



Piet Lubking

VERDICHTINGSGRAAD OF RELATIEVE DICHTHEID - ÉÉN POT NAT?

Beheersing van het materiaal grond is voor de geotechnicus van cruciaal belang; kennis van de basiseigenschappen is een eerste vereiste. Door grond letterlijk en figuurlijk op een verstandige manier in de hand te houden wordt bereikt dat geotechnische problemen niet uit de hand lopen.

In grondwerk en wegenbouw wordt de mate van verdichting van zand op veel verschillende manieren weergegeven. De meest gangbare uitdrukkingen, nationaal en internationaal, zijn daarbij de verdichtingsgraad en de relatieve dichtheid.

Verdichtingsgraad: op basis van één referentie-dichtheid (bijvoorbeeld volgens Proctor)

Ter bepaling van de verdichtingsgraad van in het terrein aangetroffen zand met een droge dichtheid ρ_{dr} wordt deze dichtheid vergeleken met een bepaalde referentiedichtheid ρ_{ref} . De referentiedichtheid wordt gewoonlijk gemeten in een gedocumenteerde laboratoriumproef op een, voor het betreffende terrein representatief monster. Toevoeging van een zekere standaard-hoeveelheid energie aan het monster resulteert in de referentiedichtheid ρ_{ref} . Het quotient ρ_{dr} / ρ_{ref} , vermenigvuldigd met 100% wordt gedefinieerd als de verdichtingsgraad.

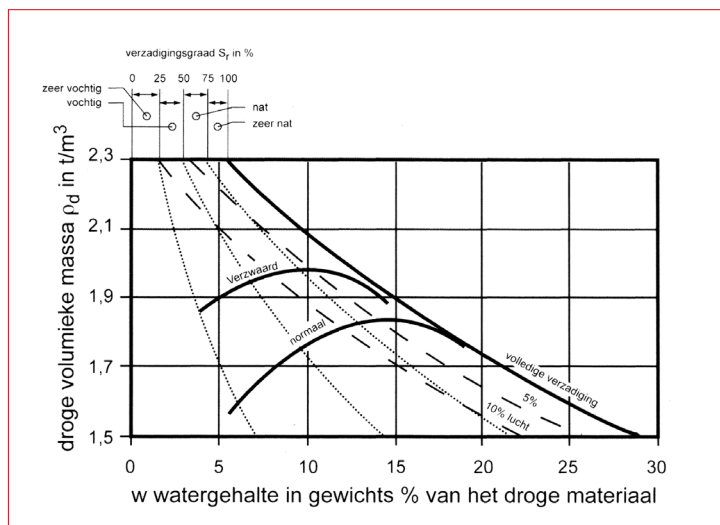
In principe kan elke standaard-laboratoriumproef,

waarbij het monster tot een reproduceerbare pakkingsdichtheid kan worden gebracht dienen als referentieproef voor de verdichtingsgraad. In de internationale praktijk wordt de zogenoemde Proctorproef veelvuldig als referentieproef gehanteerd. Geïnspireerd door de verdichtende werking van schapenpoten op een min of meer cohesieve ondergrond beschreef Proctor in 1933 een stampverdichtingsproef waarbij een metalen stamper in de vorm van een schapenpoot een aantal malen van een vaste hoogte valt op een grondmonster. Het monster wordt op deze wijze in een houder met een bepaalde inhoud laagsgewijs verdicht, zoals beschreven in de Standaard RAW Bepalingen of andere proefbeschrijvingen. Een dergelijke verdichting vindt plaats bij een aantal watergehaltes, waarbij steeds vochtiger monsters worden beproefd. Het proefresultaat wordt gepresenteerd in de vorm van de zogenoemde normale-proctorcurve, waarbij de bereikte droge dichtheid is weergegeven als functie van het watergehalte; zie figuur 1. De top van de curve wordt gedefinieerd als de 'maximum-proctordichtheid' (Engels: maximum proctor density, m.p.d. or mpd), terwijl het bijbehorende watergehalte wordt aangeduid als het optimum-watergehalte (Engels: optimum moisture content, o.m.c. or omc). In de figuur zijn tevens de lijnen van gelijk luchtgehalte en van gelijke verzadigingsgraad getekend.

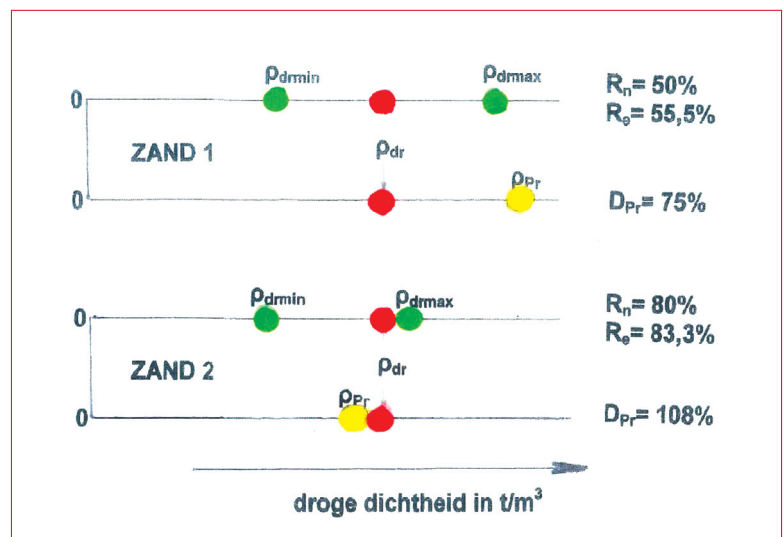
Van de Proctorproef bestaat naast de 'normale' uitvoering ook een 'verzwaarde' procedure, waarbij 4,5 maal meer energie per cm^3 materiaal wordt toegevoegd (grotere valmassa en -hoogte, meer slagen op meer grondlagen). De resulterende verzwaarde-proctorcurve ligt hoger en iets naar links verschoven ten opzichte van de normale curve; zie figuur 1.

De vorm en ligging van de curve worden sterk bepaald door de grondsoort. Grofkorrelige gronden als zand en grind, die goed zijn gegraadeerd en relatief veel fijn materiaal bevatten vertonen een meer geprononceerde curve met een hogere top dan slecht gegraadeerde materialen, zoals bijvoorbeeld de meestal relatief fijne, slecht gegraadeerde, Nederlandse Holocene zanden. Deze zanden leveren een relatief vlakke curve op, zonder duidelijke top. Vaak wordt daarom op dergelijke zanden de verzwaarde proef toegepast. Sommige onderzoekers waarschuwen voor het daarbij optredende risico van verbrijzeling van korrels; als gevolg daarvan kan de gradering van het materiaal zodanig veranderen dat een niet-representatieve proctorcurve resulteert.

De dichtheid ρ_{dr} van in het terrein aangetroffen zand kan nu worden weergegeven in de vorm van de verdichtingsgraad ten opzichte van het proctorresultaat ρ_{Pr} ; de verdichtingsgraad is gedefinieerd als het percentage maximumproctordichtheid of m.p.d., in casu $D_{Pr} = (\rho_{dr} / \rho_{Pr}) \cdot 100\%$. Ten opzichte van het verzwaarde-proctorproefresultaat



Figuur 1 – Resultaat van een normale en verzwaarde Proctorproef op grond.



Figuur 2 – Vergelijking van de verdichtingsgraad D_{Pr} en relatieve dichtheden R_n en R_e van twee verschillende zanden die eenzelfde terrein-dichtheid ρ_{dr} vertonen.

taat $\rho_{V,Pr}$ resulteert de verdichtingsgraad $D_{V,Pr} = (\rho_{dr} / \rho_{V,Pr}) \cdot 100\%$; voor hetzelfde zand ligt dat percentage natuurlijk iets lager dan D_{Pr} .

Relatieve dichtheid: op basis van twee referentie-dichtheden

Ter bepaling van de relatieve dichtheid van in het terrein aangetroffen zand met een droge dichtheid ρ_{dr} wordt deze dichtheid vergeleken met twee referentiedichtheden, de zogenoemde maximum en minimum-dichtheid. Deze referentiedichtheden worden in gedocumenteerde laboratoriumproeven bepaald op, voor het betreffende terrein representatieve monsters. De minimum-dichtheidsbepalingen zijn erop gericht van het zand een zo los mogelijke pakking te creëren door het droge of waterverzadigde materiaal zodanig voorzichtig te deponeren dat een zeer open korrel skelet tot stand komt met een reproduceerbare minimale dichtheid $\rho_{dr,min}$. Bij de maximum-dichtheidsbepalingen wordt, net als bij de Proctorproef een standaard-hoeveelheid verdichtingsenergie (trillend, stampend of kneedend) aan het droge of waterverzadigde monster toegevoegd om een reproduceerbare hoge dichtheid $\rho_{dr,max}$ te bewerkstelligen.

In nationaal en internationaal verband zijn talrijke verschillende proeven beschreven ter bepaling van de extreme dichtheden van zand. Natuurlijk zijn de uitkomsten van die proeven afhankelijk van de proefprocedures. Het is daarom van groot belang om bij relatieve dichtheidsaanduidingen altijd de gehanteerde proefprocedures ter bepaling van de referentiedichtheden te vermelden.

Er zijn in de praktijk twee manieren om de relatieve dichtheid te definiëren, de continentale en de Angelsaksische:

- de continentale relatieve dichtheid D_r (Engels: relative density) is gebaseerd op het poriëngehalte n ; deze wordt in Nederland wel betiteld als het relatief poriëngehalte R_n of de relatieve porositeit D_r :

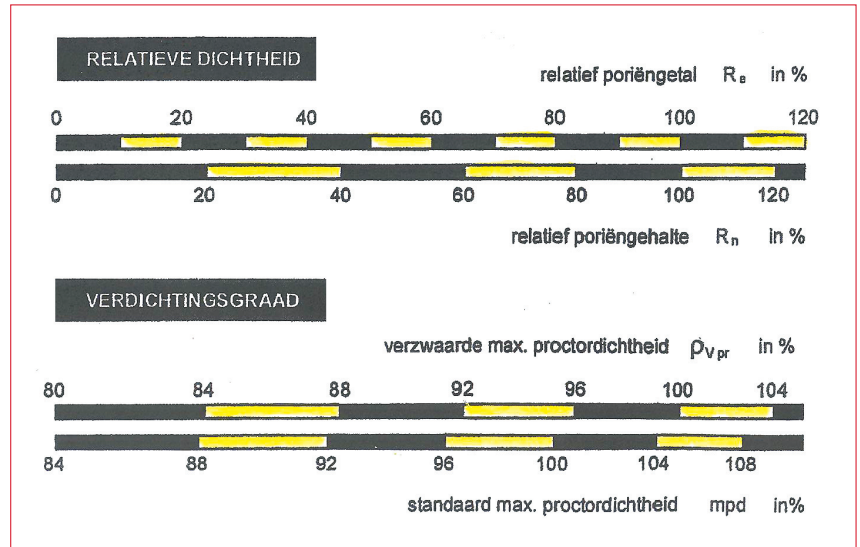
$$D_r = R_n = (n_{max} - n) \cdot 100\% / (n_{max} - n_{min})$$

- de Angelsaksische relatieve dichtheid I_D (Engels: density index) is gebaseerd op het poriëngetal e ; deze wordt in Nederland wel betiteld als het relatief poriëngetal R_e of dichtheidsindex I_D :

$$I_D = R_e = (e_{max} - e) \cdot 100\% / (e_{max} - e_{min})$$

In bovenstaande formules representeren n en e het poriëngehalte respectievelijk het poriëngetal in het terrein, terwijl n_{max} en e_{max} het poriëngehalte respectievelijk het poriëngetal voorstellen behorende bij de minimum-dichtheid. Verder representeren n_{min} en e_{min} het poriëngehalte respectievelijk het poriëngetal behorende bij de maximum-dichtheid.

Figuur 3 -
Kwantitatieve vergelijking tussen relatieve dichtheid (Angelsaksisch of continentaal) en verdichtingsgraad (normale of verzwaarde Proctor).



Vergelijking van verdichtingsgraad en relatieve dichtheid

In figuur 2 zijn de berekende relatieve dichtheden R_n en R_e en de verdichtingsgraad D_{Pr} aangegeven van twee verschillende zanden die eenzelfde terreindichtheid ρ_{dr} (rode stip) bezitten, maar waarvan de extreme dichtheden (groene stippen) en de maximum-proctordichtheid (gele stippen) verschillen.

Voor typisch Nederlandse zanden, die meestal relatief fijn, éénkorrelig en matig afgerond zijn, gelden enkele globale verbanden tussen de uitkomsten van boven beschreven referentieproeven. Daarbij is aangenomen dat de maximum- en minimum-dichtheidsproeven zijn uitgevoerd volgens de ASTM-specificaties, die ongeveer gelijke uitkomsten opleveren als de Deltares(GeoDelft)-procedures; de Proctorproeven zijn uitgevoerd volgens de internationaal gangbare specificaties. Daarbij blijkt:

$$\rho_{dr,max} \approx \rho_{V,Pr} \approx 1,05 \rho_{Pr}$$

$$\rho_{dr,max} / \rho_{dr,max} \approx 1,25$$

Met nadruk wordt erop gewezen dat deze verbanden bij hantering van andere extreme-dichtheidsproeven anders komen te liggen.

Met behulp van bovengenoemde correlaties kan de relatieve dichtheid (R_n of R_e) kwantitatief worden vergeleken met de verdichtingsgraad (D_{Pr} of $D_{V,Pr}$). In figuur 3 is deze vergelijking weergegeven.

Uit deze figuur blijkt dat de verdichtingsgraad $D_{V,Pr}$ van vastgepakt zand ($D_{V,Pr} = \text{circa } 100\%$) qua getalswaarde weliswaar globaal overeenkomt met de beide relatieve dichtheden, maar dat beneden deze waarde snel grote discrepanties optreden tussen de percentages verdichtingsgraad en relatieve dichtheid. In de praktijk worden beide aanduidingen van de mate van verdichting vaak met elkaar verward. Het zal duidelijk zijn dat daaruit veel misverstanden en conflicten kunnen ontstaan.

(On)geschiktheid Proctorproef voor Nederlandse zanden

Tenslotte wordt opgemerkt dat in Nederland de verdichtingsgraad volgens Proctor vrijwel algemeen wordt gehanteerd als aanduiding van het verdichtingsresultaat van zand. In diverse andere landen wordt de keuze tussen de aanduiding in de vorm van de verdichtingsgraad en de aanduiding in de vorm van de relatieve dichtheid onder andere afhankelijk gesteld van de zandsamenstelling. ASTM suggereert bijvoorbeeld een criterium van 12% deeltjes kleiner dan $74\mu\text{m}$ als grens tussen beide benaderingen; bij minder fijne deeltjes wordt gebruik van de relatieve dichtheid aanbevolen, bij meer fijne deeltjes heeft toepassing van de verdichtingsgraad volgens Proctor de voorkeur.

Als deze suggestie wordt gevolgd zou het verdichtingsresultaat van met name de typisch Nederlandse, uniforme, fijne Holocene zanden moeten worden uitgedrukt door middel van de relatieve dichtheid in plaats van de meestal gehanteerde verdichtingsgraad. Deze zanden leveren in de regel ook een vlakke proctorcurve op. In dergelijke gevallen is hantering van het 'percentage maximum-proctordichtheid' als aanduiding van de bereikte of vereiste mate van verdichting dan ook meestal weinig effectief. Hoewel veel Nederlandse voorschriften het 'percentage maximum-proctordichtheid' als criterium hanteren vormt de relatieve-dichtheidsaanduiding voor typisch Nederlandse zanden dus een meer adequate kwantificering.

Deze en andere onderwerpen die voor de praktiserende geotechnicus interessant en belangrijk kunnen zijn, komen aan de orde in de door PAO Techniek en Management aangeboden cursus CGF-M (Masterclass 'Handen aan de grond') en worden behandeld in het bijbehorende boek 'Grondgedrag' (www.grondgedrag.nl). ●