



TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT

Technisch geologisch onderzoek naar CO₂-opslag in het Barendrecht veld

Aan de hand van vragen geuit door omwonenden en de (lokale) politiek

BACHELOR OF SCIENCE EINDSCRIPTIE

TA3006

Studenten:

Sam Holt (1311506)

Marlies Vasmel (1307339)

Begeleidend docenten:

dr. K-H.A.A. Wolf (CiTG)

drs. P. van Hemert (CiTG)

Delft, 20 augustus 2009

Inhoudsopgave

Summary	1
Voorwoord	2
1 Beantwoording van de vragen	3
1.1 Introductie	3
1.2 Wat is CO ₂ en wat doet het?	4
1.3 Zijn er vergelijkbare projecten in de wereld?	6
1.4 Wat zijn de voornaamste overeenkomsten en verschillen tussen de opslag van aardgas en CO ₂ -gas?	9
1.5 Waarom is er voor de CO ₂ -opslag gekozen voor de lokatie Barendrecht? .	12
1.6 Wat is de historie van incidenten bij de gasproductie in Barendrecht? Hoe zijn deze aangepakt?	15
1.7 Hoe ziet de geologie boven het Barendrecht veld eruit?	16
1.8 Hoeveel aardgas blijft er in het Barendrecht veld zitten? Wat is de druk en wat is de temperatuur?	18
1.9 Hoe is de capaciteit voor CO ₂ opslag in het Barendrecht veld bepaald? . .	19
1.10 Wat voor reacties zullen er in de grond optreden als CO ₂ geïnjecteerd wordt?	21
1.11 Kunnen er breuken ontstaan door injectie van CO ₂ ?	23
1.12 Wat wordt de einddruk van het CO ₂ in het reservoir?	25
1.13 Kunnen er aardverschuivingen optreden waardoor lekkage ontstaat? . . .	26
2 Modellen: Hoe snel komt de CO₂ boven als er schade aan de caprock ontstaat?	28
2.1 Introductie	28
2.2 Bekende gegevens	30
2.2.1 Eigenschappen reservoir	30
2.2.2 Eigenschappen CO ₂	31
2.3 Model 1	33
2.4 Model 2	38
2.5 Model 3	42
2.6 Model 4	44
2.7 CO ₂ uitstoot op menselijke maat	47
3 Conclusies	48
4 Referenties	49
5 Appendix	52

Summary

An underground CO₂ storage project is proposed under the village of Barendrecht, involving two nearly depleted gasfields. Because of the lack of sufficient knowledge of these kinds of storage projects, by the general public and also by the local politicians, several questions about the technical and geological aspects have been raised. In this report an effort is made to answer specific questions about the subsurface and its reaction to a CO₂ storage project in a clear manner. These answers lead the reader through general CO₂ information, followed by site specific details and also new calculations on the possibility and rate of CO₂, that might escape from the reservoir in case of a dramatic subsurface failure. Based on our findings, as well as on previous research, we conclude that the threat of an accident is almost non-existent.

Voorwoord

Het terugdringen van CO₂ uitstoot staat hoog op de agenda van Nederland en de rest van Europa, vanwege de dreiging van klimaatverandering door de uitstoot van broeikasgassen. Een van de gepresenteerde oplossingen is het afvangen en opslaan van CO₂ in leeggeproduceerde gasvelden. Dit zijn aantrekkelijke locaties voor CO₂-opslag, omdat de reeds aanwezige infrastructuur ook voor de opslag gebruikt kan worden en omdat er door de gaswinning veel bekend is over de geologie.

Onder Barendrecht bevinden zich twee lege gasvelden die geschikt zijn als demonstratieproject. Het gaat hier om het Barendrecht veld en het Barendrecht-Ziedewij veld. Er zal begonnen worden met injectie in het Barendrecht veld, omdat dit veld reeds uitgeproduceerd is. De ervaring die tijdens dit project wordt opgedaan kan vervolgens gebruikt worden bij de CO₂-opslag in het Barendrecht-Ziedewij veld dat ruim tien maal zo groot is.

Omdat er nog betrekkelijk weinig ervaring in het reguleren van CO₂-opslag projecten is, hebben omwonenden en de (lokale) politiek diverse vragen hierover geuit. Veel van deze vragen zijn naar voren gekomen tijdens bewonersbijeenkomsten. Door de onduidelijkheden ondervindt het project veel weerstand van deze groepen.

In dit verslag pogen wij op een overdraagbare manier antwoord te geven op de technisch geologische vragen van omwonenden en de (lokale) politiek. Bij het beantwoorden van deze vragen hebben wij ons geconcentreerd op het Barendrecht veld, omdat in dit veld begonnen zal worden met injectie en omdat de antwoorden voor het Barendrecht-Ziedewij veld met een aantal kleine aanpassingen overeen zullen komen met de antwoorden die wij gevonden hebben. Dit onderwerp behandelt de ondergrond, niet de putten, de bovengrondse installatie of de publieke perceptie.

Het eerste deel van dit verslag bevat antwoorden op de vragen die te maken hebben met de injectie en de opslag. In het tweede deel van dit verslag hebben we op verschillende manieren onmogelijke en mogelijke situaties beschreven die wel of niet kunnen optreden als de caprock boven het reservoir niet goed afsluit.

Het project biedt een unieke kans voor studenten om zich te verdiepen in de opslag van CO₂, door evaluatie van bestaande rapporten en door gebruikt te maken van eigen kennis opgedaan tijdens de Bachelor Technische Aardwetenschappen.

Dit project is uitgevoerd door twee studenten, Sam Holt en Marlies Vasmel, onder begeleiding van dr. K-H.A.A. Wolf en drs. P. van Hemert. Omdat het om een groot en divers project gaat met zeer uiteenlopende vragen, is ervoor gekozen om dit project in een team van twee studenten uit te voeren.

1 Beantwoording van de vragen

1.1 Introductie

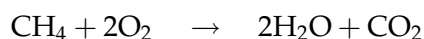
Door de grote diversiteit aan vragen, gesteld door de omwonenden en de (lokale) politiek, moest er van te voren gekozen worden welke vragen wel en welke niet beantwoord konden worden in het relatief korte tijdsbestek dat staat voor een Bachelor eindproject. Bij het uitkiezen van de te beantwoorden vragen is er gepoogd een zo breed mogelijk scala weer te geven. Dit betekent dat er algemene vragen over de opslag van CO₂-gas worden besproken, maar dat ook lokatie specifieke details aan bod komen.

De volgorde van de vragen is zo gekozen dat de lezer eerst kennismaakt met het onderwerp CO₂-gas en de effecten ervan in de biosfeer, waarna CO₂-gas injectie in het algemeen aan bod komt. Dit wordt gevolgd door een beschrijving van gas-injectie in Nederland en de verschillen tussen de opslag van aardgas en CO₂-gas. Hierna komt de lokatiekeuze voor Barendrecht aan de orde, met de bijbehorende deelonderwerpen zoals CO₂ (punt)bronnen, injectiefaciliteiten, etcetera.

Na de uitgebreide introductie wordt dieper ingegaan op de feiten van het CO₂-opslag project in het Barendrecht veld. Hier komen wat meer lokatie specifieke technische details naar voren. In deze vragen wordt ook regelmatig verwezen naar de doorgerkende scenario's uit het modellen deel van dit rapport.

1.2 Wat is CO₂ en wat doet het?

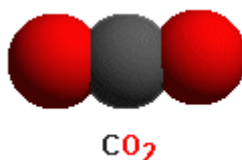
CO₂ of koolstofdioxide is één van de gassen in de atmosfeer. CO₂ is uniform verdeeld rondom de wereld met een concentratie van ongeveer 330 delen per miljoen (ppm). Dit maakt CO₂ na stikstof, zuurstof, argon en waterdamp het meest voorkomende gas in de atmosfeer. Koolstofdioxide komt in de atmosfeer door het verbranden van koolstofhoudende brandstoffen zoals olie, gas en kool. Zo ontstaat er bij de verbranding van bijvoorbeeld een methaan molecuul ook een koolstofdioxide molecuul:



Door de stijgende consumptie van fossiele brandstoffen neemt de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer de laatste jaren toe met ongeveer 1 ppm per jaar.

Koolstofdioxide is een van de broeikasgassen, samen met onder andere lachgas, methaan en ozon. De aanwijzingen dat deze gassen zorgen voor het opwarmen van de aarde worden steeds sterker. De meeste wetenschappers zijn het er over eens dat de uitstoot van CO₂ sterk verminderd moet worden om klimaatverandering tegen te gaan. Dit zal op korte termijn moeten gebeuren en één van de oplossingen hiervoor is de CO₂ die nu geproduceerd wordt bij het verbranden van fossiele brandstoffen, af te vangen en ondergronds op te slaan.

Koolstofdioxide is een kleurloos, smaakloos en reukloos gas. Het bestaat zoals de naam al zegt uit twee koolstofatomen en een zuurstofatoom, zoals weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: Uiterlijk van een CO₂ molecuul.

CO₂ is in principe geen gevaarlijke stof. In de atmosfeer is het voorkomen van 300 tot 400 ppm CO₂ normaal en in stedelijke gebieden is dit vaak nog meer. Planten hebben zelfs CO₂ nodig om te overleven. Ze gebruiken het om glucose en zuurstof te produceren. Wel kan een grote hoeveelheid CO₂ in de lucht gevaarlijk worden, net zo goed als dat geldt voor veel andere gassen. Het werkt dan verstikkend, omdat het zuurstof verdringt. CO₂ heeft een hogere dichtheid dan lucht, waardoor het lager blijft hangen.

Er bestaan veel verschillende richtlijnen voor CO₂ concentraties. Zo pleit het RIVM voor een concentratie van 800 tot 1200 ppm CO₂ binnenshuis (RIVM, 2004). Negatieve effecten van CO₂ beginnen op te treden als de concentratie ruim 100 maal zo groot is als van nature in de atmosfeer, dus bij meer dan 4% CO₂. Een concentratie van meer dan 17% is binnen een minuut dodelijk. De Threshold Limit Value (TLV) voor CO₂ en de

Maximale Arbeitsplatzkonzentratione (MAK) voor CO₂ zijn 5000 ppm. Dit zijn waarden waaraan een arbeider zijn leven lang elke dag aan kan worden blootgesteld zonder dat dat gevaren oplevert. Ter vergelijking: de MAK voor propaan gas is een stuk lager, 1000 ppm (ILO-1, n.d.). Bij hogere concentraties CO₂ lopen mensen risico op duizeligheid, hoofdpijn, bewusteloosheid, verhoogde bloeddruk en een verhoogd hartritme (ILO-2, n.d.).

Om zoveel CO₂ in de lucht te krijgen dat het dodelijk wordt, moet er in een keer heel veel CO₂ kunnen ontsnappen. Als er bijvoorbeeld een klein beetje wind staat is dit al niet mogelijk, omdat de CO₂ dan wegwaait en mengt met lucht.

Ook belangrijk is het om te weten dat water zuur wordt, ofwel een daling in de pH, als het met CO₂ in contact komt, er ontstaat dan koolzuur. Dit komt omdat de CO₂ moleculen uiteenvallen in water en zo zure H⁺-deeltjes vormen. Meer hierover valt te lezen in het hoofdstuk 'Wat voor reacties zullen er in de grond optreden als CO₂ geïnjecteerd wordt?'.

1.3 Zijn er vergelijkbare projecten in de wereld?

In het Barendrecht project wordt CO₂ opgeslagen in een bijna uitgeproduceerd gasveld op land. Dit kent een aantal nauwverwante projecten. Omdat CO₂-opslag een relatief nieuw verschijnsel is, bevinden veel van deze projecten zich nog in de planningsfase. De belangrijkste en meest recente bevindingen op dit gebied, die qua schaal en doel overeenkomen met het Barendrecht project, staan vermeld in dit hoofdstuk.

Het is belangrijk om direct een onderscheid te maken tussen het opslaan van CO₂ als alleenstaand project en het injecteren om de winbaarheid van de koolwaterstoffen, zoals olie en gas, te verbeteren. Bij het Barendrecht project is de eerste optie aan de orde.

Een lijst met relevante projecten staat hieronder weergegeven.

- Sinds april 2008 wordt in de Australische deelstaat Victoria het CO₂CRC Otway project uitgevoerd. In totaal 100.000 ton CO₂ zal daar in een leeg gasveld, op een diepte van ongeveer 2000 meter, worden geïnjecteerd. Tot begin 2009 is 30.000 ton in de diepe ondergrond opgeborgen en alle metingen laten zien dat het proces volgens verwachting verloopt. Het CO₂CRC project legt de nadruk op intensieve monitoring, registratie en verificatie van het verloop van de onder- en bovengrondse processen tijdens en na de opslag (CO₂CRC, 2009).
- De Franse oliemaatschappij Total heeft in februari 2007 aangekondigd dat het een pilot CO₂ afvang- en opslagproject start in het Lacq basin in het zuid-westen van Frankrijk. Het gaat hier om een injectie van 150.000 ton CO₂ in een uitgeput gasveld in Rousse (Pyreneeën) over een periode van twee jaar. Door druk van de bevolking en milieu-organisaties is de experimentele fase, die volgt op de geologische studies gedaan in 2008, uitgesteld tot het jaar 2009. Ook aan dit afvang- en opslagproject ligt kennisvergarig ten grondslag. De geïnjecteerde CO₂ zal met behulp van constante monitoring in de gaten gehouden worden, waarbij van te voren een plan is opgesteld wat er ter mitigatie gedaan kan worden in geval van problemen (Total, 2007).
- Rohoel AG overweegt om in een bijna uitgeproduceerd gasveld een CO₂-opslag reservoir te maken, om tevens de uitvoerbaarheid van EGR (Enhanced Gas Recovery) te toetsen. Dit project is een onderdeel van het CASTOR programma. CASTOR staat voor CO₂ from Capture to Storage en spitst zich toe op de post-verbranding afvang van CO₂. Bij dit project gaat het om het Atzbach-Schwanenstadt gasveld in het centrale deel van Noord-Oostenrijk. Het gasveld bevindt zich op 1600 meter diepte in een zandsteen formatie. Simulaties hebben uitgewezen dat het gasveld een veelbelovende opslagplaats is voor CO₂, onder andere vanwege de goede afsluiting. Dit veld heeft een uitgerekende opslagcapaciteit van 14,5 Megaton CO₂. Bij dit project wordt tevens getest hoe onshore seismische monitoringstechnieken helpen bij evaluatie van het veld. Daarnaast zal tijdens het

project gebruik worden gemaakt van een uitvoerige risicoanalyse en evaluatie over de verschillende stadia van de CO₂-opslag activiteit (CO₂Castor, 2009).

Bijzonder is dat de voorlopige resultaten van het onderzoek hebben uitgewezen dat de eigenschappen van het reservoir ervoor zorgen dat EGR geen effectieve optie is, omdat het resterende gas besmet raakt met het geïnjecteerde CO₂.

Binnen de literatuur blijkt er overeenstemming te zijn in de erkenning van de risico's en gevaren van CO₂-opslag. Deze risico's en milieueffecten zijn uitgebreid beschreven en geanalyseerd in de rapporten van AMESCO (2007) en DNV (2006). Daarnaast zijn de lege gasvelden, gebruikt voor injectie, al jaren actief en is er tijdens gasproductie uitgebreid ervaring opgedaan met de verschillende aspecten van de koolwaterstoffen-reservoirs.

Natuurlijke CO₂ reservoirs

Op veel plaatsen in de wereld is bij de zoektocht naar olie of gas gestuit op natuurlijke ophopingen van CO₂. Deze natuurlijke analogen voor CO₂-opslag bevatten belangrijke informatie over de lange termijn effectiviteit van geologische CO₂-opslag. Het CO₂ zit immers al miljoenen jaren in het reservoir. In sommige gevallen is door een natuurlijke of menselijke oorzaak een lekkage ontstaan, waardoor de CO₂ naar het oppervlak stroomt. Dit CO₂ kan worden gebruikt voor industriële toepassingen of voor de inzet in Enhanced Oil of Gas Recovery projecten op CO₂ basis.

Voorbeelden van deze natuurlijke CO₂ reservoirs vinden we reeds dichtbij huis. TNO heeft in zijn DINOShop database een overzicht van de van nature voorkomende concentraties CO₂ in aardgasaccumulaties. Alhoewel de gemiddelde concentratie van CO₂ onder de 10 mol% ligt, blijken er uitschieters te zijn van 0 mol% tot 77 mol%. Een voorbeeld van deze laatste hoeveelheid is de boring WED-01 in het Werkendam gasveld. Deze waarde werd in de Werkendam Formatie van de Altena Groep op een diepte van ongeveer 2000 meter aangetroffen (Verweij, 2006). Het werd duidelijk dat dit geen foute meting betrof toen er in put WED-03 van het Werkendam gasveld tevens gas werd aangetroffen met 72 mol% CO₂ op een diepte van 2800 meter in zandsteen, afgezet tijdens het Trias (Neele, 1994). De AMESCO studie geeft aan dat deze accumulaties kunnen worden gebruikt als natuurlijke analogen voor de CO₂-opslag in gasvelden in Nederland. Een ander voorbeeld van natuurlijke CO₂ opslag vindt men in het Werra zout (K₂CO₃) district. Hier is in 1994 na 100 jaar de CO₂- en zoutproductie gestopt. In de loop van de productietijd werd er in totaal voor bijna 530 miljoen kilogram CO₂ geproduceerd door de verschillende bedrijven die er concessies hebben gehad. CO₂ zit ingesloten onder de Werra zoutlagen in de Rotliegende en Zechstein afzettingen en is ontstaan door vulkanische activiteit tijdens het Mioceen. Dit gas bevindt zich op 1000 meter diepte in de kritieke fase, dit is dezelfde fase als waar het Barendrecht project mee te maken krijgt.

Uit bijvoorbeeld de studie van (Brune et al., 2003) is gebleken dat de zoutlagen een goede afsluitende laag vormen waar geen CO₂ doorheen kan lekken naar het oppervlak, waarmee de opslag op de lange termijn van CO₂ onder zoutlagen wordt bevestigd.

Ongelukken met CO₂ uitstromingen

De Nyos ramp in Kameroen wordt vaak aangehaald in de discussie over de veiligheid van CO₂-opslag. In 1986 vond er een incident plaats in het Nyos meer waarbij plotseling 1.6 megaton CO₂ vrij kwam. Dit pure CO₂ is zwaarder dan lucht en deze dikke laag rolde via de bergwand naar beneden en eiste door het verdringen van zuurstof bijna 1700 levens in slechts enkele uren.

Onderzoek naar de ramp wees uit dat het incident zich voordeed door een zogenaamde limnische uitbarsting, dat uitsluitend in een vulkanisch actief gebied voor kan komen. In de loop van de tijd heeft zich dan een grote hoeveelheid CO₂ opgelost in het meer (krater van de vulkaan), dat vrijkomt door plotseling vulkanische activiteit.

Essentieel is het om te realiseren dat de geologische omstandigheden van deze ramp fundamenteel verschillen van de geologische omstandigheden in de reservoirs waar men tegenwoordig CO₂ in op wil slaan. Zo is de opslag in de Barendrechtse reservoirs gevestigd in sedimentaire gesteenten, die ver weg liggen van enige recente vulkanische activiteit (zie voor illustratie figuur 6). Daarnaast bevinden de Barendrechtse reservoirs zich niet in een zogenaamde 'rift zone' waar aardbevingen voorkomen en zijn er ook geen aparte verzamelplaatsen voor CO₂ in watervoerende pakketten of gasreservoirs. Wel is er een circa 1700 meter dik bovenliggend gesteentepakket aanwezig dat eventuele uitvloeiingen enorm vertraagt en verkleint. Zie hiervoor ook het modellen deel van dit rapport. Hierdoor is het niet zinvol de effecten van het Nyos meer incident en tevens alle andere incidenten op vulkanische of seismische basis te vergelijken met de mogelijke risico's van de geologische CO₂-opslag in Barendrecht.

1.4 Wat zijn de voornaamste overeenkomsten en verschillen tussen de opslag van aardgas en CO₂-gas?

Zowel aardgas als CO₂-gas kan opgeslagen worden in uitgeproduceerde aardgasreservoirs om te voldoen aan maatschappelijke behoeften. Zo wordt aardgas opgeslagen om te kunnen voorzien in de eventuele productietekorten tijdens een strenge winter. Dit aardgas wordt onder hoge druk opgeslagen, waardoor het sneller beschikbaar is dan de gasreservoirs waar normaliter uit geproduceerd wordt. Hierdoor kunnen gasmaatschappijen de piekwaarden in de productie halen. CO₂-gas echter, wordt permanent opgeslagen zonder bedoeling het er op een later tijdstip weer uit te halen en dient ter reductie van het, door CO₂ versterkte, broeikaseffect.

Overeenkomsten tussen de opslag van aardgas en CO₂-gas

Hoe ziet een gasopslag er precies uit?

Aardgas bevindt zich in poreus gesteente, en niet in een holle ruimte onder de grond. Het gas in de gasopslag komt op eenzelfde plek te zitten als waar voorheen aardgas heeft gezeten. Daar zit het bijvoorbeeld in poriën met een zeer kleine doorsnede tussen korrels zandsteen. Deze zandsteenlaag bevindt zich veelal op een diepte tussen 1500 en 4000 meter onder de grond. Direct daarboven zit een ondoordringbare laag, meestal een zout- of kleilaag, die ervoor zorgt dat het aardgas niet omhoog kan stromen. Stroming van het gas kan zich daardoor enkel afspelen binnen de zandsteenlaag. De bovenliggende ondoordringbare laag is vaak enkele tientallen tot honderden meters dik. Boven deze afsluitende laag bevinden zich meerdere aardlagen van wisselende samenstelling. Zo zijn er vaak extra zandsteenlagen, kalksteenlagen of zelfs meer ondoordringbare zout- en of kleilagen.

Het principe van de winning en de injectie van gas

Met een boring is er een gat gemaakt door de bovenliggende lagen, waarna er winning van aardgas kon plaatsvinden. Door het handhaven van een opzuigend drukverschil tussen de ondergrond en het oppervlak. Dat gat heet in jargon een 'put'. Deze put is zo ingericht dat het met de juiste apparatuur en leidingen gas uit het reservoir kan halen en tevens terug kan stoppen, ofwel injecteren. Het principe achter het injecteren is voornamelijk het omdraaien van het drukverschil. Zo is er voor injectie een verdrijvend drukverschil nodig. Om deze beide drukverschillen te realiseren zijn er bij de winning- of injectielocatie compressoren nodig.

De faciliteiten om gas (zoals aardgas of CO₂-gas) terug te pompen in het reservoir, zijn vaak nog beschikbaar uit het winningproject, of kunnen met enige moeite weer bruikbaar worden gemaakt. In hoeverre dit laatste mogelijk is, heeft te maken met de manier van afsluiting aan het einde van het winningproject. Daarnaast is een gasbehandelingsinstallatie nodig die het te injecteren gas zoveel mogelijk zuivert, zodat enkel het gewilde gas wordt opgeslagen en de hoeveelheid bijproducten beperkt blijft.

Enkele voorbeelden van aardgas opslagplaatsen in Nederland zijn te vinden bij de plaat-

sen Langelo, Grijskerk en Bergen. De eerste twee gasopslag reservoirs worden beheerd door de Nederlandse Aardolie Maatschappij en de laatste door TAQA (Breunese, 2006).

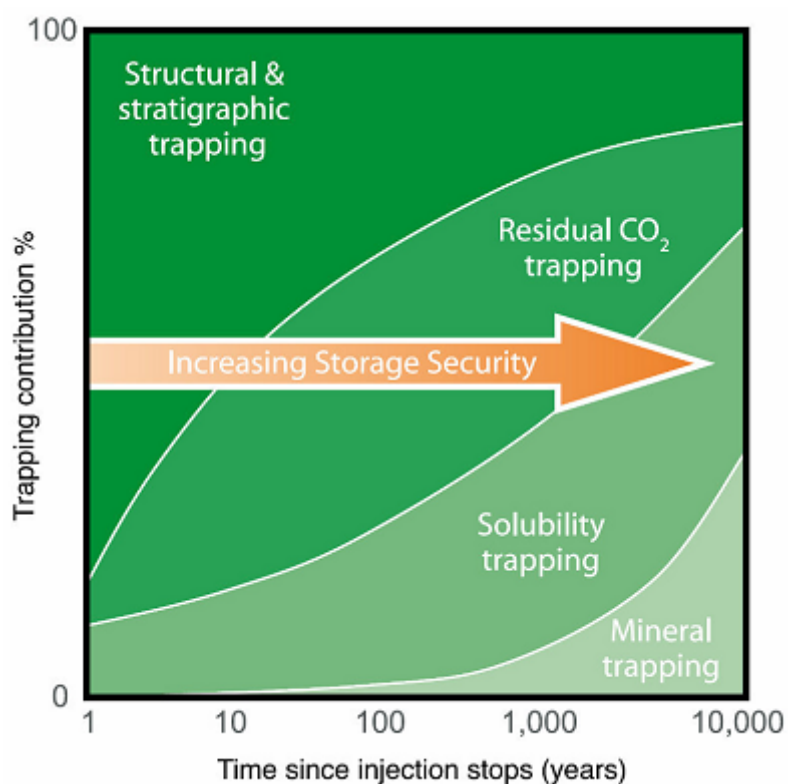
Verschillen tussen de opslag van aardgas en CO₂-gas

De verschillen concentreren zich rondom de chemische samenstelling van het te injecteren gas. Deze samenstelling zal bepalend zijn voor de manier waarop de vastlegging geschiedt en waar rekening mee gehouden moet worden. Veel onderzoek is uitgevoerd naar de reacties van CO₂ met de omringende stoffen en gesteenten in het opslagreservoir. Hier wordt dieper op ingegaan in het hoofdstuk 'Wat voor reacties treden er op als het CO₂ geïnjecteerd wordt?'. Van groot belang is tevens de reactie van het CO₂ op de gebruikte materialen van de put. Meer informatie over chemische reacties van CO₂ op de gebruikte materialen van de put is te vinden in referentiedocumenten 5, 6, 24 van de milieueffectenrapportage. Dit onderwerp valt echter buiten het bereik van dit onderzoek en hier zal niet nader op worden ingegaan. Een ander verschil is dat CO₂-gas, in tegenstelling tot aardgas, permanent op wordt geslagen in de De Lier formatie in het Barendrecht veld. Dit houdt in dat er veel belang is bij een zo sterk mogelijke vastlegging van het gas gedurende een zeer lange tijd. Drie manieren van vastlegging worden onderscheiden (AMESCO, 2007):

- In Nederland is de belangrijkste vorm van vastlegging de structurele vastlegging. Dit houdt in dat door deformatie van poreus sedimentair gesteente er breuken en plooien in het gesteente zijn ontstaan, waaronder de koolwaterstoffen (zoals gas of olie) zijn vast komen te zitten. Koolwaterstoffen hebben een lage dichtheid en zullen door hun relatief hogere drijfvermogen boven het water in de formatie willen komen te liggen. Een afsluitende ondoordringbare laag boven de formatie met de koolwaterstoffen is dan nodig om het drijfpad, naar het aardoppervlak, af te sluiten. Deze afsluitende laag wordt gekenmerkt door zeer lage permeabiliteit en biedt een stevige buffer tegen de opbouwende druk van de koolwaterstoffen of het CO₂-gas. Zo hebben deze zogenaamde 'sealing layers' al miljoenen jaren aardgas op zijn plek gehouden. Enkele bekende gesteenten die een uitstekende afsluiting vormen zijn: zoutlagen, kleisteen en anhydriet.
- Na verloop van tijd zal het geïnjecteerde CO₂ de plaats innemen van het aardgas dat na de productie is overgebleven in het reservoirgesteente (zie het hoofdstuk 'Hoeveel aardgas blijft er zitten? Wat is de druk en wat is de temperatuur?'). Na zeer lange tijd zal er, beginnend op een relatief klein contactoppervlak, een mengsel ontstaan van aardgas en CO₂. Onder invloed van de steeds hoger wordende druk in het reservoir zal het CO₂ zich ook gaan verplaatsen naar zelfs de kleinste porieruimten van het gesteente. Dit proces heet residuale vastlegging.
- Een derde mengvorm van vastlegging speelt zich af wanneer het CO₂ zich reeds lange tijd (honderden tot duizenden jaren) bevindt in het reservoir, en combineert oplosbaarheidvastlegging en mineraalvastlegging. Voor beide vormen is een gerin-

ge hoeveelheid beweegbaar water een vereiste. Oplosbaarheidvastlegging refereert naar het uiteenvallen van CO₂ in water, zodat het CO₂ zich niet langer bevindt in een eigen aparte fase. CO₂ kan dan niet langer naar boven drijven, ondanks het verschil in dichtheid. In navolging neemt de dichtheid van het water toe door de toegevoegde CO₂, waardoor het naar beneden in het reservoir zal migreren. De meest permanente vorm van opslag, de mineraalvastlegging, is het proces waarbij vrije ionen uit het formatie water (aangevuld met uiteengevallen CO₂) zullen reageren met het gastgesteente en op deze manier carbonaat mineralen vormen.

Grafisch kunnen deze vormen van vastlegging, als functie van de tijd, worden weergegeven zoals in figuur 2.



Figuur 2: Vormen van vastlegging van CO₂ als functie van de tijd (IPCC, 2005).

1.5 Waarom is er voor de CO₂-opslag gekozen voor de lokatie Barendrecht?

Introductie

Als onderdeel van een brede aanpak van twaalf grootschalige CO₂-opslag projecten in de Europese Unie (de zogenaamde vlaggenschepen), wil de Nederlandse overheid in 2015 zeker twee grootschalige ondergrondse CO₂-opslag projecten in Nederland realiseren. Om dit proces stapsgewijs te laten verlopen, heeft de overheid er toe besloten om in 2010 twee verschillende kleinschalige demonstratieprojecten te laten uitvoeren. Dit heeft ze uitgewerkt met een projectaanbesteding, de zogenaamde tender, waarop partijen in Nederland konden inschrijven en reageren. SenterNovem, de organisatie die namens het ministerie van VROM de tenderaankondiging opstelde, gaf hierin aan dat ze waarde hechtte aan het gebruik van zeer zuivere CO₂, een locatie op land, met als uitgangspunt dat de opslag veilig is, en de mogelijkheid van een snelle start. De keuze van een locatie op land is gemaakt met in het achterhoofd de in de toekomst beschikbaar komende potentiële opslagcapaciteiten in de rest van Nederland, in het bijzonder het Groningen gasveld. Daarnaast dient er 2 megaton CO₂ opgeslagen te kunnen worden binnen een tijdsbestek van 10 jaar. Bij het vinden van een geschikte locatie voor CO₂-opslag demonstratieprojecten wordt naar een aantal essentiële onderdelen van het project gekeken. Zo is er oog voor de CO₂ bronnen, het transportsysteem en het opslagreservoir inclusief de aanwezige faciliteiten. Een direct verband wordt ook gelegd met de milieuaspecten. In dit hoofdstuk worden deze vier aspecten na elkaar behandeld.

De meewegende aspecten

CO₂ bronnen

Voor een economisch toch zo aantrekkelijk mogelijk demonstratieproject, zeker van de kleine schaal van het Barendrecht project, is de keuze van een opslaglocatie nabij één of meerdere CO₂ (punt)bronnen cruciaal. Eventueel al aanwezige afvanginstallaties bij de bron zijn een pré, evenals een hoge chemische zuiverheid van CO₂ en lage kosten voor de afvang.

Voor het demonstratieproject is een zo hoog mogelijke chemische zuiverheid van CO₂ gewenst. Dit betekent dat het CO₂-gas voor minder dan 1% uit andere gasmoleculen dan CO₂ mag bestaan, bijvoorbeeld methaan en stikstof. CO₂ met deze samenstelling kan op dit moment enkel geproduceerd worden bij CO₂ bronnen in het westen van Nederland, met name in de havenregio rondom Rotterdam.

Afweging van de zojuist gestelde eisen heeft er toe geleid dat de CO₂ bron van de Shell Nederland Raffinaderij in Pernis als meest geschikt werd bevonden voor de toelevering van CO₂. Doorslaggevend bij deze keuze was de al bestaande afvanginstallatie voor CO₂, dat het gas afvangt voor gebruik in onder andere de tuinbouw en de frisdrankindustrie. De chemisch zuivere CO₂ die bij de Shell Gasification Hydrogen Plant op het terrein van Shell Nederland Raffinaderij in Pernis wordt afgevangen staat tevens bekend

om de afwezigheid van water. Hierdoor wordt het CO₂ ook wel 'droog CO₂' genoemd. CO₂ met deze eigenschappen kan gemakkelijk worden getransporteerd en opgeslagen. Het gedrag van zuivere CO₂ is goed voorspelbaar en omdat het droog is, bestaat er in beginsel geen risico van roestvorming.

Daarnaast bleek de capaciteit voor het afvangen van CO₂, voornamelijk in de wintermaanden, niet volledig gebruikt te worden door de aangesloten industrie. De hoeveelheid niet nuttig gebruikte CO₂, circa 400 kiloton per jaar, wordt dan alsnog uitgestoten. Juist deze CO₂ komt in aanmerking om permanent te worden opgeslagen.

Transportsysteem

Bij het transport van CO₂ naar de injectielocatie is naast de kosteneffectiviteit ook de veiligheid een belangrijk aspect. Transport kan plaatsvinden over de weg, met vrachtwagens, of via een pijpleiding. Gezien de hoeveelheid CO₂ die gepland staat geïnjecteerd te worden, en ook de snelheid waarmee dit moet gebeuren volgens de tender, valt transport over de weg af. Daarnaast is er al ervaring met CO₂ afvoer vanaf de Shell Nederland Raffinaderij in Pernis via een pijpleiding, geëxploiteerd door OCAP, dat naar de frisdrankindustrie en tuinbouw gaat. Het is echter niet mogelijk de bestaande CO₂ leidingen te gebruiken, wel kan een deel van leiding gebruik maken van de leidingstrook door het havengebied en de aansluitende 'Buisleidingenstraat'. Uiteindelijk zullen er ook nog een aantal kilometers leiding gelegd worden op openbare grond (waarvan een klein deel particulier) nabij bestaande NAM, RRP en Air Products leidingen. Actief CO₂ transport voor de bestaande tuinbouw- en frisdrankindustrie projecten is onderhevig aan strenge veiligheidseisen. Deze eisen zijn opgesteld in 1984, maar nieuwe inzichten die betrekking hebben op de veiligheid van de leidingen geven aan dat de genomen veiligheidsmaatregelen inmiddels wellicht niet meer voldoen aan de nieuwe eisen van het VROM. Bij de risicoanalyse van het pijpleidingen transport aspect worden deze nieuwe eisen conservatief meegenomen.

Opslagreservoir en de aanwezig faciliteiten

De eisen die worden gesteld aan de opslagreservoirs en aanwezige faciliteiten zijn hoog. Zo wordt er gekeken naar beschikbare putten, reservoirkarakteristieken, en veiligheidskenmerken. Onderzoek naar geschikte kandidaten voor een demonstratieproject levert dan ook een kleine selectie op.

Bij Barendrecht bevinden zich twee locaties, die afzonderlijk op sommige onderdelen niet voldoen aan de uitgangspunten, wat betreft volume (Barendrecht) en tijdige beschikbaarheid (Barendrecht-Ziedewij), maar die in combinatie hier wel aan voldoen. Het gasveld bij de locatie Barendrecht is in 2010 leeggeproduceerd en beschikt over twee putten. Het volume van het reservoir is echter te beperkt, maximaal circa 0,8 Megaton. Het gasveld bij de locatie Barendrecht-Ziedewij beschikt over vier goed toegankelijke putten en heeft voldoende volume, circa 9,5 Megaton. Het reservoir is pas in 2014 leeggeproduceerd. Het demonstratieproject kan aan de uitgangspunten van de overheidstender voldoen door eerst CO₂ op te slaan in het reservoir van de locatie Baren-

drecht en vervolgens vanaf 2014 over te schakelen op de locatie Barendrecht-Ziedewij. Hier kan ook na de periode van 10 jaar, zoals opgenomen in de overheidstender, nog circa 18 jaar aanvullend CO₂ worden opgeslagen.

Een belangrijke factor bij de keuze van het opslagreservoir en de aanwezige faciliteiten, is dat bij beide locaties gebruik kan worden gemaakt van de bestaande, toegankelijke en in goede staat verkerende putten, die aangepast worden voor CO₂-injectie. Daarbij zullen op de locaties extra compressoren moeten komen om de CO₂ op de juiste druk in het reservoir te injecteren. Voor de combinatie van de velden Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij wordt tevens voor het gewenste leereffect een hoog cijfer gescoord, aangezien deze reservoircombinatie de mogelijkheid biedt een complete cyclus van opstarten, injecteren en afsluiten te realiseren in relatief korte tijd.

Milieuaspecten

Naast economische, technische en andere voorgeschreven redenen, zoals beschreven in de overheidstender, spelen ook de effecten van het demonstratieproject op het milieu en de leefomgeving mee. In de studie naar mogelijke milieueffecten wordt gekeken naar onder andere de bodemgesteldheid, de waterhuishouding, ecologie, landschap en cultuurhistorie, archeologie, geluid, emissies, verkeer en vervoer, afval, de energiebalans en uiteraard ook het reservoir zelf. Een uitgebreide analyse van de zojuist genoemde deelonderwerpen is gedaan in opdracht van de Commissie voor de milieueffectenrapportage, en is vrij verkrijgbaar via de website van de Commissie MER (Haskoning B.V., 2008a).

1.6 Wat is de historie van incidenten bij de gasproductie in Barendrecht? Hoe zijn deze aangepakt?

Tijdens en na de gasproductie fase van het Barendrecht veld is veiligheid een belangrijk element geweest van de winningstrategie. Een nauwkeurige inschaling van de mogelijke risico's is voorafgegaan aan de bepaling van het veiligheidsplan. In Nederland is het bij de wet geregeld dat noemenswaardige ongelukken of incidenten gemeld dienen te worden bij het Staatstoezicht op de Mijnen. Deze onafhankelijke instelling van de overheid heeft naast zijn functie als handhaver van de wet- en regelgeving, met name de Mijnbouwwet, de bevoegdheid tot het inspecteren van de plannen en de installaties van elk 'mijnbouw'-project.

Navraag bij Shell, contactpersoon Wim van der Wiel (Pers Officier), en het Staatstoezicht op de Mijnen, contactpersoon Michael de Vos (Senior Inspecteur Operaties/Boringen), levert bewijs dat er op de locatie Barendrecht geen noemenswaardige incidenten of ongelukken hebben plaatsgevonden.

Voor de volledigheid is het juist om te vermelden dat de kleinschalige incidenten die zich hebben voorgedaan tijdens gasproductie fase van het Barendrecht veld bestonden uit:

- Drie gevallen van vloeistoflekkage (respectievelijk condensaat, water/condensaat mengsel en glycol).
- Een voorval betrof een brand(je) in de laagspanningsruimte.

Het Staatstoezicht op de Mijnen meldt dat geen van deze voorvallen een bedreiging heeft gevormd voor de omwonenden. Dieper onderzoek naar de mitigatie is dus niet van toepassing.

Voor de CO₂-opslag in de toekomst is opnieuw een veiligheidsplan opgesteld door de uitvoerende organisaties, en ook dit plan is ingestuurd ter goedkeuring van de overheid. Het zogenaamde Milieu Effecten Rapport is bovendien voorzien van een uitgebreide risicoanalyse rapportage in de vorm van Referentiedocument 1 (van Eijs, 2007).

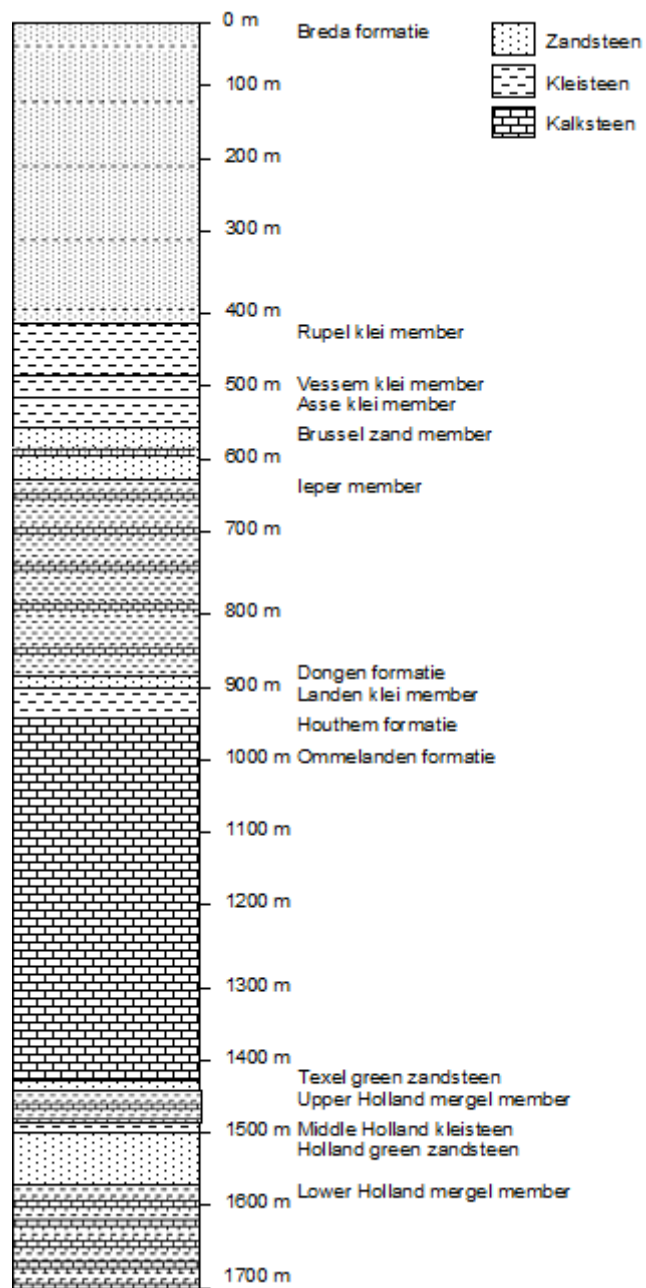
1.7 Hoe ziet de geologie boven het Barendrecht veld eruit?

Boven het lege gasveld van het Barendrecht veld in de De Lier Formatie bevinden zich verschillende aardlagen die zijn afgezet tijdens het Krijt, Tertair en Kwartair. Deze lagen zijn in de afgelopen honderd miljoen jaar afgezet.

De caprock en de lagen daarboven zijn onderdeel van de Holland Formatie. Boven het reservoir ligt een mergelpakket van ruim honderd meter dik. Dit pakket zorgde ervoor dat het aardgas in de zandsteen bleef zitten en zal er bij de injectie voor zorgen dat de CO₂ daar zal blijven zitten. Vervolgens ligt er nog een zandsteen, een kalksteen en een mergelpakket op, dat ook deel vormt van de Holland Formatie.

Deze lagen worden opgevolgd door twee dikke kalksteenpakketten die zijn afgezet tijdens het Laat-Krijt, toen boven Nederland een ondiepe zee lag. Dit zijn de Ommelanden en de Houthem Formatie. Hierboven, ongeveer tussen de 400 en 900 meter diepte, liggen een groot aantal kleisteenpakketten met hier en daar wat mergel erin. Deze kleistenen zijn net zoals het mergel pakket boven het reservoir erg impermeabel, waardoor ze ook als caprock van een eventueel onderliggend reservoir kunnen dienen.

Tot slot ligt er bovenop een pakket van ruim 400 meter dik dat voornamelijk uit zandsteen bestaat, met hier en daar wat klei er tussenin. Dit is de Breda Formatie. In figuur 3 is de complete stratigrafie boven het Barendrecht reservoir te zien.



Figuur 3: Stratigrafische kolom van de aardlagen boven het Barendrecht reservoir gebaseerd op NL Olie- en gasportaal, put BRT-01.

1.8 Hoeveel aardgas blijft er in het Barendrecht veld zitten? Wat is de druk en wat is de temperatuur?

Initieel bleek het Barendrecht veld, en dan specifiek de De Lier zandsteenformatie waarin het CO₂ geïnjecteerd zal worden, te beschikken over gas bij een kleine overdruk van 174 bar en een temperatuur van 70 graden Celsius op circa 1700 meter diepte. Dit reservoir bestond uit een olielaag van 7 meter dikte en een gaskolom van 52 meter dik. De olielaag bleek niet economisch winbaar, in tegenstelling tot de gaskolom. Aan het eind van de gasproductie werd een meting verricht waaruit naar voren kwam dat de druk in de De Lier zandsteenformatie was gedaald tot 33 bar, een behoorlijke onderdruk voor de diepte waarop het zich bevindt.

Een dynamische inschatting voor de hoeveelheid aardgas, gemaakt kort na de start van de productie, toonde aan dat er 0,285 Miljard Normaal m³ gas¹ aanwezig was in de De Lier zandsteenformatie. Van deze hoeveelheid is tijdens de productie 0,25 Miljard Normaal m³ onttrokken uit de formatie, dit komt overeen met een kleine 88%. Daarnaast is bekend dat er per miljoen Normaal m³ gas er 20 tot 30 Standaard m³ condensaat² werd geproduceerd, een lage dichtheid vloeistof met als hoofdbestanddeel koolwaterstoffen.

In het Barendrecht veld blijft dus 12% van het initiële aardgasvolume over, overeenkomend met 34,2 Miljoen Normaal m³ aardgas, op een temperatuur van 70 graden Celsius met een druk van rond de 33 bar.

¹Normaal m³ betekent onder condities van 0 graden Celsius en 1 atmosfeer druk (Miller, 1996).

²Standaard m³ betekent onder condities van 15,5 graden Celsius en 1 atmosfeer druk (Miller, 1996).

1.9 Hoe is de capaciteit voor CO₂ opslag in het Barendrecht veld bepaald?

Bij het schatten van het mogelijke opslagvolume voor CO₂, is uitgegaan van een zogenaamde cumulatieve productie curve (Newstead et al., 2008). Deze geeft aan hoeveel aardgas er is geproduceerd uit het reservoir gedurende de productiefase. Met behulp van deze gegevens kan een eerlijk model worden opgesteld over de verwachte CO₂ opslagcapaciteit. Zo is gebleken dat de oorspronkelijke statische 'Gas Initieel In Plaats' (GIIP) schatting te hoog was. Er werd geschat dat het Barendrecht veld beschikte over 0,36 Miljard Normaal m³, dat na productiecijfers is bijgesteld tot 0,285 Miljard Normaal m³. Zoals te lezen is in het hoofdstuk 'Hoeveel aardgas blijft er in het Barendrecht veld zitten? Wat is de druk en wat is de temperatuur?', is hiervan in totaal 0,25 Miljard Normaal m³ geproduceerd.

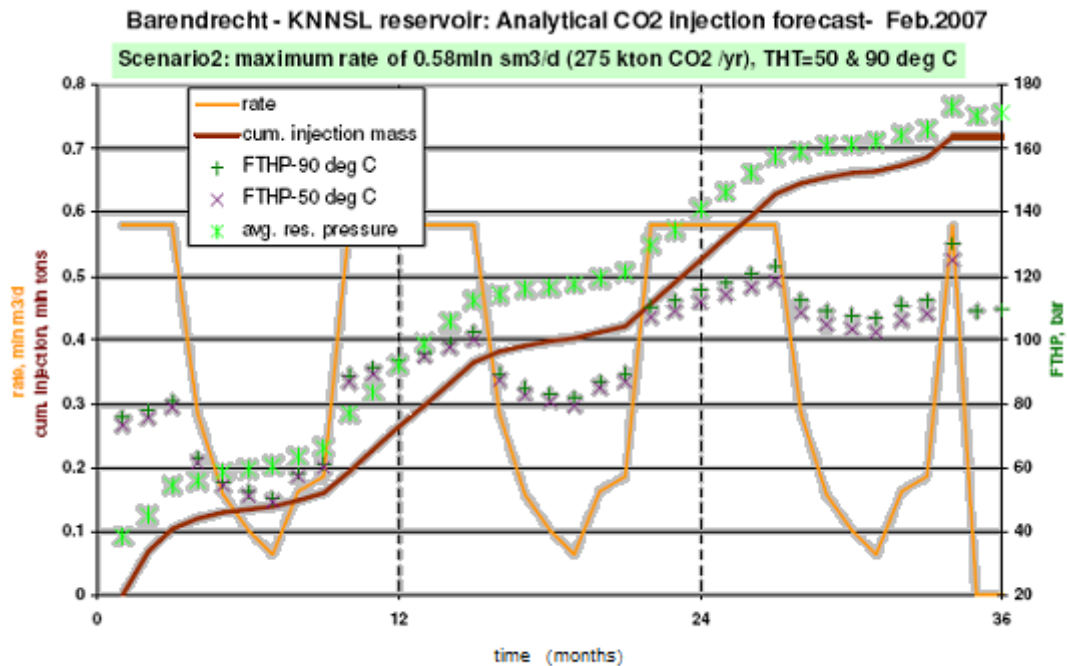
Het verschil tussen de initiële statische inschatting en de aangepaste dynamische inschatting kunnen mogelijk verklaard worden door:

- Verticale compartimentering, waardoor sommige delen van de De Lier zandsteenformatie niet werden geperforeerd bij het boren van de put en de veronderstelde tussenliggende kleilagen stroming van het gas hinderen.
- Breuk compartimentering, waardoor sommige delen van het ingeschatte reservoir afgesloten blijven en niet kunnen bijdragen aan de productie.
- Aanwezige geologische en structurele onzekerheden.

Van deze drie verklaringen lijkt in eerste instantie de tweede een mogelijke oorzaak van het relatief grote verschil in geschat volume. Bij nader seismisch onderzoek bleek dat in het noorden van de structuur kleine breuken aanwezig zijn. Deze breuk compartimentering bevat circa 0,06 Miljard Normaal m³ GIIP. Echter bleken deze breuken vanwege hun eigenschappen (kleine staphoogte en grote nevenschikking) waarschijnlijk niet volledig af te sluiten.

De aanwezige geologisch en structurele onzekerheden worden daarom als beschouwd als belangrijkste oorzaak voor het verschil in GIIP.

Schattingen voor de hoeveelheid te injecteren CO₂-gas zijn dus gebaseerd op geobserveerde (bewezen) productiviteit van de putten. Op deze waarden wordt vervolgens een CO₂ 'druk, volume en temperatuur'-karakterisatie toegepast, dat de eigenschappen van CO₂ modelleert bij veranderende druk, volume en temperatuur. De nu verkregen data wordt vervolgens in analytische en numerieke rekenmodellen gestopt, ter beschrijving van het injectieproces. Op deze manier gemodelleerde CO₂ injectie bleek goed overeen te komen met de werkelijkheid bij het K12-B gasveld van Gaz de France (Van der Meer et al., 2006).

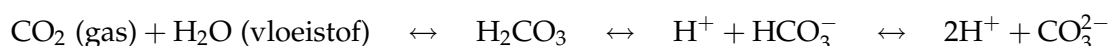


Figuur 4: Analytisch model van de hoeveelheid te injecteren CO₂-gas als functie van de tijd. Zowel de instroomsnelheid in het reservoir in miljoen m³/dag als de cumulatieve injectie in miljoen ton zijn uitgezet. De rechter verticale as geeft de druk weer, gemeten aan de bovenkant van de injectieput (Flowing Tubing Head Pressure).

Een opmerkelijk verschijnsel te zien in figuur 4 is dat de druk van het reservoir bijna aan het einde van de injectie (dit wordt gerepresenteerd door de groene sterretjes lijn), iets boven de initiële reservoirdruk uit zal komen onder aan de injectieput. Volgens het opgestelde rapport van Shell zal dit slechts tijdelijk zijn, evenals beperkt zijn tot de directe omgeving van de put. Bij het afsluiten van de put zal volgens het rapport de druk opnieuw stabiliseren en in evenwicht komen met de van te voren bepaalde maximale reservoirdruk. Eventuele schade aan de afsluitende laag wordt verder behandeld in het modellen deel van dit rapport.

1.10 Wat voor reacties zullen er in de grond optreden als CO₂ geïnjecteerd wordt?

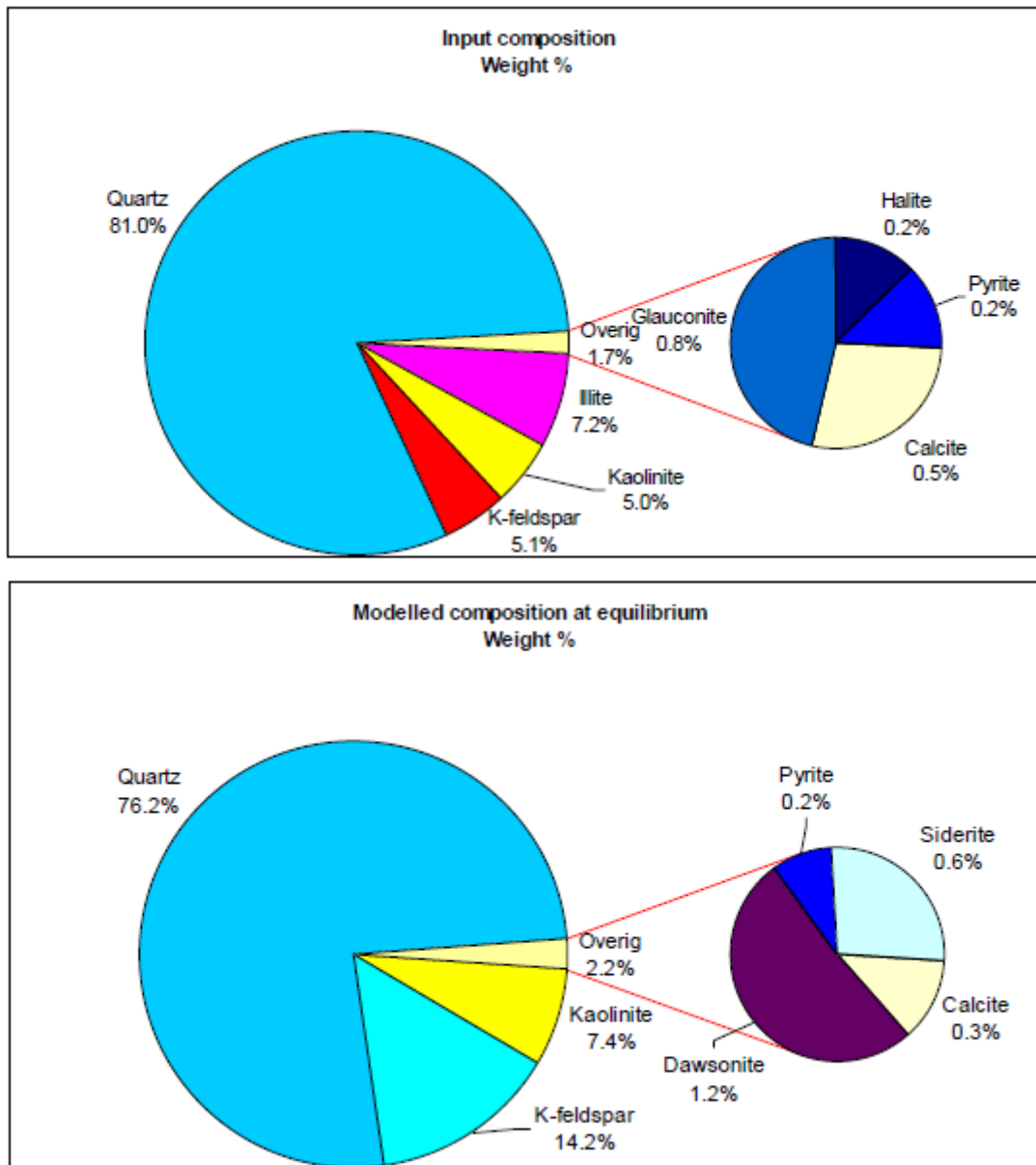
De chemische samenstelling van het geïnjecteerde CO₂-gas zal bepalend zijn voor de uiteindelijke reacties met de ondergrond. Uitgebreid onderzoek is reeds uitgevoerd naar de reacties van CO₂ en de omringende stoffen in het opslagreservoir (Van Bergen et al., 2008). Chemische reacties van CO₂ met mineralen in het reservoir, of met de afdekkende bovenlaag, zijn uitsluitend mogelijk wanneer het geïnjecteerde CO₂ oplost in water, volgens onderstaande reactie:



Als gevolg van de toename van de waterstof-ion (H⁺) concentratie zal de zuurgraad van het water toenemen, zodat het reactiever wordt. Het Barendrecht veld wordt echter gekenmerkt door uiterst 'droge' omstandigheden met weinig water (Van Bergen et al., 2008), dat zich uitsluitend in gebonden toestand bevindt. Toch zullen er plekken in het reservoir zijn waar door de injectie chemische reacties gaan optreden vanwege de beschikbaarheid van voldoende gebonden water. Essentieel is dan de stromingssnelheid van het aanwezige water en de diffusiesnelheid van eenmaal opgeloste CO₂ naar het reactieoppervlak, bijvoorbeeld de afsluitende caprock. Deze factoren zijn relevant voor de bepaling van de snelheid van het verweringsproces en de eventuele lekkages.

Daarnaast zijn reacties met mineralen uit de ondergrond mogelijk. De afdekkende bovenlaag van het Barendrecht veld bestaat uit kleisteen en mergel. Op de lange termijn zorgen geochemische reacties met de verschillende mineraalcomponenten voor veranderende eigenschappen van deze laag. Helaas zijn geen metingen beschikbaar voor de exacte samenstelling van de afdekkende bovenlaag, maar wordt er gerekend met een aangepast model van de De Lier Formatie. Voor de reacties die optreden in de afdekkende bovenlaag is een voldoende hoge zuurgraad van water nodig. Wanneer dit zure water zich eenmaal bevindt aan het contactoppervlak van de afsluitende laag, zal alleen een uiterst dun gedeelte hiervan worden aangetast en chemisch veranderd. De Bruijn (2008) heeft aangetoond dat de afsluitende laag van het Barendrecht veld minder permeabel en minder poreus wordt, ofwel slechter doordringbaar, door mineralenherstellingen als gevolg van geochemische reacties met opgelost CO₂. Hierbij zullen de mineralen calciet, kalium-veldspaat, albiet en vooral smectiet neerslaan of oplossen en zo zullen montmorilloniet-natrium, dolomiet en dawsoniet zich vormen. Dit proces leidt dus tot een positieve bijdrage aan de ondoorlatendheid van de afdekkende laag. Echter, gezien de kleinschaligheid van dit geochemische proces, is het netto effect op de totale afsluitende laag te verwaarlozen.

TNO voorspelt dat in het reservoirgesteente de mineralen glauconiet, illiet, haliet en calciet zullen reageren met het gevormde zure water en dat dit zal leiden tot een afname van de porositeit van het gesteente. Het hoofdmineraal van de zandsteen formatie, kwarts, zal niet of nauwelijks reageren door injectie van het CO₂-gas. Een illustratie van de mineraalcompositie in het reservoirgesteente voor en na de injectie is weergegeven in figuur 5.



Figuur 5: Mineraalcompositie van het reservoir gesteente van het Barendrecht veld voor en na de CO₂-injectie.

1.11 Kunnen er breuken ontstaan door injectie van CO₂?

Gesteente op een diepte onder het aardoppervlak kent verschillende richtingen van waaruit het samengedrukt wordt. Dit noemt men ook wel de 'stress' op het gesteente. De stress is niets anders de kracht over een bepaald gebied, gegeven in Pascal, een maat voor de druk. De verticale stress component op het gesteente zal bijvoorbeeld voornamelijk worden veroorzaakt door de bovenliggende gesteentemassa door middel van gravitatie. De horizontale stress component is onder andere afhankelijk van de tektoniek die heeft plaatsgevonden in het gebied, en is in de meeste gevallen de kleinste component die bijdraagt aan de totale stress op het gesteente. De kleinste stress component wordt ook wel de minimum in-situ stress genoemd. Met behulp van de verschillende stress componenten kan de gesteentesterkte worden bepaald, alsook theorieën over het breken ervan.

Tot zover zijn enkel natuurlijk voorkomende stressen in beschouwing genomen, er bestaan echter ook geïnduceerde stressen, zoals aardgaswinning. Door de NAM is bepaald dat de top van het Barendrecht reservoir een minimum stress bezat van circa 30 megapascal, ofwel 300 atmosfeer, (berekend op 1666 meter werkelijke verticale diepte met een stressgradiënt van 1,8 bar/10 meter) voor het begin van de aardgaswinning (Orlic, 2007a). Dit getal wordt echter in twijfel getrokken door een vervolg rapport van Shell uit 2008, waaruit blijkt dat de stressgradiënt niet meer dan 1,4 bar/10 meter bedraagt, resulterend in een minimum in-situ stress van 23,2 megapascal ofwel 232 atmosfeer, een behoorlijk verschil (Van Eijs, 2008).

Door de aardgaswinning is de minimum in-situ stress gezakt. Dit kan worden berekend met:

$$\Delta Sh_{\min} = \gamma h dP \quad , \quad (1)$$

waarin ΔSh_{\min} de afname in minimum in-situ stress is, γh de 'uitputtings constante' een getal dat in Nederlandse Rotliegendes reservoirs wordt geschat op 0,68 (Shell, 2006) en dP het drukverschil (initiële druk gasreservoir druk aan het eind van de productie). Dit levert een reductie van 9,7 megapascal en dus een minimum in-situ stress van $23,2 - 9,7 = 13,5$ megapascal, ofwel 135 atmosfeer. Deze minimum in-situ stress is een maat voor de druk die maximaal onderaan de put (Bottom Hole Pressure of BHP) gehandhaafd kan worden zodat het gesteente niet breekt.

Naarmate het injectieproces verloopt, zal het drukverschil tussen de initiële reservoirdruk en de huidige druk verkleinen waardoor uiteindelijk ook de reductie van de minimum in-situ stress afneemt en de stromende BHP dus verhoogt kan worden. Op basis van de BHP en de reservoirdruk kan een schatting voor de hoeveelheid mogelijk te injecteren CO₂ gas worden gemaakt, zonder dat het gesteente zal breken. Dit is door TNO gedaan in 2007, en opnieuw door Shell in 2008. Shell heeft tevens de mate van verwachte omkeerbare stress meegenomen in haar analyse, na onderzoek van een gesteentekern uit het Barendrecht reservoir.

Een zeer versimpelde berekening voor de maximaal te injecteren hoeveelheid CO₂, aan het begin van de injectieperiode, kan worden gemaakt met de radiale instroomvergelijking voor gassen, zie formule 2 (Jahn et al., 2008). Deze vergelijking is voor dit vraagstuk aangepast zodat het gebruikt kan worden voor gasinjectie. Het verschil komt tot uiting in de omgedraaide druktermen.

$$Q = \frac{(P_{wf}^2 - P_{res}^2) k h}{141,2 \cdot \mu Z T \left[\left(\ln \left(\frac{R_e}{R_w} \right) - 3/4 \right) + S \right]}, \quad (2)$$

waar Q staat voor de volumestroom gas per seconde, P_{wf} voor de BHP, P_{res} de reservoirdruk, k en h voor de gemiddelde permeabiliteit respectievelijk de hoogte van de formatie. Daarnaast geeft de μ de gemiddelde viscositeit aan, Z is de compressibiliteitsfactor voor de ideale gaswet en T de temperatuur op reservoirdiepte. Tussen de haken bevindt zich de ratio van de straal van de injectieput en de straal van het reservoir en een skinfactor S , een maat voor de remming van de gasstroming, bijvoorbeeld door verstopping.

Voor deze berekening zijn de volgende waarden gebruikt:

Symbol	Waarde
P_{wf}	13,5·10 ⁶ Pa
P_{res}	33·10 ⁵ Pa
k	17·10 ⁻¹⁵ m ²
h	66 m
μ	53·10 ⁻⁶ Pa·s
$\rho_{CO_2,1700m}$	584 $\frac{kg}{m^3}$
Z	0,08
T	343 K
R_e	1000 m
R_w	0,1 m
S	10

De uitkomst is nu een initiële volumestroom van 50,72 m³/seconde, ofwel 4,38·10⁶ m³/dag. Hoewel deze uitkomst in dezelfde orde van grootte ligt als de uitkomsten van de onderzoeken van TNO en Shell (beide rond de 1·10⁶ m³/dag), is het toch aan de hoge kant. Dit is een gevolg van de zeer versimpelde formule 2, gebruikt voor de berekening. Helaas heeft geen van beide aangehaalde partijen een exacte specificatie gegeven van de formules die er zijn gebruikt. Deze betrekkelijk hoge uitkomst geeft aan dat, tot de berekende injectiesnelheid, de kans op een breuk onwaarschijnlijk is. Wanneer de injectiesnelheid nog hoger moet worden, dan zal automatisch de BHP moeten toenemen, en zo de minimum in-situ stress overschrijden, wat leidt tot breukvorming.

1.12 Wat wordt de einddruk van het CO₂ in het reservoir?

Gedurende de gasproductie heeft de gashoudende laag in het Barendrecht veld een drukval ondergaan van 174 bar tot 33 bar, de huidige druk. Deze nu heersende onderdruk, die een aanzuigende werking heeft op eventuele waterhoudende lagen in de buurt, wordt bij injectie teruggebracht naar een waarde vergelijkbaar met de initiële druk. Echter, vanwege onzekerheden in het verloop van de chemische reacties en de stromingsverschijnselen, is er gekozen voor een veiligheidsmarge van 8 bar.

Deze veiligheidsmarge komt onder andere voort uit een model van Shell waarin de koolwaterstoffen expulsie snelheid wordt gemodelleerd op basis van een continue gasaanvulling vanuit andere (bron)lagen. Deze zogenaamde gasgeneratie, uit de dieperliggende Limburg Formatie, is een proces dat zich zeker de afgelopen 65 miljoen jaar heeft afgespeeld in het Barendrecht gebied en het zorgt voor een geschatte drukverhoging van 1,5 bar per 1000 jaar. Een kleine berekening laat zien dat er ongeveer 5000 jaar nodig is voor deze actieve gasgeneratie om samen met de geïnjecteerde CO₂ de originele reservoirdruk terug te krijgen. Na deze 5000 jaar zal de druk niet verder toenemen, maar zal het resterende aardgas ofwel migreren via gemakkelijke stromingspaden, ook wel 'overstromingspunten' genoemd, of zal er diffusie in water optreden (Seeberger, 2008). In het deel van het rapport over modellen staan een aantal, zeer onwaarschijnlijke, gevallen van mogelijke CO₂ migratie beschreven.

Op de lange termijn zal er tevens een mengsel van CO₂ en CH₄ ontstaan door diffusie. Zoals blijkt uit de TNO-studie (Hofstee & Seeberger, 2008) is het mogelijk dat daardoor op lange termijn een drukverhoging in het reservoir plaatsvindt van circa 3 tot 5 bar. Door deze drukverhoging kan de druk in het reservoir hoger worden dan aanvankelijk de bedoeling is geweest, waardoor er een risico op lekkage via het overstromingspunt ontstaat. Er is berekend dat dit proces erg langzaam verloopt, in de orde van duizenden jaren. Dit lijkt een erg lange tijd, maar het diffusie proces bij de drukken en temperaturen in de ondergrond boven het Barendrecht veld is zeer langzaam.

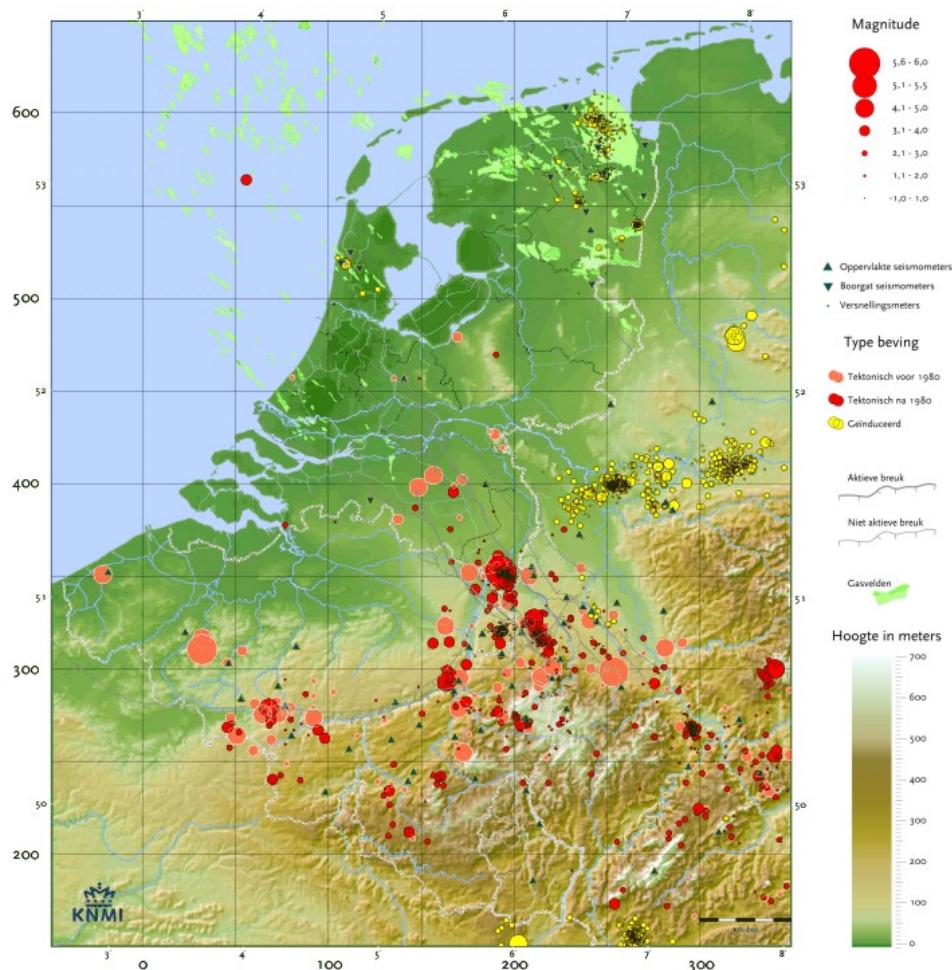
In het AMESCO rapport wordt tevens gesproken over de capillaire ingangsdruk van CO₂. Deze capillaire ingangsdruk is lager voor CO₂ dan voor koolwaterstoffen, waardoor CO₂ de afsluitende laag bij lagere drukken zal betreden dan aardgas. Het is dus raadzaam de drukopbouw van het CO₂-gas langzamer te laten verlopen om dit proces te matigen. Zo is er tijd voor het gas om zich te verspreiden en zal de kans op capillaire uitvloeiing beperkt blijven (AMESCO, 2007).

Samengevat kan worden gesteld dat de voorgestelde einddruk van het CO₂ in het reservoir 166 bar bedraagt. Deze druk is gekozen met in een achtneming van een veiligheidsmarge van 8 bar, op basis van gasgeneratie en gasmixing (Newstead et al., 2008).

1.13 Kunnen er aardverschuivingen optreden waardoor lekkage ontstaat?

Aardbevingen zijn het gevolg van beweging langs breuken. Als de ondergrond aan weerszijden van een breuk beweegt ten opzichte van elkaar gebeurt dit met een schok, waardoor een aardbeving ontstaat. In Nederland komen geen grote breuken waarlangs veel beweging plaatsvindt voor. Alleen rond de Roerdalslenk komen in Nederland aardbevingen voor. Deze slenk loopt door Zuid Limburg en is noordwest - zuidoost georiënteerd. Het slenkensysteem loopt wel door richting de Noordzee en gaat over in het Noordzeebekken, maar hier is geen tektonische activiteit meer. Bovendien loopt deze slenk ongeveer tussen Den Haag en Utrecht, dus een flink stuk ten noorden van Barendrecht.

In figuur 6 zijn de aardbevingen te zien die in Nederland hebben plaatsgevonden tussen 1904 en 2004. Behalve de aardbevingen in zuidoost Nederland, zijn er ook aardbevingen geweest in Noord-Holland en Groningen. Deze zijn niet veroorzaakt door natuurlijk tektonische activiteit, maar geïnduceerd door gas- of oliewinning.



Figuur 6: Aardbevingen in Nederland volgens het KNMI.

In het gebied rondom Barendrecht hebben in het verleden geen bodemtrillingen plaatsgevonden als gevolg van de gaswinning in de reservoirs van Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij. Vanwege het feit dat de kans op bodemtrillingen afneemt als de reservoirs worden gevuld met CO₂, worden ook in de toekomst geen bodemtrillingen verwacht (Haskoning B.V., 2008b).

2 Modellen: Hoe snel komt de CO₂ boven als er schade aan de caprock ontstaat?

2.1 Introductie

In tabel 1 zijn de verschillende symbolen, hun betekenis en de bijbehorende eenheden die in dit hoofdstuk gebruikt worden samengevat.

Symbol	Betekenis	Eenheid
Q_v	Volumedebiet	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Q_m	Massadebiet	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
P	Druk	Pa
T	Temperatuur	K
v	Snelheid	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
V	Volume	m^3
n	Aantal mol	-
k	Permeabiliteit	m^2
ϕ	Porositeit	-
t	Tijd	s
Z	Compressibiliteitsfactor	-
μ	Viscositeit	Pa·s
L	Lengte	m
A	Oppervlakte	m^2
ρ	Dichtheid	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
d	Dikte	m
D	Diffusiecoëfficiënt	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

Tabel 1: Overzicht gebruikte symbolen.

Om deze vraag te beantwoorden hebben we verschillende modellen gebruikt. Dit hebben we gedaan omdat de schade aan de caprock kan verschillen, maar ook de manier waarop de CO₂ naar boven migreert kan verschillen. De tijd die het kost voor het CO₂ om boven te komen en de hoeveelheid CO₂ die boven komt wilden we per geval apart kwantificeren. We zullen eerst de eigenschappen van ons reservoir en de relevante eigenschappen van CO₂ bespreken. Vervolgens zullen we de modellen waar we van uitgegaan zijn beschrijven, inclusief de aannames die we gedaan hebben. Daarna volgen de uitkomsten per model en tot slot evalueren we de gebruikte modellen.

In alle gevallen zijn we uitgegaan van een breuk in de caprock met een constante afmeting van 5 meter lang en 1 millimeter breed. Op 1700 meter komen in Nederland geen breuken voor die meer dan een paar meter lang en een millimeter breed zijn. Figuur 7 geeft een idee van de afmetingen van zo'n breuk. Het gesteente op de foto is afkomstig uit Zuid-Limburg van een diepte van ongeveer een kilometer.



Figuur 7: Typische afmetingen van een breuk in de Nederlandse ondergrond.

Overzichtsschema's voor de verschillende modellen zijn toegevoegd in de Appendix van dit document.

2.2 Bekende gegevens

Een aantal belangrijke gegevens om aan onze modellen te kunnen rekenen is samengevat in tabel 2.

Symbol	Betekenis	Waarde
P_{atm}	Atmosferische druk	10^5 Pa
ρ_{water}	Dichtheid water	$1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
g	Valversnelling	$9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$
T_{opp}	Gemiddelde oppervlakte temperatuur	283 K
$\frac{\Delta T}{\Delta Z}$	Geothermische gradiënt	$\frac{3}{100} \frac{\text{K}}{\text{m}}$
M_{CO_2}	Molaire massa CO_2	$44,0095 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$
R	Gasconstante	$8,3144 \frac{\text{J}}{\text{K mol}}$

Tabel 2: Bekende gegevens.

2.2.1 Eigenschappen reservoir

Druk

De druk in de poriën in de ondergrond wordt veroorzaakt door het gewicht van de bovenliggende waterkolom. De druk op een diepte (Z) kan berekend worden met de volgende vergelijking:

$$P_d = P_{\text{atm}} + \rho_{\text{water}} g Z \quad (3)$$

Temperatuur

De temperatuur in de ondergrond neemt toe met de diepte. De mate waarmee dit gebeurt heet de geothermische gradiënt. In Nederland is de geothermische gradiënt 3 graden Celsius per 100 meter. De temperatuur in de diepte kan vervolgens berekend worden met de volgende vergelijking:

$$T_d = T_{\text{opp}} + \frac{\Delta T}{\Delta Z} Z \quad (4)$$

Porositeit en Permeabiliteit

Van sommige lagen is de permeabiliteit en porositeit vrij nauwkeurig bepaald met behulp van tests uitgevoerd door gespecialiseerde bedrijven. Dat is gedaan voor de reservoirgesteenten (Brussels zand Member, Holland green sand en De Lier Member). De waarden die hieruit naar voren gekomen zijn hebben we overgenomen in tabel 3 (Pluymakers en Hofstee (2007), Orlic et al. (2007)). Van andere lagen zijn geen exacte permeabiliteiten bekend en daarom hebben we hiervoor zeer conservatieve aannames gedaan. Omdat we willen weten hoe snel CO_2 kan stromen door onze lagen is het belangrijk om voor kleistenen de effectieve porositeit en permeabiliteit te gebruiken. Waarden voor de effectieve porositeit van kleistenen variëren van 0,012 tot 0,093 (Fedor et al., 2007, Sadisun et al., 2005).

Als gemiddelde zijn we daarom voor de kleistenen uitgegaan van 0,06. Typische waarden voor de effectieve permeabiliteit van kleisteen liggen rond de 10^{-17} tot 10^{-18} m² (Fishman et al., 2008, Reeves et al., 2003). Als conservatieve waarde voor de permeabiliteit hebben we daarom gekozen voor 10^{-17} m².

Tabel 3 geeft een overzicht van de verschillende lagen in de ondergrond, hun diktes en de permeabiliteiten en porositeiten aangenomen per laag.

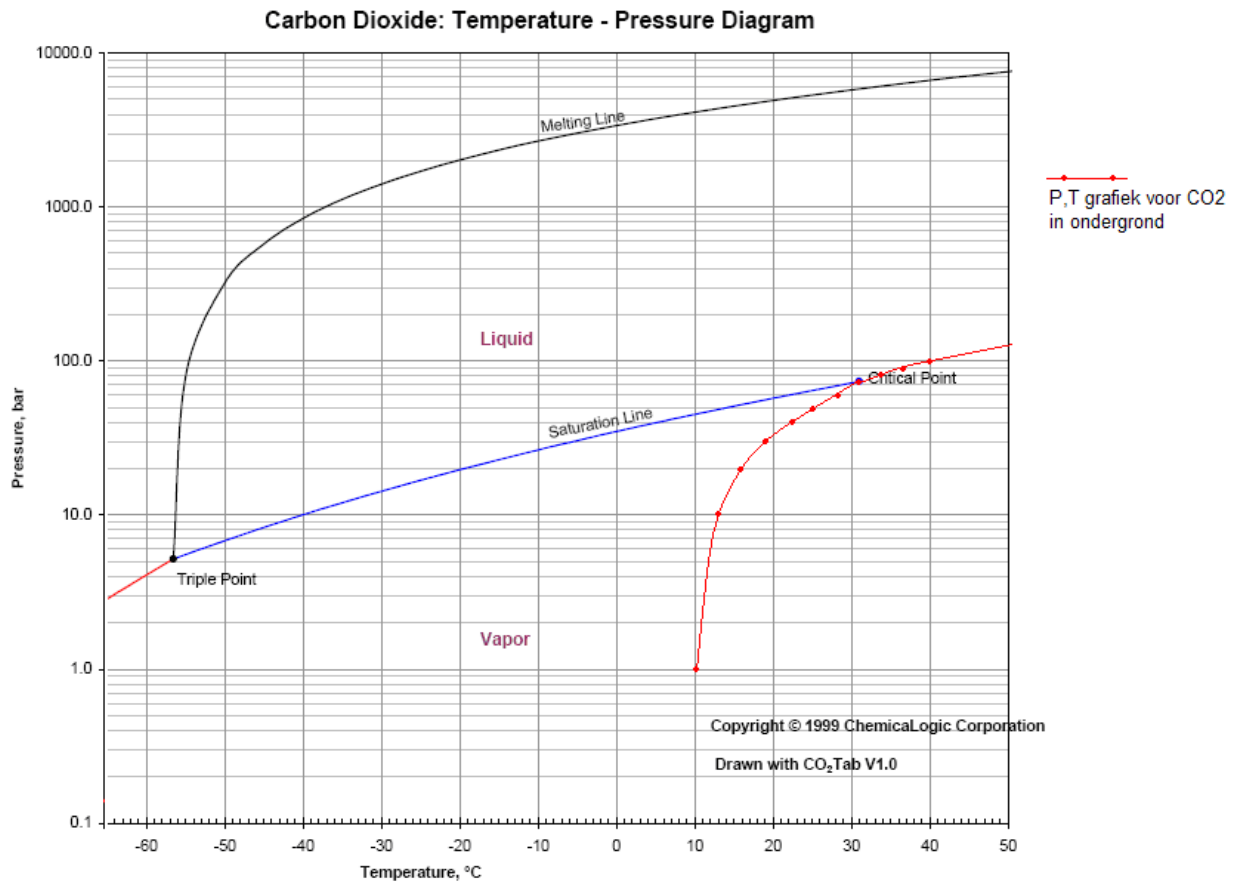
Begin (m)	Eind (m)	Naam	Dikte (m)	k (m ²)	ϕ
0	412	Breda Formatie	412	10^{-13}	0,2
412	496	Rupel klei Member	84	10^{-17}	0,06
496	522	Vessem klei Member	26	10^{-17}	0,06
522	554	Asse klei member	32	10^{-17}	0,06
554	629	Brussels zand Member	75	$2,9 \cdot 10^{-14}$	0,18
629	889	Ieper Member	260	10^{-17}	0,06
889	900	Basal Donden zand	11	10^{-12}	0,32
900	948	Landen kleisteen member	48	10^{-17}	0,06
948	986	Houthem Formatie	38	10^{-12}	0,2
986	1442	Ommelanden Formatie	456	10^{-12}	0,37
1442	1452	Texel green sand	10	10^{-12}	0,16
1452	1480	Upper Holland mergel Member	28	10^{-13}	0,2
1480	1504	Middle Holland kleisteen	24	10^{-17}	0,14
1504	1571	Holland green sand	67	$2,9 \cdot 10^{-14}$	0,14
1571	1699	Lower holland mergel Member	128	10^{-16}	0,2
1699	1743	De Lier Member	44	$1,7 \cdot 10^{-14}$	0,2

Tabel 3: Overzicht gesteentelagen met hun diktes, permeabiliteiten en porositeiten.

2.2.2 Eigenschappen CO₂

Fasediagram CO₂

De fase waarin CO₂ zich bevindt hangt af van de druk en temperatuur. Door de temperatuur en de druk tegen elkaar uit te zetten in een T,P -diagram voor CO₂ kan afgelezen worden in welke fasen CO₂ zich achtereenvolgens bevindt als het vanaf reservoir condities naar boven beweegt. Het kritieke punt van CO₂ ligt bij 304,1 Kelvin (Lake, 2006) en 73,8 bar (Chimowitz, 2005). In figuur 8 is te zien dat de T,P -grafiek van de CO₂ in de ondergrond zo goed als door het kritieke punt gaat. Dit betekent dat we tot op een diepte van 720 meter te maken hebben met een gas en daaronder een superkritisch gas.



Figuur 8: Fasediagram CO₂.

Dichtheid

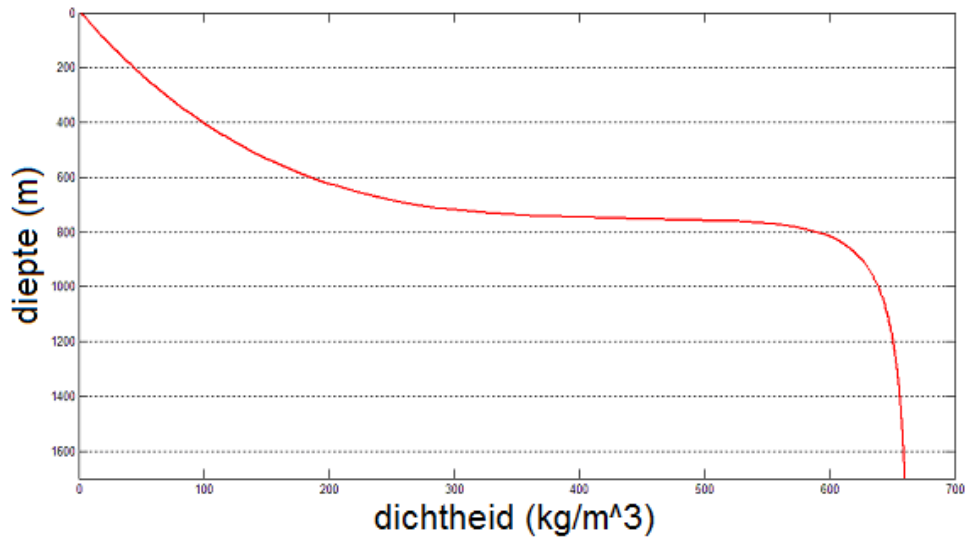
De dichtheid van CO₂ kan berekend worden met de gaswet. Omdat CO₂ zich bij onze drukken en temperaturen alleen in de gasfase en de superkritische fase bevindt kunnen we gebruik maken van de ideale gaswet met de compressibiliteits factor (Z) om deze te corrigeren voor het werkelijke gedrag van het gas. Volgens de gaswet is het volume van CO₂ dan:

$$V = \frac{ZnRT}{P} \quad (5)$$

Voor de Z factor hebben we gebruik gemaakt van een door Patrick van Hemert geschreven MATLAB programma naar Span en Wagner (1996) in opdracht van de Technische Universiteit Delft in 2005. Hiermee wordt de dichtheid van het gas bij de verschillende diepten berekend. In de grafiek in figuur 9 is de dichtheid uitgezet tegen de diepte. De Z factor heeft de grootste invloed in het gebied rond het kritieke punt, waar de dichtheid heel sterk toeneemt. Voorbij het kritieke punt, dieper dan 1000 meter, blijft de dichtheid vrijwel constant.

Viscositeit

De viscositeit van CO₂ is een functie van de diepte en de temperatuur. Hiervoor hebben we gebruikt gemaakt van de tabellen door Fenghour et al. (1998). De datapunten die we uit de tabel konden halen hebben we vervolgens lineair geïnterpoleerd om de viscositeit over de gehele diepte te vinden. Het resultaat hiervan is te zien in figuur 10.



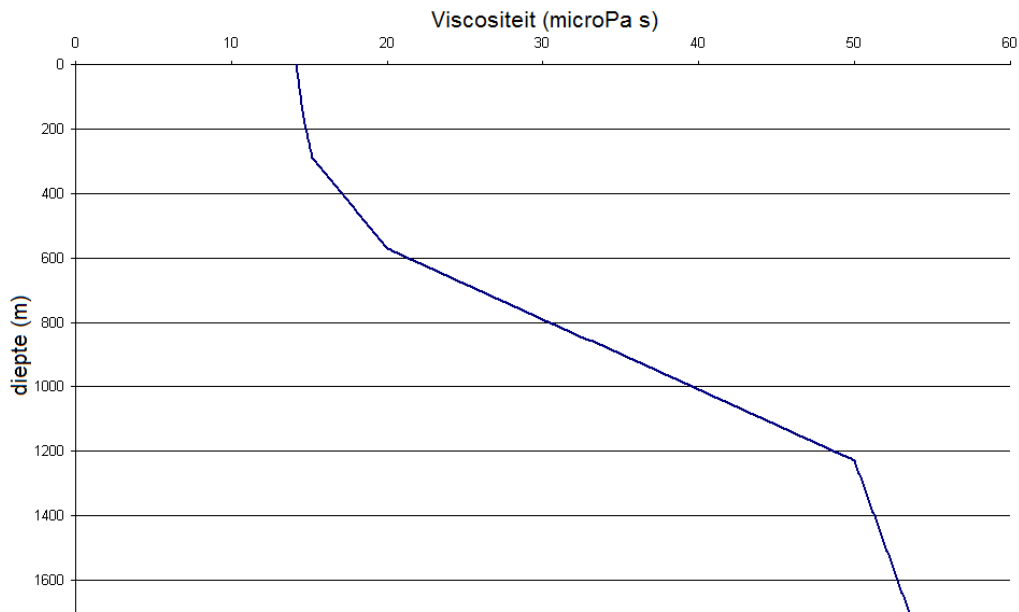
Figuur 9: Dichtheid van CO₂.

Over de hele diepte neemt de viscositeit af met ongeveer een factor 4, van 53,5 $\mu Pa \cdot s$ onder reservoircondities tot 14,21 $\mu Pa \cdot s$ aan het oppervlak.

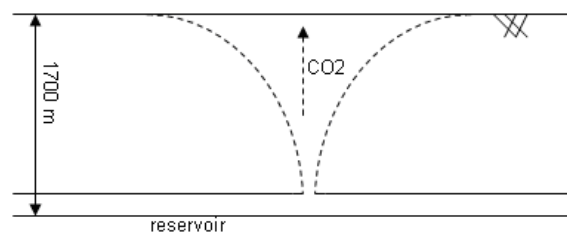
2.3 Model 1

In dit model gaan we ervan uit dat CO₂ dat ontsnapt aan het reservoir door de bovenliggende lagen gaat stromen volgens de Wet van Darcy. Hiermee kan het volumedebiet door een poreus medium berekend worden:

$$Q_{\text{volume}} = \frac{kA\Delta P}{\mu L} \quad (6)$$



Figuur 10: Viscositeit van CO₂.



Figuur 11: Schematische weergave van model 1.

Aannames

- Intervallen van 10 meter met constante druk, temperatuur, viscositeit en dichtheid.
- CO₂ stroomt over de gehele diepte als vloeistof.
- Homogene en isotrope gesteentelagen.
- CO₂ stroomt in een verticale kolom omhoog.
- CO₂ kan vrij naar boven stromen, er bevindt zich geen water in de poriën dat de doorgang belemmert.

Berekening

Het volumedebiet is in de Wet van Darcy onder andere een functie van de permeabiliteit van het gesteente waar de vloeistof doorheen stroomt. De lagen die boven het reservoir liggen hebben verschillende permeabiliteiten (zie tabel 3). Als de CO₂ uit het reservoir naar het oppervlakte komt, stroomt het loodrecht op de gelaagdheid, omdat de lagen

erboven zo goed als horizontaal liggen. Voor stroming loodrecht op de gelaagdheid kan een gemiddelde permeabiliteit berekend worden met behulp het harmonisch gemiddelde:

$$k_{\text{harm}} = \frac{d_{\text{tot}}}{\frac{d_i}{k_i}} \quad (7)$$

Dit levert een harmonisch gemiddelde van $4,2575 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$.

Verder hebben we in dit model intervallen van 10 meter genomen waarop we de viscositeit en dichtheid constant beschouwen. Hiermee wordt ΔL dus 10 meter en $\Delta P = \rho_{\text{water}} g \Delta L = 100000 \text{ Pa}$.

De laatste variabele in de Wet van Darcy is de oppervlakte. De dichtheid van CO_2 neemt af naarmate het gas naar boven komt (figuur 9). Omdat wij ervan uitgaan dat het gas zich in één kolom recht omhoog beweegt betekent dit dat expansie van het gas ervoor zal zorgen dat de oppervlakte van de kolom groter wordt. We gaan er dus vanuit dat de uitzetting horizontaal plaatsvindt. Hierdoor neemt het oppervlakte evenredig met het volume toe volgens:

$$A = A_{1700\text{m}} \frac{V}{V_{1700\text{m}}}, \quad (8)$$

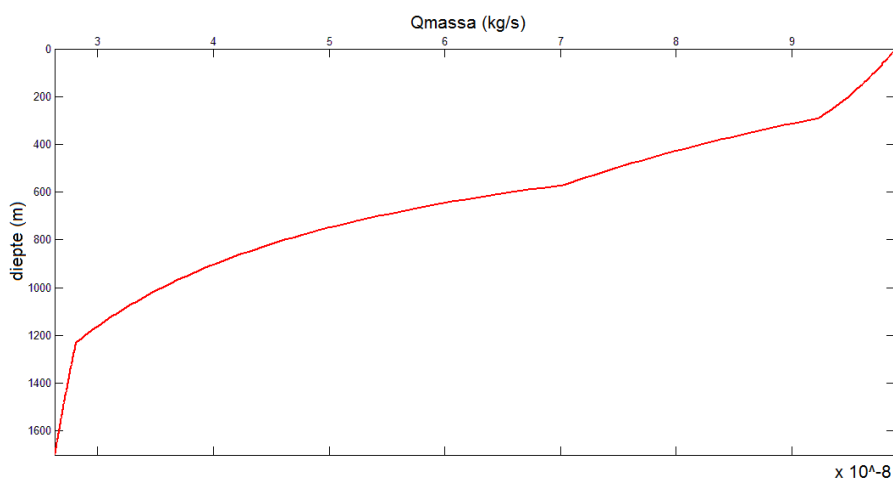
waarbij $V_{1700\text{m}}$ de kubieke meter CO_2 is waarmee we zijn begonnen op 1700 meter diepte en $A_{1700\text{m}}$ de oppervlakte van de breuk in de caprock.

Uitkomsten

Nu alle variabelen gedefinieerd zijn kan het massadebiet berekend worden. Dit kan vervolgens met behulp van de dichtheid omgezet worden in een volumedebiet:

$$Q_{\text{massa}} = Q_{\text{volume}} \rho \quad (9)$$

In figuur 12 is de massastroom uitgezet tegen de diepte. Als deze vergeleken wordt met figuur 10 is duidelijk te zien dat de massastroom en de viscositeit omgekeerd evenredig zijn. Dit komt omdat in de Wet van Darcy ΔP , ΔL en de permeabiliteit op elk interval gelijk zijn, en het oppervlakte omgekeerd evenredig is met de dichtheid waarmee we in vergelijking 9 de volumestroom vermenigvuldigen.

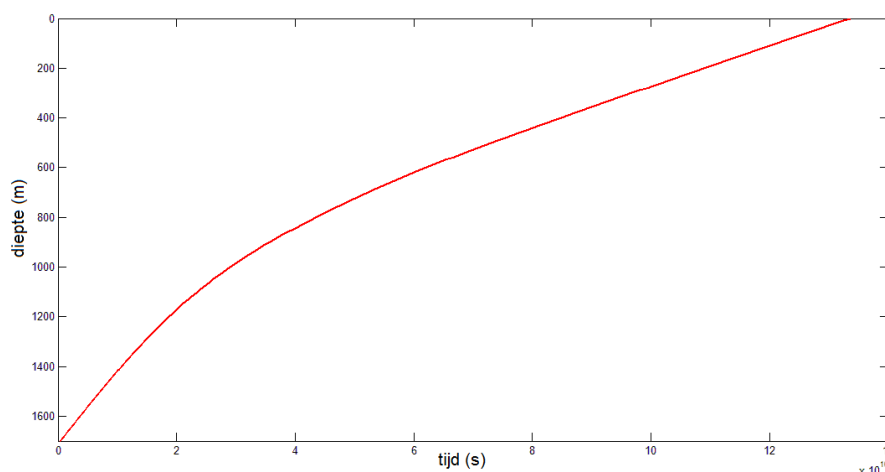


Figuur 12: Massastroom CO₂ volgens model 1.

De massastroom is het hoogst aan het oppervlak; $9,89 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$. In theorie zou CO₂ hier dus met dit massadebiet kunnen stromen. Deze hoogste snelheid wordt bereikt, omdat de viscositeit hier het laagst is. In de praktijk kan deze massastroom echter niet gehaald worden, omdat CO₂ dat hier stroomt vanaf het reservoir moet komen. Net boven het reservoir is de massastroom een stuk lager en dus komt er niet genoeg CO₂ in de hogere gesteentelagen om dit maximale volumedebiet te halen. Het laagste massadebiet wordt net boven het reservoir bereikt en dit is de bepalende factor voor de rest van het reservoir. Het gaat hier om een debiet van $2,63 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$. Dit betekent dat het 440 dagen duurt voordat er een kilo CO₂ aan het oppervlak is gekomen. Ook kan de snelheid waarmee CO₂ omhoog stroomt berekend worden volgens:

$$v = \frac{Q_{\text{volume}}}{A} \quad (10)$$

Met behulp van de snelheid waarmee CO₂ zich naar boven beweegt kan berekend worden hoelang het duurt voordat de eerste CO₂ aan het oppervlakte komt. $t = \frac{\Delta L}{v}$ geeft de tijd per interval van 10 meter en door al deze tijden bij elkaar op te tellen kan de totale tijd berekend worden. De cumulatieve tijd is in figuur 13 uitgezet als functie van de diepte. Het duurt $1,3347 \cdot 10^{11}$ seconde voordat het eerste CO₂-gas aan het oppervlakte komt. Dit is 4232 jaar.



Figuur 13: Cumulatieve tijd, als functie van de diepte, voor het omhoog stromen van CO₂. De totale tijd die CO₂ erover doet om boven te komen is uitgezet tegen de te waarop het zich na die tijd bevindt.

Evaluatie

In dit model hebben we een aantal belangrijke aannames gedaan waarvan we hieronder zullen bespreken waarom we deze gedaan hebben en wat voor invloed dat op het model gehad heeft.

Aannames wat betreft permeabiliteit

De permeabiliteiten die we hebben aangenomen zijn zeer conservatief. In de Barendrechtse ondergrond bevinden zich een aantal zeer compacte kleilagen die een extreem lage permeabiliteit hebben, waardoor het harmonisch gemiddelde in het echt waarschijnlijk nog lager uit zal vallen.

CO₂ gedraagt zich over de gehele diepte als vloeistof

De Wet van Darcy geldt voor vloeistoffen. In de superkritische fase stroomt CO₂ als een vloeistof en kan dus beschreven met behulp van deze wet. Als het CO₂ boven de 720 meter komt wordt het een gas en gaat de Wet van Darcy niet meer op. De permeabiliteit voor een gas is namelijk anders dan die van een vloeistof, met name omdat gas veel minder last heeft van wrijving langs de wanden en daardoor sneller kan stromen. Hierdoor zou de snelheid in de bovenste 700 meter een stuk hoger kunnen zijn dan is berekend volgens de Wet van Darcy.

Dit is voornamelijk van invloed op de tijd die CO₂ erover doet om boven te komen.

Het duurt in ieder geval $0,83 \cdot 10^{11}$ seconde voordat de diepte van 720 meter bereikt is. Volgens Darcy duurt het vervolgens nog eens $0,50 \cdot 10^{11}$ seconde voordat de CO_2 het oppervlak bereikt heeft, maar dit is in de praktijk waarschijnlijk een stuk minder. Voor het massadebiet maakt deze aanname geen verschil. Het gaat hierbij namelijk om de hoeveelheid CO_2 die vlak boven het reservoir kan doorstromen, en de waarde die we daarvoor met behulp van Darcy hebben uitgerekend is wel betrouwbaar.

Horizontale uitzetting

We gaan uit van een lineaire toename van de druk, dit betekent dat er geen verticale drukopbouw plaatsvindt. Omdat CO_2 tijdens het omhoog migreren wel uitzet, kan dit alleen horizontaal gebeuren. Hierdoor wordt er geen verticale druk opgebouwd en blijft CO_2 in een kolom recht omhoog bewegen. In het gebied rondom het kritieke punt zal in de praktijk wel druk opgebouwd worden omdat het uitzetten daar ontzettend snel gebeurt. In de andere gebieden is deze aanname redelijk, omdat de horizontale permeabiliteit vaak veel hoger is dan de verticale permeabiliteit. In de meeste reservoiranalyses wordt voor de verticale permeabiliteit een tiende of nog minder van de horizontale permeabiliteit genomen (Sada D. Joshi, 1990).

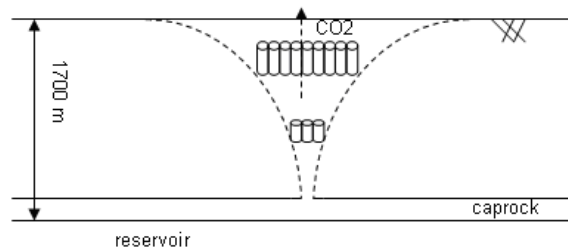
Geen water in ondergrond

In werkelijkheid zal zich in veel van de gesteentepakketten, en zeker in de zandsteenlagen, wel water bevinden. Dit water zorgt voor een druk omlaag, wat de doorgang van CO_2 zal belemmeren of in elk geval zal afremmen.

2.4 Model 2

In dit model berekenen we het debiet waarmee de CO_2 omhoog zou kunnen stromen als we de gesteentepakketten vervangen door denkbeeldige buisjes met een karakteristieke straal die afhangt van de porositeit en permeabiliteit van het gesteente. Dit kan berekend worden met de Wet van Poiseuille:

$$Q_v = \frac{n\pi r^4 \Delta P}{\mu \Delta L} \quad (11)$$



Figuur 14: Schematisch overzicht van model 2.

Aannames

- Homogene en isotrope gesteentelagen.
- CO₂ stroomt in een verticale kolom omhoog.
- Temperatuur, druk, viscositeit en dichtheid constant op intervallen van 1 meter.
- CO₂ stroomt over de gehele diepte als een vloeistof.
- CO₂ kan vrij naar boven stromen, er bevindt zich geen water in de poriën dat de doorgang belemmert

Berekening

De Wet van Poiseuille beschrijft de stroming door n buisjes met daarover een drukverschil ΔP . Om de gesteentepakketten te kunnen beschrijven als buisjes hebben ze een karakteristieke straal die afhangt van de porositeit en permeabiliteit. Dit verband kan gevonden worden door de Wet van Darcy en de Wet van Poiseuille te combineren:

$$r = \sqrt{\frac{8k}{\phi}} \quad (12)$$

Hiermee is per gesteente de straal (r) van de buisjes bepaald door de permeabiliteit en porositeit zoals in tabel 3 te nemen.

Het aantal buisjes waardoor de CO₂ stroomt is het totale doorstroomde oppervlak gedeeld door het oppervlak van een buisje. Omdat we net als in model 1 uitgaan van horizontale uitzetting naarmate het gas hoger komt neemt de oppervlakte opnieuw toe volgens vergelijking 8.

Het aantal buisjes (n) kan nu berekend worden:

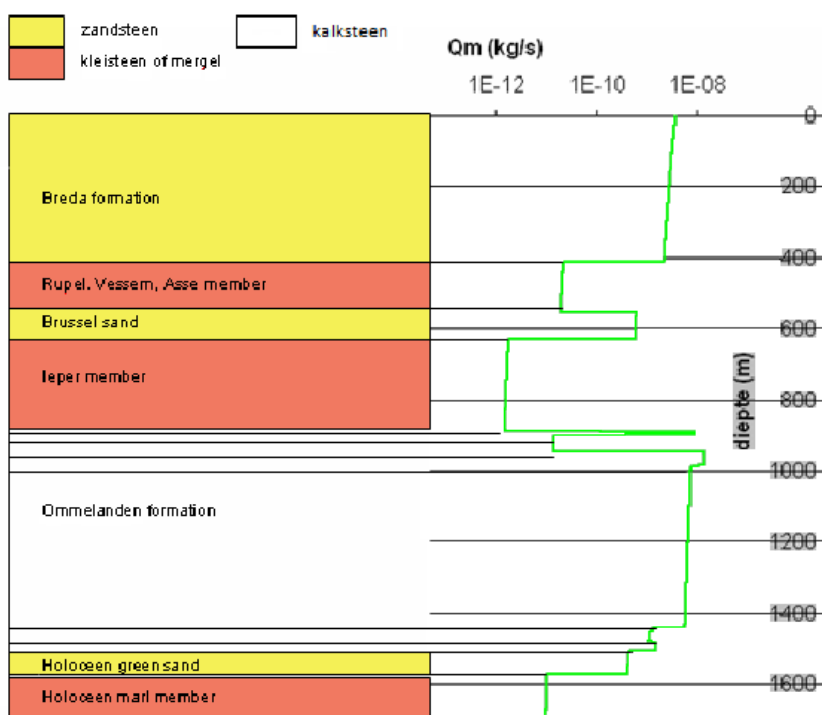
$$n = \frac{A}{A_{\text{buis}}} = \frac{A}{\pi r^2} \quad (13)$$

Verder hebben we gekozen voor intervallen van 1 meter waardoor $\Delta P = \rho g \Delta L = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 1 \text{ m} = 10000 \text{ Pa}$.

Uitkomsten

Nu alle variabelen gedefinieerd zijn kan het massadebiet berekend worden. Dit kan vervolgens met behulp van de dichtheid omgezet worden in een volumedebiet door vergelijking 9 te gebruiken.

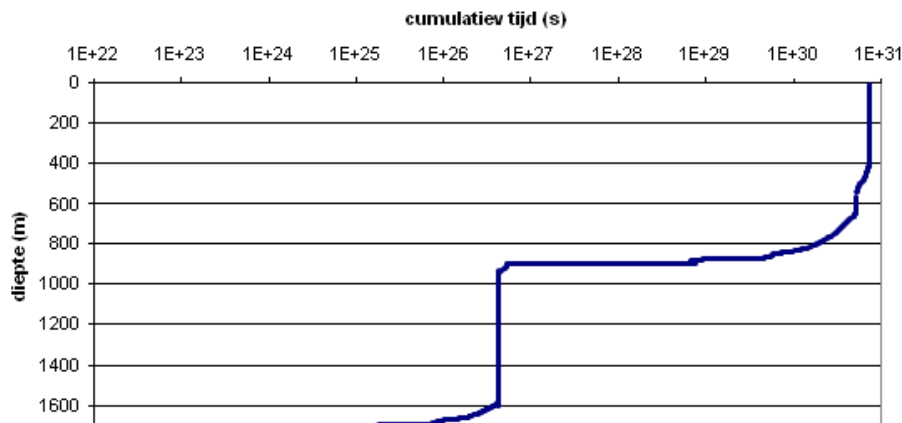
De massastroom is in figuur 15 logaritmisches uitgezet tegen de diepte met daarnaast de verschillende gesteentelagen. Het is duidelijk te zien dat de massastroom verspringt op overgangen van het een naar het andere gesteente. Dit komt omdat elk gesteente één andere karakteristieke straal heeft. In de Wet van Poiseuille komt de straal tot de vierde macht voor, dus dit is een zeer bepalende factor voor de massastroom. Zandstenen hebben over het algemeen een hogere permeabiliteit dan kleistenen en daardoor ook een grotere straal van hun buisjes. Hierdoor hebben de kleistenen het laagste massadebiet en de zandstenen een relatief hoog massadebiet.



Figuur 15: Massastroom als functie van de diepte volgens model 2.

Ook kan de snelheid waarmee CO_2 omhoog stroomt berekend worden volgens vergelijking 10. Met behulp van de snelheid waarmee CO_2 zich naar boven beweegt kan berekend worden hoelang het duurt voordat het eerste CO_2 -gas aan het oppervlakte komt. $t = \frac{\Delta L}{v}$ geeft de tijd per interval van 1 meter, en door al deze tijden bij elkaar op te tellen kan de totale tijd berekend worden.

De cumulatieve tijd is in figuur 16 uitgezet als functie van de diepte.



Figuur 16: Cumulatieve tijd, als functie van de diepte, voor het omhoog stromen van CO₂.

In dezelfde figuur is te zien dat de belangrijkste bijdragen voor de tijd worden geleverd door de klei- en mergellagen net boven het reservoir en door de kleilagen tussen de 900 en 400 meter. Dit komt omdat de snelheid hier tientallen malen lager ligt dan in de meer permeabele gesteenten.

In totaal duurt het $7,38 \cdot 10^{30}$ seconde voordat het CO₂ aan het oppervlak is. Dit is $2,34 \cdot 10^{23}$ jaar. Dit is enorm lang en vele ordes groter dan de leeftijd van onze aarde.

Evaluatie

Aannames wat betreft porositeit en permeabiliteit

Net als voor model 1 is uitgelegd, zijn de porositeiten en permeabiliteiten die we in dit model hebben gebruikt zeer conservatief. In sommige gebieden hebben de representatieve buisjes in werkelijkheid waarschijnlijk een straal die nog wel een orde, of zelfs een paar ordes lager ligt. Dit zou leiden tot een nog veel grotere cumulatieve tijd.

CO₂ gedraagt zich over de hele diepte als een vloeistof

Opnieuw is dit tot aan het kritieke punt van CO₂ op ongeveer 720 meter een goede benadering. Op 720 meter is de cumulatieve tijd al in de orde van 10^{30} seconden. De tijd die er daarna nog bijkomt is waarschijnlijk overschat, omdat CO₂ in gasvorm sneller kan stromen dan in de kritieke fase wanneer het als vloeistof stroomt.

Horizontale uitzetting

Deze aanname is, net als beschreven voor model 1 wel realistisch in de zandsteenlagen, maar in de kleisteenlagen wordt in de werkelijkheid wel verticale druk opgebouwd.

Beschrijving van de ondergrond als buisjes

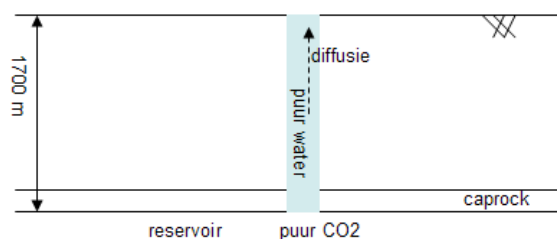
Het grootste probleem van het beschrijven van de ondergrond in de vorm van denkbeeldige buisjes ligt bij de overgangen tussen de gesteentelagen. Omdat de buisjes op deze overgangen ineens een grotere of kleinere straal krijgen, neemt de massastroom vaak sterk af of toe. Dit is de oorzaak van de grote sprongen in de grafiek van figuur 15. In werkelijkheid zullen deze overgangen geleidelijker verlopen. Ook zal er bij de overgangen van grotere naar kleinere buisjes (ofwel van laag permeabele naar meer permeabele gesteenten) in werkelijkheid druk opgebouwd worden, omdat CO₂ in de grote buisjes veel sneller kan stromen dan in de kleinere buisjes. Hierdoor kan zeker onderin de klei-stenen een hogere druk worden opgebouwd, wat zal zorgen voor een snellere stroming van CO₂.

Geen water in ondergrond

In werkelijkheid zal zich in veel van de gesteentepakketten, en zeker in de zandsteenlagen, wel water bevinden. Dit water zorgt voor een druk omlaag, wat de doorgang van CO₂ zal belemmeren of in elk geval zal afremmen.

2.5 Model 3

In dit model berekenen we hoe snel CO₂ aan het oppervlak komt door diffusie. Diffusie kan beschreven worden met de instationaire massa overdrachts vergelijking van Fourier.



Figuur 17: Schematische weergave van model 3.

Aannames

- CO₂ staat bij de breuk in de caprock in rechtstreeks contact met water uit de gesteentepakketten daarboven.
- Diffusie vindt recht omhoog plaats door een kolom van puur water.

Berekening

Om Fourier's diffusievergelijking op te lossen kan gebruik gemaakt worden van tabellen waarin het Fouriergetal ($\frac{D \cdot t}{a^2}$) is uitgezet tegen $\frac{C_1 - C_{\text{center}}}{C_1 - C_0}$. Ons probleem is analoog aan diffusie door een hele dikke vlakke plaat. Omdat in de tabellen de concentratie in het midden van de plaat is uitgezet, kiezen we voor een plaat van dikte $2 \cdot 1700 \text{ m} = 3400$ meter. Een overzicht van de verschillende variabelen staat in tabel 4.

Symbol	Betekenis
C_0	Concentratie CO ₂ aan het oppervlak op tijdstip $t = 0$
C_1	Concentratie CO ₂ op 1700 meter
C_{center}	Concentratie CO ₂ in het 'midden van de plaat', ofwel het oppervlak

Tabel 4: Overzicht van de gebruikte symbolen.

De diffusiecoëfficiënt van CO₂ in water bij temperaturen tussen de 10 en 70 °C is van de orde $10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ (Tamimi et al., 1994), dat betekent dat we een Fouriergetal van de orde $\frac{10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot t}{3400^2 \text{ m}^2} = 8,65 \cdot 10^{-17} \cdot t$. De tabel lezen we af voor $\frac{C_1 - C_{\text{center}}}{C_1 - C_0} = 0,95$. Dit betekent dat de concentratie van de CO₂ in het water dan 5% van de concentratie op reservoirdiepte is. Hierbij hoort een Fouriergetal van 0,05.

Uitkomsten

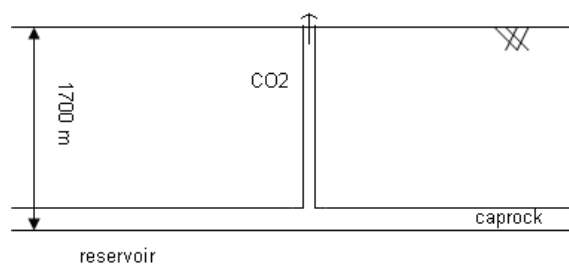
$8,65 \cdot 10^{-17} \cdot t = 0,05$ geeft een tijd van $5,8 \cdot 10^{14}$ seconde, wat gelijk is aan 18 miljoen jaar.

Evaluatie

In dit model hebben we een zeer conservatieve aanname gedaan door ervan uit te gaan dat CO₂ vrij kan diffunderen vanaf 1700 meter diepte tot aan het oppervlak door een kolom van puur water. We hebben geen aannames gedaan die ervoor zorgen dat de diffusie in werkelijkheid sneller zou kunnen verlopen. We komen uit op een tijd van miljoenen jaren voordat er een kleine hoeveelheid CO₂ naar het oppervlak gediffundeerd is. Diffusie vanaf het reservoir naar het oppervlak is dus geen reëel gevaar.

2.6 Model 4

In dit model kijken we wat er gebeurt als door spontane tektonische activiteit een breuk ontstaat die zowel door de caprock, als door het gesteentepakket daarboven loopt, in een verticale lijn naar het aardoppervlak. Opgeslagen puur CO₂ in het reservoir, krijgt op deze manier de mogelijkheid om vlug naar boven te stromen en zonder omwegen of andere belemmeringen, bijvoorbeeld in de vorm van andere vloeistoffen in de ondergrond en permeabiliteiten van bovenliggende gesteenten. Een analogie voor dit probleem ligt in de turbulente stationaire stroming door een dunne vlakke plaat theorie, uit de Fysische Transportverschijnselen (TN4780TU) colleges, zoals gegeven aan de Technische Universiteit Delft in 2008.



Figuur 18: Schematische weergave model 4.

Aannames

- Geen andere vloeistoffen aanwezig in de opgestelde breuk, zoals water of olie.
- Constante breukeigenschappen (met andere woorden: geen verdikking / verdunning/ verbreding).
- Verwaarloosbare wandruwheid, er is voor een gladde wand gekozen.
- Temperatuur, druk, viscositeit en dichtheid constant op berekende intervallen.

Berekening

Op basis van de zojuist gemaakte aannames hebben we een model opgesteld met het computerprogramma MATLAB (zie Appendix), dat een simulatie maakt van het breuktraject, en dit opdeelt in kleine elementen. Allereerst is er geverifieerd of de stroming inderdaad turbulent mag worden genoemd, met behulp van vergelijking 5.34 uit het Fysische Transportverschijnselen boek. Deze vergelijking hebben we iets aangepast zodat er gerekend kan worden met een geschatte (initiële) massastroom, in plaats van met een snelheid. Dit leidt tot vergelijking 14.

$$\text{Re}_{\text{Hydr}} = \frac{4 Q_{m,\text{geschat}}}{\mu_{\text{gem}}(2B + 4R)} \quad (14)$$

In vergelijking 14 is Re_{Hydr} het hydraulische Reynoldsgetal (een maat voor de turbulentie van de stroming) en μ_{gem} de gemiddelde viscositeit zoals berekend volgens de modellen van Vesovic. Daarnaast staat B voor de breedte van de breuk, en R voor de halve diameter van de breuk.

Gezien de lage viscositeit is het hydraulische Reynoldsgetal in ons geval zeer waarschijnlijk groter dan 2000, dat aangeeft dat de stroming zich inderdaad in het turbulente gebied bevindt. In het door ons te onderzoeken turbulente gebied geldt de empirische relatie van Blasius en daarmee vergelijking 5.29 uit Fysische Transportverschijnselen deel 1. Deze formule is weergegeven in vergelijking 15.

$$4f = 0,316 \cdot Re_{Hydr}^{-1/4} \quad \text{mits } 4000 < Re_{Hydr} < 10^5 \quad (15)$$

In vergelijking 15 is $4f$ de Fanning frictiefactor, verkregen door het invullen van het zojuist geschatte hydraulische Reynoldsgetal. Wanneer deze Fanning frictiefactor eenmaal bekend is kan vergelijking 5.35 uit het Fysische Transportverschijnselen boek worden ingevuld. Deze is opnieuw omschreven zodat de onbekende snelheid wordt vervangen door de geschatte massastroom, zodat vergelijking 16 wordt verkregen.

$$\Delta P = 4f \frac{(2B + 4R)}{64R^3 B^3} \frac{1}{\rho} Q_{m,geschat}^2 x - \rho g x \quad (16)$$

In vergelijking 16 is x de afstand die door CO_2 al is afgelegd op de weg naar boven. Er is gekozen voor een nauwkeurig berekening door het aantal elementen te zetten op 1700, waardoor elk meter van de weg naar boven kan worden beschreven. De drukval die bij alle elementjes wordt berekend kan nu vervolgens bij elkaar worden geteld, zodat een berekende totale drukval ontstaat. Door deze berekende totale drukval te vergelijken met de bekende totale drukval (17 MPa), ofwel 170 atmosfeer, is het mogelijk zeer precies te bekijken of de massastroom te hoog of te laag is geschat volgens vergelijking 17.

$$Q_{m,berekend} = Q_{m,geschat} \left(\frac{\Delta P_{totaal}}{P_{begin} - P_{eind}} \right) \quad (17)$$

Wanneer de berekende totale drukval gelijk is aan de bekende totale drukval (waarde boven de deelstreep gelijk aan de waarde onder de deelstreep), levert de vergelijking dat de berekende massastroom gelijk is aan de geschatte massastroom door gebruik te maken van de wet van behoud van massa.

Uitkomsten

Op basis van deze simulatie vinden we met behulp van het computerprogramma MATLAB resultaten, zoals beschreven in tabel 5.

Variabele	Waarde
Re_{Hydr}	$1,0929 \cdot 10^4$
$Q_{m,geschat}$	$0,9101 \frac{kg}{s}$
$Q_{m,berekend}$	$0,9101 \frac{kg}{s}$
P_{eind}	$1,0137 \cdot 10^5 Pa$
v	$99,3767 \frac{m}{s}$
$Q_{v,oppervlak}$	$0,4969 \frac{m^3}{s}$

Tabel 5: Overzicht van de uitkomsten van model 4.

Uit tabel 5 kan afgelezen worden dat het Reynoldsgetal inderdaad zorgt voor een turbulent stromingregime, waar ook direct de empirische relatie van Blasius mag worden gebruikt. De geschatte massastroom is na enig experimenteren gelijk geworden aan de berekende massastroom, getuige de einddruk na de cumulatieve drukval (druk op het aardoppervlak van 101325 Pa is gelijk aan 1 bar). Op basis van de berekende massastroom is nu bij standaardcondities op het aardoppervlak zowel de snelheid als de volumestroom te bepalen, door te delen door de dichtheid en oppervlak, respectievelijk de dichtheid.

Het volume CO₂ dat per seconde vrijkomt uit de breuk van 1 millimeter bij 5 meter is dus substantieel te noemen!

Evaluatie

Aannames over de breuk

In dit model hebben we een breuk van 1 millimeter breed van 1700 meter diepte tot aan het oppervlak laten lopen. Zulke breuken komen in Nederland niet voor. Verder zijn we uitgegaan van een vlakke wand van de breuk, in werkelijkheid zal een breuk heel ruw zijn, doordat de gesteenten waar de breuk doorheen loopt niet glad zijn en een breuk bovendien nooit perfect verticaal door de aarde loopt.

Geen water in de breuk

Als zo'n breuk in werkelijkheid al zou kunnen ontstaan, dan zou er ook water instromen vanuit de waterhoudende lagen waar de breuk doorheen loopt. Dit water zou de doorgang van CO₂ afremmen omdat het een druk naar beneden uitoefent.

CO₂ gedraagt zich over de hele diepte als een vloeistof

Dit is tot aan het kritieke punt van CO₂ een goede benadering, daarboven kan de CO₂ sneller stromen omdat het een gas is. Voor de snelheid zal dit echter geen verschil maken, omdat het massadebiet vanaf het reservoir tot aan het kritieke punt bepalend is voor de hoeveelheid CO₂ die boven de 720 meter komt en daar als gas verder kan stromen.

2.7 CO₂ uitstoot op menselijke maat

Een mens ademt circa 12 tot 15 keer per minuut en ademt per ademhaling ongeveer 0,4 liter in dat een samenstelling heeft zoals in tabel 6.

Gas	Percentage
Stikstof	78%
Zuurstof	21%
Argon	0,96%
CO ₂ , H ₂ , H ₂ O, etc.	0,04%

Tabel 6: Samenstelling van ingeademde lucht.

Omdat zuurstof deels wordt omgezet in CO₂ ademt een mens lucht uit met 4% CO₂ en 17% zuurstof. De rest van de percentages blijft gelijk.

Hiermee kan berekend worden hoeveel CO₂ een mens uitstoot:

$$Q_{v,mens} = 0,04 \cdot 0,4 \text{ liter} \cdot 13,5 \frac{\text{ademhalingen}}{\text{minuut}} = 0,208 \frac{\text{dm}^3}{\text{minuut}} \quad (18)$$

Dit is een massastroom van:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho = \frac{0,216 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{60 \text{ s}} \cdot 1,88 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 6,77 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (19)$$

Omgerekend betekent dit dat een mens per jaar 213 kilo CO₂ uitstoot.

3 Conclusies

Om de CO₂-uitstoot terug te dringen, zullen er nu maatregelen genomen moeten worden. Het opslaan van CO₂ is een reële oplossing, maar stuit op veel weerstand omdat het nieuw en onbekend is. De technisch geologische vragen die spelen bij de omwonenden en lokale politiek zijn in dit verslag beantwoord. Veel vragen zijn opgekomen uit angst voor onrealistische rampscenario's. De oorzaak hiervan is dat de technische aspecten van CO₂-opslag bij het grote publiek erg onbekend zijn.

De antwoorden op de vragen, die beantwoord zijn aan de hand van de MER-rapporten en andere literatuur, maken duidelijk dat er technisch geologisch gezien geen reële gevaren aan de opslag van CO₂ zitten. Er is voldoende ervaring en kennis om over te gaan tot de opslag van CO₂ in het Barendrecht veld.

De modellen van de scenario's waaraan gerekend is, de zogenaamde 'in het slechste geval'-scenario's, tonen aan dat zelfs in deze gevallen de hoeveelheid CO₂ die naar het oppervlak zou kunnen stromen zeer klein is. Daarnaast komt naar voren dat het bovendien minstens duizenden jaren duurt voordat er überhaupt CO₂ aan het oppervlak verschijnt.

4 Referenties

- AMESCO, (2007). Royal Haskoning, AMESCO: *Generic Environmental Impact Study on CO₂ Storage*, (9S0742/R04/ETH/Gron). pp. 104.
- Breunese, J.N., (2006). *The Netherlands: A case of optimisation of recovery and opportunities for re-use of natural gas assets*. <http://www.igu.org/html/wgc2006/pdf/paper/add11555.pdf>. Bekeken op 28 mei 2009.
- Brune, S. et al. (2003). *CO₂-Deposits at Vorderrön area (Thuringia) - Gas migration from a deep reservoir to surface?*. <http://www.cosis.net/abstracts/ICGG7/00023/ICGG7-A-00023.pdf>. Bekeken op 20 mei 2009.
- Chimowitz, E. (2005). *Introduction to critical phenomena in fluids*. Oxford University Press. pp. 110.
- CO2Castor (2009). <http://www.co2castor.com>. Bekeken op 19 mei 2009.
- CO2CRC (2009). <http://www.co2crc.com.au/otway>. Bekeken op 18 mei 2009.
- De Bruijn, J. (2008). *Geochemical consequences for CO₂ storage in the BRT(-Z) fields; Summary*. Shell EPE, **report nr. EP200810202805**.
- Fedor, F., Hamos, G., Jobbik, A., Mathe, Z., Somodi, G., Szucs, I., (2007). *Laboratory pressure pulse decay permeability measurement of Boda Claystone, Mecsek Mts., SW Hungary*. *Physics and Chemistry of the Earth*, **Volume 33 (1)**, pp. S45-S53.
- Fenghour, A., Wakeham, W.A., Vesovic, V., (1998). *The viscosity of carbon dioxide*. *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 27 (1), pp. 31-39.
- Haskoning B.V. (2008a). *MER Ondergrondse Opslag van CO₂ in Barendrecht*. Rapport 2, Beschrijving milieueffecten.
- Haskoning B.V. (2008b). *MER Ondergrondse Opslag van CO₂ in Barendrecht*. Rapport 1, Samenvattend hoofdrapport. pp. 112 en 113.
- Hofstee, C. & Seeberger, F. (2007). *The effect of CO₂/CH₄ mixing on the reservoir pressure*. Shell EPE/ TNO Built Environment and Geoscience, report nr. EP200706216714.
- ILO-1 (n.d.). http://www.ilo.org/safework_bookshelf/english?d&nd=857171641. Bekeken op 17 mei 2009.
- ILO-2 (n.d.). http://www.ilo.org/safework_bookshelf/english?d&nd=857171344. Bekeken op 17 mei 2009.
- IPCC, (2005). *Carbon Dioxide Capture and Storage*, figuur 5.9.

- Jahn, F., Cook, M., & Graham, M. (2008). *Hydrocarbon Exploration and Production*. Elsevier, 2^e editie. **pp.** 232.
- Joshi, S.D., (1990). *Horizontal well technology*. Joshi Technologies Internationals, Inc. **pp.** 288.
- Lake, L.W. (2006). *Petroleum Engineering Handbook*. Society of Petroleum Engineers. **Volume 1, pp.** 272.
- Miller, R.W. (1996). *Flow measurement engineering handbook*. McGraw-Hill Professional, 3^e editie. **pp.** 3.41.
- Nederland Olie- en gasportaal. <http://www.nlog.nl/nlog/requestData/nlogp/allBor/metaData.jsp?type=ALLBOR&id=106512517>. Bekeken op 4 juli 2009.
- Neele, N. (1994). *Voorlopig resultaat van inventariserend petrofysisch onderzoek in het kader van CO₂-injectie*. Project 3397, Rijks Geologische Dienst, Afdeling Reserves.
- Newstead, J. et al. (2008). *Technical Field Development Plan; Barendrecht & Barendrecht-Ziedewij CO₂ Geostorage* Paragraph 5.8: Reservoir engineering and dynamic modelling). Shell EPE, **report nr. EP200801218447**. **pp.** 2, 3, 10, 12 en 13.
- Orlic, B. et al. (2007a). *Cap rock and fault integrity for CO₂ Storage in Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields*. TNO Built Environment and Geoscience, report nr. 2007-U-R1057/B. **pp.** 3-23
- Orlic, B., Fokker, P., Geel, K. (2007b). *Feasibility of CO₂ storage in Barendrecht/Barendrecht-Ziedewij: Cap Rock and Fault integrity study*. TNO Built Environment and Geoscience, **report nr. 1007-U-R0461/C**.
- Pluymakers, M.P.D., Hofstee, C. (2007). *Qualitative study of the fate and transport of CO₂ in the overburden of the Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields*. TNO Built Environment and Geoscience, **report nr. 2007-U-R1057/B**.
- RIVM (2004). Rapport 609021029/2004
- Sadisun, I.A., Shimada, H., Ichinose, M., Matsui, K., (2005). *Study on the physical disintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified slaking index test*. Geotechnical and Geological Engineering, **23 (3), pp.** 199-218.
- Seeberger, F. (2008). Estimation of long-term pressure increase due to ongoing gas charge in Barendrecht. Shell EPE, **report nr. EP200810203728**.
- Shell confidential report EP 2002-5090. (2002). *Compaction of Holland Greensand, De Lier Sandshale and Upper and Middle Bunter Core samples from West Netherlands - An experimental investigation*.

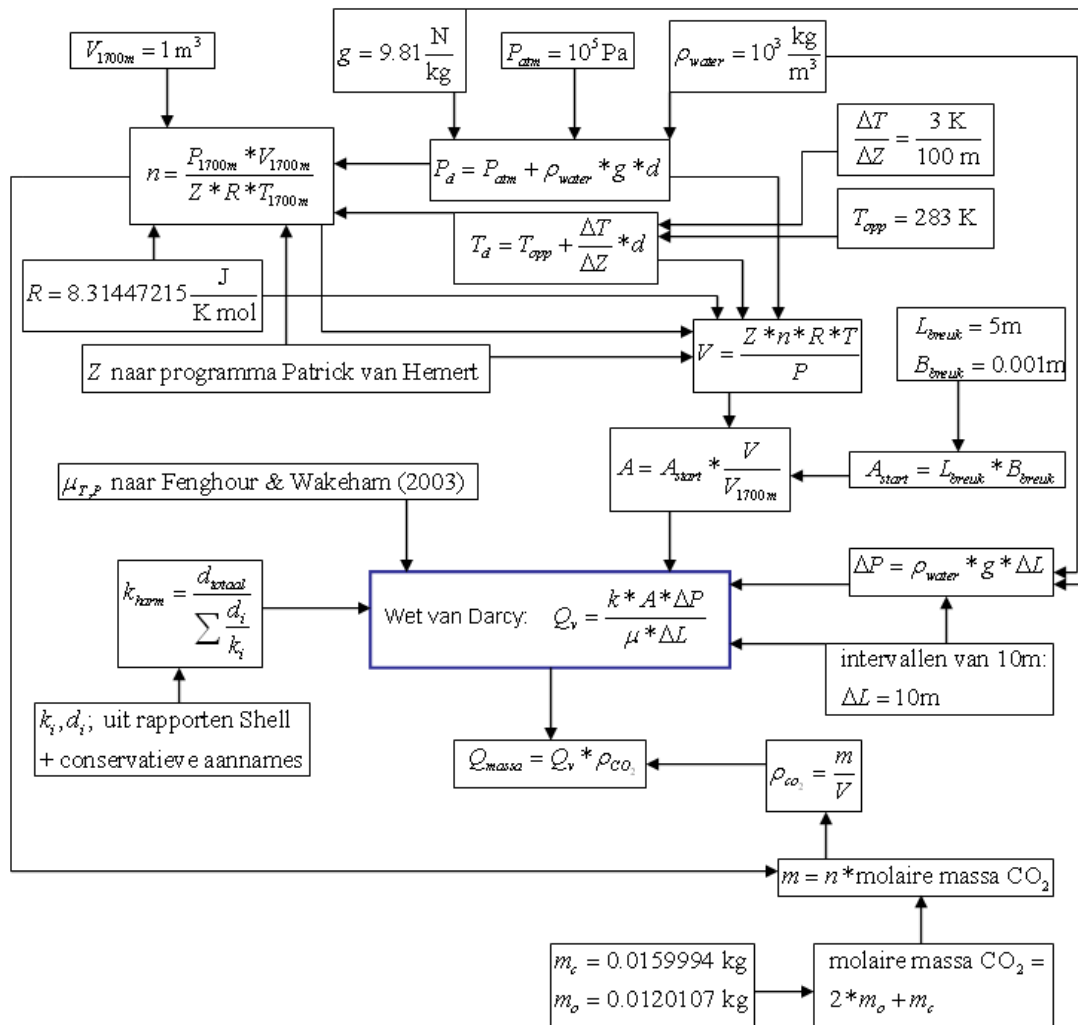
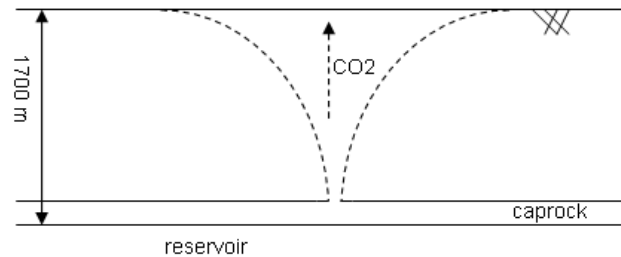
- Span, R., Wagner, W. (1996). *A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa*. J. Phys. Chem. Ref. Data 25, **pp.** 1509-1596.
- Tamimi, A., Rinker, E.B., Sandall, O.C. (1994), *Diffusion coefficients for hydrogen sulfide, carbon dioxide, and nitrous oxide in water over the temperature range 293-368 K*. Journal of Chemical and Engineering Data 39 (2), **pp.** 330-332.
- Total (2007). <http://www.total.com/static/en/medias/topic2627/CO2-total-lacq-summary-information-dossier.pdf>. Bekeken op 19 mei 2009.
- Van Bergen, F. et al. (2008). *Geochemical consequences of CO₂ injection in the Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields*. TNO Built Environment and Geoscience, **report nr. 2007-U-R1057/B revised**.
- Van den Akker, H.E.A., Mudde, R.F., (2003). *Fysische Transportverschijnselen 1*. VSSD. **pp.** 215-223.
- Van der Meer, L.G.H. et al. (2006). *Enhanced gas recovery testing in the K12-B reservoir by CO₂ injection, a reservoir engineering study*. **pp.** 6. Bekeken op www.k12-b.nl op 19 juni 2009.
- Van Eijs, R. (2007). *Risk management for stored CO₂; Migration from the Barendrecht (BRT) and Barendrecht-Ziedewij (BRTZ) fields*. Shell EPE, **report nr. EP200812201503**.
- Van Eijs, R. (2008). *Barendrecht (BRT) CO₂ sequestration: consequence from an irreversible stress path*. Shell EPE, **report nr. EP200803212403**.
- Verweij, H. (2006). *Carbon dioxide in natural gas accumulations in onshore and offshore Netherlands*. TNO Built Environment and Geosciences, <http://dino.loket.tno.nl/dinoLks/nlog/publications.jsp>. Bekeken op 1 juni 2009.
- Wikipedia.org. <http://en.wikipedia.org/wiki/Breathing>. Bekeken op 19 juni 2009.

5 Appendix

FLOWCHART MODEL 1

Model 1:

- Breuk van 5m x 1mm in caprock
- Vrije doorgang door bovenliggende lagen (geen water)
- CO₂ stroomt naar boven volgens wet van Darcy



Figuur 19: Flowchart voor model 1.

```

% script ter berekening van de drukval over het reservoir interval van
% 1700m tot aan de oppervlakte bij verschillende viscositeiten/dichtheden
%
% aannames:
%
% stroming turbulent
% geen gas slippage
% gebruik ideale gaswet, voor dichtheid/viscositeits eigenschappen
% eigenschappen constant op hun interval
% 'leiding' met gladde wanden
% stationaire stroming
% constante breukeigenschappen (i.e. geen verdikking/verdunning/verbreiding)
clear all;clc;
warning off; %#ok<WNOFF>

% vaste gegevens
L = 1700;
Pbegin = 17000000;
Peind = 101325;
P = Pbegin;
deltaPtotaal = Pbegin - Peind;
R = 0.0005;
B = 5;
g = 9.81;
Dhydr = (4*B*2*R)/(2*B + 4*R);

% aantal stappen
n = 1700;
deltaX = L/n;
x = -deltaX/2;

% grove afschatting
AvMu = 3.33*10^(-5);

PhiM = ...;

ReynoldsHydr = (4*PhiM)/(AvMu*(2*B + 4*R));
disp('Reynolds Hydraulisch =');
disp(ReynoldsHydr);

% Reynolds naar 4f: 64/Re if Re < 2000, 0.316*Re^(-1/4) if 4000 < Re < 10^5
FourF = 0.316*ReynoldsHydr^(-1/4);

% polynomen
Rho = [260.8204802;247.8445603;234.6160238;221.1274213;207.3710076;193.3387266;
179.0221961;164.4126908;149.5011244;134.2780312;118.7335456;
102.8573812;86.63880769;70.06662696;53.12914722;35.81415549;18.10888824;
1.831529934];

```

```

Mu = [5.35E-05;5.27E-05;5.20E-05;5.12E-05;5.05E-05;4.86E-05;4.41E-05;3.95E-05;
3.50E-05;3.06E-05;2.59E-05;2.14E-05;1.88E-05;1.71E-05;
1.54E-05;1.48E-05;1.44E-05;1.42E-05];
dynamicMu = Mu./Rho;
depth = [1700;1600;1500;1400;1300;1200;1100;1000;900;800;700;600;500;400;300;
200;100;0];
polynoomDynamicMu = polyfit(depth,dynamicMu,15);
polynoomRho = polyfit(depth,Rho,15);

for k = 1:n
    P;
    x = x + deltaX;
    DynMuFit = polyval(polynoomDynamicMu,x);
    RhoFit = polyval(polynoomRho,x);
    deltaP = FourF*((2*B + 4*R)/(64*R^(3)*B^(3)))*(1/RhoFit)*PhiM^(2)*x -
RhoFit*g*x;

    P = P - deltaP;
end;

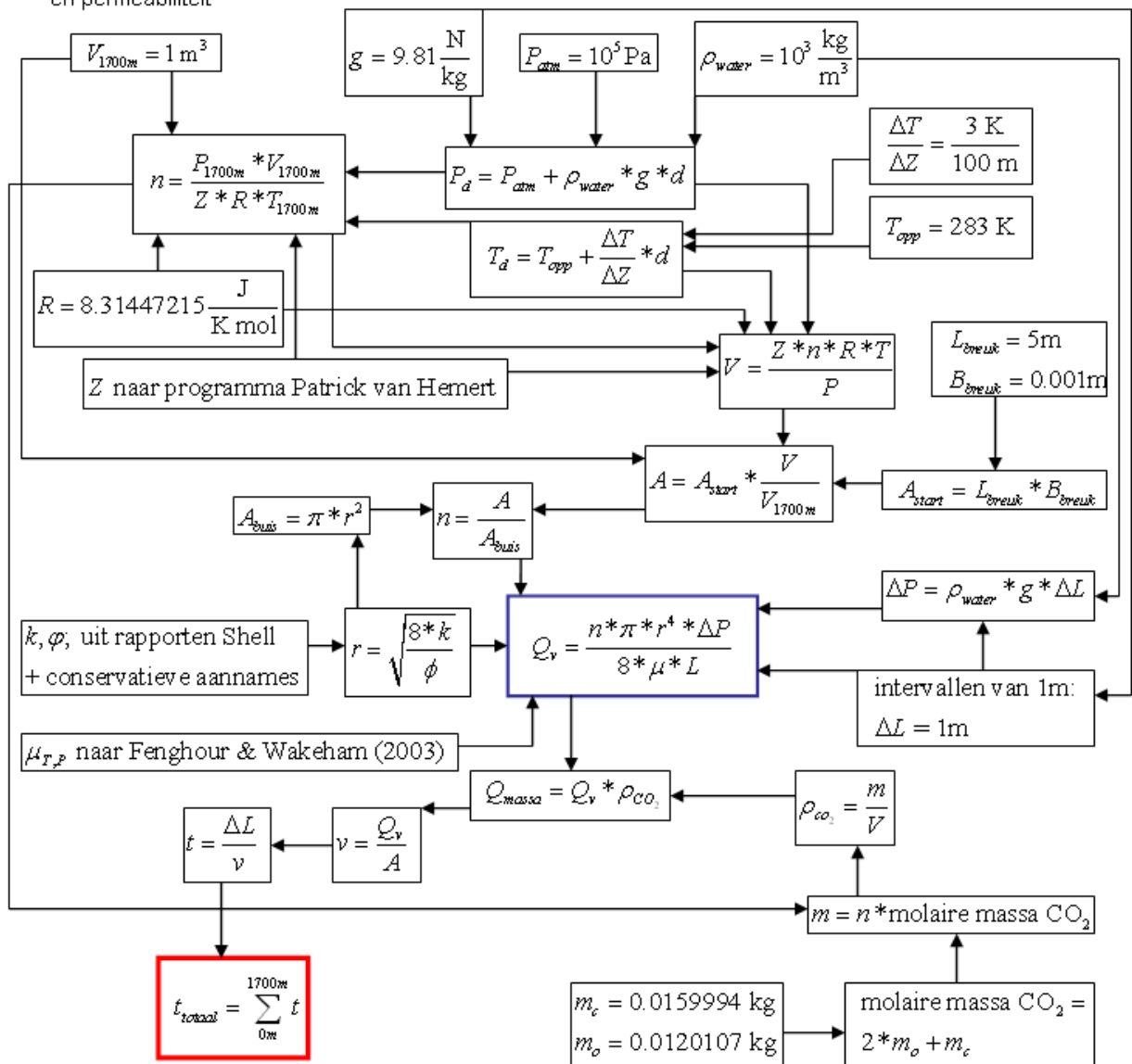
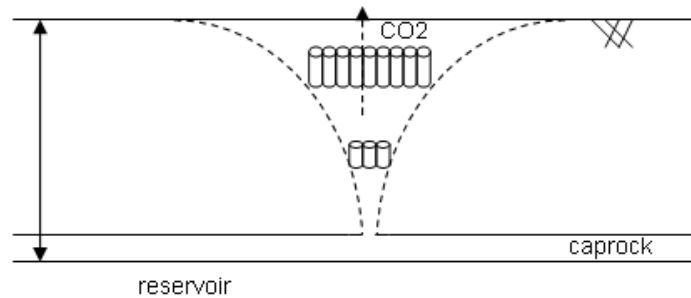
PhiMnieuw = PhiM*((deltaPtotaal)/(Pbegin - P));
Snelheid = (PhiMnieuw/(B*2*R))/polyval(polynoomRho,0);
Volume = PhiMnieuw/polyval(polynoomRho,0);
disp('Massastroom in (kg/s) ='); disp(PhiM);
disp('Massastroom uit (kg/s) ='); disp(PhiMnieuw);
disp('Einddruk na cumulatieve drukval (Pa) ='); disp(P);
disp('Snelheid (m/s) ='); disp(Snelheid)
disp('Volume (m^3/s) ='); disp(Volume)

% Voor laminaire stroming gebruik het onderstaande
% Reynolds check
% % Re = (2*PhiMnieuw)/(B*AvMu);
% disp('Reynolds number =');
% disp(Re);
%
% PhiM = ...;
% for k = 1:n
%     P;
%     x = x + deltaX;
%     DynMuFit = polyval(polynoomDynamicMu,x);
%     RhoFit = polyval(polynoomRho,x);
%     deltaP = ((3)/(2*B*R^(3)))*DynMuFit*PhiM*x - RhoFit*g*x;
%
%     P = P - deltaP;
% end;
% PhiMnieuw = PhiM*((deltaPtotaal)/(Pbegin - P));
% disp('PhiMnieuw =');
% disp(PhiMnieuw);

```


FLOWCHART MODEL 2

- Model 3:
- Breuk van 5m x 1mm in caprock
 - Vrije doorgang door bovenliggende lagen (geen water)
 - Stroming volgens Poiseuille (door buisjes)
 - Straal van buis verschild per laag als functie van de porositeit en permeabiliteit

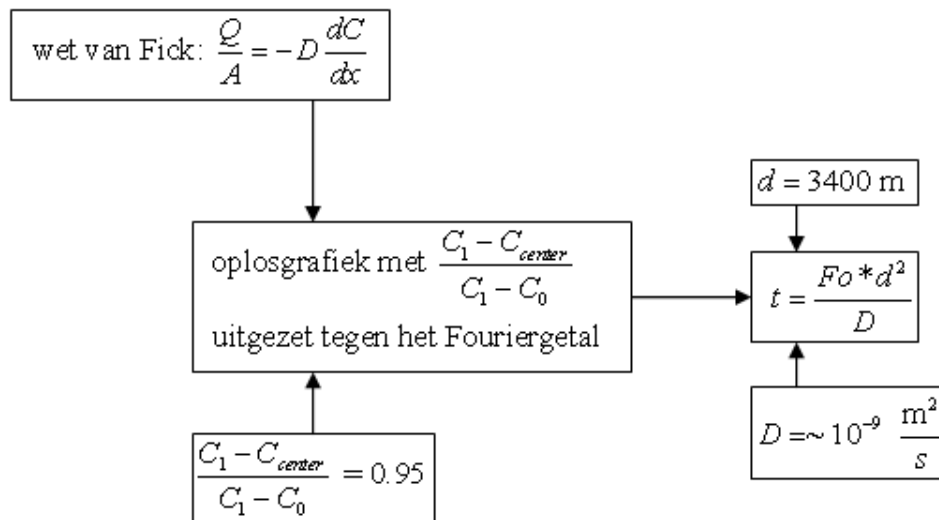
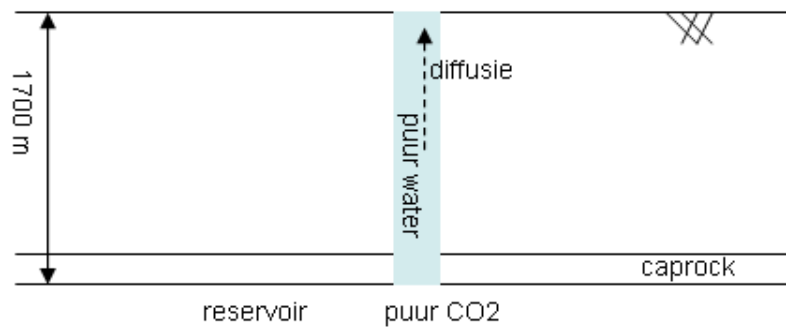


Figuur 20: Flowchart voor model 2.

FLOWCHART MODEL 3

Model 1:

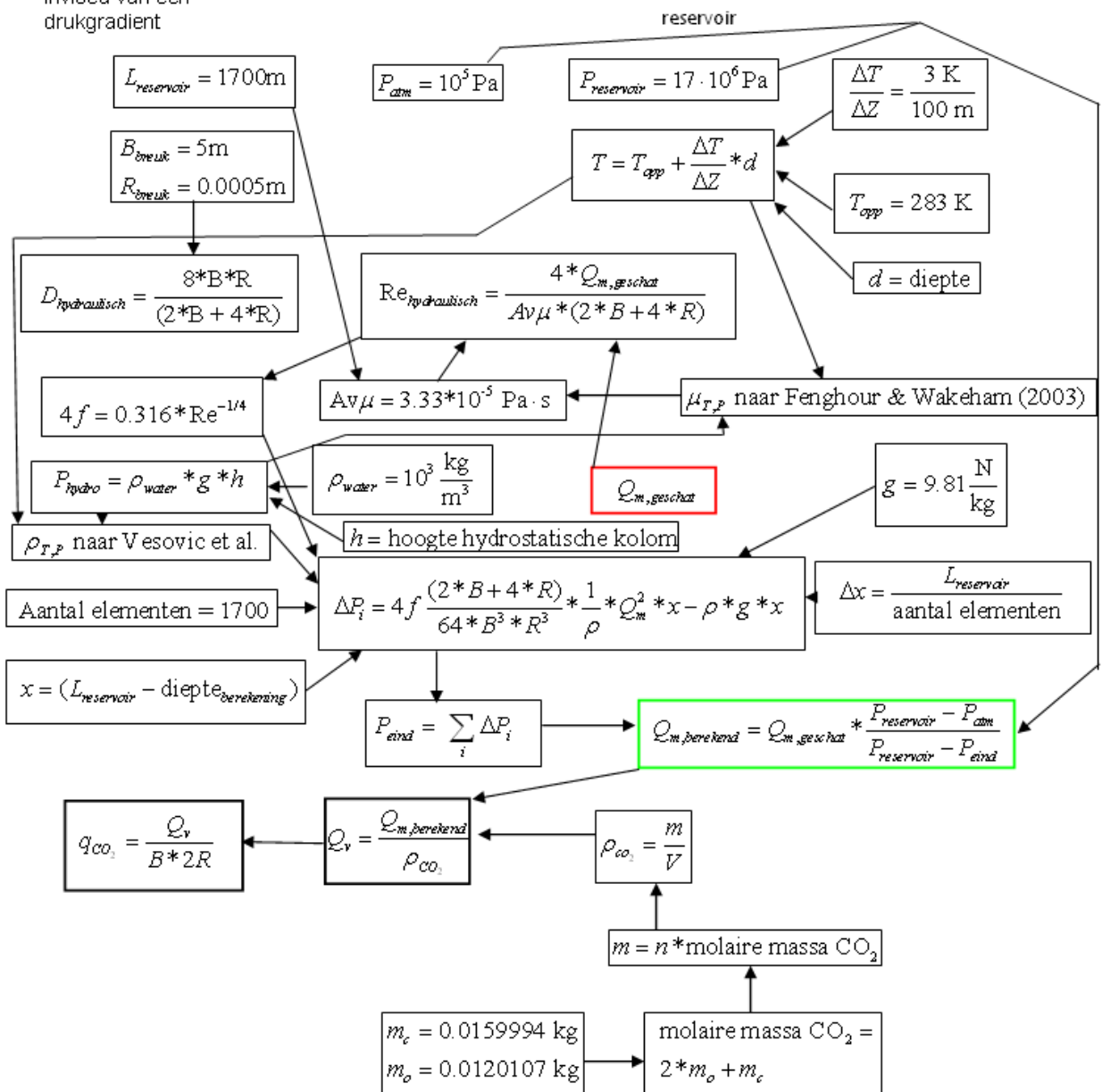
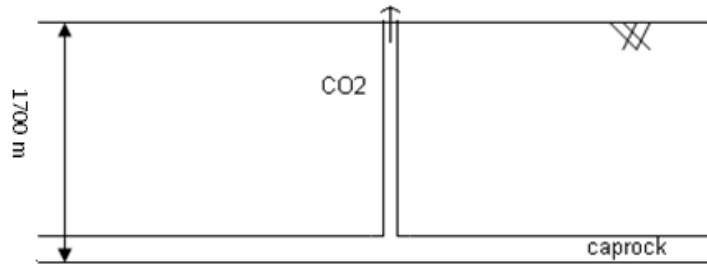
- Rechtstreeks contact puur CO₂ en water op 1700 meter diepte
- Verticale diffusie door een kolom van puur water
- Diffusie volgens diffusievergelijking van Fourier



Figuur 21: Flowchart voor model 3.

FLOWCHART MODEL 4

- Breuk van 5m x 1mm door gehele lagenpakket
- Vrije doorgang door breuk in bovenliggende lagen (geen water)
- CO₂ stroomt naar boven volgens stationaire turbulente stroming onder invloed van een drukgradient



Figuur 22: Flowchart voor model 4.