

▲ Afb. 1. Doorsnede Groningenveld. Van onder naar boven: grijs: Carboon; bruin: Rotliegend; beige/crème: Zechstein; roze: Trias; donker-groen: Vroeg-Krijt; lichtgroen: Laat-Krijt (Chalk); geel: Tertiair; oranje: Tertiair-Kwartair. Bron: NLOG.

## Algemene geologie

# De traagheid van gesteenten

*Hoe zandkorrels de wetenschap verrasten*

door **Annemieke van Roekel**

avroekel@xs4all.nl (redactie Gea)

Hoe wordt bodemdaling wetenschappelijk benaderd? Dit is bij uitstek het domein van de gesteentemechanica, een vakgebied voor natuur- en wiskundigen, mijnbouwkundigen en geomechanici. Als je wilt weten wat er aan het aardoppervlak boven een olie- of gasveld gebeurt, dan moet je diep in de aarde kijken: wat gebeurt er precies in het gesteentelichaam waar gas, olie, maar ook water en zout, in gevangen zitten, tijdens of na de productiefase? De wetenschappelijke benadering van het "gedrag" van reservoirgesteenten kwam in de warme zomer van 2022 aan de orde tijdens de interviews van de Parlementaire Enquêtecommissie Aardgaswinning Groningen (PEAG). Het was een uniek moment, want wanneer zie je bèta-wetenschappers op televisie uitleg geven over een dergelijk specialistisch en aan geologie gerelateerd onderwerp? Eén van de geïnterviewden tijdens 'de dag van de wetenschappers' was experimenteel natuurkundige Hans de Waal. In het interview met de commissie legde hij het proces van compactie (van het zandsteenreservoir) en de daaraan gerelateerde bodemdaling (aan het aardoppervlak) uit, met de nadruk op het Groningen-gasveld. Hans de Waal, nu werkzaam bij Staatstoezicht op de Mijnen (SodM), was bereid om zijn uitleg nogmaals te geven t.b.v. een artikel in Gea. Dit artikel is gebaseerd op het verhoor van Hans de Waal met de PEAG op 28 juni 2022 en een aanvullend interview met Gea op 19 januari 2023.

Wanneer olie- en gaswinning offshore plaatsvindt, kan dat gevolgen hebben voor bijv. de boorplatforms die op de zeebodem staan. Wanneer het op land plaatsvindt, zeker in dichtbewoonde gebieden zoals in

Nederland, kan dat grote gevolgen hebben, zoals we nu in Groningen zien.

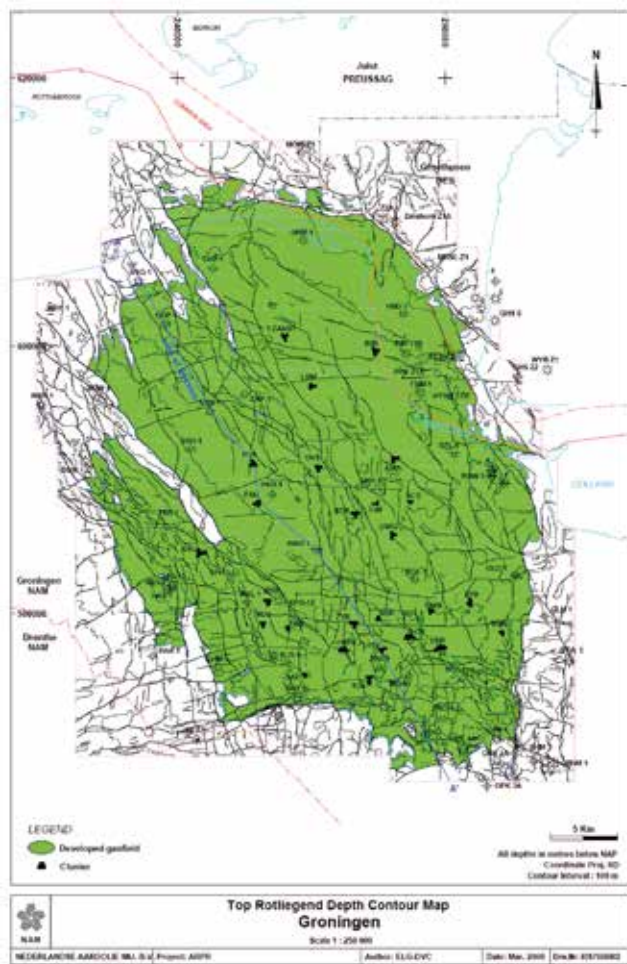
In ons land hebben we, behalve bodemdaling door processen in de *diepe* ondergrond, ook te maken met bodemdaling door ondiepe compactie, bijvoorbeeld als gevolg van wateronttrekking, waardoor zand, veen en kleilagen inklinken. In dit artikel gaat het uitsluitend om bodemdaling door compactie van reservoirgesteente in de diepe ondergrond.

De natuurkundige Hans de Waal werd op 28 juni 2022 geïnterviewd door de Parlementaire Enquêtecommissie Aardgaswinning Groningen (PEAG) vanwege zijn expertise op het gebied van compactie en bodemdaling als gevolg van olie- en gaswinning. Tijdens zijn promotie in 1986 (en al daarvoor) ontwierp hij hiervoor een nieuw model over gesteentegedrag. Zijn hele werkzame leven houdt hij zich al met dit onderwerp bezig, ook buiten Nederland. Sinds 2009 werkt hij bij Staatstoezicht op de Mijnen (SodM).

## Drukdaling door gaswinning

Bodemdaling vindt zowel plaats bij olie- als gaswinning, maar ook bij waterwinning uit aquifers (watervoerende lagen). Het principe van compactie is vergelijkbaar: het gewicht van bovenliggende gesteentelagen wordt deels gedragen door het gesteente zelf, en deels door olie of gas (of water) dat zich onder druk in de aardkorst bevindt. Wordt die druk minder, dan zakt het reservoir in (compactie), wat tot bodemdaling aan het aardoppervlak leidt (voor grote gasreservoirs zoals Groningen ongeveer in de verhouding 1:1). Het gaat dus om de drukverandering, en niet om de soort substantie (olie, gas of water).

Als olie of gas worden geproduceerd en de druk vermindert, moet het reservoirgesteente zelf een groter deel van het gewicht van de bovenliggende lagen gaan dragen. Als er vanuit de omgeving (van de zijkanten of soms van onderen) water terugstroomt, het veld in, zou er niet veel gebeuren. Bij gasvelden in Nederland heb je echter vaak te maken met randbreuken en onderliggende kleilagen die een barrière vormen, waardoor er weinig terugstroomt.



▲ Afb. 2. Groningenveld, Top Slochteren, met de locaties van Groningen-stad en Delfzijl. Bron: NAM/NLOG.

Aanvankelijk (bij het begin van de gasproductie) was de gasdruk in het Groningenveld 350 atmosfeer (op 3000 m diepte); de druk door het gewicht van de bovenliggende gesteentelagen is ongeveer het dubbele.

Het aardgas uit het Groningenveld (vooral methaan) is afkomstig uit onderliggende Carboonlagen (afb. 1) en wordt a.h.w. gevangen door de afsluitende zoutlagen van anhydriet en vooral steenzout erboven. Het reservoirgesteente bestaat uit Rotliegend-zandsteen (Slochteren Formatie), een vroeg-Permische zandsteen gevormd uit zandvlaktes, duinen en wadi's, die zijn afgezet in een grote woestijnachtige omgeving. Zie ook het artikel in *Gea* 2022/4.

Het Groningen-reservoir (afb. 2) wordt beschouwd als één grotendeels intern verbonden gesteentelichaam (diameter=60 km; hoogte 100-300 meter), met een gemiddelde porositeit van 17% en een goede permeabiliteit (het gemak waarmee het gas stroomt). Door productieclusters

in te richten over het gehele veld, wordt de drukdaling over het reservoir gelijkmatig verdeeld; de breuken binnen het veld zijn er veelal doorlatend en vormen dus geen barrière.

### Veldobservaties en voorspellingen

De discrepantie tussen *veldobservaties* en de *voorspellingen* van bodemdaling boven het Groningen-gasveld was de aanleiding dat Hans de Waal (in 1977 afgestudeerd in de experimentele natuurkunde, met als specialisatie vast waterstof) zich voor Shell ging bezighouden met het onderwerp van compactie en bodemdaling. Hij ging dit onderzoek uitvoeren in het Shell-laboratorium te Rijswijk.

De voorspellingen van bodemdaling in Groningen, die daar eerder op basis van onderzoek in opdracht van de NAM in de jaren '60 waren gedaan, waren o.a. gebaseerd op gesteentemechanisch onderzoek van Shell in de (destijds) eigen olievelden in Venezuela. Daar wisselen licht hellende lagen met niet gecementeerde zand- en kleilagen elkaar af, op een diepte van 1-1,5 km; een situatie die heel anders is dan de Rotliegend in Groningen dus. In Venezuela ging het om een kustgebied waar men te maken kreeg met bodemdaling tussen 5 en 10 m, en waar toen dijken zijn aangelegd.

Op basis van de hierop gebaseerde (computer)modellen en aanvullende laboratoriummetingen werd een uiteindelijke bodemdaling van ca. een meter voor het Groningenveld (dat in de jaren '70 pas goed in productie werd genomen) voorspeld. Dit was al snel in tegenspraak met concrete metingen: na extrapolaties van meetgegevens uit het veld kwam men uit op slechts 25-30 cm.

### Op zoek naar de verschillen

Aan De Waal dus de opdracht dit verschil van ca. een factor vier tussen theorie (vooral op basis van laboratoriummetingen en berekeningen) en praktijk (veldmetingen) te verklaren. Hiervoor bekeek De Waal de gebruikte computermodellen opnieuw en deed hij een aantal van de laboratoriummetingen uit de jaren '60 over.

In een lab worden de fysische ontwikkelingen in het gasveld, zoals druk en drukveranderingen, nagebootst met boorkernen uit het te onderzoeken veld. Je kunt dan meten wat er in het gesteente verandert. Voor zijn onderzoek had De Waal de beschikking over dezelfde gesteentemonsters als destijds (jaren '60) en daarnaast ook 'verse' boorkernen.

Al vrij snel kwam De Waal er achter dat de onderliggende principes uit de gesteentemechanica van de *diepe* ondergrond hier wellicht helemaal niet, of beter gezegd, niet helemaal van toepassing waren. Het algemeen geaccepteerde idee over het mechanische gedrag van harde gesteenten was namelijk dat hier het zogeheten 'veerprincipe' van toepassing is: als er druk wordt uitgeoefend op materie, dan "krimpt" het; blijft de druk stabiel, dan stopt de krimp. Oftewel: de vervorming is recht evenredig met de drukverandering. Dit *lineair-elastische* principe (*evenredige vervorming*) was tot eind jaren '70 leidend in modellen van gesteentegedrag.

Een illustratie van dit veermodel is het gedrag van (gehard) staal, dat zelfs 100% terugveert; andere voorbeelden zijn zuivere metalen en vloeistoffen, maar ook diamant en zuiver kwarts. Van zeer hard gesteente (zandsteen is even hard als beton) dacht men daarom ook dat dit zich elastisch zou gedragen. Het idee was daarom dat bij constante druk (na de fase van vervorming) er niets meer zou gebeuren en het materiaal zou stabiliseren. Voor gasproductie zou dit betekenen dat na stopzetting van de gasproductie (dus bij constante druk) verdere compactie zou stoppen.

Er bleek echter een traagheid in het proces van compactie te zitten, en die traagheid was veel groter dan men dacht.

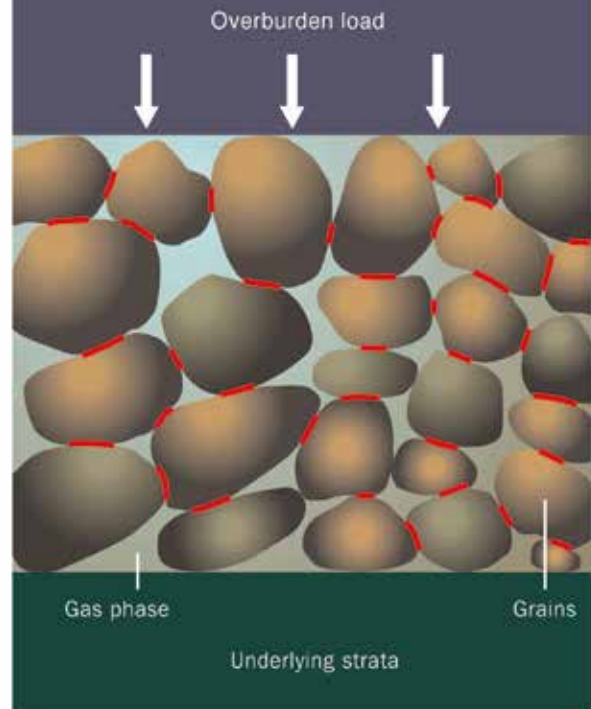
### De factor tijd

Bij de gebruikelijke laboratoriummetingen zie je die traagheid nauwelijks, legt De Waal uit. Als je zandsteen uit het Groningenveld in een pers samendrukt, dan zie je de steen letterlijk snel krimpen, daarna gebeurt er niet veel meer. Eigenlijk moet je nog tienmaal de ‘drukopbouw-tijd’ wachten voor verdere krimp, daarna honderd uur voor nog verdere krimp, etc. Dit “na-ijleffect” heeft men zich onvoldoende gerealiseerd, aldus De Waal.

Dit fenomeen van verdere inzinking wordt ‘kruip’ genoemd (‘creep’ in het Engels). Kruip speelt op het niveau van de zandkorrels, die een beetje over elkaar kunnen schuiven. Het is een traag proces dat langzaam uitsterft, maar op een logaritmische schaal sterft het niet uit.

### Schuivende zandkorrels

Het fenomeen kruip treedt op in zandsteen, maar even goed in kalksteen (zie kadertekst *Bodemdaling offshore*). Ondanks het feit dat in hard gesteente de korreltjes aan elkaar “gekit” zijn geraakt en dus met elkaar zijn verbonden, is beperkte beweging van korreltjes nog steeds mo-



— Areas of effective stress

▲ Afb. 3. Schematische weergave van zandkorrels in zandsteen. Bron: Hans de Waal.

gelijk, legt De Waal uit. Op de individuele korrelcontacten staan namelijk hele grote krachten, om de spanning in het gesteente te dragen. Als er daardoor één korrel verschuift, heeft dat gevolgen voor de spanning op andere korrels. Ook zijn er op alle lengteschalen kleine breukjes aanwezig in het gesteente. Ook daarlangs zijn plotselinge kleine verschuivingen mogelijk. Kruip is dus het langzaam in de tijd uitstervende proces van het schuiven van korreltjes en bewegingen langs interne breukjes. Afb. 3. De snelheid van dit losschieten, en dus de beweging van het geheel en de verdere inzinking (compactie) die hiervan het gevolg is, vindt in de tijd plaats volgens een

### Bodemdaling offshore

Compactie en de hierop volgende bodemdaling vindt niet alleen plaats in zandsteen, maar ook en zelfs in veel sterkere mate in zogeheten ‘chalk-fields’ (krijt), vertelt De Waal. Zo was hij in de jaren tachtig van de vorige eeuw direct betrokken bij het onderzoek naar de onverwacht sterke bodemdaling boven het Noorse Ekofisk-veld (afb. 4), in het centrale deel van de Noordzee - waar de chalk hetzelfde gesteente is als de krijtrotten van Dover (afb. 5). De porositeit van chalk kan oplopen tot wel 40%; hierdoor is de kruip in chalk sterker.

In het begin van de productieperiode was er niets aan de hand, totdat het Noorse olie- en gasbedrijf in de jaren ‘80 geheel onverwacht te maken kreeg met zakkings van enkele meters, in een tempo van ca. een halve meter per jaar; dit zou volgens berekeningen tot wel 10-15 m kunnen doorgaan. In dat geval zouden de boorplatforms het water gaan raken. Van alle platforms zijn toen de poten doorgezaagd en verlengd. De zinking werd bij toeval ontdekt omdat de aanlegpunten van de bevoorradingschepen onder water waren verdwenen. De hulp van de Waal werd ingeroepen, omdat hij eerder (voor de start van de productie en dus nog op tijd) vergelijkbare dalingen had voorspeld voor hoog poreuze (mouldic carbonate) kalksteenvelden voor de kust van Sarawak (Borneo) en daarover had gepubliceerd.

► Afb. 4. Ekovisk 2-4 B olieplatform. Foto: Knudsens Fotosenter / DEXTRA Photo / Norsk Teknisk Museum via Wikimedia Commons CC-BY-4.0.



logaritmische schaal. Dus als de compactie door kruip bijv. 1 mm is 10 jaar, is het resp. 2 mm in 100 jaar, 3 mm in 1000 jaar, etc.

Kruip door bewegingen van korrels en kleine breukjes kan met een akoestische opstelling hoorbaar gemaakt worden. Tijdens samenpersing in het laboratorium hoor je honderden van deze bewegingen, vertelt De Waal. Wat overigens nog steeds onverklaard is, is dat de weerstand (wrijving) tussen de korreltjes en op de breukjes (~het oppervlak dat met elkaar in contact staat) langzaam toeneemt in de tijd. Dit proces vindt ook plaats op de schaal van de geologische tijd, en daarom is de zandsteen op grote diepte na tientallen miljoenen jaren a.h.w. 'uitgekropen', maar indien er grote drukveranderingen plaatsvinden, begint het kruiseffect opnieuw.

### Rate Type Compaction Model

Voor dit kruiseffect ontwikkelde De Waal het *Rate Type Compaction Model* (lett. vertaald: het snelheidsafhankelijke compactiemodel). Dit model, dat een grotere mate van bodemdaling voorspelde, werd in de jaren '80 door de NAM wel gebruikt, maar in de jaren '90 weer verlaten en na 2000 weer omarmd, o.a. omdat men zag dat in een aantal velden de bodemdaling doorging na stopzetting van de productie en de drukkaling en men dit niet met het lineair-elastisch model kon verklaren.

Met terugwerkende kracht zou je het lineair-elastische model een 'paradigma' kunnen noemen, vindt De Waal. Een blinde vlek in de wetenschap dus, ook wel 'tunnelvisie' genoemd. Met kruip voor sommige betrokken partijen een "inconvenient truth".

Het kruiseffect was al wel algemeen bekend in de grondmechanica (de mechanica van de ondiepe bodem), wanneer los zand zich op dieptes tot enkele tientallen meters bevindt en door de druk een zekere hardheid heeft bereikt (vergelijkbaar met een vacuüm gezogen pak koffie).

Maar waarom snelheidsafhankelijk? Dat heeft betrekking op de snelheid waarmee het gesteente onder druk komt te staan (naarmate het gasveld leeg raakt). Naarmate dit proces langzamer gaat, is er méér compactie meetbaar als gevolg van kruip. Een concreet voorbeeld: als je dezelfde hoeveelheid gas in één of tien jaar zou produceren, zou er in het geval van tien jaar meer compactie en dus meer bodemdaling optreden (op veel langere termijn is de uiteindelijke compactie wel weer ongeveer gelijk).

### De tijdschaal in het lab

Mechanische processen treden op verschillende tijdschalen op, en dit beperkt de bruikbaarheid van standaardproeven in het laboratorium. In het lab wordt bijv. in één dag de situatie van dertig jaar gasproductie gesimuleerd, met een snel oplopende gesteentedruk. Die snelheid verstoort het experiment, aldus De Waal. Om kruiseffecten te kunnen meten, moet je langdurige proeven doen.

Een ander belangrijk probleem met de monsters in het lab, afkomstig uit boorkernen, is dat men vergeet dat het gesteente in het veld voorafgaand aan de start van de gasproductie al 300 miljoen jaar heeft 'gekropen'.

Je zou het gesteente in het lab eerst in dezelfde toestand moeten brengen door een vergelijkbare wachttijd toe te passen, wat natuurlijk niet kan. Het kan gelukkig ook door het monster eerst tot een hogere druk te belasten (met het Rate Type Compaction Model kan berekend worden hoeveel hoger) en het daarna weer te ontlasten tot aan de begintoestand in het veld (de druk vlak voor de start van de gasproductie), legt De Waal uit. Bij een dergelijk experiment, waarin je de effecten van de kruip tijdens de geologische tijd dus simuleert, zie je aanvankelijk minder bodemdaling (doordat alleen het elastisch effect van toepassing is) en pas in een latere fase meer compactie, als door de verdere drukkaling de kruip weer op gang komt.



▲ Afb. 5. Het zeer poreuze kalk (krijt) is gevormd tijdens het Krijt en bestaat uit miljarden skeletjes van eencellige organismen. Foto: James St. John via Wikimedia Commons CC-BY-2.0.

Het gevolg van dit alles is dat tot een bepaalde afname van de gasdruk (80-100 bar in Groningen) veel minder bodemdaling plaatsvindt. Hieruit concludeerde men in 1975 dat het gesteente in het Groningenveld veel harder was dan de labmonsters, en

stelde men de voorspelling bij naar ca. 30 cm. De Waal voorspelde in 1986 dat de compactie, en daarmee de bodemdaling, zouden versnellen, wat resulteerde in een verdubbeling van die voorspelling.

Daarnaast zijn er in de loop van de tijd een aantal problemen met de oorspronkelijke labmetingen gevonden. Daardoor waren die zo'n 30% te hoog.

Inmiddels is besloten de gaswinning vervroegd stop te zetten. Alles meenemend is de meest recente voorspelling voor de maximale bodemdaling in 2080 (NAM, 2021) nu 42 cm met een onzekerheid van ca. +/-3 cm.

De Waal promoveerde in 1986 op dit onderwerp en nog weer later, in 2013, werd het model door TNO, in samenwerking met de Waal, verder geperfectioneerd, om het gesteentegedrag optimaal te kunnen modelleren. In deze laatste versie worden beide mechanismen die aan compactie ten grondslag liggen gecombineerd: het veerprincipe (uitgaande van vervorming van de korrels, een proces waarbij tijd geen rol speelt) én kruip (uitgaande van de beweging van de korrels).

### Referenties en meer lezen/bekijken

- De verhoeren van de Parlementaire Enquêtecommissie Aardgaswinning Groningen zijn online te lezen of te bekijken op [www.tweedekamer.nl/kamerleden-en-commissies/commissies/parlementaire-enquetc-commissie-aardgaswinning-groningen/openbare-verhoeren/verhoerweek-1](http://www.tweedekamer.nl/kamerleden-en-commissies/commissies/parlementaire-enquetc-commissie-aardgaswinning-groningen/openbare-verhoeren/verhoerweek-1)
- NAM, 2021. Groningen long term subsidence forecast, NAM report EP202008201822, unrestricted, 12 February 2021.
- Zandsteen: waarom het interessant is, door Josje Kriest. *Gea* 2022/4.