



Piet Lubking

PRIKKEN IN KLEI (4) DIVERSE CONUSVORMEN



Figuur 1 – Voorbeelden van penetrometers, met verschillen in ruwheid, tophoek en diameter van de conus.

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 de loop der jaren zijn er in de geotechniek, maar ook in de bodemkunde talrijke penetrometers ontwikkeld voor onderzoek van de oppervlaktelaag. In figuur 1 zijn diverse van deze conusvormen afgebeeld. Dergelijk penetrometeronderzoek vindt in het terrein meestal plaats vanaf het maaiveld of vanaf de bodem van een ingraving, en in het laboratorium vanaf het oppervlak van relatief grote grondmonsters. De gemeten penetratieweerstand geeft inzicht in bodemeigenschappen als beloopbaarheid en berijdbaarheid van de top-laag, in bewerkbaarheid en doorwortelbaarheid van de agrarische grond en in het mechanisch gedrag van funderingslagen.

De penetrometers worden gewoonlijk gevormd door een staaf waaraan een conusvormige punt is bevestigd. De schacht met de conus wordt verticaal in de grond gedrukt en de daarvoor benodigde kracht wordt geregistreerd als de conus- of sondeerweerstand in kN of MN, dan wel in kPa of MPa. De diameter van de schacht is als regel kleiner dan de diameter van de basisplaat van de kegel. De conuspunt heeft een tophoek (Engels: apex angle) van 30, 60 of 90 graden (hoewel soms ook top-hoeken van 15 graden (zeer scherpe punt) of 180 graden (vlakke punt) voorkomen; zie figuur 2. Vaak wordt de conus enigszins verstevigd door de basisplaat over een zekere afstand te verhogen; zie de

eerste en laatste conus van figuur 2. De kegelwand is meestal glad, maar na enige corrosie kan een zekere ruwheid optreden. Soms wordt een volkomen ruwe kegelwand gecreëerd door in het oppervlak een trapjesvorm van concentrische ringen te frezen; zie het detail van de trapjesvorm in figuur 2.

De basisdiameter van de conus kan variëren van ongeveer 1 cm tot 3 à 4 cm, een en ander afhankelijk van de grondsoort en de beschikbare penetratiekracht. Om te bewerkstelligen dat de penetratieweerstand louter bestaat uit de weerstand die de conuspunt ondervindt (zonder de schuifweerstand langs de achter de conus bevestigde schacht), is de schachtdiameter in principe kleiner dan de conusdiameter. Bij de zogenoemde oppervlakkige conuspenetratie is de indringing, dat wil zeggen de verticale verplaatsing van de basisplaat van de conus in de praktijk meestal niet groter dan enige decimeters.

Analyse mini-funderingsplaat

Evenals de CBR-stempel en de pocket-penetrometer kan de conuspenetrometer worden opgevat als een mini-uitvoering van een belaste funderingsplaat. De grootte van het grensdragvermogen q_b van een plaat kan bij ongedraineerde belasting van de klei-ondergrond ($\varphi = 0$) worden afgeleid op basis van de draagkrachtformule van Prandtl, aangepast voor een ronde, ruwe funderingsplaat met een penetratiediepte D en een plaatdiameter B . De formule voor het grensdragvermogen q_b van een funderingsplaat luidt:

$q_b = N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot c_u$
 waarbij q_b en c_u de dimensie van een spanning hebben. Het grensdragvermogen Q_b [kracht] van de mini-funderingsplaat is daardoor:

$Q_b = A \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot c_u$
 Daarbij is het oppervlak van de basisplaat gelijk aan $A = 0,25\pi \cdot B^2$, terwijl N_c een draagkrachtcoëfficiënt voorstelt en s_c een vormfactor. Beide parameters zijn afhankelijk van de hoek van inwendige wrijving φ , die in geval van ongedraineerd belaste klei gelijk is aan nul, waardoor $N_c = 5,7$ en $s_c = 1,2$.

Verder is de zogenoemde dieptefactor d_c een functie van de verhouding D/B ; in de literatuur worden voor situaties waarbij $D/B \approx 1$ waarden gegeven van $d_c = 1,2 - 1,4$.

Om het totale grensdragvermogen of de volledige penetratiekracht Q_u van een fundering (zoals bijvoorbeeld de CBR-stempel en de pocket-penetrometer) te bepalen dient tevens de kleefkracht Q_f langs de zijkant of schacht in rekening te worden gebracht; deze bedraagt: $Q_f = \pi \cdot B \cdot H \cdot F \cdot c_u$. Daarin is F de langs de verticale schacht heersende verhouding tussen adhesie en cohesie, terwijl H de schachthoogte representeert. Zodoende geldt algemeen voor het totale grensdragvermogen:

$$Q_u[\text{kracht}] = Q_b + Q_f = (A \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c + \pi \cdot B \cdot H \cdot F) \cdot c_u$$

of

$$q_u[\text{spanning}] = Q_u / A = (N_c \cdot s_c \cdot d_c + \pi \cdot B \cdot H \cdot F) / (0,25 \pi \cdot B^2) \cdot c_u$$

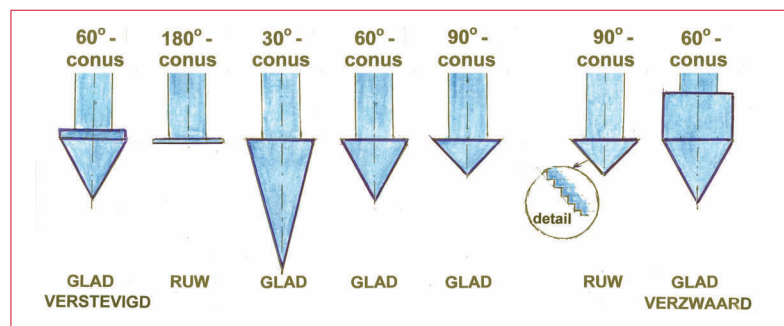
zodat: $q_u[\text{kPa}] = (5,7 \times 1,2 \times 1,28 + 4H \cdot F/B) \cdot c_u[\text{kPa}]$

Bij de CBR-proef wordt de stempel als regel slechts weggedrukt tot een maximale diepte van 0,5 inch. In dat geval is $D/B = 0,5 \times 2,54 \text{ cm} / 4,96 \text{ cm} \approx 0,25$. Bij de pocket-penetrometer is de voorgeschreven penetratiediepte gelijk aan de penetrometerdiameter, zodat $D/B = 1$. In beide gevallen is de penetratiediepte D gelijk aan de schachthoogte H en moet ter bepaling van de totale penetratieweerstand de weerstand die de weggedrukte basisplaat ondervindt worden vermeerderd met de kleefweerstand q_f langs de schacht; deze is gelijk aan $q_f[\text{kPa}] = (4H \cdot F/B) \cdot c_u[\text{kPa}]$.

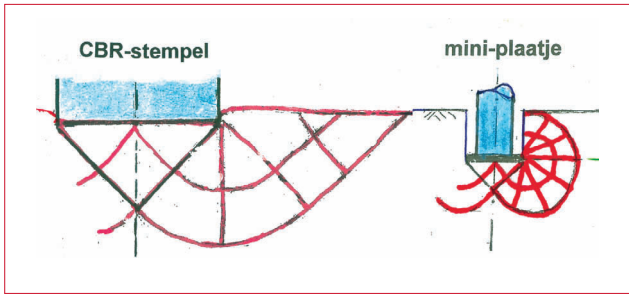
De weggedrukte mini-funderingsplaat kan worden opgevat als een 180-gradenconus (vlakke conuspunt). Omdat doorgaans de plaatdikte of hoogte H zeer klein is ten opzichte van de diameter B kan voor normaal-geconsolideerde, slappe klei conform bovenstaande formule en onder aanname van $F \approx 1$ worden afgeleid dat de kleefweerstand $q_f[\text{kPa}] = (4H \cdot F/B) \cdot c_u[\text{kPa}]$ zeer klein tot verwaarloosbaar is: daardoor bedraagt de plaat- of conusweerstand $q_c[\text{kPa}] \approx 9 \cdot c_u[\text{kPa}]$.

Funderingsplaatje, 90-gradenconus en verzwaarde conus

Zoals reeds is besproken bij analyse van de CBR-stempel en de pocket-penetrometer zullen de glijlijnen die vertrekken van de basis van de plaat bij initiële penetratie naar het maaiveld lopen, maar bij voortschrijdende penetratie tenslotte terugbuigen naar de schacht. Laatstgenoemde situatie wordt bij de mini-plaatbelastingproef op normaal-geconsolideerde klei en een ongedrai-



Figuur 2 – Diverse conusvormen voor ondiepe penetratie.



Figuur 3 - Glijlijnenpatronen bij een CBR-proef en bij een vlakke-conuspenetratie tot de grensdiepte.

neerde belastingtoestand bereikt bij een zogenoemde grensdiepte van $D \approx 0,7B$; zie figuur 3. Op de grensdiepte is het grensdraagvermogen van de weggedrukte belastingplaat, dat wil zeggen van een penetrometer met een vlakke conuspunt en een schachtdiameter die kleiner is dan de plaatdiameter, te definiëren als:

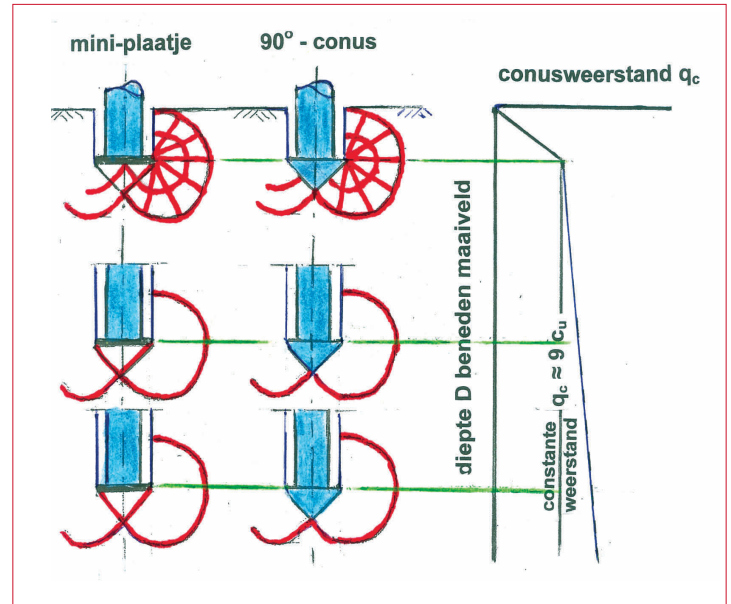
$$q_b = N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot c_u = 5,7 \times 1,2 \times 1,3 c_u \approx 9 c_u$$

Uit het glijlijnenpatroon tijdens penetratie blijkt verder dat onder het plaatje een grondkegel met een tophoek van 90 graden wordt gevormd die, evenals het gehele glijlijnenpatroon bij de grensdiepte ongewijzigd blijft bij verdere penetratie; zie figuur 4a. Daardoor is de benodigde penetratiekracht beneden de grensdiepte in principe constant; zie het verloop van de penetratieweerstand met de diepte ofwel de sondering van figuur 4b. Zoals ook in figuur 4b is te zien neemt de penetratieweerstand op grotere diepte nog enigszins toe als gevolg van de met de diepte toenemende terreinspanning. De gradiënt van de toename is volgens veel onderzoekers afhankelijk van de plasticiteitsindex van de klei.

Indien de grondkegel onder de basisplaat wordt vervangen door een ruwe 90-gradenconus zal het glijlijnenpatroon en daardoor ook de penetratieweerstand q_c [kPa] niet veranderen (zie figuur 4a+b). Het weggedrukte plaatje levert dus eenzelfde penetratieweerstand op als de ruwe 90-gradenconus. In beide gevallen bedraagt de zogenoemde conusfactor $N_k = q_c/c_u \approx 9$ en ontstaat een sondering als van figuur 4b.

Toepassing van een ruwe conus met een andere tophoek dan 90 graden of van gladde conustypen levert een ander glijlijnenpatroon op en zal daardoor ook resulteren in een andere conusweerstand c.q. conusfactor. Ook een andere dimensionering van de conus door een opstaande rand achter de kegelvorm aan te brengen (zie de eerste en laatste conus van figuur 2) zal het glijlijnenpatroon veranderen. Zoals blijkt uit bovenstaande formules zal in die gevallen de penetratieweerstand van de weggedrukte conus q_c [kPa] toenemen met de wrijvingscomponent q_f [kPa] = $(4H.F/B)c_u$ [kPa], waarbij H de randhoogte representeert. Daardoor kan de conusfactor N_k in belangrijke mate toenemen.

Figuur 4a+b - Glijlijnenpatronen bij een ruwe vlakke conus en een ruwe 90-gradenconus op diverse penetratiediepten met bijbehorende sondering.



Wanneer de randhoogte H van de conus relatief groot is ontstaat een massievere conus die normaliter wordt gebruikt als slagsonde; zie het laatste conustype van figuur 2. Een dergelijke conus, die wordt weggeslagen in plaats van weggedrukt, wordt betiteld als slagsondeconus. Bij de dynamische penetratie van de slagsonde zal de ondergrond zich bovendien stijver gedragen, zodat daarbij nog hogere weerstanden worden gemeten.

Effecten van randvoorwaarden bij conuspenetratie

Uit meerdere series laboratoriumexperimenten en verificatieberekeningen met diverse computerprogramma's blijken de volgende algemene tendensen voor wat betreft de invloed van de respectieve randvoorwaarden (zoals tophoek, ruwheid, diameter en penetratiesnelheid van de conus) op de grootte van de conusweerstand:

- Bij normaal gangbare conussen is de conusweerstand onafhankelijk van de diameter. Slechts bij extreem grote diameters worden enigszins lagere weerstanden gemeten, terwijl bij extreem kleine diameters soms veel hogere weerstanden worden waargenomen.
- Bij gladde conussen worden geen noemenswaardige verschillen in conusweerstand gevonden tussen resultaten van 30°, 60°- en 90°- conussen. Conussen met een zeer scherpe tophoek (<15 graden) leveren vanwege een relatief groot conusoppervlak wel hogere weerstanden op.
- Met ruwe conussen worden in het algemeen 5-15% hogere weerstanden geregistreerd dan met overeenkomstige gladde conussen. Daarbij zijn de verschillen bij 30°-conussen groter dan bij 60°- en 90°-conussen.
- Van de ruwe conussen vertonen de 90°- en 180°-conus eenzelfde conusweerstandverloop; de conusfactor bedraagt in beide gevallen

$N_k = q_c/c_u \approx 9$. De ruwe 60°-conus registreert ten opzichte van deze typen een circa 5% hogere en de ruwe 30°-conus een circa 10% hogere weerstand; de conusfactoren van laatstgenoemde instrumenten zijn dan ook groter.

- De penetratiesnelheid kan de grootte van de conusweerstand in aanzienlijke mate beïnvloeden. Met name bij veel hogere snelheden dan de meest gangbare sonderingsnelheid van circa 20mm/s worden relatief hoge weerstanden gemeten: een snelheidstoename van 1mm/s naar 1000mm/s levert een 50% hogere en een toename van 2,5mm/s naar 250mm/s een 30% hogere conusweerstand op.

Wanneer het kleimateriaal vanwege een gedraaide belastingtoestand niet voldoet aan de conditie $\varphi = 0$ kan de conusfactor gemakkelijk oplopen tot waarden groter dan $N_k =$ circa 10; in overgeconsolideerde klei kunnen nog veel hogere waarden worden waargenomen. In de geotechnische praktijk worden bij de gestandaardiseerde elektrische, gladde 60-gradenconus met een diameter van 36mm in zachte, normaal-geconsolideerde klei doorgaans conusfactoren aangehouden van $N_k =$ circa 10-15 en in harde, overgeconsolideerde klei van $N_k =$ circa 15-20. ●

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).



TECHNIEK
EN MANAGEMENT