

De stabiliteit van bouwputten in onverzadigde gronden

ir. M. De Vos

ir. V. Whenham

WTCB – Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf

SAMENVATTING

In een WTCB-onderzoek is aandacht geschonken aan de impact van de niet-verzadigde toestand van de grond op de stabiliteit van taluds. In het proefstation te Limelette is een experimentele bouwput gerealiseerd in de gedeeltelijk verzadigde leemgrond. Na het uitgraven werd de stabiliteit opgevolgd met metingen van de zuiging, het watergehalte en de verplaatsing. De eerste afschuivingen ontstonden op het ogenblik dat de zwakste zuiging optrad. Als middel om de zuiging in de ondergrond te behouden, is de doeltreffendheid van een kunststoffolie getest.

INLEIDING

In de praktijk wordt men niet zelden geconfronteerd met uitgravingen waarvan de stabiliteit onverklaarbaar lijkt (*figuur 1*). Daarnaast krijgt men net zo vaak te maken met de onverwachte instorting van andere (*figuur 2*). Een reden hiervoor is dat er nog grote lacunes bestaan in de kennis over en het goede begrip van bepaalde fenomenen die de stabiliteit van taluds beïnvloeden. Deze vaststelling ligt aan de grondslag van een WTCB-onderzoek waarbij voornamelijk aandacht geschonken wordt aan de impact van de niet-verzadigde toestand van de grond op de stabiliteit van taluds. In dit artikel wordt een kort overzicht gegeven van de resultaten die verkregen werden in het kader van dit onderzoek.



↑ **Figuur 1** Talud waarvan de stabiliteit niet kan verklaard worden met de traditionele rekenmethoden

HET GRONDTYPE

In cohesieve grondtypes kunnen vrij steile taluds uitgevoerd worden. Indien de cohesie haar oorsprong vindt in de aard van de grond (bijv. kleigrond), heeft men het over intrinsieke cohesie. Deze vermindert slechts zeer langzaam, zodat het gevaar voor afschuivingen pas op lange termijn zal optreden. Indien de cohesie van de grond afkomstig is van andere facto-



↑ **Figuur 2** Boven en onder voorbeelden van bruuske en onverwachte afschuivingen

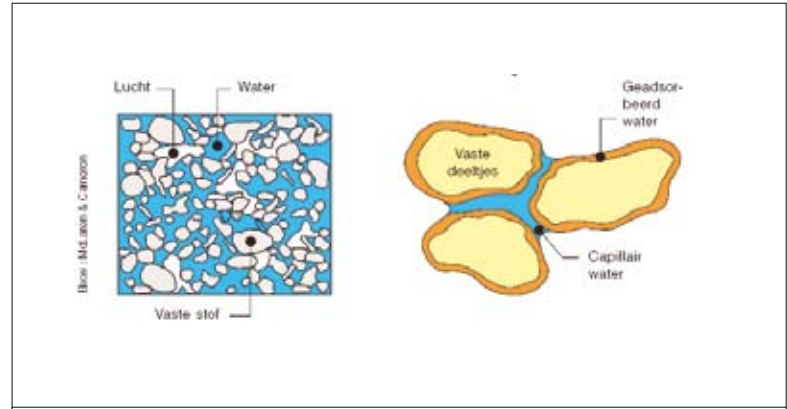
ren (cementering, dichtheid, capillariteit, ...), spreekt men van een schijnbare cohesie. Deze laatste kan veel sneller verdwijnen als gevolg van een plotse watertoevoer of een verwerking van de grond. Om het behoud van de cohesie in de grond te waarborgen, is het bijgevolg nodig de oorsprong ervan te kennen. Verder dient men de impact ervan in aanmerking te nemen bij de berekeningen, zelfs indien het gaat om tijdelijke bouwputten. Cohesieve grondtypes staan in de regel bloot aan krimp als gevolg van eventuele vorst-dooicycli en bevochtigings-drogingscycli. De krimp ligt aan de oorsprong van de vorming van scheuren aan het oppervlak. Deze scheuren leiden niet enkel tot de oppervlakkige verwerking van de grond, maar bevorderen ook de infiltratie van water



↑ **Figuur 3** Afschuiving als gevolg van de infiltratie van water in het talud na slagregen



↑ **Figuur 4** Translatorische afschuiving in zandhoudende grond



↑ **Figuur 5** Verschillende toestanden waaronder water in de grond kan voorkomen

in de grond. Aangezien de onderliggende niet-gescheurde grond minder permeabel is, stapelt het water zich doorgaans op aan het raakvlak tussen de verweerde en de intacte zone, wat progressief aanleiding geeft tot erosie van de taluds of tot grootschaligere afschuivingen (zie *figuur 3*).

De stabiliteit van grondsoorten die geen intrinsieke of schijnbare cohesie vertonen, wordt bepaald door hun interne wrijving en door de eventuele aanwezigheid van water tussen de korrels. De maximale helling van een talud is in dergelijke gevallen niet zo steil. De vastgestelde afschuivingen bij dit grondtype zijn meestal te wijten aan redelijk oppervlakkige terreinverschuivingen (zie *figuur 4*).

In het geval van niet-homogene grond, kan er een afschuiving ontstaan ter plaatse van een niet onderkende zwakke zone of in het raakvlak tussen lagen met een verschillende permeabiliteit (permeabele laag boven een minder permeabele laag).

INVLOED VAN WATER

De aanwezigheid van water in de grond leidt doorgaans tot een vermindering van het contact tussen de vaste deeltjes, wat een vermindering van de effectieve spanningen teweegbrengt (effect versterkt door de filtratiekrachten als het water in beweging is).

Regenval kan aan de grondslag liggen van twee fenomenen die de stabiliteit van een talud in het gedrang kunnen brengen: erosie en infiltratie. Een geërodeerd talud kan een minder stabiele geometrische vorm vertonen, wat aanleiding kan geven tot de progressieve afschuiving van het talud. Door de infiltratie van water kan de grond een deel van zijn schijnbare capillaire cohesie verliezen. Hierdoor kan tevens een waterophoping ontstaan

aan het raakvlak tussen de permeabele grond aan het oppervlak (doorgaans gescheurd en verweerd door bevochtigings-drogingscycli en vorst-dooicycli) en de minder permeabele onderliggende grond.

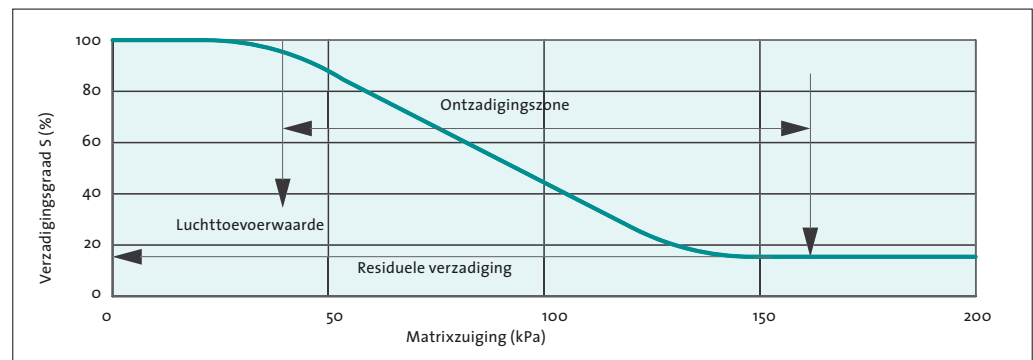
INVLOED VAN DE TIJD

De invloed van de tijd op de stabiliteit van bouwputten is het gevolg van tal van fenomenen:

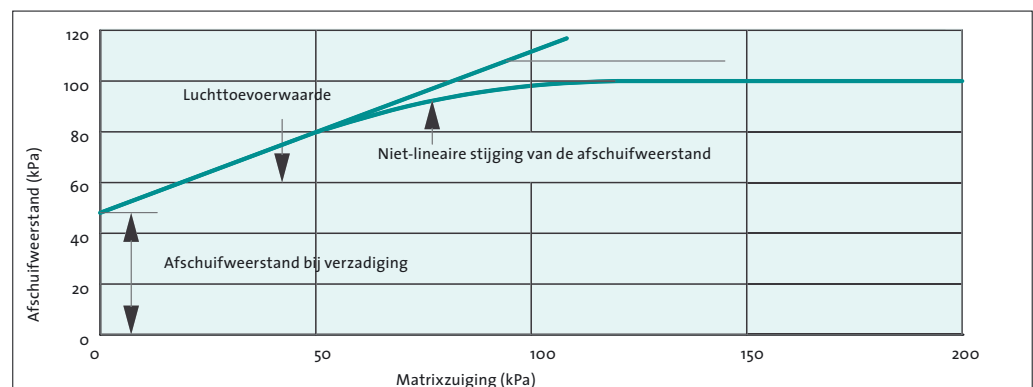
- ontspanning van de grond als gevolg van een uitgraving. Hierdoor kunnen microscheurtjes ontstaan, wat vooral bij kleigronden veel voorkomt. Ze leidt eveneens tot een vermindering van de waterdruk in cohesieve grond-

types, waardoor de afschuifsterkte van de grond op korte termijn toeneemt door de stijging van de capillaire cohesie. Na verloop van tijd kunnen de scheurtjes opgevuld raken met water. Hierdoor bereikt de waterdruk opnieuw een evenwichtstoestand, wat minder gunstig is voor de stabiliteit van het talud.

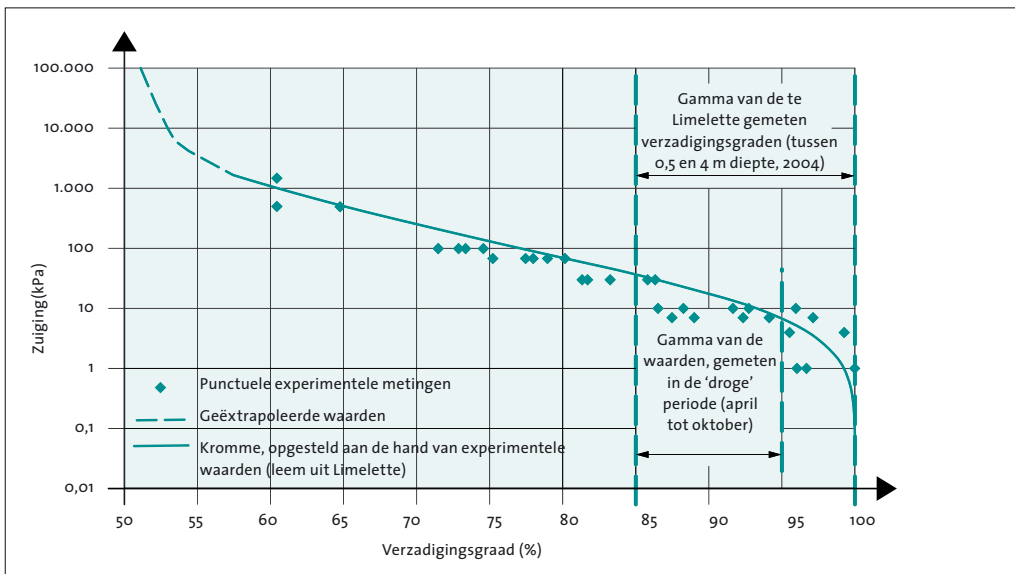
- vorst-dooicycli en bevochtigings-drogingscycli die de grond aan het oppervlak langzaam maar zeker doen verwerken, en dan vooral door een versnelling van de scheurvorming en/of de erosie van de grond. Hierdoor kunnen er min of meer oppervlakkige afschuivingen ontstaan, die teweeggebracht worden door externe factoren (bijv. slagregen of trillingen door het werfverkeer).



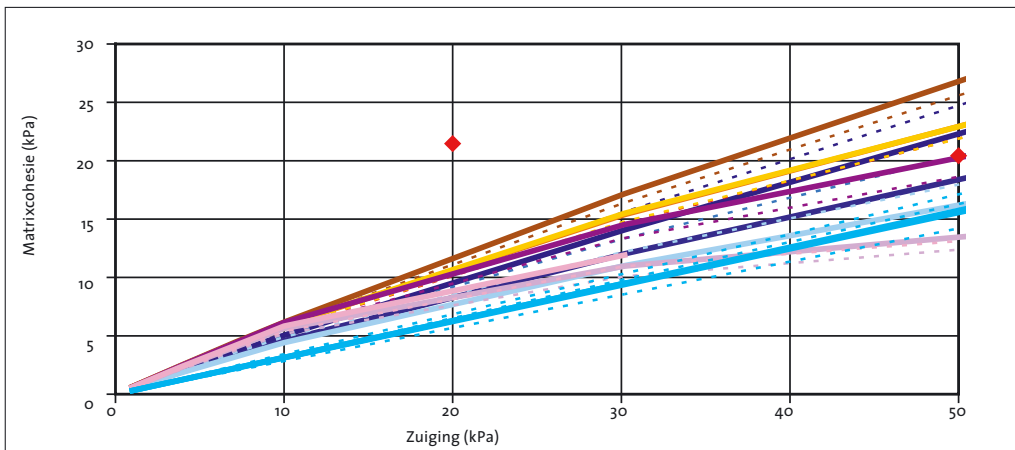
↑ **Figuur 6** Waterretentiekromme



↑ **Figuur 7** Evolutie van de afschuifweerstand, afhankelijk van de matrixzuiging [6].



↑ **Figuur 8** Experimenteel bepaalde retentiekromme voor de leemgrond van Limelette (methode van Richards, toegepast op ongeroerde monsters)



↑ **Figuur 9** Afleiding van de 'matrixcohesie' $c_{matrix} = (u_a - u_w) \cdot tg \phi_b$ voor de leem uit Limelette (*).

- kruip, die op lange termijn aanleiding kan geven tot het instorten van het talud door progressieve afschuiving.

BASISPRINCIPE VAN DE NIET-VERZADIGDE TOESTAND VAN DE GROND

In gedeeltelijk verzadigde gronden, waarbij de ruimte tussen de korrels zowel gevuld is met water als met lucht (zie figuur 5), ruimen de positieve waterdrukken plaats voor spanningen tussen de korrels (matrixzuiging). Deze worden zowel veroorzaakt door de adsorptiekrachten aan de contactpunten water-vaste stof (geval van geadsorbeerd of gebonden water) als door de capillaire werking aan het raakvlak water-lucht (geval van capillair water). De zuiging heeft een positieve invloed op de afschuifweerstand van de grond, omgekeerd evenredig met het watergehalte in de grond.

INVOEREN VAN DE MATRIXZUIGING IN DE BEREKENINGEN

In de literatuur worden verschillende benaderingen voorgesteld waarmee men de invloed van de matrixzuiging op de afschuifweerstand van de grond in rekening kan brengen. De benadering die de voorkeur genoot in het kader van het WTCB-onderzoek is deze, opgesteld door Fredlund [1] en Vanapalli [6]. Ze steunt enkel op de waarneming dat men parallellen kan trekken tussen het afschuifgedrag van de grond en zijn waterretentiekromme (zie figuren 6 en 7). De waterretentiekromme wordt voornamelijk bepaald door de grootte en de vorm van de poriën.

De auteurs maken bovendien gebruik van de algemene vergelijking (1) die doorgaans toegeschreven wordt aan Fredlund en presenteren hun besluiten onder de vorm van een definitie voor de hoek ϕ_b .

Vergelijking van Fredlund :

$$\tau = c' + tg' \varphi' (\sigma - u_a) + tg \varphi_b (u_a - u_w), \quad (1)$$

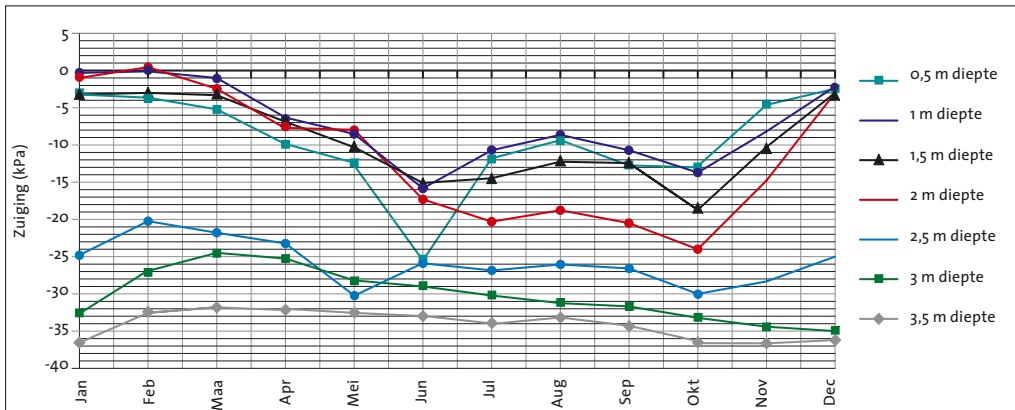
waarbij :

- τ (kPa) = de afschuifweerstand
- c' (kPa) = de effectieve cohesie (zonder de capillariteit in rekening te brengen)
- φ' (°) = de interne wrijvingshoek
- u_a (kPa) = atmosferische druk
- $\sigma - u_a$ (kPa) = de totale spanning
- u_w (kPa) = waterdruk
- $tg \varphi_b (u_a - u_w)$ (kPa) = de invloed van de zuiging op de afschuifweerstand van de grond ('capillaire cohesie' of 'matrixcohesie')
- φ_b (°) = een parameter die het verloop van de afschuifweerstand afhankelijk van de zuigingsgraad weergeeft
- $u_a - u_w$ (kPa) = de zuiging in de grond

Door de bepaling van de waterretentiekromme van de grond enerzijds en de toepassing van een wet die de afschuifweerstand aan de zuigingsgraad koppelt anderzijds, kan men de invloed van de zuiging op de afschuifweerstand begroten. Eens de schijnbare cohesie bepaald is, kan deze in om het even welke berekeningsmethodiek ingevoerd worden. Deze benadering werd toegepast op de studie van de leemgrond van het WTCB-proefstation te Limelette (zie figuren 8 en 9). Tijdens de eerste fase van het onderzoek werden de krommen uit figuur 7 vergeleken met de resultaten van triaxiaalproeven op onverzadigde grondmonsters (CW-methode of 'constant water'-methode), die gedraineerd werden ten opzichte van de lucht en niet ten opzichte van water. Als gevolg van de complexiteit van deze proeven, was het niet mogelijk voldoende betrouwbare resultaten te verkrijgen om definitieve conclusies te kunnen trekken. Om deze reden werd beslist het onderzoek verder te zetten met eenvoudige drukproeven, overeenkomstig de methode van Vanapalli [6]. Deze proeven zijn minder nauwkeurig, maar wel veel makkelijker en sneller uitvoerbaar. Momenteel wordt er een analoge werkwijze gevolgd voor het onderzoek van een aantal andere (vooral zandhoudende) grondsoorten.

SCHATTINGEN EN METINGEN VAN DE ZUIGING IN DE GROND

Aan de hand van grafieken zoals deze voorgesteld in figuur 9 en waarvan de bepaling voor



recte bepaling van de retentiekromme, wat een tamelijk onzekere (erg variabele) parameter blijft.

EXPERIMENTELE TOEPASSING

Om het belang van de invloed van de zuiging op de stabiliteit van uitgravingen te illustreren, werd in het WTCB-proefstation te Limelette een experimentele bouwput gerealiseerd in de gedeeltelijk verzadigde leemgrond (de grondwaterlaag bevindt zich op een diepte van ongeveer 55 m onder het maaiveld). Vóór de realisatie van de bouwput werden klassieke oriënterende proeven uitgevoerd (CPT, boringen met monsternamen voor identificatie- en triaxiaalproeven (CU), ...), evenals specifieke proeven ter bepaling van de zuiging in de grond (watergehalte en tensiometers).

De metingen van de zuiging werden gedurende een jaar vóór de uitgraving opgevolgd, ter bepaling van de maximale en de minimale waarde van de zuiging in de grond, afhankelijk van het seizoen, de diepte en de weersomstandigheden. Aan de hand van deze metingen werd de bouwput zodanig gedimensioneerd dat zijn stabiliteit enkel gerechtvaardigd was (op het vlak van de berekeningen) wanneer de verhoging van de afschuifweerstand, overeenkomstig de zuiging in de droge periode (van april tot oktober) in rekening gebracht werd. Daarna werd de bouwput uitgegraven (juni 2004) en werd de stabiliteit ervan opgevolgd met verschillende meetinstrumenten ter bepaling van de zuiging, het watergehalte en de verplaatsing. Overeenkomstig de voorspellingen ontstonden de eerste afschuivingen van de

verschillende grondsoorten het voorwerp uitmaakt van het huidige WTCB-onderzoek, wordt het mogelijk de toename van de afschuifweerstand afhankelijk van het watergehalte of de zuiging in rekening te brengen, op voorwaarde dat deze vooraf gemeten of geschat werden. Om deze basisinformatie te verkrijgen, dient men ter plaatse de zuiging op te meten. In het verleden was dit niet eenvoudig uit te voeren op de bouwplaats (plaatsing, opvolging). De meer recente opnemers zijn echter beter aangepast aan geotechnische toepassingen.

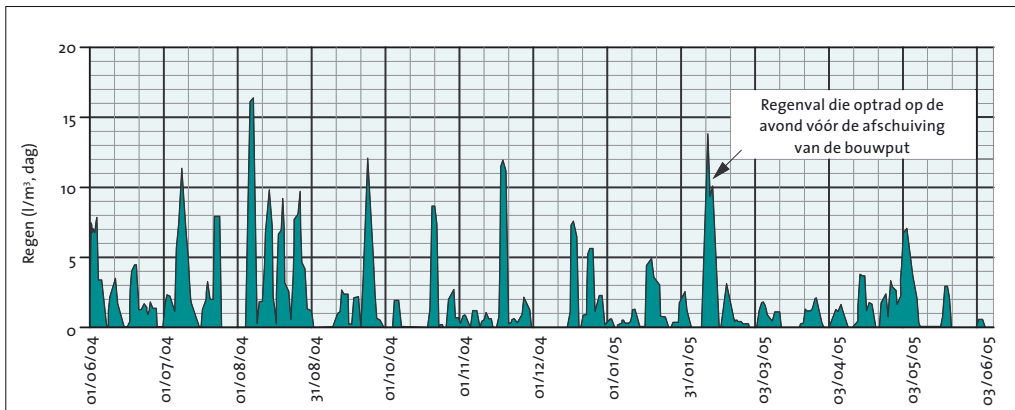
In het kader van het onderzoek werden er vanaf augustus 2003 metingen van de zuiging uitgevoerd in het proefstation te Limelette (leemgrond) aan de hand waarvan statistieken opgesteld werden van het gemiddelde zuigingsniveau per maand (over een periode van bijna 3 jaar) en per diepte. Deze zijn voorgesteld in *figuur 10*. De resultaten zijn uiteraard enkel

geldig voor de leemgrond van Limelette en mogen zonder specifieke studie in geen geval veralgemeend worden. Ze geven echter wel een eerste indicatie van de seizoensgebonden schommelingen van de zuiging waaraan men zich kan verwachten in een leemgrond. Zo stelt men een daling van de zuiging van ongeveer 20 kPa vast tussen de droge en de regenachtige maanden, en dit tot op een diepte van 2 m. Uit *figuur 9* blijkt dat deze schommelingen overeenstemmen met variaties van de capillaire cohesie of de matrixcohesie van 0 kPa tot 5 à 10 kPa, wat niet te onderschatten is voor de stabiliteit van bouwputten.

Als alternatief voor de meting van de zuiging kan men ook metingen van het watergehalte uitvoeren. In dit geval kan het verband tussen het watergehalte en de zuiging afgeleid worden uit de waterretentiekromme van de grond. Deze methode wordt echter afgeraden, omdat de resultaten sterk afhankelijk zijn van de cor-



↑ **Figuur 11** Eerste fase van de experimentele bouwput (afmetingen: 6 m breed, 20 m lang en 3 m diep)



↑ **Figuur 12** Meting van de regenval

bouwput op het ogenblik dat de zwakste zuiging in de grond gemeten werd, met name in januari en februari 2005 (zie figuur 11).

De figuren 12 en 13 geven respectievelijk een overzicht van de neerslagwaarden en de zuiging die opgemeten werden tussen juni 2004 (uitvoering van de bouwput) en juni 2005. Hierin ziet men duidelijk de lage zuigingswaarden in de grond in januari-februari 2005 die, in combinatie met de zware regenval eind januari, geleid hebben tot de afschuiving van de wanden van de experimentele bouwput. Aangezien de afschuivingen slechts oppervlakkig zijn (over een dikte van 75 cm), zeer plots optraden en in verband gebracht kunnen worden met de geringe zuiging in de grond en de zware regenval, kan men veronderstellen dat we inderdaad te maken hebben met een afschuiving als gevolg van een overmatige waterinfiltratie in de verweerde oppervlaktezone van de wanden.

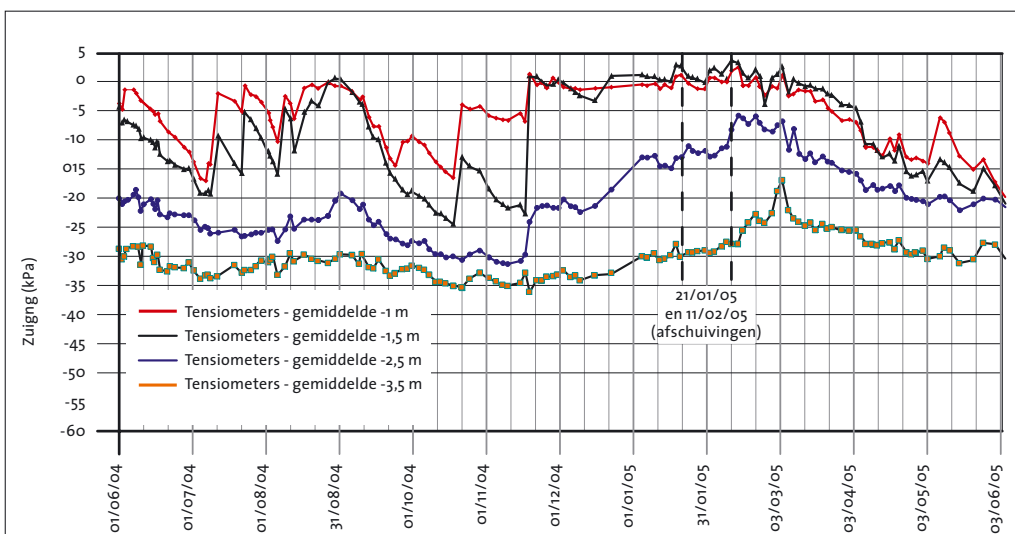
De resultaten van het hiervoor besproken exper-

iment zijn representatief voor een bouwput, uitgevoerd in leemgrond. Deze studie wordt momenteel uitgebreid naar zandgronden, door de opvolging van een aantal bestaande taluds.

De metingen van de verplaatsingen (hellingsmeters, optische metingen) hebben aangetoond dat de verplaatsingen tot op het ogenblik van de afschuivingen zeer klein waren. Hieruit blijkt dat dit fenomeen zeer onverwacht optreedt en met de traditionele verplaatsingsmetingen slechts moeilijk te voorspellen is.

MIDDELEN OM DE ZUIGING IN DE GROND TE BEHOUDEN

Hoewel een regenbui op zich gewoonlijk niet aan de basis ligt van de afschuiving van een talud, en zelfs een talud dat blootgesteld wordt aan een hevig onweer geen aanzienlijke schade oploopt, kan de progressieve aantasting van het oppervlak van een talud wel leiden tot de onverwachte afschuiving ervan, meestal na



↑ **Figuur 13** Meting van de zuiging (gemiddelde van de meetpunten rondom de experimentele bouwput)

een bijzonder voorval zoals een hevige stortbui. Om de taluds te beschermen tegen de invloed van de regen, worden deze niet zelden afgedekt met een kunststoffolie. Dankzij deze folie kan men de oppervlakkige erosie van het talud tegengaan en vermijden dat er grote hoeveelheden water zouden infiltreren. De folie verhindert echter ook de verdamping van het water, zodat er oppervlaktecondensatie kan optreden.

Om te testen in hoeverre de kunststoffolie doeltreffend is om de zuigingsgraad in de grond te waarborgen en uiteindelijk ook het risico op afschuivingen te beperken, werd de experimentele bouwput te Limelette in juni 2005 verbreed om opnieuw intacte wanden te verkrijgen. De wand die het meest blootstond aan de regen werd vervolgens voorzien van een kunststoffolie. De andere wand bleef onbeschermd. Zodoende kon de evolutie van de zuigingsgraad aan weerszijden van de bouwput vergeleken worden, evenals de stabiliteit van de twee wanden. Aan de hand van dit experiment konden de volgende vaststellingen gedaan worden (zie de figuren 14 en 15):

- de kunststoffolie heeft een eerder negatieve invloed aan de bovenkant van de bouwput, vooral tijdens de droge periode. Ze verhindert namelijk de verdamping van het water en leidt tot condensatie onder de folie. Dit verschijnsel brengt echter geen schade aan de grond teweeg en lijkt ook de stabiliteit van de wand niet in het gedrang te brengen.
- de aanwezigheid van de folie leidt tot een aanzienlijke vermindering van:
 - de waterinfiltratie (dit effect heeft op lange termijn gevolgen voor de zuigingsgraad in de diepte)
 - het risico op het ontstaan van afschuivingen na zware regenval
 - de schade tengevolge van de erosie van de wanden en van het risico op plaatselijke afschuivingen.

Men kan dus besluiten dat de positieve invloed van de kunststoffolie voornamelijk toegeschreven kan worden aan het feit dat deze de erosie van de wanden beperkt, de progressieve beschadiging door bevochtgings-drogingscycli vermindert en eveneens het risico op waterinfiltratie na zware regenval inperkt.

Om de doeltreffende afscherming van de wanden tegen waterinfiltraties te waarborgen, moet de kunststoffolie echter aan een aantal basiseisen voldoen:

- aangezien de efficiëntie ervan deels te maken



↑ **Figuur 14** Oppervlakkige afschuiving van de niet-afgeschermd wand (april 2006)

- heeft met het feit dat ze de oppervlakkige verweering van de grond tegengaat, moet de folie kort na het uitgraven van de bouwput aangebracht worden (d.w.z. alvorens de wand beschadigd raakt door bevochtigings-drogingscycli)
- omdat de kunststoffolie tot doel heeft te vermijden dat er water zou binnendringen in de grond, moet deze tot een bepaalde afstand achter de wand doorlopen (minstens 2 tot 3 m, afhankelijk van de grondsoort en de diepte van de bouwput)
 - de folie moet uiteraard waterdicht zijn. Plaatselijke onderbrekingen in de afscherming zouden immers kunnen leiden tot lokale ophopingen van water in het talud, en aldus tot een zwakkere zone met een hoger risico op afschuivingen.

BESLUIT

Het onderzoek met de experimentele bouwput te Limelette heeft – voor zover dat nog nodig was – de belangrijke invloed van de zuiging en van de regenval op de stabiliteit van bouwputten aangetoond. De verschillende afschuivingen van de bouwput na de winter getuigen van een vermindering van de zuiging, die, in combinatie met bepaalde fenomenen (bijv. zware buien), kan leiden tot de instorting van taluds. Het onderzoek dat momenteel loopt binnen het WTCB heeft tot doel hulpmiddelen te ontwikkelen waarmee het mogelijk moet worden de invloed van de zuiging in aanmerking te nemen bij de berekening van de stabiliteit van



↑ **Figuur 15** Staat van de afgeschermd wand na één jaar, na de verwijdering van de folie (juni 2006)

taluds. Dit gebeurt door :

- de uitbreiding van de bestaande databanken met waterretentiekrommen
- de opstelling van krommen die de toename van de afschuifweerstand in verband trachten te brengen met de zuiging
- de promotie van doeltreffende en gebruiksvriendelijke meetsystemen voor de zuiging
- de opstelling van een databank met typische zuigingsniveaus die te verwachten zijn voor de verschillende grondsoorten

LITERATUUR

- [1] Fredlund D.G. en Rahardjo H., Soil mechanics for unsaturated soils. New York, John Wiley & Sons Inc., 1993.
- [2] Vanapalli S.K. en Fredlund D.G., Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength. Advances in Unsaturated Soils. Geotechnical Special Publication, nr. 99, ed. C. Shackleford, S.L. Houston and N-Y. Chang, Reston: American Society of Civil Engineers, 2000.
- [3] Vanapalli S.K. en Fredlund D.G., Empirical procedures to predict the shear strength of unsaturated soils. Seoul (Korea), Proceedings of the 11th Asian Regional Conference, 16-20 augustus 1999.
- [4] Vanapalli S.K. en Fredlund D.G., Interpretation of undrained shear strength of unsaturated soils in terms of stress state variables. 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, ed. Sung-Wan Hong et al. Tacio de Campos & E.A. Vargas, Freitas Editorial, 21-25 april 1997.
- [5] Vanapalli S.K., Fredlund D.G., Pufahl D.E. en Clifton A.W., Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. Canadian Geotechnical Journal, nr. 33(3), 1996.
- [6] 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 1996.
- [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), biennale 2003-2005.

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