



Piet Lubking

PRIKKEN IN KLEI #2

DE CBR-STEMPEL

De California Bearing Ratio (CBR) is een "draagkracht"-parameter die in het terrein of in het laboratorium (op geroerde of ongeroerde monsters) wordt bepaald door middel van een gestandaardiseerde indringproef. Anders dan de valconusproef, waarbij een conusvormig lichaam de grond penetreert door de impact van de vallende conus, is de penetrerende CBR-stempel een schaalmodel van een ronde, stijve funderingsplaat die verplaatsingsgestuurd tot bezwijken wordt gebracht. In figuur 1 is het patroon van glijlijnen en vervormingen van de ondergrond in beide situaties (valconus en CBR-stempel) met elkaar vergeleken.

De CBR-waarde wordt in de wegenbouw gebruikt als basis voor de dimensionering van funderingslagen van wegen en vliegvelden; in de bodemkunde en geotechniek wordt de CBR-waarde gehanteerd als aanduiding van de begaanbaarheid of stabiliteit van de natuurlijke grondslag.

De proefuitvoering

De CBR-proef behelst een verplaatsingsgestuurde, langzame penetratie van een cilindervormige

stempel (doorsnede $B = 49,6$ mm en oppervlakte 3 sq. inch of $19,35$ cm²), die met een snelheid van $0,05$ inch/min (21 μ m/s) in de grond wordt gedrukt tot een diepte van minstens $0,2$ inch ($5,08$ mm) en maximaal $0,5$ inch ($12,7$ mm); zie figuur 2. De penetratiesnelheid van de stempel is daarmee circa 1000 maal trager dan die van een standaard-sondeerconus. Tijdens de penetratie wordt eventueel terzijde van het belaste oppervlak een bovenbelasting aangebracht die representatief is voor de druk die in situ op het funderingsniveau heerst ten gevolge van het gewicht van de aanwezige lagen (verharding of grond); zie figuur 2.

De voor penetratie benodigde kracht wordt geregistreerd en het kracht-verplaatsingsdiagram van het ondergrondmateriaal wordt vergeleken met dat van eenzelfde proef op een standaardmateriaal, bestaande uit gebroken rots. Enige voorbeelden van kracht-verplaatsingsdiagrammen van grondsoorten (curve A en B) zijn weergegeven in figuur 3 tezamen met het diagram van gebroken rots. De CBR-waarde van het ondergrondmateriaal bij $0,1$ inch en bij $0,2$ inch penetratie wordt gede-

finieerd als de verhouding tussen de spanning p_A respectievelijk p_B van dat materiaal en de overeenkomstige kracht of spanning bij gebroken rots, vermenigvuldigd met 100% . Voor gebroken rots bedraagt de kracht $13,5$ kN (3000 lbs) respectievelijk $20,3$ kN (4500 lbs), terwijl de grootte van de spanning 6895 kPa (1000 psi) respectievelijk 10343 kPa (1500 psi) is; zie figuur 3.

In de meeste gevallen zal de CBR-waarde bij $0,1$ inch penetratie hoger liggen dan die bij $0,2$ inch penetratie; de eerstgenoemde CBR-waarde wordt dan als proefresultaat beschouwd. Indien de $0,2$ inch-CBR hoger ligt wordt het monster opnieuw beproefd. Is de $0,2$ inch-CBR wederom hoger, dan wordt deze als proefresultaat gehanteerd. In de praktijk blijkt de $0,1$ inch-CBR meestal maatgevend als proefresultaat

Globaal verband tussen CBR-waarde en ongedraineerde sterkte

De grootte van het grensdragvermogen q_u van de stempel bij statische, ongedraineerde belasting van de klei-ondergrond ($\varphi = 0$) en bij afwezigheid van een zijdelingse bovenbelasting kan worden afgeleid op basis van de draagkrachtformule van Prandtl, aangepast voor een ronde, ruwe funderingsplaat, waarvan de penetratiediepte D zeer klein is ten opzichte van de plaatdiameter B :

$$q_u = N_c \cdot s_c \cdot c_u = 5,7 \times 1,2 \times c_u$$

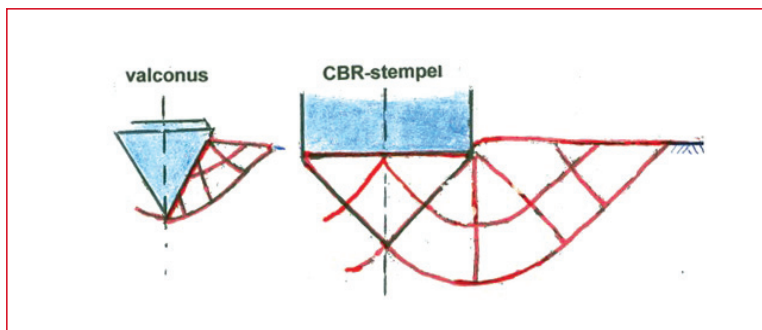
Daarin is c_u de ongedraineerde schuifweerstand van de ondergrond. N_c is een draagkrachtcoëfficiënt en s_c een vormfactor; beide zijn afhankelijk van de hoek van inwendige wrijving φ . Daardoor kan worden gesteld dat q_u [kPa] $\approx 7 c_u$ [kPa].

Volgens de definitie komt CBR = 100% bij een penetratie van $2,54$ mm ($0,1$ inch) overeen met een standaardkracht op de CBR-stempel ter grootte van 13.240 N en met een spanning beneden de stempel ter grootte van 6895 kPa. Verder blijkt uit veel praktijkmetingen dat bij een stempelpenetratie van $2,54$ mm in normaal-geconsolideerde (NC-) of verstoorde klei de spanning beneden de stempel ongeveer de helft van het grensdragvermogen bedraagt: $p_A = 0,5 q_A$; zie het spanningsverplaatsingsdiagram A van NC-klei in figuur 3. Daardoor is:

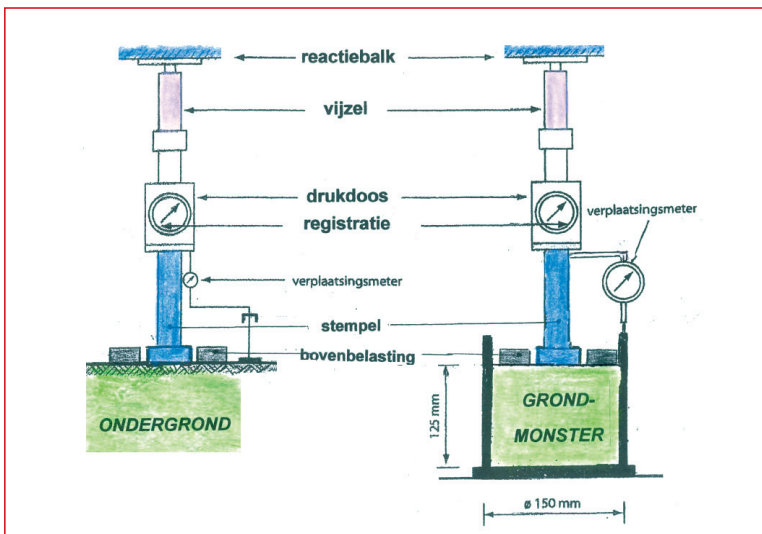
$$CBR[\%] \approx 0,5 q_u / 68,95 \approx 0,05 c_u$$

Voor relatief slappe, NC-klei, zoals die veelvuldig in West-Nederland voorkomt, alsmede voor sterk verstoorde klei geldt dus de globale betrekking: c_u [kPa] \approx circa 20 CBR[%]

Figuur 1 - Glijlijnen en vervormingen bij penetrerende valconus en CBR-stempel.



Figuur 2 - Principe van een CBR-proef in het terrein en in het laboratorium.



In overgeconsolideerde (OC-), onverstoorde klei treedt bij een penetratie van 2,54 mm van de stempel een spanning op die meestal iets groter is dan driekwart van het grensdragvermogen, terwijl het grensdragvermogen van de stempel wordt bereikt voordat een penetratie van 5,08 mm (0,2 inch) is gerealiseerd; zie de spanning $p_B = \text{circa } 0,85 q_B$; zie het spanningsverplaatsingsdiagram B van OC-klei in figuur 3. Voor relatief stijve, overgeconsolideerde, onverstoorde klei geldt daardoor ruwweg:

$$CBR[\%] \approx 0,85 / 68,95, \text{ zodat:}$$

$$c_u [\text{kPa}] \approx \text{circa } 12 \text{ CBR}[\%]$$

Globale verbanden tussen CBR-waarde en vervormingsparameters

Voor een simpele, globale analyse van het vervormingsgedrag van de grond onder de penetrerende stempel wordt soms de spannings-vervormingscurve van de klei volgens figuur 3 opgevat als het resultaat van een mini-plaatbelastingsproef, uitgevoerd met een stijve plaat (diameter $B = 49,6 \text{ mm}$). Vanaf de oorsprong vertoont de curve daarbij een vrijwel lineair verloop tot aan de verticale vervorming van $D = 2,54 \text{ mm}$ (0,1 inch) die maatgevend is voor de bepaling van de CBR-waarde. Het quotiënt van spanning en vervorming representeert de beddingsconstante k_{CBR} van de CBR- stempel :

$$k_{CBR} [\text{MPa/m}] = p / D = 0,01 \text{ CBR}[\%] .$$

$$6,895 / 0,00254 \approx 27 \text{ CBR}[\%]$$

Volgens de elasticiteitstheorie wordt het zettingsgedrag van een stijve plaat, gelegen op een half-oneindige ruimte van (homogeen, isotroop en lineair-elastisch) ondergrondmateriaal beschreven als:

$$z = f . p . r (1 - \nu^2) / E \text{ ofwel } E = f . r (1 - \nu^2) p / D$$

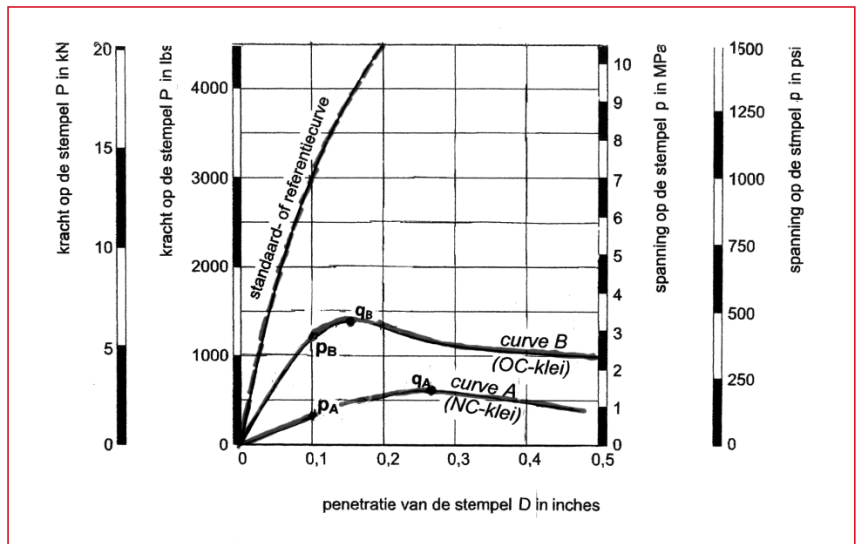
waarin de plaatszakking D en de straal van de plaat $r = B/2$ de dimensie van een lengte (bijvoorbeeld m) hebben, terwijl de plaatbelasting p en de elasticiteitsmodulus E van de grond onder de stempel als een spanning (bijvoorbeeld MPa) worden uitgedrukt. De factor f is daarbij afhankelijk van de plaatstijfheid; bij een volkomen stijve plaat als de CBR-stempel bedraagt de factor $f = \pi/2 = 1,57$. Wanneer voor de dwarscontractiecoëfficiënt ν van klei wordt aangenomen dat $\nu = 0,5$, geldt voor de CBR-stempel ($r = 0,0248 \text{ m}$) bij een penetratie van $D = 0,0254 \text{ m}$ in de klei-ondergrond:

$$E_{CBR} [\text{MPa}] = 1,57 \times 0,0248 (1 - 0,52) p_A / D_A =$$

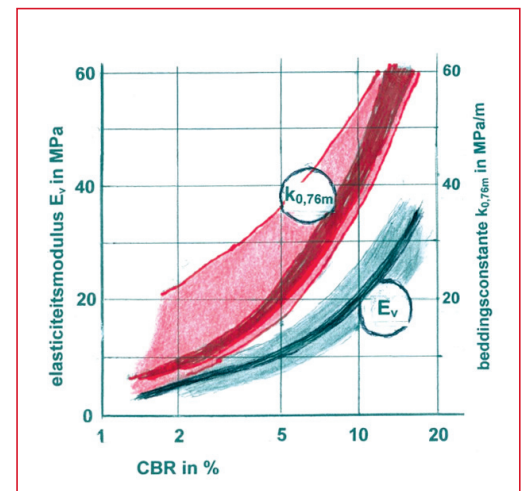
$$0,03 \times 27 \text{ CBR}[\%] = 0,8 \text{ CBR}[\%]$$

Talrijke onderzoekers hebben aangetoond dat de beddingsconstante van de grond daalt naarmate de plaatdiameter groter is, terwijl plaatdiameters groter dan circa 0,76m (30 inch) geen verdere afname van de beddingsconstante laten zien. Als beddingsconstante van de ondergrond wordt dan ook vaak $k_{0,76m}$ aangehouden, dat wil zeggen de

Figuur 3 -
Principe van een CBR-proef in het terrein en in het laboratorium.



Figuur 4 -
Globale, analytisch afgeleide en in de praktijk gevonden verbanden tussen CBR-waarde en vervormingsparameters beddingsconstante k en elasticiteitsmodulus E .



k -waarde, ontleend aan een plaatbelastingsproef met een 0,76m-plaat. Uit praktijkproeven van Stratton blijkt dat k -waarden, ontleend aan plaatbelastingproeven met kleinere diameter moeten worden gereduceerd met een zekere factor teneinde de "werkelijke" k -waarde van de ondergrond te vinden. Daarbij geldt:

$$k_{0,76m} \approx k_{0,50m} / 1,25 \approx k_{0,30m} / 2,1 \approx k_{0,05m} / 6,4 = k_{CBR} / 6,4$$

Daardoor is: $k_{0,76m} \approx 27 \text{ CBR} / 6,4 \approx (4-4,5) \text{ CBR}[\%]$ terwijl verder:

$$E_{076m} [\text{MPa}] = 1,57 \times 0,38 (1 - 0,52) k_{CBR} / 6,4$$

ofwel $E_{076m} [\text{MPa}] \approx 2 \text{ CBR}[\%]$.

In figuur 4 zijn de hierboven afgeleide globale relaties tussen CBR-waarde en vervormingsparameters, in casu de beddingsconstante k en de elasticiteitsmodulus E bij eerste vervorming weergegeven door middel van dikke getrokken lijnen. Tevens zijn de ranges ingetekend die doorgaans in praktijkwaarnemingen worden gevonden.

Restricties

Hoewel de CBR-waarde in principe een aanduiding is van zowel de sterkte als de stijfheid van de ondergrond dienen bovengenoemde correlaties tussen CBR-waarde en sterkte-, dan wel stijfheidswaarden met voorzichtigheid te worden gehanteerd. Met name ten aanzien van de verbanden tussen CBR-waarde en de vervormingsparameters merken diverse onderzoekers op dat ze voor klei

weinig consistent zijn.

Tevens moet worden opgemerkt dat bovengenoemde afleidingen een statische belasting-situatie betreffen; de CBR-proef kan worden beschouwd als een relatief langzame penetratieproef. Bij snellere, dynamische proeven gedraagt de grond zich veel stijver en gelden andere correlaties met de CBR-waarde. Een bekende betrekking tussen een dergelijke elasticiteitsmodulus (de zogenoemde resilient modulus E_r) en de CBR-waarde luidt: $E_r [\text{MPa}] \approx 10 \text{ CBR}[\%]$. Diverse onderzoekers geven aan dat de dynamische E -waarden als regel een aantal malen hoger liggen dan de statisch-bepaalde E -moduli.

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). ●