

Empirische regels voor de interpretatie van sonderingen en het afleiden van mechanische parameters van grond in Vlaanderen

Dr. ir. K. Thooft

De Nayer Instituut, België

SAMENVATTING

Het praktische gebruik van sondeerresultaten en het afleiden van grondkarakteristieken uit deze resultaten plaatst de ontwerpingenieur voor een aantal keuzes. Nagegaan is of bestaande correlaties voldoen voor de Vlaamse grondomstandigheden. Voor de grondidentificatie blijken CUR-publicatie 162 en Robertson et al. goed te voldoen, afgezien van de identificatie van glauconiethoudend zand. Voor het vastleggen van de schuifweerstandsparementen en stijfheidsparementen worden correlaties voorgesteld, mede op basis van literatuurgegevens. De geselecteerde correlaties zijn geprogrammeerd, zodat men automatisch vanuit de CPT een overzicht kan maken van de diverse grondlagen en hun maatgevende parameters. Het gebruik van gegevens uit de Databank Ondergrond Vlaanderen is hierbij rechtstreeks mogelijk.

INLEIDING

In een tijd waarin sondeergegevens digitaal beschikbaar zijn, is de problematiek van hun interpretatie meer dan ooit actueel. Deze tekst probeert te beantwoorden aan deze nood en geeft een overzicht van een aantal empirische correlaties die bruikbaar zijn voor de interpretatie van sonderingen. Concreet wordt aandacht besteed aan naamgeving, schuifweerstand en vervormbaarheid van gronden. Een overzicht van bruikbare correlaties wordt bijvoorbeeld gegeven door Lunne e.a., 1997. Ook andere bronnen, vermeld in de literatuurlijst geven bruikbare aanbevelingen.

De gebruikte numerieke gegevens omvatten sonderingen, labo-proefresultaten, resultaten van boringen, etc. In eerste instantie werden een aantal locaties (Sint-Katelijne-Waver, Beveren en Limelette) geselecteerd omwille van een bekend en homogeen grondprofiel dat als representatief geldt voor de geologische formaties in Vlaanderen:

• Sint-Katelijne-Waver

Het grondprofiel bestaat uit een dunne laag leemhoudend zand, met daaronder overgeconsolideerde Boomse klei. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de site, terreinproeven en laboratoriumproeven kan verwezen worden naar Mengé, 2001

of Huybrechts, 2002. De gegevens kaderden in een onderzoeksproject dat ook werd beschreven door Huybrechts en Maertens, 2003 en Huybrechts e.a., 2003. Een voorbeeldsondering wordt gegeven in *figuur 1*.

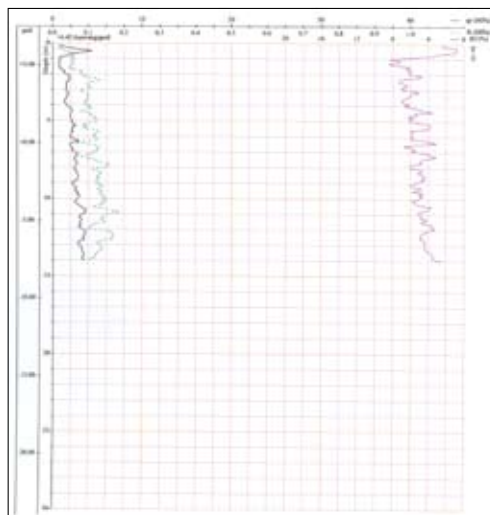
• Beveren (Verrebroek)

Voor de ontwikkeling van de Antwerpse haven worden op de linkerscheldeover een aantal nieuwe dokken en bijbehorende kaaimuren gebouwd. Het grondprofiel bestaat uit een aantal kwartshoudende normaalgecon-

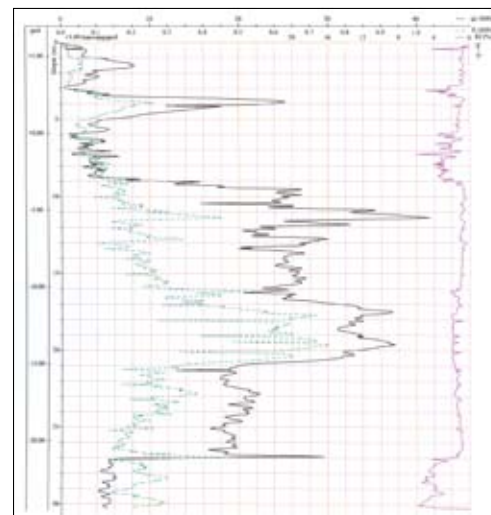
solideerde zanden, tertiair overgeconsolideerd glauconiethoudend Antwerpiaanzand en overgeconsolideerde Boomse klei. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de site, terreinproeven en laboratoriumproeven kan verwezen worden naar Van Tichelen, 2001. Een voorbeeldsondering is gegeven in *figuur 2*.

• Limelette

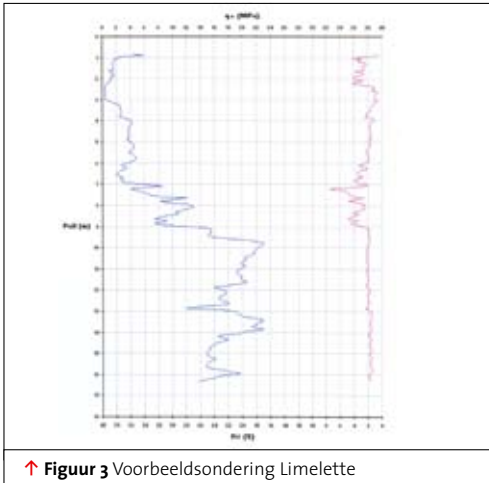
Het grondprofiel bestaat uit een leemlaag en uit overgeconsolideerde kalkhoudende, plaatselijk ontkalkte, Brusseliaanzanden.



↑ **Figuur 1** Voorbeeldsondering Sint-Katelijne-Waver



↑ **Figuur 2** Voorbeeldsondering Beveren (Verrebroek)



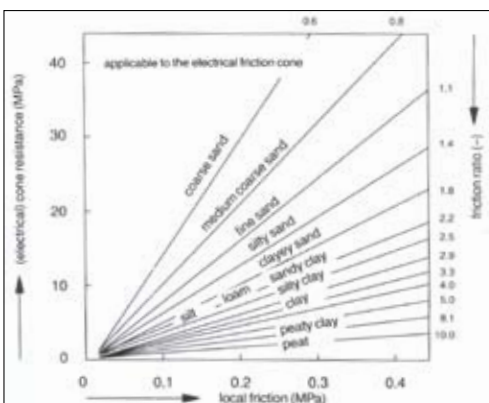
↑ **Figuur 3** Voorbeeldsondering Limelette

Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de site, terreinproeven en laboratoriumproeven kan verwezen worden naar Huybrechts, 2002 of Van Alboom, 2003. Het onderzoeksproject waarin de gegevens werden verzameld, wordt beschreven door Huybrechts en Maertens, 2004a en 2004b. Een voorbeeldsondering is gegeven in *figuur 3*.

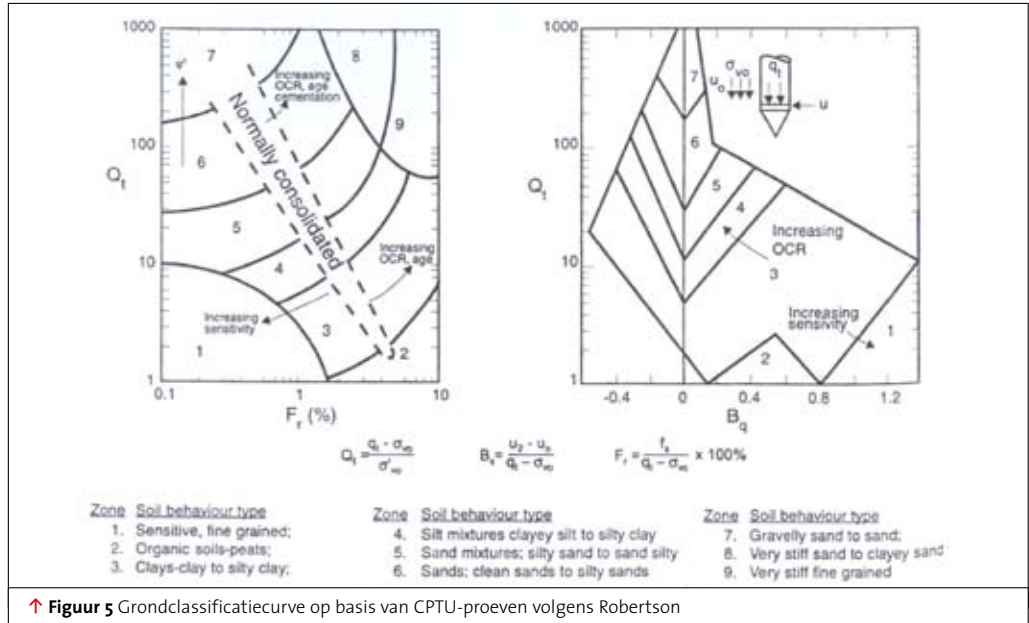
De vermelde sites omvatten bijgevolg een breed scala van onsamenhangende gronden (kwartzzanden, glauconiethoudende zanden, kalkzanden) en samenhangende gronden (leem, stijve klei). Alleen veenhoudende gronden waren in de studie niet opgenomen.

GRONDIDENTIFICATIE

Een belangrijk hulpmiddel voor de grondidentificatie is de meting van de plaatselijke kleef. CUR-publicatie 162 geeft een handige grafiek die de identificatie van een grond koppelt aan het kleefgetal zoals wordt weergegeven op *figuur 4*. Het criterium geldt enkel voor verzadigde gronden onder de grondwater tafel: uitgedroogde klei zal met dit criterium bijvoorbeeld ten onrechte als veen worden



↑ **Figuur 4** Grondidentificatie volgens CUR-publicatie 162



↑ **Figuur 5** Grondclassificatiecurve op basis van CPTU-proeven volgens Robertson

beschouwd. Glauconiethoudende zanden zijn niet in de grafiek opgenomen, maar hebben typisch een wrijvingsgetal van 4 à 5%.

Wanneer men kan beschikken over meetgegevens van CPTU-sonderingen kan men ook de opgemeten poriënwaterdruk in de identificatie betrekken. Een voorbeeld van dergelijke classificatie is deze van Robertson, gegeven op *figuur 5*. Men rekent de sondeergegevens conusweerstand, plaatselijke kleef en poriënwaterdruk om naar drie dimensionaal diagramma de grondsoort aflezen. Wanneer beide deeldiagramma's een andere conclusie opleveren, kan een dissipatieproef op deze diepte een aanduiding opleveren van de permeabiliteit van de grond en op deze manier dubbelzinnigheid in de naamgeving uitsluiten. De classificatie is ook bruikbaar voor gewone CPT-proeven: men gebruikt dan slechts het linkse deeldiagramma.

Wanneer men de vermelde identificatiecriteria (CUR-publicatie 162, Robertson) gaat toetsen aan sondeergegevens uit het Antwerpse havengebied (site Beveren-Waas) leveren deze voor alle gronden, behalve voor de glauconiethoudende zanden, bruikbare conclusies op. In dit laatste geval levert Robertson een overgeconsolideerd zand op dat neigt naar leemhoudend zand. Aangezien het mineraal glauconiet de structuur heeft van de kleimineralen uit de illietgroep (op een verregaande Fe-Al substitutie na) is deze identificatie als kleihoudend zand niet verrassend.

Het criterium van Robertson levert een onderscheid op tussen normaalgeconsolideerde en

overgeconsolideerde gronden. Ook voor de gronden in Limelette (slappe leem en overgeconsolideerd zand) en Sint-Katelijne-Waver (stijve klei) levert het criterium van Robertson en CUR-publicatie 162 een correcte identificatie op.

SCHUIFWEERSTAND VAN GRONDEN

Schuifweerstandsparementen van een grond zijn gekoppeld aan het gekozen breukcriterium en ook de uitvoeringsmodaliteiten van de laboproef en de definitie van de "breuktoestand" in deze proef zal de schuifweerstandsparementen beïnvloeden. Afhankelijk van het concrete geotechnische ontwerp (fundering op staal, keermuur, talud, etc.) zal men andere proeven voorstellen en dus impliciet andere schuifweerstandsparementen bekomen.

Niet-gedraineerde cohesie c_u voor samenhangende gronden

De literatuur vermeldt verschillende correlaties tussen de niet-gedraineerde schuifweerstand c_u en de conusweerstand q_c . *Tabel 1* geeft een overzicht met de referenties en de bekomen resultaten voor c_u in de Boomse klei te Beveren en te Sint-Katelijne-Waver. De correlaties leveren bruikbare schattingen op voor de niet-gedraineerde schuifweerstand. De tabel drukt een aantal grootheden uit ten opzichte van de dieptecoördinaat z onder het maaiveld.

Effectieve hoek van inwendige wrijving ϕ' voor niet-samenhangende gronden

Volgens Mitchell en Durgunoglu (1974, 1975) hangt de conusweerstand van een grond af van zijn effectieve hoek van inwendige wrij-

Auteur	Vorm	Beperkingen, commentaar	Beveren		Sint-Katelijne-Waver	
			correlatie	U.U.-proef	correlatie	U.U.-proef
Meigh & Corbett, 1974	$q_c = 16 c_u + \gamma \cdot z$	leemhoudende klei:	0,28 MPa	0,28 MPa	0,17 MPa tot 0,19 MPa	11,3z + 34
Diverse auteurs	$c_u = \frac{q_c}{N}$	N: 7 – 23 CUR-publicatie 162 N: 12 – 15 voor normaalgeconsolideerd klei, leem, loess en veen	0,25 MPa N = 20		0,15 MPa N = 20	
		N: 10 – 13 voor heel jonge en gevoelige klei N: 15 – 25 voor overgeconsolideerde klei.	0,28 MPa N = 18		0,20 MPa N = 15	
Diverse auteurs	$c_u = \frac{q_c - \sigma'_{vo}}{N}$ σ'_{vo} = verticale korrelspanning	N : 10 - 20	0,33 MPa N = 15	0,14 MPa N = 20	0,15 MPa tot 0,20 MPa	
			0,25 MPa			

↑ Tabel 1 Correlaties voor c_u

monsterverstoring, die kan begroot worden door wijzigingen in de pakkingsdichtheid van het monster op te volgen. Ook de (niet-meetbare) skeletstructuur heeft een niet te verwaarlozen invloed: metingen van de auteur van de dynamische G-modulus op Ticino Zand met Bender-elementen bij een relatieve dichtheid van 42 à 43% en een isotrope korrelspanning van 100 kPa leverden een modulus van 75 MPa op bij monstervorming via sedimentatie in lucht en daaropvolgende saturatie. Bij identieke proefomstandigheden, maar bij aanstampen in aardvochtige toestand en daaropvolgende saturatie, werd 88 MPa (20% meer) opgemeten.

De meeste vergelijkingen uit de literatuur hebben de vorm $E_{50} = \alpha q_c$. De enige specifieke parameter die hiervoor moet bepaald worden, is de evenredigheidsparameter α . Hierover bestaat in de literatuur weinig eensgezindheid. Vaak vindt men hiervoor in Vlaanderen de volgende vuistregels:

- Losgepakt zand: $\alpha = 1,5$
- Dichtgepakt zand en normaalgeconsolideerde klei: $\alpha = 2$
- Overgeconsolideerde klei: $\alpha = 2,5$

De bovenstaande waarden worden vaak gebruikt bij het berekenen van de zettingen van een fundering op staal. De rekenresultaten ervan worden als conservatief ervaren.

De beste resultaten vindt men met de relaties van Trofimenkov (1995):

- $E_{50} = 3,4 q_c + 13$ waarbij E en q_c in MPa voor tertiaire zandgronden (122 MPa)
- $E_{50} = 7,8 q_c + 2$ waarbij E en q_c in MPa voor quataire zandgronden (6 MPa) en tertiaire kleigronden (41 MPa)

ving. Ook de effectieve spanningen, de graad van overconsolidatie, de tophoek van de sondeerconus, de ruwheid en de diameter van de sondeerconus, de vorm (conus, wig) van de sondeerconus, ... hebben een invloed.

In een rapport over de State of the Art van sonderingen geven Mlynarek e.a. (1995) onderstaande formule voor de hoek van inwendige wrijving in zandgronden:

$$\phi' = d \left[\frac{(q_c)^e}{(\sigma'_{vo})^f} \right]$$

- Voor fijne rivierzanden geldt hierbij: $d = 15,56$; $e = 0,108$; $f = 0,083$
- Voor middelgrote rivierzanden raadt men aan: $d = 19,54$; $e = 0,092$; $f = 0,062$

Toegepast op sondeergegevens en laboratoriumproefresultaten kan men tabel 2 samenstellen en volgende besluiten formuleren:

- Mitchell & Durgunoglu leveren bruikbare waarden op voor de hoek van inwendige wrijving in zandgronden en leveren een duidelijke onderschatting op voor stijve, overgeconsolideerde klei. Dit illustreert het toepassingsdomein van de formule van Mitchell, die in feite voor zandgronden werd ontwikkeld.
- Mlynarek e.a. leveren bruikbare waarden op voor klei en een lichte onderschatting voor de schuifweerstandparameters van zand.

De c.u.-triaxiaalproeven geven de hoek van inwendige wrijving bij 2%.

VERVORMBAARHEID VAN GRONDEN

Bij het bepalen van de vervormbaarheidsparameters van een grond speelt het niet-lineaire karakter en het niet-elastische karakter van de grond het sterkst. Wanneer men het spannings-ervormingsgedrag van een grond wenst te kenmerken door een elasticiteitsmodulus, dan dient men zich onder andere volgende gegevens voor ogen te houden:

- Het spannings-ervormingsgedrag van een grond is niet-lineair. Het zuiver elastisch gedrag bij zeer kleine vervormingen en de dynamische respons van gronden wordt beschreven door de dynamische modulus E_0 . Voor elke vervormingparameter geldt een uitgesproken variatie afhankelijk van het vervormingsniveau en van de gemiddelde effectieve spanningen.
- De vervormingsmoduli zijn zeer gevoelig aan

	Grondsoort	c.u. Triaxiaalproeven	Durgunoglu & Mitchell	Mlynarek e.a.
Beveren Waas	Antwerpiaan Zand	32°	32°	30°
	Boomse klei	23°	15°	23°
Sint-Katelijne-Waver	Boomse klei	27°	14°	24°
Limelette	Brusseliaan Zand	34°	28°	30°

↑ Tabel 2 Hoek van inwendige wrijving volgens diverse criteria

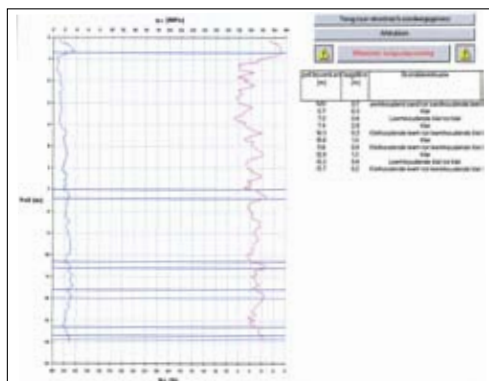
De laboproeven leverden 162 MPa op voor het tertiaire Antwerpiaanzand, 81 MPa voor de tertiaire Boomse klei en 6 MPa voor het quartaire zand. De formule van Trofimenkov lijkt dus bruikbaar voor quartaire gronden. Voor tertiaire gronden resulteert ze echter in een belangrijke onderschatting.

SOFTWARE-IMPLEMENTATIE

De bevindingen van het onderzoek werden geprogrammeerd: het programma levert een grondprofielinterpretatie op, samen met de meest gebruikte mechanische karakteristieken. In eerste instantie heeft men de invoer van de sondeerdata, vervolgens volgen de grondidentificatie & laagopbouw, de grondkarakteristieken en als laatste de grafische weergave met eventuele laagmanipulatie. Deze tekst beschrijft enkel de module, gebaseerd op resultaten van een elektrische sondering.

Het programma biedt de gebruiker de mogelijkheid om gegevens automatisch in te lezen vanuit een GEF-formaat. Hiernaast is er ook de mogelijkheid voorzien om de sondeergegevens handmatig in te voeren via een ingescande sondeertabel met tekstherkenning. Ook andere digitaal beschikbare sondeergegevens buiten het GEF-formaat kunnen ingelezen worden. Nadien kan men overgaan tot de grondidentificatie, met de eerder besproken criteria. Lagen dunner dan 25 cm worden genegeerd. In laatste instantie biedt het programma de mogelijkheid om de lagenindeling met de sondeergrafieken, het verloop van de hoek van inwendige wrijving met de diepte, het verloop van de niet-gedraineerde cohesie met de diepte en het verloop van de E-modulus met de diepte grafisch weer te geven. Op deze output (*figuur 6*) wordt een samenvattende tabel met de verschillende lagen en laagdikten weergegeven.

Men kan tenslotte afwijken van de gegeven lagenindeling en gevonden lagen samenvoegen. Wanneer een nieuwe laag wordt aangemaakt (door twee lagen samen te voegen), kan men deze een nieuwe naam geven die eventueel een betere geologische benaming kan zijn. De oorspronkelijk gegenereerde lagen worden altijd weergegeven als de lagen waaruit de nieuwe laag is opgebouwd. De grondkarakteristieken van de nieuwe laag worden berekend als een gewogen harmonisch gemiddelde zodat de “zwakkere, slappere” lagen iets meer invloed uitoefenen op het gemiddelde dan “sterkere, stijvere” lagen.



↑ **Figuur 6** Output van de verschillende grondkarakteristieken (voorbeeld Sint Katelijne Waver)

BEDANKING

Deze bijdrage is gebaseerd op onderzoeksresultaten van een IWT-Hobu fondsproject 00216, dat werd uitgevoerd onder leiding van de auteur. Bij deze wenst de auteur het IWT te bedanken voor de steunmaatregelen.

LITERATUUR

- [1] De Schrijver P., Databank Ondergrond Vlaanderen, Innovatieforum TI KVIV, Antwerpen, 2002
- [2] Durgunoglu & J.K. Mitchell, Influence of Penetrometer Characteristics on Static Penetration Resistance: Penetration Testing ESOPT, Volume 2:2, Stockholm, 1974
- [3] Huybrechts N., Correlaties tussen grondkarakteristieken – case study paalproeven te Sint-Katelijne-Waver en te Limelette, studiedag Grondonderzoek voor het dimensioneren van funderingen, TI KVIV, Antwerpen, 2002
- [4] Huybrechts N., Maertens J., Statische paalbelastingproeven op grondverdringende schroefpalen in Boomse klei, Geotechniek, 6^e jaargang, nummer 3, juli 2003, Educom, Rotterdam
- [5] Huybrechts N., Maertens J., Mengé P., Resultaten van een uitgebreide grondonderzoekscampagne in de Boomse klei te Sint-Katelijne-Waver, Geotechniek, 6^e jaargang, nummer 4, oktober 2003, Educom, Rotterdam
- [6] Huybrechts N., Maertens J., Statische paalbelastingproeven op grondverdringende schroefpalen aangezet in tertiair zand, Geotechniek, 8^e jaargang, nummer 2, april 2004, Educom, Rotterdam
- [7] Huybrechts N., Maertens J., Uitgegraven proefpalen te Limelette: observaties en metingen, Geotechniek, 8^e jaargang, nummer 3, juli 2004, Educom, Rotterdam

- [8] Lunne, Powell, Robertson, Cone Penetration Test in Geotechnical Practice, 1997
- [9] Meigh, Corbett, Evaluation of undrained shear strength from static CPT in a soft silty clay in Patras, Greece, A.G. Anagnostopoulos, Penetration Testing ESOPT, Volume 2:2, Stockholm, 1974
- [10] Mengé P., Soil Investigation results at Sint-Katelijne-Waver (Belgium), Screw-piles – Installation and design, Brussel, 2001
- [11] Mitchell, Durgunoglu, Static Penetration Resistance of Soils: I. Analysis & II. Evaluation, ASCE Spec. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, NC, 1975, pp 151-171 & 172-189.
- [12] Z. Mlynarek, W. Tschuschke, J. Wierzbicki, CPT National Report – Poland, International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT '95, Volume 3
- [13] G. Ricceri, P. Previatello & F. Colleselli, Relationships between static penetration test results and mechanical properties of soils, Penetration Testing ESOPT, Volume 2:2, Stockholm, 1974
- [14] Thoof K., Afleiden van grondkarakteristieken uit sonderingen: een overzicht van de best bruikbare empirische correlaties voor de Vlaamse praktijk, studiedag Grondonderzoek voor het dimensioneren van funderingen, TI KVIV, Antwerpen, 2002
- [15] Thoof K., Van Tichelen G., Automatische interpretatie en bepaling van richtwaarden voor de geotechnische ontwerpparameters uit statische diepsonderingen., KVIV 13^e Innovatieforum, 15 oktober 2003, Antwerpen
- [16] Y.G. Trofimenkov et al, Cone Penetration Testing in Russia, International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT '95, Volume 1
- [17] Van Alboom G., Soil Investigation campaign at Limelette (Belgium): results, Belgian Screw Pile Technology in Sand – Design & recent Developments, Brussel, 2003
- [18] Van Tichelen G., Stabiliteitsberekeningen voor een kaaimuur met de eindige elementenmethode, eindwerk De Nayerinstituut, 2001, Sin-Katelijne-Waver
- [19] Vergauwen I., De Schrijver P., Van Alboom G., Databank Ondergrond Vlaanderen, Geotechniek, 8^e jaargang, nummer 1, januari 2004, Educom, Rotterdam

Reacties op dit artikel kunnen tot 1 oktober 2007 naar de uitgever worden gestuurd