

De dynamiek van gas

Citation for published version (APA):

Smeulders, D. M. J. (2011). *De dynamiek van gas*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2011

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Intreerede
prof.dr.ir. D.M.J. Smeulders
18 november 2011

A close-up portrait of a man with dark hair and blue eyes, wearing a blue and white striped shirt. The background is a solid light blue. A thin red diagonal line runs from the top left towards the bottom left, passing through the text area.

/ Faculteit Werktuigbouwkunde

TU / **e** Technische Universiteit
Eindhoven
University of Technology

De dynamiek van gas

Where innovation starts

Intreerede prof.dr.ir. D.M.J. Smeulders

De dynamiek van gas

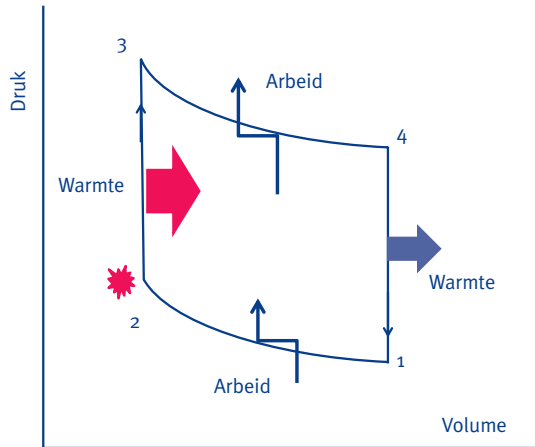
**Uitgesproken op 18 november 2011
aan de Technische Universiteit Eindhoven**

Inleiding

Graag wil ik u informeren over mijn plannen omtrent het onderzoek en onderwijs in het vakgebied 'Engineering Thermodynamics for Energy Systems', maar staat u mij toe eerst het vakgebied zelf nader te duiden. Het woord 'thermodynamica' is afkomstig van de Griekse woorden 'τό θερμόν', dat warmte betekent, en 'ή δύναμις', dat 'kracht', 'macht', of 'vermogen' betekent. 'Warmtekracht' zouden we dus in eerste instantie vertalen. Interessant is te vermelden dat het woord 'dynamica', vanuit het door de Duitse geleerde Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) in 1692 geïntroduceerd begrip 'dynamique', de betekenis 'bewegingsleer' heeft gekregen. Een accurate vertaling zou nu dus zijn: de bewegingsleer van warmte. Het woord 'dynamiek' zoals dat voorkomt in de titel van deze rede, heeft hiermee natuurlijk te maken, zij het dat het woord inmiddels ook een snelle opeenvolging van feiten suggereert, en dat is precies wat we nu waarnemen in de ontwikkelingen van de gasindustrie in Nederland en daarbuiten. Ik zal hier later op terugkomen. Het begrip gasdynamica ten slotte, beschrijft de stroming van samen-drukbare media, bijvoorbeeld in een schokbuis. Ook dit komt later aan de orde.

Een uitermate belangrijk begrip in de thermodynamica is het zogenaamde kring-proces. Ik zal dat introduceren aan de hand van een klassiek energiesysteem, namelijk het kringproces van Otto (figuur 1).

Het kringproces van Otto beschrijft het gedrag van de moderne verbrandingsmotor die u in alle auto's aantreft. Als de zuiger van de cilinder de gassen comprimeert, zal het volume afnemen en de druk toenemen. Denk hierbij aan een fietspomp waarmee u lucht in een band pompt. U pompt echter zo snel dat er geen warmte aan de omgeving kan worden afgestaan: u pompt 'adiabatisch'. Als de zuiger in de bovenste stand is aangekomen zal de bougie het gasmengsel ontsteken en zal de druk flink toenemen. Dit gaat wederom erg snel; zo snel dat het volume nog even constant blijft. We spreken van een 'isochoor' proces. Vervolgens zal de zuiger zich naar beneden bewegen en de wielen in beweging zetten via alweer een adiabatisch proces. Ten slotte gaan de cilinderkleppen open, daalt de druk, stromen de verbrande gassen naar de uitlaat en wordt een vers gasmengsel in de cilinder geïnjecteerd. Hiermee is het kringproces gesloten en is de cilinder klaar voor een volgende slag. Het laatste deel van dit proces vindt in een viertaktmotor overigens



Figuur 1

Het kringproces van Otto beschrijft het gedrag van een verbrandingsmotor. In de compressieslag (1-2) wordt het mengsel gecomprimeerd, vervolgens ontstoken (2-3), waarna de zuiger naar beneden beweegt en arbeid levert (3-4). Ten slotte gaan de cilinderkleppen open, daalt de druk en wordt een nieuw mengsel geïnjecteerd (4-1).

plaats met een extra zuigerslag, maar voor het gemak laten we dat hier even achterwege. U hebt dus gezien dat we warmte aan het systeem toevoeren middels de verbranding van het gasmengsel in de cilinder, en dat de zuiger arbeid verricht op de wielen. U hebt bovendien gezien dat we om het kringproces te sluiten ook zelf arbeid in het zuigersysteem moeten stoppen om het mengsel te comprimeren alvorens te ontbranden en dat we ook zelf warmte afvoeren tijdens het openen van de cilinderkleppen. Deze arbeid en warmte kunnen we dus helaas niet gebruiken om de auto in beweging te zetten, al kunnen we een deel van de warmte nog gebruiken om de cabine te verwarmen en de ruiten te ontdooien. Een ander interessant aspect van het plaatje is dat de geleverde nuttige arbeid wordt weergegeven door het oppervlak binnen de kringloop.

Aan de hand van dit voorbeeld kunnen we nu meteen de twee hoofdwetten van de thermodynamica illustreren. De eerste hoofdwet is de zogenaamde wet van behoud van energie, die aangeeft dat warmte (eigenlijk de chemische energie van de benzine) kan worden omgezet in bewegingsenergie van de auto of in hoogte-energie (potentiële energie) als de auto bijvoorbeeld bergopwaarts rijdt, maar dat deze energie nooit verloren zal gaan; als ik alle energieën bij elkaar optel, komt er steeds weer hetzelfde uit. Overigens kunnen energieën wel degraderen: als we straks al onze fossiele brandstoffen hebben verstoekt, is de aarde wellicht flink

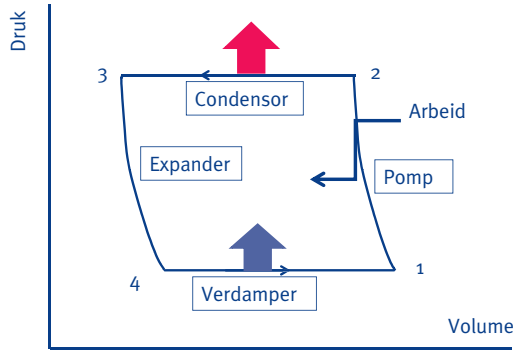
opgewarmd, maar deze warmte is dan natuurlijk niet meer beschikbaar om een auto aan te drijven.

De tweede hoofdwet van de thermodynamica volgens Kelvin-Planck stelt simpelweg dat het rendement van een rechtsdraaiend kringproces altijd kleiner moet zijn dan 100%. Er is dus principieel geen positief werkend kringproces te ontwerpen waarbij alle warmte die ontstaat tijdens het verbranden van de benzine in de cilinders ten goede komt aan het aandrijven van de wielen, zelfs als we alle wrijvingsverliezen zouden kunnen elimineren. Om nog even bij dit voorbeeld te blijven, kunnen we aantonen dat het rendement van het kringproces van Otto uit te drukken is in een eenvoudige formule:

$$\eta = 1 - r^{1-\gamma},$$

waarbij η het rendement voorstelt, r de compressieverhouding van de motor en γ de verhouding van de specifieke warmten van het mengsel. Een moderne automotor heeft een compressieverhouding van ongeveer 9, en de verhouding van de specifieke warmten kunnen we opzoeken in een tabellenboek: 1,4. Invullen in de formule levert dan voor het rendement een waarde van 0,58, dus 58%. Dit betekent dat van elke Joule warmte die we verbranden bijna de helft niet ten goede komt aan het aandrijven van de auto. In de praktijk zal het rendement eerder rond 40% liggen, wegens extra parasitaire effecten zoals wrijving en het niet-ideaal volgen van het kringproces van Otto. U kunt zich voorstellen dat hier nog winst is te behalen. Dit is dan ook precies het doel van het onderzoek van mijn promovendus Ruud Eichhorn die samen met het spin-off bedrijf Progression Industry van Michael Boot binnen het project WEDACS (Waste Energy Driven Air Conditioning System) kijkt of smoorverliezen over de gasklep in het inlaatsysteem van de motor kunnen worden verminderd. In principe komt het erop neer dat de gasklep wordt vervangen door een kleine turbine die stroom kan opwekken voor de elektrische systemen in de auto.

Laten we ook nog eens een meer duurzame toepassing van een kringproces beschouwen in de vorm van de warmtepomp. In feite werkt een warmtepomp precies hetzelfde als de koelkast in uw keuken, zij het dat we nu uw vriesvak vervangen door een koelteservoir, zoals een ondergrondse koele waterlaag of koele buitenlucht, en het rooster aan de achterkant van uw koelkast door verwarmingselementen in een kantoorpand of winkelcentrum. Dit kringproces is getekend in figuur 2. Een belangrijk verschil met het vorige kringproces is dat we nu linksom lopen, tegen de wijzers van de klok in.



Figuur 2

Het kringproces van Carnot beschrijft het gedrag van een (ideale) warmtepomp/koelmachine. In de pomp wordt de damp gecomprimeerd (1-2), die vervolgens condenseert door het afgeven van warmte aan de omgeving (2-3), waarna in de expander de druk adiabatisch daalt (3-4). Tenslotte wordt warmte opgenomen uit het reservoir waarbij de koelvloeistof verdampt (4-1).

In dit geval zal een pomp de koelvloeistof (deels in dampvorm) adiabatisch comprimeren tot een hogere druk. De as van de pomp moet worden aangedreven, wat arbeid kost. In de verwarmingselementen (of het rooster aan de achterzijde van uw koelkast) condenseert damp door nuttige warmte af te geven aan de omgeving. We veronderstellen dat de temperatuur van de omgeving hierbij slechts heel langzaam verandert: een isotherm proces. Vervolgens zal de damp moeten expanderen om het kringproces te kunnen sluiten. In de praktijk gebeurt dit niet adiabatisch maar isenthalpisch door middel van een smoorklep bijvoorbeeld. Ten slotte zal de damp weer worden opgewarmd door isotherm warmte te onttrekken aan het koelteservoir (of uw vriesvak), waarna het proces weer van voren af aan kan beginnen. Hierbij kunnen we de maximale effectiviteit van het proces beschrijven door middel van de zogenaamde werkingsgraad volgens Carnot:

$$\varepsilon_C = \frac{T_1}{T_1 - T_2},$$

waarbij de T_1 en T_2 de temperaturen van het verwarmingselement en van het koelteservoir voorstellen. Wanneer we bijvoorbeeld voor T_1 320 Kelvin invullen (47 graden Celcius ongeveer), en voor T_2 280 Kelvin (ongeveer 7 graden Celcius), vinden we een werkingsgraad van 8. Dit betekent dat voor elke 8 Joule nuttige warmte (de rode pijl in figuur 2) er maar 1 Joule energie nodig is. Deze energie wordt geleverd door de elektriciteitscentrale die zelf bijvoorbeeld een rendement

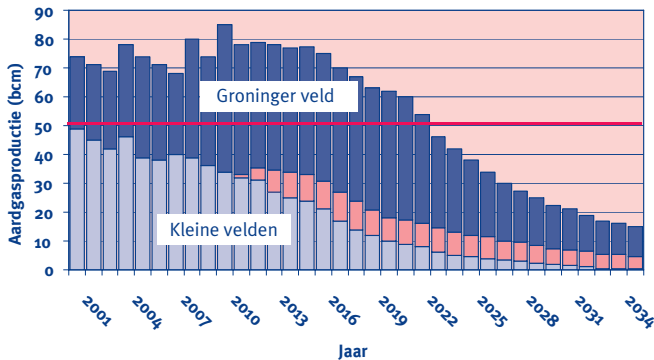
van 50% heeft. We vinden dan uiteindelijk dat elke Joule elektrische energie een warmtetoevoer van maar liefst 4 Joule genereert, wat verklaart dat warmtepompen een belangrijke bijdrage aan een duurzame energievoorziening leveren. Als we dit laatste kringproces ten slotte rechtsom laten lopen en de smookklep vervangen door een (adiabatische) turbine, verkrijgen we een ideaal arbeidsleverend Carnot-proces, waarvan het thermisch rendement wordt gedefinieerd door de vorige formule op zijn kop te zetten:

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Als we de temperatuurverhouding T_1/T_2 opvoeren, zal het rendement dus hoger worden. Dit is de reden dat turbines efficiënter werken bij hoge temperaturen. We komen hier later nog op terug bij de beschrijving van het gebruik van aardwarmte voor de elektriciteitsproductie.

Nederland gasland

Sinds op 22 juli 1959 om vijf over half zeven in de ochtend in de grond onder de akker van boer Boon het Groninger gasveld werd ontdekt, is Nederland een gasland bij uitstek. Het Groninger gasveld bevatte initieel 2875 miljard standaard kubieke meter (billion cubic meters, bcm) en is daarmee een van de grootste ter wereld (TNO 2011). Later zijn nog ongeveer 235 kleinere terreitere en offshore gasvelden in productie genomen die maken dat Nederland momenteel de negende gasproducent ter wereld is, nog vóór bijvoorbeeld Saoedi-Arabië. De raming van de Nederlandse aardgasvoorraad per 1 januari 2010 bedraagt 1304 bcm (TNO 2011). Figuur 3 geeft een overzicht van de jaarlijkse gasproductie in Nederland over de afgelopen jaren en een verwachting voor de komende jaren.



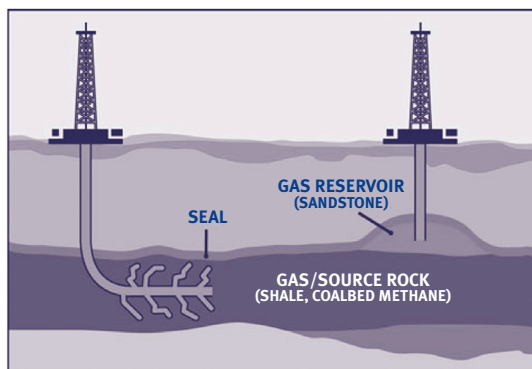
Figuur 3

Gasproductie in Nederland uit het Groninger gasveld en de kleinere velden vanaf 2001 en de prognose tot 2035. De vlakjes in het midden geven de nog te ontdekken velden aan. Verwacht wordt dat Nederland in 2022 niet meer voldoende zal produceren voor de binnenlandse vraag (50 bcm).

We zien dat er jaarlijks ongeveer 75-80 bcm wordt geproduceerd, zodat de Nederlandse velden bij gelijkblijvende productie over 17 jaar leeg zouden zijn. Doordat de druk in de gasvelden daalt, zal het echter onmogelijk zijn de huidige jaarproductie te handhaven. Die zal dan ook geleidelijk teruglopen zoals in figuur 3 te zien is.

De verwachting is dat in 2022 Nederland niet meer voldoende gas kan produceren om aan de binnenlandse vraag te voldoen. Dit zal een aanzienlijke consequentie

hebben voor de Nederlandse schatkist. Aan omzetbelasting, licenties, participaties en heffingen heeft de Nederlandse staat de afgelopen 50 jaar ongeveer 220 miljard euro binnengehaald. Nederland heeft ervoor gekozen om deze inkomsten in de reguliere begroting op te nemen en niet (deels) apart te zetten. Ter vergelijking: in Noorwegen, waar men een andere keuze heeft gemaakt betreffende de olie-inkomsten, heeft het Global Government Pension Fund inmiddels 571,5 miljard dollar in kas (NRC 27 september 2011). In de laatste rijksbegroting wordt voorzien dat de aardgasbaten voor 2012 12,1 miljard euro zullen bedragen, zijnde 5% van de begrote inkomsten van 244 miljard euro. Miljarden euro's zijn inmiddels geïnvesteerd in een fijnmazig gasnet om aardgas te distribueren voor industrie en huishouden, en veel kennis en kunde is opgebouwd in instituten en bedrijven zoals TNO, Energiebeheer Nederland (EBN), NAM en GasTerra. Het is daarom te begrijpen dat Nederland alles op alles zet om deze vooraanstaande status binnen de gaswereld te prolongeren. Drie opties hiervoor zal ik aan de orde laten komen. Heel actueel op het moment is het zogenaamde onconventionele aardgas, ook wel schaliegas of leisteengas genoemd. Het verschil met gewoon aardgas is dat het niet kan stromen. Gewoon aardgas is de loop van miljoenen jaren ontstaan en door aardlagen omhoog gemigreerd naar een poreus reservoir waaruit het niet kan ontsnappen, omdat het afgedekt wordt door een ondoorringbare aardlaag. Dit reservoir is te beschouwen als een uitgedroogde harde spons waar in de poriën het gas onder hoge druk is opgeslagen (zie figuur 4). Als we een dergelijk reservoir ontdekken kunnen we de afsluitende aardlaag doorboren net alsof we een ballon lekprikken. Het gas zal door de poriën van het reservoir naar de productieput stromen en gewonnen kunnen worden.



Figuur 4

De productie van conventioneel aardgas (rechts) en leisteengas (links). Conventioneel aardgas wordt gewonnen uit een permeabel reservoir waarin het gas onder hoge druk is aangetroffen. Leisteengas kan alleen stromen nadat een netwerk van scheuren het gas verbindt met de productieput.

Het leisteengas heeft deze migratiefase niet meegemaakt, omdat de aardlagen waarin het is ontstaan te compact zijn, waardoor het gas daar nog steeds zit opgesloten. Het idee is nu dat we deze aardlagen minder compact kunnen maken door er een netwerk van scheurtjes in aan te brengen, zodat het aardgas wel gewonnen kan worden: we kraken de noot om de vrucht te winnen. Het aanbrengen van een netwerk van scheurtjes in een aardlaag is een bekende techniek in de olie-industrie. Onder hoge druk wordt water in het gesteente geïnjecteerd zodat het gaat scheuren. Om te voorkomen dat de scheur zich weer sluit als we ophouden met pompen, worden kleine zandkorrels met de vloeistof mee geïnjecteerd. Deze korrels nestelen zich in de openstaande scheur en dienen als kleine wiggetjes om de kanaaltjes open te houden, waarna de olie of het aardgas gewonnen kan worden. Naar deze methode is in Nederland veel onderzoek gedaan, onder andere aan de Technische Universiteit Delft, waar een unieke opstelling staat om deze scheurvorming in het laboratorium te onderzoeken (Meng & de Pater 2011). Het aanbrengen van een fijnmazig netwerk in een anders ondoordringbare laag heet in het Engels ‘fracturing’. Toepassing van dit scheurvormingsproces heeft in de Verenigde Staten geleid tot een enorme toename van de gasproductie, zodat het land inmiddels de grootste gasproducent ter wereld is geworden. Zoals u weet wordt momenteel door het bedrijf Cuadrilla Resources onderzocht of het mogelijk is ook in Nederland leisteengas te winnen. Het bedrijf is momenteel al actief in Engeland in de Bowland shale bij Blackpool. Nadeel van de onconventionele winningsmethode is dat er veel meer putten geboord moeten worden dan voor een conventioneel aardgasveld en het is dus de vraag of deze techniek in Nederland rendabel kan worden toegepast. Bovendien lopen het schattingen omtrent de hoeveelheid leisteengas enorm uiteen: van 48.000 tot 230.000 bcm (TNO 2009), in het slechtste geval toch nog zo’n 16 keer het Groningen gasveld. Het is om deze reden dat het van het grootste belang is dat de Nederlandse universiteiten samen met het bedrijfsleven en de Nederlandse overheid een onderzoeksprogramma opzetten om dit potentieel verder te onderzoeken. In Delft is inmiddels het Unconventional Gas Research Initiative (UGRI) onder leiding van Ruud Weijermars tot stand gekomen, maar ik vind het belangrijk om tot een alomvattend Nederlands programma te komen. Zodoende is recentelijk een programmavoorstel opgesteld waarin onderzoekers van Eindhoven, Delft, Twente en Utrecht samen met partners uit het bedrijfsleven participeren in de volgende onderzoekslijnen:

1. Het aantonen van leisteengas. We ontwikkelen geofysische technieken om leisteengas op te sporen en methoden om de leisteenlaag te karakteriseren.
2. Het scheuren ('fraccen') van de leisteenlaag. We onderzoeken het scheurvormingsproces en de mogelijkheid om dit proces te kunnen volgen en beïnvloeden.
3. Het winnen van het leisteengas. We bestuderen het gedrag van de injectievloeistof en het geproduceerde gas in de nauwe stromingskanaaltjes. Een complicerende factor hierbij is natuurlijk de aanwezigheid van korreltjes in de injectievloeistof, die op de juiste plek terecht moeten komen.

De leidraad bij al deze leisteenprojecten moet het minimaliseren van de milieubelasting zijn. Zo worden bij het kraken miljoenen liters water geïnjecteerd op verschillende plekken in de leisteenlaag. Als vooraf beter is vast te stellen waar het gas zich precies bevindt, kan dit verbruik drastisch worden gereduceerd. Er kan bijvoorbeeld ook gedacht worden aan het gebruik van CO₂ bij het scheurvormingsproces, in plaats van water. Ook zal onderzocht moeten worden in hoeverre het scheuren van de leisteenlaag trillingen gaat veroorzaken die mogelijk schade aan het oppervlak kunnen aanrichten. Anderzijds zijn deze trillingen ook een waardevolle informatiebron om de scheurgroei te kunnen volgen. Met behulp van gevoelige geofoons worden de trillingen geregistreerd en kan worden gemeten waar de scheur zich precies bevindt.

We maken wederom een uitstapje naar een duurzame energievoorziening. Een belangrijke bijdrage aan de duurzame energievoorziening zou geleverd kunnen worden door aardwarmte. Aardwarmteprojecten kunnen worden onderscheiden in drie categorieën. Allereerst bestaan er de traditionele WKO-systemen (Warmte en Koude Opslag), waarbij in de zomer koel grondwater van rond de 7 graden Celcius van een diepte van 20 tot 300 meter onder het maaiveld wordt onttrokken en opgewarmd grondwater (van 20 graden Celcius ongeveer) na gebruik terug in de bodem wordt geïnfiltrerd. In de winter wordt de circulatierichting omgedraaid. Hierbij is dus sprake van een verplaatsing van grondwater. Het meest voorkomende systeem is het doubletsysteem waarbij de warmte en de koude in twee aparte bronnen op afstand worden opgeslagen. Vaak worden WKO-systemen gecombineerd met de eerder besproken warmtepomp.

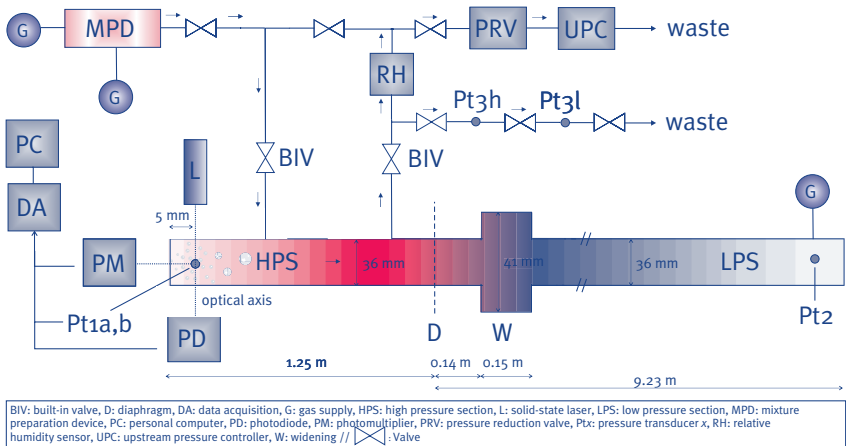
Als we dieper de aarde ingaan, zullen we hogere temperaturen aantreffen door radioactieve vervalprocessen in de aardmantel en aardkern, en door de restwarmte die aanwezig is uit de tijd dat de aarde ontstond. De geothermische gradiënt bedraagt ongeveer 20-30 graden per kilometer, afhankelijk van de geologische situatie. Als we dus op 2 kilometer diepte een waterlaag aantreffen in een poreus gesteente, zal het water daar een temperatuur hebben tot 80 graden

Celcius. Door het boren van een productieput kan dit warme water worden gewonnen en gebruikt voor het opwarmen van gebouwen en fabrieken. Het afgekoelde water wordt dan weer geïnfiltrerd in de waterlaag op een flinke afstand van de productieput. Hiervoor is een tweede put, de injectieput benodigd. Uiteindelijk zal het koelere water natuurlijk bij de productieput aankomen, zodat er geen warm water meer gewonnen kan worden en de levensduur van het project is beëindigd. Dit kan enkele tientallen jaren duren. In Nederland zijn inmiddels enkele van deze aardwarmteprojecten operationeel, vooral bij glastuinders en voor stadsverwarming (aardwarmte Den Haag bijvoorbeeld). Een voortrekkersrol in de ontwikkeling van dergelijke systemen is weggelegd voor het Delft Aardwarmte Project (DAP), waar enkele studenten een diepe boring op of nabij het universiteitsterrein willen gaan uitvoeren. Als we tenslotte nog dieper afdalen tot een kilometer of 5, zullen we temperaturen van ver boven de 100 graden Celcius aantreffen. Hier is echter over het algemeen geen water meer te vinden wegens de hoge compactiegraad van het gesteente; er zijn eenvoudigweg geen poriën meer te vinden. Dit gesteente wordt dan ook vaak 'Hot Dry Rock' (HDR) genoemd. Door middel van het eerder besproken 'kraken' van het gesteente kan er echter een ondergrondse warmtewisselaar worden gemaakt: een netwerk van kanaaltjes in het hete graniet, waar we vloeistof doorheen kunnen pompen. Omdat deze vloeistof wordt opgewarmd tot relatief hoge temperaturen kan hij nu gebruikt worden om via een turbine elektriciteit op te wekken. Dit opwekkingsproces kan ook als kringproces worden beschreven en is efficiënter bij hoge temperaturen. Toepassingen van deze zogenaamde Enhanced Geothermal Systems (EGS) vinden we bijvoorbeeld in Soultz-sous-Forêts in Frankrijk (www.soultz.net), dichtbij de Rijn ter hoogte van Karlsruhe. Opvallend is dat precies dezelfde techniek ('fraccen'), die worden verguisd als het gaat om het winnen van onconventioneel gas, kan worden ingezet voor een duurzame vorm van energiewinning. Het is dus van het grootste belang deze techniek verder zorgvuldig te onderzoeken, zodat een onderbouwde afweging gemaakt kan worden omtrent de inzetbaarheid ervan.

Vloeibaar gas

Gewonnen aardgas zal vanaf de put naar de gebruiker getransporteerd moeten worden. Een voor de hand liggende methode is het transport via pijpleidingen. Pijpleidingen zijn echter kostbaar en vergroten onze afhankelijkheid van de landen die het gas doorvoeren (transitlanden). Zo leidde een stremming in de pijpleiding in Oekraïne wegens politieke problemen met Rusland enige jaren geleden tot een acuut gastekort in West-Europa. Om deze afhankelijkheid te verminderen is op 25 augustus 2011 de eerste (van twee) Nord Stream-pijpleidingen in gebruik genomen, die Russisch aardgas rechtstreeks vanuit de baai van Portovaya (Siberië) via de Baltische zee naar Greifswald in Duitsland pompt. De capaciteit van deze pijpleiding is 27,5 bcm per jaar, wat verdubbeld zal worden als eind 2012 naar verwachting ook de tweede pijpleiding klaar is. Dat betekent dat tegen die tijd de totale Nederlandse gasconsumptie (50 bcm) door de Nord Stream-leidingen zou kunnen worden aangevoerd. Ook bestaan er leidingen vanuit Noorwegen naar Nederland en vanuit Nederland naar Engeland. Voor offshore productie is de situatie echter ingewikkelder, omdat er meestal geen pijpleidingen van het productieplatform naar het vasteland aangelegd kunnen worden. Om deze reden werd offshore gewonnen gas als bijproduct van aardolie vaak afgefakkeld (verbrand). Aardolie heeft als enorm voordeel dat het eenvoudig met olietankers getransporteerd kan worden. Als we aardgas echter afkoelen tot min 162 graden wordt het ook vloeibaar en wordt het volume 600 keer verkleind zodat het als 'Liquified Natural Gas' (LNG) in schepen uitgerust met thermoskanachtige opslagfaciliteiten, vervoerd kan worden. Verwacht wordt dat de productie en het vervoer van LNG in de komende jaren aanzienlijk zal toenemen, zodat het voor Nederland van groot strategisch belang is hierin te participeren. Hiervoor is recentelijk door de industrie (Gasunie, Vopak, VSL, Shell, SBM, Stork, Imtech, Bluewater) en TNO het 'LNG Test and Technology Centre' (LNG TTC) consortium opgericht, met als doel het LNG-gerelateerd onderzoek en onderzoek naar cryogene processen binnen Nederland te bundelen en uit te breiden. Het initiatief sluit aan bij de ambities die Nederland heeft op het gebied van de Gasrotonde binnen Noordwest Europa. Ook zal er een testfaciliteit worden gebouwd, waarbij als potentiële locatie wordt gedacht aan de 'Peak Shaving Plant' van de Gasunie op de Maasvlakte, waar men al de beschikking heeft over LNG-opslagfaciliteiten.

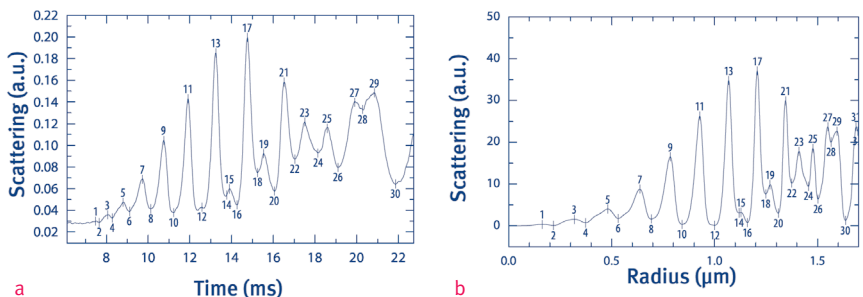
De productie van LNG vindt plaats in verschillende stappen waarin verontreinigingen uit het aardgas verwijderd moeten worden. Deze verontreinigingen (water, koolstofdioxide en waterstofsulfide onder andere) worden onder atmosferische omstandigheden verwijderd voordat het gas kan worden afgekoeld. De verontreinigingen moeten eruit worden gehaald om te voldoen aan internationale kwaliteitsafspraken over de samenstelling van het gas. Maar ook om bij het afkoelen van het aardgas verontreiniging en verstopping van de koelapparatuur te voorkomen, aangezien de verontreinigingen dan gaan condenseren of kristalliseren. Om de verontreinigingen uit het aardgas te halen, zijn grote en complexe installaties benodigd waarbij chemicaliën worden gebruikt om de verontreinigingen te binden. Deze installaties vergen onderhoud, zijn kostbaar, vertragen het productieproces, en zijn moeilijk kleinschalig te implementeren (bijvoorbeeld op offshore productieplatforms). Binnen mijn groep zoeken we daarom samen met de groep van professor J.J.H. Brouwers naar nieuwe en eenvoudiger technieken om verontreinigingen uit aardgas te verwijderen. Hiervoor moet natuurlijk het gedrag van dergelijke verontreinigingen bij afkoeling onderzocht worden. Een elegante techniek om dit gedrag te onderzoeken, maakt gebruik van een zogenaamde schokbuis of pulsexpansiebuis (zie figuur 5). In een lange buis wordt een schokgolf gemaakt door een scheidingsmembraan tussen een hoge druk links van het membraan en een lage druk rechts ervan, plotseling te verwijderen.



Figuur 5

Pulsexpansiebuis. De hoge druk (HPS) en de lage druk (LPS) zijn van elkaar gescheiden door middel van een dun membraan (D). De laserstraal uit laser L wordt verzwaakt en afgebogen door de druppelwolk in het meetgedeelte (HPS). Een fotodiode PD meet het verzwakte licht en een fotomultiplier PM meet het afgebogen licht. Uit deze metingen kunnen druppelgrootte en concentratie worden bepaald, als functie van de tijd.

Dit gebeurt door middel van een stroomstoot die de randen van het membraan doet smelten. Als gevolg hiervan zal er een schokgolf naar rechts de buis inlopen met een snelheid groter dan die van het geluid. Naar links echter, zal het aanwezige gas plotseling expanderen, wat betekent dat zowel de druk als de temperatuur plotseling zullen dalen. Als er bijvoorbeeld waterdampverontreiniging in de lucht aanwezig is, zal deze onder bepaalde experimentele omstandigheden ineens worden afgekoeld tot wel 70 graden onder nul. Het spreekt voor zich dat deze damp wil gaan condenseren en wellicht daarna ook nog eens gaat bevriezen. Er zullen kleine waterdruppeltjes ontstaan (nucleatie), die snel gaan groeien doordat ze extra water uit de dampfase zullen opnemen. Als de druppeltjes enkele tienden micrometers groot zijn, kunnen ze worden waargenomen doordat een invallende laserbundel wordt verzwakt (extinctie) en afgebogen. Dit kan met behulp van lichtdetectieapparatuur gemeten worden. Een voorbeeld van een experimenteel gemeten signaal in de groep van professor M.E.H. van Dongen is weergegeven in figuur 6a. Hierbij is de lichtsterkte van de bundel die over 90 graden wordt afgebogen, uitgezet tegen de meettijd in milliseconden. De fotomultiplier meet een karakteristiek patroon van pieken en dalen, dat wordt veroorzaakt door het groeiende waterdruppeltje. De pieken en dalen vinden hun oorsprong in de interferentie van de laserbundel met het druppeltje. Het patroon kan ook worden voorspeld, namelijk met de zogenaamde Mie-theorie zoals weergegeven in figuur 6b. We zien dat ook hier het patroon identiek terugkeert, zij het dit keer als een functie van de druppelstraal. Door nu experiment en theorie met elkaar te vergelijken, kan eenvoudig de groei van het druppeltje als functie van de meettijd worden gereconstrueerd. Omdat we tegelijkertijd ook nog een extinctiemeting uitvoeren aan het laser-sig-naal, kunnen we ook de concentratie van de druppeltjes bepalen. Als het goed



Figuur 6 a b
Gemeten (a) en theoretisch (b) laserlichtsignaal dat over een hoek van 90 graden door een waterdruppeltje in helium wordt afgebogen. Een karakteristiek signaal van pieken en dalen beschrijft de interferentie van het laserlicht met het waterdruppeltje. Door experiment en theorie met elkaar te vergelijken wordt de groei van het druppeltje in de tijd gemeten (afstudeerverslag V. Holten, experiment 46).

is zal deze concentratie niet veranderen in de tijd, omdat de druppeltjes weliswaar zullen groeien, maar constant in aantal zullen blijven. We merken op dat het kleinste druppeltje dat op deze manier met deze laser kan worden waargenomen, een straal heeft van ongeveer 0,2 micrometer. Als we nu weten wanneer en hoe dergelijke deeltjes condenseren en groeien, kunnen we een scheidingsapparaat ontwerpen dat de gecondenseerde deeltjes afvoert naar de wand van een pijp bijvoorbeeld, terwijl de aldus gereinigde gasstroom door de pijp verder wordt getransporteerd. We zouden dit een drukdistillator kunnen noemen, omdat het distillatieproces hier niet plaatsvindt in een vanuit de scheikunde bekende distillatiekolf, maar doordat de faseovergang hier wordt geïnduceerd door een plotse dalende druk en temperatuur. Dit principe ligt ten grondslag aan de door professor J.J.H. Brouwers ontwikkelde Rotational Particle Separator (RPS), waarbij de gecondenseerde deeltjes door een centrifuge uit de gasstroom worden geslingerd en afgevoerd. Een andere mogelijkheid is om de gasstroom zelf te laten wervelen door aan de binnenzijde van de pijp vaantjes aan te brengen, waardoor bij hoge snelheid de lucht in rotatie wordt gebracht en een cycloonstroming wordt opgewekt. Dit principe ligt ten grondslag aan het Twister-apparaat dat momenteel op enkele plaatsen in de wereld wordt toegepast bij offshore gaswinning. De uitdaging is gelegen in de verdere ontwikkeling van deze apparaten zodat in zeer korte tijd grote hoeveelheden gas gereinigd kunnen worden met minimale drukverliezen. Omdat door de korte verblijftijd in het apparaat de druppels klein zullen blijven (1-10 micrometer), zijn de uitkomsten van ons nucleatieonderzoek dat zich immers richt op dergelijk kleine deeltjes, bij uitstek richtinggevend voor de verdere ontwikkeling van grootschalige scheidingsapparatuur.

CO₂ terug naar zee

Scheidingstechnologie is ook van groot belang bij het afvangen van CO₂ uit de rookgassen van elektriciteitscentrales, hoogovens en raffinaderijen (de zogenaamde 'post combustion capture') om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. Europa heeft ingezet op een 80% reductie van broeikasgassen per 2020 ten opzichte van de hoeveelheid die in 1990 werd uitgestoten. Ondanks energiebesparende maatregelen, verbeterde rendementen van apparatuur en gebruik van alternatieve energiebronnen, ziet het er naar uit dat deze doelstellingen niet zullen worden gehaald. Een alternatieve methode is daarom het teveel geproduceerde CO₂ eenvoudigweg uit de lucht te halen en op te slaan (CO₂ capture and storage, CCS). Dit brengt natuurlijk twee problemen met zich mee: (1) hoe halen we CO₂ zo efficiënt mogelijk uit de lucht zonder daarbij apparaten te gebruiken die weer nieuwe broeikasgassen produceren, en (2) waar slaan we afgevangen CO₂ dan weer op? Voor wat betreft de eerste vraag ligt het natuurlijk voor de hand de afvang te concentreren bij de bron waar de CO₂ is geproduceerd: centrales, hoogovens en raffinaderijen. In de huidige methoden wordt het CO₂ in het rookgas met een chemische reactie gebonden aan het vloeibare mono-ethanolamine (MEA), waarvan het onder verhitting in een tweede processtap weer wordt gescheiden. Huidige proefinstallaties leggen ongeveer 250 kilo CO₂ per uur vast, maar voor realistische commerciële toepassingen is nog minstens een opschaling met een factor 30 benodigd. Een ander probleem bij deze scheikunde is dat de tweede processtap waarin het MEA wordt geregenereerd, zeer veel energie vergt. Het rendement van bijvoorbeeld een kolencentrale zou hierdoor met enkele procenten afnemen tot een onaanvaardbaar laag niveau. Het inzetten van fysische scheidingstechnologie op basis van de eerder besproken drukdistillatie (afkoelen door een drukdaling en daarna het condensaat scheiden door middel van centrifugale krachten) is dus ook hier een aantrekkelijk alternatief. Het probleem blijft daarna natuurlijk wat te doen met het afgevangen CO₂.

Zoals bekend is in Nederland besloten het afgevangen CO₂ niet op te slaan op land na protesten van bewoners in Barendrecht en Groningen. Een alternatief is het injecteren en opslaan van CO₂ in lege gasvelden op de Noordzee. Sinds 2004 werkt TNO samen met Gaz de France aan een gesubsidieerd demonstratieproject waarbij aardgas met een hoog CO₂-gehalte uit het K12-B-veld 100 kilometer ten

noordwesten van Den Helder de bodem in teruggepompt wordt. Dit verloopt tot op heden probleemloos. Bij grootschaliger toepassing zou ook op het vasteland afgevangen CO₂ opgeslagen kunnen worden in de zeebodem. Ook hier moeten dan schepen worden ingezet voor het transport. Dit keer niet om het aardgas vanaf het productieplatform te vervoeren naar de afnemers aan wal, maar om het restproduct - CO₂ - terug te brengen naar het platform, waar het wordt opgeborgen in een inmiddels leeg gasreservoir onder de zeebodem. De Rotterdamse rederij Anthony Veder heeft al sinds 1999 de Coral Carbonic in de vaart die vloeibaar CO₂ transporteert bij min 50 graden Celcius en een druk van 8 bar. Bij het afkoelen van CO₂ zal het nog aanwezige restwater kunnen gaan condenseren, hetgeen corrosie van pijpsystemen en opslagtanks kan veroorzaken. Ook bij het werken met CO₂/H₂O-systemen is dus een nauwkeurige kennis van het condensatiegedrag van de aanwezige waterdamp van het grootste belang, en is onderzoek met behulp van de eerder beschreven pulsexpansiebuis een aantrekkelijke optie. Een meer speculatieve toepassing is het gebruik van CO₂ voor het eerder geschetste kraken van de aardlagen om onconventioneel gas te winnen of om een aardwarmtecentrale te ontwikkelen. Ook bij deze toepassing wordt het gas in de aarde geïnjecteerd op een diepte van 3-5 kilometer bij temperaturen en drukken waarbij CO₂ superkritisch wordt: het is dan gas noch vloeistof. Verwacht wordt dat het gemakkelijk in het gesteente zal doordringen wegens de lage viscositeit van superkritisch CO₂. Een belangrijk voordeel van het gebruik van superkritisch CO₂ is, naast het feit dat we een broeikasgas onttrekken aan de atmosfeer, dat we geen water hoeven te gebruiken. Het aanleggen van een scheurnetwerk vergt miljoenen liters water die in de grond moeten worden geïnjecteerd, hetgeen zeker in droge gebieden in de wereld onacceptabel is.

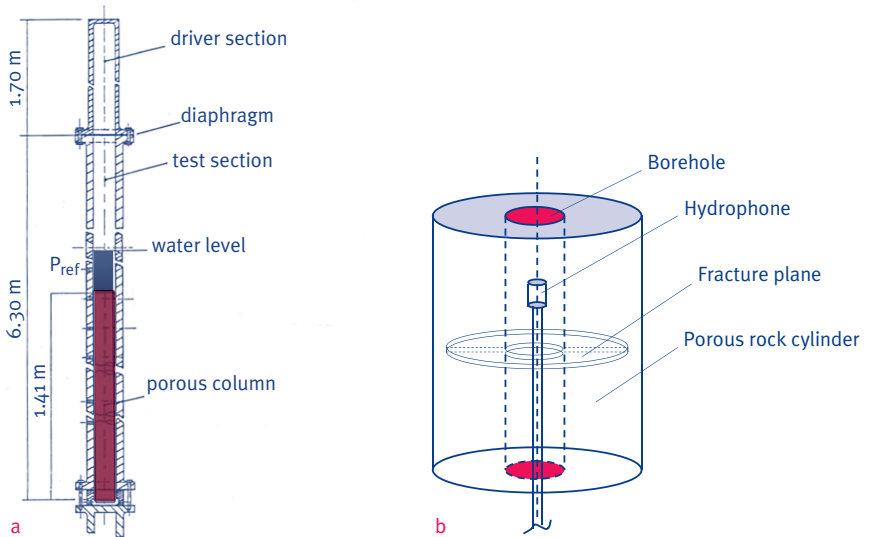
Voor alle bovenvermelde scheidingstoepassingen is een voortdurende onderzoekinspanning noodzakelijk omtrent nucleatie en condensatie binnen verschillende gasmengsels. Als dit proces namelijk bekend is, kan een efficiënte scheiding door middel van centrifugale krachten worden ontworpen, omdat nu immers de druppelgrootte en concentratie bekend is bij gegeven procescondities. Dat is dan ook precies het onderzoek dat door mijn promovendus Maurice Fransen in de eerder genoemde pulsexpansiebuis zal worden uitgevoerd. Doordat het gasmengsel door een plotselinge druk- en temperatuurdaling uit zijn thermodynamisch evenwicht wordt gebracht, zal het daarop reageren met condensaatvorming in een poging een nieuwe evenwichtssituatie te bereiken. Door extrapolatie kan zelfs de druppelvorming ab initio worden onderzocht, en kunnen uitspraken worden gedaan over de hoeveelheid verschillende moleculen binnen het kritische dampcluster (Holten 2009). Dit brengt mij dan weer bij een geheel andere toepassing

van de schokbuis, namelijk die waarbij met behulp van schokgolven de aanwezigheid van scheurtjes in de ondergrond kan worden opgespoord.

Van scheuren en geluid

Geluid en onderaardse scheurvorming hangen nauw met elkaar samen. Allereerst zal een zich voortbewegende scheur in de ondergrond een zekere mate van geluid produceren. Dit zal weliswaar niet veel zijn, maar onze gevoelige geofoons zijn zeker in staat om dit te detecteren en te lokaliseren. U moet zich voorstellen dat het geluid van een kleine explosieve lading aan de oppervlakte van de aarde in staat is enkele kilometers diep de aarde in te reizen, daar te reflecteren aan overgangen naar nieuwe aardlagen, en vervolgens weer terug te reizen naar het oppervlak. De zogenaamde microseismische activiteit die wordt veroorzaakt door onderaardse werking en scheurvorming is een belangrijke bron van informatie tijdens het aanbrengen van een netwerk van scheurtjes in de ondergrond. Onderzoek heeft ook aangetoond dat de oriëntatie van een geïnduceerde scheur sterk beïnvloed wordt door de al aanwezige scheuren. Van nature is een aardlaag namelijk verre van homogeen en scheurtjes, scheuren en afschuifzones zijn alomtegenwoordig. Niet alleen vanaf het aardoppervlak kan de aarde onderzocht worden maar door het boren van exploratieputten dringen we door in het inwendige van de aarde om structuren en eigenschappen te onderzoeken. Ook hierbij worden akoestische apparaten gebruikt: een kabel met daaraan een geluidsbron en een 'microfoon' op enige afstand worden in het gat neergelaten tot enkele kilometers diepte. Hierbij zullen druk en temperatuur snel oplopen; we herinneren ons de eerder genoemde geothermische gradiënt. Ook moet vermeld worden dat het geboorde gat niet leeg zal zijn. Het staat vol met de boorspoeling die we hebben gebruikt tijdens het boren van de put om de beitels te koelen, om het gruis af te voeren en ook om te zorgen dat de put stabiel blijft. We moeten er namelijk voor zorgen dat de druk in de put altijd hoger blijft dan die in het omringende gesteente om het risico van een 'blow-out', zoals bij het recente ongeluk met de Macondo boorput in de golf van Mexico, te vermijden. De diameter van een boorput ligt rond de 20 centimeter, hetgeen over een diepte van 5 kilometer neerkomt op het leegzuigen van de kelder van een flatgebouw met een rietje vanaf het dak. Bovendien moet dat rietje dan ook nog eens precies op de juiste plek in de kelder uitkomen, wat de precisie van het toegepaste boorproces redelijk accuraat weer geeft. In het laboratorium gebruiken we binnen mijn groep een verticale schokbuis om onderzoek te doen naar geluidsvoortplanting in een boorgat, en dan met name naar een boorgat dat wordt doorsneden door een scheurvlak. Als we kunnen

voorspellen hoe geluid zich gedraagt als het een scheur tegenkomt in de ondergrond, kunnen we de initieel aanwezig scheurnetwerken vastleggen en daar ons nieuw te ontwerpen scheurnetwerk op aanpassen. Tenslotte hoeven we niet alles opnieuw te kraken als er al een bruikbaar netwerk aanwezig is. De akoestische meting in een boorput wordt nagebootst in onze verticale schokbuis (zie figuur 7a).



Figuur 7

Verticale schokbuis (a). De buis heeft een lengte van 8 meter en een diameter van 13 centimeter. De binnendiameter van de buis bedraagt 7,7 centimeter. In de meetsectie onderin wordt een cilindrisch gesteentemonster met een concentrisch boorgat geplaatst (b). Dit monster is voorzien van een kunstmatig aangebracht horizontaal scheurtje met een vastgestelde lengte en dikte. De schokgolf wekt een boorgatgolf op die kan worden geregistreerd door de op een asje gemonteerde verplaatsbare hydrofoon.

Onderin de buis wordt een cilindervormig poreus gesteentemonster geplaatst, met een diameter van 76 millimeter. In deze cilinder is een concentrisch gat geboord met een diameter van 12 millimeter (figuur 7b). Dit is nu het boorgat waarin we onze metingen uitvoeren. Het geheel wordt met water of olie afgevuld, zodat we een realistische weergave op schaal verkrijgen van een werkelijk boorgat omgeven door een poreus reservoirgesteente. De buis wordt vervolgens tot een bepaald niveau verder afgevuld met deze vloeistof. Daarna wordt de buis boven het membraan gevuld met testgas onder druk. Op dezelfde manier als bij de pulsexpansiebuis wordt het membraan plotseling verwijderd met een elektrische stroomstoot

waardoor er een schokgolf met hoge snelheid naar beneden de buis ingaat. Deze schokgolf zal worden afgeremd door het vloeistofoppervlak boven de cilinder en zal met een wat lagere snelheid (de geluidssnelheid) in die vloeistof verder reizen. Aangekomen bij de bovenzijde van de cilinder, zal de golf zich opsplitsen in een boorgatgolf en een gesteentegolf. De vorming van de gesteentegolf kan onderdrukt worden door het aanbrengen van een geluidstrechter in de buis boven de cilinder (Chao 2005) die de akoestische energie focuseert in het boorgat. Het boorgat kan nu worden onderzocht met een kleine hydrofoon, die op willekeurige hoogte in het boorgat kan worden geplaatst, doordat hij op een asje is gemonteerd dat verticaal in het boorgat op en neer kan bewegen (zie figuur 7b). Door eenvoudigweg het golfexperiment te herhalen met de hydrofoon steeds op een andere hoogte kan het gehele boorgat worden doorgemeten. Ook kunnen in het gesteente zelf of in de wand van de schokbuis hydrofoons worden aangebracht die informatie geven over de gesteentegolf en de oppervlaktegolven tussen de buitenwand van de cilinder en de binnenwand van de schokbuis. Deze onderzoeken hebben in het verleden geresulteerd in een viertal proefschriften (van der Grinten 1987, Smeulders 1992, Wisse 1999, Chao 2005). Momenteel wordt dit onderzoek voortgezet door mijn promovendus Huajun Fan, die onderzoekt wat de invloed van scheurtjes in het reservoir is op de boorgatgolven. Hiertoe wordt in de meest eenvoudige vorm de gesteentecilinder voorzien van een enkelvoudige horizontale scheur van enkele millimeters dik, zodat de invloed hiervan op de geluidsmetingen kan worden onderzocht (figuur 7b). Variaties in de vorm van gelaagde media, meervoudige scheuren, niet-horizontale scheurvlakken, en scheurlengte kunnen in deze opstelling eenvoudig worden onderzocht, hetgeen de toepassing van onze bevindingen voor realistische reservoirgesteenten, die immers vrijwel nooit netjes homogeen zijn opgebouwd, enorm zal vergroten.

Onderwijs als kringproces

In de afgelopen jaren is er veel gesleuteld aan het onderwijs, en aan het universitaire onderwijs in het bijzonder. Toen ik studeerde in Delft behaalde je je P in het tweede jaar, het kandidaats in het derde en je ingenieursdiploma na vijf jaar nominaal. In het studiejaar 2002/2003 hebben de Nederlandse universiteiten en hogescholen de bachelor-masterstructuur ingevoerd. Deze verandering vloeide voort uit de doelstellingen in de 'Bologna-verklaring' waarin 29 Europese landen in 1999 hebben afgesproken hun onderwijssystemen meer op elkaar af te stemmen. Dit gebeurde onder meer door het invoeren van een European Credit Transfer System (ECTS), waarmee studenten eenvoudiger de aan één universiteit behaalde studiepunten kunnen meenemen naar een andere universiteit. De naam 'Bologna-verklaring' verwijst ook naar de universiteit van Bologna, gesticht in 1088, en daarmee de oudste van Europa. Binnen de bachelorfase (de eerste drie jaren) is daarna ook de major-minor-structuur ingevoerd, waarbij de minor ter waarde van 30 ECTS (een half jaar) als een samenhangend keuzepakket vrij kan worden ingevuld. Dit pakket kan in principe dus bij een andere faculteit of een andere universiteit worden gevolgd. Als voorzitter van de taakgroep bachelorherziening heb ik in Delft meegewerkt aan de herziening van het onderwijsprogramma voortvloeiend uit het vrijmaken van 30 ECTS voor een minor. Inmiddels worden bachelor en master steeds meer als losse identiteiten gezien, wat heeft uitgemond in de invoering van de zogenaamde 'harde knip'. Studenten mogen niet meer met hun master beginnen, tenzij zij hun bachelor hebben behaald. Ook wordt momenteel het zogenaamde bindend studieadvies (BSA) ingevoerd, wat inhoudt dat studenten die in hun eerste jaar niet voldoende studiepunten behalen, worden weggestuurd. De meest recente ontwikkeling is de invoering van een zogenaamde brede bachelor aan de TU/e waarbij in de opleiding meer aandacht moet komen voor algemeen vormende vakken ten koste van het faculteitsgebonden vakinhoudelijke programma (van 'knospeldmodel' naar 'punaisemodel'). Met deze aanpak moeten zowel de instroom- als de rendementsproblemen worden aangepakt. In opdracht van het Platform Bèta Techniek hebben de reclamebureau's Motivaction en YoungWorks in mei-juli 2010 2140 jongeren in de leeftijd van 12-24 jaar ondervraagd en is het in 2007 op basis van 21 groeps gesprekken ontwikkelde BètaMentality-model verder verfijnd. Dit model verdeelt de doelgroep jongeren van 12 t/m 24 jaar in vier groepen te weten 31% concrete bètatechnici,

28% carrièrebèta's, 28% mensgerichte generalisten en 13% non-bèta's (Bèta-Mentality 2011-2016). Met het in te voeren punaisemodel zouden ook de tweede en derde groep meer geneigd zijn aan de TU/e te komen studeren, waar dit nu alleen voor de eerste groep het geval zou zijn. In feite leggen we met een brede bachelor meer nadruk op de klassieke 'artes liberales' (grammatica, retorica, logica, rekenen, astronomie, geometrie en muziek) die Aristoteles al onderscheidde van de vakkennis of de ambachten, en is ook deze kringloop weer gesloten. De vraag is echter of we alle kringlopen wel moeten willen sluiten en of er op deze manier nog voldoende ruimte overblijft voor de ontwerpgerichte en praktische componenten waarmee een technische 'hogeschool' zich onderscheidt. De tijd zal het leren.

Nawoord

Allereerst wil ik het College van Bestuur en de faculteit Werktuigbouwkunde bedanken voor het in mij gestelde vertrouwen. Ik heb altijd het geluk gehad binnen een groep te mogen werken waar mensen elkaar stimuleerden binnen een goede en open werksfeer. Dit was zo binnen de groep van Rini van Dongen in Eindhoven, waar ik mijn promotieonderzoek heb gedaan, bij Aardwetenschappen in Delft waar een bijzonder hecht petrofysisch team werkte, en nu weer binnen de TFE-groep en Werktuigbouwkunde als geheel. Ik wil in het bijzonder de mensen die ik als mijn mentoren beschouw bedanken, Rini van Dongen en Hans de Pater. Ik ben verheugd dat zij aan het minisymposium voorafgaand aan deze intrede hebben willen bijdragen. Verder dank aan mijn lieve familie en schoonfamilie, aan Wendy, die ik deze week 25 jaar geleden ontmoette, en aan Casper en Karlijn, die de gevolgen van onze keuzes op energiegebied zullen erven. Laten we verstandig kiezen.

Ik heb gezegd.

Literatuur

- Chao, G. 2005. Dispersive surface acoustic waves in poroelastic media. Proefschrift TU Delft.
- Grinten, van der, J.G.M. 1987. An experimental study of shock-induced wave propagation in dry, water-saturated, and partially saturated porous media. Proefschrift TU/e.
- Holten, V. 2004. From supersaturated water vapour to supercooled liquid water; analysis and experiments. Afstudeerverslag R-1634-A, TU/e.
- Holten, V. 2009. Water Nucleation. Wave tube experiments and theoretical considerations. Proefschrift TU/e.
- Meng, C. en Pater, de, C.J. 2011. Hydraulic Fracture Propagation in Pre-Fractured Natural Rocks. SPE 140429.
- Smeulders, D.M.J. 1992. On wave propagation in saturated and partially saturated porous media. Proefschrift TU/e.
- TNO 2009: Inventory non-conventional gas. TNO-034-UT-2009-00774/B.
- TNO 2011: Delfstoffen en Aardwarmte in Nederland. Jaarverslag 2010. www.nlog.nl.
- Wisse, C.J. 1999. On Frequency Dependence of Acoustic Waves in Porous Cylinders. Proefschrift TU Delft.

Curriculum vitae

Prof.dr.ir. D.M.J. (David) Smeulders is per 1 september 2010 benoemd tot voltijd-hoogleraar aan de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) op het gebied van ‘Engineering Thermodynamics for Energy Systems’.

David Smeulders behaalde het ingenieursdiploma aan de Technische Universiteit Delft (Lucht- en Ruimtevaarttechniek) en verrichtte zijn promotieonderzoek aan de TU/e (Technische Natuurkunde). Daarna was hij werkzaam aan de Technische Universiteit Delft, dit keer bij de faculteiten Mijnbouwkunde en Petroleumwinning, Technische Aardwetenschappen, en Civiele Techniek en Geowetenschappen. Hij verrichtte theoretisch en experimenteel onderzoek naar golfvoortplanting in poreuze media, met toepassingen in de olie- en gaswinning. Ook was hij hoofd van het Laboratorium voor Geotechnologie. Sinds 2010 is hij weer verbonden aan de TU/e. Het huidige onderzoek richt zich op stroming in poreuze media, motoren en gasturbines, en op faseovergangen in gassen en dampen. Op vrijdag 18 november 2011 sprak hij zijn intrede uit.

Colofon**Productie**

Communicatie Expertise
Centrum TU/e

Fotografie cover

Rob Stork, Eindhoven

Ontwerp

Grefo Prepress,
Sint-Oedenrode

Druk

Drukkerij Snep, Eindhoven

ISBN 978-90-386-3020-5
NUR 978

Digitale versie:
www.tue.nl/bib/

Bezoekadres

Den Dolech 2
5612 AZ Eindhoven

Postadres

Postbus 513
5600 MB Eindhoven

Tel. (040) 247 91 11
www.tue.nl