

Aardolie, van oorsprong naar productie

door Dr. M.H. Nederlof
geoloog, werkzaam in olie- en gasexploratie en productie
Geology And Energy Analysis (GAEA)

Inleiding

In een artikel in *Gea* van dec. 2003 heeft u kunnen lezen over het ontstaan van aardolie en aardgas uit organisch materiaal. In dit artikel zien we wat er verder gebeurt met de olie en het gas dat in voldoende mate was gegenereerd in het oliemoedergesteente om daaruit te ontsnappen. Deze ontwikkeling zullen we in een aantal stappen bekijken.

1. Migratie
2. Accumulatie
3. Retentie en kwaliteit
4. Reserve-schattingen
5. Productie

Eerst komt aan de orde wat men "**secundaire migratie**" noemt (1). We zullen hier eenvoudig de term migratie gebruiken voor de secundaire migratie. De "primaire migratie" was de beweging binnen het oliemoedergesteente zelf. De secundaire migratie moet hopelijk leiden tot een "**accumulatie**" (2), de vorming van een olie- of gas-veld. Dan zijn er nog risico's dat de olie langzaam uit de accumulatie lekt of chemisch/bacterieel tot inferieure "kwaliteit" gedegradeerd wordt. Dit gehele probleem kunnen we samenvatten als "**retentie**" (3). Na deze geologische fasen komen de exploratie en productie die uiteindelijk kunnen leiden tot **reserve-schattingen** (4) en **productie** (5).

1. Migratie

Er zijn over de jaren veel mechanismen voorgesteld die de migratie moeten verklaren. Het lijkt er nu op dat we meestal te doen hebben met een continue oliefase. De meeste olie is lichter dan water, en dit geldt bovenal voor gas, hoewel met toenemende druk het gas samengeperst is tot veel grotere dichtheid dan aan de oppervlakte. Het verschil in soortelijk

gewicht zorgt ervoor dat olie- en gasdruppels die zich in het water tussen de gesteentekorrels bevinden een opwaartse kracht ondervinden, zoals slaolie in een glas water. Die kracht is afhankelijk van de verticale lengte van de olie-druppel. Die kracht moet enkele natuurkundige krachten overwinnen. Er zijn capillaire krachten die het moeilijk maken door kleine poriën heen te komen. De oliemigratie zal dus bij voorkeur plaats vinden in reservoirgesteenten met voldoende porositeit. Maar er zijn ook vaak breuken en splijtingen in het gesteente, die zelf een soort pijpleiding vormen.

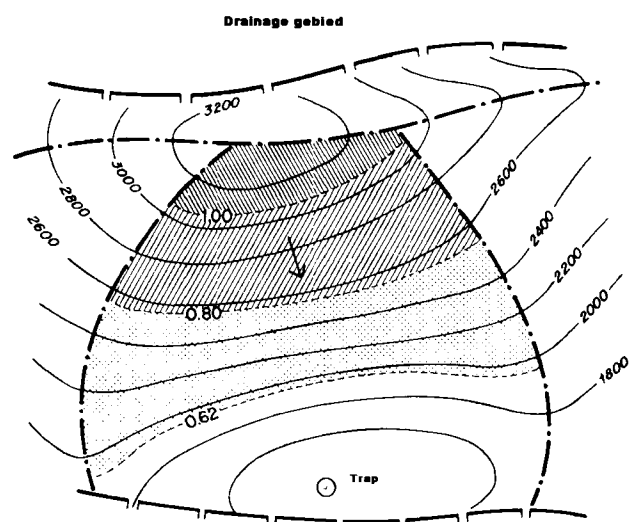
In een sedimentair bekken met oliemoedergesteente is het vaak mogelijk gebieden aan te wijzen van waaruit alle gegenereerde olie naar een centraal punt migreert. Dat is een "drainagegebied". Het is vergelijkbaar met het drainagegebied van een rivier, maar de olie stroomt omhoog, terwijl water juist het omgekeerde doet. De hoeveelheid olie die per volume moedergesteente gegenereerd wordt en het drainageoppervlak geven een schatting van de hoeveelheid olie die voor een potentieel olieveld beschikbaar is, of is geweest. In de schematische afbeelding (afb. 1) zijn dieptecontouren getekend op het niveau van het oliemoedergesteente. De gearceerde gebieden en onderbroken contouren geven aan in hoeverre het organisch materiaal is omgezet in olie en gas. De waarden zoals 0.62 zijn vitriniet-reflectanties. Vitriniet is organisch materiaal dat bij inkoling steeds glanzender wordt. De glans wordt onder de microscoop vergeleken met de glans van diamant en als een percentage uitgedrukt. Het is een veelgebruikte maat voor de omzettingsgraad. Bij ongeveer 0,5% begint de eerste oliegeneratie, bij 1,2% wordt er nog hoofdzakelijk gas gegenereerd. In een oliemoedergesteente met een vitriniet-reflectantie van boven de 3 is het meeste van het kerogeen omgezet in olie en gas. In afb. 1 geeft het migratiepijlje aan dat de migratie naar de trap loodrecht op de dieptecontouren (in meters) loopt.

Er wordt wel eens gedacht dat generatie en migratie zo snel gaan dat producerende olievelden steeds weer gevuld worden. In principe kan er nog wel olie in migreren, maar het proces van generatie is zo langzaam dat dat de bottleneck vormt. Migratie van olie gaat met snelheden die nog redelijk in een laboratorium na te bootsen zijn. Maar voor generatie moeten we de temperatuur wel erg hoog maken om binnen de beschikbare tijd een beeld te krijgen van de chemische processen die in werkelijkheid miljoenen jaren vergen. Een vuistregel is dat de snelheid van afbraak van organisch materiaal verdubbelt bij elke 10 °C meer. De temperatuur in de bovenste kilometers aardkorst neemt toe met ongeveer 3 °C per 100 meter. Wij produceren olie met misschien wel een duizendvoudige snelheid vergeleken met de aanvoersnelheid bij de geologische processen in een ver verleden.

Meestal migreert olie samen met gas. Deels is het gas opgelost in de olie, maar ook gas in gasvorm migreert naar een trap. Hoe verder de olie migreert, hoe ondieper. Daardoor komt er steeds meer gas uit oplossing. In de accumulatie zal er bij voldoende gas een gaskap ontstaan.

2. Accumulatie

In gunstige gevallen ontmoet de migrerende olie een val oftewel trap (*trap*, deze Engelse term zullen we verder maar

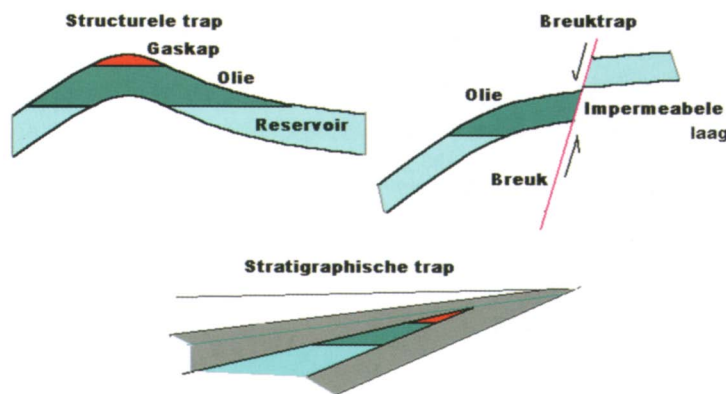


Afb. 1. Drainagegebied. De olie die binnen het drainagegebied wordt gegenereerd in het gearceerde gebied stroomt omhoog langs hellende aardlagen naar de trap. Volle lijnen: contouren van diepte in meters; onderbroken lijnen: vitriniet-reflectantie in het oliemoedergesteente. De pijl wijst de migratierichting aan.

gebruiken bij gebrek aan een zinnige Nederlandse term, hoewel de term “fuik” wel eens is gesuggereerd). Dat is dus een potentiële olieaccumulatie. Meestal bestaat een trap uit een structurele vervorming van aardlagen die zowel poreuze als ondoorlaatbare lagen omvatten. Tussen de korrels van de poreuze lagen wordt de olie dan opgeslagen. Omdat de trap afgedekt is met een ondoorlaatbare laag zoals klei, schalie of zout, blijft de olie of het gas gevangen in de trap. In andere gevallen is er geen val op de migratieweg en stroomt de olie regelrecht naar de oppervlakte en wordt daar bijna of geheel onbruikbaar. Het vormt dan een toestand die wij nu een “natuurlijke” milieu-ramp zouden noemen.

Energiehongerig als we zijn, vinden we het interessanter als de olie op een redelijke diepte in een reservoir-gesteente gevangen wordt. Eén, of meer van zulke accumulaties boven elkaar, vormen een olieveld. Er zijn legio mogelijkheden voor een trap. Ze worden grofweg ingedeeld in structurele en stratigrafische traps (afb. 2). De structurele kunnen weer onderverdeeld worden in anticlinale en breuk-traps. Een stratigrafische trap is vaak één waar het reservoirgesteente steeds dunner wordt en bovendien op een helling ligt. De top van de accumulatie is dan waar het reservoir geheel geërodeerd is. Zo'n trap moet wel ook de juiste structurele configuratie hebben. In zo'n geval moet er niet alleen een impermeabele topdeklaag zijn maar ook een bodemdeklaag.

Een trap heeft altijd maar een beperkt volume. Het volume hangt af van de vorm, het reservoir gesteente en de kwaliteit van de deklaag, die een zekere druk van de olie en gas

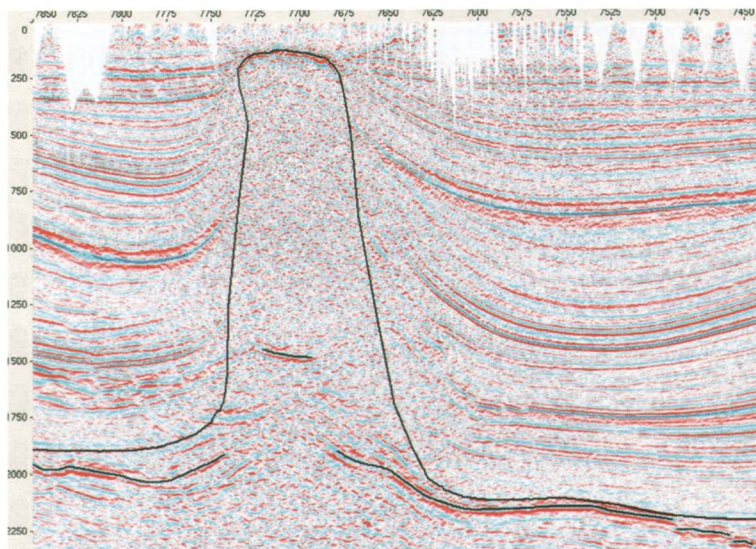


Afb. 2. Enkele soorten traps waarin olie- en gasaccumulaties gevormd kunnen worden. Het is een combinatie van een poreus reservoir en een ondoorlaatbare laag erboven. Hier is alleen het reservoir gekleurd weergegeven. Rood is vrij gas, donkergroen olie en blauw het “flankwater” onder het olie/water- contact. Bij de stratigrafische trap is grijs de impermeabele laag die de trap afsluit van boven en beneden.

accumulatie moet kunnen weerstaan. In het algemeen kan men zeggen dat hoe dieper de trap hoe meer gas we er in kunnen opbergen, vanwege de hoge druk. Voor olie is het een beetje andersom: hoe dieper, hoe meer gas er in de olie oplost. Die doet de olie zwellen, zodat bij productie de hoeveelheid olie die we produceren bij atmosferische druk aanzienlijk minder is dan in het reservoir.

3. Retentie en kwaliteit

Wanneer migratie doorgaat tot de oppervlakte wordt de olie geoxideerd of belaagd door bacteriën, die dol zijn op de eenvoudige rechte, niet al te lange koolwaterstof ketens (alkanen). Dan wordt de overblijvende olie zo visceus dat ze zelf een impermeabele laag vormt en ontstaat er een ondiepe



Afb. 3. Een seismische doorsnede tot ongeveer 4 km diepte door de Zuidwende zoutpijler (Twente). Zout is geologisch gezien plastisch en licht (2.05 g/cm^3) en kan daarvoor omhoog dringen door zwaardere bovenliggende lagen ($2.2 - 2.5 \text{ g/cm}^3$). De omliggende lagen worden door het zout ook opgeheven. Zout kan een trap goed afsluiten. Bron: NAM.

accumulatie onder de stilstaande olie. Een goed voorbeeld is de Orinoco-accumulatie in Venezuela. Over een gebied zo groot als Nederland liggen oliereserves, op een diepte van enkele honderden meters, van 1,2 x biljoen (10 tot de macht 12) vaten meest zeer zware olie, waarvan toch nog 100 tot 300 miljard vaten economisch geproduceerd kunnen worden.

Bij temperaturen in de ondergrond van minder dan 75°C kunnen bacteriën hun vernietigende werk doen. Meestal is die temperatuurgrens bereikt bij 1500 meter diepte.

Daarom heeft een accumulatie in een anticlinaal op grotere diepte enkele voordelen boven ondiepe olie. Dan is de olie er meestal lichter en is er meer gas in opgelost. Maar dan moet de deklaag van de trap ook impermeabel zijn gebleven tot op heden. Als een olieveld vroeg is gevormd, maar later door tektonische bewegingen vervormd, kan er olie uitgelekt zijn. Dit kan gebeuren via min of meer verticale breuken die dwars door de accumulatie gaan. Ook de trap die afhankelijk is van breuken voor een laterale afsluiting kan lekken indien verdere breukbewegingen geactiveerd worden.

Met de enorme vooruitgang van de geofysische techniek kunnen we olie-accumulaties soms duidelijk zien op verticale doorsneden die door seismisch onderzoek zijn verkregen. Meestal moeten we het echter met alleen structurele informatie doen (afb. 3).

Technisch is gas beter te zien dan olie; dit is het gevolg van het grotere dichtheidscontrast tussen gas en water vergeleken bij olie/water. Het is mede daardoor dat “schoorstenen” van lekkend, of migrerend gas te zien zijn op zulke doorsneden van het gesteente. Bijvoorbeeld de riffen in Maleisië zijn vaak tot een lateraal lekniveau vol met gas. Als er meer gas naar toe migreert, gaat dat van het lekpunt recht naar boven, wel soms wat afgebogen door hellende lagen waar het doorheen gaat.

Belangrijke kwaliteitseisen bij olie zijn o.a. laag gehalte aan zwavel en hoog gehalte aan de koolwaterstoffen die geschikt zijn om benzine te maken. Voor aardgas is het belangrijk dat het voor het grootste deel brandbaar is. Het Groningen gas heeft een gehalte aan niet-brandbare bestanddelen, zoals kooldioxide, van 14%. Per volume is het gas dan minder waard.

4. Reserve-schattingen

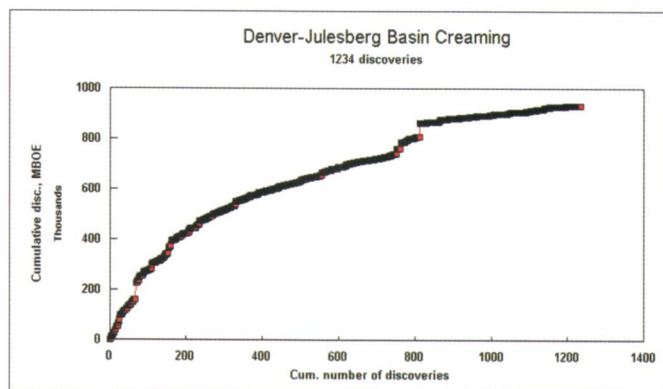
De hoeveelheden winbare olie en gas die oliemaatschappijen opgeven in hun jaarrapport stonden onlangs in het middelpunt van de belangstelling. Er zijn een aantal grote problemen over de terminologie en een zekere mate van technische onkunde in de financiële wereld alsook de vaak grote onzekerheden in het vaststellen van reserves.

De reeds ontdekte voorraden in de ondergrond kunnen met de huidige technieken niet allemaal economisch worden geproduceerd. Die voorraden zijn "in situ". Er wordt een schatting gemaakt van het gedeelte dat uiteindelijk geproduceerd kan worden, noem dit de Uiteindelijke Reserves (UR). Wat gewoonlijk Reserves wordt genoemd is de UR min de cumulatieve productie, dus wat nog overblijft. Helaas kan de UR direct na de ontdekking niet erg nauwkeurig bepaald worden. Pas na enkele boringen wordt het duidelijk wat er echt in situ is en hoeveel daarvan aan de UR gaat bijdragen. Financiële instellingen willen graag alleen "bewezen" reserves gerapporteerd hebben. Dat is dus een conservatieve schatting van de UR. De oliemaatschappij moet zijn planning richten op de beste schatting ("mathematische verwachting") die op een moment mogelijk is, en dus groter en onzekerder. In de loop der jaren groeit de som van bewezen reserves + cumulatieve productie naar de mathematische verwachting.

Nog-Niet-Ontdekte-Voorraden ("Undiscovered resources")

Deze categorie wordt met verschillende methoden geschat. De eerste vraag is "Waar gaat het over?" Is het de hele aardbol, of een sedimentair bekken of een structuur, zoals een anticlinaal?

Voor de grote en vooral grove schattingen kunnen we een gemiddelde hoeveelheid olie per vierkante kilometer toepassen. Er is helaas zoveel variatie in dat gemiddelde van plaats tot plaats, dat de schattingen wel erg onbetrouwbaar worden. Een betere methode is elk sedimentair bekken te bekijken in detail, ofwel geologisch ofwel statistisch. Een belangrijke methode is *creaming* of ontdekkingssimulatie. Het blijkt namelijk dat olie ontdekt wordt volgens een bepaald patroon.



Afb. 4. Verloop van exploratie in een sedimentair bekken in de Verenigde Staten. Het woord "creaming" slaat op het "afromen", d.w.z. bij voorkeur eerst boren van de aantrekkelijke boorlocaties in het exploratieverloop.

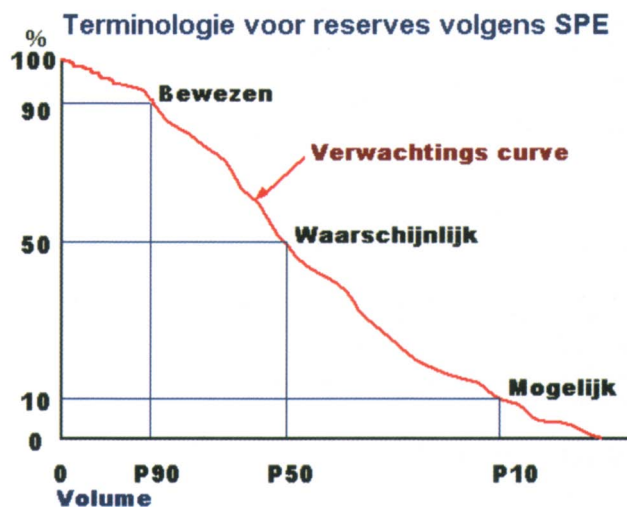
In het begin worden de grootste velden gevonden, maar de gemiddelde grootte van de vondsten neemt af volgens een negatief exponentiële functie. De succesratio, het aantal vondsten in het totaal aantal exploratieboringen, neemt af volgens een lineaire regel. Na een redelijke hoeveelheid exploratie in een bekken kunnen de trends geëxtrapoleerd worden om een voorraad nog-niet-ontdekte olie te schatten. Het voorbeeld in afb. 4 is alleen gebaseerd op de ontdekte velden. De X-as toont alleen de succesvolle exploratieboringen. Voor de reserveschatting gebruikt men ook wel de grafiek van het afnemende succespercentage tegen het cumulatieve aantal exploratieboringen.

Wat betreft de hele wereld maakt de Geological Survey of the United States van tijd tot tijd een schatting van nog-te-vinden olie en gas, waarbij alle sedimentaire bekkens bestudeerd worden door ervaren geologen.

Helaas blijft zulk een schatting erg onzeker. De geaccepteerde manier in de olie-industrie is de onzekerheid weer te geven in een "verwachtingscurve" (in het Engels "Expectation Curve"). Dat is een cumulatieve verdeling van alle mogelijke uitkomsten die zijn voorzien. Dit soort curve is het complement van een statistische verdelingscurve. Het volume van de reserves wordt op de horizontale schaal weergegeven. Op de verticale as staat de waarschijnlijkheid dat het corresponderende volume overschreden zal worden. Een eenvoudig geformuleerd: als we van volume X omhoog gaan naar de verwachtingscurve en dan de bijbehorende kans aflezen, is dat de kans om **tenminste** de hoeveelheid X te vinden. De afbeelding toont de verwachtingscurve voor een olieveld dat al gevonden is. In exploratie is er veel meer risico en begint de curve niet bij de 100% maar bijvoorbeeld bij 30%. Dat betekent dat er 70% kans is om niets te vinden. Voor exploratie is 30% kans op succes nog steeds een heel redelijke kans.

Een verwachtingscurve voor een exploratieboring wordt verkregen door een geologisch computermodel te gebruiken. De invoer bestaat dan uit schattingen van de vele parameters (soms wel vijftig) in de vorm van waarschijnlijkheidsverdelingen. Deze worden dan in de computer gecombineerd, eventueel met wereldwijde verdelingen en parameters en een z.g. Monte Carlo-analyse. Deze analyse neemt steekproeven uit de parameter-verdelingen en combineert deze in het model. Door dit duizenden malen te herhalen ontstaat een waarschijnlijkheidsverdeling voor het resultaat. Geologisch gezien heeft een dergelijk model een deel dat de hoeveelheid olie en gas schat die naar de trap migreert ("lading") en een ander deel dat een schatting van het trapvolume maakt. Dan wordt in de Monte Carlo-procedure één toevallige steekproef uit de ladingverdeling genomen en één uit de trap-volume-verdeling. Het minimum van die twee trekkingen wordt geaccepteerd. Want teveel lading voor een kleine trap gaat verder naar een volgende trap, of naar de oppervlakte. En als de lading relatief klein is helpt het niet om een grote trap te hebben.

Voor reserve-rapportage hebben we twee belangrijke systemen. De Society of Petroleum Engineers in de Verenigde Staten (SPE) hebben de terminologie voorgesteld zoals in afb. 5 is aangegeven.



Afb. 5. Verwachtingscurve voor de "uiteindelijke reserves" van een olieveld. Het volume P90 heeft 90% kans om overschreden te worden. De verticale as geeft een percentage voor de kans om meer te vinden dan het corresponderende volume op de X-as.

De termen “bewezen”, “waarschijnlijk” en “mogelijk” worden verbonden met de percentielen. (Percentielen zijn cumulatieve waarschijnlijkheden van een verdeling). Wat ook berekend kan worden is de mathematische verwachting, het gemiddelde van alle mogelijke uitkomsten, inclusief de “nul-uitkomsten”. De term “mogelijk” kan ook vervangen worden door “speculatief”.

Het andere belangrijke instituut, ook Amerikaans, is de “Stock Exchange Commission” (SEC). Deze waakt over beursgenoteerde bedrijven om onder andere ervoor te zorgen dat de aandeelhouders niet bij de neus genomen worden. De oliemaatschappijen moeten de bewezen reserves van olie en gas rapporteren. De SEC-definitie van “bewezen” wijkt nogal af van die van de SPE. Een belangrijk verschil, vooral waar het gas betreft, is dat bewezen reserves eigenlijk al verkocht moeten zijn. Dus een leveringscontract voor het gas moet al getekend zijn. Dit is vanuit financieel oogpunt een redelijke eis. Maar omdat de bewezen reserves maar een deel uitmaken van de mathematische verwachting, kan men op de SEC-definitie geen lange-termijnplanning maken. Steeds worden belangrijke hoeveelheden olie en gas van de waarschijnlijke en mogelijke categorieën overgebracht naar bewezen. Met de SEC-definitie krijgen we dus wel een heel pessimistisch beeld van de waarde van het bedrijf. Het zijn hoofdzakelijk de zojuist besproken verschillen in terminologie die aanleiding gaven tot de grote veranderingen bij Shell.

5. Productie

De olie in de grond wordt geproduceerd uit een aantal productieboorings. Als er genoeg druk in het reservoir is komt de olie vanzelf omhoog. Dat is gunstig, maar ook gevaarlijk. Olie die aardig wat gas bevat komt omhoog in het boorgat en een gedeelte van het gas komt uit oplossing. Dit helpt ook om de olie omhoog te stuwten. Als aan de oppervlakte nog geen installatie is om de stroom in bedwang te houden krijgen we een spuiters (*blow-out*). De beelden uit Kuwait lieten zien dat als de “kerstboom” van kranen die een boorgat moeten afsluiten gesaboteerd wordt, er een grote ramp kan ontstaan.

Sommige olievelden hebben niet zoveel druk, bijvoorbeeld omdat ze door jaren productie druk verloren hebben. Dan moet de olie die wel op diepte in het boorgat stroomt omhoog geholpen worden door een pomp, de bekende jankikker. De druk kan lange tijd in stand blijven als het volume olie dat geproduceerd wordt vervangen wordt door water uit de flanken van de structuur. Zoiets geldt ook voor gasreservoirs.

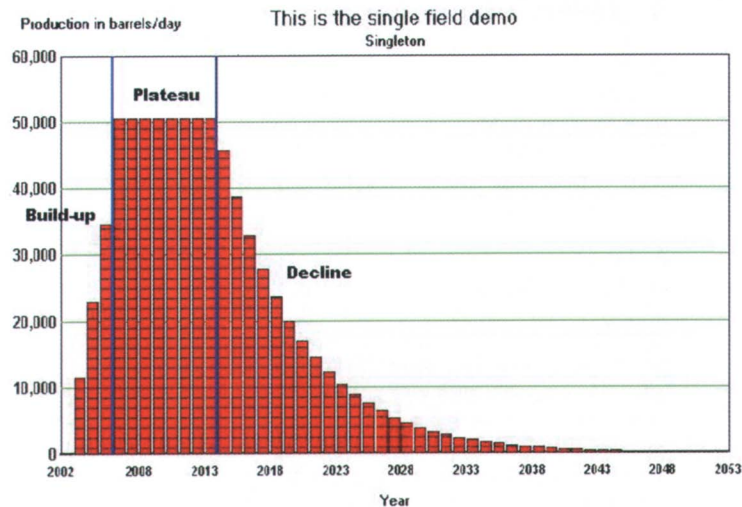
Sommige olievelden hebben een gaskap. Dit zogenaamde “vrije gas” werkt als drijfgas voor de olie, zoals in een verfspuitbus. De gaskap staat onder hoge druk. Boren we in de onderliggende olie dan wordt deze de boorput ingedrukt door het gas.

Gas produceert men gemakkelijker. Maar gas moet wel gereinigd worden van de wat zwaardere componenten die erin voor kunnen komen, de condensaten.

Een olieveld produceert meestal enkele tientallen jaren. Er is een bepaald optimum, bepaald door economische en technische beperkingen. Een typisch productieprofiel toont een eerste opbouwfase, dan een plateau- of piek-fase en dan een afnemende fase (afb. 6)

De Wereld

Een dergelijk productieprofiel kan ook gemaakt worden voor alle conventionele olievelden van de wereld. De schattingen daarover lopen ver uiteen. Om een beeld te krijgen van de toekomst van olie als belangrijke energiebron is het de moeite waard eens te kijken op de website www.PeakOil.org. Er



Afb. 6. Een productieprofiel van een olieveld met 300 miljoen vaten reserves. Verticale as: productie in vaten olie per dag. Horizontale as: tijd. Het duurt hier vier jaar tot de maximum-productie bereikt wordt. Installaties, pijpleidingen en het boren van de productieputten nemen de eerste jaren van opbouw in beslag. Dan is er in dit voorbeeld een periode van 8 jaar maximum-productie. Daarna begint de afnemende fase.

zijn nogal wat analisten die menen dat we over het plateau heen zijn, of dat de afnemende wereld-productiefase in 2007 of 2008 zal beginnen. Dat betekent natuurlijk nog wel tientallen jaren olie, maar zal wel de prijs beïnvloeden. Aardgas is er nog wel genoeg voor deze eeuw.

Over gebrek aan duurdere niet-conventionele olie (b.v. de oliezanden van de Athabasca in Canada en van Venezuela) of gas (b.v. gas uit koolafzettingen of uit gashydraten in de zeebodem) hoeven we ons niet veel zorgen te maken. Die hoeveelheden zijn veel groter dan alle ooit gevonden conventionele koolwaterstofreserves bij elkaar. Het nadeel van die voorraden is dat ze per vat of kubieke meter wel heel wat duurder zijn dan de conventionele voorraden. Maar innovaties in technologie hebben in de conventionele olie-industrie een grote rol gespeeld om de kosten te beperken. Hetzelfde proces is te verwachten als wij gedwongen worden om de onconventionele voorraden verder te benutten.

Literatuuropgave

- Engelse website van de olie-industrie met uitleg over olie-exploratie en -productie: www.oilandgas.org.uk/issues/storyofoil/index.htm
- Geluk, Mark et al. (2000) “The Zuidwending salt dome. A multidisciplinary mapping project”, in: Information, Netherlands Institute of applied Geoscience TNO. Number 5, May 2000, p.5-7.
- Geofoon: Landelijk informatiepunt waar iedereen terecht kan met vragen over bodemdaling en aardbevingen. Zie ook www.geofoon.nl.
- Nederlof, M.H. (2005) Website: <http://ourworld.cs.com/gaeenl/index.htm> (Geeft, in het Engels, uitleg over een computermodel voor het schatten van nog-niet-ontdekte voorraden).
- WWW.PeakOil.org Website waar discussies over de toekomst van wereld-olieproductie gevoerd worden.
- Sluyk, D. & M.H. Nederlof (1984) “Worldwide geological experience as a systematic basis for prospect appraisal”. American Association of Petroleum Geologists Memoir 35, p. 15-26.
- Yergin, Daniel (1990) “The prize, the epic quest for oil, money and power”, Simon and Schuster, New York, 877 p. (Een zeer leesbaar historisch overzicht van de olie-industrie).