

Schijnbare cohesie van onverzadigde gronden

ir. Valérie Whenham
Wetenschappelijk en
Technisch Centrum voor het
Bouwbedrijf – WTCB



ir. Monika De Vos
Wetenschappelijk en
Technisch Centrum voor het
Bouwbedrijf – WTCB



De traditionele dimensioneringsmethoden voor de helling van de wanden in bouwputten, sleuven of keerconstructies houden geen rekening met het effect van de zuigspanning die optreedt in onverzadigde gronden (i.e. gronden boven het grondwaterpeil die beschermd zijn tegen neerslag) en dat deze laatste van een bijkomende schijnbare cohesie en afschuifweerstand voorziet. Deze leemte in de dimensioneringsmethoden ligt niet alleen aan de grondslag van de schijnbaar onverklaarbare stabiliteit van bepaalde uitgravingen, maar ook van de al even onverwachte instorting van bepaalde andere.

Naar aanleiding van deze vaststelling voerde het WTCB van 2003 tot 2009 [6, 7] een onderzoek uit dat als oogmerk had om aanbevelingen voor het ontwerp van tijdelijke taluds op te stellen, rekening houdend met het effect van de zuigspanning in onverzadigde gronden. Bepaalde conclusies uit dit onderzoek kunnen overigens ook toegepast worden op het ontwerp van beschoeiingswanden.

Bij het ontwerp van een bouwput moeten er verschillende parameters in acht genomen worden: de vereiste diepte, de aard van de grond, de aanwezigheid van water, de termijn gedurende welke

de bouwput open dient te blijven en externe factoren zoals bovenbelastingen en trillingen. Met deze parameters en de eventuele uitvoeringsrisico's in het achterhoofd kan men vervolgens overgaan tot de bepaling van de geometrie van de bouwput. Dit kan ofwel gebeuren met behulp van een stabiliteitsberekening of door te steunen op een (minder nauwkeurige) inschatting op basis van ervaring.

In een vorig artikel uit 2007 [8] werden de fundamentele principes voor de uitvoering van bouwputten uiteengezet. Op basis van een experiment dat uitgevoerd werd in het WTCB-proefstation te Limelette werd in dit artikel eveneens een kwalitatieve beschrijving gegeven van het effect van de zuigspanning. Voorliggend artikel vormt een aanvulling op deze publicatie en beschrijft de manier waarop men bij de dimensionering van bouwputten en beschoeiingen rekening kan houden met het positieve effect van de zuigspanning door gebruik te maken van een bijkomende afschuifweerstandparameter, die ook wel aangeduid wordt als de schijnbare cohesie of matrixcohesie. Terwijl de intrinsieke cohesie bij kleihoudende gronden afhankelijk is van de aard van de grond, is de schijnbare cohesie eerder het

gevolg van de zuigspannings- of vochtigheidstoestand van de grond en kan ze mettertijd variëren.

Dankzij deze bijkomende afschuifweerstand, die toe te schrijven is aan het effect van de zuigspanning in onverzadigde gronden, kan men overwegen om steilere bouwputten of lichtere beschoeiingsconstructies uit te voeren, op voorwaarde dat er op de bouwplaats meetsystemen ter bepaling van de zuigspanning aanwezig zijn en dat er maatregelen getroffen werden om de toevoer en/of opstapeling van water in de bouwput of achter de beschoeiingswand tegen te gaan (draineersysteem, eventueel dekzeil).

De zuigspanning kan opgemeten worden met behulp van erg goedkope en quasi-autonome sensoren die de gegevens automatisch kunnen opslaan en verzenden. De installatie van dergelijke sensoren op de bouwplaats vergt evenwel een zekere ervaring, aangezien er voor de uitvoering ervan bepaalde voorzorgen moeten getroffen worden. Dankzij het onderzoek van de zes afgelopen jaren heeft het WTCB hieromtrent de nodige ervaring opgebouwd en kon tevens aangetoond worden dat de meting van de zuigspanning op de bouwplaats zowel op economisch als op veiligheidsvlak van groot belang kan zijn.



Figuur 1 – Links: voorbeeld van een bouwput waarvan de stabiliteit niet verklaard kan worden met de traditioneel aanbevolen rekenmethoden en grondparameters. Boven: bruuske en onverwachte instorting van een bouwput.

Samenvatting

De traditionele dimensioneringsmethoden voor de helling van de wanden in bouwputten, sleuven of keerconstructies houden geen rekening met het effect van de zuigspanning die optreedt in onverzadigde gronden. Deze leemte in de dimensioneringsmethoden ligt niet alleen aan de grondslag van de schijnbaar onverklaarbare stabiliteit van bepaalde uitgravingen, maar ook van de al even onverwachte instorting van bepaalde andere. In een vorig artikel uit 2007 werden de fundamentele principes voor de uitvoering van bouwputten uiteengezet. Voorliggend artikel vormt een aanvulling op deze publicatie en beschrijft de manier waarop men bij de dimensionering van bouwputten en beschoeiingen rekening kan houden met het positieve effect van de zuigspanning door gebruik te maken van een bijkomende afschuifweerstandparameter, die ook wel aangeduid wordt als de schijnbare cohesie of matrixcohesie.

1. Gebruikelijke dimensioneringsparameters voor bouwputten en beschoeiingswanden

1.1. Dimensioneringsprincipe

In principe heeft de dimensionering van een bouwput tot doel om de steilste mogelijke helling voor een welbepaalde situatie te bepalen, rekening houdend met de aard en de geotechnische eigenschappen van de ondergrond, de diepte van de uitgraving en de eventuele andere uitvoeringsparameters. Als het, gelet op de geometrische vorm van de uitgraving en/of de geotechnische voorwaarden (onvoldoende weerstand van de ondergrond, aanwezigheid van water,...), onmogelijk is om een niet-ondersteunde wand uit te voeren, zal men zijn toevlucht moeten nemen tot de plaatsing van een beschoeiing.

1.2. Traditionele grondparameters

Voor de dimensionering van een bouwput zijn vooral de volgende geotechnische parameters van belang:

- de volumieke massa
- de effectieve cohesie
- de interne wrijvingshoek.

Bij beschoeiingen dient men eveneens over te gaan tot een inschatting van de vervormbaarheid van de aanwezige ondergrond. Deze geotechnische gegevens moeten bepaald worden voor elke grondlaag en dit, tot op een voldoende diepte onder het niveau van de uitgraving.

Voor de bepaling van de wrijvingshoeken en de intrinsieke cohesie maakt men best gebruik van laboratoriumproeven op ongeroerde monsters (triaxiaalproeven), waarmee het tevens mogelijk is om de vervormingseigenschappen van de grond in kaart te brengen.

Meestal blijft de beschikbare geotechnische informatie beperkt tot de conusweerstand en de laterale wrijving, die bepaald werden door middel

van statische diepsonderingen (CPT - Cone Penetration Tests). Er bestaat evenwel geen directe correlatie tussen de gegevens die afleidbaar zijn uit de sonderingen en de grootheden die nodig zijn voor de dimensionering van een bouwput. Ter bepaling van de grondsoort en zijn mechanische eigenschappen aan de hand van sonderingen kan men wel gebruik maken van de tabel uit de Belgische Nationale Bijlage (ANB) bij de Eurocode 7 [10]. Het gebruik van voornoemde tabel zou bij voorkeur gepaard moeten gaan met een voorafgaandelijke beoordeling van de geologische aard van de ondergrond. Dit kan ofwel gebeuren aan de hand van geologische en/of geotechnische kaarten, ofwel door de uitvoering van observatieboringen en/of identificatieproeven. Op de website dov.vlaanderen.be is er bovendien een schat aan informatie opgenomen over de ondergrond op verschillende plaatsen in Vlaanderen.

2. In aanmerking nemen van het effect van de zuigspanning

2.1. Basisprincipe en definitie van zuigspanning

De hoeveelheid water die in de grond aanwezig is, is in sterke mate bepalend voor het gedrag ervan. Wanneer de grond volledig verzadigd is, d.w.z. wanneer de ruimte tussen de korrels helemaal opgevuld is met water, wordt er een interstitiële (positieve) druk uitgeoefend tussen de korrels. Dit heeft tot gevolg dat de effectieve spanningen verminderen en dat bijgevolg ook de afschuifweerstand van de grond afneemt. In het geval van taluds kan de aanwezigheid van interstitieel water tevens aanleiding geven tot het ontstaan van stromingskrachten die netto horizontale water-

drukken teweegbrengen.

In gedeeltelijk verzadigde grondtypes, waarbij de ruimte tussen de korrels zowel gevuld is met water als met lucht, moeten deze interstitiële overdrukken plaatsruimen voor negatieve spanningen tussen de korrels (ook aangeduid als zuigspanning of matrixzuiging). Deze spanningen worden zowel veroorzaakt door de adsorptiekrachten aan de contactpunten water-vaste stof als door de capillaire werking aan het raakvlak water-lucht. In tegenstelling tot de interstitiële overdrukken hebben de zuigspanningen een positieve invloed op de afschuifweerstand van de grond en bijgevolg ook op de stabiliteit van de taluds of de wanden. Met uitzondering van duinzand (dat een specifieke korrelgrootteverdeling heeft) zijn de meeste gronden nooit volledig droog, maar hebben ze een residueel watergehalte, overeenkomende met een hoge waarde van de zuigspanning. Bij toenemend watergehalte daalt deze zuigspanning en zal de afschuifweerstand van de grond afnemen.

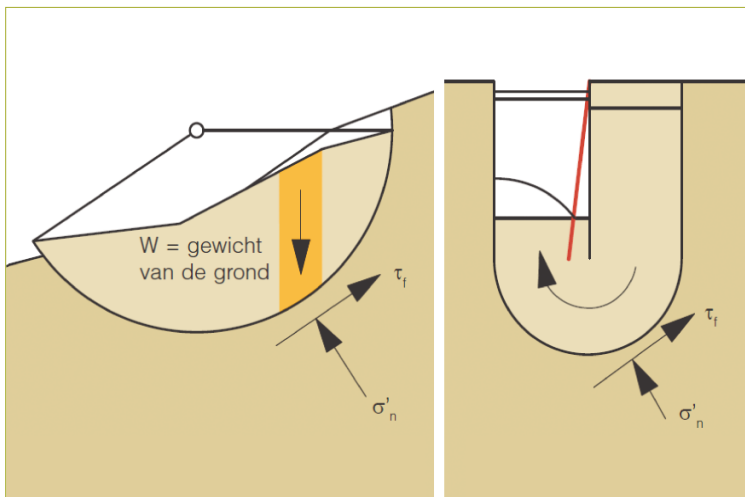
Hierbij dient men in het achterhoofd te houden dat de zuigspanning in de grond variabel is in de tijd, aangezien deze afhankelijk is van het aanwezige watergehalte.

Bij een gegeven gronddiepte zullen deze variaties voornamelijk afhankelijk zijn van (zie figuur 2):

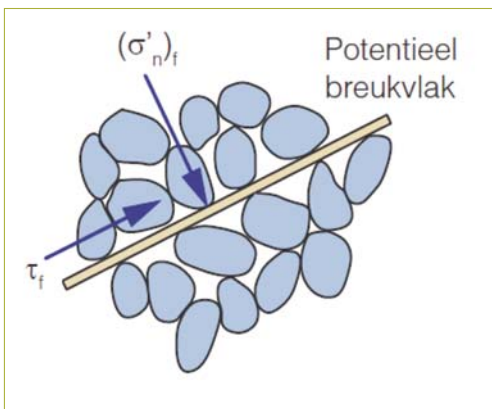
- de schommelingen van het grondwaterpeil: vermits de grond onder het grondwaterpeil verzadigd is, kunnen er op deze plaats geen zuigspanningen optreden. Gelet op het capillaire vochttransport dat optreedt in fijne gronden kan de verzagingsgraad hier hoog zijn waardoor de zuigspanning beperkt blijven tot op een niet te verwaarlozen hoogte boven het grondwaterpeil;



Figuur 2 – Invloed van de weersomstandigheden op het zuigprofiel.



Figuur 3 – Voorbeelden van breukschema's van een talud en een beschoeiingswand. Rol van de afschuifweerstand.



Figuur 4 – Illustratie van het Mohr-Coulomb bezwijkscriterium.

- neerslag: de toename van de hoeveelheid water in de grond door infiltratie in de bovenste lagen (en de daarmee gepaard gaande opbouw van positieve waterspanningen) kan leiden tot een beperking van de zuigspanning
- de periode van het jaar: voor een vergelijkbaar neerslagniveau zal het grondwatergehalte in de winterperiode (van november tot maart) groter zijn dan in de zomer vermits er minder evapotranspiratie optreedt. Gezien de relatie tussen het watergehalte en de zuigspanningen in de grond afhankelijk is van de grondsoort, zoals beschreven in [8], zal de variatie van de zuigspanningen in de loop van het jaar groter zijn in leemgronden dan in zandgronden, en dit niettegenstaande de lagere doorlatendheid van leemgronden.

2.2. Invloed van de zuigspanning op de grondweerstandparameters

Er bestaan verschillende rekenmethoden om de stabiliteit van een helling of een beschoeiings-

wand na te gaan.

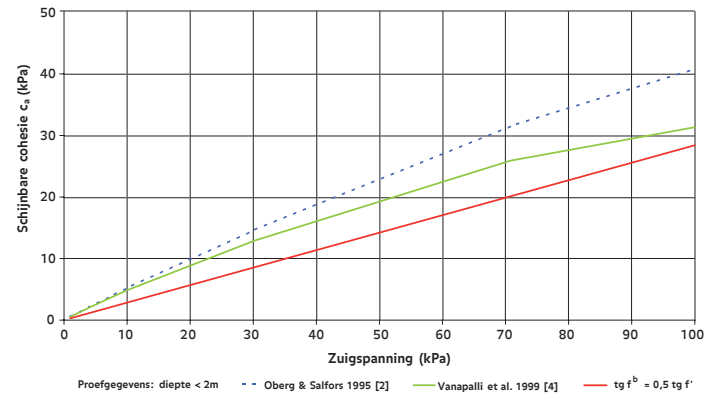
De meeste dimensioneringsmethoden zijn gebaseerd op berekeningen van de breukweerstand, waarbij rekening gehouden wordt met bepaalde veiligheidscoëfficiënten. In het geval van taluds dient men na te gaan of de afschuifweerstand van de grond over het volledige potentiële breukvlak groter is dan de schuifspanningen die erop aangrijpen (figuur 3). Bij de dimensionering van een beschoeiingswand dient men te verifiëren of de geometrische en structurele elementen waaruit deze opgebouwd is stabiel blijven onder invloed van de krachten die erop uitgeoefend worden. Ook de afschuifweerstand speelt hier een belangrijke rol: het evenwicht zal des te gemakkelijker (tijdelijk) verloren worden naarmate de afschuifweerstand van de grond lager wordt.

De afschuifweerstand van een verzadigde/droge grond wordt gewoonlijk gekarakteriseerd door het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium, volgens de welke er bij de breuk een lineaire relatie bestaat tussen de afschuifweerstand (in het breukvlak) en de normaalspanning (op het breukvlak), zoals weergegeven in de volgende vergelijking (zie ook figuur 4):

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_w) \operatorname{tg} \varphi' = c' + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi'$$

- τ_f afschuifweerstand [kPa]
- c' effectieve intrinsieke cohesie van de grond [kPa]
- σ_n totale normaalspanning [kPa]
- u_w interstitiële waterspanning [kPa]
- φ' interne-wrijvingshoek [°]
- σ'_n effectieve normaalspanning [kPa]

Op analoge wijze kan ook de afschuifweerstand van gedeeltelijk verzadigde gronden afgeleid wor-



Figuur 5 – Relatie tussen de schijnbare cohesie en de zuigspanning van de leemgrond, afkomstig van het WTCB-proefstation te Limelette (met gravimetrisch watergehalte tussen 17% en 25%) [1].

den uit de hiervoor vermelde vergelijking, op voorwaarde dat de effectieve normaalspanning zal in plaats van de spanningsdefinitie volgens Terzaghi ($\sigma'_n = \sigma_n - u_w$) worden overgegaan op de spanningsdefinitie volgens Bishop:

$$\sigma'_n = (\sigma_n - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

waarbij:

- u_a atmosferische druk [kPa]
- χ dimensieloze parameter die een relatie heeft met de verzadigingsgraad van de grond (χ bedraagt 0 bij een droge grond en 1 bij een verzadigde grond)
- $u_a - u_w$ zuigspanning

Bovenvermelde vergelijking van de afschuifweerstand kan ook op de volgende manier geschreven worden [1]:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \operatorname{tg} \varphi' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b$$

$$c_a = (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b$$

$$\operatorname{tg} \varphi^b = \chi \operatorname{tg} \varphi'$$

waarbij:

- c_a schijnbare cohesie tengevolge van de zuigspanning (matrixcohesie) [kPa]. Deze term stelt de toename van de afschuifweerstand van de grond voor die toe te schrijven is aan het effect van de zuigspanning
- φ^b variabele die de verhouding tussen de schijnbare cohesie en de zuigspanning aanduidt [-].

Om een veilige waarde te verkrijgen, kan men in eerste instantie gebruik maken van de volgende vergelijking: $\operatorname{tg} \varphi^b = 0,5 \operatorname{tg} \varphi'$ waarbij uitgegaan wordt van gelijk aan de verzadigingsgraad (metingen hebben aangetoond dat de reële verzadigings-

graad over het algemeen hoger is dan 50%).

Er werden ook nog een aantal andere formules voorgesteld voor $t_g \varphi^b$ die gebruik maken van de verzadigingsgraad en, eventueel, de plasticiteits-index van de grond [1, 2, 4]. Deze formules leveren echter minder veilige waarden voor de parameter $t_g \varphi^b$ op en vereisen een uitgebreidere kennis van de grond. De parameter $t_g \varphi^b$ kan voor een gegeven bouwplaats ook verkregen worden door vrije-prismaproeven uit te voeren op ongeroerde proefmonsters [3]. Dankzij dit type proeven is het mogelijk om rechtstreeks het in rekening te brengen niveau van schijnbare cohesie vast te stellen en dit, voor een *in situ* bepaald watergehalte (massapercent). Deze aanpak werd gevalideerd voor leemgronden in het kader van het uitgevoerde WTCB-onderzoek.

Figuur 5 toont de experimenteel verkregen relatie tussen de zuigspanning en de schijnbare cohesie voor de leemmonsters, afkomstig van het WTCB-proefstation te Limelette. De resultaten van de vrije-prismaproeven worden vergeleken met de diverse theoretische formules die hierboven vermeld werden.

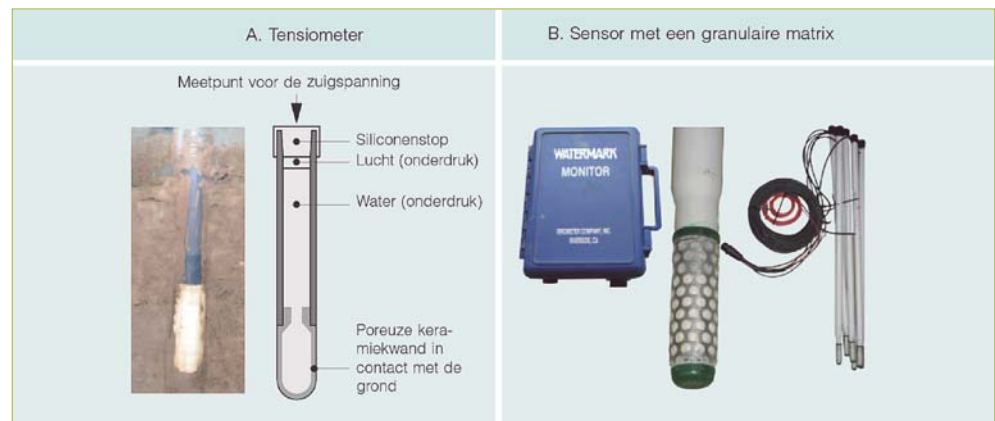
Deze experimentele benadering, gebaseerd op de uitvoering van vrije-prismaproeven, is echter moeilijk toepasbaar op zandgronden, omdat het niet eenvoudig is om ongeroerde zandmonsters te verkrijgen. Bovendien is gebleken dat het effect van de zuigspanning vergroot bij toenemende dichtheid van het zand.

De waarde van de schijnbare cohesie c_a tengevolge van de zuigspanning zal niet bepaald kunnen worden op basis van CPT-sonderingen of boringen alleen. De aanwezigheid van de zuigspanning zal immers bevestigd moeten worden door een rechtstreekse meting van de zuigspanning of door een indirecte meting aan de hand van het door weging bepaalde watergehalte.

2.3. Meting van de zuigspanning *in situ*

Alvorens men het positieve effect van de zuigspanning in rekening kan brengen bij de dimensionering van bouwputten of beschoeiingen, dient men zich in de eerste plaats te vergewissen van de aanwezigheid ervan. Hiertoe is het aanbevolen om de zuigspanning *in situ* op te volgen gedurende de volledige duur van de werken.

In het kader van het WTCB-onderzoek werden er twee types sensoren gevalideerd voor het meten van de zuigspanning: tensiometers enerzijds en sensoren met een granulaire matrix anderzijds. In beide gevallen is het meetprincipe gebaseerd op een evenwicht tussen de plaatselijke druk tussen de grond en de sensor.



Figuur 6 – Types sensoren die tijdens het WTCB-onderzoek gebruikt werden. Links: foto genomen op het einde van de proef en schema van een tensiometer (www.eijkellkamp.nl). Rechts: sensor met een granulaire matrix (www.watermark-monitor.com).

Het drukevenwicht tussen de tensiometer en de grond komt tot stand ter hoogte van de poreuze keramiekwand van de tensiometer, die op het gewenste meetpunt in contact gebracht wordt met de grond (zie figuur 6a). De waterdruk die opgebouwd wordt ter hoogte van de poreuze keramiekwand wordt via de waterkolom doorgegeven aan de opening bovenaan de tensiometer. Na aftrek van het gewicht van de waterkolom geeft de waarde van de onderdruk bovenaan de tensiometer een duidelijk beeld van de zuigspanning in de grond.

De werking van sensoren met een granulaire matrix is lichtjes anders (zie figuur 6b). Hoewel de sensor ook in dit geval een evenwicht dient te bereiken in de bodem, wordt de zuigspanning hier afgeleid aan de hand van een meting van het watergehalte in de granulaire matrix (door de soortelijke weerstand). Deze waarde kan immers omgezet worden in een zuigspanning door gebruik te maken van de waterretentiekromme van het granulaire materiaal.

Deze goedkope sensoren kunnen de resultaten van de zuigspanningsmetingen automatisch en quasi-autonoom registreren en versturen. De installatie ervan op de bouwplaats vraagt echter een zekere ervaring aangezien er voor de uitvoering ervan bepaalde voorzorgen moeten genomen worden. Tensiometers zijn in de regel preciezer (0,1 kPa) dan sensoren met een granulaire matrix (0,5 kPa) daar hun precisie niet afhankelijk is van de eigenschappen van een derde materiaal. De toepassing ervan is evenwel delicaat dan deze van sensoren met een granulaire matrix van het type Watermark © (www.watermark-monitor.com).

Omdat het over plaatselijke metingen gaat (met een invloedssfeer van slechts enkele centimeters),

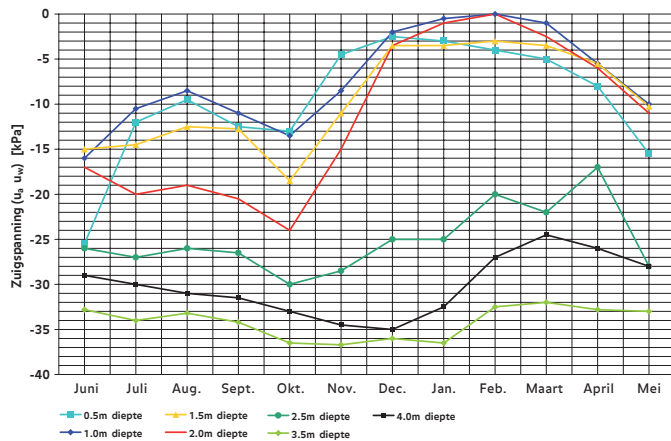
moeten de sensoren op verschillende diepten geplaatst worden en eventueel ook op verschillende plaatsen op de bouwplaats (naargelang van de heterogeniteit van de bodem).

We willen erop wijzen dat het altijd beter is om de meetsystemen reeds te installeren vóór de uitvoering van de bouwput, zodanig dat men de schijnbare cohesie die gebruikt moet worden in de berekeningen vooraf kan bepalen en zodoende ook het gunstige effect van de zuigspanning in de dimensionering van taluds en beschoeiingen (steilere hellingen, minder dure beschoeiingen) in rekening kan brengen.

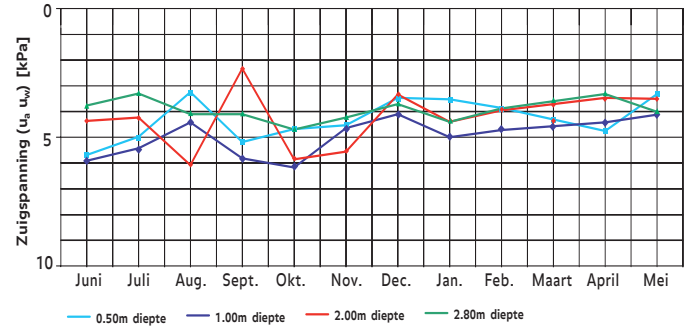
De figuren 7 en 8 geven bij wijze van voorbeeld de meetresultaten van de zuigspanning weer die respectievelijk verkregen werden op een bouwplaats met leem- en zandgrond. Deze resultaten zijn uiteraard niet rechtstreeks toepasbaar op andere bouwplaatsen, maar laten wel toe om de geobserveerde tendensen bij deze twee grondtypes te illustreren.

In de leemgrond van Limelette (figuur 7) kunnen twee regimes onderscheiden worden:

- op geringe diepte (minder dan 2 m): de zuigspanning vertoont aanzienlijke verschillen in functie van de neerslag en de evapotranspiratie. Deze schommelingen springen slechts weinig in het oog in figuur 7, omdat er hier gewerkt wordt met gemiddelde waarden (maandgemiddelden op basis van dagelijkse metingen, uitgevoerd over vier jaar). De schommelingen van de zuigspanning op korte termijn (minder dan 15 dagen) en op geringe diepte (minder dan 2 m) hebben slechts een verwaarloosbare invloed op de stabiliteit van de hellingen. De zuigspanningswaarden liggen doorgaans aan de lage kant gedurende de winterperiode (van november



Figuur 7 – Seizoensgebonden schommelingen van de zuigspanningswaarden opgemeten in het WTCB-proefstation te Limelette (leemgrond) op een diepte tussen 0,5 en 4 m (gemiddelde maandwaarden, opgesteld aan de hand van metingen uitgevoerd over een periode van vier jaar).



Figuur 8 – Zuigspanningsmetingen uitgevoerd te Bierbeek (zandgrond) op een diepte tussen 0,5 en 2,8 m (gemiddelde maandwaarden, opgesteld aan de hand van metingen uitgevoerd tussen mei 2006 en juni 2007).

Hoogte h	5m		7m		10m		15m	
Grootheid	β [°]	L [m]	β [°]	L [m]	β [°]	L [m]	β [°]	L [m]
Zuigspanning niet meegerekend: $c_a = 0$ kPa	34	7,4	34	10,4	34	14,8	34	22,2
Zuigspanning wel meegerekend: $c_a = 6,7$ kPa	65	2,3	60	4	50	8,5	45	15

Tabel – Maximale hellingen verkregen bij berekening met een veiligheidsfactor = 1 en een effectieve wrijvingshoek van 34° (β = hoek, L = lengte, zie afbeelding 9).



Figuur 9 – Talud te Gasthuisberg (Leuven).

In de zandgrond van Bierbeek (figuur 8) liggen de zuigspanningswaarden (en de schijnbare cohesie) een stuk lager (een zuigspanning van om en bij de 5 kPa). Rekening houdend met de tabel uit de NBN EN 1997-1 ANB [10] en met de vergelijking $\text{tg } \varphi^b = 0,5 \text{tg } \varphi'$ stemt dit overeen met een schijnbare cohesie van $c_a = (u_a - u_w) \frac{1}{2} \text{tg } \varphi' = 5 \text{ kPa} \frac{1}{2} \text{tg } 30^\circ = 1,4 \text{ kPa}$.

Ondanks de grotere doorlatendheid van zand, zijn de waarden stabiel. Dit kan verklaard worden door de typische relatie tussen het watergehalte en de zuigspanningen bij zandgronden, zoals beschreven in [8].

3. Toepassingsvoorbeelden

Om het belang van de zuigspanningsmetingen aan te tonen voor de dimensionering van taluds en tijdelijke beschoeiingswanden, worden hieronder twee toepassingsvoorbeelden van geïnstrumenteerde bouwplaatsen beschreven.

3.1 Geval 1: talud te Gasthuisberg

Het eerste voorbeeld betreft het in figuur 9 voorgestelde talud op de site van Gasthuisberg (Leuven) alwaar de ondergrond samengesteld is uit kleihoudend glaukonietzand (Formatie van Sint Huibrechts-Hern en Formatie van Diest). De karakteristieke intrinsieke grondeigenschappen werden als volgt ingeschat:

$$\varphi' = 34^\circ \text{ en } c' = 0 \text{ kPa}$$

Deze waarden werden afgeleid uit:

- analyse van het Departement 'Geotechniek' van de Vlaamse Overheid (MOW), gebaseerd op verschillende triaxiaalproeven van de betreffende geologische laag;
- resultaten van triaxiaalproeven op grondmonsters van de bouwplaats.

tot maart) terwijl ze in de 'droge' periode (van april tot oktober) kunnen oplopen tot 25 kPa. Op basis van de tabel uit de NBN EN 1997-1 ANB [10] en de vergelijking $\text{tg } \varphi^b = \frac{1}{2} \text{tg } \varphi'$ komt deze waarde van 25 kPa overeen met een schijnbare cohesie van

$$c_a = (u_a - u_w) \frac{1}{2} \text{tg } \varphi' = 25 \text{ kPa} \frac{1}{2} \text{tg } 25^\circ = 5,8 \text{ kPa}.$$

- op grote diepte (meer dan 2 m): er worden slechts geringe seizoensgebonden schommelingen van de zuigspanning vastgesteld.

De resultaten van een CPT-sondering zijn voorgesteld in *figuur 10*.

Indien men bij de dimensioneringsberekeningen louter en alleen maar rekening zou houden met de hier vermelde gegevens, zou de helling die gehanteerd werd bij dit talud nooit gerechtvaardigd kunnen worden.

De zuigspanningsmetingen die uitgevoerd werden op een diepte van 1,6 tot 4 m en op een afstand van 0,5 m van de kruin van het talud, hebben echter aangetoond dat het zand een aanzienlijke zuigspanning vertoonde (*zie figuur 11*). Deze waarden kunnen verklaard worden door het feit dat de grond kleihoudend is (hoge wrijvingsfactor bij de sondering). Uit *figuur 11* blijkt bovendien dat de zuigspanning stabiel is, wat waarschijnlijk toe te schrijven is aan de dekzeilen op het talud (*figuur 9*) die de wanden beschermen tegen een plotse watertoevoer door neerslag.

Aan de hand van de formules die hiervoor vermeld werden voor het in rekening brengen van de zuigspanning in de berekeningen, kan aangetoond worden dat deze zuigspanningswaarden overeenkomen met een schijnbare cohesie van om en bij de

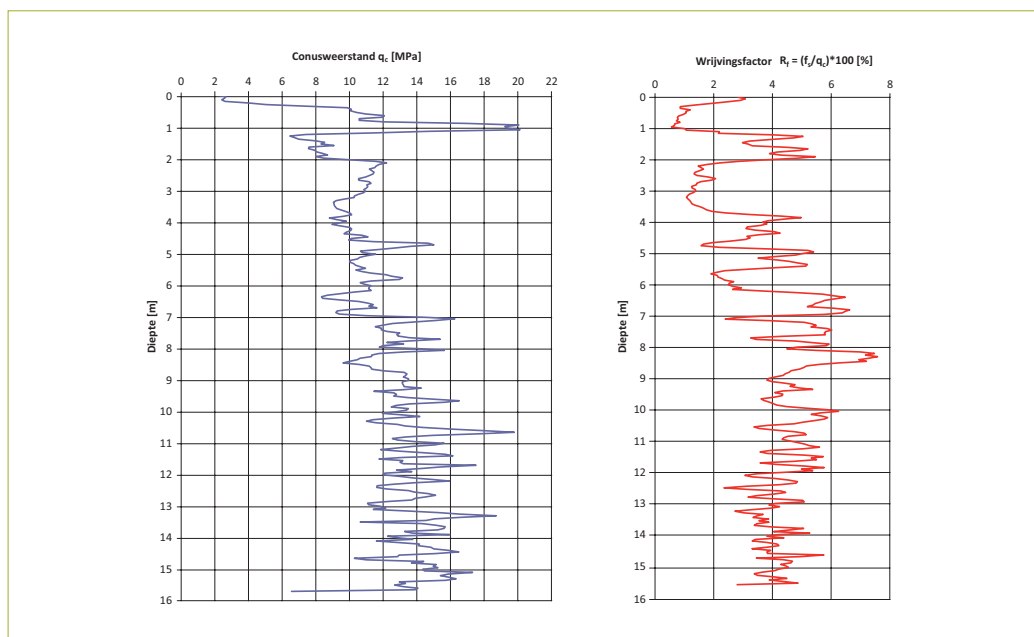
$$c_a = (u_a - u_w) \frac{1}{2} \operatorname{tg} \varphi' = 20 \text{ kPa} \frac{1}{2} \operatorname{tg} 34^\circ = 6.7 \text{ kPa} .$$

Tabel 1 geeft een overzicht van de maximale hellingen die – voor een effectieve wrijvingshoek van 34° – verkregen werden door een berekening waarbij geen enkele veiligheidsfactor, noch bovenbelasting in rekening gebracht werd. Dit gebeurde enerzijds zonder rekening te houden met de zuigspanning die opgemeten werd op de site van Gasthuisberg: $c_a = 0 \text{ kPa}$ en anderzijds met inrekeningbrenging van deze zuigspanning door gebruik te maken van de vergelijking $\operatorname{tg} \varphi^b = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \varphi'$: $c_a = 6,7 \text{ kPa}$. Volgens deze tabel blijkt de inrekeningbrenging van de schijnbare cohesie bepalend te zijn voor de dimensionering van het talud.

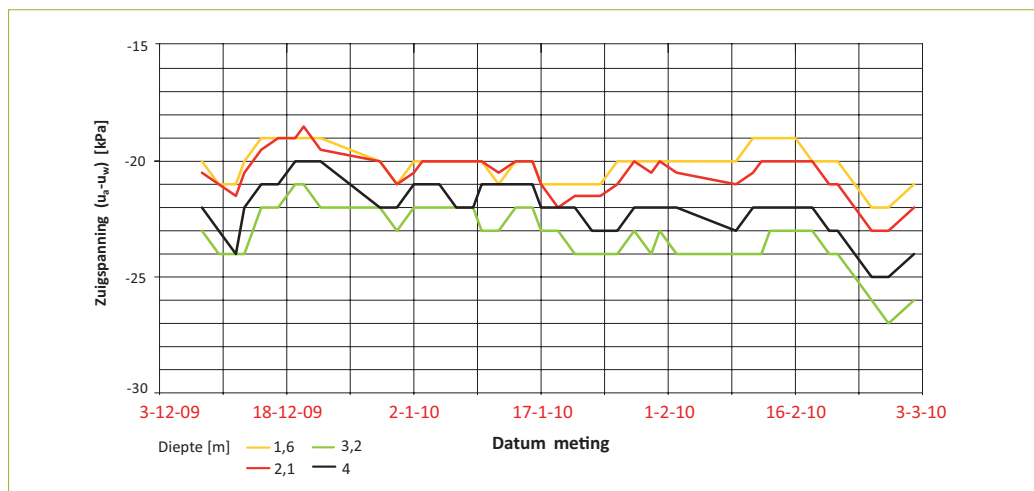
3.2. Geval 2: beschoeiingswand te Wetteren

Een tweede voorbeeld betreft een Berlijnse wand te Wetteren, die opgebouwd werd uit verticale profielen (HEA220) met een hoogte van 8,5 m en een tussenafstand van 1,6 m [5]. Tussen de profielen werden er stalen platen met een dikte van 10 mm aangebracht tot op het uitgravingsniveau (2,6 m diepte) (*zie figuur 12*).

Aan de hand van een sondering (*figuur 13*) en drie boringen die uitgevoerd werden in de buurt van de wand was het mogelijk om de eigenschappen te bepalen. De bodem bestaat voornamelijk uit fijn tot heel fijn zand (formatie van Gent).



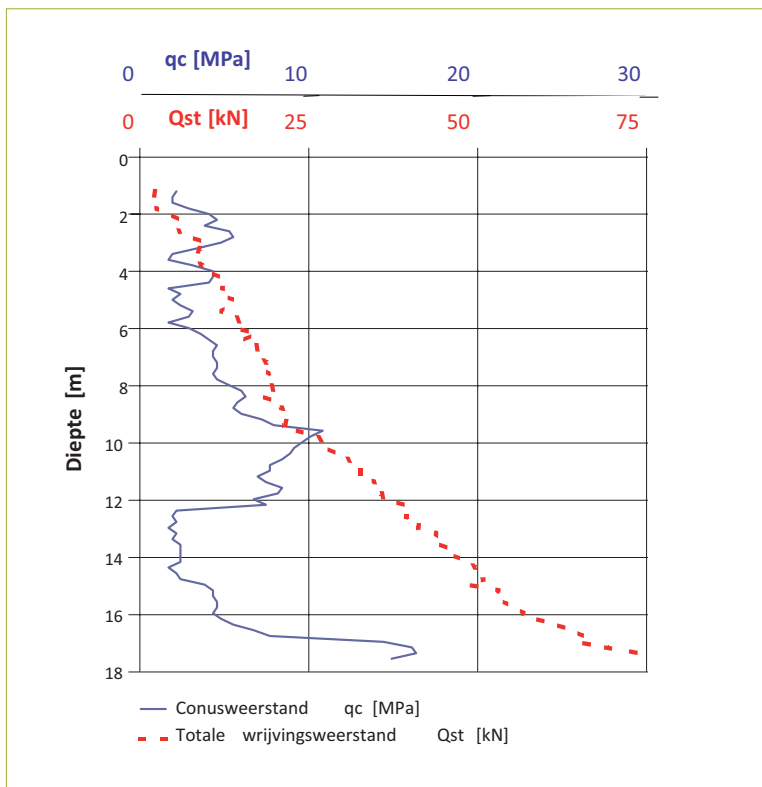
Figuur 10a-b – Resultaten van de CPT-E-sondering op de site van Gasthuisberg.



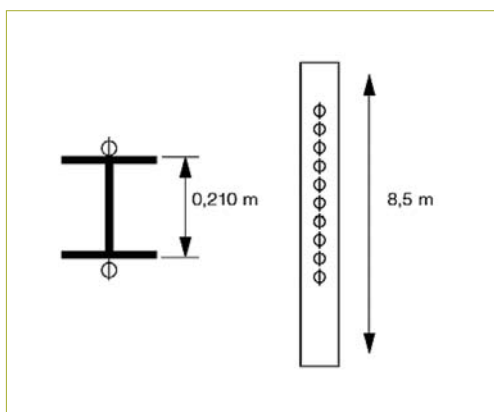
Figuur 11– Resultaten van de zuigspanningsmetingen uitgevoerd op de site van Gasthuisberg (Leuven) op een diepte van 1,60 tot 4 m en voor de periode van 8-12-2009 tot 3-3-2010.



Figuur 12 – Berlijnse wand te Wetteren (uitgravingsniveau = 2,6 m, met een steek van 5,5 m).

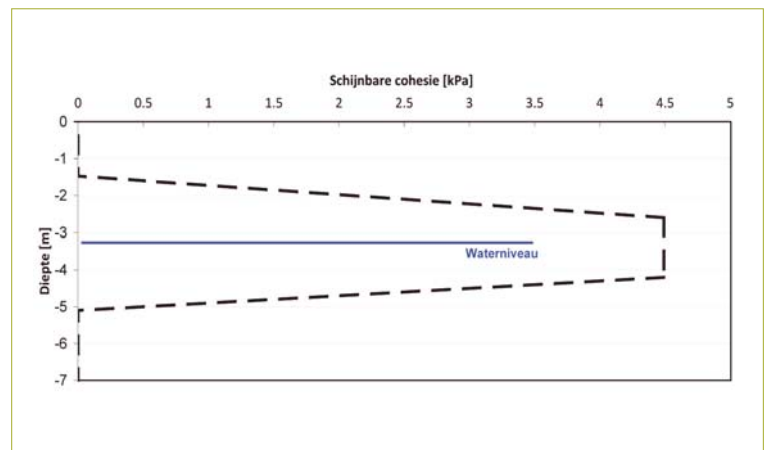


Figuur 13 – Resultaten van de CPT-M1-sondering, uitgevoerd te Wetteren.

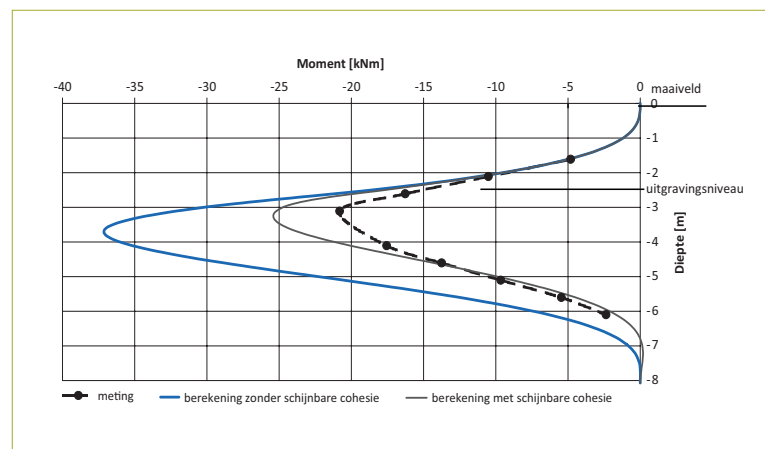


Figuur 15 – Instrumentatie van het profiel.

Het grondwaterpeil dat zich aanvankelijk op een diepte van -1,7 m bevond, werd voor de duur van de uitgraving verlaagd tot een diepte die schommelde tussen -4,2 m en -5,5 m (volgens metingen die elk uur uitgevoerd werden). Dankzij zuigspanningsmetingen die uitgevoerd werden met behulp van tensiometers, opgesteld op een diepte van -1,6 m en -2,6 m, was het bovendien mogelijk om het in *figuur 14* voorgestelde profiel van de schijnbare cohesie op te stellen. Dit profiel is niet enkel gebaseerd op de zuigspanningsmetingen, maar ook op een theoretische verdeling van het water in de grond. Deze verdeling werd opgesteld aan de hand van de randvoorwaarden van het grondwaterpeil en het maaiveld. Hierbij werd



Figuur 14 – Profiel van de schijnbare cohesie op de site van Wetteren



Figuur 16 – Buigmomenten, berekend op basis van metingen met optische vezels en modelvormingen, met en zonder rekening te houden met het effect van de zuigspanning in de grond.

uitgegaan van de veronderstelling dat de grond als redelijk homogeen beschouwd kan worden tussen -2,6 m en -4,2 m diepte.

Eén van de profielen (in het midden van de wand om eventuele randeffecten te vermijden) werd op een diepte tussen -1,6 m en -6,1 m en om de 50 cm voorzien van optische vezels om een idee te krijgen van de vervormingsgraad van het staal (en de overeenkomstige spanningen) (zie *figuur 15*). Aan de hand van de spanningsmetingen die met behulp van de optische vezels uitgevoerd werden aan weerszijden van het profiel, konden tevens de momenten in dit profiel berekend worden (*figuur 16*). Deze figuur geeft ook een overzicht van de buigmomenten die verkregen werden door modelvorming. Op basis van de geometrie van de wand, de grondparameters en het waterniveau en in de veronderstelling dat het effect van de grond vastgesteld kan worden door lineaire veren, levert het rekenmodel niet alleen een evaluatie op van de druk die door de grond wordt uitgeoefend op de Berlijnse wand, maar ook van de overeenkomstige

buigmomenten.

Het blijkt duidelijk dat de standaardberekening (zonder rekening te houden met de gemeten zuigspanning) een ruime overschatting van de buigspanningen in het profiel inhoudt, terwijl de berekening waarbij deze zuigspanning wel in aanmerking genomen wordt, de gemeten waarden benadert. Als de door de zuigspanning teweeggebrachte schijnbare cohesie in aanmerking genomen wordt, zullen de berekeningen zonder veiligheidsfactor voor wat het noodzakelijke gewicht van de profielen betreft een potentiële besparing van 35% opleveren. Dit resultaat is uiteraard afhankelijk van de karakteristieken van de site en kan niet toegepast worden op andere bouwplaatsen waarvoor er geen voorafgaandelijke zuigspanningsmetingen uitgevoerd werden.

4. Besluit

De zuigspanning is een essentiële parameter voor de beoordeling van de stabiliteit van bouwputten en tijdelijke beschoeiingswanden: dit laat immers

toe om steilere hellingen en/of minder dure beschoeiingen te rechtvaardigen. De instrumentatie van bouwplaatsen is een eenvoudige en economische oplossing om deze zuigspanning in aanmerking te kunnen nemen in de berekeningen. Hierbij dient men evenwel een aantal voorzorgsmaatregelen in acht te nemen teneinde belangrijke schommelingen van het grondwatergehalte te vermijden. Denken we hierbij maar even aan het voorzien van een geschikt drainage-systeem of de eventuele plaatsing van een dekzeil op het talud bij uitgraving in een 'vochtige' periode (met name tussen de maanden november en maart).

Als het effect van de zuigspanning in aanmerking genomen wordt in de berekeningen, moet er een minimale zuigspanningswaarde gedefinieerd worden naargelang van de karakteristieken van het bouwwerk. De zuigspanningsmetingen moeten bovendien opgevolgd worden gedurende de volledige duur van de uitgravingswerken om zich ervan te vergewissen dat de minimale waarde nooit onderschreden wordt.

5. Referenties

[1] Fredlund D.G. en Rahardjo H., *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York, John Wiley and Sons Inc., 1993.

[2] Öberg A.-L. en Sällfors G., *A Rational Approach to the Determination of the Shear Strength Parameters of Unsaturated Soils*. In *Unsaturated Soils, Soils non saturés*, Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils (Parijs, 6-8 september 1995), Rotterdam, A.A. Balkema (Alonso E.E. en Delage P.), 1995.

[3] Tomboy O., Whenham V., De Vos M., Charlier R., Maertens J. en Verbrugge, J.-C., *Shear Strength of Unsaturated Soil and its Influence on Slope Stability*. Durham, Proceedings of the First European Conference on Unsaturated Soils, 2-4 juli 2008.

[4] Vanapalli S.K., Pufahl D.E. en Fredlund D.G., *Interpretation of the Shear Strength of Unsaturated Soils in Undrained Loading Conditions*. Regina, Proceedings of the 52nd Canadian Geotechnical Conference, 25-27 oktober 1999.

[5] Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf *Beschoeiingen: richtlijnen voor het ontwerp, de uitvoering en de monitoring van klasieke en nieuwe beschoeiingstechnieken*. Brussel, WTCB, Onderzoek, gefinancierd door het NBN,

Conventie CC CCN/PN/NBN - 613, 2006-2009.

[6] Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf *Stabilité des talus: méthodes de calcul avec prise en compte du degré de saturation du sol et déduction de règles pratiques pour l'exécution des tranchées et fouilles temporaires*. Brussel, WTCB, Onderzoeksrapport (niet-gepubliceerd), biënnale 2003-2005.

[7] Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf *Stabilité des talus: méthodes de calcul avec prise en compte du degré de saturation du sol et déduction de règles pratiques pour l'exécution des tranchées et fouilles temporaires*. Brussel, WTCB, Onderzoeksrapport (niet-gepubliceerd), biënnale 2005-2007.

[8] De Vos, M., Whenham V., *De stabiliteit van bouwputten in onverzadigde gronden*. Geotechniek, 11e jaargang, nummer 1 p. 50-55.

[9] Whenham V., De Vos M., Legrand C., Charlier R., Maertens J. en Verbrugge J.-C., *Influence of Soil Suction on Trench Stability*. Weimar, 2nd International Conference on Mechanics of Unsaturated Soils, 7-9 maart 2007.

[10] Belgisch Bureau voor Normalisatie. *NBN EN 1997-1 ANB*. Brussel (wordt weldra gepubliceerd). ●

We let you penetrate the world

In 1932 ontwikkelden wij als de Goudsche Machinefabriek, naar ideeën van Prof. Barentsen, het eerste sondeerapparaat.

Vandaag doen wij nog altijd waar wij het beste in zijn: het ontwikkelen en produceren van sondeerapparatuur voor betrouwbaar en efficiënt bodemonderzoek, gericht op de toekomst. En vanzelfsprekend kunt u van GeoMil Equipment nog steeds de kwaliteit en service verwachten zoals u die al jaren van ons gewend bent.

GEOMIL
equipment

Ontwikkeling, fabricage en verkoop van sondeerapparatuur
De originele "Goudsche" sondeerkwaliteit

Al 70 jaar gekopieerd, nooit geëvenaard!



GeoMil Equipment B.V.

Postbus 450, 2800 AL Gouda
Westbaan 240, 2841 MC Moordrecht

Tel. +31 (0) 172 427 800
Tel. +31 (0) 172 427 801
E-mail info@geomil.com

www.geomil.com