøst materiale. Bulk resistiviteten er funnet ved:

$$R_t = Z \frac{A}{L} \cos(\phi) \quad 18)$$

Hvor R_t er bulk resistiviteten (Ωm), Z er den målte impedansen (Ω), A er tverrsnittsarealet av kjernen (m^2), L er distansen mellom elektrodene (m) og ϕ er fasevinkelen. Det er blitt kjørt eksperiment (K. A. Birkedal et. Al) på progresjon av impedans og fasevinkel mot tid, som gjenspeiler en lav fasevinkel ($< 0,5$) [26]. Fasevinkelen som ble benyttet for beregninger av resistivitet i denne oppgaven er derfor satt til null.

Vannmetningen i kjernen beregnes ut i fra den målte motstanden (Ω), der CO_2 vil fungere som en elektrisk isolator. Dette ved hjelp av en nyttig empirisk relasjon fra Archie, der resistivitets indeksen er gitt som [26]:

$$RI = \frac{R_t}{R_0} = S_w^{-n} \quad 19)$$

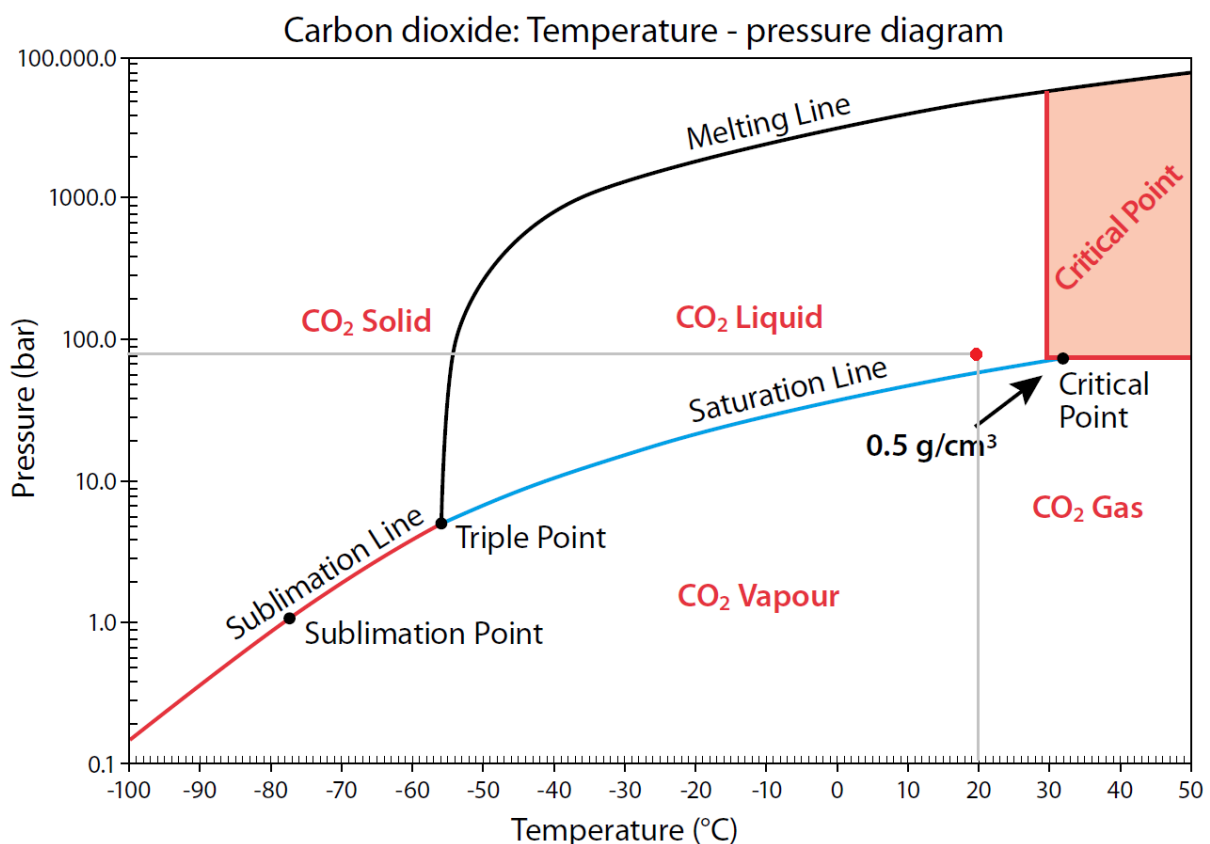
Hvor R_t er den målte bulk resistiviteten, R_0 er den målte bulkresistiviteten ved 100 % vannmetning, S_w er metning vann i kjernen og n er metnings eksponenten. Metningseksponenten, n , er lik 2 for rene, konsoliderte vann-våte sandsteiner [27]. Etersom kjernene benyttet i denne oppgaven er vannvåte dagbruddsbergarter, ble det da $n = 2$ benyttet under utregningene.

2 CO₂

2.1 Egenskaper til karbondioksid

Ved alminnelig temperatur og trykk (typisk atmosfærisk trykk og 20-25°C) er CO₂ en fargeløs gass med svak syrlig lukt og smak [28]. Karbondioksid er en naturlig del av atmosfæren, og er del av jordens karbon-syklus (den naturlige syklusen blant jordens atmosfære, havet, jord, planter og dyr). Denne naturlige syklusen er karbondioksid emisjon som oppstår av forskjellige årsaker, hvor den økende trenden av CO₂ skyldes menneskelige aktiviteter, og blir naturlig fjernet ved hjelp av sjø og planter [29]. CO₂ eksisterer i hovedsak i gassfase, men kan også oppstå i fast fase og væske fase.

I dette studiet blir det studert strømning av CO₂, og det vil derfor være viktig å forstå egenskapene til karbondioksid. Figur 14 viser fasekonvolutt for CO₂:

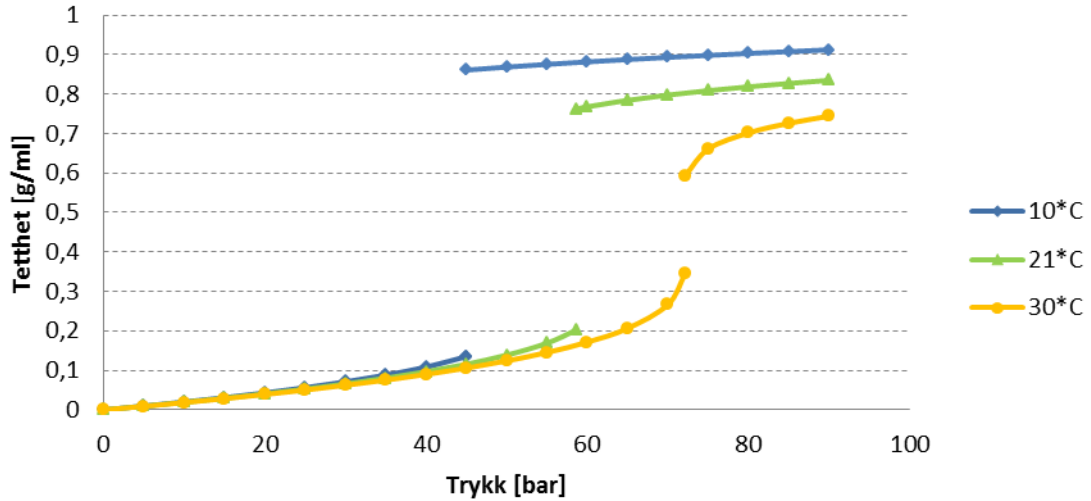


Figur 14: Fasekonvolutt for CO₂ [30].

Den kritiske temperaturen for CO₂ er 31,08 °C. Under denne temperaturen vil karbondioksid opptre som enten ren gass-, fast- eller væske-fase. Over denne temperaturen kan CO₂ opptre som et superkritisk fluid, det vil si at den vil fylle porene slik som i gassfasen, men ha en tetthet lik som i væskefasen. Det røde punktet markerer trykk og temperatur som CO₂ blir operert ved i dette studiet (henholdsvis 83 bar og romtemperatur på 21°C).

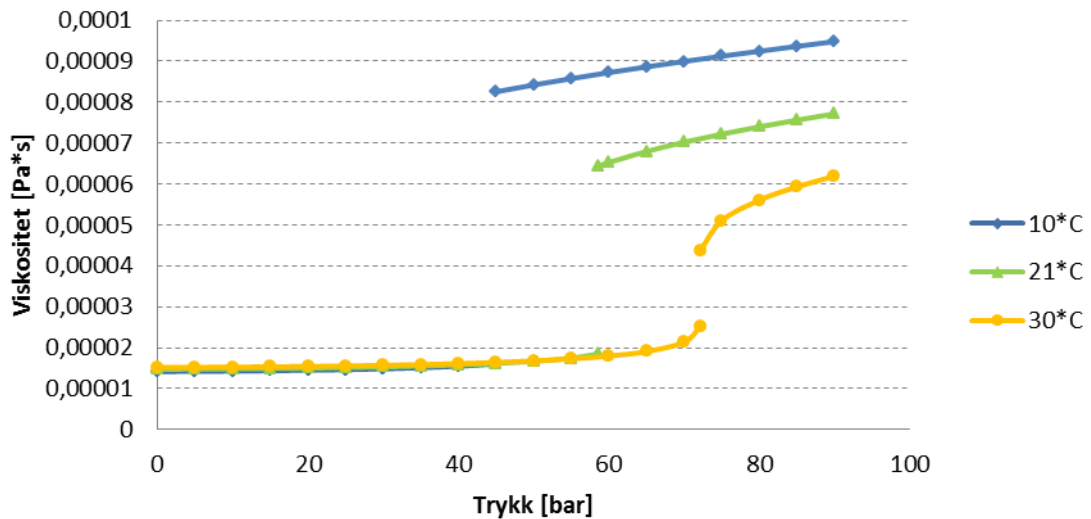
Plottet vist i Figur 10, viser hvordan viskositet og tetthet til CO₂ endrer seg med trykk ved 21 °C. Følgende figurer viser hvordan tetthet og viskositet for karbondioksid endrer seg ved samme trykkintervall, dersom temperaturen øker eller minker.

CO₂: Tetthet vs trykk ved forskjellig temperatur



Figur 15: Tetthet som funksjon av trykk ved forskjellig temperatur [20].

CO₂: Viskositet vs trykk ved forskjellig temperatur

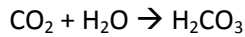


Figur 16: Viskositet som funksjon av trykk ved forskjellig temperatur [20].

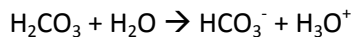
Av Figur 15 og Figur 16 ser man at dersom trykket øker over «liquid+gas» (væske+gas) kurven (se Figur 14), øker både tetthet og viskositet betraktelig ved et bestemt trykk. Det vil si at ved dette trykket, vil CO₂ gå fra gass fase til væske fase.

2.1.1 CO₂-H₂O blanding

Under reservoartilstander blir vann og CO₂ betraktet som to ikke-blandbare fluidere, som generelt betyr at CO₂ vill strømme på toppen av vannet på grunn av forskjellen i tetthet. Likevel, ved kontakt mellom de to fluidene, vil det skje en oppløsning av karbon dioksid inn i vannet, og også for vannet inn i CO₂ [31]. Når karbondioksid gradvis oppløser seg i vann, danner den en svak syre kalt karbonsyre, H₂CO₃, etter følgende reaksjonslikning:

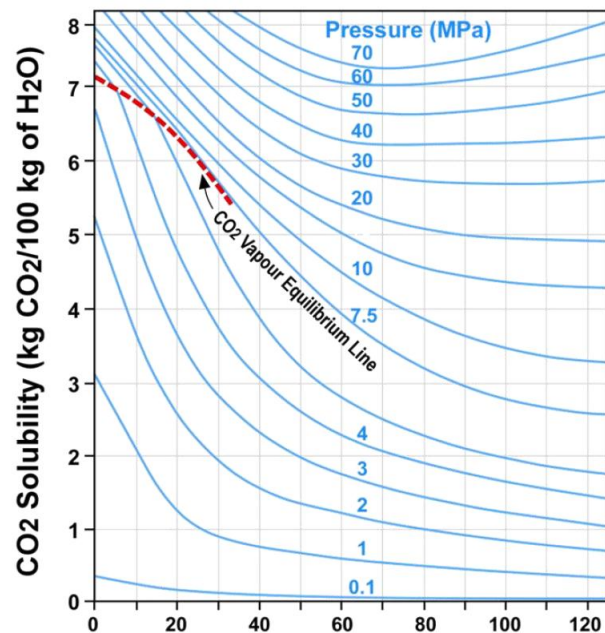


Etter det, vil karbonsyren reagere gradvis og reversibelt i vann og danner H₃O⁺ og HCO₃⁻.



Denne kjemien forklarer blant annet hvorfor vann, som vanligvis har pH 7, får omtrentlig pH 5,5 hvis det har vært i kontakt med luft [32]. Dette er også viktig å ta med i betraktning for kjøring av eksperimenter med vann og CO₂, med tanke på ødeleggelse av utstyr og lekkasje. Utstyr som er særskilt utsatt vil hovedsakelig være omslutningshylsen som blir presset rundt kjernematerialet med omslutningsoljen. Denne er laget av gummi og vil over tid brytes ned og danne lekkasje, dersom den blir utsatt for karbonsyre. CO₂ løselighet i vann er regnet rundt 15-60 sm³/sm³ i et trykkintervall på 100-1000 bar [33].

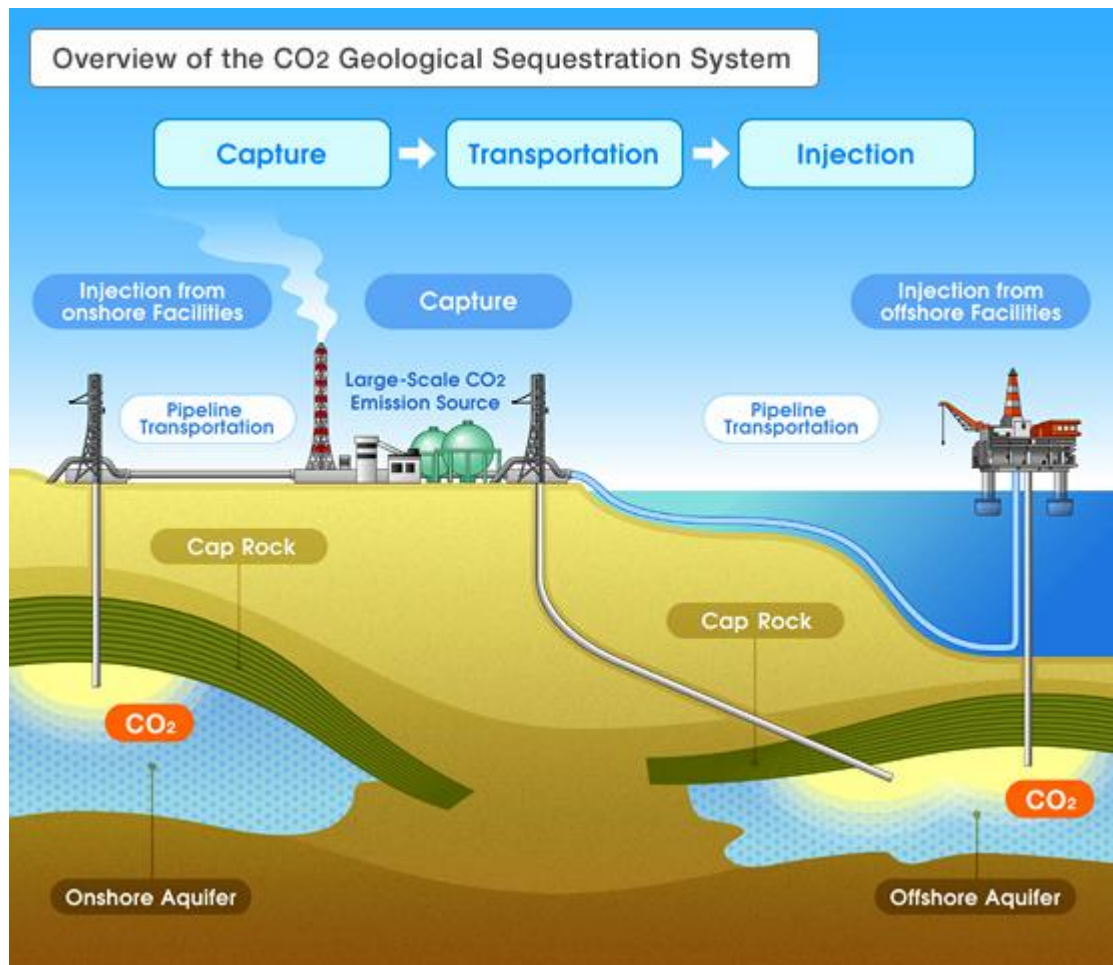
Tre ting som spiller inn med tanke på mengde CO₂ som løser seg i vann er; saltholdighet i løsningen, trykk og temperatur [34]. Løselighet av CO₂ i reint vann kan derfor vises som funksjon av trykk og temperatur. Økende CO₂ trykk øker løseligheten av CO₂ i vannet, og økende temperatur minsker løseligheten av CO₂ (se Figur 17). Med mindre trykket og temperaturen er over 300 bar og 65°C, hvor løseligheten begynner å øke igjen [3].



Figur 17: Løselighet av CO₂ (y-akse) i reint vann som funksjon av Temperatur [*C] (x-akse) og trykk av CO₂ (MPa) [3].

2.2 Lagring av karbondioksid

Fanging og lagring av karbondioksid i dype geologiske formasjoner er en av de mest lovende og fremvoksende teknologier for stor-skala reduksjon av CO₂ utslipp. I Norge har det hovedsakelig konsentrert seg om fangst og lagring av CO₂ fra gasskraftverk, og norske aktører er langt fremme på dette område. Norge har i tillegg lang erfaring med lagring av CO₂ i geologiske strukturer. Siden 1996 er en million tonn CO₂ per år skilt utfra gassproduksjonen på Sleipner Vest i Nordsjøen og lagret i Utsira formasjonen 1000 meter under havbunnen [10].



Figur 18: Geologisk lagring av CO₂ [35].

2.2.1 Fangst av CO₂

Teknologien fra fangst av CO₂ fra gasskraftverk kan deles i tre hovedkategorier: post-forbrenning, pre-forbrenning og «oxy-fuel». Post-forbrenning innebærer å skille ut CO₂ fra eksosgassen fra kraftverket ved hjelp av kjemisk rensing. Siden CO₂ blir skilt ut fra eksosgassen, kan denne teknologien i prinsippet benyttes på eksisterende kraftverk uten store modifikasjoner av selve kraftverket og blir derfor sett på som den mest modne teknologien. Pre-forbrenning teknologien blir CO₂ fanget før forbrenningen. Det skjer ved at naturgassen blir konvertert til en hydrogenrik gassblanding. Gassblandingen blir behandlet slik at CO₂ blir fanget, og det nye brenselet er

«dekarbonisert», som gjør at eksosutslippet inneholder svært lite CO₂. Pre-forbrenning innebærer en ombygging av gassturbinen og blir vurdert som mer kompleks enn post-forbrenning. «Oxy-fuel» skjer forbrenningen i gassturbinen med reint oksygen i stede for luft. Det gjør at eksosen inneholder kun vanndamp og CO₂, og karbondioksid kan dermed skilles ut ved å kjøle ned eksosen. «Oxy-fuel» blir ikke sett på som noen moden teknologi, fordi det må utvikles nye typer gassturbiner som egner seg bedre til oksygenforbrenning og i tillegg er det svært energikrevende å produsere oksygen [10].

2.2.2 Transport av CO₂

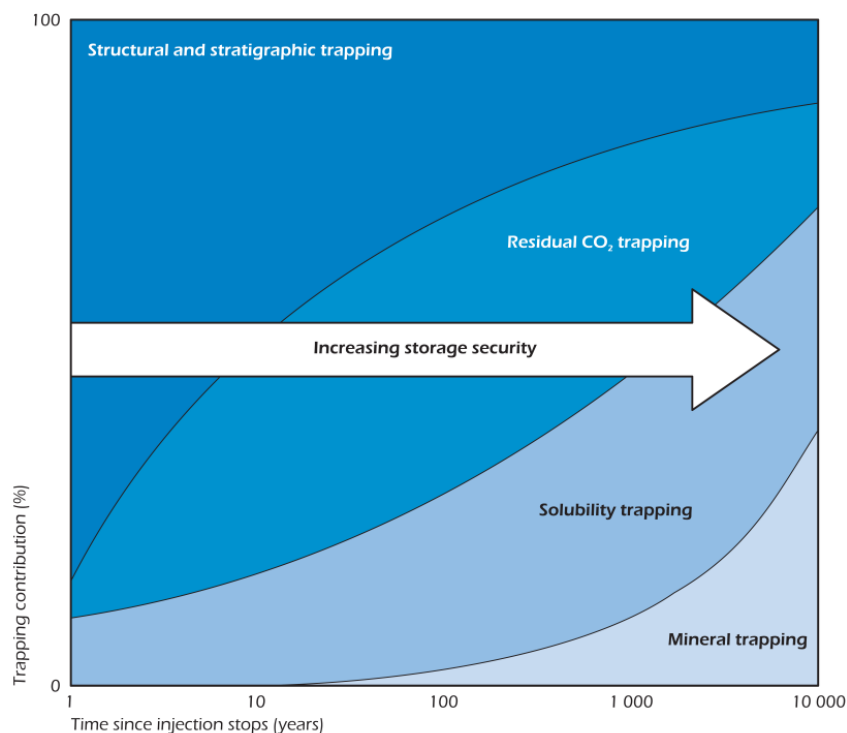
Transport av CO₂ fra CO₂-kilden til den geologiske strukturen der CO₂ skal lagres, skjer i rør eller ved skip. Ettersom CO₂ oppfører seg svært ulikt under ulike trykk og temperaturer, må transporten foregå under kontrollerte former for å unngå at CO₂ går over i fast form og blokkerer rør eller annet utstyr. Med dagens teknologi blir rørtransport vurdert som det enkleste og mest kostnadseffektive alternativet. Transporten blir sett på som det minst kompliserte ved en lagringsprosess, med tanke på både teknologi og til å vurdere realistiske kostnader.

2.2.3 Prinsipper for lagring av CO₂

Fire viktigste lagringsmekanismer for å kunne lagre CO₂ i reservoarbergarter, er som følgende [36]:

- Strukturell eller stratigrafisk fanging, hvor migrering av (fluid) CO₂ som følger av sin oppdrift og/eller trykkgradient i reservoaret forhindres av lav permeabilitet (takbergart).
- Fanging ved residuell metning (S_{r,CO_2}), hvor kapillærkreftene og adsorpsjon på overflaten av mineralkornene innenfor en bergarts matrise immobiliserer en andel av injisert CO₂ langs sin migrasjonsvei.
- Fangst ved oppløsning, der injisert CO₂ oppløses og blir fanget i reservoarets saltholdige formasjonsvann.
- Geokjemisk fangst, hvor oppløst CO₂ reagerer med det opprinnelige porefluidet og mineralene som utgjør reservoarets bergartsmatrise. CO₂ blir innlemmet reaksjonsproduktene mellom dem, som faste karbonatmineraler og vandige komplekser oppløst i vann (noen ganger kalt «ionisk overlapping», på grunn av de ofte dominerende bikarbonationene).

Karbondioksid blir mindre mobil over tid som et resultat av flere fangstmekanismer. Som man kan se av Figur 19, så vil den strukturelle eller stratigrafiske fangst mekanismen ha størst betydning for å få lagret CO₂ sikkert ved tidlig fase. Over tid vil de residuelle og kjemisk fangstmekanismene få større innvirkning for å ha en stabil fangst av CO₂. Dette vil redusere prospektet for lekkasje, som igjen bygger på økt sikkerhet for geologisk lagring av CO₂.



Figur 19: Lagringskapasitet avhenger av en kombinasjon av fysisk og geokjemisk fangst [33].

2.2.4 Risiko ved CO₂ lagring

Lagring av CO₂ kan føre med seg konsekvenser for miljøet dersom det oppstår en lekkasje fra CO₂-reservoaret. De største konsekvensene, relatert til lekkasje, er nevnt som følger [36]:

- Mulig forurensning av grunnvann. En migrering av CO₂ vil medføre en reduksjon av pH-verdien til grunnvannsakvifer, som kan medføre oppløsning og endring av mineralene fra bergarter og jord som kan gi slipp på elementer som tungmetaller, som kan potensielt forurense ferskvannstilgangen.
- Dersom forhold på overflaten gjør det mulig å samle CO₂ lokalt fra en lekkasje, hvor for eksempel høy konsentrasjon kan oppnås i fordypninger og trange områder, kan dette medføre fare for mennesker og andre levende organismer.
- Lekkasje av CO₂ kan påvirke det biologiske mangfoldet i økosystemer.

Lekkasje kan rangeres mellom kortsiktige potensielt store lekkasjer og langsiktige mer diffuse lekkasjer. Kortsiktig lokalisert lekkasjer vil trolig være lettere å oppdage og gjøre noe med, siden de vil skje over et begrenset område, men kan ha store konsekvenser på grunn av potensielt høye konsentrasjonsnivåer. Langsiktige diffuse lekkasjer vil være vanskeligere å oppdage og avhjelpe, siden de kan skje over store områder og kan derfor anses som en mer alvorlig bekymring [36].

3 Avbildningsteknikker

For å kunne kontinuerlig se på en endring av fluidmetning og strømning over tid ved en flerfasestrømning i en kjerne-/blokkprøve, kan forskjellige avbildningsteknikker benyttes. I dette studiet ble det brukt NTI, PET og CT for å avbilde slike prosesser.

3.1.1 PET/CT – Positron Emission Tomography/Computed Tomography

PET/CT skanneren som ble benyttet for kontinuerlig avbildning I dette studiet var “Siemens Biograph™ TruePoint™ PET•CT”. Skanneren er plassert i *Senter for Nukleærmedisin/PET* ved Haukelands Universitetssykehus. PET/CT skanneren var en gave fra Trond Mohn, som i hovedsak blir benyttet for å gi informasjon om tilstanden til kroppen til kreftpasienter [37], men også ment å bli brukt til ytterlig ønsket forskningsarbeid.

Kombinasjonen PET/CT, *Positron Emisjons Tomografi (PET)* og *Beregnet Tomografi (CT)*, vil si at det er mulig å gjennomføre både PET undersøkelser og CT undersøkelser i en og samme maskin. PET bildene vil ikke alene kunne gi anatomien til en pasient (for dette studiet; form av kjerne og tetthetsforskjeller), og derfor fusjoneres bildene med en CT undersøkelse. Dermed kan man få avbildning av kjernen sammen med metabolisme av det radioaktive signalet i en og samme undersøkelse. Når kjernen er plassert på benken (normalt ment til personer) som føres inn i skanneren og det initiale skanet er kjørt (CT-skan), så vet maskinen hvor den skal plassere kjernen i PET skanneren for å få nøyaktig samme avbildningsintervall.

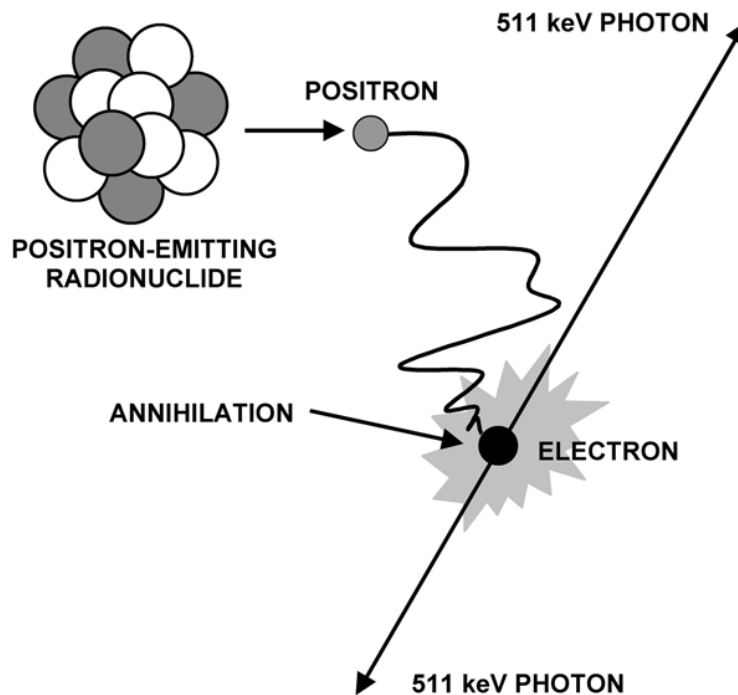
PET skanner

PET er en radioaktiv avbildningsteknikk som fremstiller kontinuerlige digitale 3D-bilder av kjernen gjennom stråling produsert under nedbryting av det radioaktive isotopet/sporingstoffet. En slik emisjon av et positron vil være unik for hver enkelt nuklide, hvor det i dette studiet ble i hovedsak brukt Na^{22} som ble oppløst i saltvannet og injisert i kjernene/blokkene.

Et radioaktivt nukleid vil spontant gjennomgå et radioaktivt forfall/nedbryting basert på halveringstiden til det radioaktive nukleidet. En slik nedbrytningsprosess av det radioaktive atomet på et gitt molekyl, vil et positron (β^+) løsrive seg fra nukleidet som videre kolliderer med et elektron. Ved hver slik positron-elektron kollisjon vil to energifotoner med høy energi (gamma stråling) dannes, hvor de blir "sendt" i motsatt retning i forhold til hverandre (tilnærmet 180°) med en energi på 511keV [38].

Slikt foton som dannes vil forlate objektet og bli fanget opp av skanneren. PET skanneren er sylinderformet rundt benken med mange detektorer, der kjernen ligger, hvor den er optimalisert for å kunne få avbildet alle utslipp av positron fra det radioaktive nukleidet med denne energien. PET skanneren er designet slik at det konvergerer det høy energirike signalet fra fotonet og sender det ut som elektrisk signal i datasystemet som logger dette. Før det registrerte signalet blir rekonstruert til et tomografisk bilde, så blir det registrerte fotonet korrigert for en rekke faktorer. Det at fotonene sendes tilnærmet 180° i forhold til hverandre, gjør at PET skanneren kan beregne hvor en slik emisjon skjer med relativ stor nøyaktighet (oppløsning på ca 2mm^3 , referer M. Færnø).

Det vil likevel være en usikkerhet for å lokalisere nøyaktig hvor det nukleære forfallet tar sted. Mange foton par blir ikke "skutt" fra hverandre med en vinkel på nøyaktig 180° . Denne fraksjonen har blitt estimert til å være så høy som 65% for vann. Dette medfører en usikkerhet på $0,5^\circ$ (om lag 1,5 mm, avhengig av distansen mellom de to detektorene). I tillegg vil dannelsen av de to energifotonene dannes utenfor det radioaktive nuklide, ved positron emisjon. Denne distansen mellom nuklide og foton dannelsen vil også gi økt usikkerhet for lokasjonen. Denne usikkerheten er en funksjon som øker med økt initiell energi av positronet. Figuren under viser et eksempel av positron emisjon [39].



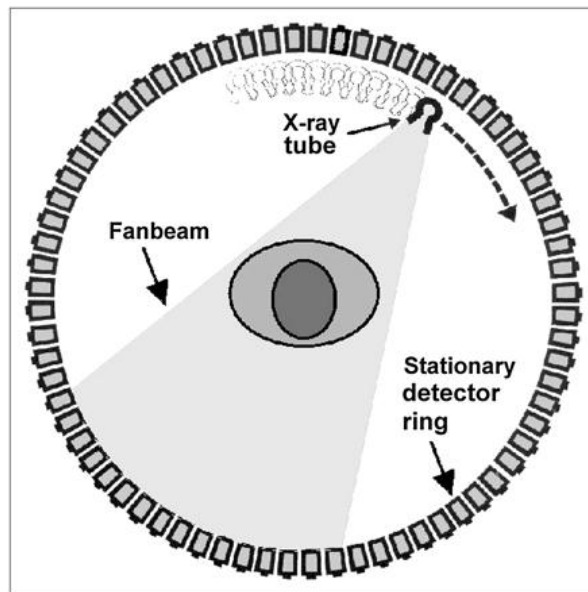
Figur 20: Prosessen av positron emisjon og videre positron-elektron tilintetgjørelse som resulterer i 511 keV fotoner som blir skutt 180° fra hverandre [38].

Bilde som kommer ut, er i 3D hvor signal intensiteten for et gitt volum er proporsjonal med det radioaktive nukleide for det gitte volumet.

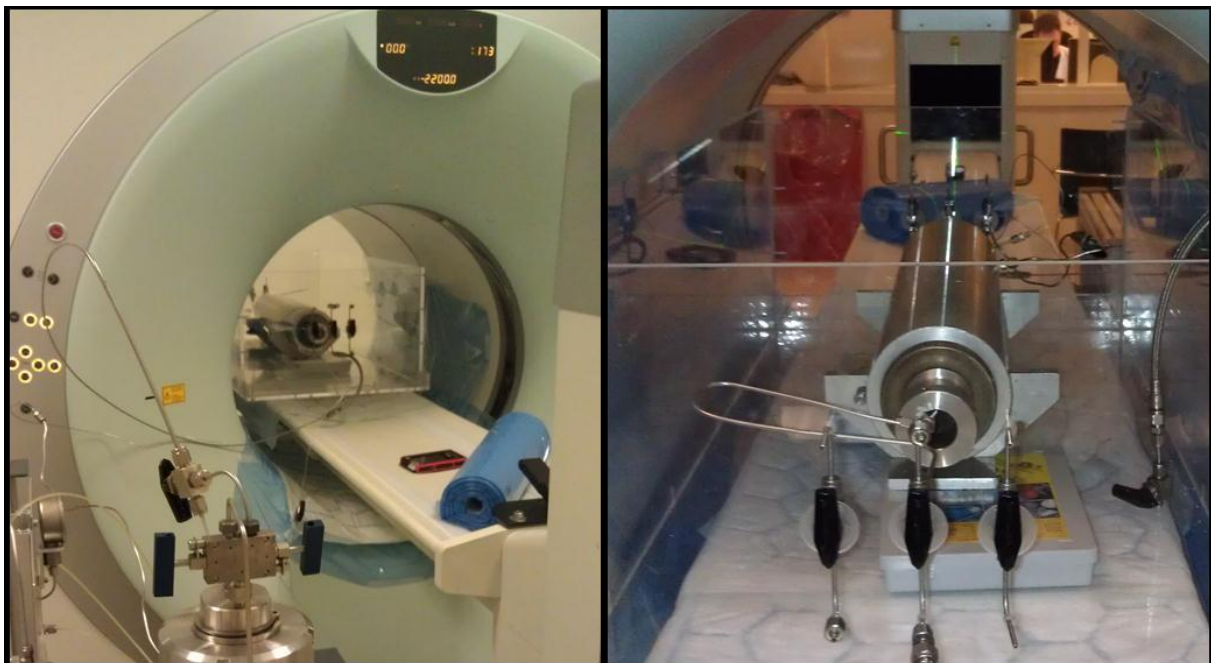
CT skanner

Ved CT-skanning blir avbildningen generert i fra forskjellige vinkler ved bruk av røntgen stråling. CT-skanneren består av en røntgenkilde og detektorer som beregner mengden av signalet som blir svekket når det sendes gjennom objektet som skal skannes (kjernen). CT-skanning gir en visualisering og karakterisering som skaper bilder som kartlegger variasjonen av røntgen demping med sterk relasjon til tetthetsforskjeller innenfor et objekt [40] [41]. For å optimalisere resultatene fra CT-skanneren vil det være nødvendig at spenningen og strømmen som benyttes er justert for dette. En økning i spenning gir mer gjennomtrengende og energisk røntgen, slik at også lavere strømminnstillinger kan gi høyere oppløsning [42].

CT-skanneren som ble benyttet på Haukeland er bygget opp med en sirkel av detektorer rundt objektet for å registrere røntgenstråling. Røntgenkilden kan roteres slik at det er mulig å ta flere avbildninger som kan settes til en 2D-avbildning av kjernen. I tillegg vil bordet som kjernen ligger på bevege seg horisontalt, slik at det kan gjennomføres mange 2D avbildninger som kan settes sammen til en 3D visualisering av kjernen. Skanneren som ble benyttet i dette studiet har en oppløsning på 0,4 mm [43].



Figur 21: Skisse av røntgen kilde som roterer rundt objektet for å kunne fremstille et 2D-skan [44].



Figur 22: Kjerneholder plassert i PET/CT skanneren ved Haukeland.

3.1.2 NTI – Nuclear Tracer Imaging (Radioaktiv sporings avbildning)

Denne avbildningsteknikken detekter γ -stråling som sendes ut av det radioactive isotopet som er oppløst i vannet som forekommer i porene. Dette er videre utviklet fra en teknikk som ble beskrevet av Baily «Nuclear measurements of fluid saturation in EOR flood experiments» [45].

For avbildningsfluid i en porøs kjerneprøve, skal valget av sporingsstoff vurderes ut i fra følgende tre aspekter:

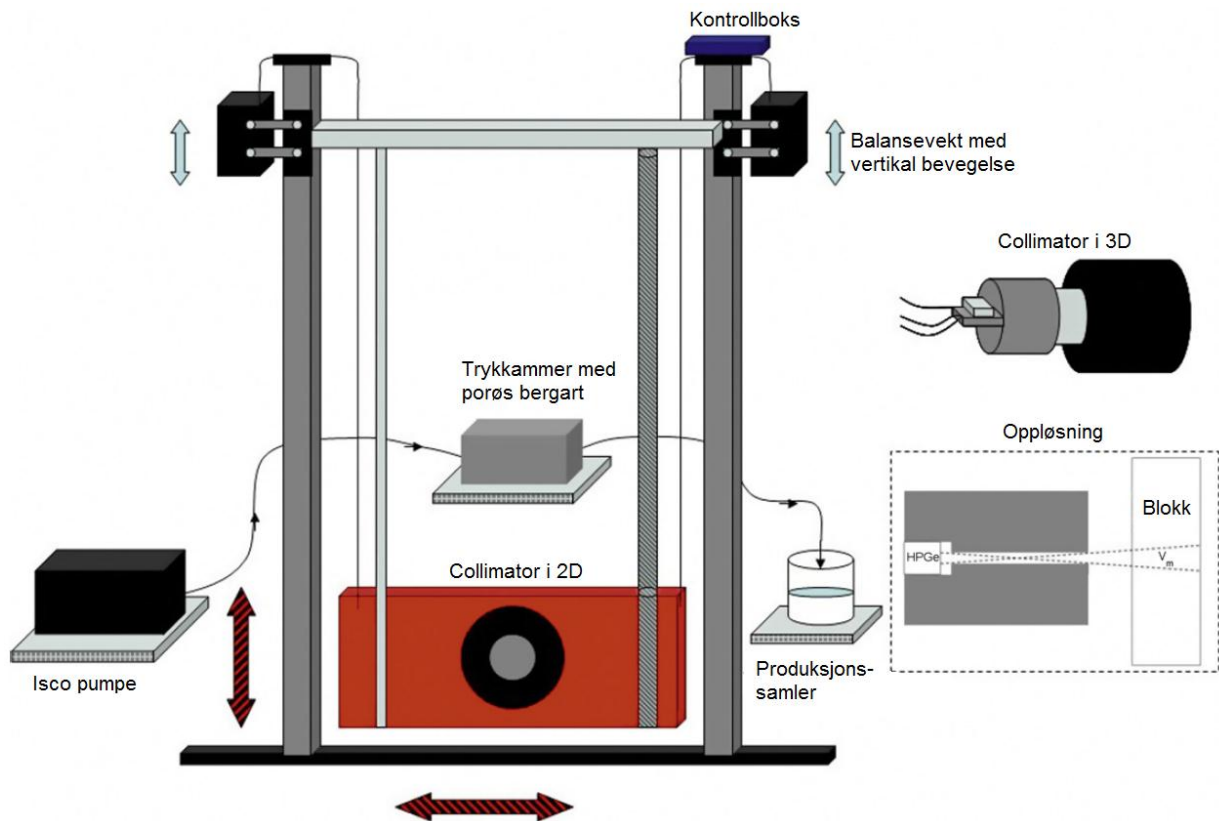
1. Høy energi, slik at den vil kunne penetrere kjerneprøven og trykkammer
2. Tilstrekkelig lang halveringstid for å minimere korreksjon på grunn av naturlig forfall
3. Sporingsstoffet løser seg kun opp i et av fluid fasene.

Generelt i et system hvor n faser skal identifiseres, er det behov for $n-1$ sporingsstoffer. I dette studiet sees det nærmere på CO_2 -vann fortrenkning, hvor kun vann og CO_2 er tilstede i porekanalene i blokken. Ett sporingsstoff vil i dette studiet da være tilstrekkelig basert på $S_w = 1 - S_{\text{CO}_2}$ (se metning i kapittel 1.2). Det radioactive natrium isotopet, ^{22}Na , kan sees som et godt egnet sporingsstoff, hvor dette vil løses opp i vannet, ettersom natrium allerede er tilstede i saltvannsløsningen [46] (se Tabell 2: Fluid egenskaper for fluidene benyttet i dette studiet.). For mer detaljerte informasjon om ^{22}Na , se kapittel 3.1.3 og/eller Figur 84: Vedlegg 1; ^{22}Na datablad.

En av fordelene ved bruk av nukleær sporingsstoff er at man kan gjøre flere forsøk på en og samme kjerneprøve på grunn av at mulig salt absorpsjon kan minimeres ved å flømme kjerneprøven med vanlig saltvann i forkant [46]. Dette kan gjøre det mulig å gjennomføre sensitiv studie av parametere som for eksempel injeksjons rate, gravitasjonseffekt og mobilitet. En annen fordel ved bruk av nukleær sporingsstoff, sett opp mot de ikke-nukleære teknikkene som røntgen, mikrobølger og NMR tomografi, er at denne teknikken ikke er sensitiv for høyt omslutningstrykk med tanke på absorpsjon og refleksjon [47]. Den radioactive intensiteten til isotopet vil dermed være proporsjonal med fluid metningen (S_w), og kan bli registrert av en bevegelig gamma detektor. Det som tilsynelatende er negativt med denne teknikken er radioaktiviteten i seg selv, den lave oppløsningen og laboratoriet som må imøtekomme med plass til relativt store rigger og instrumenter.

Tabell 1: Oversikt over det radioactive isotopet benyttet i NTI eksperimentene [46].

Isotop	Halveringstid (år)	Energi γ_1 (keV)	Energi γ_2 (keV)	Merket fase
^{22}Na	2.6	511	1275	Water



Figur 23: Skisse av vertikal strømningsrigg som ble benyttet i dette studiet [46].

Kalkulering av fluid-metning

For NTI 2D avbildning, vil denne metoden ikke kunne ta øyeblikksbilder av metningsdistribusjonen i blokken. Dette er fordi metningen i blokken endrer seg kontinuerlig mens avbildningen (et skann) pågår, men metnings endring i blokken skjer sakte som kan medføre at det ikke er noen stor signifikant endring i metning fra skann til skann.

Metningen av vann (S_w), merket med ^{22}Na , kan beregnes ut fra det lineære forholdet mellom antall desintegrasjoner og metning av merket væske:

$$S_{i,w} = \frac{d_i - B_i}{d_{i,100\%} - B_i} \quad 20)$$

Der S_w er metningen vann som fraksjon av porevolumet (se kapittel 1.2 Metning), d er antall målte desintegrasjoner (radioaktive intensiteten) ved et gitt punkt i , B er antall tellinger fra bakgrunn skann (uten sporingstoff i blokken) og $d_{100\%}$ representerer den radioaktive intensiteten når blokken er 100% mettet med radioaktiv saltløsning.

Radioaktivitet er et spontant kjernefysisk fenomen som ikke er sensitivt for trykk og temperatur med statistisk usikkerhet for den radioaktive intensiteten ved et gitt punkt i :

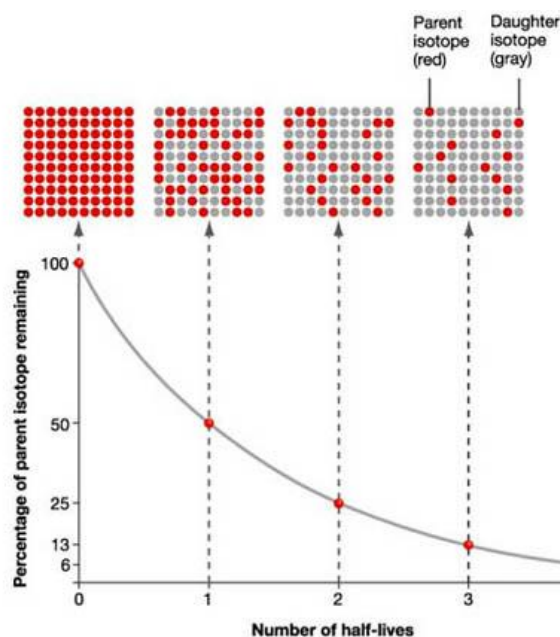
$$\Delta d_i = \frac{1}{\sqrt{d_i}} \quad 21)$$

Telle tiden som behøves for å opprettholde en lav usikkerhet blir redusert ved å øke den radioaktive konsentrasjonen. Usikkerhetene for metningen av et vilkårlig punkt med disse innstillingene vil være i området fra 3-5% [46].

3.1.3 Radioaktivt springsstoff

I dette studiet ble det radioaktive isotopet ^{22}Na benyttet som den radioaktive kilden for vann fasen, hvor det også ble gjort forberedelser for å kunne injisere CO_2 som var merket med ^{11}C . ^{22}Na er et radioaktivt isotop fra natrium, som har halveringstid på 2,6 år (se spesifikasjoner i Figur 84: Vedlegg 1; ^{22}Na datablad). Det er også et av de mest stabile kunstige isotopene. ^{22}Na nedbrytes ved positron emisjon og videre avgir fotoner som vil være synlig i PET-skanneren. Karbon har 16 kjente isotoper, hvor ^{11}C er den mest stabile kunstige isotopen med halveringstid på 20,4 minutter. Dette er en vell liten halveringstid, og kan by på utfordringer ettersom eksperimentene vil bli kjørt over flere halveringstider. Det vil her også være en positron emisjon som avgir fotoner som blir synlig i PET-skanneren. Når CO_2 og ^{11}C blir blandet blir det antatt at det vil blandes fullstendig. I dette studiet ble det kun jobbet for å klargjøre og optimalisere et oppsett for å injisere CO_2 blandet med ^{11}C , men ikke gjennomført forsøk med injeksjon i kjerne.

- Emisjon av ^{22}Na : $^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{22}_{10}\text{B} + \beta^+$
- Emisjon av ^{11}C : $^{11}_6\text{C} \rightarrow ^{11}_5\text{B} + \beta^+$

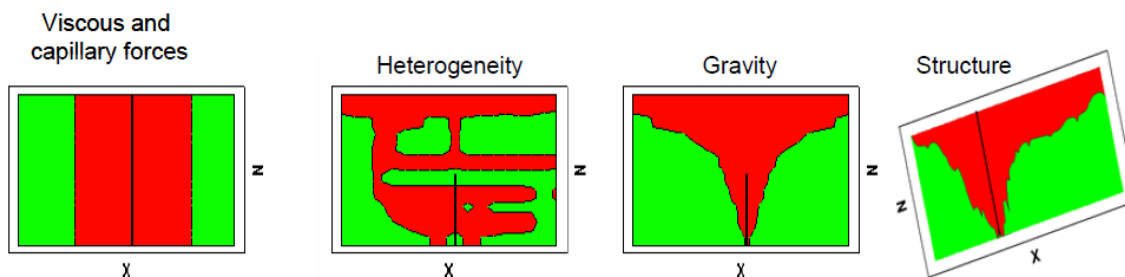


Figur 24: Figuren viser plott av gitt antall radioaktive isotoper som funksjon av et gitt antall halveringstider [48].

4 Litteraturstudie

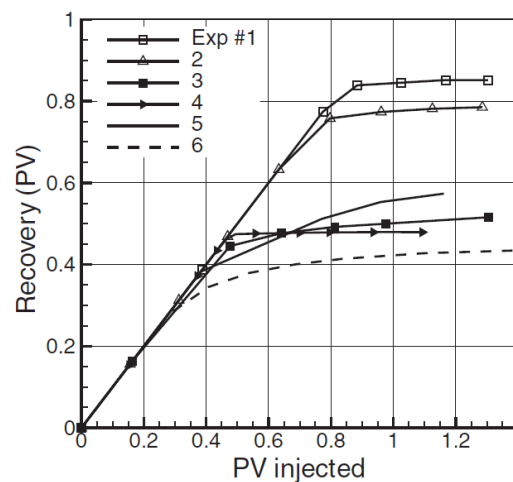
Ved å injisere CO₂ for lagring i dype saline geologiske formasjoner, vil trykket og temperaturen her medføre at CO₂ er i flytende væskefase eller fremstår som superkritisk. Eksperimentene gjort i denne oppgaven, er gjort ved trykk og temperaturforhold som holder CO₂ i en stabil væske-fase.

Økt fundamental forståelse for flerfasestrømning og fanging av CO₂-saltvann systemer er nødvendig for å ta fordeler av potensielle kapasiteter av stor skala saltvannsholdige bergarter. Ved poreskala, vil den viskøse og kapillære prosessen kontrollere fordelingen av metningen mellom den vætende fasen (saltvann) og den ikke-vættende fasen (CO₂). I et reservoar benyttet for lagring, vil den heterogene, geologiske oppbygning hindre strømmingen for både saltvannet og CO₂ til områder med høyere permeabilitet. Med tanke på CO₂-lagring, vil lavpermeabilitets soner gjerne ha en fordelaktig effekt for å motvirke effekten av oppdrift, ved å lokalt hindre vertikal strømning. Den store tetthetsforskjellen mellom CO₂ (≈700 kg/m³) og saltvannet (≈1000 kg/m³) ved typiske lagringstilstander gir en sterk oppdriftskraft, som medfører at CO₂ vil stige til toppen av lagringsreservoaret. Figur 25 viser fra bildet til venstre; hvordan viskøse og kapillære krefter kontrollerer fortregningen på poreskala, heterogenitet som fører strømmingen inn i høypermeable soner og lokalt kan motvirke oppdriftseffekten, hvordan oppdriftseffekten fører CO₂ opp til den når en eventuell kappebergart og at vinklede kappebergarter fører CO₂ i en asymmetrisk oppstrømmende migrering [49].



Figur 25: Prosessen som kontrollerer migrering av CO₂ i saltvannsformasjoner [49].

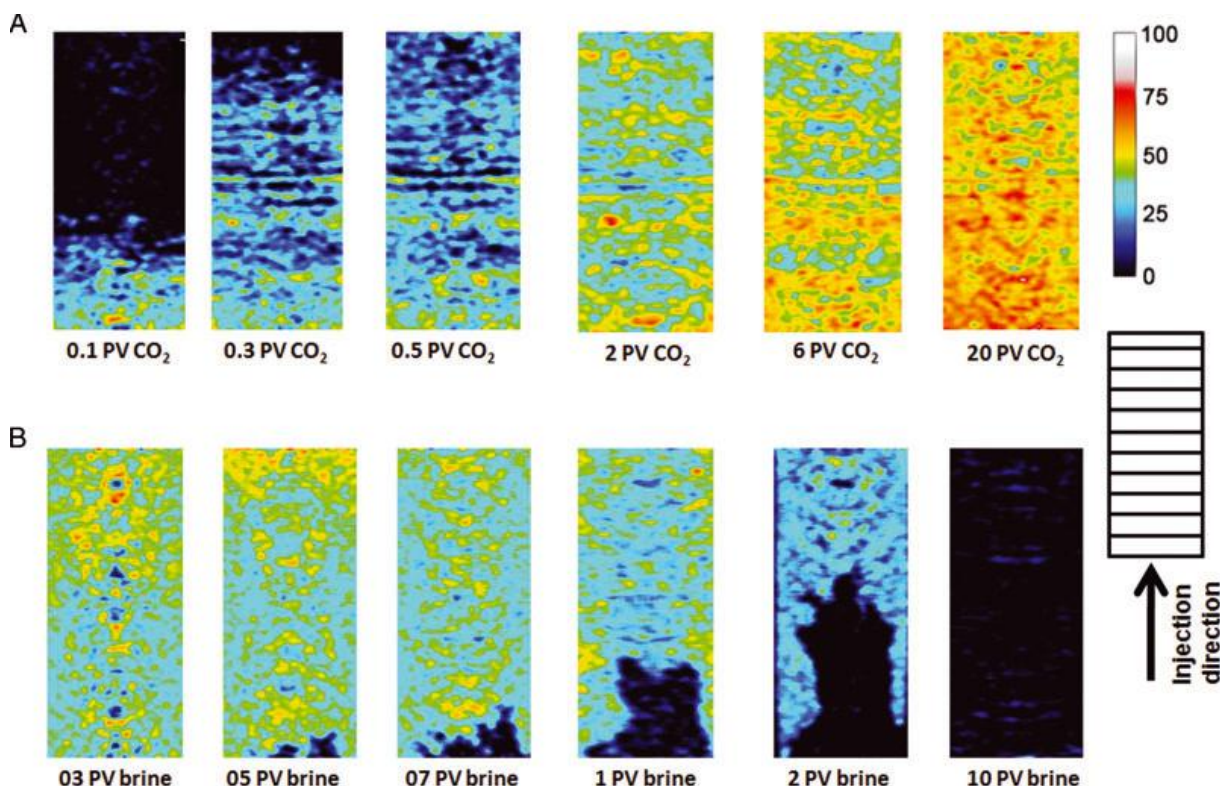
A. Riaz, referert til [2], har utført eksperimenter hvor det er blitt sett på sammenligning og påvirkning av effekten for gravitasjon, viskøse og kapillære krefter for CO₂ injeksjonsprosesser. Eksperiment 1; Injiserte fluid med lavere tetthet og mer viskøst enn det fortregnte fluidet ovenfra. Dette medførte en stabil fortregning på grunn av den fordelaktige viskositeten og tettheten. Eksperiment 2: Var en mer ustabil viskositetsfortregning ovenfra. Fortregningen ender opp med å være uniform ved enden av injeksjonsprosessen, men det er en del områder som ikke er blitt sveipt over. Eksperiment 3: Injiserer en ustabil viskositet og tetthetskontrast. Det er her opplevd liten sveip effekt, men en uniform front. Eksperiment 4: Plottet viser resultat som er



Figur 26: Utvinnings kurve fra eksperiment 1 til 6. Porevolum utvunnet som funksjon av porevolum injisert [2].

hentet ut i fra et eksperiment utført i en sylindrisk tube, med samme parametere som i eksperiment 3. Eksperiment 5: Injisert nedenfra med samme viskositet og tetthets kontraster som i eksperiment 3, men her med større injeksjons rate. Fronten er da mer kompakt, men konsentrert over et mindre sveipområde enn i eksperiment 3. Eksperiment 6: Injisert nedenfra med en høyere verdi for viskositet [2].

Det er blitt utført kalkulerer av metning ved bruk av CT-avbildning (B. L. Alemu et. Al 2012) [50]. 3D volum-avbildningen av kjernen og med referanse til CT-tallet av porefluidet (luft og saltvann) ble brukt for å kalkulerer porøsiteten og CO₂ metningen. Metningsberegningen og bildeanalysen ble utført ved bruk av den grafiske programvaren «ImageJ». Metningen av CO₂ i to forskjellige kjerneprøver som ble kalkulert direkte ut i fra CT avbildning hadde en gjennomsnittlig feil på henholdsvis +/- 7 % og +/- 10 %. For å øke nøyaktigheten på metningsmålingen ble metningen kalkulert på nytt ved målte resistivitetsverdier. Eksperimenter ved dette studiet viser til en korrelasjon mellom porøsitet og CO₂ metning. Områder med høyere porøsitet gav høyere metning av CO₂. En lignende korrelasjon mellom porøsitet og CO₂-metning er noe som er blitt rapportert av Perrin og Benson (2010). Etter injeksjon av 20 porevolum av CO₂ ble den gjennomsnittlige metningen over den ene kjernen gitt til å være 53 %, mens den andre var 41 %. Injeksjon av 10 porevolum med saltvann (imbibisjon), etterfulgt av dreneringsprosessen, resulterte i 100 % vannmettet kjerne for begge prøvene. Den lave residuelle metningen av CO₂ som ble observert kan relateres til oppløsning av CO₂ inn i saltvannet. Prøvene ble holdt under konstant trykk på 150 bar og temperatur på 20 +/-1°C [50].



Figur 27: 2D avbildning av CO₂ metning for en kjerne ved forskjellige injeksjonsstadier; A) Drenering B) Imbibisjon. Fargen representerer CO₂ metningen fra 0 til 100 % [50].

NGI (Norge Geotekniske Institutt) har gjennomført forskningsprosjekter for å øke forståelsen for hvordan CO₂ påvirker de geofysiske egenskapene til reservoarbergarter. Dette er nødvendig informasjon for å kunne overvåke oppførselen til CO₂ nede i reservoaret og oppdage mulige lekkasjer. NGI har utviklet et laboratorieoppsett som sender røntgenstrålinger gjennom bergarten for å avbilde væskefordelingen i porøse bergarter. Samtidig kan bergartens geofysiske egenskaper som akustisk lyd hastighet (trykk- og skjærbølger) og elektrisk motstand (resistivitet) måles kontinuerlig gjennom eksperimentene. Det har også blitt utviklet nye metoder for å karakterisere hvor tett takbergarten er, ved å måle oppsprekking. Ved bruk av slike metoder kan man vurdere egnetheten til fremtidige CO₂-lagringsformasjoner. Undersøkelsene ble gjort på sylindriske prøver av sandstein med saltholdig vann før det pumpes inn CO₂ med høyt trykk. Det ble her oppnådd en maksimal CO₂-metning i porene på 53 %. Da om lag halvparten av porene var fylt med CO₂, var lyd hastigheten til trykkbølgene redusert med 7 %. Den elektriske motstanden økte fra om lag 3 ohm-m til 14 ohm-m ved CO₂ injeksjon. Grunnen er at ren CO₂-væske er en elektrisk isolator, til forskjell fra saltvannet som leder strøm [51].

Thomas Ramstad, ved Numerical Rocks, har gjennom prosjektet «Pore Scale Numerical Analysis for Geological Sequestration of CO₂» satt i gang et forsøk på å bygge opp en forståelse for hvordan CO₂ og andre fluider blir transportert gjennom et porennettverk i en reservoar bergart. Dette er blitt gjort gjennom numerisk simulering av flerfasestrømning i realistiske geologiske modeller av porøse bergarter. Deres ultimate mål er å kunne komme opp med et produkt som gir service relatert til CO₂ håndtering og lagring. Numerical Rocks har i liten grad publisert noe fra deres CO₂ prosjekt enda. Det blir derfor ikke distribuert noe videre data fra arbeidet som er gjort fra deres side her i denne oppgaven. Publikasjoner fra Numerical Rocks vil antageligvis komme snart. Numerical Rocks blir nevnt her, ettersom et fortsatt tett samarbeid mellom dem og UiB vil være gunstig for å utvikle kunnskapen omkring CO₂ lagring. Det er her gode muligheter for å kunne sammenligne simulering og eksperimentell data.

5 Eksperimentelle oppsett og prosedyrer

Dette kapitlet gir en kort beskrivelse av fluidene og de porøse kjernematerialene som ble benyttet, metodene for preparering av porøse mediene og måling av sentrale parametere, samt en gjennomgang av oppsettene som er benyttet for å utføre forsøkene relatert til CO₂ lagring.

5.1 Kjernemateriale

Kjernemateriale hentet direkte fra reservoaret representerer reservoarets egenskaper best. Kjernetaking er en kostbar operasjon og mange usikkerheter blir introdusert ved boring og trykkavlastning. Fra reservoaret til overflaten vil både trykket og temperaturen endre seg, slik at den originale fluidfordelingen i kjernen kan endre seg.

I dette studiet har det blitt brukt vannfuktede dagbruddsbergarter som analoger til kalksteinsreservoar og sandsteinsreservoar. Dagbruddsbergartene som er blitt brukt er kalkstein (Rørdal) og sandstein (Bentheim) i form av kjerner med diameter på 1,5" og 2" med forskjellige lengder. I tillegg er det brukt blokker av større skala (typisk 5 x 10 x 15 cm). Geometrien til kjernene blir nærmere beskrevet under kapittel 6.1 Kjerne analyse.

5.1.1 Rørdal kalk

Rørdal kalk er en vann-våt bergart som kommer fra Portland sement fabrikk i Aalborg, Danmark. Dette er en relativt homogen bergart som består hovedsakelig av kokkolitt avsetninger med rundt 99% kalsitt og 1% kvarts. Den absolutte permeabiliteten er lav på grunn av de trange poregangene, rangert fra 1-4 mD [52].

5.1.2 Bentheim Sandstein

Bentheim er en vann-våt dagbrudds bergart hentet fra Tyskland. Mineralogien til denne type sandstein er 99% kvarts med spor av leir mineralet kaolinitt. Permeabiliteten er betraktelig høyere enn for Rørdal kalk, hvor Bentheim sandstein har omkring 1,1 Darcy [53]. Porøsiteten for sandstein vil derimot være lavere enn for Rørdal kalk.

5.2 Fluider

Tabell 2: Fluid egenskaper for fluidene benyttet i dette studiet.

Fluid	Innhold	Tetthet [g/mL]	Viskositet [cP] (20°C)
Kalksteinsvann	✓ Destillert ✓ 5,0 vekt% NaCl ✓ 5,0 vekt% CaCl ₂ ✓ 0,0005 vekt% NaN ₃	1.05 ^b	1.09 ^b
Sandsteinsvann	✓ Destilert vann ✓ 5,0 vekt% NaCl ✓ 0,0005 vekt% NaN ₃	1.03 ^b	1.07 ^b
CO ₂ @ 85 bar	✓ Flytende fase	0.84 ^a	0.08 ^a

^a – Verdier gitt ved [20]

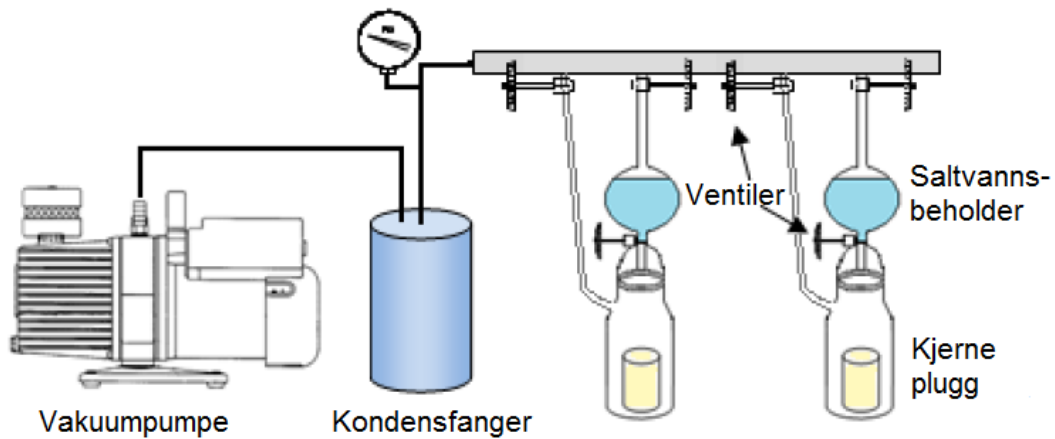
^b – Verdier hentet fra oppskrift på laboratoriet ved UiB.

5.3 Preparering av kjerner/blokker

Følgende er en beskrivelse av metode og utførelse for måling av porøsitet og permeabilitet for kjerner og blokker, samt metoden som har blitt benyttet for pålegging av epoksy på blokk. For nærmere beskrivelse av kjernemateriale, se kapittel 5.1 Kjernemateriale. For data og resultater i form av dimensjoner, porøsitet og permeabilitet, se kapittel 6.1 Kjerne analyse.

5.3.1 Porøsitetsmåling av kjerner

Først ble kjernene skylt og vasket før de ble plassert i et varmeskap (90 °C), hvor de stod i minst 24 timer. For kalkkjernene, som er en mer skjør enn sandsteinskjernene, ble disse først plassert for tørking i romtemperatur i ett døgn før de ble plassert i varmeskapet. Deretter ble dimensjonen målt på kjernene og tørrvekten. Plasserte så kjernene og saltvann i beholdere slik som vist i Figur 28, hvor informasjon om saltvannet kan finnes i Tabell 2. Kjernene og vannet ble vakuumert i hver sin omgang til < 10 mbar, før ventilene til vakuumpumpen ble stengt og ventilene mellom kjernen og saltvannet ble åpnet. Kjernene ble stående i vannet slik at de ble mettet videre ved imbibisjon (holdt de minimum ved denne tilstanden i 12 timer), før de ble tatt ut og veid.



Figur 28: Illustrasjon av porøsitetens oppsett (modifisert skisse fra [43]).

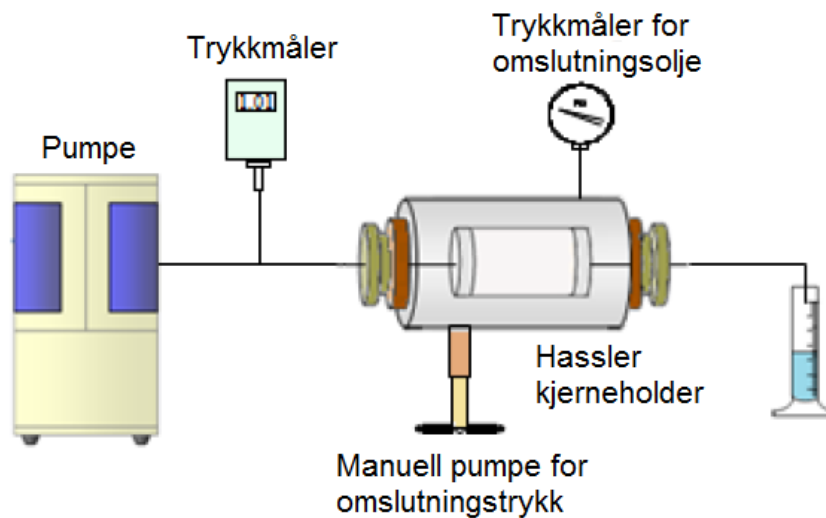
Den effektive porøsiteten ble målt ved å bruke materialbalanse. Ettersom porøsiteten blir estimert ut i fra materialbalanse, var det viktig å få ut mest mulig luft av kjernen. Ved gjenstående luftrom i kjernen, kunne porøsiteten bli underestimert.

$$\phi = \frac{M_m - M_t}{\rho \cdot V_b} \cdot 100 \quad (22)$$

Hvor M_m er kjerne mettet, M_t er kjerne tørr, ρ er tettheten til vannet og V_b er bulkvolumet til kjernen.

5.3.2 Permeabilitetsmålinger

De absolutte permeabilitetsmålingene ble estimert ut i fra å strøkke saltvann gjennom en fullstendig mettet kjerne med konstant rate. Varierte med minst fire forskjellige rater, og registrerte trykkfallet over kjernen ved de forskjellige ratene. Trykkfallet ble målt når den ble stabil ved den gitte raten. Den totale permeabiliteten ble estimert ved å beregne permeabiliteten for hver av ratene mot korresponderende trykkfallet, ved hjelp av likning beskrevet i kapittel 1.3 om absolutt permeabilitet. Kjernene ble plassert i en Hassler kjerne holder, hvor omslutningstrykk rundt kjernen ble påført ved en manuell pumpe for å hindre at væske flømmer mellom kjernen og gummihylsen som kjernen er plassert i. Omslutningstrykket ble holdt konstant til 10 bar over differensial trykket over kjernen. En illustrasjon av oppsettet er gitt i Figur 29.



Figur 29: Illustrasjon av permeabilitets oppsett (modifisert skisse fra [43]).

For sandstein ble det brukt en vannsøyle for å estimere trykket, ettersom at trykkfallet over en sandsteinskjerne er for lavt til å bli registrert med den digitale trykkmåleren som var tilgjengelig. Trykkfallet ble da målt ut i fra høyden på en vannsøyle i en målesylinder, tilkoblet til rørledning, som erstatning til den digitale trykkmåleren. Trykket blir da estimert ut i fra følgendelikning:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h \quad 23)$$

Der ρ er tettheten til væsken, g er gravitasjonsakselerasjonen og h er høyden på vannet i søylen for den gitte raten.

5.4 Preparering av blokker

Kalkstein-/sandsteinsblokkene ble kuttet opp i størrelser på rundt 15 x 10 x 5 cm (se kapittel 6.1 Kjerne analyse). Deretter ble de vasket for å fjerne smuss og lignende før de ble plassert i varmeskap i minst ett døgn. Målte dimensjonen på blokkene, for deretter å pakke blokkene inn med epoksy. Se kapittel C: Vedlegg – Epoksy datablad, for nærmere beskrivelse av epoksyen som ble benyttet. Hensikten med epoksy rundt blokken er at den skal skille blokken og omslutningsoljen fra hverandre. Det ble forsøkt å sette blokkene med våt epoksy i et varmeskap for å akselerere og muligens forbedre herdingsprosessen av epoksy. Dette endte med at epoksyet sprakk og ble deformert. Videre preparering av blokkene ble da gjennomført ved at epoksyen fikk størkne i romtemperatur. Fremgangsmåte for pålegging av epoksy på blokkene som ble benyttet i dette studiet, er som følgende:

1. Ett jevnt lag med epoksy ble smurt rundt hele blokken bortsett fra de to sidene med endestykkene (siden med målene 10 cm x 5 cm). Epoksyen ble satt til tørking/herding i minimum 4-5 timer før neste lag ble lagt på.
2. Et nytt lag med epoksy ble etterfulgt med ett lag med aluminiumsfolie mens epoksyen fortsatt var våt. Det kunne danne seg luftbobler under aluminiumsfolien. Tørt papir ble så brukt for å stryke ut alle luftbobler under aluminiumsfolien. Aluminiumsfolie ble benyttet for å forhindre at karbonsyren, som dannes ved kontakt mellom vann og CO₂, skulle etse gjennom og ut i omslutningsoljen (se kapittel 2.1.1).
3. Nytt lag med kun epoksy ble påført blokken.
4. Endestykkene ble satt på (blokken var nå blitt så stor at den ikke kunne ha flere lag med epoksy før endestykkene måtte settes på). Et nytt lag med kun epoksy ble påført systemet med endestykker. Alle hulrom mellom blokk og endestykke med epoksy ble forsøkt fylt (benyttet en sprøytespiss for å presse epoksy ned i glipen mellom endestykket og blokken).
5. Nok et lag med epoksy ble påført, etterfulgt av glassfiberduk mens epoksyen enda var våt. Dette var for å stive av blokken bedre. Igjen ble det fokusert på å fjerne alle luftbobler og å mette glassfiberdukken med epoksy.
6. Til slutt ble to nye lag med epoksy og aluminiumsfolie lagt på, før det tilslutt ble lagt på et lag med kun epoksy helt ytterst.

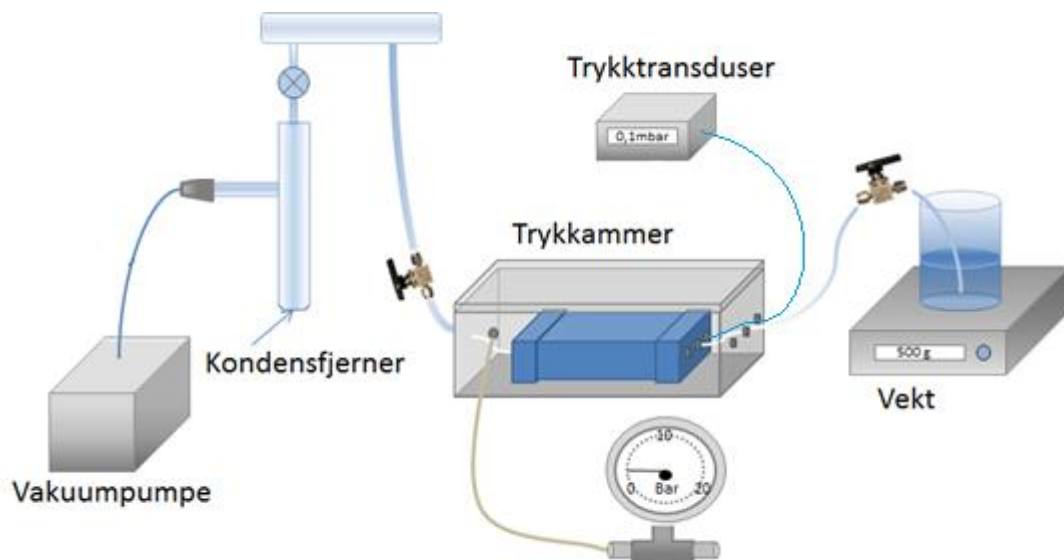


Figur 30: Illustrasjon av stegene for pålegging av epoksy på blokk, før og etter endestykkene ble satt på [54].

5.4.1 Porøsitetmåling av blokk

På grunn av størrelsen på blokken og prepareingsprosessen, var det ikke mulig å mette blokken på lik linje som for kjerne pluggene. Porøsitet av blokken ble målt ved å veie blokken når den var ferdig preparert med epoksy. Den ble deretter lagt i et trykkammer med omslutningsolje. Blokken ble i trykkammeret tilkoblet tre rørledninger. En rørledning ble ført til vakuumpumpen, en annen rørledning ble ført til trykkavleser (denne ble tilkoblet på motsatt side av vakuumpumpen for å lese av det antatt høyeste trykket i blokken) og siste rørledning gikk til en stengt ventil som skulle suge saltløsningen inn i blokken. Trykket så opp omslutningsoljen og satt den til konstant trykk på 5 bar ved hjelp av en QX-pumpe. Det ble benyttet en pumpe for å ha full kontroll på omslutningstrykket og holde dette trykket konstant. Dette med tanke på temperaturendringer i rommet, ettersom epoksyen kan ha lett for å sprekke. Startet deretter vakuumering av blokken. Blokken ble vakuumert frem til trykket var redusert til 0,1 mbar (ca 500 mtorr), som tok om lag 24 timer. Ventilen for trykkmåleren ble så stengt og deretter ble ventilen som er lagt ned i beholder med saltvann åpnet, slik at vannet ble suget inn i blokken. Vakuumpumpen ble med fordel kjørt frem til gjennombrudd av vann ble observert på venstre side, se Figur 31, før ventilen på venstre side ble stengt. For å fortsette

imbibisjonsprosessen av saltvann inn i blokken, ble blokken liggende slik i minimum 12 timer. Blokken var da antatt 100 % mettet med saltvann. For å få bidrag til hydrostatisk trykk når blokken skulle mettes, ble vannbeholderen satt så høyt som mulig i forhold til blokken. Tilslutt ble vekten av mettet blokk målt. I likhet med porøsitetmåling av kjernene, ble porøsiteten av blokken estimert med materialbalanse. Luftrom i blokken vil da gi underestimat av porøsiteten. Beregnet porøsiteten ved ligningen gitt i kapittel 5.3.1 Porøsitetmåling av kjerner.



Figur 31: Illustrasjon av oppsett for porøsitetmåling av blokk (modifisert fra [54]).

5.4.2 Permeabilitetsmåling av blokken

Permeabiliteten av blokken ble målt i trykkammeret ved den vertikale strømningsriggen. Blokken var her plassert med en vinkel, θ , hvor permeabiliteten ble beregnet ut i fra likning 7, gitt på side 11. Målingene ble utført med minst fire forskjellige rater, der trykket ble registrerte når det hadde stabilisert seg. Trykkmåleren som ble benyttet var en Validyne trykkmåler, hvor det på lik linje med permeabilitetsmålingene for kjernene var atmosfærisk trykk på produksjonssiden.

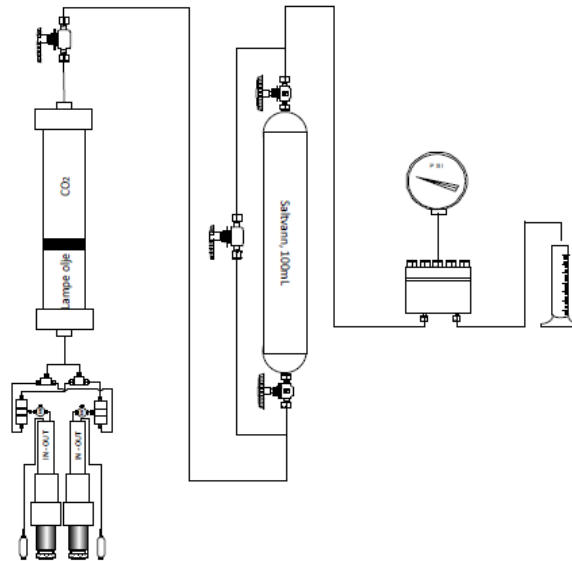
5.5 Eksperimentelle oppsett

I dette kapittelet er oppsettene som ble benyttet for eksperimenter i denne oppgaven presentert.

5.5.1 CO₂ løselighet i vann

Oppløsning av CO₂ inn i store mengder vann som enten opprinnelig befinner seg i reservoaret eller er seinere injisert er en ikke-neglisjerbar faktor i simulering av CO₂-strømning, spesielt for simulering av CO₂ injisert i et vannfylt reservoar [33]. På grunnlag av dette ble det bestemt å utprøve effekten og mulighetene for blande CO₂ med vann i forkant av CO₂-injeksjon. Tanken var å benytte et slikt oppsett i forkant av videre eksperimenter i denne oppgaven.

Det ble først fylt 100 ml kalksteinsvann i en buffer som CO₂ skulle pumpes gjennom. CO₂ ble i forkant av eksperimentet trykket opp til 83 bar og holdt ved dette trykket til det hadde stabilisert seg i flytende tilstand. Deretter ble det åpnet ut for CO₂ i systemet frem til baktrykksregulatoren via rørledningen rundt bufferen, for å sørge for at all rørledning holdt 83 bar. Stengte så bypass og åpnet innløp- og utløpsventilen fra bufferen. Da falt trykket, ettersom buffer som var fylt med vann ikke holdt 83 bar, men trykket økte jevnt videre (baktrykks regulator satt til 83 bar). Bufferen var plassert slik at den stod vertikalt, hvor CO₂ ble pumpet gjennom bufferen nedefra og opp. Dette for at all CO₂ som ble pumpet, skulle komme i kontakt med vannet. Pumperaten ved dette forsøket ble holdt konstant til 3 ml/time og forsøket ble avsluttet etter at 300 ml flytende CO₂ var pumpet gjennom.

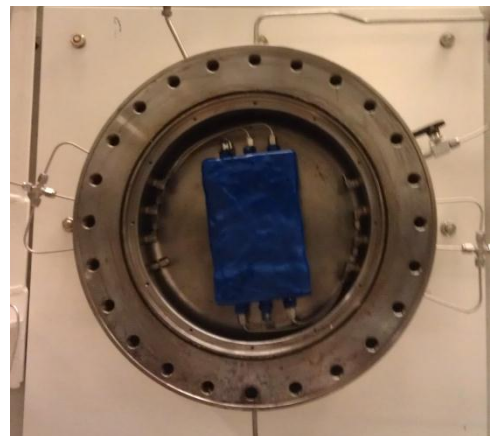


Figur 32: Oppsett for CO₂-vann blandbarhet.

5.5.2 Blokk eksperimenter ved bruk av NTI avbildning

For å se på forsøk av større skala (sammenlignet med kjerneprøvene) og i tillegg se på mulighetene for avbildning av CO₂-vann fortregning, ble det valgt å gjennomføre eksperimenter med blokker i vertikalriggen ved UiB. NTI er nyttig og kan brukes til dispersjon analyse ved å beregne effluentproduksjonen med tanke på radioaktiv intensitet [46].

Det ble benyttet en Isco-pumpe for injeksjon av fortregningsfluid ved dette oppsettet. På grunn av manglende utstyr, måtte pumpen styres manuelt fra selve pumpen og det var heller ikke mulig å logge pumpedata utenom det som ble notert ned manuelt. For å separere

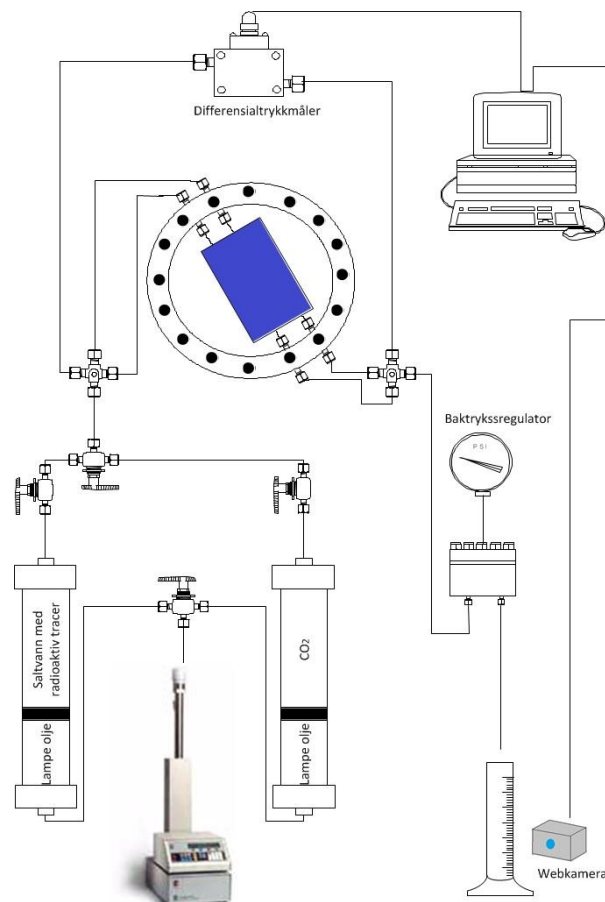


Figur 33: Bilde av blokk plassert i trykkammer.

den radioaktive væsken og oljen som ble pumpet fra pumpen, ble det benyttet en buffer. Dette ble gjort for å ikke forurense pumpen og å holde radioaktiviteten over et minst mulig område. Det ble også brukt buffer for injeksjon av CO₂. Differensialtrykket over blokken ble logget ved hjelp av en

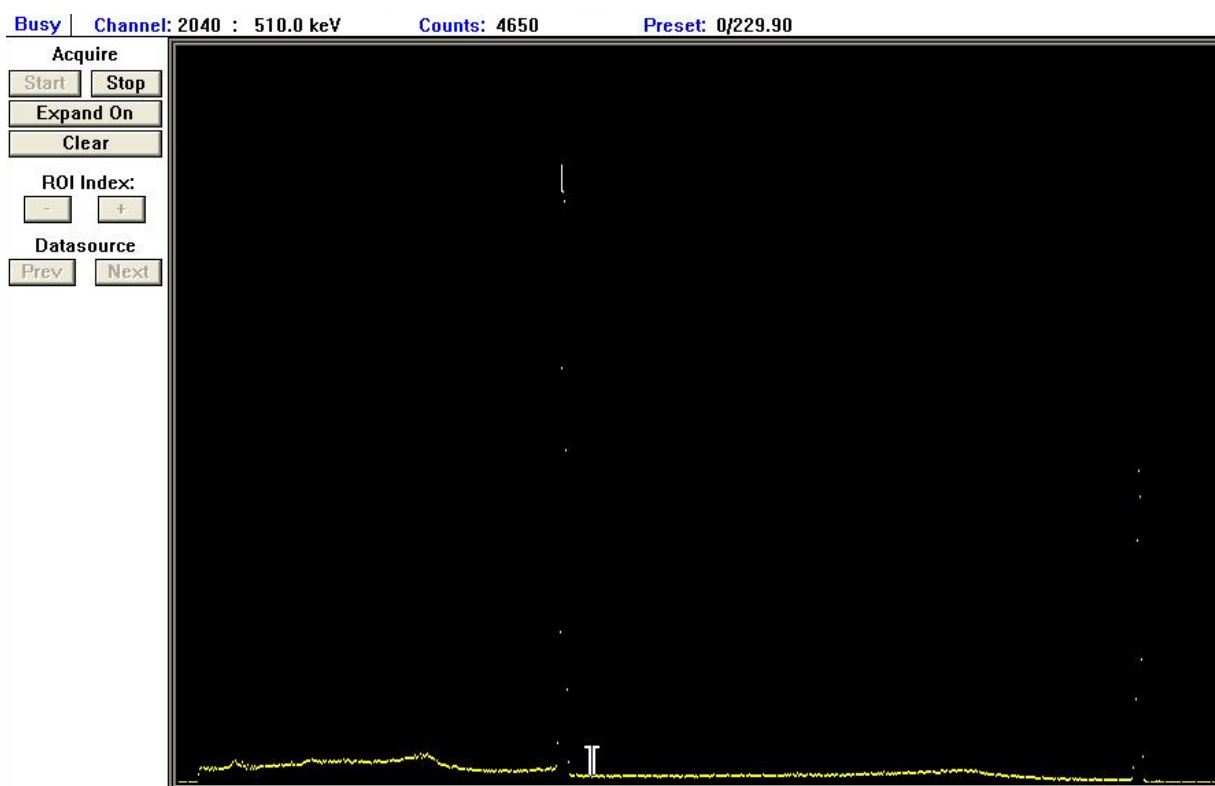
validyne differensialtrykkmåler som var tilkoblet en PC. Effluent produksjonen ble målt ved visuell avbildning av målebeger ved hjelp av et kamera. Det ble tatt bilder kontinuerlig gjennom eksperimentene hvert tiende minutt.

Da blokken var ferdig preparert, ble den plassert i trykkammeret som henger på veggen ved den vertikale riggen. Det ble her koblet til to rørledninger til blokken, på både injeksjon- og produksjonssiden. Rørledningene på injeksjonssiden frem til blokken var fylt med tilhørende saltvann for bergarten før blokken ble skrudd på plass (kalksteinsvann/sandsteinsvann). Endestykkene som ble benyttet var designet med kanaler, slik at fluidet kunne bevege seg over hele endestykket på både produksjonssiden og injeksjonssiden. Deretter ble trykkammeret fylt med olje ved hjelp av en lufttrykkpumpe, og satt til 8 bar omslutningstrykk. Flømmet så blokken med saltvann, hvor det var atmosfærisk trykk ved produksjonssiden. Stoppet injeksjon når produksjon ble observert, ettersom hele systemet da var fylt med vann. Trykket på baktrykksregulatoren ble da økt til 83 bar, og startet å trykke opp systemet. Epoksyen som er rundt blokken er lite elastisk og kan relativt lett knekke. Systemet ble derfor forsiktig trykket opp, hvor trykkforskjellen mellom pumpetrykket og omslutningstrykket aldri oversteg 10 bar. På denne måten kunne man minimere bevegelsen i epoksyen, og dermed øke sannsynligheten for at den holder tett og ikke knekker. Tilslutt, før start av injeksjon av radioaktivt vann, ble flere porevolum med rent saltvann injisert. Dette for å minimere adsorpsjon av det radioaktive sporingsstoffet (^{22}Na) til kjernematerialet [55]. Skjematisk illustrasjon av systemet er vist i følgende figur.



Figur 34: Oppsett for blokkeksperiment ved den vertikale strømningsriggen ved UiB.

Motoren på vertikal riggen fungerte slik at detektoren kunne beveges både horisontalt og vertikalt. Dette gjorde det mulig å få 2D-avbildning av metning som funksjon av posisjon. Først ble det gjort et bakgrunns-skann over det område som blokken var plassert, for å ha kontroll på eventuell "støy". Satt så i gang injeksjon av saltvann (sandsteinsvann/kalksteinsvann) som var merket med ^{22}Na , samtidig som skanneren ble startet for å få avbildning av vann-vann fortregningen i blokken. Typiske NTI eksperimenter har en konsentrasjon på rundt 1-2 mCi/L (1 mCi = 37 MBq), med en korresponderende telletid på rundt 3 minutter ved hver posisjon [46]. Skannintervallet for blokken ble typisk satt til 15 punkt i horisontalretning og 21 punkt i vertikalretning for å få avbildning av hele blokken, som tilsvarte en tid på 15 timer og 45 minutter per skann. Da blokken var 100 % mettet med radioaktivt vann, ble injeksjon av CO_2 startet ovenfra. Ettersom CO_2 har lavere tetthet enn vann, vil dette kunne gi en gravitasjonsstabil fortregning. Etter endt CO_2 injeksjon ble blokken mettet med radioaktivt vann, og deretter ble det startet injeksjon av CO_2 nedenfra. Nærmere beskrivelse og sammenligning av resultater er gitt i kapittel 6.3 Blokk eksperimenter ved bruk av NTI avbildning.



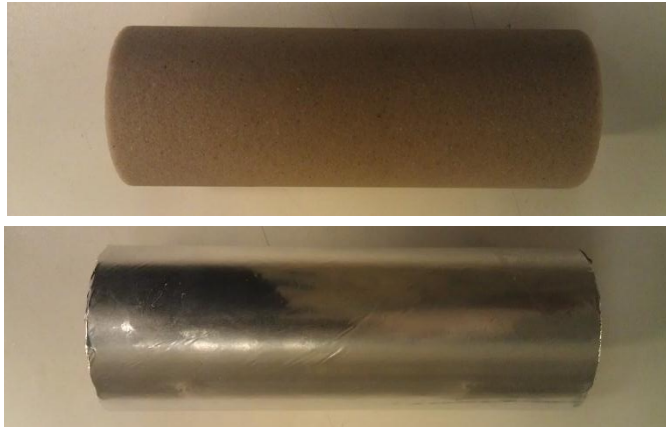
Figur 35: Plott for å bestemme ROI for forsøkene ved bruk av ^{22}Na . De røde sirklene viser toppene av energiintervallene.

Hvilke energi intervall skanneren skulle telle over, ROI, ble bestemt ut i fra å kjøre et skann av høyt konsentrert ^{22}Na . Fikk da to tydelige toppene, vist i Figur 35, hvor intervallet ble bestemt rundt disse toppene. «Channel» øverst i vinduet i Figur 35 viser den første av de to toppene (2040), hvor denne toppen er tilnærmet middelveidien av ROI 1, gitt nedenfor. ROI-intervallene som ble benyttet i forsøkene var som følgende:

- ROI 1: 2016 – 2072
- ROI 2: 5072 – 5128

5.5.3 Klargjøring av kjerne for Hassler kjerneholder

Generelt for kjernene som ble benyttet for eksperimentene gitt i kapittel 5.5.4, 5.5.5 og 5.5.6, er at disse ble klargjort på en slik måte at CO₂ og vann som ble injisert skulle komme i minst mulig kontakt eller ikke kontakt i det helet tatt med gummihylsen rundt kjernene i Hassler kjerneholder. Dette for å verne gummihylsen fra å ødelegges og derav forårsake lekkasje fra omslutningsoljen og inn i kjernen (se kapittel 2.1.1). Materialet som ble brukt for dette var aluminiumsfolie og aluminiumsteip, hvor kjernene ble pakket inn på følgende vis:



Figur 36: Klargjøring av kjerne for Hassler holder.

5.5.4 Resistivitet

På grunnlag av metningsforskjell mellom målinger basert på strålingsintensitet og materialblanse (gitt i kapittel 6.3 Blokkekksperimentet ved bruk av NTI avbildning), av forskning gjort ved NGI og tidligere resistivitetsstudie med hydrat som et estimat av metning gjort ved UiB [26], ble det valgt å utføre et resistivitetseksperiment i denne oppgaven. Dette for å observere muligheten for å korrelere CO₂ metning som funksjon av resistiviteten (elektriske motstanden) over en sandsteinskjerne. Det ble benyttet en pumpe som var koblet til en buffer, der CO₂ og væske fra pumpen var adskilt med et stempel. Oppsettet for dette eksperimentet er tilsvarende som vist i Figur 37, med noen få endringer. Til sammenligning var det montert opp en rørledning mellom injeksjon og produksjonssiden som var tilkoblet én Validyne DP15 differensialtrykkmåler (ikke to separerte absoluttrykkmålere). For å logge den elektriske motstanden, Ω , ble det koblet til to elektriske kabler fra hp 4262A LCR METER, og bort til rørledningen ved både injeksjonssiden og produksjonssiden. For at motstanden skulle logges kun over kjernen ble det montert på to dielektriske isolatorer, MS-02-36 [56], på rørledningen i ytterkant av hvor ledningene var tilkoblet. Ettersom destillert vann ikke leder strøm, ble all rørledning og utstyr mellom de dielektriske isolatorene fylt med destillert vann. Ved produksjonssiden var det koblet til en baktryksregulator som var satt til 83 bar, for at systemet skulle holde dette trykket.

Systemet ble først trykket opp med saltvann, der produksjon ble verifisert ved 83 bar (bypas var da stengt slik at det destillerte vannet holdt seg i ro i rørledningen). Omslutningstrykket ble holdt til 10 bar over pumpetrykket, for å sørge for at ikke noe fluid strømmet på yttersiden av kjernen. Skulle så injisere CO₂ med rater på henholdsvis 1 ml/min, 3 ml/min og 5 ml/min på samme kjerne. Mellom hver av disse ratene ble kjernen mettet med saltvann, ved å flømme kjernen med 3 porevolum saltvann og baktrykk på 83 bar.

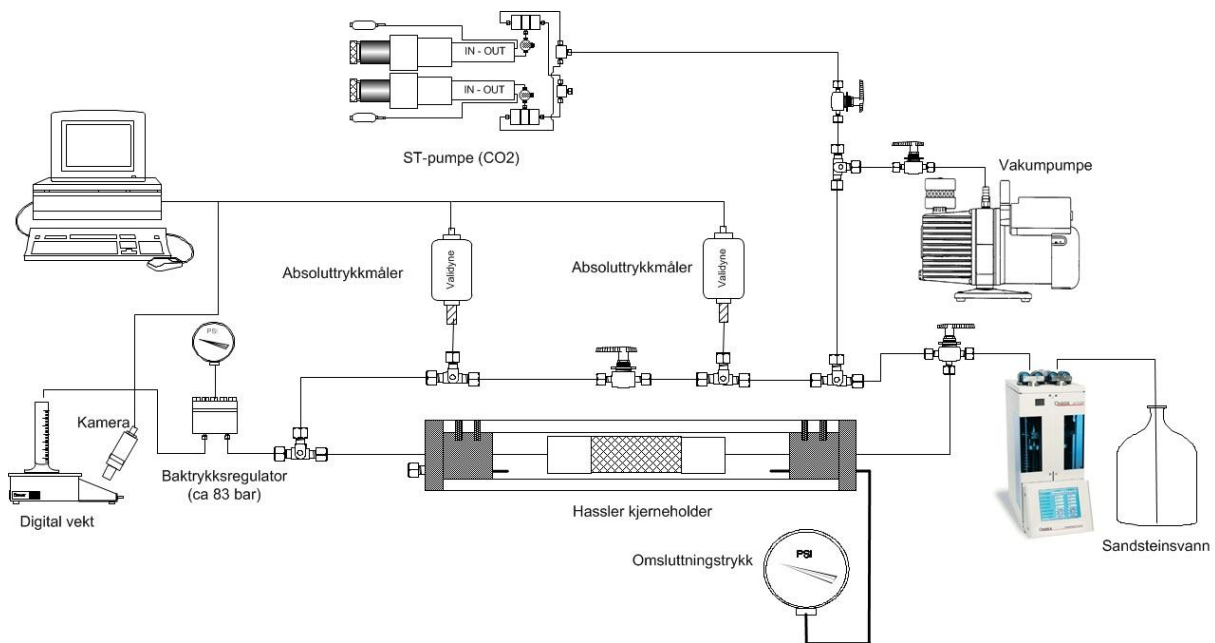
5.5.5 CO₂-fortrengning ved forskjellige rater

Det ble utført fortrenningsprosesser hvor CO₂ fortrengte sandsteinsvann (ikke merket med radioaktivt sporingstoff) i Bentheim sandsteinskjerner ved tre forskjellige rater (henholdsvis 1 ml/min, 3 ml/min og 5 ml/min). Dette for å oppnå en eventuell repeterbarhet for endepunktsmetningen av CO₂ og da sammenligne resultatene med andre eksperimenter utført i denne oppgaven. I tillegg var hensikten å se på rateeffekt ved CO₂ injeksjon som kunne sammenlignes med simuleringsarbeid gjort av Thomas Ramstad ved Numerical Rocks.

Oppsettet ble lagt opp slik at både CO₂ og vann kunne bli produsert, men kun det fortrengende fluidet (CO₂) ble injisert. Det ble satt et baktrykk på 83 bar for å opprettholde en fortrengning med CO₂ i væskeform. Alle kjernene ble injisert med en konstant rate, som gav et konstant kapillærtall for injeksjonen av CO₂ (se kapittel 1.8.1) [23]. Effluenten ble kontinuerlig logget gjennom kjøring av forsøkene ved hjelp av en digital vekt som produksjonsbegerglasset stod på. Begerglasset hadde et tett plastikklokk skrudd på toppen, med lite hull boret i lokket for tilkomst av rørledningen til produksjonen. Dette var for å redusere usikkerheten med fordampning. Differensialtrykket ble kontinuerlig logget med absolutt trykkmålere. Det var plassert én absoluttrykkmåler på injeksjonssiden og én på produksjonssiden. Etter systemet var trykket opp, men før eksperimentet ble satt i gang, ble trykket for hver av trykkmålerne registrert mens ventilen mellom dem var åpen.

Dette for å se på eventuell kalibreringsdifferanse mellom dem, når begge trykkmålerne ble påført samme trykk. Med dette kunne man korrigere avlest differensialtrykk under eksperimentet. I forkant av eksperimentet ble det trykket opp nesten 1 liter CO₂ i en ST-pumpe. Dette ble gjort for å hindre at forsøket måtte stoppes halvveis fordi pumpen gikk tom for CO₂.

Etter hver kjøring av CO₂-injeksjon ble kjernen tatt ut for å se på massebalansen gjennom eksperimentene. Etter kjernen var veid etter CO₂ injeksjon, ble kjernene satt inn i Hassler kjerneholderen og injisert med sandsteinsvann for å mette kjernen igjen før neste rate med CO₂-injeksjon ble satt i gang. Kjernen ble da flømmet med 5 porevolum med sandsteinsvann, og baktrykk lik 83 bar. Etter kjernene var flømmet med vann ble de tatt ut og veid før neste CO₂ injeksjon. Dette kunne gjøre det mulig å få en indikasjon på mengden av residuell CO₂ metning etter hver av de forskjellige injeksjonsratene. Følgende skisse illustrerer oppsettet for eksperimentet:



Figur 37: Oppsett for eksperiment av CO₂ fortregning ved forskjellige rater.

5.5.6 Relativ permeabilitet

Eksperiment for å estimere den relative permeabiliteten for injeksjon av vann og CO₂ med forskjellige fraksjoner ble utført på kalksteinskjerner og sandsteinskjerner. Det ble valgt å gjøre dette med samme type kjernemateriale som ble benyttet for blokkeksperimentene ved den vertikale strømningsriggen ved UiB. Dette for å kunne hente ut eksperimentelle data om denne type kjerne materiale, slik at det kunne utføres simuleringer for å sammenligne, analysere og eventuelt verifisere blokkeksperimentene. Simuleringsprogrammet STARS av CMG var da tenkte å bli benyttet som simuleringsprogram. I tillegg kunne dette gjøre det mulig å sammenligne simulerte data i CMG utført ved UiB, med simuleringer gjort ved Numerical Rocks av Thomas Ramstad.

Oppsettet for målinger av relativpermeabilitet, var tilsvarende som vist i Figur 37. Det var noen endringer og modifikasjoner som ble gjort. Ved injeksjonssiden ble det koblet opp slik at det var mulig å injisere CO₂ og vann samtidig. I tillegg ble det koblet inn en skumgenerator, der hensikten var at CO₂ og vann skulle mikses godt sammen. I etterkant av skumgeneratoren ble det lagt inn en meter med rørledning, for at CO₂ og vann skulle bli mikset ytterligere før det entret kjernen.

Det ble trykket opp nesten 1 liter CO₂ i forkant av eksperimentet i en ST-pumpe for å ikke måtte stoppe forsøket halvveis fordi pumpen eventuelt gikk tom for CO₂. Alle kjernene ble flømmet med en konstant rate på totalt 50 ml/time (totalrate av både vann- og CO₂-injeksjon), hvor fraksjonene av CO₂ skulle endres stegvis for samme kjerne etter hvert som differensialtrykket stabiliserte seg. Differensialtrykket ble logget på lik linje som eksperimentet beskrevet i kapittel 5.5.5 CO₂-fortrengning ved forskjellige rater. Det samme gjelder for logging av effluenten. Den ble logget ved hjelp av en digital vekt med avbildning av vekten ved hjelp av et kamera som tok bilder ved bestemte tidsintervall (hvert minutt).

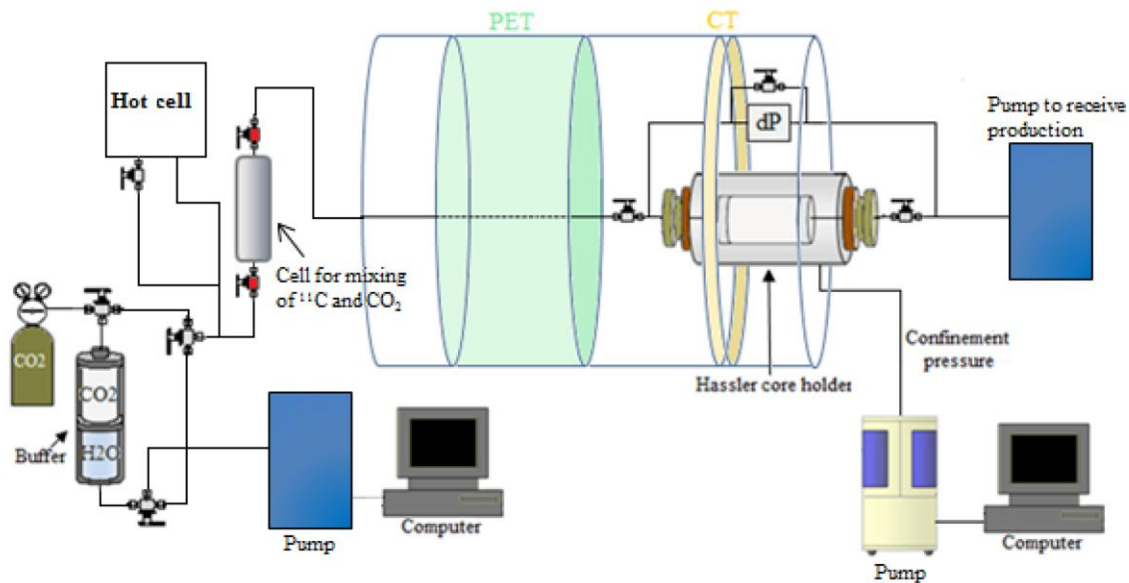
5.5.7 PET/CT: CO₂ injeksjon

For å potensielt få en høyere oppløsning og dermed kunne se CO₂ strømmingen gjennom kjernematerialet bedre enn ved det mer uniforme 2D-plottet, som man får ut fra strømningsriggen ved UiB, ble det besluttet å se på CO₂-strømning ved bruk av en PET/CT skanner.

CO₂ merket med ¹¹C

En visualisering av CO₂ injeksjon ble forsøkt i PET/CT skanneren ved å merke CO₂ fasen med det radioaktive isotopet ¹¹C. Fordelen med å få merket CO₂-fasen er at det kan lettere vise hvordan CO₂ strømmer gjennom kjernemateriale (ettersom det er CO₂ som blir avbildet direkte), ved avbildning i PET/CT skanneren.

CO₂ ble fylt og påført trykk (83 bar) i en buffer. En celle for å mikse CO₂ og ¹¹C var koblet inn i etterkant av bufferen og før Hassler kjerneholderen. På grunn av den korte halveringstiden for ¹¹C (20,4 minutter), ble den produsert på Haukeland i en syklotron i kjelleren til Senter for Nukleærmedisin/PET. I tillegg måtte strålingsintensiteten være høy, ettersom ¹¹C ville gjennomgå flere halveringstider gjennom et eksperiment. ¹¹C ble videre transportert fra syklotronen til "hot cellen" og inn i akkumulator cellen hvor CO₂ og ¹¹C skulle mikses. CO₂/¹¹C skulle mikses ved at ventilen mellom høytrykks CO₂ bufferen og akkumulator cellen ble åpnet, hvor det da ble antatt at CO₂ ble fullstendig blandet med ¹¹C.

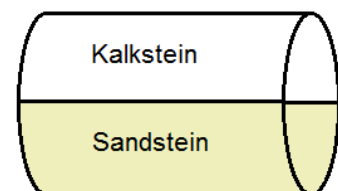


Figur 38: Illustrasjon av det eksperimentelle oppsettet for merket (^{11}C) CO_2 injeksjon i en PET/CT skanner [43].

Det viste seg at dette forsøket ikke lot seg gjennomføre slik som oppsettet var bygget. Når akkumulatorcellen var fylt med ^{11}C , skulle oppsettet trilles fra labben hvor «hot cellen» var plassert og inn hvor PET/CT skanneren var plassert. Dette utgjorde noen minutter arbeid hvor man ville oppholdt seg nær den radioaktive strålingskilden. Det viste seg at det var for høy radioaktivitet omkring oppsettet for å kunne jobbe videre med dette. På grunn av den korte halveringstiden til ^{11}C , ble oppsettet forlatt i et avlukket rom i et døgn for så å rigge det ned (radioaktive strålingen var da redusert til et nivå som var mulig å arbeide rundt). Det ble da besluttet å se på muligheten for å dekke til rørledning og akkumulatorcellen ytterligere med bly. I tillegg å installere trykkstyrte ventiler for å åpne ventilen inn og ut av akkumulatorcellen (se kapittel 7.1 Videre arbeid).

Saltvann merket med ^{22}Na

To forsøk ble kjørt i PET/CT skanneren ved Haukeland. I likhet med eksperimentene som ble kjørt på den vertikale strømningsriggen, så var saltvannet merket med ^{22}Na . Første forsøket var en sandsteinskjerne som var plassert i PET/CT skanneren med en vinkel, θ , i forhold til horisontalplanet. Det andre forsøket lå kjernen horisontalt, der dette var en kombinert sandsteinskjerne og kalksteinskjerne. Ettersom kalk er mindre permeabelt enn sandstein (se kapittel 5.1 Kjernemateriale og 6.1 Kjerne analyse) og at CO_2 er mer mobilt enn vann (se kapittel 1.4.1 Mobilitetsforhold), ble kalksteinen plassert øverst.



Figur 39: Kombinert sandstein og kalkstein.

Ettersom PET/CT skanneren var reservert til pasienter i kontortid alle ukedager, ble oppsettet klargjort og trykket opp i forkant i en lab reservert for UiB ved Senter for Nukleærmedisin/PET. Oppsettet ble så trillet inn ved hjelp av 3 forskjellige traller, hvor Hassler kjerneholderen ble plassert i PET/CT skanneren. Var da kun nødvendig å koble til tre rørledninger til denne, henholdsvis omslutningstrykk, injeksjon og produksjon. Dette gav mulighet for lengst mulig kjøring av

eksperimentene, fredag ettermiddag til mandags morgen. Kjørte først vann-vann injeksjon (injisert vann merket med ^{22}Na) for sandsteinskjernen som var vinklet, før CO_2 injeksjonen ble startet. Kjernen med kombinert sandstein og kalkstein var mettet med saltvann merket med ^{22}Na i forkant, hvor dette eksperimentet da startet direkte med CO_2 -vann fortregning i PET/CT skanneren.

Oppsettet for denne kjøringen var helt likt som er illustrert i Figur 38, med tanke på Hassler kjerneholder, omslutningstrykk og oppsettet på produksjonssiden. Produksjonspumpen fungerte som en baktrykksregulator. Oppsettet på injeksjonssiden ble derimot endret litt ettersom det ikke var CO_2 som skulle merkes med sporingsstoff. Det ble satt opp to buffere, hvor en hadde CO_2 trykket opp til 83 bar og den andre var fylt med RWAT (^{22}Na). En ST-pumpe ble benyttet for å pumpe disse fluidene inn i kjernen.

5.5.8 Test av krympeplast for kjerner

Grunnet tidkrevende arbeid i forbindelse med preparering av blokker, med tanke på å legge på epoksy, vil det være ideelt å se på andre muligheter for å klargjøre en blokk. I tillegg er epoksy skjør for trykk, som kan medføre at den lett sprekker og knekker. (To av fire blokker ble ødelagt på grunn av lekkasje gjennom epoksy. Se kapittel 6.1 Kjerne analyse.) Muligheten for bruk av krympeplast som erstatning for epoksy ble da vurdert og derfor kjørt eksperiment på.

UiB mottok to forskjellige typer krympeplast fra Zeus, for å se om dette kunne egne seg og i så fall hvilken av de som egnet seg best. De to typene krympeplast som skulle bli kjørt eksperiment på var:

- ZEUS D3415, ITEM 0000077918
- ZEUS A0447, ITEM 0000018391

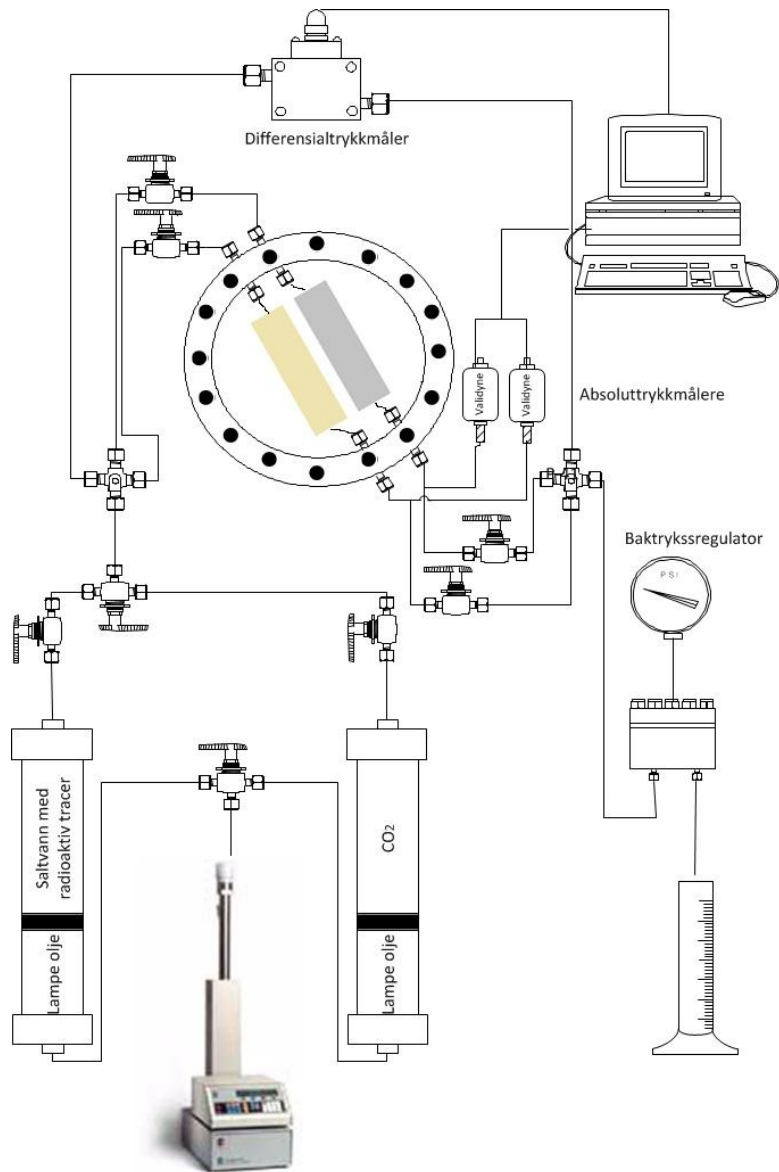
Kjernene ble plassert mellom to endestykker, hvor krympeplasten ble ført over både kjerne og endestykke. Krympeplasten ble så festet og krympet, slik at den lå tett inntil kjernen, ved å varme den ved hjelp av en varmluftpistol. Det viste seg at ZEUS A0447 ikke hadde noe særlig grad av krympeeffekt, så det ble besluttet å kjøre forsøk med kun ZEUS D3415. Den ene kjernen ble da rullet inn med aluminiumsfolie (slik at kjerne og krympeplast ikke hadde direkte kontakt), hvor den andre kjernen hadde kun krympeplast rundt. Dette for å få en indikasjon på om det kan være avgjørende å benytte seg av aluminiumsfolie i tillegg til krympeplast eller ikke.

Oppsettet er vist i Figur 41, hvor det ble koblet opp to sandsteinskjerner parallelt i et trykkammer. Systemet ble så trykket opp til 87 bar og med et omslutningstrykk på 105 bar. Kjernen ble så flømmet separert hver for seg med CO_2 (1 ml/min) til det var tydelig gjennombrudd av CO_2 og produksjonen av vann avtok. Differensialtrykket ble logget ved injeksjon av begge kjernene. Etter kjernen var flømmet med CO_2 ble en ventil lukket på både injeksjonssiden og produksjonssiden, med en absoluttrykkmåler som



Figur 40: Kjerner plassert i trykkammer.

logget trykket innad i hver av kjernene. Denne kunne da registrere trykkendringer som da kunne indikere når eventuelle lekkasjer oppstod for kjernene.



Figur 41: Oppsett for testing av krympeplast ved CO₂-injeksjon.

6 Resultater og diskusjon

Som del av den løpende diskusjonen på verdensbasis vedrørende CO₂ lagring, har dette studiet omhandlet CO₂ injeksjon og lagring i saltvannsformasjoner. CO₂ lagring er relativt nytt, med tanke på utførte eksperimenter og analyser, ved UiB. De viktigste målene med denne oppgaven var;

1. Å kartlegge muligheter for avbildningsteknikker ved forskjellige metoder og dimensjoner av kjernemateriale.
2. Å beskrive strømningsregimet og kartlegge fysiske føringer for lagring av CO₂ i ulike bergarter.

Totalt ble 13 kjerner og 5 blokker ble preparert. Kun to blokker ble fullført eksperiment på, mens alle 13 kjernene ble benyttet ved ulike eksperimenter. Oversikt over kjerner/blokker som ble brukt og til hvilket eksperiment er gitt i kapittel 6.1 Kjerne analyse. Resultater fra eksperimentene er representert i påfølgende underkapitler i dette kapittelet. CO₂ var i flytende tilstand under alle eksperimentene. Kjernematerialet var to dagbruddsbergarter, Bentheim sandstein og Rørdal kalk, som kan gjenspeile saline reservoarformasjoner i Nordsjøen.

Hensikten med eksperimentene og bruk av avbildningsteknikker som PET/CT og NTI (Radioaktiv sporingavbildning) var å se på muligheten for å avbilde CO₂ vannfortrengning. I tillegg å kartlegge muligheten for å kunne utvikle eventuelle forbedringer, optimaliseringer av oppsettene og prosedyre for utførelse av eksperimentene.

6.1 Kjerne analyse

Følgende tabeller gir en oversikt over hvilke kjerner som er benyttet til de forskjellige eksperimentene, samt dimensjoner og egenskaper (porøsitet og permeabilitet) til kjernene.

Tabell 3: Identifisering og egenskaper til blokker.

Blokk ID	Materiale	Bruk	Lengde [cm]	Bredde [cm]	Høyde [cm]	PV [ml]	Porøsitet [%]	Permeabilitet, K _{blokk} [mD]
Blokk_5	Kalkstein	CO ₂ inj. m/ ²² Na vann	15,14	9,50	5,03	350,52	48,39	4,64
Blokk_6	Sandstein	CO ₂ inj. m/ ²² Na vann	15,01	9,63	4,97	174,13	24,24	-
Blokk_7	Sandstein	CO ₂ inj. m/ ²² Na vann	14,70	9,72	4,96	172,29	24,31	-
Blokk_8	Sandstein	CO ₂ inj. m/ ²² Na vann	15,06	9,77	5,04	176,93	23,88	1100
Blokk_9	Sandstein	Levert videre til neste masterstudent	14,60	8,73	5,06	-	-	-

Av disse var det kun Blokk_5 og Blokk_8 der eksperimentene ble fullstendig gjennomført. Eksperimentene med Blokk_6 og Blokk_7 ble avsluttet på et tidlig stadige på grunn av utstyrsfeil og lekkasje, som medførte at blokkene ble ødelagt og ikke kunne benyttes videre. Blokk_9 ble laget parallelt med Blokk_8 for å ha en blokk i bakhånd dersom Blokk_8 skulle feile. Da eksperimentet med Blokk_8 var vellykket, ble den ubenyttede Blokk_9 gitt til neste masterstudent som skal videreføre arbeidet med CO₂ lagring ved UiB. Permeabiliteten for Blokk_7 og Blokk_8 er basert på historisk data, som tilsier at Bentheim sandstein har en permeabilitet på ca. 1,1 Darcy.

Tabell 4: Identifisering og egenskaper til kjerner

Blokk ID	Materiale	Bruk	Lengde [cm]	Diameter [cm]	PV [ml]	Porøsitet [%]	Permeabilitet, K_{blokk} [mD]
2" BH_#1	Sandstein	CO ₂ inj. Væskefase	14,21	5,06	67,20	23,53	1116
2" BH_#2	Sandstein	CO ₂ inj. Væskefase	14,16	5,07	65,94	23,09	1038
2" BH_#3	Sandstein	Resistivitet; CO ₂ væske-fase	14,21	5,07	66,24	23,11	1063
2" BH_#4	Sandstein	CO ₂ inj. Væskefase	14,20	5,06	66,24	23,20	1098
2" BH_#5	Sandstein	PET/CT; vinkel	14,19	5,07	65,02	22,74	1184
2" BH_#6	Sandstein	PET/CT; vinkel (reserve)	13,97	5,06	64,16	22,84	1167
2" BH_#7	Sandstein	CO ₂ inj. Væskefase / Rel. Perm	13,98	5,04	63,03	22,64	1136
2" PC_#1	Kalkstein	Rel.perm. CO ₂ /vann	12,28	4,95	111,96	47,36	1,29
2" PC_#2	Kalkstein	Rel.perm. CO ₂ /vann	12,29	4,94	112,18	47,54	1,56
2" PC_#3	Kalkstein	Rel.perm. CO ₂ /vann	6,27	5,06	58,36	46,36	1,48
1,5" BH_#1.1	Sandstein	Krympeplast	14,39	3,76	36,64	22,95	≈1100
1,5" BH_#1.2	Sandstein	Krympeplast	14,46	3,76	37,18	23,21	≈1100
2" PC/BH_#1	Sandstein/ Kalkstein	PET/CT: Kombinert sandstein og kalkstein	13,14	4,61	90,28	PC: 54,66 BH: 28,36	PC: ≈1-4 mD BH: ≈1100 mD

Fra Tabell 4 kan man se at sandsteinskjernene #1 til #7 er relativt homogene med tanke på porøsitet og permeabilitet. De to sandsteinskjernene som ble brukt for å teste funksjonen av krympeplast, ble ikke målt permeabilitet på. Dette fordi hovedhensikten ved dette eksperimentet var å teste krympeplasten, og i tillegg er det historisk gode data på at Bentheim sandstein har en permeabilitet på ca. 1,1 Darcy.

6.2 CO₂ løselighet i vann

I etterkant av forsøket for CO₂ løselighet i vann, ble volum kalksteinsvann i bufferen målt og sammenlignet med det opprinnelige volumet som var i bufferen før det ble startet å flømme CO₂. Det viste eksakt samme volum, som opprinnelig var satt i bufferen (100 ml). I tillegg viste det ikke tegn til fuktighet i målebegeret hvor produksjonen samles.

Ut i fra løselighets-plottet vist i Figur 17, så skulle CO₂ løseligheten teoretisk havne i underkant av 8 kg CO₂/100 kg H₂O, basert på eksperimentets trykk- og temperaturforhold (romtemperatur (21 °C) og 83 bar) og forbehold om at CO₂ blandes med rent vann. CO₂ løseligheten reduseres dersom mengden av løst materiale i vannkomposisjonen øker [3], som vil være gjeldende for saltvannet som ble benyttet i eksperimentet i denne oppgaven.

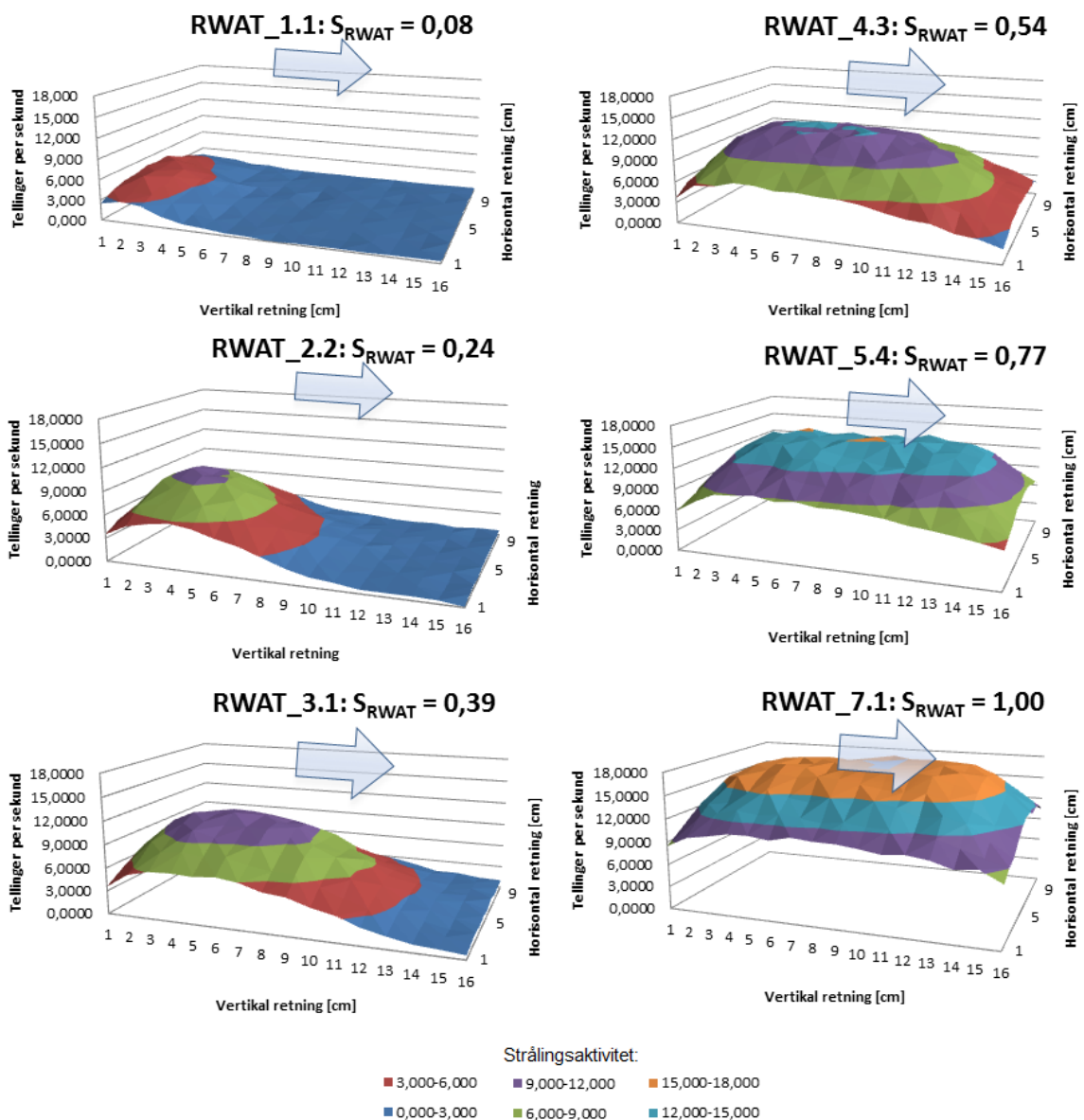
På grunnlag av at det ikke viste noen endring i mengde vann, sammenlignet med før og etter eksperimentet, ble det besluttet å injisere ren CO₂ for eksperimentene videre i denne oppgaven.

6.3 Blokkes eksperimenter ved bruk av NTI avbildning

Det viste seg å være vanskelig å preparere blokkene med epoksy, hvor 50 % av blokkene som ble preparert og forsøkt brukt under eksperiment ble ødelagt. Totalt ble det gjort forsøk på to blokker, da henholdsvis en kalksteinsblokk og en sandsteinsblokk. Resultatene for disse to eksperimentene som ble fullført blir representert og diskutert i dette kapitlet. For nærmere beskrivelse av oppsettet, se kapittel 5.5.2 Blokk eksperimenter ved bruk av NTI avbildning.

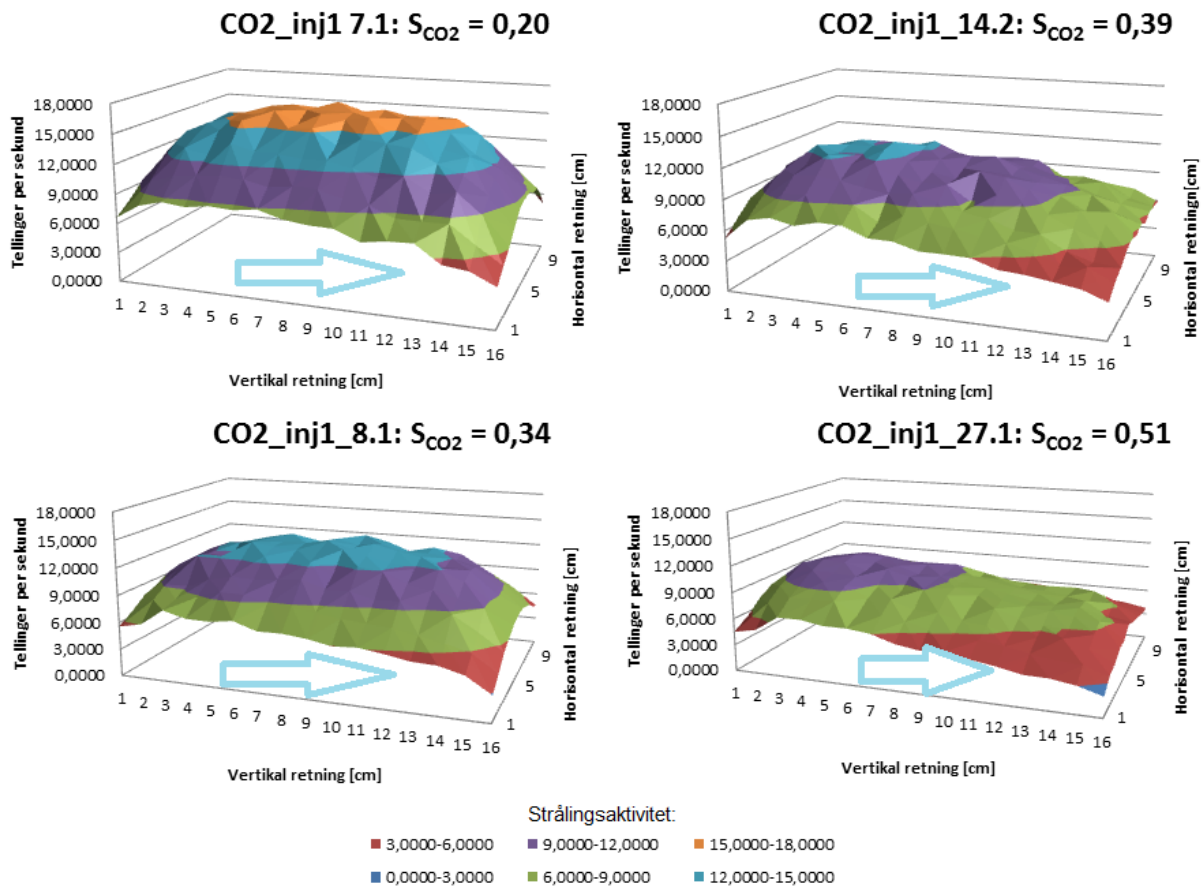
6.3.1 Kalksteinsblokk

Kalksteinsblokken ble først mettet med radioaktivt vann ved injeksjon med en baktrykksregulator satt til 83 bar. Figur 42 viser vann-vann fortrengningen for injeksjonsprosessen. 100 % metning med radioaktivt vann ble konkludert nådd når strålingsendringen mellom skann stagnerte.



Figur 42: Injeksjon i kalksteinsblokk av kalksteinsvann løst i ^{22}Na .

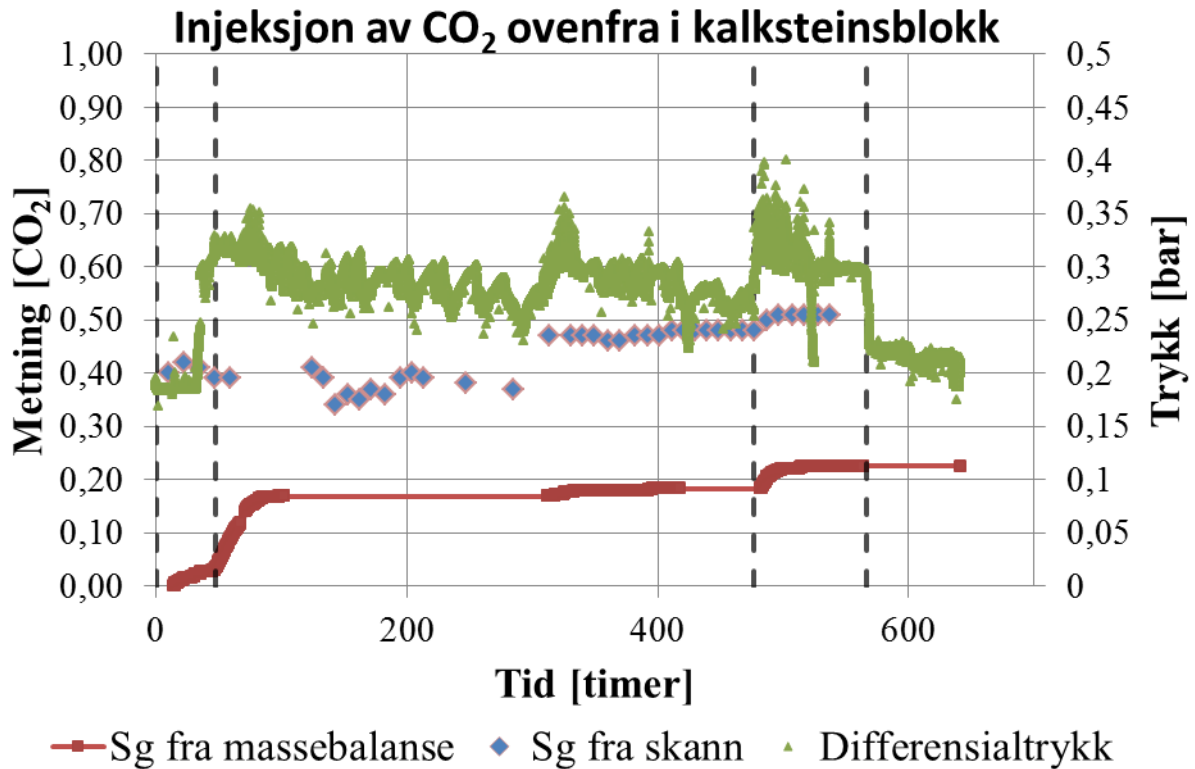
Ettersom det er vann som fortrenger vann vil det være en blandbar fortrenkning, og det vil oppnås en stabil fortrenkningsfront. Dette kan man se av frontforløpet i Figur 42, hvor det opprettholdes en stabil front frem til blokken er 100 % mettet med radioaktivt vann. Injiserte så CO₂ fra toppen av blokken med rater på 0,5, 2 og 5 ml/time, hvor raten ble økt underveis for å kunne se på effekten av rateendring. Den initielle strålingsintensiteten før CO₂ injeksjon er vist i Figur 42, $S_{RWAT} = 1,00$.



Figur 43: Injeksjonsprosess av CO₂ fra toppen av kalksteinsblokken.

Ved CO₂ injeksjon i en vannfylt kalksteinsblokk vil mobilitetsforholdet bidra til en mer ustabil fortrenkning. Til gjengjeld ble CO₂ injisert fra toppen for å få bidrag av gravitasjonen til en mer stabil fortrenkning, på grunn av tetthetsforskjellen mellom CO₂ og vann. Ved eksperimentets trykk- og temperaturforhold vil tetthetene være henholdsvis $\rho_{CO_2} \approx 0,7$ g/ml og $\rho_{vann} \approx 1,0$ g/ml. Fra Figur 43 kan man se at det i starten av injeksjonsprosessen (CO₂_inj1 7.1 og CO₂_inj1 8.1) ikke var en tydelig fortrenkningsfront, men en reduksjon av strålingsintensitet jevnt over hele blokken. Ved endt CO₂ injeksjon kan man se at strålingsintensiteten er lavest ved bunnen av blokken, som vil si at det er høyest konsentrasjon av CO₂ i dette område. Dette kan tyde på at mobilitetsforholdet har vært dominerende for fortrenkningsprosessen, fremfor å oppnå en gravitasjonsstabil fortrenkning. Det var ikke god nok oppløsning for å kunne konkludere for hvordan CO₂ har beveget seg gjennom blokken, men et mulig frontforløp er at det har dannet seg CO₂-fingrer allerede ved injeksjonssiden for så at sveipeffekten har økt mot bunnen av blokken med et større bidrag fra gravitasjonen i dette område. En annen teori kan være at blokken var mer heterogen i toppen sammenlignet med bunnen, som da

kan medføre større fingringseffekt i det område. Effekten av rateending, metningen beregnet fra materialbalansen og metningen beregnet fra strålingsaktivitet er visualisert i plottet vist i Figur 44. Metningsendringen fra materialbalanse er ikke estimert videre ut i forsøket (henholdsvis ved injeksjon av sporingsvann og CO₂ injeksjon fra bunnen), ettersom data gikk tapt.



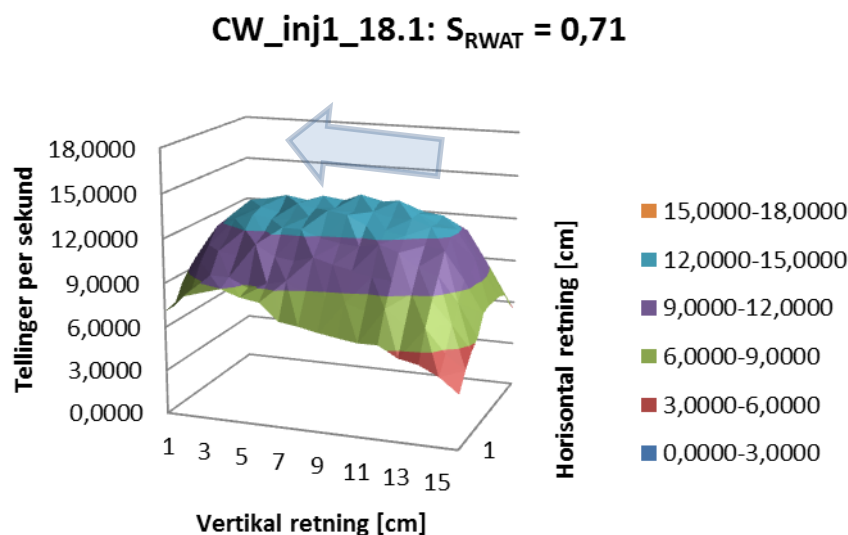
Figur 44: Metningsendring fra materialbalanse og strålingsaktivitet ved CO₂ injeksjon fra toppen av blokken.

De fire loddrette stiplede strekene markerer endringer i injeksjonsprosessen. Den første streken, som går helt langs y-aksen i Figur 44, markerer start av CO₂ injeksjon ved 0,5 ml/time. Ved strek nr 2 fra venstre ble injeksjonsraten økt til 2 ml/time. Ved strek nr 3 fra venstre ble injeksjonsraten økt til 5 ml/time og ved strek nr 4 fra venstre ble pumpen stoppet for injeksjon av CO₂. Det ble observert økt endepunktsmetning for CO₂ ved å øke injeksjonsraten. Dette både basert på strålingsintensitet og materialbalanse.

Ved CO₂ injeksjon for kalksteinsblokken ble det nådd en metning beregnet av strålingsdata på $S_{CO_2} = 0,51$. Til sammenligning gav metningen basert på materialbalanse en endepunktsmetning på $S_{CO_2} = 0,23$. Dette er en stor differanse mellom metningen i en og samme blokk til samme tid, hvor det kan stilles usikkerheter for metningsberegning ved både materialbalanse og strålingsintensitet. En usikkerhetskilde for dette eksperimentet er at det ikke ble opprettholdt en konstant avstand på skanneren fra trykkammeret. Skanneren kunne til tider bevege seg flere centimeter enten til eller fra blokken i trykkammeret. Typisk tidspunkt for når slikt kunne oppstå, er når skanneren ble fylt på med nitrogen (brukt for avkjøling av skanneren, som må fylles på hver tredje dag). Dette ble en erfaringsoverføring for neste blokkeksperiment. Strålingsaktiviteten avtar med avstanden fra

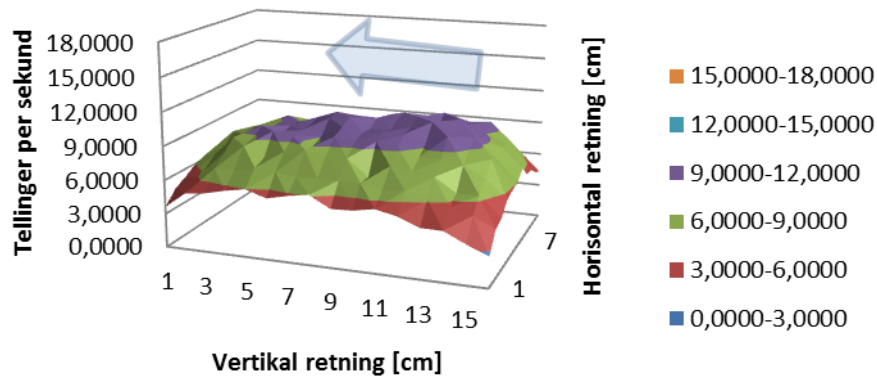
strålingskilden. Det har under dette eksperimentet medført store usikkerheter for strålingsavlesningen som er blitt utført. En teori for at metningen beregnet fra strålingsintensiteten er større enn for materialbalanse, kan være at skanneren var helt inntil blokken da den tok 100 % skann av RWAT, som medfører en høy strålingsintensitet, for så at den ble flyttet lengre vekk i fra trykkammeret ved CO₂ injeksjon. Det vil gi en lavere strålingsintensitet for CO₂-skannet enn det som er reelt sammenlignbart mot normal-skannet (100 % skann av RWAT). En lavere strålingsintensitet, gir høyere estimat av CO₂ metning i blokken. En annen usikkerhet for strålingsintensiteten, kan være absorpsjon av radioaktivt sporingsstoff i kjernematerialet. Dette vil til gjengjeld øke den radioaktive intensiteten, og dermed økt beregnet CO₂-metning. Det ble, som nevnt i kapittel 5.5.2 injisert flere porevolum med rent saltvann for å hindre en slik absorpsjon. Det da ble antatt å kunne se vekk fra en slik absorpsjonsprosess. Svakheter med materialbalanse vil være at CO₂ løste seg opp i vann, der noe av dette vannet ble værende i blokken. Metning CO₂ i blokken vil da være volum vann produsert pluss mengde CO₂ som er løst i vannet, hvor materialbalanse da vil gi noe underestimat av CO₂ metningen. I tillegg vil noe vann løse seg opp i CO₂. Dette fordampet da ble produsert, noe som medførte at denne mengde vann som fordampet, ikke kunne bli observert som produksjon. Dette førte til ytterligere laver CO₂-metning beregnet av materialbalanse. Metningsberegninger basert på materialbalansen, antas likevel å gi mer pålitelige resultater enn det som er beregnet ut i fra strålingsintensiteten i dette eksperimentet. Dette fordi usikkerheten med bevegelse av skanneren antas å gi større usikkerhet, enn usikkerheten som er nevnt for materialbalanse.

Materialbalansen videre ut i eksperimentet er ikke beregnet ettersom data falt vekk fra denne perioden. Metningen som er blitt estimert videre etter CO₂ injeksjon fra toppen av blokken, er kun beregnet ut i fra strålingsintensiteten. Figur 45, Figur 46 og Figur 47 viser endepunktsmetningene til henholdsvis injeksjon av radioaktivt vann etter første CO₂ injeksjon, CO₂-injeksjon fra bunnen og injeksjon av radioaktivt vann etter andre CO₂-injeksjon.



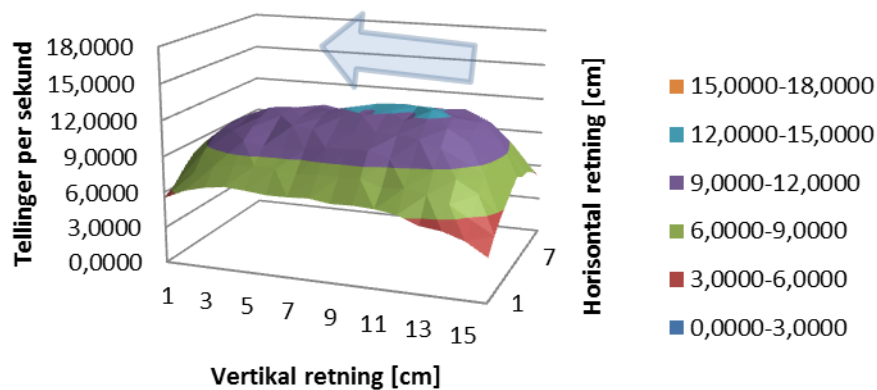
Figur 45: Endepunktsmetning for springsvann1 injisert fra bunnen av blokken.

CO₂_inj2_8.1: S_{CO₂} = 0,48



Figur 46: Endepunktsmetning for CO₂ injisert fra bunnen av blokken.

CW_inj2_8.1: S_{RWAT} = 0,63



Figur 47: Endepunktsmetning for springsvann2 injisert fra bunnen av blokken.

Basert på den store differansen mellom metningsberegningene (materialbalanse og strålingsaktivitet) ved første CO₂ injeksjon og i tillegg til tider små mengder produksjon av olje, er det ikke mulig å trekke noen konklusjon for eksakt potensiell endepunktsmetning ved injeksjon av CO₂ i kalksteinsblokken. Det som likevel kan hentes ut fra strålingsdataene er visualiseringen av fortrenningsfronten og metningsfordelingen innad i blokken. Strålingsdataene viser til en stabil front ved vanninjeksjon, mens ved CO₂ injeksjon blir det observert en mer uniform og ustabil fortrenning. Dette er et resultat av mobilitetsforholdet mellom vann og CO₂. Det kan også diskuteres hvorvidt gravitasjonen og injeksjonsretningen (injeksjon fra topp eller bunn på blokken) påvirker endepunktsmetningen for en kalksteinsblokk. Endepunktsmetningen ved injeksjon fra toppen av blokken var på 51 % CO₂, mens ved injeksjon fra bunnen endte metning på 48 % CO₂. Det var forventet å oppnå en lavere metning ved injeksjon fra bunnen, på grunn av at CO₂ har lavere tetthet enn vann. Initell radioaktiv vannmetning før CO₂ injeksjon fra toppen var 100 %, mens fra

bunnen var den på 71 %. CO₂ metningen økte da med 51 % ved injeksjon fra toppen, mens fra bunnen økte den med 19 %. Årsaken til at total endring av CO₂-metning var en del mindre ved CO₂ injeksjon fra bunnen enn fra toppen, antas å komme av gravitasjonens bidrag til stabilisering av fortrenningsfront ved injeksjon fra topp. Et bidrag for lavere CO₂-metning ved injeksjon fra bunnen kan også komme av at kjernen tidligere er blitt utsatt for CO₂ injeksjon. Dette kan ha resultert i fingering og kanaler som CO₂-strømmingen i hovedsak fulgte etter gjennombruddet. I tillegg oppløser karbonsyren kalken som kan danne kanaler gjennom blokken. At blokken har blitt utsatt for CO₂ injeksjon i forkant kan dermed medføre at CO₂-vannfortrengningen vil bli redusert, fordi CO₂ vil i hovedsak strømme i kanalene som allerede var dannet da blokken ble injisert med CO₂ fra bunnen. En mulig teori vil da være at det vil kunne observeres en høyere endepunktsmetning av CO₂ ved injeksjon fra bunnen, dersom den ikke har blitt utsatt for injeksjon av CO₂ på et tidligere tidspunkt. Det var ikke mulig å visualisere en eventuell fingerings-prosess ved blokkekperimentene gjort ved strømningsriggen på UiB, på grunn av at oppløsningen på skannet var for lite og altfor uniform.

Det ble til tider observert små mengder olje som ble produsert. Det ble bestemt å fortsette med eksperimentet ettersom det tilsynelatende ikke var kommunikasjon mellom omslutningstrykk og pumpetrykk. Disse trykkene holdt seg stabilt på henholdsvis 100 bar omslutningstrykk og 83 til 86 bar pumpetrykk. Systemet ble trykket ned og blokken tatt ut etter endt eksperiment. Det ble da observert skader på både blokk og epoksy lagene rundt. Enden på blokken, vist i Figur 48, viser at blokken har blitt utsatt for karbonsyre og kalken har blitt oppløst. Øverst i bildet, markert med en rød sirkel, kan man se at det er blitt dannet et hulrom mellom epoksy og kalksteinskjerne. Dette kan ha medført dannelse av kanaler som kan ha bidratt til å redusere fortrengingen av vann (fingering). Dette hulrommet ble registrert på den siden av blokken som var plassert mot toppen av trykkammeret. Dette kan ha gitt bidrag til at strålingsintensiteten har vært ytterligere lavere ved denne siden av blokken.

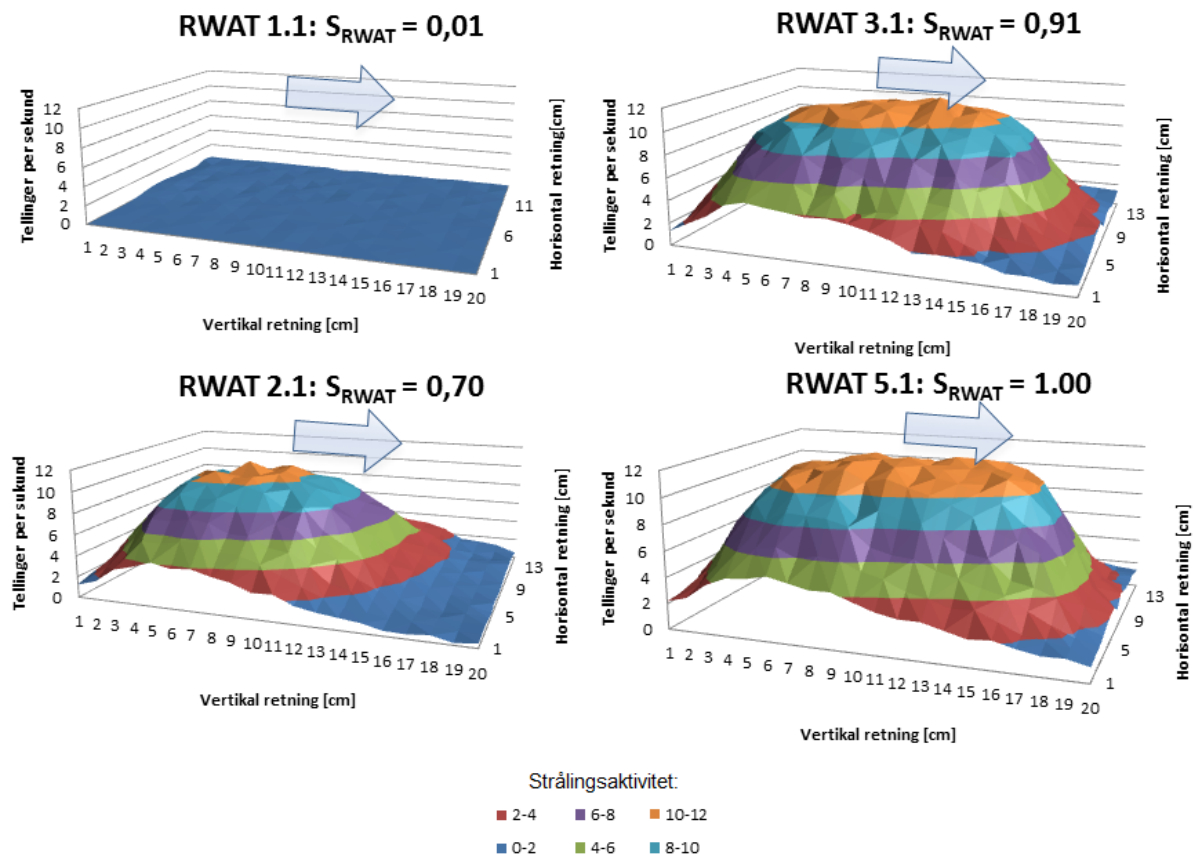


Figur 48: Kalksteinsblokk etter endt eksperiment.

6.3.2 Sandsteinsblokk

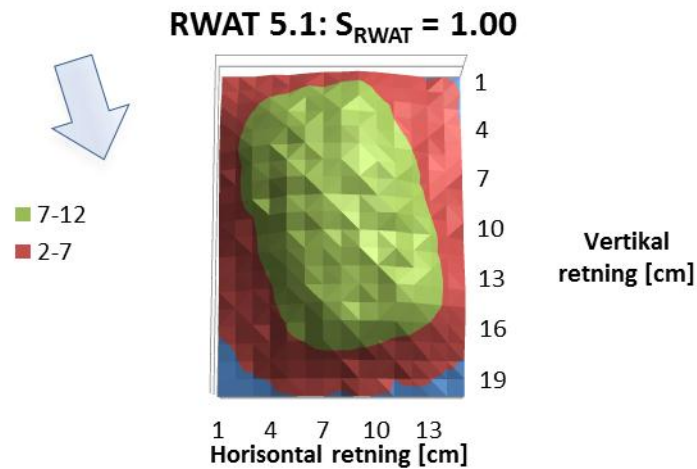
Etter eksperimentet med kalksteinsblokken ble det utført et tilsvarende eksperiment med en sandsteinsblokk. Det ble dermed tatt med mye lærdom fra eksperimentet med kalksteinsblokken, som ble benyttet for sandsteinsblokken. Skanneren ble plassert lengst mulig inn mot trykkammeret (ble informert om at det finnes en justerings skrue på venstre side som kan finjustere avstanden mellom skanner og trykkammer). Skannere ble da festet i denne posisjonen ved bruk av en lastestropp. Under eksperimentet var det ingen tegn til oljeproduksjon. Blokken var også helt fin etter endt eksperiment (ingen sprekkdannelser i epoksyen).

Figur 49 viser den blandbare vann-vann fortregning ved injeksjon av sandsteinsvann merket med ^{22}Na . Strålingsdataene visualiserer en stabil fortrenningsfront, med ingen tegn til fingering gjennom fortrenningsprosessen. Dette samsvarer med den blandbare fortregningen i kalksteinsblokken. Ved slutten av injeksjonsprosessen stabiliserte strålingsintensiteten seg, som indikerte at blokken var 100 % mettet med radioaktivt vann.



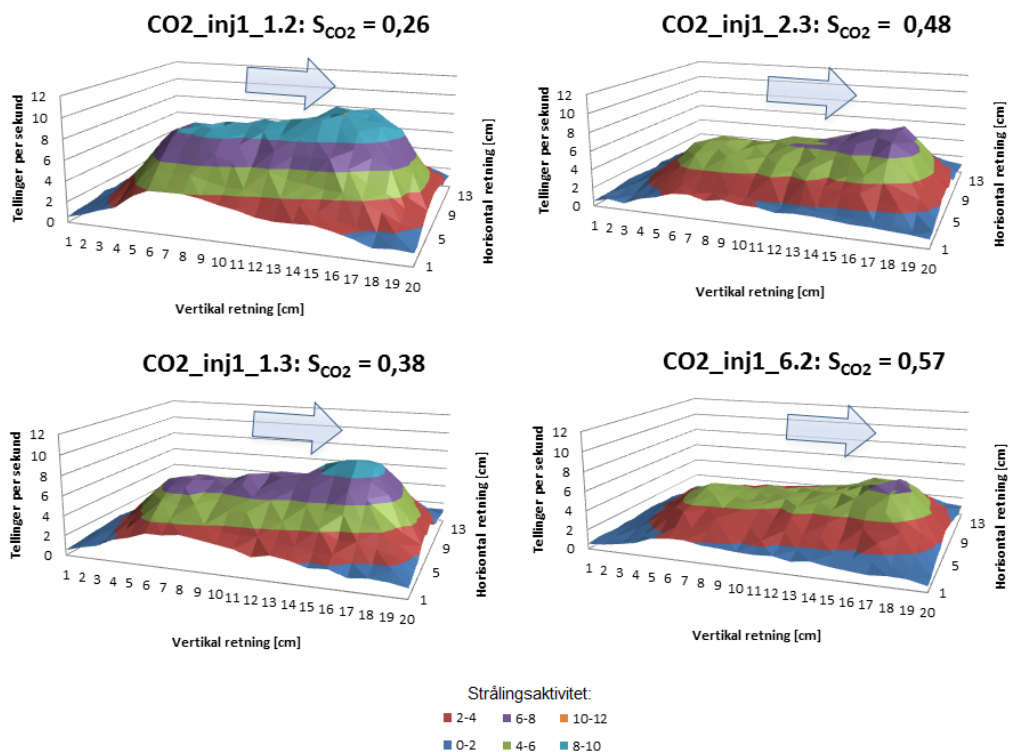
Figur 49: Injeksjon av radioaktivt vann i sandsteinsblokk.

Blokken var plassert tilnærmet vertikalt i strømningsriggen (hadde en liten vinkel). Skannet som ble tatt når blokken var 100 % mettet med radioaktiv væske, illustrerer orienteringen på blokken. Følgende plott viser blokken basert på radioaktiv strålingsaktivitet, sett fra samme vinkel som i Figur 33.



Figur 50: Illustrerer vinklingen på blokken i vertikalriggen for sandsteinsblokk 100% mettet med radioaktivt vann.

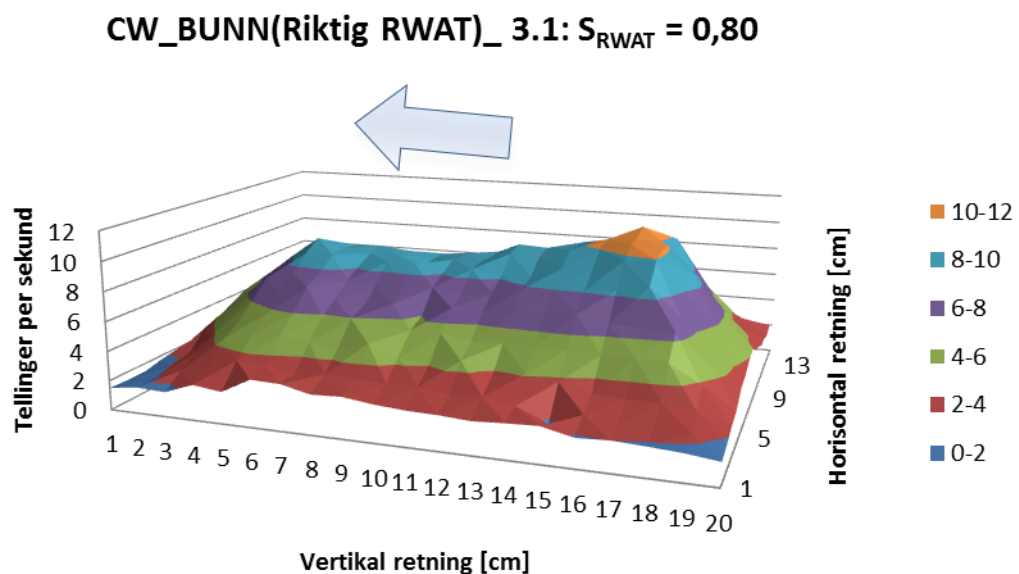
Injeksjon av CO₂ fra toppen (2,5 ml/time) ble startet etter at blokken var 100 % mettet med radioaktivt vann. Startskanet før CO₂-injeksjon, er gitt i Figur 49, der sandsteinsblokken hadde metning; $S_{RWAT} = 1,00$. Endepunktsmetningene ved CO₂ injeksjon ble, $S_{CO_2} = 0,57$. CO₂-injeksjonen ble avsluttet når strålingsintensiteten mellom skann stagnerte.



Figur 51: CO₂ injeksjon fra toppen i sandsteinsblokk.

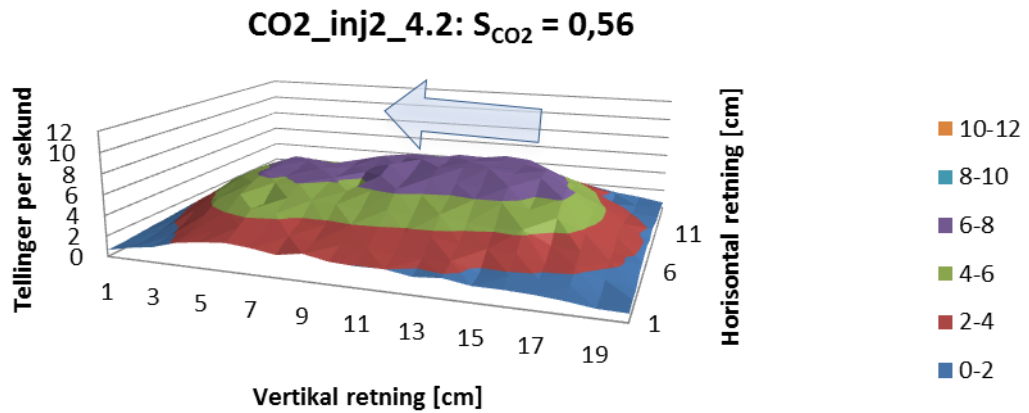
Figur 51 visualiserer CO₂-injeksjon i sandsteinsblokken fra toppen, der det ble observert en mer ustabil fortrenkning sammenlignet med den blandbare vann-vann fortrenkningen. Ved injeksjon fra toppen av blokken, vil gravitasjonen gi et fordelaktig bidrag for økt stabil fortrenkning (tetthetsforskjell mellom CO₂ og vann). Likevel ble det ikke observert en klar front for fortrenkningsprosessen. Det kommer av det ufordelaktige mobilitetsforholdet mellom CO₂ og vann. På grunn av oppløsningen til data hentet fra den vertikale strømningsriggen ved UiB, er det ikke mulig å se klare fingeringsprosesser. Den høyere CO₂-metningen ved injeksjonssiden (toppen av blokken) sammenlignet med produksjonssiden, indikerer at det ble dannet en fingeringsprosess som gradvis reduserte sveipeffektiviteten gjennom blokken.

For å mette blokken med radioaktivt vann og kunne se på en eventuell residuell CO₂-metning (Kapillært fanget CO₂), ble det injisert radioaktivt vann fra toppen. Det ble registrert lavere endepunkts-vannmetning enn forventet basert på materialbalanse ($S_{RWAT} = 0,53$), samt på antall radioaktive tellinger per sekund. Startet injeksjon av radioaktivt vann fra bunnen, da teorien tilsier en mer stabil front med bidrag fra gravitasjon (CO₂ har lavere tetthet enn vann). Gravitasjonsbidraget gav da økt endepunktsmetning for vann. Dette økte vannmetningen sett ut i fra materialbalanse, men radioaktiviteten i blokken korresponderte ikke til økningen i materialbalanse. Det ble da registrert at vannet som ble pumpet inn ikke hadde samme strålingsintensitet som det initielle vannet som ble brukt før CO₂ injeksjonen (radioaktivt vann ved normaliseringsskannet). Byttet da ut vannet i bufferen til sandsteinsvann med riktig strålingsintensitet og fortsatte injeksjonen av vann fra bunnen. Det ble injisert i overkant av 1,7 porevolum med sandsteinsvann med riktig radioaktivitet. Etersom blokken var mer eller mindre allerede mettet med vann, ble det antatt at alt vann i blokken var byttet ut med riktig RWAT etter 1,7 porevolum injisert. Fra Figur 54 kan man se at den transiente perioden avtok og metningen mellom materialbalanse og strålingsintensitet begynte å korrespondere. Det ble oppnådd endepunktsmetning basert på materialbalanse ($S_{RWAT} = 0,72$). Følgende figur viser skann etter endt injeksjon av sporingsvann og metning beregnet ut i fra strålingsintensitet.



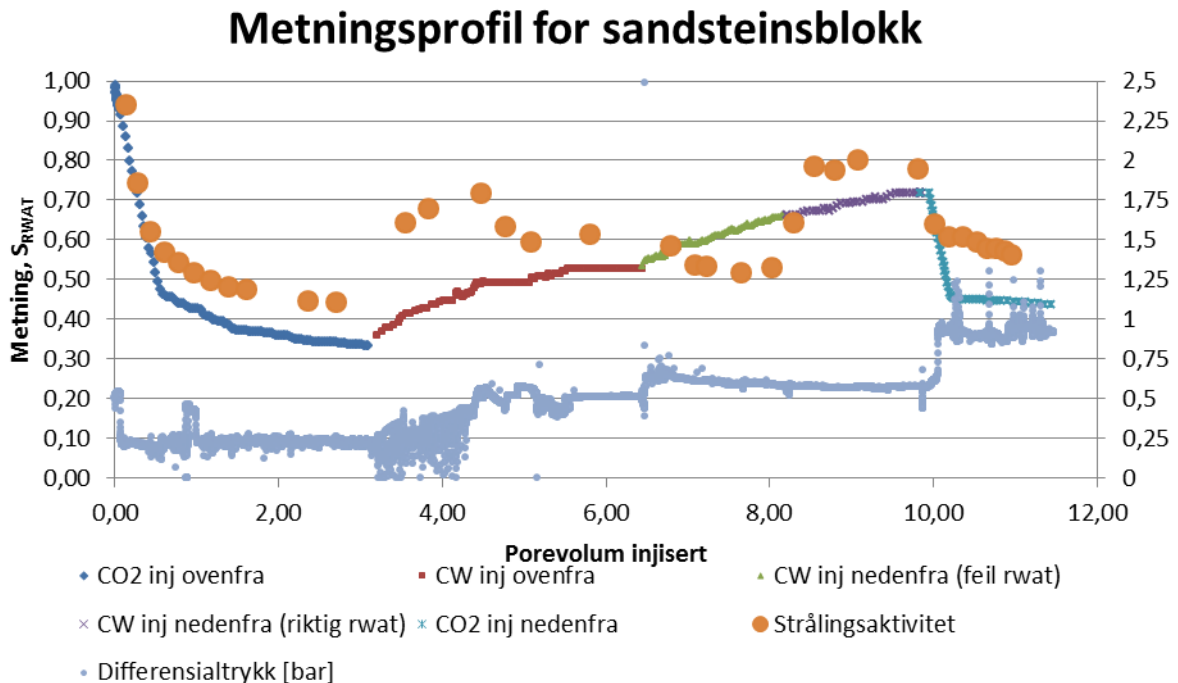
Figur 52: 100 % skann etter injeksjon av radioaktivt vann fra bunnen.

Etter at blokken hadde nådd endepunktsmetning med vann, ble det injiserte CO₂ fra bunnen av blokken for å kunne se på det ufordelaktige bidraget av gravitasjon. Basert på strålingsintensitet, ble det beregnet en CO₂-metningen på $S_{CO_2} = 0,56$.



Figur 53: Skann etter endt CO₂ injeksjon fra bunnen av blokken.

Et oversiktsplott over hele eksperimentet er gitt i Figur 54, som viser metningsendring basert på både materialbalanse og radioaktivitet, samt differensialtrykket over blokken. Plottet starter ved injeksjon av CO₂ ovenfra, for så å bli injisert med radioaktivt vann (CW), og tilslutt injisert med CO₂ nedenfra. Injeksjonen av det radioaktive vannet etter den første CO₂ injeksjonen var tredelt, slik som beskrevet tidligere. Metningsprofilen basert på strålingsdata er ikke gjeldende for injeksjon av det radioaktive vannet, ettersom deler av denne injeksjonsprosessen ble injisert med sandsteinsvann av feil radioaktiv intensitet.



Figur 54: Metningsprofil av sandsteinsblokk.

CO₂ metningen ved injeksjon fra toppen av blokken endte på 57 %, estimert ut i fra strålingsintensitet. Sett ut i fra materialbalansen ble det oppnådd en enda høyere CO₂ metning, $S_{CO_2} = 0,66$. Dette er motsatt av hva som ble observert for kalksteinsblokken. Som vist i Figur 54 øker differansen mellom metning beregnet ut i fra strålingsintensitet og materialbalanse, utover i den transiente perioden. Når vann blir produsert ved CO₂ injeksjon kan noe av saltene i vannet bli liggende igjen i porene (kapittel 2.1.1 CO₂-H₂O blanding). Dette saltet kan fortsatt være merket med ²²Na. I tillegg er det en mulighet at noe av det radioaktive sporingstoffet blir absorbert av kjernematerialet. Det blir antatt at dette ikke vil være tilfelle, ettersom denne usikkerhetskilden er redusert ved å injisere flere porevolum med rent sandsteinsvann i forkant av den radioaktive injeksjonsprosessen. Dersom en slik absorpsjon likevel skulle være tilfelle, vil dette bidra til forklaringen for hvorfor differansen mellom metningsberegningen av materialbalanse og strålingsintensitet øker utover i CO₂-injeksjonsprosessen. Slike usikkerheter medfører at estimert vannmetning i blokken, basert på strålingsintensitet, er høyere enn det som vil være reelt. Usikkerheter basert på materialbalanse der vann blander seg med CO₂ og CO₂ blander seg med vann, vil som nevnt i diskusjon for kalksteinsblokken, bidra til et underestimat av CO₂-metning. CO₂-endepunktsmetning etter injeksjon fra toppen er høy (66 %), basert på materialbalanse. Blir derfor antatt at usikkerhetene i metningsberegningen basert på strålingsintensitet er høyere enn for beregningene basert på materialbalanse. Resultatet for CO₂-metning basert på materialbalanse blir da også her antatt som mer gjeldende enn resultatet basert på strålingsintensitet.

For å teste kapillært fanget CO₂ ble det injisert sporingvann etter endt CO₂. Effekten av gravitasjon ble observert ved vanninjeksjon. Endepunktsmetningen ved vanninjeksjon fra toppen, stabiliserte seg på $S_{RWAT} = 0,53$ (materialbalanse). Ved å deretter injisere vann fra bunnen ble det oppnådd en endepunktsmetning på $S_{RWAT} = 0,72$ (materialbalanse). Dette var forventet, ettersom fortregningen fikk bidrag fra gravitasjonen (tetthetsforskjell mellom CO₂ og vann) for en økt stabil fortregningsprosess. Metningsprofilen basert på strålingsintensitet ved injeksjon av sporingvann etter første CO₂-injeksjon vil ikke være gjeldende. Dette fordi deler av injeksjonen var med sporingvann av for lav strålingsintensitet. Strålingsintensiteten ved endt sporingvann injeksjon ansees derimot som gjeldende, ettersom det på dette stadiet er antatt at alt vann i blokken var blitt byttet ut med sporingvann av riktig strålingsintensitet. Ved CO₂ injeksjon fra bunnen, ble det observert en lavere endepunktsmetning for CO₂, $S_{CO_2} = 0,44$. Dette kommer av at CO₂ får et ufordelaktig bidrag av gravitasjonseffekten, fremfor å injisere CO₂ fra toppen.

Sammenlignet med resultatet gitt i kapittel 6.5, ble det for begge metningsestimatene (radioaktiv stråling og materialbalanse) oppnådd en høyere metning ved injeksjon fra toppen på sandsteinsblokken. Metningen beregnet fra materialbalansen, som antatt gir et estimat med minst usikkerhet, indikerer en CO₂ metning på omtrent 10 % høyere ved gravitasjonsstabil fortregning enn ved horisontal fortregning (vist i kapittel 6.5). Begge eksperimentene er utført på samme type sandstein (Bentheim). Ved injeksjon fra bunnen av blokken ble det også observert en høyere CO₂ metning (basert på materialbalanse) enn ved horisontal fortregning. Dette var ikke forventet ettersom CO₂ har lavere tetthet enn vann. Det var da antatt å få en mer ustabil fortregning, som vil medføre en lavere CO₂-metning sammenlignet med horisontal fortregning. En faktor her, er at den residuelle CO₂ metningen ved sporingvann-injeksjon fra bunnen av blokken var 20 %. Det vil si at ved injeksjon av CO₂ fra bunnen, ble det en økning av CO₂-metningen med 24 %. Resultatet tilsier da en lavere fortregningseffektivitet ved injeksjon fra bunnen av blokken enn ved fortregning

horisontalt. Ved injeksjon på vinklet sandsteinskjerne, gitt i kapittel 6.7, ble det oppnådd en CO₂ metning på 24 % ved injeksjon nedenfra i en 100 % mettet sandsteinskjerne.

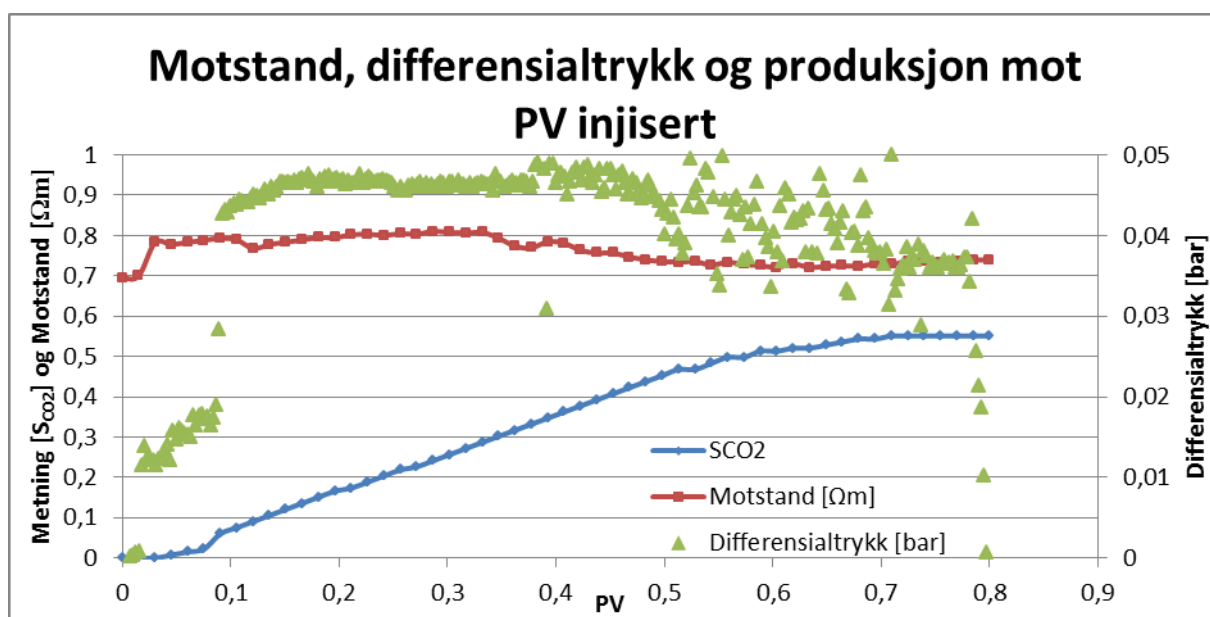
Oppsummering kalkstein- og sandsteinsblokk

Det er, som også nevnt for kalksteinsblokken, vanskelig å trekke konklusjon av metningen sett ut i fra strålingsdataene fra eksperimentene. Det kan trekkes paralleller til arbeidet utført av B. L. Alemu et. Al [50] (se kapittel 4 Litteraturstudie), som fikk feilestimat på metningsberegningene sett ut i fra strålingsintensitet. Her ble det tilslutt korrigerende for metning beregnet ut i fra elektrisk motstand. Mulig årsak som kan skyldes feilestimat på stråling, er absorpsjon av sporingstoff i kjernematerialet. Det er, som nevnt i kapittel 5.5.2, tatt høyde for dette ved å injisere flere porevolum av umerket saltvann i forkant. Det vil også være usikkerheter med tanke på materialbalanse. Noe CO₂ vil blande seg med vann, og bli værende i blokken. Samtidig vil noe vann blande seg med CO₂ og fordampe når det blir produsert. Usikkerhetene for metningsberegning basert på materialbalanse er likevel antatt mindre enn usikkerhetene basert på strålingsintensitet. Strålingsdataene kan derimot gi et bilde av hvordan CO₂ beveger seg i blokken ved injeksjon. Gir CO₂ en uniform og jevn fortrenkning, eller samler CO₂ seg ved injeksjons- eller produksjonssiden? På grunn av oppløsningen til skannet i dette eksperimentet er det ikke mulig å eksakt se hvordan strømmingen beveger seg gjennom blokken. Fra strålingsdata i disse blokkeksperimentene er det observert at metningsendringen ikke er uniform gjennom blokken ved CO₂-injeksjon, noe som kan indikere en lavere sveipeffekt som følge av fingering.

6.4 Resistivitet

Metningsberegningene basert på strålingsintensitet og materialbalanse ved blokkeksperimentene gav ulike resultat. Dette var også tilfelle for eksperimenter henvist til i litteraturstudie (kapittel 4) [50], der det ble det valgt å se på metningen som funksjon av resistivitet. Dette ble derfor også forsøkt i denne oppgaven, hvor resistiviteten (Ω) ble målt ved hjelp av hp 4262A LCR METER. Bulk resistiviteten er funnet ved bruk av formel 18, som er beskrevet i kapittel 0. I tillegg er det her beskrevet en nyttig empirisk relasjon fra Archie, resistivitets indeksen (formel 19, i kapittel 0). Ved hjelp av denne formelen kan vannmetningen i kjernen beregnes ut i fra den målte motstanden (Ω).

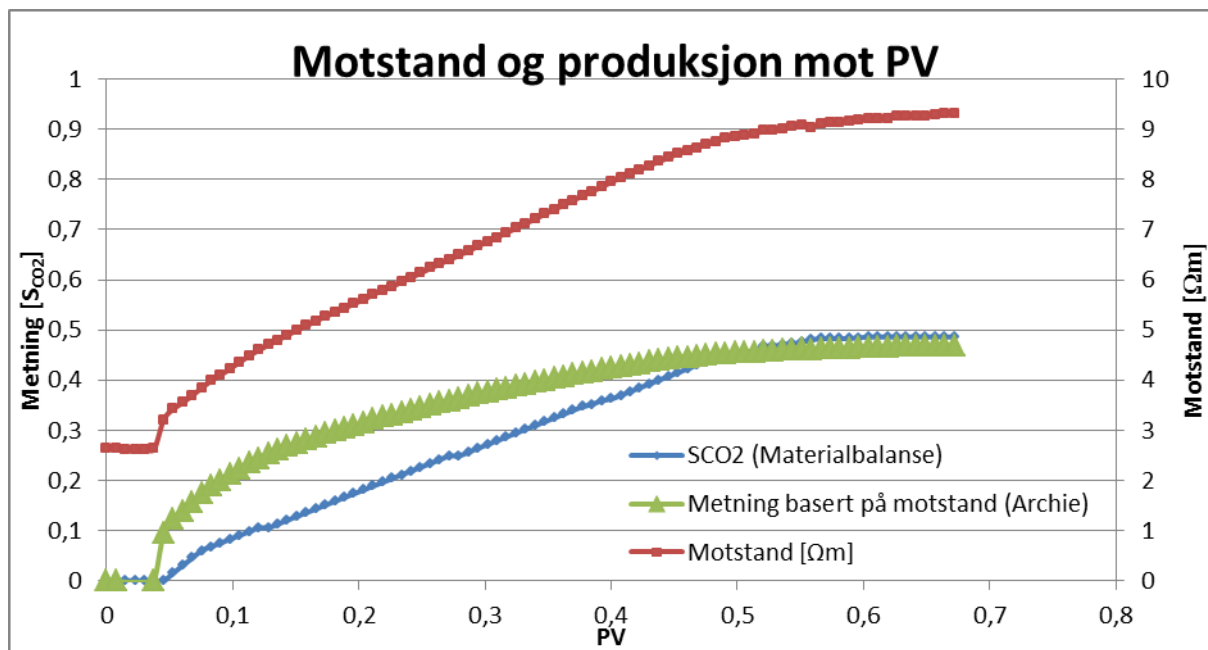
Det første eksperimentet ble injisert med en rate på 1 ml/min og avsluttet når det ikke lenger var produksjon av vann.



Figur 55: Måling av resistivitet og differensialtrykk ved injeksjon av CO_2 i vannfylt Bentheim sandsteinskjerne.

Av plottet i Figur 55 kan man se at det er en stabil økning i CO_2 metning i blokken frem til gjennombruddet kommer ved litt over 0,5 porevolum injisert. Gjennombruddet kan man også tydelig se ut i fra at differensialtrykket blir mer ustabil. Endepunktsmetningen er på 55 % CO_2 ved dette eksperimentet. Resistiviteten gjennom dette eksperimentet endret seg ikke som funksjon av økt CO_2 metning. Årsaken var at de dielektriske isolatorene ikke fungerte med vann (ment for gass). Elektrisitet tar minstemotstandsvei, som da var via rørledning koblet til differensialtrykkmåler rundt Hassler-kjerneholder.

Neste eksperiment ble kjørt uten at differensialtrykksmåleren var koblet til. Dette ble gjort for å sikre at motstanden ble målt over kjernen og ikke via rørledningen. Injeksjonsraten ble også ved dette eksperimentet satt til 1 ml/min.



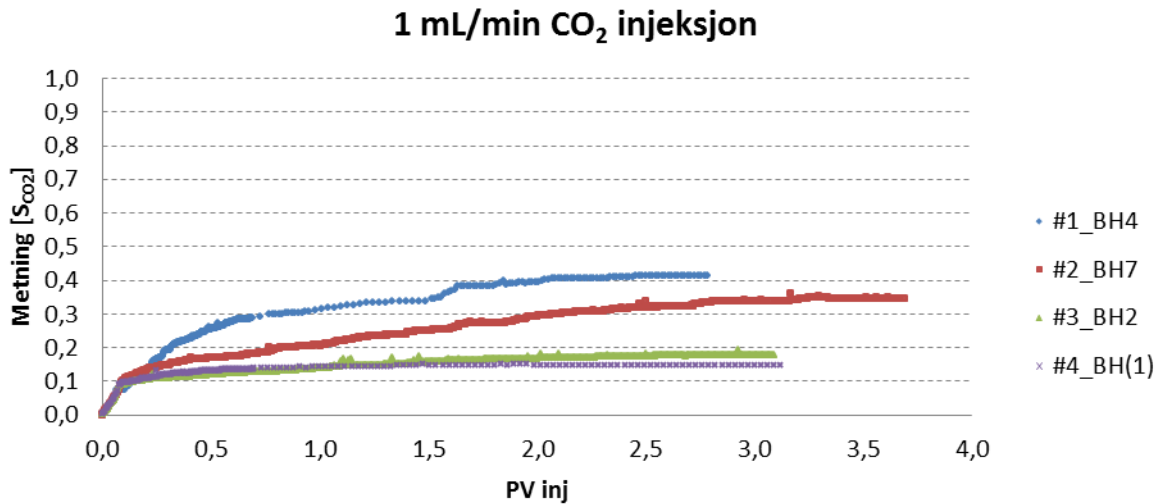
Figur 56: Motstand og metning som funksjon av porevolum ved 1 ml/min CO₂ injeksjon. Differensialtrykkmåler var koblet vekk.

I dette eksperimentet (se Figur 56) ble det registrert økning i motstand etter hvert som metningen av CO₂ i sandsteinskjernen økte. Sett ut i fra materialbalansen, så ble det oppnådd en CO₂ endepunktsmetning på 48,6 % ved dette eksperimentet. Beregnet CO₂ endepunktsmetning ut fra motstanden (Archie) er 46,9 %. Det er noe avvik mellom disse to målingene (1,8 %), i tillegg er det en tydelig forskjell på formen av kurven mellom metning basert på motstand og metning basert på materialbalanse.

Metningene på 55 % og 48,6 % er i samme område som resultater hentet fra Norges Geotekniske Institutt (NGI). Der oppnådde de maksimal CO₂ metning i porene på ca 53 % [51]. Ved forsøket gjort ved NGI, økte den elektriske motstanden fra om lag 3 Ωm til 14 Ωm. De eksperimentelle resultatene utført i denne oppgaven ligger noe lavere, ettersom resistiviteten her økte fra rett under 3 Ωm til rett over 9 Ωm. Det at resistiviteten er lavere i dette eksperimentet enn ved det som ble målt av NGI, kan forklares med at endepunktsmetningen (48,6 %) er lavere enn det som er blitt målt av NGI (53 %). Ved en økt sveipeffekt, og da økt CO₂ metning, ville dette ført til en høyere elektrisk motstand over kjernen. Resistiviteten vil ikke nødvendigvis kunne estimere en korrekt metning, ettersom Archie er en empirisk relasjon som vanligvis blir brukt for vann-olje systemer. Til sammenligning kan den elektriske motstanden i et oljereservoar være 100 Ωm. Den relativt lave økningen i resistivitet kommer av at halvparten av det effektive porevolumet var fylt med saltvann, slik at elektronene lett kunne bevege seg gjennom kjerneprøven uten å måtte gå via CO₂-fasen [51]. Ut i fra dette ene eksperimentet hvor resistiviteten ble målt kan man se at endepunktsmetningen samsvarer bra mellom resistivitet og materialbalanse, men at starten på injeksjonsprosessen ikke stemmer overens. Det var ikke mulig å gjøre flere eksperiment ved dette oppsettet for å oppnå repeterbarhet av dataene, ettersom oppsettet ikke lenger var tilgjengelig.

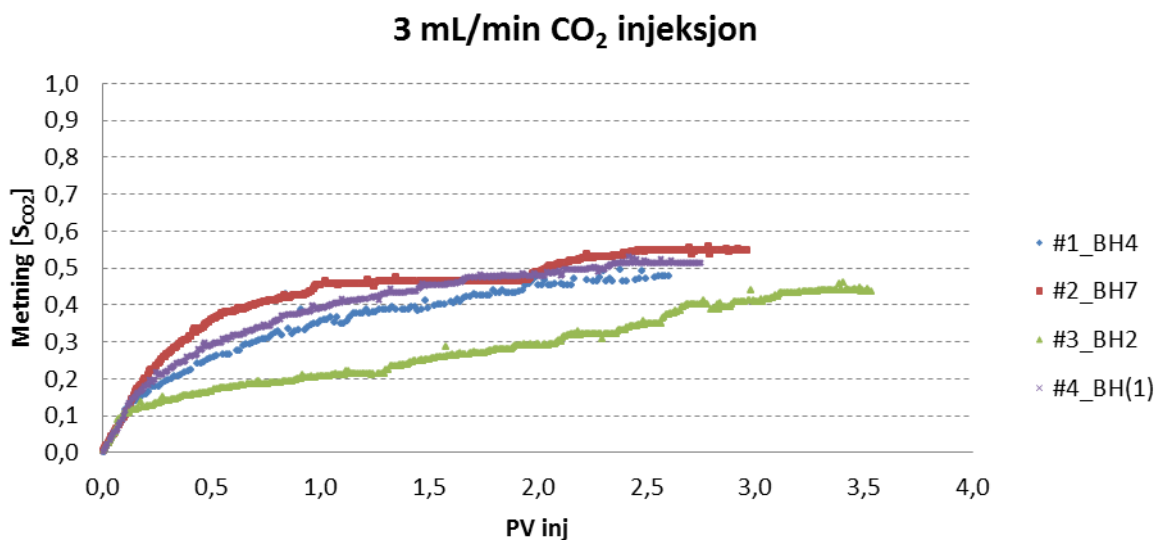
6.5 CO₂-vann fortregning ved ulike injeksjonsrater

Resultatene for eksperimentene gjennomført med CO₂-vann fortregning med CO₂ i væskefase (poretrykk på 83 bar og romtemperatur 21 °C) er presentert i påfølgende figurer.



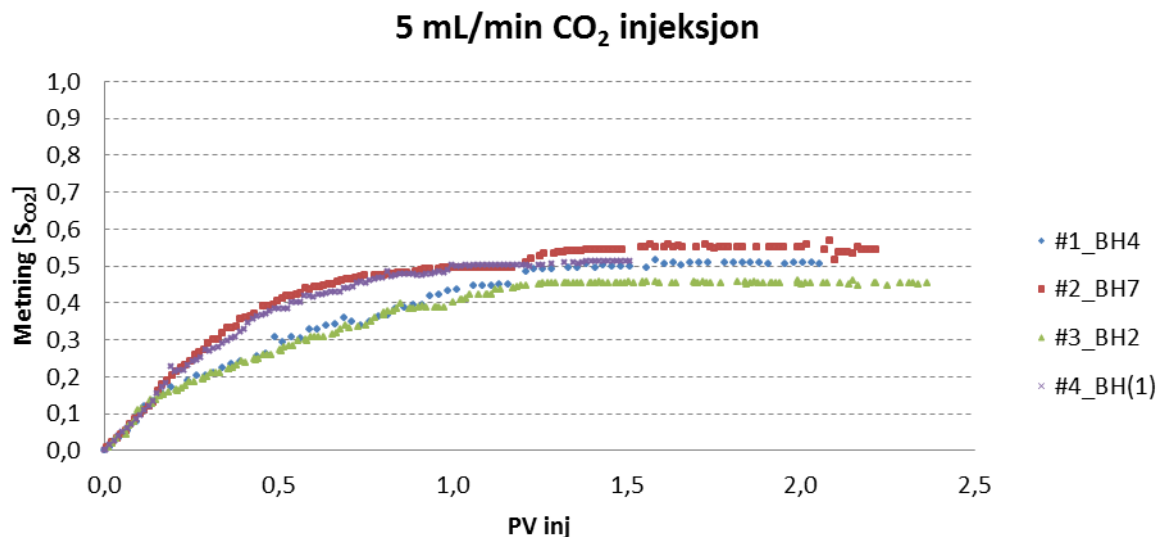
Figur 57: Metning som funksjon av porevolum ved 1 ml/min CO₂ injeksjon.

Endepunktsmetningene fra forsøkene med injeksjonsrate på 1 ml/min (Figur 57) hadde størst differanse av de tre injeksjonsratene. Endepunktsmetningene varierte her fra 15 % til 41 %. Generelt for alle tre kjernene #2, #3 og #4 er at første tegn til CO₂ ved produksjonsiden kom etter ca 0,1 porevolum injisert, mens kjerne #1 fikk det etter ca 0,3 porevolum injisert. Kjerne #1 oppnådde i tillegg høyest endepunktsmetning av CO₂. For kjerne #3 og #4 ble det observert en lang haleproduksjon uten noe stor grad av økning i CO₂ metning etter CO₂-gjennombrudd. Kjerne #2 økte metningen jevnt etter CO₂ gjennombruddet, der endepunktsmetningen ikke var nådd før etter ca 3 injiserte porevolum.



Figur 58: Metning som funksjon av porevolum ved 3 ml/min CO₂ injeksjon.

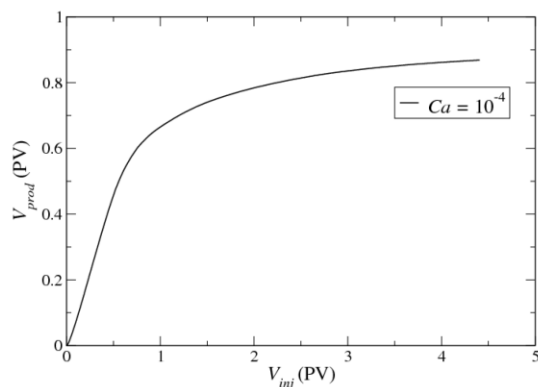
For kjerne #2 ved 3 ml/min CO₂-injeksjon stoppet CO₂ pumpen på grunn av at sikkerhetstrykket i pumpen ble oversteget. Dette ble oppdaget etter den teoretisk sett skulle vært injisert for nesten 0,5 porevolum (intervallet 1,5 til 2 PV). Det forklarer hvorfor metningen til denne kjernen tilsynelatende ser ut til å stabilisere seg ved en lavere metning. Pumpen ble startet igjen, der produksjonen av vann fortsatte og endepunktsmetningen stabiliserte seg ved en høyere metning.



Figur 59: Metning som funksjon av porevolum ved 5 ml/min CO₂ injeksjon.

En trend som kan sees ut i fra Figur 57, Figur 58 og Figur 59 er at formen på kurvene og endepunktsmetningene samler seg mer ettersom injeksjonsraten øker. Eksperimentet med høyest injeksjonsrate (5 ml/min), gir altså best repeterbarhet for resultat av endepunktsmetning sammenlignet med de tre injeksjonsratene. Endepunktsmetningen varierte her mellom 45 % og 55%. Resultatet fra materialbalansen i resistivitets eksperimentet (1 ml/min), som ble injisert i samme kjernemateriale under samme trykk og temperatur forhold, ble det her en høyere endepunktsmetning av CO₂ (refererer til kapittel 6.4). Det var altså et større sprik mellom endepunktsmetningen ved raten 1 ml/min er resultatene ved denne raten. Økt repeterbarhet for resultater, reduserer usikkerheten for resultatene. Årsaken for en slik spredning av resultatene for 1 ml/min kan komme av heterogenitet innad i kjernene. Ved lavere injeksjonsrater av CO₂, kan endepunktsmetningen være mer sensitiv for heterogenitet enn ved høyere rater. Dette kommer av at ved lavere injeksjonsrater, kan større mengde av det injiserte CO₂-fluidet, kunne følge de store porekanalene og dermed kan en redusert sveipeffekt observeres.

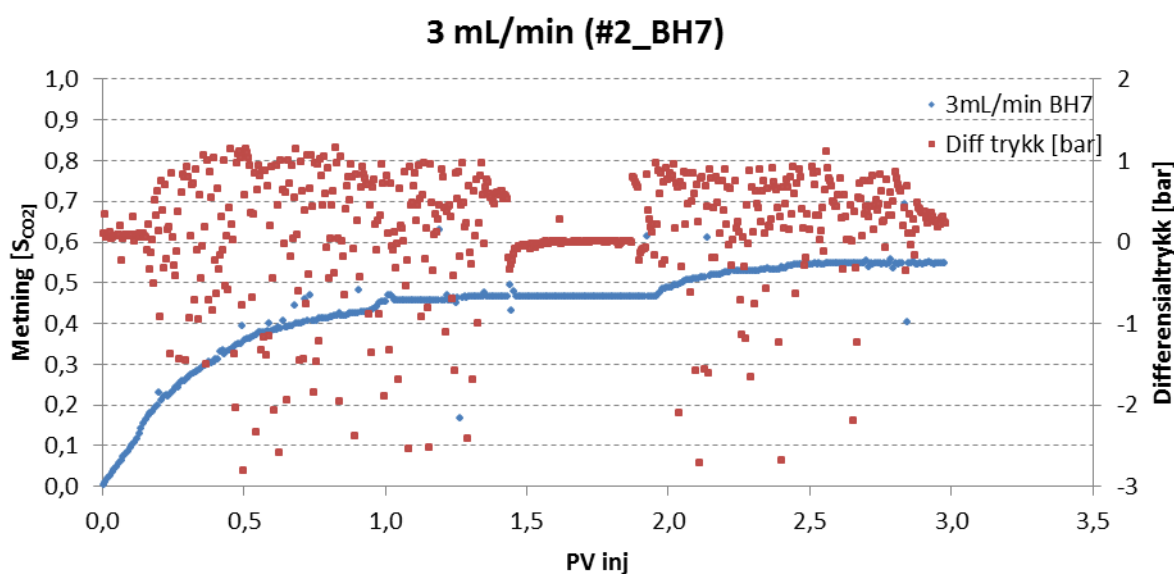
Av plottene kan man se at den transiente perioden på kurven fra CO₂ har fått gjennombrudd, ikke er kort og konsis. Dette samsvarer med simuleringer gjort av Thomas Ramstad, ved Numerical Rocks. Simuleringen viser til en formeringsfront med fingring som får gjennombrudd før hoved bulk fronten når frem til produksjonssiden (se Figur 60) [57]. Dette kommer av fingring som følge av det dårlige mobilitetsforholdet mellom vann og CO₂.



Figur 60: Simulering av Thomas Ramstad ved Numerical Rocks; produsert volum av fortrent fluid (vann) i en dreneringsprosess i Bentheim sandstein (Kapillærtallet $Ca=10^{-4}$) [57].

Tilnærmet stabilt og lavt differensialtrykk ble målt for alle sandsteinskjernene og alle ratene. Dette kommer av at sandstein er høypermeabel og i tillegg har CO_2 høy mobilitet (se kapittel 1.4.1 Mobilitetsforhold). Det som tydelig kommer frem av differensialtrykket er gjennombruddet av CO_2 , ettersom CO_2 får et høyt trykkfall over kort tid (fra 83 bar til atmosfærisk trykk). Dette resulterte i at differensialtrykket fikk en variasjon av trykk, som følge av en mer ustabil produksjon. Den alternerende gass- og væske-fasen i baktrykksregulatoren forklarer ustabiliteten i differensialtrykket. Trykkfallet CO_2 ble utsatt for da det ble produsert, medførte en gassekspansjon som resulterer i at temperaturen sank i rørledningen. Rørledningen kunne da plugges på grunn av frost. Dette kunne også forklare den ujevne produksjonen, og ustabiliteten i differensialtrykket. Rørledning som gikk fra baktrykksregulatoren til begerglasset, ble derfor kontinuerlig varmet opp.

For å illustrere endring i differensialtrykk ved gjennombrudd av CO_2 , er plottet valgt ut for kjerne #2_BH7 for å også kunne tydeligere illustrere det intervallet hvor pumpen stoppet på grunn av oversteget sikkerhetstrykk i pumpen ved CO_2 injeksjon:



Figur 61: 3 ml/min CO_2 injeksjon i #2_BH7. (Illustrerer et typisk differensialtrykks-plott ved injeksjon av CO_2).

Etter økt injeksjons rate viser eksperimentene en trend til forbedret sveipeffekt ved CO₂ injeksjon, og dermed en økende CO₂ endepunktsmetning. Dette samsvarer med simulerte data utført av Thomas Ramstad ved Numerical Rocks. Under et møte med Numerical Rocks i Trondheim (våren 2012) kunne han bekrefte at deres simuleringresultater ved CO₂ injeksjon på sandstein viste en trend på økt CO₂ endepunkts metning ved økt injeksjons rate. I tillegg kan man se at dette samsvarer med eksperiment utført av A. Riaz, der CO₂ metningen økte ved økt injeksjonsrate (Figur 26 i kapittel 4). Eksperiment 3 og 5, vist i Figur 26, er injisert nedenfra med samme viskositet og tetthetskontraster, men i eksperiment 5 er det en høyere injeksjonsrate. For å sammenligne simulerte data utført av Thomas Ramstad og eksperimentelle data utført i denne oppgaven, ble endepunktsmetningene beregnet som en funksjon av kapillærtall, N_c , ved hjelp av ligning 17 gitt i kapittel 1.8.1:

:

Tabell 5: Eksperimentell data fra forsøk utført i denne oppgaven.

Eksperimentell data:			
	Rate [ml/min]	N_c	Metning [S_{CO_2}]
Bentheim	1	3,9E-07	0,27
	2	1,2E-06	0,50
	3	1,9E-06	0,53

Viskositet og grenseflatespenning for utregningen av kapillærtallet er hentet for Bentheim sandstein fra tabell gitt i [57], med følgende verdier $\mu_{\text{saltvann}} = 0,75 - 3 \text{ cP}$ og $\sigma = 20 \text{ mN/m}$. Det er viskositeten for vann alene som er benyttet for utregningen, da det regnes som den som kontrollerer mobiliteten siden viskositetsforholdet er ca 10 [58]. Middelvei for viskositeten ble brukt for utregningen. Injeksjonsraten for de simulerte dataene, utført av Thomas Ramstad, ble ikke regnet om fra kapillærtall. Dette fordi arealet på simuleringmodellene var små sammenlignet med de som ble brukt i eksperimentet (drøy kvadratmillimeter). For $5e-6$ tilsvarer det en strømningshastighet på ca 0,08 mm/s som nok er i overkant av hastigheten 5 ml/min [58]. Siden Berea steinen er segmentert uten leire er disse sandsteinene nokså like i porøsitet og permeabilitet og derfor sammenlignbare [58].

Tabell 6: Simulert data utført av Thomas Ramstad ved Numerical Rocks [57].

Simulert data:		
	N_c	Metning [S_{CO_2}]
Bentheim	5,0E-06	0,72
	5,0E-05	0,87
	1,0E-04	0,90
Berea	5,0E-06	0,68
	5,0E-05	0,82

Sett ut i fra eksperimentelle data gjort i denne oppgaven og simulerte data fra Numerical Rocks, samsvarer det at økt kapillærtall gir økt lagringspotensial for CO₂ i Bentheim sandsteinskjer. Det er

enda ikke blitt gjort forsøk for å kunne direkte sammenligne de eksperimentelle og de simulerte dataene mot eksakt samme kapillærtall, N_c . Ved å plote CO_2 -metning som funksjon av kapillærtall, der aksene for kapillærtall er gitt logaritmisk, ser det tilsynelatende ut som de simulerte dataene vil samsvare bra med de eksperimentelle dataene. Thomas Ramstad og Numerical Rocks har derfor mottatt de eksperimentelle dataene utført i denne oppgaven, for å kunne jobbe videre med dette i et samarbeid med UiB.

Kjernen ble, som nevnt i kapittel 5.5.5, flømmet med 5 porevolum sandsteinsvann for å mette kjernene med vann før neste rate med CO_2 injeksjon av kjernen. Dette ble gjort for å se på hvor mye CO_2 som var kapillært bundet i kjernen etter hver CO_2 -injeksjonsprosess.

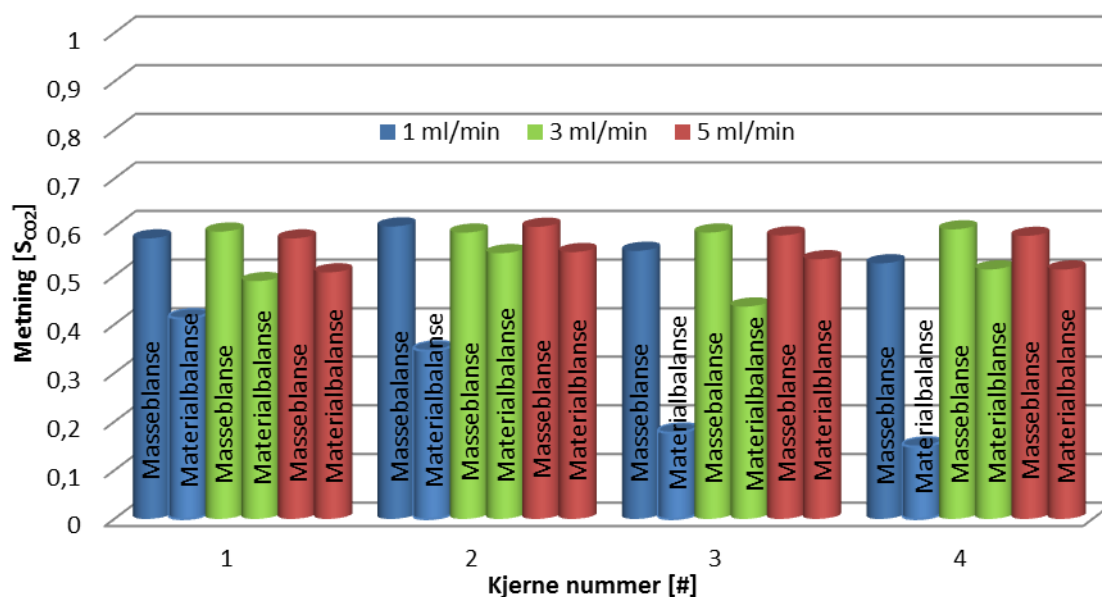
Tabell 7: Gjennomsnittlig residuell CO_2 metning beregnet av massebalanse.

Rate [ml/min]	Metning, S_{CO_2} [%]
1	1,08
3	1,13
5	1,44

Den residuelle CO_2 metningen ble kun målt ved massebalanse. Det er en liten vekt differanse mellom den initielle vekten til kjernen når den var 100 % mettet og etter de var flømmet med CO_2 . Denne vektforskjellen kan indikere mengde CO_2 i kjernen som kapillært bundet. Tabell 7 viser en trend for økt residuell CO_2 metning, ved økt injeksjonsrate av CO_2 . Generelt for alle kjernene, så startet alle forsøkene med rate på 1 ml/min og avsluttet med 5 ml/min. Det vil si at kjernene hadde totalt sett blitt eksponert for en større mengde CO_2 etter raten 5 ml/min enn ved 1 ml/min. Metningen gitt i Tabell 7 er beregnet ut i fra massebalanse, hvor massebalansen er sett opp mot den intielle massen av kjernene før de ble flømmet med noe CO_2 . Den lave residuelle metningen som ble observert kan relateres til oppløsning av CO_2 inn i slatvannet, ved injeksjon av vann.

Massen av kjernen ble målt etter hver injeksjonsprosess for å kunne sammenligne massebalanse opp mot materialbalanse. Følgende plott viser en sammenligning av CO_2 -metning utregnet ved massebalanse og materialbalanse (se Figur 62).

Sammenligning av masseblanse og materialblanse



Figur 62: Materialblanse og masseblanse etter CO₂ injeksjon for fire kjerneprøver ved tre forskjellige rater.

Av Figur 62 er det observert relativ stor forskjell mellom CO₂-metningen beregnet av masseblanse og metningen beregnet av materialblanse. Det som kan forklare denne differansen, er at etter endt CO₂ injeksjon så ble systemet trykket ned ved å forsiktig åpne to ventiler (én ved produksjonssiden og én ved injeksjonssiden). Rørledning og et gitt antall prosent av porevolumet i kjernen var da fylt med CO₂ i væskefase. Ved å blø av trykket i systemet i løpet av relativ kort tid (2 til 3 minutter) kan mye av vannet i kjernen ha blitt presset ut på grunn av gassekspansjon (det ble observert vann og gass som kom ut av avblødningsventilene). En slik teori og observasjon av avblødningen støtter det at massebalansen viser generelt høyere CO₂ metning enn materialbalansen.

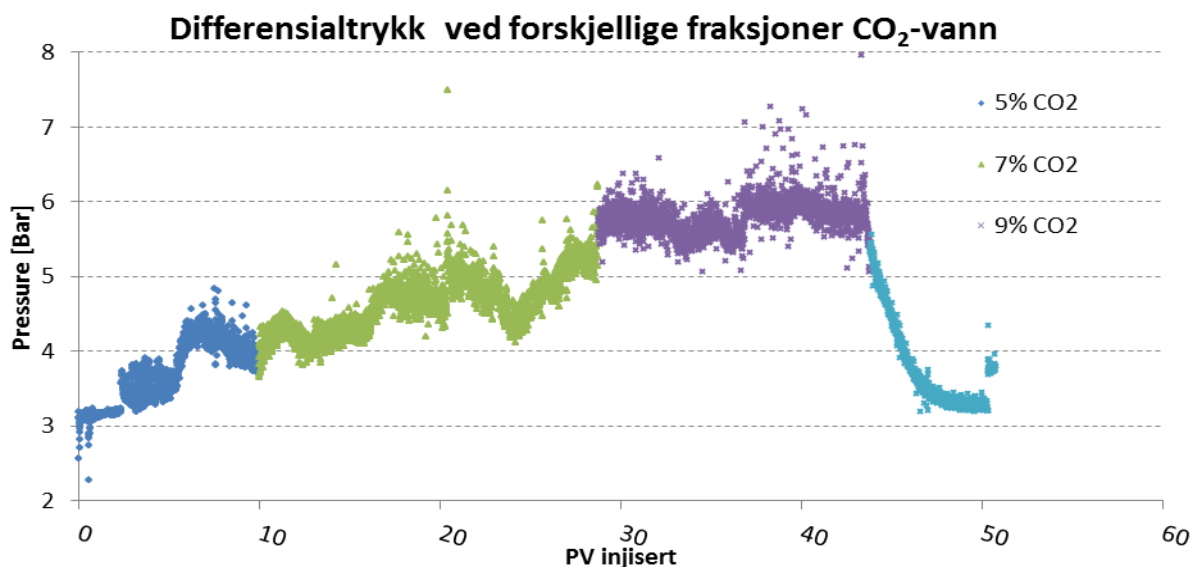
Usikkerheten med fordamping var lav i dette eksperimentet, ettersom det ble gjort et separat forsøk med å fylle samme begerglass med litt vann og la det stå i ro på en vekt i litt over 1 time. Denne vekten ble redusert med 0,02 g, som utgjør en endring på ≈0,03% for endepunktsmetningene.

6.6 Relativ permeabilitet

For å kunne utføre simuleringsarbeid med kjernemateriale fra denne oppgaven ble det gjort eksperimenter for å finne den relative permeabiliteten for CO₂-vann injeksjon i sandstein- og kalksteinskjerner. Simuleringsdataene var hovedsakelig tenkt for sammenligning opp mot blokkeeksperimentene, samt sammenligning av simulerte data utført av Thomas Ramstad ved Numerical Rocks.

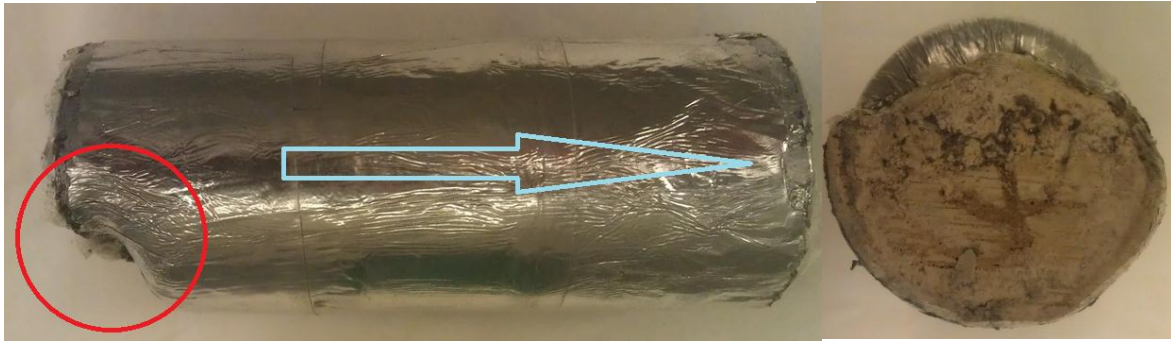
Data som skulle hentes ut av dette eksperimentet var differensialtrykket ved forskjellig fraksjoner av CO₂-vann injeksjon og materialbalanse. Det ble benyttet to absoluttrykkmålere på hver side av kjernen, for å måle differensialtrykket. Differensialtrykket over sandsteinskjerner, ved kjøring av forskjellig rater med vann, var for lite til at absolutt trykkmålerne kunne registrere noe endring i trykket. På grunnlag av dette ble det ikke utført videre eksperimenter for å estimere den relative permeabiliteten for sandstein. Det ble derfor valgt å utføre videre eksperimenter for kalkstein på grunn av dens lavere permeabilitet og der til høyere differensialtrykk.

Første eksperimentet var ble utført på kjernen 2" PC_#1. Fraksjonene som ble kjørt var henholdsvis 5 %, 7 % og 9 % CO₂, der den totale CO₂-vann injeksjonsraten ble holdt konstant til 50 ml/time.



Figur 63: Differensialtrykk over kalksteinskjerne ved forskjellige fraksjonsstrømmer av CO₂/vann (Forsøk 1).

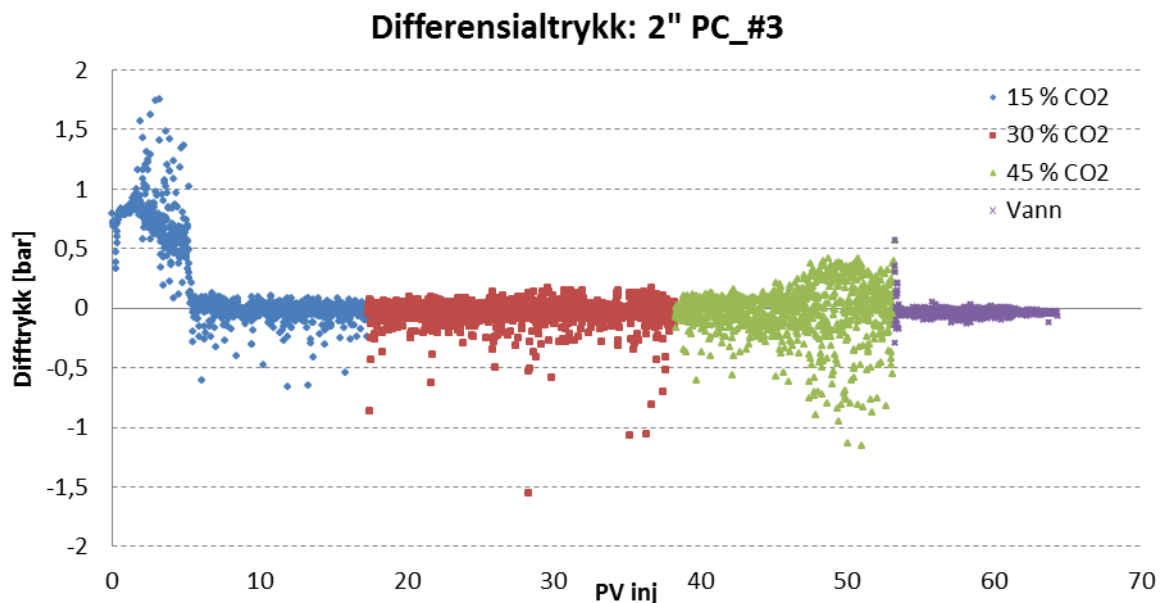
Figur 63 viser en indikasjon på trykkendring ved forskjellige fraksjoner av CO₂/vann. Trykket fikk aldri stabilisert seg skikkelig ved noen av de tre fraksjonsstrømmene. Det ble besluttet å fortsette med samme kjerne etter at ca 5 PV med vann var flømmet gjennom med en rate på 5 ml/time og baktrykk på 84 bar. CO₂-vann injeksjon ble startet med fraksjon på 11 % CO₂. Forsøket ble avsluttet på grunn av indikasjon på lekkasje fra omslutningsoljen. Det viste seg å være tydelig lekkasje i gummihylsen rundt kjernen i Hassler kjerneholderen. Dette på grunn av deformasjon av kalkkjernen, der omslutningstrykket har presset gummihylsen til den knakk i det punktet hvor deformasjonen oppstod.



Figur 64: Deformasjon av kalksteinskjerne etter CO₂-vann injeksjon (pilen viser strømningsretning av CO₂).

Eksperiment 2 (2" PC_#2) ble utført på samme måte som for 2" PC_#1, med henholdsvis 5 %, 7 % og 9 % fraksjonsstrømmer. Det som skulle bli prioritert denne gangen var å holde trykket til differensialtrykket hadde stabilisert seg fullt ut ved hver av fraksjonsstrømmene. Startet å injisere med 5 % CO₂ med en total CO₂-vann injeksjons rate på 50 ml/time. Etter ca 7 porevolum injisert, hvor differensialtrykket enda ikke var stabilisert, stoppet pumpene på grunn av oversteget sikkerhetstrykk i pumpen. Det viste seg at kjernen var blitt ødelagt. Den var gått i oppløsning og smuldret sammen slik at kjerne/rørledninger i systemet var pluggert. Det var dermed ikke mulighet å fortsette flømmingen.

Tredje eksperimentet for å estimere den relative permeabiliteten ble gjort på en noe kortere kjerne (2" PC_#3), som forsøk på å tidligere kunne oppnå et stabilt differensialtrykk. Tanken var da at kjernen kunne klare å «overleve» hele eksperimentet før den ble ødelagt, fordi at differensialtrykket kunne muligens stabilisere seg tidligere. I tillegg ble det besluttet å kjøre med større forskjell på fraksjonene av CO₂, for og tydeligere kunne skille differensialtrykkene. Fraksjoner på henholdsvis 15 %, 30 % og 45 % ble da valgt, med en total pumperate på 50 ml/time.



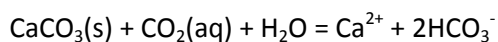
Figur 65: Differensialtrykk over kalksteinskjerne ved forskjellige fraksjonsstrømmer av CO₂/vann (Forsøk 3).

Figur 65 viser at differensialtrykket over kalksteinskjernen avtok etter nesten 5 PV injisert med en fraksjon på 15 % CO₂. Differensialtrykket mellom injeksjonssiden og produksjonssiden holdt seg stabilt på ≈0 bar gjennom hele eksperimentet. Eksperimentet ble avsluttet og kjernen tatt ut for å analysere og se på eventuelle skader på kjernen, som kunne gi en forklaring på at differensialtrykket ikke endret seg. Av Figur 66 ser man en tydelig kanal som går langs kjernen. Denne kanalen er blitt dannet gjennom injisering av de første 5 porevolumene, som forklarer hvorfor det ikke ble noe utslag for differensialtrykket ved videre injeksjon.

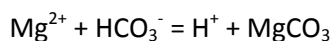
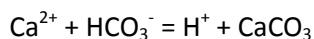


Figur 66: Kalksteinskjerne (2" PC_#3) etter endt forsøk 3.

Generelt for kalksteinskjernerne var at de ble deformert og/eller gikk i oppløsning. Dette var årsaken for at det ikke var mulig å hente ut eksperimentelle data for å beregne den relative permeabiliteten for kalksteinskjernerne. Den kjemiske svekkelsen fant sted når kalk blir eksponert for CO₂ injeksjon, som er påvirket av reservoarforhold siden løseligheten av CO₂ i vann styres av partialtrykkene, saltsammensetning (ionestyrke) og temperatur. Løseligheten av kalk vil av dette være en funksjon av partialtrykk av CO₂, saltsammensetning og temperatur. CO₂ vil løse seg inn i vannet i et reservoar og danne karbonsyren (H₂CO₃) og senere bikarbonat (HCO₃⁻), som fungerer som en svak syre som oppløser kalken [59]:



En slik kjemisk reaksjon av kalkstein og CO₂ kan medføre komprimering av reservoar og dertil innsynkning. I verste fall kan en slik innsynkning føre til lekkasje i takbergarten som skal holde CO₂ i reservoaret. Sjøvannet som benyttes som injeksjonsfluid i Nordsjøens reservoarer inneholder kationer (for eksempel Ca²⁺ og Mg²⁺) som kan reagere med bikarbonat og danne stabile karbonater [59]:



Kalksteinsvannet var tilsatt CaCl (refererer til kapittel 5.2 Fluidier) for å redusere mulighetene for oppløsning av kalken, men tross dette løste kalken seg opp ved alle eksperimentene.

På grunnlag av at det ikke var tilgjengelig utstyr for å måle differensialtrykket for sandsteinskjernen (høy permeabilitet som medfører lavt differensialtrykk), og at kalksteinskjernerne ble tydelig deformert og ødelagt gjennom injeksjonsprosessen av forsøkene, ble det besluttet å avslutte forsøket på å hente ut eksperimentelt data for å estimere den relative permeabiliteten.

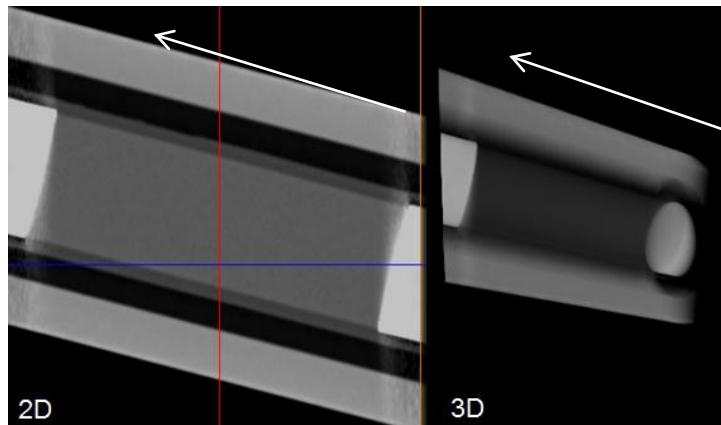
6.7 PET/CT: CO₂ injeksjon

I dette kapitlet blir bildene og plottene fra eksperimentene illustrert for å vise resultatene som ble oppnådd ved Haukeland i PET/CT-skanneren. Samtidig presenteres noen av mulighetene for hvordan man kan presentere og analysere dataene som ble hentet ut fra eksperimenter gjort ved PET/CT skanneren. Alle metningsberegninger er relatert til strålingsaktivitet. Det var ikke mulig å se på materialbalanse her, ettersom alt skulle være i et lukket system for å hindre forurensning (produksjonen ble samlet i en lukket buffer).

Vinklet sandsteinskjerne:

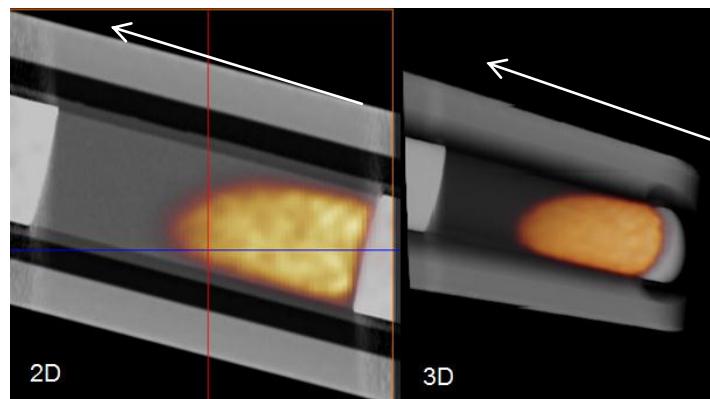
Sandsteinskjernen ble mettet med sandsteinsvann som var merket med ²²Na, mens den var plassert i PET/CT skanneren. Dette for å kunne ta skann av kjernen fra start av radioaktiv vanninjeksjon til endt CO₂ injeksjon. Følgende figurer viser denne injeksjonsprosessen både i 2D og 3D format, fremstilt med programvaren «Amira». Pilen indikerer strømningsretningen for injeksjonsfluidet. I 3D-formatet i Amira, kan man rotere kjernen slik at man kan se fortrenghingen og kjernen fra alle mulige vinkler. I tillegg kan man kutte ned på kjernen dersom man ønsker å se på et spesifikt område innad i kjernematerialet (for eksempel i en sprekk eller lignende).

1. Injeksjon radioaktivt sporingsvann, $S_{RWAT} = 0,00$:



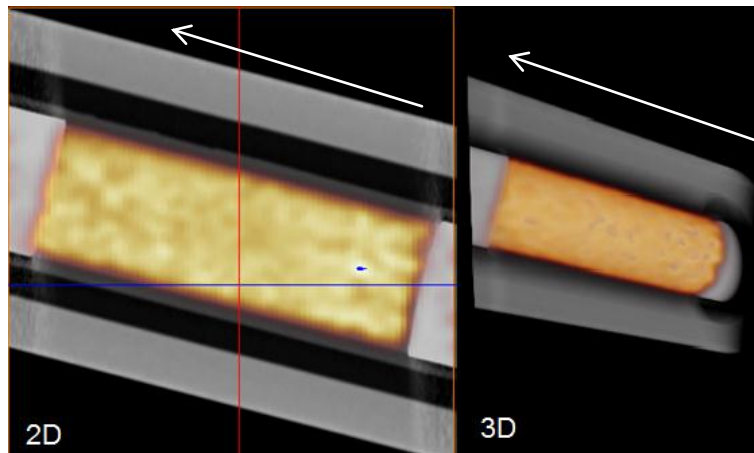
Figur 67: Vinklet sandsteinskjerne PET/CT-skann (1 av 4).

2. Injeksjon radioaktivt sporingsvann, $S_{RWAT} = 0,12$:



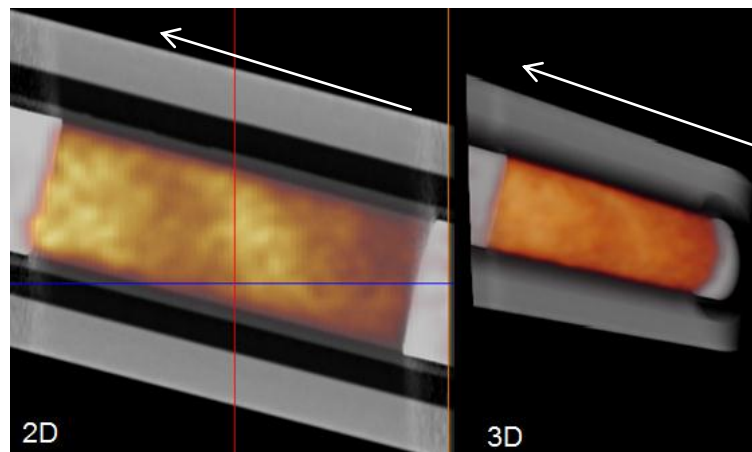
Figur 68: Vinklet sandsteinskjerne PET/CT-skann (2 av 4).

3. Injisert 3,2 porevolum med radioaktivt sporingsvann, $S_{RWAT} = 1,00$:



Figur 69: Vinklet sandsteinskjerne PET/CT-skann (3 av 4).

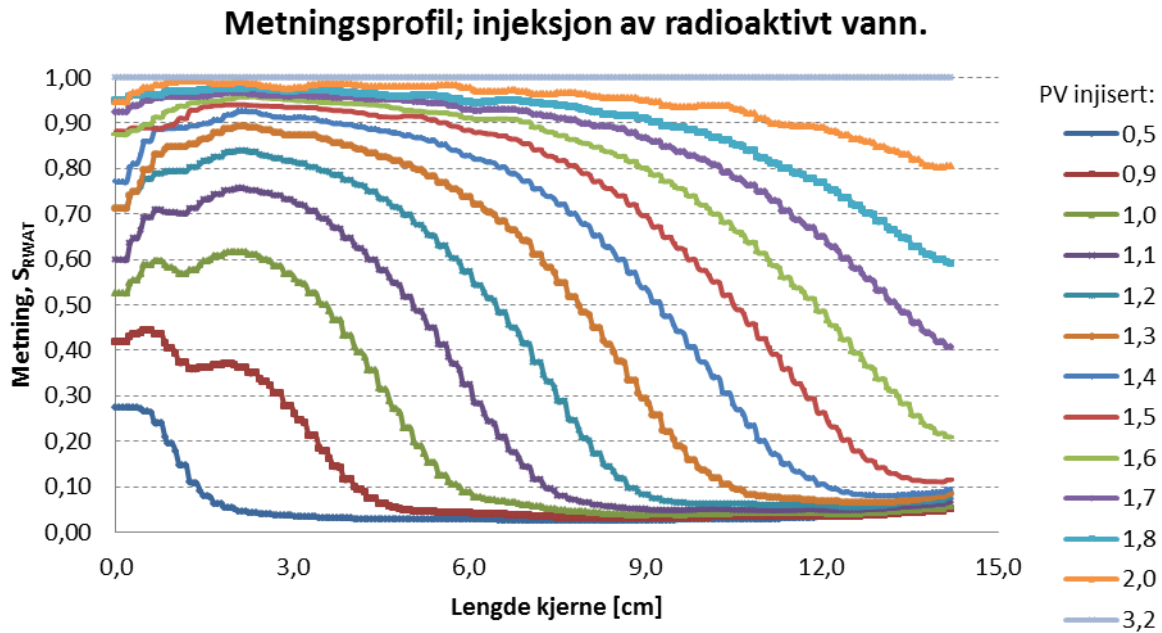
4. Injisert 2,54 porevolum med CO_2 , $S_{CO_2} = 0,24$:



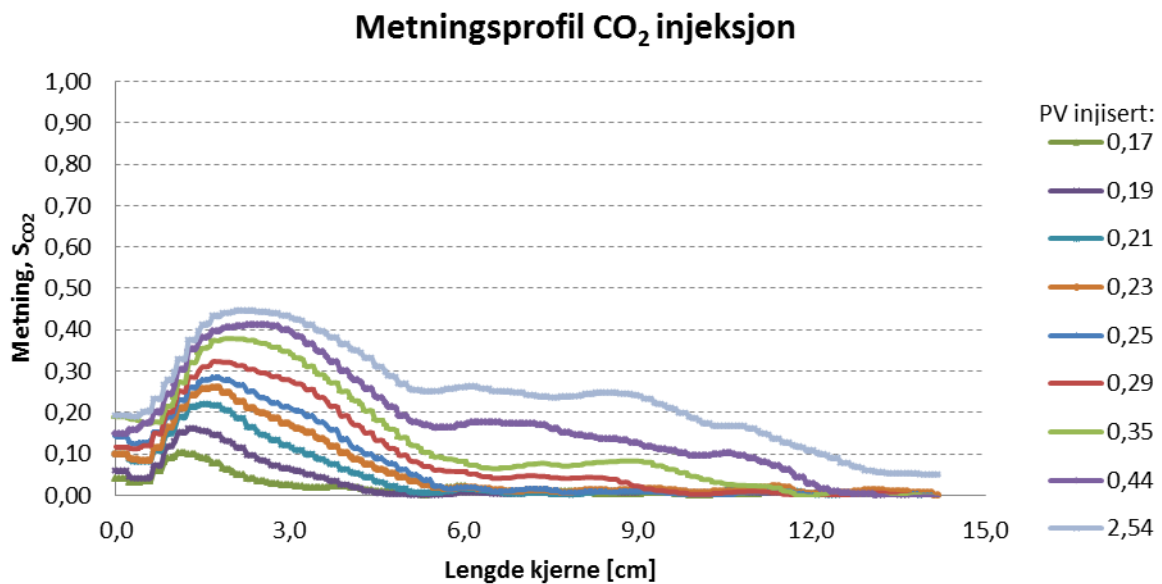
Figur 70: Vinklet sandsteinskjerne PET/CT-skann (4 av 4).

På bildene ser man pakningshylsen som omslutter kjernene som en svak grå strek langs kjernen, samt endestykkene som er plassert på injeksjon og produksjonssiden. Ytterst er selve kjerneholderen/omslutningskammeret.

Følgende plott (Figur 71 og Figur 72) viser injeksjonen av vann-vann fortregning og CO_2 -vann fortregning. Dataene er basert fra et tverrsnitt av kjernen i lengderetning midt gjennom kjernen for å kunne se på den gjennomsnittlige metningsendringen i 1D-profil.

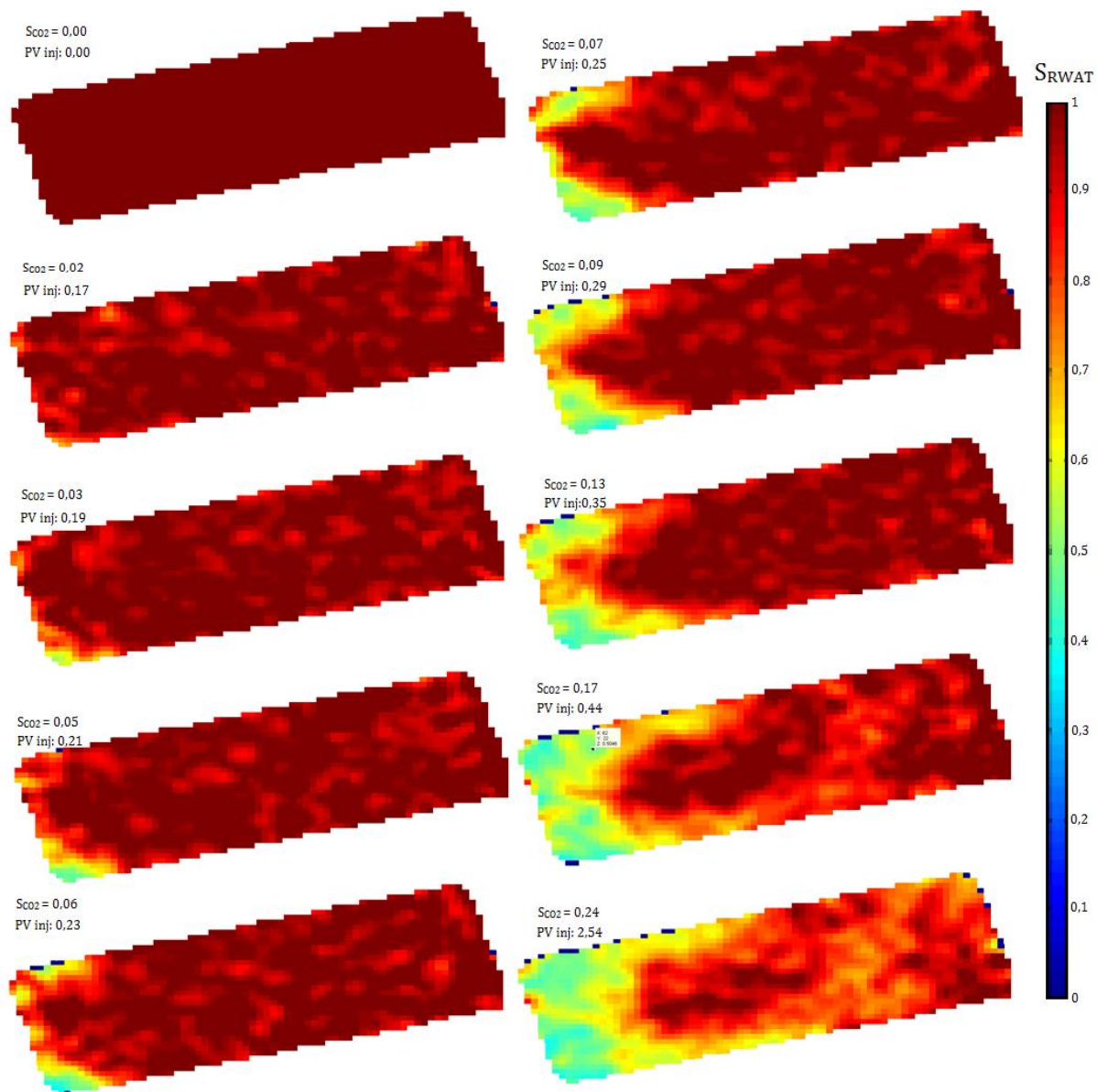


Figur 71: Metningsprofil for injeksjon av radioaktivt vann.



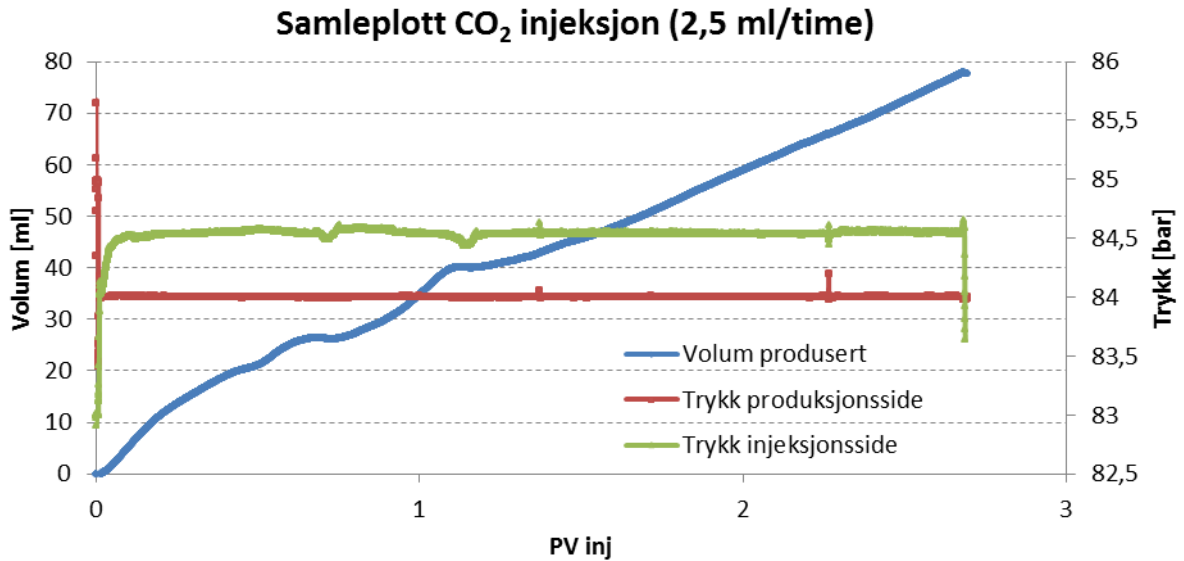
Figur 72: Metningsprofil av CO₂ injeksjon.

CO₂ metningen økte mest de første 0,5 porevolumene injisert. Endepunktsmetningen S_{CO_2} etter 2,54 porevolum injisert var 24 %. Den avtagende CO₂ metningen gjennom kjernen stemmer overens med resultatene fra sandsteinsblokken gjort ved strømningsriggen ved UiB (se kapittel 6.3.2). For sandsteinsblokken ble det antatt at dette kom som følge av mobilitetsforholdet, der det ble dannet en fingeringsprosess. Samme tverrsnitt som ble benyttet for å lage 1D-plottene i Figur 71 og Figur 72, ble benyttet for å lage et 2D-plott ved hjelp av MATLAB. Dette for å tydeligere kunne visualisere hvordan CO₂ strømmet gjennom kjernematerialet.



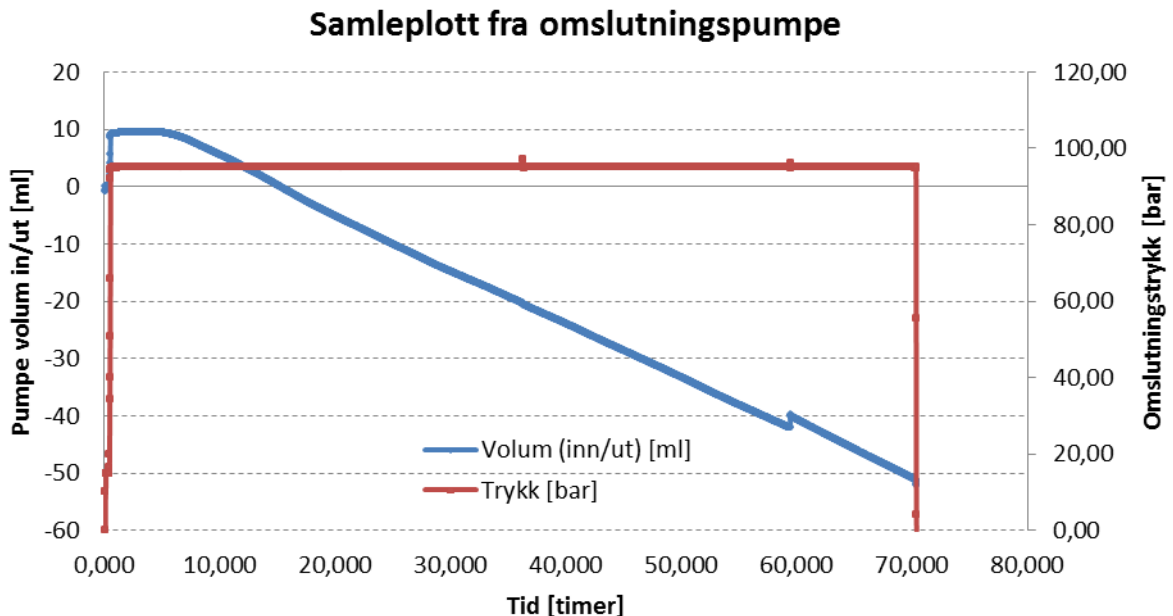
Figur 73: 2D metningsprofil av CO₂-vann foretregning i vinklet sandstein, injisert nedenfra.

Fra Figur 73 kan man, som også vist i 1D-plottet i Figur 72, se at metningsendringen ved CO₂ injeksjon nedenfra i en vinklet sandsteinskjerne var størst ved injeksjonssiden på kjernen. Fargekodene er gitt som funksjon av metningen av radioaktivt vann i kjernen, hvor alle skann er normalisert opp mot kjernen som var 100% mettet med radioaktivt vann (vist i Figur 69). Ut i fra dette 2D-plottet blir en fingeringsprosess tydelig visualisert, noe som kan bekrefte antagelsen om fingeringsprosess ved blokkeksperimentene ved UiB.



Figur 74: Plott av pumpe data fra injeksjonen av CO₂ i sandsteinskjernen med vinkel.

Figur 74 viser pumpedata fra både injeksjonspumpen og produksjonspumpen. Pumpene var ikke kalibrert opp mot hverandre. Sammenligning av trykket på injeksjonsside og produksjonsside kan derfor ikke ansees som differensialtrykk. Produksjonspumpen var satt til konstant trykk (baktrykksregulator), mens injeksjonspumpen var satt til konstant rate. Ut i fra dette plottet kan man se at produksjonskurven har et størst stigningstall tidlig i injeksjonsprosessen, noe som kan bekrefte størst økning av CO₂-metning ved startfasen av injeksjonen.



Figur 75: Trykk og volum fra QX-pumpe som holdt omslutningstrykk.

Pumpen for omslutningstrykket ble satt til konstant trykk, for å holde kontroll på omslutningstrykket rundt kjernen, henholdsvis 95 bar. Til å begynne med kan man se at det ble injisert litt omslutningsolje for å trykke pumpen opp til ønsket omslutningstrykk (sandsteinskjerne og

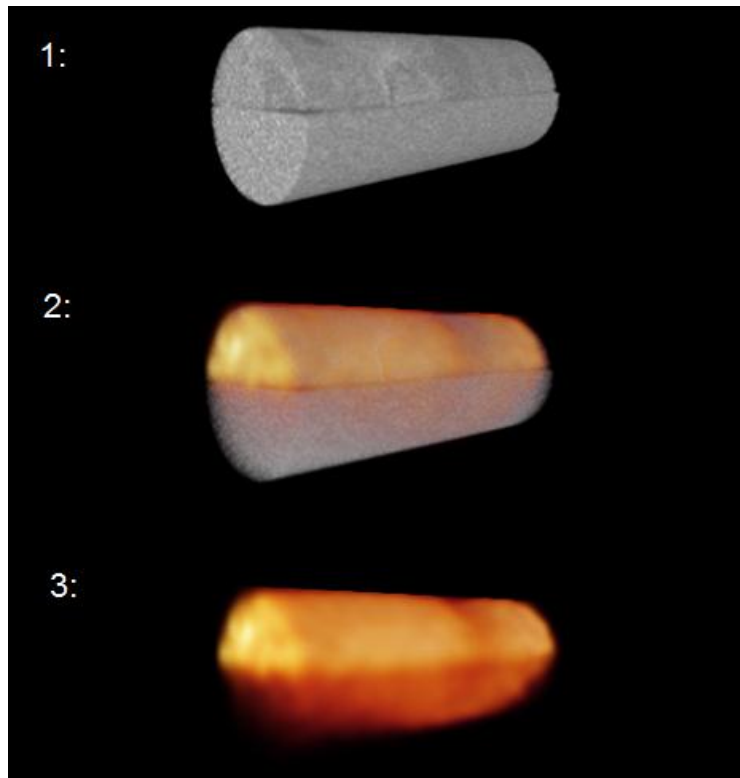
kjerneholder var allerede trykket opp i forkant av dette plottet). Dette volumet holdt seg stabilt i ≈ 5 timer før pumpen begynte å ta i mot fluid for å holde et konstant omslutningstrykk. Årsaken for dette kan være at CO₂ og vann har dannet karbonsyre, som har etset seg inn i gummihylsen rundt kjernen og dannet små hull, som medfører kommunikasjon mellom omslutningstrykk og kjernetrykk.

Vann-vann fortregningen stabiliserte seg med tanke på strålingsaktivitet mot slutten av injeksjonen, noe som indikerer en 100 % mettet kerne med merket sandsteinsvann. Ved endt CO₂ injeksjon var metningen CO₂ i kjernen 24 %, med en injeksjons rate på 2,5 ml/time. Dette er lavere enn resultatene som er gitt i Tabell 5, noe som også gjelder for endepunktsmetningen for blokken med vinkel og injeksjon av CO₂ nedenfra (se Figur 53). Sistnevnte eksperiment (blokk-eksperimentet) kan ikke sammenlignes direkte. Dette fordi CO₂ metningen initielt var 20 % da denne først var injisert med CO₂ ovenfra. Økningen av CO₂ metning ved injeksjon på blokken nedenfra var på 24 %, som til gjengjeld gjenspeiler seg med resultatet i dette eksperimentet. Det var forventet å oppnå en lavere CO₂ metning ved dette eksperimentet enn ved eksperimentene gitt i «6.5 CO₂-vann fortregning ved ulike injeksjonsrater», ettersom CO₂ har lavere tetthet enn vann som vil kunne bidra til en mer ustabil fortregning ved injeksjon nedenfra grunnet gravitasjonen. Av 2D-plottet for endt CO₂ injeksjon i Figur 73 kan man se at CO₂ har dannet kanaler gjennom kjernen (fingering). Allerede etter 0,44 porevolum injisert, kan man se tendenser til dannelse av fingering. Når CO₂ får gjennombrudd gjennom fingering, tyder det til at CO₂ følger minste motstands vei som er gjennom slike fingeringskanaler fremfor å fortrenge mer vann. Dette kommer av at det fortregende fluidet (CO₂) har høyere mobilitet enn det fortregte fluidet (vann). Det er altså et ufordelaktig mobilitetsforhold ($M > 1$), hvor det fortregende fluidet vil få tidlig gjennombrudd [17]. Dette gjør at CO₂ metningen ikke øker i noe særlig grad etter et slikt gjennombrudd. For å optimalisere mobilitetsforholdet mellom CO₂ og vann, og dermed kunne produsere mer vann for å potensielt øke lagringskapasiteten, kan CO₂-skum injeksjon benyttes. Ved injeksjon av samtlige CO₂ skumeksperimenter, utført av A. Christophersen, ble det observert en økning i differensialtrykket, som tyder på en reduksjon i mobilitet av CO₂ [54].

Oppløsningen og tydelige avbildningen av hvordan CO₂ beveger seg gjennom kjernematerialet, gitt i Figur 73, er en ny eksperimentell metode som er tatt i bruk av IFT ved UiB. Dette viser seg å være vellykket, med gode eksperimentelle data. Slike data kan gi bidrag til økt forståelse av hvordan CO₂ oppfører seg i forskjellige kjernematerialer.

Kombinert sandsteins- og kalksteins-kjerne:

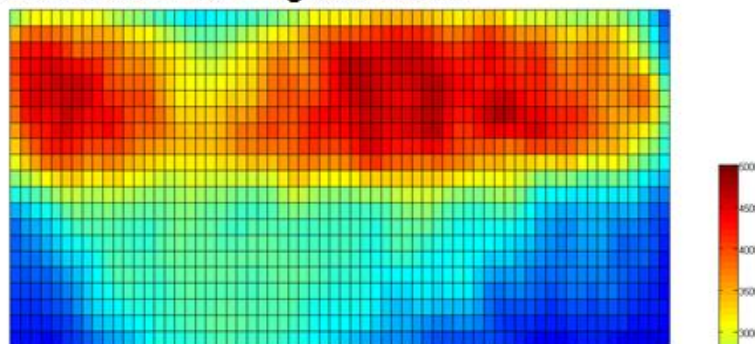
Etter å ha gjort eksperimenter på rene kalksteins- og sandsteinskjerner, ble det besluttet å se på strømmingen i en kombinert kjerne av disse kjernematerialene. Dette for å visualisere effekten av kjernematerialer (henholdsvis permeabilitetsforskjeller) og gravitasjonseffekt. Kalkstein lå øverst fordi den har lavere permeabilitet enn sandstein. CO₂ har lavere tetthet enn vann, der gravitasjonen vil bidra til at denne beveger seg oppover i kjernematerialet. Sandstein har høyere permeabilitet enn kalkstein, hvor CO₂ vil strømme lettere i dette kjernematerialet. Den kombinerte sandstein- og kalksteinskjernen ble flømmet med CO₂ med en gang etter den ble plassert i PET/CT-skanneren ettersom den allerede skulle være mettet med radioaktivt vann.



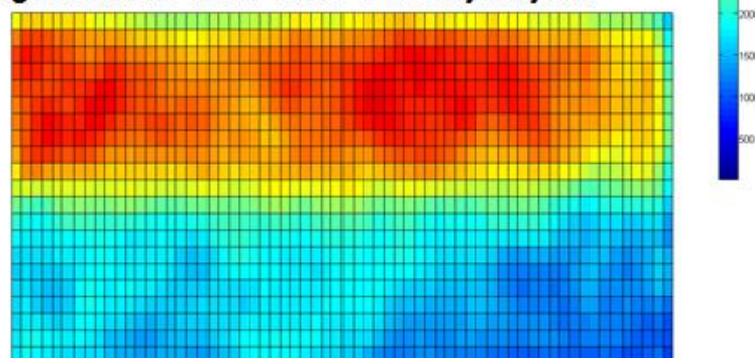
Figur 76: 3D avbildning av kjerne fremstilt ved bruk av programvaren Amira.

Figur 76 viser den kombinerte sandsteinskjernen avbildet i PET/CT skanneren. Avbildning 1 viser kjernen skannet ved CT. Man kan her se sprekken mellom kalksteinskjernen og sandsteinskjernen, hvor kalksteinskjernen lå øverst. Orientering på kjernen er lik for alle de tre avbildningene. Avbildning 3 viser den radioaktive strålingsenergien som er i kjernen målt ved bruk av PET skanneren. Avbildning 2 illustrerer hvordan man kan kombinere PET og CT skann for å tydeligere visualisere hvordan strålingsintensiteten varierer over kjernematerialet. Man kan ut i fra denne figuren se en høyere strålingsintensitet i kalksteinskjernen enn sandsteinskjernen. Avbildningene er hentet ut i fra ett og samme skann, som henholdsvis er det første skannet (det vil si skannet som ble brukt som normaliseringskann for metningen i kjernene som funksjon av strålingsintensitet).

Initiell radioaktiv strålingsaktivitet:



Strålingsaktivitet etter endt CO₂ injeksjon:

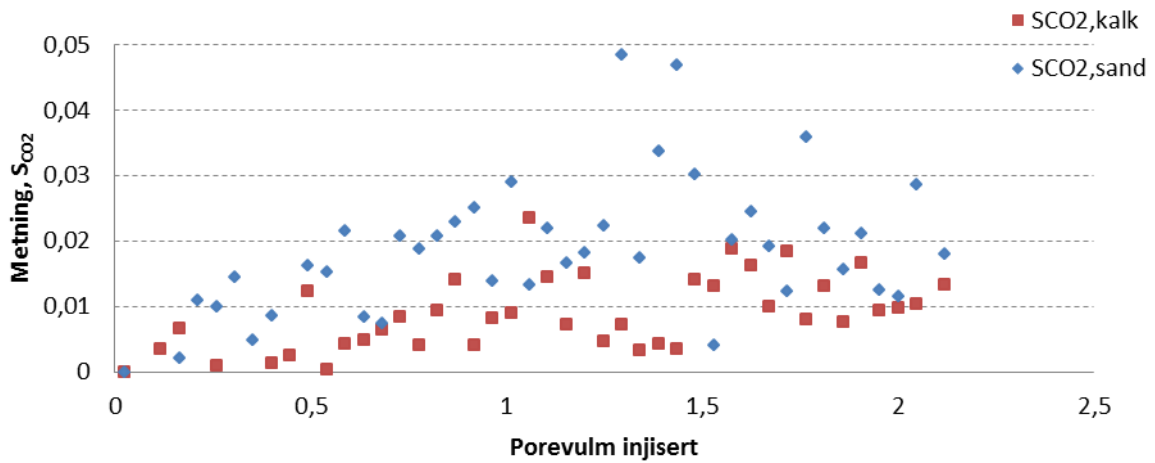


Figur 77: Strålingsaktivitet av kombinert sandstein (underst) og kalksteinskjerne (øverst) før og etter CO₂ injeksjon.

Figur 77 viser 2D profil av strålingsaktiviteten til den kombinerte kjernen før og etter CO₂ injeksjon. Profilet er sett i fra siden og er hentet fra midt i kjernen (2 mm tykt), slik at sprekken mellom sandstein og kalkstein vil være gitt omtrent som et tverrsnitt, horisontalt midt i plottet. X-aksen representerer lengden av kjernen, og y-aksen diameteren. Fargekodene er gitt som funksjon av strålingsintensitet i kjernen. Injeksjonen av CO₂ skjer fra høyre mot venstre i plottet.

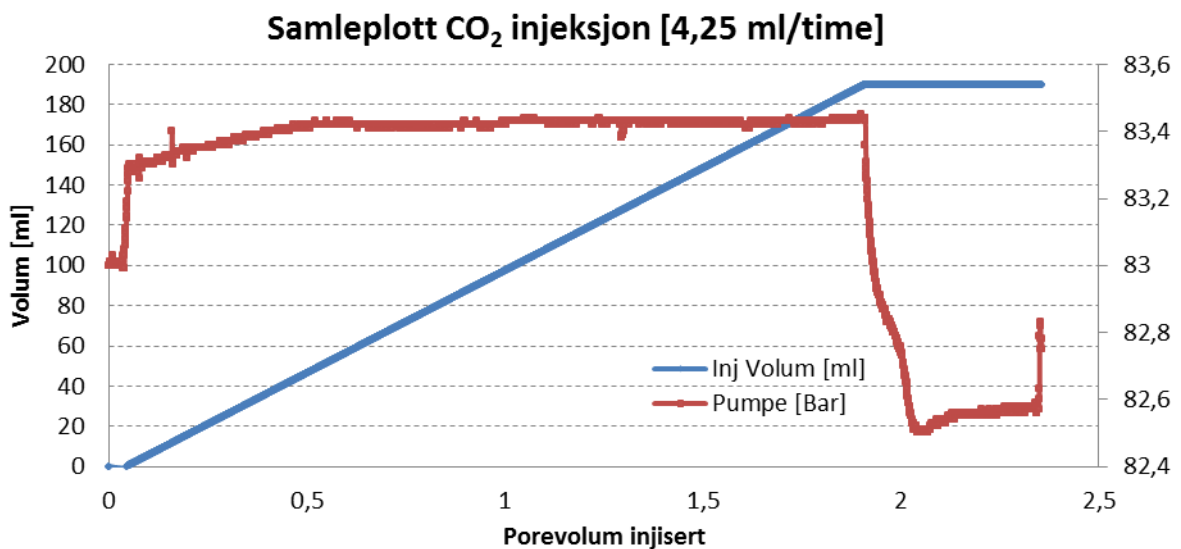
Kjernen ble utsatt for relativ lav strålingsendring. Dette indikerer liten metningsendring i kjernen ved CO₂ injeksjon. Endepunktsmetningen av CO₂ i kjernen sett opp mot normaliseringskkanet er på 1,5% CO₂ totalt i den kombinerte kjernen. Den lave endepunktsmetningen for CO₂, vil trolig skyldes sprekken mellom halvdelene av sandstein og kalkstein. En slik sprekke med god kommunikasjon gjennom hele kjernen, vil medføre at CO₂ vil hovedsakelig strømme gjennom denne. Metningsendringen som funksjon av injisert porevolum er gitt i Figur 78, hvor plottet er delt opp i endring av metning over og under sprekken langs kjernen, da henholdsvis sandstein og kalkstein relativt til hverandre.

Metningsendring; CO₂ injeksjon i kombinert sand og kalkstein kjerne.



Figur 78: Metningsendring som funksjon av porevolum injisert CO₂, for hver av de halve kalkstein og sandsteins kjernene.

Metningen basert på strålingsintensitet gir ingen klar trend for hvordan metningen i kjernematerialene endrer seg. Metningen har en veldig ustabil variasjon utover i injeksjonsprosessen, som kan komme av den lave den metningsendringen og strømming av vann innad i kjernen. Tverrsnittet er, som nevnt, hentet fra et 2 mm utsnitt i x-retning av kjernen. Dersom sporingvannet beveger seg i z-retning, vil strålingsintensiteten kunne variere slik som vist i Figur 78. Figuren viser likevel en trend for større økning av CO₂-metning i sandsteinen enn kalksteinen, men det er for liten total metningsendring for å kunne trekke noen bastant konklusjon ut i fra dette.



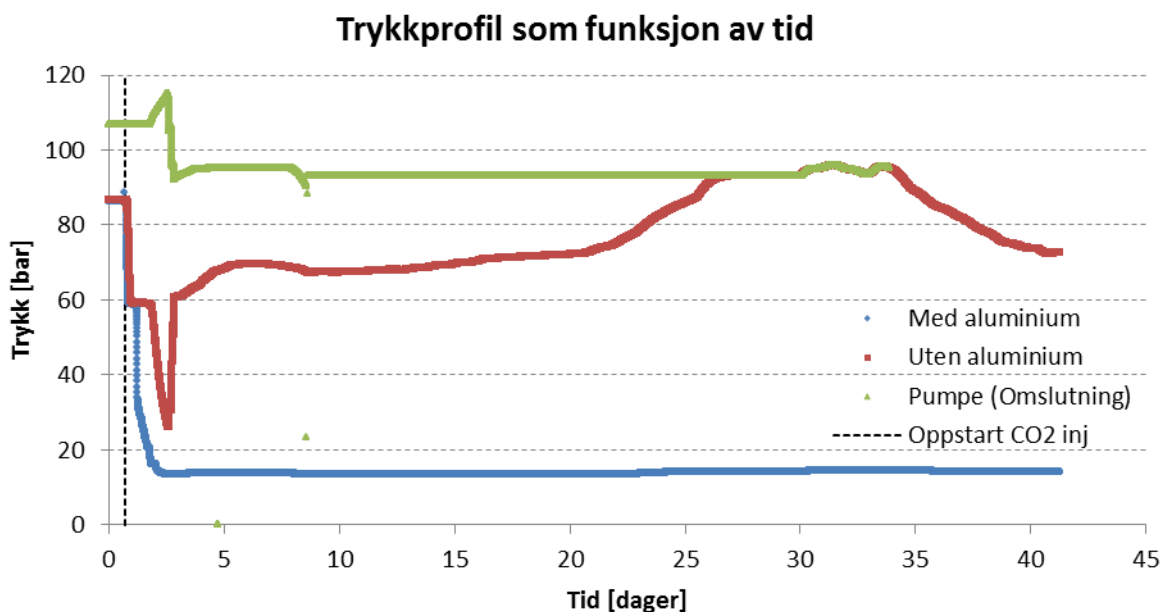
Figur 79: Plott av injeksjonspumpe data fra CO₂ injeksjon i kombinert kalkstein- sandstein kjerne.

Både av Figur 76 og Figur 77 kan man tydelig se forskjell på strålingsintensiteten i sandsteinen og kalksteinen. Dette var forventet ettersom porøsiteten til kalkstein er høyere enn for sandstein og begge ble injisert med samme vann (lik strålingsintensitet). Ettersom det er stor forskjell i permeabilitet mellom sandstein og kalkstein (1-4 mD mot 1100 mD) ble kjernene mettet med radioaktivt sporingsvann i to omganger. Kalksteinskjernen ble først mettet ved å plassere en halv dummy i kjerneholderen, slik at all injisert væske strømmet gjennom den halve kalksteinskjernen. På grunn av permeabilitetsforskjellen mellom sandstein og kalkstein, var det forventet at den halve sandsteinskjernen ville mettes 100 % med radioaktivt sporingsvann ved å direkte injisere sandsteinskjernen med kalksteinskjernen til stede fremfor en dummy. Det ble valgt å gjøre det slik for å minimere tiden personell var i kontakt med kjernematerialer som var mettet med radioaktivt sporingsstoff. Av skannedataene kan man tydelig se forskjell på strålingsaktivitet mellom kjernematerialene, og i tillegg kan man se av Figur 77 at det var forskjell på strålingsaktiviteten innad i sandsteins- og kalksteinskjernen. Dette tyder på at kjernematerialene ikke var 100% mettet med radioaktivt vann, noe som i størst grad gjelder for sandsteinen.

Strålingsintensiteten endret seg lite under injeksjonsprosessen av CO₂, noe som gav en veldig lav total metningsendring. Dette kan tyde på at CO₂ har fulgt sprekken fremfor å fortrenge vannet i kjernematerialene. For å sammenligne fortrenghingen av vann i kalkstein og sandstein, ble metningsendringen i kjernematerialene plottet mot hverandre i Figur 78. Fra dette plottet kan det indikere som at det er produsert mest vann ut av sandsteinen. Den totale metningsendringen og differansen mellom metningsendring i kalksteinen og sandsteinen er for lav til å kunne trekke konklusjon om vannproduksjonen hovedsakelig skjer fra den høypermeable sandsteinen.

6.8 Test av krympeplast

For å spare tid med å klargjøre blokker/kjerner, ble det sett på alternative metoder fremfor epoksy. Kriteriet for en slik metode er først og fremst at det ikke er mulighet for lekkasje gjennom det tidsløpet eksperimentet er ment til å kjøre. I tillegg må metoden være enklere og mindre tidkrevende å klargjøre. Krympeplast ble sett på som et alternativ, hvor UiB mottok to forskjellige prøver som kunne testes. Som nevnt i kapittel 5.5.8, var det bare den ene typen krympeplast (D3415) som krympt tilstrekkelig rundt kjernen ved hjelp av varmlufts pistol. Det ble derfor kun gjort eksperiment med denne typen krympeplast.

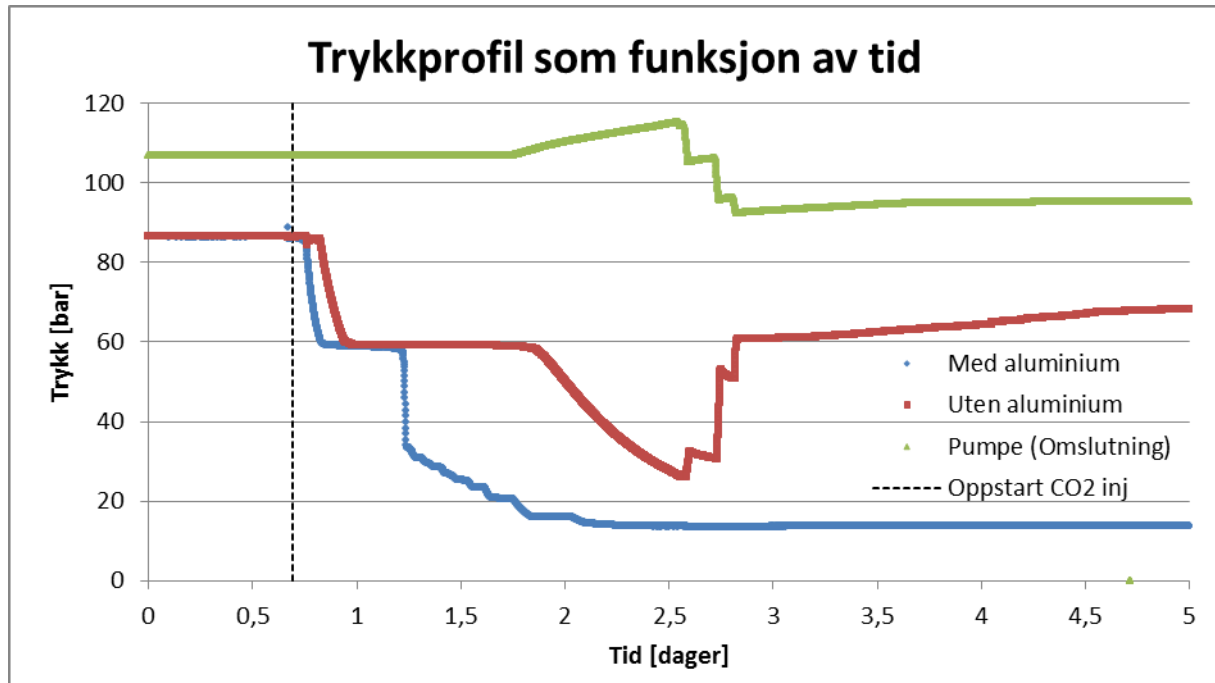


Figur 80: Trykkprofil av to kjerne som funksjon av tid sett opp mot logget omslutningstrykk rundt kjernene.

Figur 80 viser det absolute trykket til hver av de to kjernene over tid. Den røde kurven indikerer kjernen som kun var pakket inn med krympeplast. Den blå kurven indikerer kjernen som var rullet inn med aluminiumsfolie mellom kjernemateriale og krympeplasten som en ekstra barriere mot lekkasje. I forkant av injeksjon av CO₂ i kjernene, ble kjernene flømmet med 5 PV med saltvann og baktrykk på 86 bar, for å sørge for at kjernen var fullstendig mettet med vann. Ettersom en del vann ble fordampet ved pålegging av krympeplast på kjerne, grunnet varmlufts pistol. Den svarte stiplede streken i Figur 80 indikerer hvor CO₂ injeksjonen startet. Kjernene ble så lukket inne ved å stenge to ventiler tett på kjernen ved injeksjonssiden og produksjonssiden, hvor absoluttrykket i kjernene fortsatt kunne logges individuelt.

Absoluttrykket innad i kjernen, etter at injeksjonen var stoppet og ventilene stengt, sank umiddelbart ned til 58 bar. CO₂ ble injisert i kjernen uten aluminium etter kjernen med aluminium var ferdig injisert med CO₂, derav faller trykket noe senere for denne kjernen. 58 bar er det kritiske trykket hvor CO₂ går fra væske til gass ved romtemperatur 21°C [20] (se kapittel 1.7 Viskositet og tetthet). For kjernen med aluminium holder trykket seg relativt stabilt ved dette trykket i 8,5 timer, og for kjernen uten aluminium holdt trykket seg stabilt i 20,5 timer, før det falt ytterligere. Trykket stabiliserte seg da på rundt 15 bar for kjernen med aluminium gjennom hele forsøket. For kjernen uten aluminium

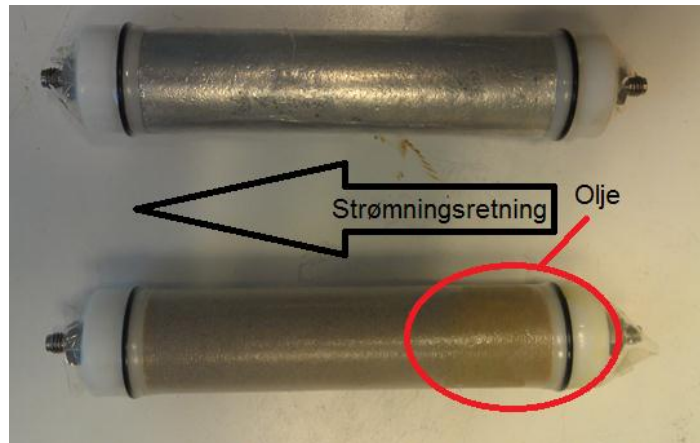
kan man se antydning til at trykkendringen påvirker, eller blir påvirket av, omslutningstrykket. Avslutningsvis i forsøket følger trykkprofilen til denne kjernen det nøyaktig samme trykket som for omslutningstrykket. I Figur 81 kan man se trykkprofilen de første 5 dagene, hvor trykkendringene var størst.



Figur 81: Trykkprofil av to kjerner, som funksjon av tid sett opp mot logget omslutningstrykk rundt kjernene (avgrenset tidsintervall).

For kjernen *uten* aluminium kommer det tydelig frem at det er en direkte kommunikasjon mellom trykket i kjernen og omslutningstrykket. Dette viser at det er en lekkasje inn til kjernen, som også kommer frem av bildet tatt av kjernen etter forsøket (Figur 82). Man kan tydelige se lekkasjen ved injeksjonssiden. Produksjonssiden vil være den siden av kjernen med antatt høyest CO₂ konsentrasjon (basert på avbildningseksperimenter av CO₂ fortregning vist i kapittel 6.3 og 0), hvor krympeplasten her vil være mest utsatt for karbonsyre. Samtidig kan lekkasjen ha oppstått uten at selve krympeplasten var blitt ødelagt, altså lekkasje mellom endestykket og krympeplasten. Det kan også ha oppstått en lekkasje i koblingen som leder inn til kjernen. Når trykket i kjernen begynte å øke igjen (etter litt over 2,5 dager), så reduseres omslutningstrykket på lik linje som trykket til kjernen øker. Dette kan indikere at omslutningsoljen startet å migrere inn i kjernen.

For kjernen *med* aluminiumsfolie er det ikke noen direkte paralleller mellom omslutningstrykket og trykket i kjernen. I tillegg viste det ingen indikasjon på kjernen, etter den ble tatt ut, at noe olje hadde migrert inn i den. Sett ut i fra trykkprofil og observasjon av kjernen har det ikke vært noen lekkasje gjennom krympeplasten. Årsaken for at trykket i kjernene ikke holdt seg stabilt på 86 bar, etter injeksjonen stoppet og de ble stengt inne med ventiler, er uklart. Årsaken kan skyldes en liten lekkasje i en kobling eller i absoluttrykkmålerne (det var ingen lekkasjer i forkant av forsøket da systemet ble trykktestet). Selv om dette trykket ikke holdt seg stabilt, så vil eksperimentet likevel være gjeldende ettersom kjernene var fylt med vann og CO₂ som danner karbonsyre og derav kan danne lekkasje i krympeplasten uavhengig av trykket i kjernen.



Figur 82: Bilde tatt kjernene etter endt eksperiment.

Det ble i dette eksperimentet tydelig observert lekkasje for kjerne som var kun pakket inn med krympeplast. Kjernen med krympeplast óg aluminiumsfolie, viste seg å ikke danne noe kommunikasjon mellom omslutningsolje og poretrykk i løpet av de 41 dagene eksperimentet pågikk. Det er for lite repeterbarhet og historisk data for å kunne fastslå om dette er noe som kan la seg benytte i fremtidige eksperimenter, men resultatet tyder til at dette kan være aktuelt å bruke fremfor epoksy.

7 Konklusjon

- Resultatene fra strømningsriggen gir en uniform oppløsning av fortrenkning av det radioaktive sporingsvannet. Metningen beregnet av radioaktiv stråling og materialbalanse samsvarer ikke med hverandre, noe som medfører at strålingsmetningen må korrigeres for ved andre metoder (resistivitet). Det er ikke mulig å tydelig kunne registrere fingering med denne avbildningsmetoden. I tillegg tar hvert skann lang tid (timer) sammenlignet med PET/CT-skann ved Haukeland (sekunder). Fordelen med NTI-metoden er at større blokker av bergarter kan benyttes og effekter av gravitasjon kan lettere være mulig å identifisere.
- Endepunktsmetning i sandstein, basert på materialbalanse, var på $S_{CO_2} = 50\% \pm 5\%$, hvor det viser en tydelig trend på at metningen øker ved økt injeksjonsrate. Vinklingen på kjernematerialet spiller også inn med tanke på metning. Injeksjon ovenfra gir en mer gravitasjonsstabil fortrenkning og økt potensiell lagringskapasitet, sammenlignet med injeksjon fra bunnen av kjernematerialet.
- CO_2 danner størst metning ved injeksjonssiden i kjernematerialet, for så å danne kanaler (fingring) som leder CO_2 med reduserende grad av sveip til produksjonssiden, på grunn av det ikke-ideelle mobilitetsforholdet. Dette var forventet og i overensstemmelse med andre studier.
- Ved PET/CT skanneren på Haukeland ble det med suksess utprøvd en ny metode for å avbilde et eksperiment kontinuerlig gjennom en fortrenkingsprosess med korte tidsintervall (ned i sekunder om ønsket). I tillegg gir den høy oppløsning, som gjør det mulig å kunne se hvordan CO_2 beveger seg i kjernematerialet. Dette vil være steget videre sammenlignet med avbildningsteknikken ved strømningsriggen ved UiB, som gir en mer uniform avbildning av strålingsaktiviteten.
- Kalkstein viser seg å ikke være godt egnet for CO_2 lagring i saline reservoarer. Dette på grunnlag av eksperiment vist i kapittel 0, hvor kalksteinen gikk i oppløsning. Kalksteinen gikk i oppløsning på grunn av at det ble dannet karbonsyre. Dersom en slik oppløsning og deformasjon skjer i et reservoar, kan det medføre brudd på kappebergarten og dermed lekkasje av CO_2 ut fra lagringsreservoaret.
- Krympeplasten ser ut i fra eksperimentet utrettet i denne oppgaven til å kunne være aktuell som erstatning for epoksy og holde systemet tett i minst 40 dager, dersom man benytter seg av aluminiumsfolie som ekstra barriere mellom kjernemateriale og krympeplast. Det er for tidlig å trekke en bastant konklusjon på dette. Men arbeidet utført her indikerer at dette kan være fordelaktig både med tanke på tidsbruk og lekkasje.

7.1 Videre arbeid

Eksperimentell forskning på CO₂ lagring er relativt nytt ved Universitetet i Bergen, men er tema som er veldig aktuelt i dagens internasjonale samfunn. Videre forskning på å kunne få historiebekreftet data fra tidligere eksperimenter og få nytenkning på metoder for å kunne avbilde og innhente data fra CO₂ vann fortrenkning er derfor viktig. Videre arbeid som kan utføres fra det som er blitt gjort i denne oppgaven vil være:

- For blokkeksperimentet, er det vannet som er merket med radioaktivt sporingstoff. Når vannet fortrenkes med CO₂, er det muligheter for at det vil bli liggende radioaktive salter igjen i porene. Dette kan medføre et overestimat av metningen av vann som er i blokken etter CO₂ injeksjon. Vurder muligheten for å kunne se på den totale metningen beregnet ut i fra massebalanse, i tillegg til materialbalanse og strålingsaktivitet.
- Se på en oppgradering av oppsettet for å lukke akkumulatorcellen og rørledningen som er fylt med ¹¹C ytterligere inn med bly. Dette for å skjerme personell når oppsettet skal trilles inn til PET/CT skanneren ved Haukeland Universitets sykehus. Ved å utbedre dette kan det kjøres injeksjon hvor CO₂ er merket med radioaktivitet fremfor vann. Man vil da kunne gjøre et bedre estimat for metning av CO₂, enn når det er vannet som er merket med ²²Na.
- Bruke dummy for både halve sandsteinskjerner og kalksteinskjerner for å mette de tilstrekkelig med radioaktivt vann. I tillegg ble det observert lite endring i strålingsaktivitet ved CO₂ injeksjon på kombinert sandstein og kalksteinskjerne, hvor årsaken trolig kan være at CO₂ har fulgt sprekken gjennom kjernen. Gjør eksperiment med foringspakning mellom kjernene for å tydeligere kunne se effekten av vannfortrenkning ved CO₂ injeksjon på forskjellige kjernemateriale.
- Utprøve krympeplast ytterligere. Mangler her historisk data og repeterbarhet for om dette er noe som kan benyttes (UiB mottok akkurat nok krympeplast for å prøve ut på to kjerner). Eksperimentet i denne oppgaven ga interessante resultater som kunne indikere på at dette vil fungere, og dermed spare mye tid for preparering og i tillegg være mer driftssikkert gjennom eksperimentet (med tanke på elastisitet).
- Se på utstyrsmuligheter for å kunne utføre eksperimenter for å finne den relative permeabiliteten i sandstein. Må her få tak i en trykktransduser som måler lave trykkendringer over en kerne ved høye trykk.
- Modifisere oppsettet for å gjøre det mulig å kjøre eksperimenter hvor man ser på CO₂ metning som funksjon av resistivitet, samtidig som det er mulig å måle differensialtrykk. Kan for eksempel benytte to absolutt trykkmålere (en ved produksjonssiden og en ved injeksjonssiden) for så å kalibrere disse mot hverandre, slik at differensialtrykket blir målt over dem. Dette vil utelukke muligheten for at elektrisitet går over rørledningen rundt kerneholderen, fremfor gjennom kjernen.
- Kjøre simuleringer, ved for eksempel bruk av CMG, for å se på effekten av viskositetsendring av CO₂ (ved bruk av surfaktanter) og effekten av fingring på større skala enn kjernen som ble kjørt på Haukeland.
- De fleste lagringspotensielle områdene er ved dyp og temperaturer som medfører CO₂ i superkritisk tilstand, hvor utførelse av eksperimenter for CO₂ lagring ved superkritisk tilstand vil være aktuelt.

8 Forkortelser

- TCM Teknologisenteret på Mongstad
- NTI Nuclear Tracer Imaging (Radioaktiv sporingsavbildning)
- PET Positron Emisjons Tomografi
- CW Chase Water (sporingssvann injisert etter CO₂ injeksjon)
- RWAT Radioactive water (Radioaktivt vann)
- CCS Carbon capture storage (Karbon, fangst, lagring)
- CO₂ Karbon dioksid
- CT Computed Tomography (Beregnet tomografi)
- ¹¹C Kunstig isotope av karbon, brukt som sporingsstoff for CO₂
- ²²Na Radioaktivt isotop av natrium, brukt som radioaktivt sporingsstoff for vann
- Ω Ohm – elektrisk motstand
- θ Vætningsvinkel mellom to fluid/vinkling av kjerne I forhold til horisontalplanet
- P_c Kapillærtrykk
- Ca/N_c Kapillærnummer
- σ Grensflatespenning
- μ Viskositet
- M Mobilitetsratio
- λ Mobilitet av et fluid
- A Tverrsnittsareal
- L Lengde av kjernemateriale
- V_{pa} Totale porevolum
- V_b Bulkvolum
- φ_{Abs} Absolutt porøsitet
- φ_{Eff} Effektiv porøsitet
- V_p Effektivt porevolum
- Q Strømningsrate
- dp Trykkforskjell
- dx Lengde av materialet
- K Absolutt permeabilitet

- ρ Tetthet av fluidet
- g Gravitasjonsakselerasjonen
- K_e Effektiv permeabilitet
- K_r Relativ permeabilitet
- S_w Vannmetning
- S_{CO_2} CO₂-metning
- V_w Volum vann
- V_{CO_2} Volum CO₂
- r Radius
- d Radioaktiv intensitet
- B Radioaktiv intensitet, bakgrunnskann
- h Høyde
- PV Porevolum
- ΔP Trykkfall
- M_t Masse kjerne, tørr
- M_m masse kjerne, mettet

9 Referanse

1. Ramstad, T., *Report from Task 2: CLIMIT Project 203175: Pore Scale Numerical Analysis for Geological Sequestration of CO₂*. 2011.
2. A. Riaz, H.A.T., *Experimental Study of CO₂ Injection Into Saline Formations*. 2009.
3. Perkins, E., *Fundamental Geochemical Processes Between CO₂, Water and Minerals*. (Alberta Innovates - Technology Futures).
4. P. Chiquet, D.B., S. Thibeau, *Wettability alteration of caprock minerals by carbond dioxide*. 2007.
5. Miljøverndepartementet. *Årsaker til klimaendring*. Available from: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/md/tema/klima/sporsmal-om-klimaendringene.html?id=449643>.
6. IEA, *Energy Technology Perspectives 2010 - Scenarios & Strategies to 2050*. 2010: p. Executive summary.
7. Wright, I.W., et al., *An Overview of Active Large-Scale CO₂ Storage Projects*, in *SPE International Conference on CO₂ Capture, Storage, and Utilization 2009*, Society of Petroleum Engineers: San Diego, California, USA.
8. mareano, *CO₂-lagring og klima*. samler om kunnskap i havet.
9. CICERO. *Norge har tro på CO₂-fangst*. 2009; Available from: <http://www.cicero.uio.no/fulltext/index.aspx?id=7648>.
10. Olje- og energidepartementet. *Fangst, transport og lagring av CO₂*. 2008; Available from: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/oed/tema/co2/fangst-transport-og-lagring-av-co2.html?id=443518>.
11. GASSNOVA. *CO₂-handtering - ei viktig sak for regjeringa*. 2012; Available from: http://www.gassnova.no/co2-handtering-ei-viktig-sak-for-regjeringa/?publish_id=1427&year=2012.
12. Klima og forurensningsdirektoratet. *Bedrifter med størst CO₂ utslipp*. 08.05.2012; Available from: <http://www.klif.no/no/Aktuelt/Nyheter/2012/Mai-2012/Bedrifter-med-storst-CO2-utslipp/>.
13. Technology_Center_Mongstad. *Selskapet TCM DA etablert*. 2009; Available from: <http://www.tcmda.com/no/Presserom1/Nyheter1/2009/Selskapet-TCM-DA-etablert/>.
14. GASSNOVA. *Opening of CO₂ Technology Centre Mongstad by Prime Minister Jens Stoltenberg*. 2012; Available from: <http://www.gassnova.no/opening-of-co2-technology-centre-mongstad-by-prime-minister-jens-stoltenberg>.
15. Selley, R.C., *Elements of Petroleum Geology*, 1988, Academic Press.
16. A.B.Zolotukhin_and_J.-R.Ursin, *Introduction to petroleum reservoir engineering* 2000: Høyskoleforlaget AS. 407.
17. F.M. Orr, J., J.P. Heller, J.J. Taber, *Carbon Dioxide Flooding for Enhanced Oil Recovery: Promise and Problems*, in *American Oil Chemists' Society 1982*, New Mexico Institute of Mining and Technology: Toront, Canada.
18. Ren, G., H. Zhang, and Q.P. Nguyen, *Effect of Surfactant Partitioning Between CO₂ and Water on CO₂ Mobility Control in Hydrocarbon Reservoirs*, in *Enhanced Oil Recovery Conference 2011*, 2011, Society of Petroleum Engineers: Kuala Lumpur, Malaysia.
19. ramé-hart. *ramé-hart contact angle goniometers and tensionmeters*. 2012; Available from: <http://www.ramehart.com/glossary.htm>.
20. NIST. *NIST Chemistry WebBook*. 2011; Available from: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>.
21. A. Hildenbrand, S.S., B.M. Krooss, R. Littke, *Gas breakthrough experiments on peltic rocks: comparative study with N₂, CO₂ and CH₄*. 2004: p. 61-80.
22. Anderson, W., *Wettability Literature Survey- Part 2: Wettability Measurement*. SPE Journal of Petroleum Technology, (1986b). **38**(11): p. 1246-1262.

23. T. Ramstad, N.I., C. Nardi, P. E. Øren, *Relative Permeability Calculations from Two-Phase Flow Simulations Directly on Digital Images of Porous Rocks*. 2011: p. 18.
24. C. Bardon, D.G.L., *Influence of Very low Interfacial Tensions on Relative Permeability*. 1980.
25. Lake, L.W., *Enhanced Oil Recovery*. 1989.
26. K.A. Birkedal, G.E., L.P. Ø hauge, A. Graue, *Electrical Resistivity Measurement of CH₄ Hydrate-bearing Sandstone During Formation*. 2011.
27. Donaldson, E.C. and T.K. Siddiqui, *Relationship Between the Archie Saturation Exponent and Wettability*. SPE Formation Evaluation, 1989. **4**(3): p. 359-362.
28. Leksikon, S.N. *karbondioksid*. 2012; Available from: <http://snl.no/karbondioksid>.
29. EPA, *Greenhouse Gas Emissions*. 2012.
30. E.K. Halland, W.T.J., F. Riis, *CO₂ Storage Atlas - Norwegian North Sea*. 2011(Norwegian petroleum directorate).
31. Hangx, S.J.T., *Behaviour of the CO₂-H₂O system and preliminary mineralisation model and experiments*. HPT Laboratory, Department of Earth Sciences Utrecht University, 2005.
32. Lenntech. *Carbon dioxide*. Available from: <http://www.lenntech.com/carbon-dioxide.htm>.
33. Yan, W. and E.H. Stenby, *The Influence of CO₂ Solubility in Brine on CO₂ Flooding Simulation*, in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition 2009*, Society of Petroleum Engineers: New Orleans, Louisiana.
34. Bob, A.J. McMahon, and K. Blakley, *The Controversy of CO₂ Solubility in Water*, 1998, NACE International.
35. Ibrahimlubis. *From geology to energy resources, from energy to automotive*. 2011; Available from: <http://ibrahimlubis.wordpress.com/category/mobil/>.
36. A. Chadwick, R.A., C. Bernstone, F. May, S. Thibeau, P. Zweigel, *Best Practice For The Storage Of CO₂ In Saline Aquifers - Observations and guidelines from SACS and CO₂STORE projects*. 2007.
37. Bergen, H. *PET/CT-undersøkelser*. 2010; Available from: <http://www.helse-bergen.no/pasient/undersokelser/Sider/pet-ct-unders%C3%B8kelser.aspx>.
38. S.R. Cherry, M.D., *PET: Physics, Instrumentation and Scanners* 2006, Springer New York: Editor M.E. Phelps
39. D.L. Bailey, D.W.T., P.E. Valk and M.N. Maisey, *Positron Emission Tomography, Basic Sciences* 2005.
40. R.A. Ketcham, W.D.C., *Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences*. 2001: p. 381-400.
41. Watanabe, N., et al., *Precise 3D Numerical Modeling of Fracture Flow Coupled With X-Ray Computed Tomography for Reservoir Core Samples*. SPE Journal, 2011. **16**(3): p. pp. 683-691.
42. Imaging, C.f.Q.X.-R. *Basics and capabilities of X-ray CT*. 2009; Available from: <http://www.cqi.psu.edu/basics.html>.
43. Haugen, M., *CO₂ Injection in Fractured Chalk for Enhanced Oil Recovery*. 2012.
44. Technology, J.-J.o.N.M. *Principles of CT and CT Technology*. 2007; Available from: <http://tech.snmjournals.org/content/35/3/115.full>.
45. N.A. Baily, P.R.R., D.P. Robinson, *Nuclear measurements of fluid saturation in EOR flood experiments*. 1981.
46. G. Ersland, M.A.F., A. Graue, B.A. Baldwin, J. Stevens, *Complementary imaging of oil recovery mechanisms in fractured reservoirs*. 2008.
47. J.R. Lien, A.G., K. Kolltveit, *A Nuclear Imaging Technique For Studying Multiphase Flow In A Porous Medium At Oil Reservoir Conditions*. 1988.
48. Austin, T.U.o.T.a. *Nuclear Decay*. 2012; Available from: <http://ch302.cm.utexas.edu/?module=nuclear-decay>.
49. Benson, S.M., *Multiphase Flow and Trapping of Carbon Dioxide in Deep Saline Aquifers*, 2008.

50. B. L. Alemu, E.A., M. Soldal, Ø. Johnsen, P. Asgaard, *Effect of sub-core scale heterogeneities on acoustic and electrical properties of a reservoir rock: a CO₂ flooding experiment of brine saturated sandstone in a computed tomography scanner*. 2011.
51. NGI_(Norges_Geotekniske_Institutt). *CO₂ påvirker reservoaregenskaper*. Available from: <http://www.ngi.no/no/Innholdsbokser/Referansjeprojekter-LISTER-/Referanser/CO2-pavirker-reservoarenes-geofysiske-egenskaper/>.
52. Tveit, J.A.F., *An Experimental Study of Water Mixing in Carbonate Rocks Using Different Imaging Techniques*. 2012.
53. A. Graue, B.K., *Environmentally Friendly CO₂ Storage in Hydrate Reservoirs Benefits From Associated Spontaneous Methane Production*. 2006.
54. Christophersen, A., *Økt oljeutvinning ved injeksjon av CO₂-skum i en oppsprukket karbonatbergart ved forskjellige fuktforhold*. 2012.
55. Graue, A., R. Moe, and B.A. Baldwin, *Comparison of Numerical Simulations and Laboratory Waterfloods with In-Situ Saturation Imaging of Fractured Blocks of Reservoir Rocks at Different Wettabilities*, in *SPE International Petroleum Conference and Exhibition in Mexico 2000*, Copyright 2000, Society of Petroleum Engineers, Inc.: Villahermosa, Mexico.
56. Swagelok. *Dielectric Fittings*. Available from: <http://www.swagelok.com/downloads/WebCatalogs/EN/MS-02-36.PDF>.
57. Ramstad, T., *Report from Task 3. CLIMIT project 203175: Pore scale Numerical Analysis for Geological Sequestration of CO₂*. 2011.
58. Ramstad, T., *Personlig kommunikasjon*. 2012.
59. R.I. Korsnes, M.V.M., K.A.N. Vorland, T. Hildebrand-Habel, T.G. Kristiansen, A. Hiorth, *Enhanced Chemical Weakening of Chalk Due to Injection of CO₂ Enriched Water*. 2008.
60. Stanford. *Radiation Safety Data Sheet; Na²²*. Available from: http://www.stanford.edu/dept/EHS/prod/researchlab/radlaser/RSDS_sheets/Na-22.pdf.

A. Vedlegg – Usikkerhetsberegninger

Resultatene ved eksperimentelt arbeid, vil alltid påvirkes av usikkerheter. Nøyaktigheten til utstyret (som er benyttet i dette studiet) er høyere enn det største bidraget til usikkerhet som vil være eksperimentelle usikkerheter som lekkasje, luft i systemet, eller lignende. Kjernene ble preparert gjennom flere trinn før kjøring av eksperimentene (dimensjon, porøsitet og permeabilitet), og ved flere av trinnene ble det utført målinger. Hver måling forbindes med en viss grad av usikkerhet, og den totale usikkerheten kan dermed bli komplisert å beregne. En rekke forenklinger for å utføre en usikkerhetsanalyse er derfor nødvendig. Nøyaktig arbeid og gode rutiner er viktig for å minimere den totale usikkerheten ved eksperimentelt arbeid. Statistikk og repeterbarhet ved hvert enkelt eksperiment vil kunne bidra til øke sikkerheten på resultatene.

Formler for beregning av usikkerhet:

Usikkerheten for en verdi R , gitt ved variablene x, y, z, \dots, i , hver med usikkerhet gitt ved $\delta_x, \delta_y, \delta_z, \dots, \delta_i$, kan beregnes ved hjelp av følgende uttrykk:

$$\delta_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x} \delta_x\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial y} \delta_y\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial z} \delta_z\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial i} \delta_i\right)^2} \quad 24)$$

Hvor x, y, z, \dots, i er variabler uten korrelasjon, og $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots, \bar{i}$ er aritmetiske gjennomsnitt av de målte variablene, gitt ved:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad 25)$$

Ved standard kjerne og blokk analyse er det usikkerheter i dimensjonsmålingene ved bruk av skyvelære. Det ble derfor gjort minimum 5 målinger for hver dimensjonslengde og beregnet et gjennomsnittsverdi ut i fra ligning 25. Det er usikkerhet i vekt målinger og antagelse om at kjernepluggene/blokkene hadde perfekt geometri.

Porøsitet

For porøsitet inngår det to hovedfaktorer; bulkvolum og porevolum. Bulkvolumet til kjernepluggene ble beregnet ut i fra $V_b = \pi r^2 L$. Lengde og diameter ble som sagt målt med skyvelære med en nøyaktighet på +/- 0,01 mm. Usikkerheten er beregnet ut fra:

$$\delta_{V_b} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_b}{\partial L} \cdot \delta_L\right)^2 + \left(\frac{\partial V_b}{\partial r} \cdot \delta_r\right)^2} = \pi \sqrt{(r^2 \cdot \delta_L)^2 + (2L \cdot \delta_r)^2} \quad 26)$$

For bulkvolumet til blokkene vil usikkerheten i tre variabler inkluderes i ligning 26, da henholdsvis lengde, bredde og høyde. Porevolumet ble funnet ved massebalanse som beskrevet i kapittel 5.3 og 5.4. Nøyaktigheten til vekten som ble benyttet var +/- 0,01g, mens usikkerheten for tettheten til vannet fylt i porene neglisjeres. Usikkerhet for beregning av porevolum er da gitt med:

$$\delta_{V_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_p}{\partial \Delta m} \cdot \delta_{\Delta m}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_p}{\partial \rho} \cdot \delta_{\rho}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{\Delta m}}{\rho}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta m}{\rho^2} \cdot \delta_{\rho}\right)^2} \quad 27)$$

Permeabilitet

Permeabiliteten ble målt som beskrevet i 5.3.2 og 5.4.2, hvor usikkerhetene i lengde og areal er gitt som for porøsitet. Usikkerheten for viskositet neglisjeres. Pumperatens nøyaktighet er satt til +/- 5% og trykkmålingene +/- 2% av full skala (20 bar) for trykkmåleren til kalkstein. For sandstein er det satt en usikkerhet på avlesningen for høyden i vannsøylen på +/- 1mm. Eksempel på den totale usikkerheten for permeabilitetsmåling er gitt ved:

$$\frac{\delta_K}{K} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{\bar{q}}}{\bar{q}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\bar{\mu}}}{\bar{\mu}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\bar{L}}}{\bar{L}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\bar{A}}}{\bar{A}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\Delta p}}{\Delta p}\right)^2} \quad 28)$$

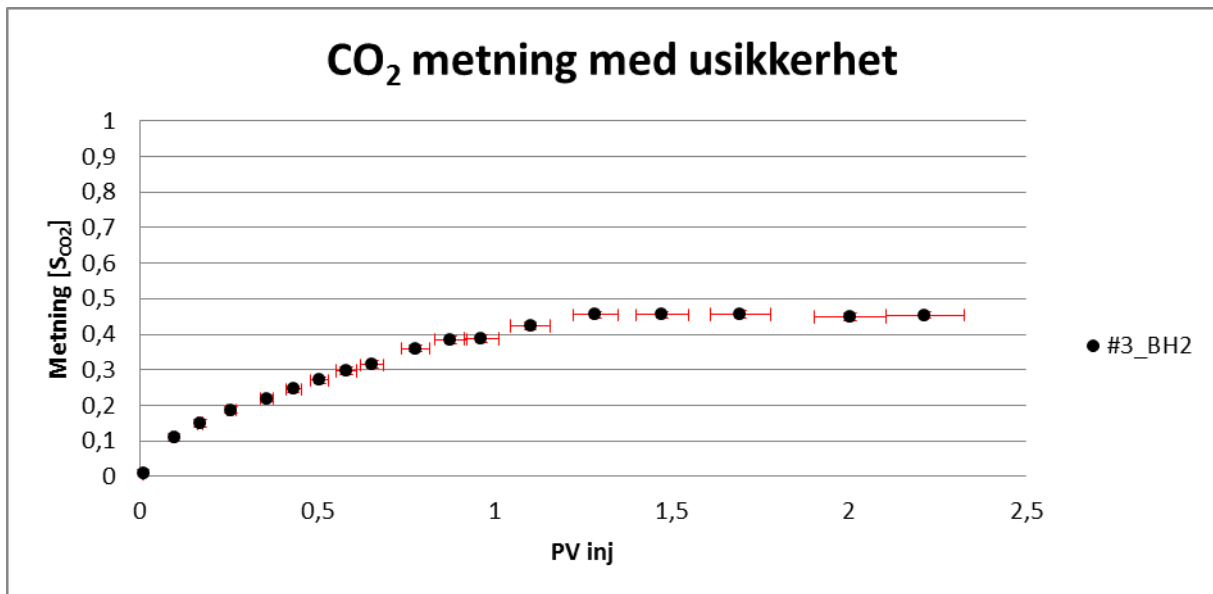
Usikkerheter ved kjøring av eksperimenter

For hvert enkelt eksperiment er det en rekke parametere som bidrar med usikkerheter. Usikkerheten for fluidmetning ved et gitt punkt i basert på strålingsaktivitet, sett ut i fra usikkerheten gitt for Δd på side 32:

$$\Delta S_{i,w} = \sqrt{\left(\frac{\Delta d_i}{d_{i,100\%}}\right)^2 + \left(\frac{d_i}{(d_{i,100\%})^2} \Delta d_{i,100\%}\right)^2} \quad 29)$$

Der $\Delta S_{i,w}$ er usikkerheten for fluidmetningen ved et gitt punkt i , Δd_i er usikkerheten for den radioaktive intensiteten ved et gitt punkt i , $\Delta d_{i,100\%}$ er usikkerheten for intensiteten ved 100% skann. Typisk usikkerhet for et skann er 3-5% (se kapittel 3.1.2), men for et 100% skann vil det være noe lavere ettersom det gjerne vil være høyere radioaktiv intensitet.

Fordampning ved produsert volum er blitt neglisjert i beregningene ettersom beholderen ble dekket til og det ble gjort forsøk på å se på volumendring over tid som ga liten endring (se kapittel 6.5). Usikkerhet på pumperate er satt til +/- 5%, dødvolum i linjene ble anslått til +/- 1,0 ml, avlesning av produksjon ved hjelp av bilder tatt av webkamera +/- 0,5 ml for en 50 ml målesylinder og avlesning av produksjon ved vekt er satt til 0,01 g.



Figur 83: Eksempel for usikkerhetsvisualisering av metning og PV injisert ved CO₂ injeksjon (5 ml/min).

B. Vedlegg – ²²Na datablad

RADIONUCLIDE SAFETY DATA SHEET	
NUCLIDE: Na-22	FORMS: ALL SOLUBLE
PHYSICAL CHARACTERISTICS:	
HALF-LIFE: 2.6 years	
TYPE DECAY: positron emission --- maximum energy 0.545 MeV gamma ray associated with annihilation 0.511 MeV accompanying gamma photons 1.275 MeV	
Hazard category: C- level (low hazard) : 0.001 to 0.1 mCi B - level (Moderate hazard) : > 0.1 mCi to 10 mCi A - level (High hazard) : greater than 10 mCi	
EXTERNAL RADIATION HAZARDS AND SHIELDING:	
The gamma exposure rate at 1 cm from 1 mCi of <u>Na22 shielded for positrons</u> is 12000 mR/hr. The half and tenth values of lead for this gamma are 0.9 and 3.6 cm respectively. The maximum exposure rate at 1 foot from such storage areas must be shielded to less than 2 mR/hr.	
The dose rate from the positrons is 310,000 mrad/hr at 1 cm per mCi. The maximum range of the positrons is about 44 inches in air, and about 0.06 inches in lucite. The use of the lead shield for storage will provide an adequate shield for the positron particles.	
HAZARDS IF INTERNALLY DEPOSITED:	
It is important to avoid ingestion and /or skin contamination.	
The Annual Limit of Intake based on a whole body dose of 500 mrem per year is 54 microcuries. The maximum permissible body burden is 10 microcuries; the critical organ being the body fluids.	
DOSIMETRY AND BIOASSAY REQUIREMENTS:	
Film badges and dosimeter rings are required if 0.5 millicuries or more are being handled at any one time or 0.1 millicurie levels are handled on a frequent (daily) basis.	
SPECIAL PROBLEMS AND PRECAUTIONS:	
1. Work behind shielding, preferably transparent materials. Use remote handling whenever possible.	
2. Survey frequently. Change gloves often.	
3. Segregate wastes to those with half-lives greater than 90 days (but not with H3 and/or C14).	
4. Limit of soluble waste to sewer: 1 microcurie per day per lab.	
6/90	

Figur 84: Vedlegg 1; ²²Na datablad [60]

C. Vedlegg – Epoksy datablad



GC1 150 / GC 15

TECHNICAL DATA SHEET

EPOXY GEL COAT
CAN BE SANDED – GLOSS RECOVERY
GOOD TEMPERATURE RESISTANCE
GOOD CHEMICAL RESISTANCE

USE

Molds : Polyester RTM, polyurethane foaming.

MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES AT 23°C ⁽¹⁾			
Hardness	ISO 868-85	Shore D1 / D15	87 / 86
Compressive modulus	ISO 604-97	MPa	6000
Compressive yield strength	ISO 604-97	MPa	120
Flexural modulus	ISO 178-93	MPa	4800
Flexural strength	ISO 178-93	MPa	103
Glass transition temperature after curing	T.M.A.-Mettler	°C	130
Glass transition temperature without curing (24hrs at room temperature)	T.M.A.-Mettler	°C	100

(1) : Average values obtained on standardized specimens / Hardening 16 hrs at 25°C + curing described in processing conditions

STORAGE CONDITIONS

Use before 24 months according to the manufacturing date. Expiration date indicated on the packaging.

HANDLING PRECAUTIONS

Normal health and safety precautions should be observed when handling these products :

- ensure good ventilation
- wear gloves, safety glasses and clothes.

For further information, please consult the product safety data sheet.

PACKAGING

Resin	Hardener
1 x 8.69 kg	1 x 1.740 kg
12 x 0.326 kg	Carton de 12 x 0.065 kg

GUARANTEE

The information of our technical data sheet are based on our present knowledge and the result of tests conducted under precise conditions. It is the responsibility of the user to determine the suitability of AXSON products, under their own conditions before commencing with the proposed application. AXSON refuse any guarantee about the compatibility of a product with any particular application. AXSON disclaim all responsibility for damage from any incident which results from the use of these products. The guarantee conditions are regulated by our general sale conditions.

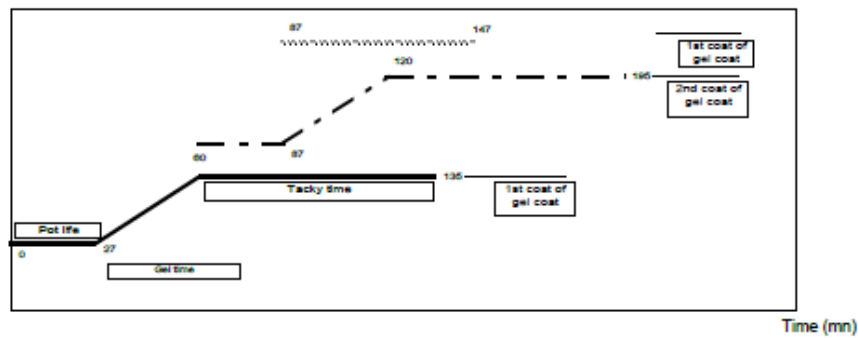
The technical data sheet and the safety data sheet are also available on our website : www.axson.com

Page 1/2 01082

Figur 85: Epoksy datablad (side 1 av 2).

PHYSICAL PROPERTIES				
		RESIN GC1 150	HARDENER GC 15	MIXING
Mixing ratio by weight		100	20	
Aspect		paste	liquid	thick liquid
Color		dark blue	light amber	dark blue
Brookfield LVT viscosity at 25°C (mPa.s)	-	thixotrope	850	thixotrope
Density at 25°C	ISO 1675-85	1.25 – 1.35	1.05 – 1.09	-
Density of the cured product	ISO 2781-88	-	-	1.25 – 1.26

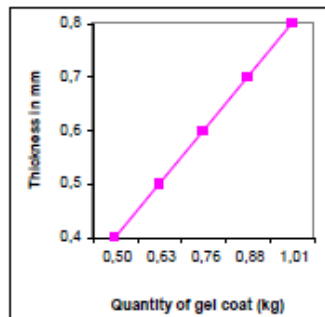
Application diagram of GC1 150/GC 15
(Application temperature : 23°C Mass 390 g)



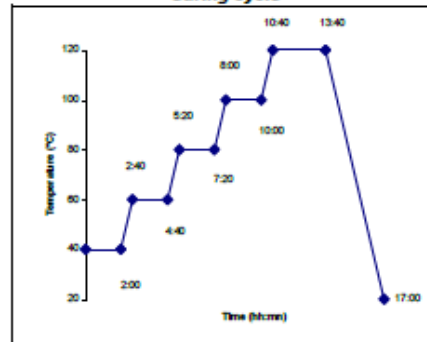
PROCESSING CONDITIONS

- Apply DEMOLDING AGENT 841 or WAX 827 on a non porous pattern.
- Back-up : EPOLAM 2050 and reinforcements EPO 4030

Quantity of gel coat for production of 1 m² surface
(for information only)



Curing cycle



Initial stabilization 16 hrs at room temperature

Figur 86: Epoksy datablad (side 2 av 2)