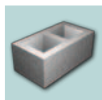


**D**e toepassing van de 'soil mix'-technologie voor grond- en waterkerende wanden tijdens graafwerken is in België aan een sterke opmars bezig. Het biedt namelijk een voordeliger alternatief voor betonnen secans palenwanden en zelfs voor Berlijnse wanden.



✍️ P. Ganne, dr. ir., projectleider, laboratorium 'Grondmechanica & Monitoring', WTCB

N. Huybrechts, ir., afdelingshoofd, afdeling 'Geotechniek', WTCB

F. De Cock, ir., Geotechnical Expert Office, Geo.be

B. Lameire, ing., Belgische Vereniging Aannemers Funderingswerken (ABEF)

J. Maertens, prof. ir., K.U.Leuven

## 1 INLEIDING

Bij 'soil mixing' ('mixed in place' of 'deep mixing') wordt de grond *in situ* mechanisch vermengd, terwijl er een cementgebonden bindmiddel geïnjecteerd wordt. De cilindervormige 'soil mix'-kolommen of rechthoekige panelen worden naast elkaar geplaatst, maar wel overlappend (secans) uitgevoerd, zodanig dat er een doorlopende 'soil mix'-wand gerealiseerd wordt [5] (zie afbeeldingen 1 en 2). Vóór het uitharden worden er een aantal H- of I-profielen in het 'soil mix'-materiaal geplaatst die tot doel hebben om de schuif- en



**Afb. 1** 'Soil mix'-wand met een grond- en waterkerende functie.

buigkrachten in de kerende constructie op te nemen. Het 'soil mix'-materiaal geeft bovendien de grond- en waterdrukken door aan de profielen en verhoogt de buigstijfheid van de grondkering. De druksterkte en de elasticiteitsmodulus van het 'soil mix'-materiaal vormen bijgevolg essentiële parameters.

De toepassing van 'soil mix'-wanden als grond- en/of waterkerende constructies biedt enkele specifieke voordelen :

- doordat er bij de toepassing van de 'soil mix'-techniek geen grote trillingen veroorzaakt worden en er slechts een beperkte ontspanning van de grond optreedt, kan deze techniek uitgevoerd worden in de dichte nabijheid van bestaande constructies
- aangezien er op bouwplaatsen met 'soil mix'-wanden geen constante betonaanvoer nodig is (in tegenstelling tot bouwplaatsen met betonnen secans palenwanden), zijn ze minder gevoelig voor vertragingen door bijvoorbeeld verkeersopstoppingen
- bij de 'soil-mix'-techniek komt er minder retourspecie vrij dan bij jet-grouting (= *Very High Pressure Grouting* of VHP).

Het is echter niet altijd eenvoudig om de kwaliteit van het 'soil mix'-materiaal goed in te schatten vóór de uitvoering. De heterogeniteit van het 'soil mix'-materiaal (bv. aanwezigheid van grondinsluitels) is een grote bron van onzekerheid die onder meer bepaald wordt door de ondergrond, het mengproces, enz.

In dit artikel bespreken we een procedure waarmee men de druksterkte en de elasticiteits-

modulus van het 'soil mix'-materiaal kan inschatten en meten. Deze procedure kon gevalideerd worden dankzij een uitgebreide proefcampagne die bestond uit de uitvoering van laboratoriumproeven op *in situ* gekernd 'soil mix'-materiaal uit Belgische bodems. We zullen daarnaast ook een procedure uit de doeken doen voor de bepaling van de karakteristieke druksterkte (voor een fractiel van 5 %) van het 'soil mix'-materiaal.

Na een beschrijving van de verschillende 'soil mix'-systemen die gebruikt worden in België, geven we een uitvoerige bespreking van de gehanteerde proefprocedures en lichten we de proefresultaten toe.

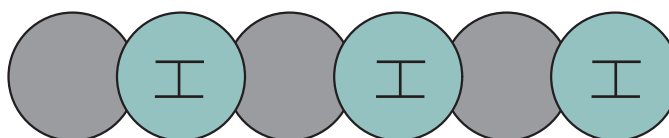
## 2 'SOIL MIX'-SYSTEMEN IN BELGIË

In België worden er momenteel drie soorten 'soil mix'-systemen gebruikt die aangeduid worden met de letterwoorden C-mix®, TSM en CSM. Alle drie de systemen zijn gebaseerd op de injectie van een cementspecie.

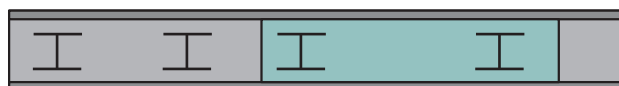
### 2.1 C-MIX®

Bij dit procedé maakt men gebruik van een aangepaste boormachine en een speciaal ontworpen mengboorkop. Deze boorkop draait rond een verticale as en zorgt zo voor de mechanische versnijding van de grond. Tijdens het boren wordt er een mengsel van water en bindmiddel (de water-bindmiddelverhouding ligt tussen 0,6 en 0,8) onder lage druk geïn-

A. Cilindervormige 'soil mix'-kolommen



B. Rechthoekige 'soil mix'-panelen



**Afb. 2** Schematisch boven-aanzicht van de secansuitvoering van cilindervormige 'soil mix'-kolommen en rechthoekige 'soil mix'-panelen.

jecteerd (< 5 bar). De geïnjecteerde bindmiddelhoeveelheid varieert van 350 tot 450 kg/m<sup>3</sup>, afhankelijk van het grondtype. 0 tot 30 % van dit bindmiddel komt tijdens het mengen opnieuw aan het oppervlak (retourspecie) en zal afgevoerd worden.

De met dit procedé gerealiseerde 'soil mix'-elementen bestaan uit cilindervormige kolommen met een nominale diameter tussen 0,43 en 1,03 m (volgens de diameter van de boorkop). Indien deze techniek gebruikt wordt voor kerende constructies, kan er per dag zo'n 160 m<sup>2</sup> 'soil mix'-wand geproduceerd worden.

De productiesnelheid kan nog verhoogd worden door het gebruik van een Twinmix® of Triple C-MIX®. De eerste heeft twee mengboorkoppen waardoor men twee overlappende, cilindervormige kolommen tegelijkertijd kan uitvoeren (dit stemt overeen met een wandlengte van 0,8 tot 1,2 m) en de dagproductie opgetrokken kan worden tot 210 m<sup>2</sup>. De laatste heeft drie mengboorkoppen naast elkaar waardoor men in één keer een totale wandlengte van 1,5 tot 1,8 m kan produceren, hetgeen overeenstemt met een productiesnelheid van 300 m<sup>2</sup> per dag.

## 2.2 TUBULAR SOIL MIX (TSM)

De TSM-techniek berust op een combinatie van mechanische en hydraulische menging. De grond wordt immers niet alleen versneden door de mengboorkop die rond de verticale as draait, maar ook door de injectie van een mengsel van water en bindmiddel onder hoge druk (tot 500 bar). De water-bindmiddelverhouding van dit mengsel ligt tussen 0,6 en 1,2. De geïnjecteerde mengselhoeveelheid varieert meestal van 200 tot 450 kg/m<sup>3</sup>, afhankelijk van het grondtype. 0 tot 30 % van dit bindmiddel komt tijdens het mengen opnieuw aan het oppervlak (retourspecie) en zal afgevoerd worden.

De met dit procedé gerealiseerde 'soil mix'-elementen bestaan uit cilindervormige kolommen met een nominale diameter tussen 0,38 en 0,73 m. De productiesnelheid bedraagt ongeveer 80 m<sup>2</sup> 'soil mix'-wand per dag.

Ook hier bestaat er een twin- en triple-versie. De totale wandlengte van de twee (drie) cilindervormige kolommen van een twin- (triple-) versie varieert van 0,8 tot 1,4 m (1,2 tot 2,1 m). Op deze manier stijgt de productiesnelheid respectievelijk tot ongeveer 180 m<sup>2</sup> en 250 m<sup>2</sup> 'soil mix'-wand per dag.

## 2.3 CUTTER SOIL MIX (CSM)

In tegenstelling tot de voorgaande technieken, is het toestel voor dit procedé commercieel verkrijgbaar. Het maakt gebruik van twee snij-

wielen die onafhankelijk rond een horizontale as draaien en de grond versnijden. Tegelijkertijd wordt een mengsel van water en bindmiddel onder lage druk geïnjecteerd (< 5 bar). De water-bindmiddelverhouding ligt tussen 0,6 en 1,2. De geïnjecteerde bindmiddelhoeveelheid varieert meestal van 200 tot 400 kg/m<sup>3</sup>, afhankelijk van het grondtype. 0 tot 30 % van dit bindmiddel komt tijdens het mengen opnieuw aan het oppervlak (retourspecie) en zal afgevoerd worden.

De met dit procedé gerealiseerde 'soil mix'-elementen bestaan uit rechthoekige panelen. In België hebben deze panelen een lengte van 2,4 m en een dikte van 0,55 m, hoewel er internationaal ook frezen met andere afmetingen verkrijgbaar zijn. De productiesnelheid bedraagt ongeveer 100 m<sup>2</sup> tot 250 m<sup>2</sup> 'soil-mix'-wand per dag.

## 3 WTCB-PROEFCAMPAGNE

Zoals eerder vermeld, zijn de druksterkte en de elasticiteitsmodulus van het 'soil mix'-materiaal belangrijke parameters voor de berekening van de integriteit van de 'soil mix'-wand. We beschrijven hierna een procedure voor de bepaling van de druksterkte en de elasticiteitsmodulus van het 'soil mix'-materiaal. In de volgende paragrafen zullen we vervolgens deze procedures valideren (§ 4) en de proefresultaten interpreteren (§ 5).

Voor dit WTCB-onderzoek boorde men op 23 verschillende bouwplaatsen in België met een verschillend grondtype horizontaal enkele kernen met uiteenlopende 'soil mix'-systemen. In het totaal werden er op deze kernen 950 uniaxiale drukproeven en 100 elasticiteitsmodulusproeven uitgevoerd. Er werden daarnaast ook proeven uitgevoerd op verse 'soil mix'-proefstukken (*wet grab*) en proefstukken die in het laboratorium vermengd werden.

### 3.1 UITVOERING VAN DE UNIAXIALE DRUK-PROEVEN

De laboratoriumproef voor de bepaling van de (uniaxiale) druksterkte (UCS = *Unconfined Compressive Strength*) werd uitgevoerd op proefstukken met een diameter van 85 tot 115 mm en een 'hoogte/diameter'-verhouding van 1 (NBN EN 206 [2]). De resultaten van de proefstukken met grondinsluitingen groter dan 1/6 van de diameter werden uitgesloten, op voorwaarde dat niet meer dan 15 % van de proefstukken van één specifieke bouwplaats uitgesloten werd. Deze uitsluiting vloeit voort uit de overweging dat een grondinsluiting van 20 mm of minder geen invloed zal uitoefenen op het gedrag van een 'soil mix'-constructie. Een grondinsluiting van 20 mm in een proefstuk met een diameter van 100 mm zal het proefresultaat daarentegen wel aanzienlijk

beïnvloeden. Deze voorwaarde is vanzelfsprekend enkel van toepassing wanneer aangemen wordt dat er in de 'soil mix'-constructie geen grondinsluitingen voorkomen die groter zijn dan 1/6 van de breedte van de 'soil mix'-constructie.

### 3.2 UITVOERING VAN DE ELASTICITEITSMODULUSPROEVEN

De laboratoriumproef voor de bepaling van de elasticiteitsmodulus werd uniaxiaal uitgevoerd op *in situ* genomen proefkernen met een diameter van 85 mm tot 115 mm en een 'hoogte/diameter'-verhouding van 2. De geselecteerde kernen hadden een visueel betere kwaliteit om het uniaxiale gedrag tijdens de proef te behouden. De elasticiteitsmodulus werd secans bepaald door het aanbrengen van een cyclische belasting die tussen 10 % en 30 % van de geschatte druksterkte van de proefstukken bedroeg (NBN B 15-203 [1]). Na de bepaling van de elasticiteitsmodulus werd de belasting verhoogd voor de uitvoering van de drukproeven.

### 3.3 VERGELIJKING TUSSEN GEKERNDE EN 'WET GRAB'-PROEFSTUKKEN

In paragrafen 4 en 5 worden enkel de laboratoriumproeven op gekernde proefstukken besproken. Dit werd beslist na een vergelijkend onderzoek van de druksterkte van de gekernde proefstukken van alle bouwplaatsen en de 'wet grab'-proefstukken van twee bouwplaatsen.

De 'wet grab'-proefstukken werden een half uur na de uitvoering van de 'soil mix'-wand vergaard met een speciaal hiervoor ontworpen cilindervorming bemonsteringsgereedschap. Dit gereedschap bleef gesloten tot op een diepte van  $2 \pm 0,2$  m om dan geopend te worden over een hoogte van 0,2 m totdat het gevuld was met 'soil mix'-materiaal. Ten slotte werd het gesloten en naar het grondoppervlak gebracht. Het vergaarde materiaal werd bewaard in cilindrische mallen (diameter : 113 mm; hoogte : 220 mm) in een klimaatkamer (vochtigheid > 98 %; temperatuur :  $20 \pm 2$  °C). Twee weken later kernde men de andere proefstukken op dezelfde locatie (op  $2,0 \pm 0,2$  m diepte).

De 'wet grab'-proefstukken en de kernen werden op dezelfde dag beproefd, na een uithardingstijd van 14 dagen. Deze procedure werd tweemaal uitgevoerd op een bouwplaats in Gent (CSM in tertiair zand) en op een bouwplaats in Leuven (CSM in tertiair zand).

De verschillen tussen de gemiddelde druksterkte van de gekernde proefstukken en de 'wet grab'-proefstukken varieerden van -10 % tot +35 % (zie tabel 1 op p.3) en konden bijgevolg niet volledig toegeschreven worden aan de variabiliteit van de proefresultaten [4].

Wellicht hebben ook de omstandigheden tijdens de uitharding een grote invloed. Het nemen van ‘wet grab’-proefstukken is bijgevolg geen volwaardig alternatief voor het nemen van kernen.

**3.4 DRUKSTERKTE BOVENAAN DE KEERMUUR**

We konden op verschillende bouwplaatsen vaststellen dat de druksterkte van de eerste meter ‘soil mix’-materiaal sterk beïnvloed was door de uitvoeringsprocedure (bv. infiltratie van spoelwater).

De grafiek uit afbeelding 3 geeft aan dat op de bouwplaats te Brugge (CSM in kwartair zand) de druksterkte van proefstukken van de eerste meter slechts ongeveer 60 % van de gemiddelde druksterkte op grotere diepte bedraagt. De bovenzijde van de wand is met andere woorden niet representatief voor het dieper gelegen gedeelte. We bespreken in de volgende paragrafen (§ 4 en 5) dan ook enkel laboratoriumproeven die uitgevoerd werden op proefstukken die gekernd werden op een diepte van meer dan 1 m onder het oppervlak.

Het feit dat de druksterkte van de eerste meter materiaal beduidend lager kan liggen dan deze van het dieper gelegen materiaal, hoeft niet onmiddellijk een probleem te vormen voor ‘soil mix’-wanden : de eerste meters van kerende constructies worden immers vaak minder zwaar belast.

**3.5 INVLOED VAN DE UITHARDINGSTIJD OP DE DRUKSTERKTE**

De druksterkte van een ‘soil mix’-proefstuk hangt onder meer af van de uithardingstijd. Tijdens onze onderzoekscampagne varieerde de uithardingstijd van de ‘soil mix’-proefstukken van 14 tot 180 dagen. Daarom deden we voor de bepaling van de invloed van de uithardingstijd een beroep op proefstukken die in het laboratorium gemengd werden.

De grond en het bindmiddel werden in het laboratorium gemengd aan de hand van een specifieke procedure. Om de homogeniteit van de proefstukken te waarborgen, werd elke reeks van 24 proefstukken gefabriceerd tijdens eenzelfde menghandeling. Na 3, 7, 14, 28, 56 en 91 dagen bepaalden we de druksterkte van vier proefstukken. Met de volgende formule kan men de gemiddelde druksterkte berekenen in functie van de tijd :

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm}$$

waarbij :

- $f_{cm}(t)$  : de evolutie van de druksterkte met de tijd [MPa]
- $f_{cm}$  : de druksterkte na 28 dagen [MPa].

Site – Element	Geboorde kernen	‘Wet grab’-proefstukken
Gent Element I	$\mu = 2,37$ MPa $V = 15$ % # = 5	$\mu = 2,61$ MPa $V = 9$ % # = 4
Gent Element II	$\mu = 1,60$ MPa $V = 16$ % # = 5	$\mu = 1,85$ MPa $V = 5$ % # = 4
Leuven Element I	$\mu = 3,98$ MPa $V = 20$ % # = 4	$\mu = 3,68$ MPa $V = 6$ % # = 4
Leuven Element II	$\mu = 4,99$ MPa $V = 14$ % # = 5	$\mu = 3,64$ MPa $V = 12$ % # = 4

(\*) # = het aantal proefstukken  
 $\mu$  = de gemiddelde druksterkte  
 $V$  = de variatiecoëfficiënt van de metingen van de druksterkte)

**Tabel 1** Vergelijking tussen de resultaten van de druksterkte na 14 dagen van gekernde proefstukken en ‘wet grab’-proefstukken (\*).

en

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left(s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right)$$

waarbij :

- $t$  : de uithardingstijd [dagen]
- $s$  : de gefitte parameter (volgens de norm NBN EN 1992-1-1) [3].

Het soort en de hoeveelheid bindmiddel, de waterdosering en de invloed van de uithardingstijd werden in 11 verschillende combinaties beproefd, afhankelijk van het grondtype. Naargelang van de bodemgesteldheid in België, de gebruikte hoeveelheid water en cement en het soort bindmiddel (zie § 2) varieerde de gefitte parameter ‘s’ van 0,96 tot 0,99 (bindmiddel gebruikt bij CSM) en van 1,28 tot 1,71 (bindmiddel gebruikt bij C-mix®).

**4 PROEFRESULTATEN**

Er werden 950 drukproeven en 100 proeven ter bepaling van de elasticiteitsmodulus uitge-

voerd op proefstukken die gekernd werden op 23 verschillende bouwplaatsen in België.

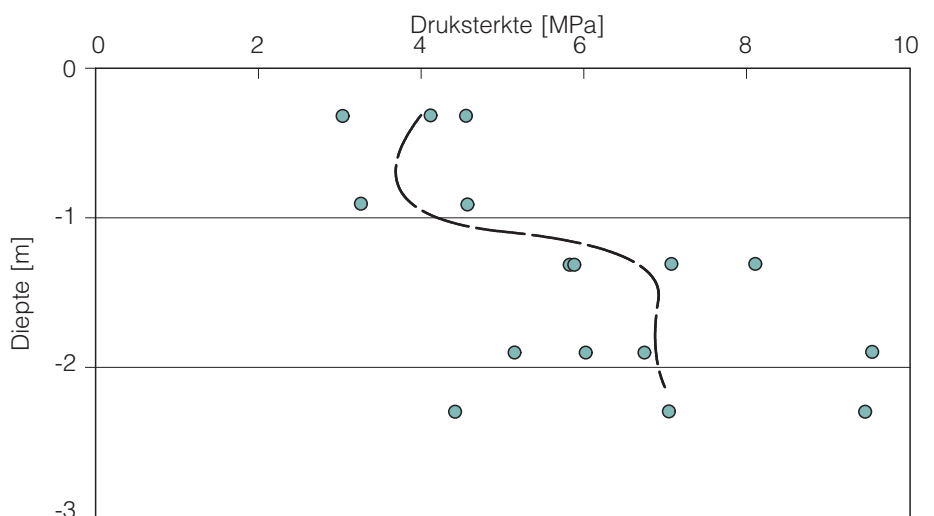
De grond werd vermengd met een water-bindmiddelmengsel volgens diverse ‘soil mix’-technieken en volgens de uitvoeringsparameters die gehanteerd worden in België (zie § 2). Het is duidelijk dat de druksterkte en de elasticiteitsmodulus beïnvloed worden door deze uitvoeringsparameters, het grondtype, enz.

**4.1 INVLOED VAN HET GRONDTYPE OP DE DRUKSTERKTE**

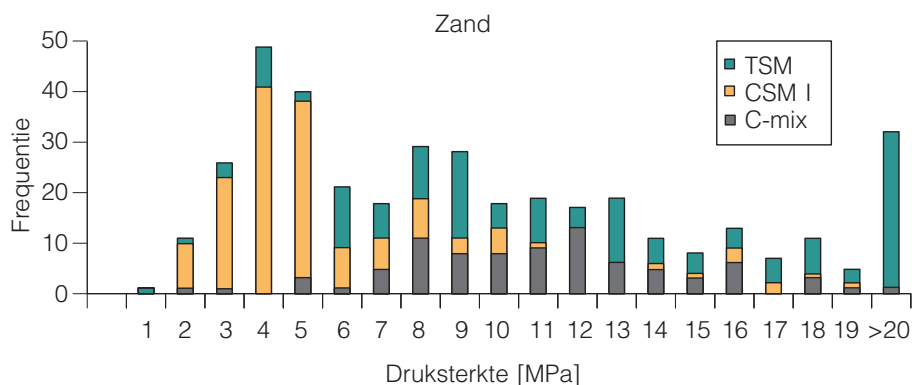
We corrigeerden de gemeten druksterktes uit deze paragraaf naar een uithardingstijd van 28 dagen (zie § 3.5) om de invloed van het grondtype te kunnen inschatten.

Om dezelfde reden classificeerden we de gronden als kwartair of tertiair zand (A), leem (B) of alluviale klei (C).

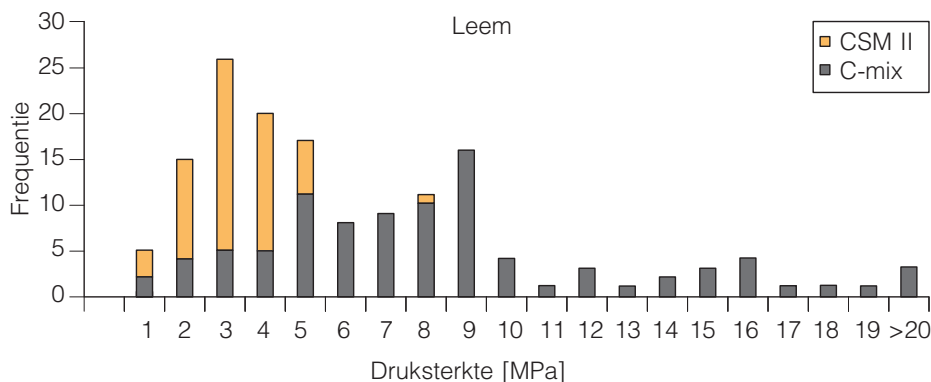
De histogrammen uit de afbeeldingen 4 tot 6



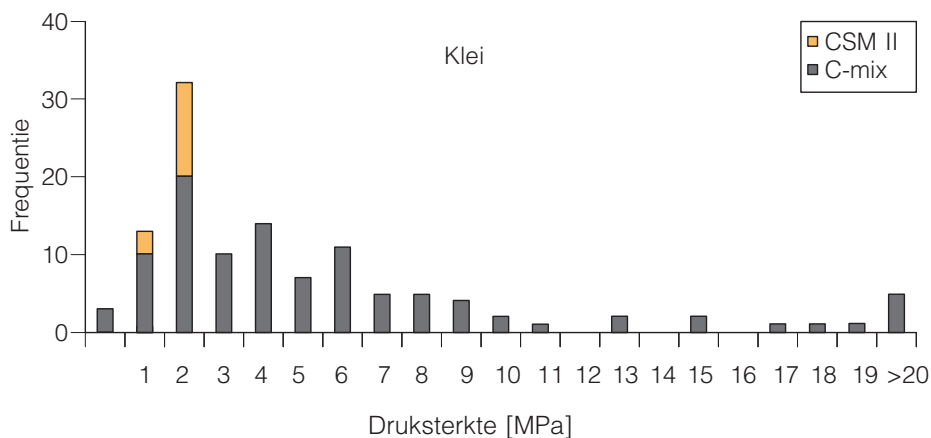
**Afb. 3** Druksterkte van proefstukken die gekernd werden op verschillende dieptes (bouwplaats te Brugge : CSM in kwartair zand).



**Afb. 4 Druksterkte [MPa] van gekernde 'soil mix'-proefstukken gemengd in kwartair en tertiair zand volgens de TSM-, CSM- of C-mix@-techniek. De proefresultaten werden gecorrigeerd naar een uithardingstijd van 28 dagen.**



**Afb. 5 Druksterkte [MPa] van gekernde 'soil mix'-proefstukken gemengd in leemgrond volgens de CSM- of C-mix@-techniek. De proefresultaten werden gecorrigeerd naar een uithardingstijd van 28 dagen.**



**Afb. 6 Druksterkte [MPa] van gekernde 'soil mix'-proefstukken gemengd in alluviale kleigrond volgens de CSM- of C-mix@-techniek. De proefresultaten werden gecorrigeerd naar een uithardingstijd van 28 dagen.**

geven de druksterkte weer afhankelijk van het grondtype en na correctie naar een uithardingstijd van 28 dagen. Hieruit blijkt duidelijk dat de druksterkte van de 'soil mix'-kernen uit zandgronden doorgaans hoger ligt dan de druksterkte van kernen uit kleigronden. 80 % van de proefstukken heeft na 28 dagen een druksterkte die hoger ligt dan 4,5 MPa (zand), 3,0 MPa (leem) en 1,7 MPa (klei). Ten slotte merken we op dat de druksterkte voor alle grondtypes sterk varieert.

#### 4.2 ELASTICITEITSMODULUS VAN 'SOIL MIX'-MATERIAAL

We bepaalden de secans elasticiteitsmodulus van 100 gekernde 'soil mix'-proefstukken met behulp van een cyclische belasting. Om de druksterkte te bepalen werd de proef vervolgens voortgezet tot er een breuk optrad. De gehanteerde proefstukken werden gekernd op 17 bouwplaatsen met een verschillend grondtype en verschillende uitvoeringsparameters (zie § 2). De uithardingstijd van de geteste 'soil mix'-proefstukken lag tussen 14 en 180 dagen. Omdat we in deze paragraaf de correlatie tussen de elasticiteitsmodulus en de druksterkte van het 'soil mix'-materiaal willen bepalen, werden de testresultaten niet gecorrigeerd naar een bepaalde uithardingstijd.

In afbeelding 7 (p. 5) wordt de elasticiteitsmodulus van het 'soil mix'-materiaal weergegeven in functie van de druksterkte. Volgens de lineaire relatie die men kon leggen tussen de elasticiteitsmodulus en de druksterkte, bedraagt de beste geschatte waarde van de elasticiteitsmodulus ongeveer :

$$E = 1000 \text{ UCS}$$

waarbij :

- E : de secans elasticiteitsmodulus [MPa]
- UCS : de druksterkte [MPa] van het 'soil mix'-materiaal.

De correlatiecoëfficiënt bedraagt 94 %. Voor een fractiel van 5 % bedraagt de elasticiteitsmodulus van het 'soil-mix'-materiaal :

$$E = 620 \text{ UCS}$$

Omgekeerd bedraagt de elasticiteitsmodulus voor een hoge fractiel van 5 % :

$$E = 1460 \text{ UCS}$$

Deze schattingen gelden enkel voor druksterketwaarden tussen 2 en 30 MPa.

#### 5 BEPALING VAN DE KARAKTERISTIEKE DRUKSTERKTE

De druksterkte (getest zoals in § 3) wordt gebruikt als kwaliteitscontrole voor het *in situ* gekernd 'soil mix'-materiaal. De bedoeling is om een schatting te maken van de karakteristieke druksterkte (voor een fractiel van 5 %) die gehanteerd kan worden bij het ontwerp. Bij een conventionele schatting van de karak-

teristische waarde gaan we uit van een Gaussiaanse verdeling van de proefresultaten. In dit geval wordt de karakteristieke druksterkte als volgt ingeschat (verwaarlozing van student t-correctie) :

$$X_{k,0.05} = \bar{X} - 1,64 \sigma$$

waarbij :

- $X_{k,0.05}$  : de geschatte karakteristieke druksterkte (voor een fractiel van 5 %)
- $\bar{X}$  : de gemiddelde waarde
- $\sigma$  : de standaardafwijking van de verdeling van de testresultaten.

In België is men van mening dat deze methode te pessimistische resultaten oplevert voor een populatie van de druksterktes van 'soil mix'-materiaal. Tabel 2 op p. 6 levert hiervan het bewijs door het laagste 5 %-fractiel proefresultaat (zoals bepaald op de testpopulatie) te vergelijken met  $X_{k,0.05}$  (zie bovenstaande vergelijking).

Zo leveren de druksterktes die gemeten werden op proefstukken afkomstig van de bouwplaats Gent KII (TSM-techniek in tertiair zand) bijvoorbeeld een  $X_{k,0.05}$  van -0,7 MPa op. We merken op dat een negatieve karakteristieke druksterkte fysisch geen betekenis heeft. Toch bedraagt het laagste proefresultaat voor een fractiel van 5 % van de populatie 6,3 MPa. Dit substantiële verschil wordt veroorzaakt door de niet-symmetrische en niet-Gaussiaanse verdeling van de resultaten van de druksterktes (zie afbeelding 8). De opgemeten druksterktes van meer dan 25 MPa veroorzaken namelijk een grote toename van de standaardafwijking en bijgevolg een daling van de  $X_{k,0.05}$ -waarde.

Een schatting van de karakteristieke waarde waarbij uitgegaan wordt van een lognormale verdeling, levert een meer realistische schatting op. Voor de bouwplaats Gent KII bedraagt de geschatte karakteristieke waarde, uitgaande van een lognormale verdeling, bijvoorbeeld 5,0 MPa. Deze waarde moet vergeleken worden met het laagste 5 %-fractiel proefresultaat (zoals bepaald op de proefpopulatie : 6,3 MPa). De 20 % onderschatting van de karakteristieke waarde van de druksterkte is te wijten aan de imperfecte lognormale verdeling van de proefresultaten.

Het histogram uit afbeelding 9 geeft het logaritme (grondtal 10) weer van de proefresultaten van de druksterkte op 'soil mix'-proefstukken van Gent KII. Deze grafiek suggereert dat de populatie van de proefresultaten uit twee subpopulaties bestaat : een populatie rond 1,1 (dus 13 MPa) en één rond 1,5 (dus 32 MPa).

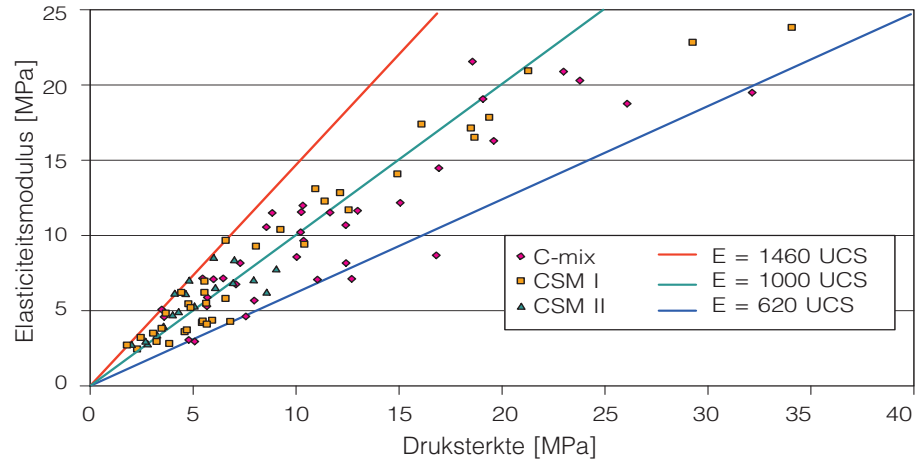
Over het algemeen (zie tabel 2) is de schatting van de karakteristieke waarde waarbij uitgegaan wordt van een lognormale verdeling realistischer dan de schatting gebaseerd

op de Gaussiaanse benadering. We wijzen erop dat men de karakteristieke waarde van de druksterkte van 'soil mix'-materiaal verkrijgt door proefstukken met een lengte en een diameter van telkens ongeveer 100 mm te beproeven. Er zal verder onderzoek worden uitgevoerd om de invloed van de schaal van de proefstukken op deze karakteristieke waarde te analyseren.

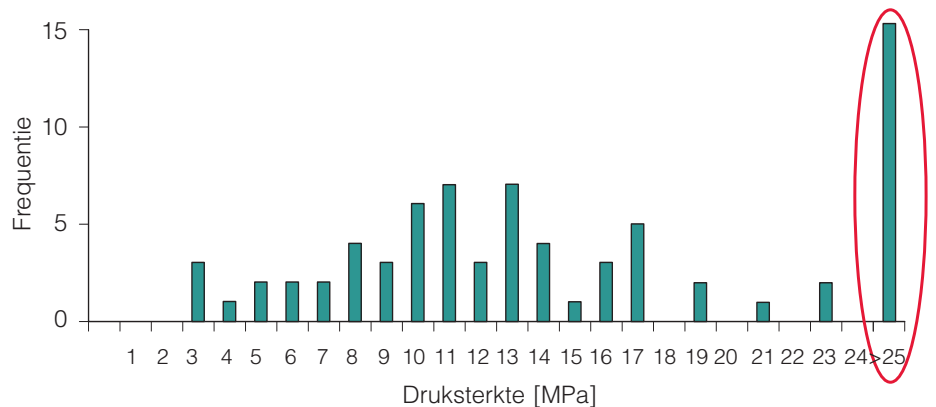
6 CONCLUSIES

De toepassing van de 'soil mix'-technologie voor de realisatie van grond- en waterkerende constructies kent in België en ook elders in de wereld een sterke toename.

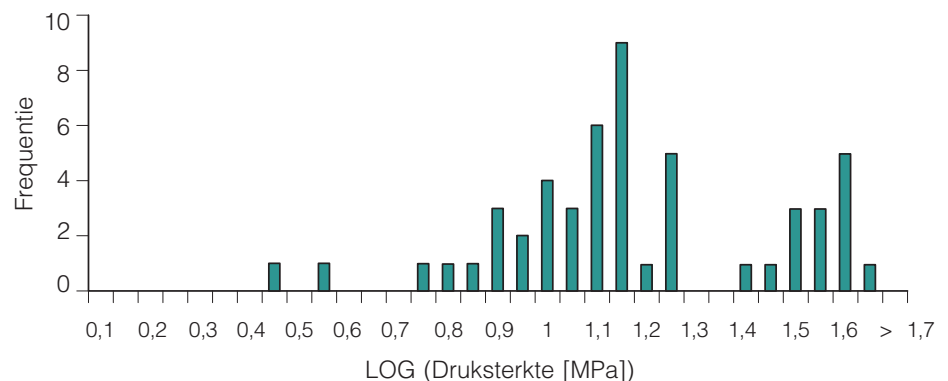
Voor de toepassing van de 'soil mix'-technologie voor kerende constructies moet



Afb. 7 Verhouding tussen de elasticiteitsmodulus [MPa] en de druksterkte [MPa] van 'soil mix'-kernen uit verschillende grondsoorten (zand, leem of klei).



Afb. 8 Druksterkte van 'soil mix'-proefstukken gekernd op de bouwplaats Gent KII (TSM in tertiair zand).



Afb. 9 Logaritme van de druksterkte van 'soil mix'-proefstukken gekernd op de bouwplaats Gent KII (TSM in tertiair zand).

**Tabel 2** Vergelijking van de karakteristieke druksterkte voor een 5 %-fractiel van de drukproeven op 'soil mix'-materiaal, uitgaande van een Gaussiaanse en een lognormale verdeling. De proeven worden per bouwplaats uitgevoerd op proefstukken die op dezelfde diepte ( $\pm 0,2$  m) gekernd werden met ongeveer dezelfde uithardingstijd. Proefstukken van verschillende bouwplaatsen kunnen op verschillende dieptes gekernd worden of kunnen een verschillende uithardingstijd hebben.

Site	'Soil mix'-systeem	Grond	Gemiddelde waarde van de druksterkte [MPa]	Standaardafwijking van de druksterkte [MPa]	Variatie-coëfficiënt [%]	Aantal geteste proefstukken	Karakteristieke druksterkte voor een fractiel van 5% [MPa] (proefpopulatie)	Karakteristieke druksterkte voor een fractiel van 5% [MPa] (Gaussiaans)	Karakteristieke druksterkte voor een fractiel van 5% [MPa] (lognormale)
Brugge	CSM	Kwartair zand	6,3	1,6	25,4	[-]	4,1	3,8	4,0
Zeebrugge	CSM	Kwartair zand	6,5	0,8	12,3	39	4,8	5,3	5,3
Gent KI	TSM	Tertiair zand	9,8	4,6	46,9	38	3,6	2,3	3,6
Gent KII	TSM	Tertiair zand	17,2	10,9	63,4	60	6,3	-0,7 (*)	5,0
Antwerpen	C-mix®	Kwartair zand	11,9	4,1	34,5	52	6,5	5,2	6,4
Lommel	C-mix®	Kwartair zand	18,6	3,9	21,0	50	11,6	12,2	12,4
Tongeren	CSM	Leem	5,3	1,6	30,2	39	2,8	2,7	2,7
Sint-Lievens-Houtem	C-mix®	Leem	10,8	4,9	45,4	33	4,8	2,7	4,5
Limelette	C-mix®	Leem	14,8	5,4	36,5	31	7,4	6,0	7,8
Anderlecht	C-mix®	Leem	8,0	5,8	72,5	38	2,0	-1,6 (*)	1,9
Gent	C-mix®	Alluviale klei	8,6	7,0	81,4	64	1,5	-2,8 (*)	1,6
Borgloon	C-mix®	Alluviale klei	5,7	3,1	54,4	41	1,0	0,6	1,4
Knokke	C-mix®	Klei	7,3	7,2	98,6	26	0,5	-4,5 (*)	0,9
Eremodegem	C-mix®	Alluviale klei	8,0	4,6	57,5	25	2,3	0,4	2,4

(\*) een negatieve karakteristieke druksterkte heeft geen fysische betekenis.

men de algemene kwaliteit, de druksterkte en de elasticiteitsmodulus van het 'soil mix'-materiaal op voorhand inschatten. Hiervoor kan men de afbeeldingen 4 tot 7 hanteren voor zover het typisch Belgische gronden betreft en gelijkaardige uitvoeringsparameters. Na de uitvoering van de 'soil mix'-elementen moeten er laboratoriumproeven uitgevoerd worden op *in situ* gekernd 'soil mix'-materiaal ter bevestiging van de ingeschatte parameters. Daarom wordt er een procedure voorgesteld en gevalideerd om de karakteristieke druksterkte van 'soil mix'-materiaal (lognormale verdeling) te bepalen.

Het is niettemin hoog tijd voor een aangepaste methodologie voor de mechanische bereke-

ning van 'soil mix'-constructies, rekening houdend met de heterogeniteit en de grondinsluitingen. Het WTCB startte daarom eind 2009 een onderzoeksproject over de berekeningsmethodologie van 'soil mix'-materiaal met voornamelijk aandacht voor :

- de druksterkte van 'soil mix'-constructies, rekening houdend met de invloed van grondinsluitingen
- de hechting tussen het 'soil mix'-materiaal en de stalen wapeningselementen
- de duurzaamheid van 'soil mix'-materiaal
- de doorlatendheid.

De bedoeling is om tot een berekeningsmethodologie voor de 'soil mix'-constructie te komen waarbij rekening gehouden wordt



## NUTTIGE INFORMATIE

Dit onderzoek wordt financieel gesteund door het Belgisch Instituut voor Normalisatie (NBN).

met de heterogeniteit en de aanwezigheid van grondinsluitings, alsook met de tijds- en schaafeffecten, zoals uithardingstijd en kruip.

Dit nieuwe onderzoeksproject wordt uitgevoerd in samenwerking met de K.U.Leuven en de Belgische Vereniging Aannemers Funderingswerken (ABEF) en wordt financieel ondersteund door het Vlaamse gewest. ■



## LITERATUURLIJST

1. Bureau voor Normalisatie  
NBN B 15-203 Proeven op beton. Statische elasticiteitsmodulus bij druk. Brussel, NBN, 1990.
2. Bureau voor Normalisatie  
NBN EN 206-1/A2 Beton. Deel 1 : specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit. Brussel, NBN, 2006.
3. Bureau voor Normalisatie  
NBN EN 1992-1-1 Eurocode 2 : ontwerp en berekening van betonconstructies. Deel 1-1 : algemene regels en regels voor gebouwen. Brussel, NBN, 2005.
4. Larsson S.  
State of Practise Report. Execution, monitoring and quality control. Stockholm, Swedish Deep Stabilization Research Centre, Proceedings of the International Conference on Deep Mixing 'Best Practise and Recent Advances', mei 2005.
5. Rutherford C.J., Biscontin G., Koutsoftas D. en Briaud J.L.  
Design Process of Deep Soil Mixed Walls for Excavation Support. International Journal of Geoengineering Case Histories, <http://casehistories.geoengineer.org>, Vol. 1, Issue 2, 2007.
6. Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf  
Beschoeiingen. Richtlijnen voor het ontwerp, de uitvoering en de monitoring van klassieke en nieuwe beschoeiingstechnieken. Brussel, ongepubliceerd rapport (CC CCN/PN/NBN – 613), 2009.
7. Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf  
Soil mix in constructieve en permanente toepassingen. Karakterisatie van het materiaal en ontwikkeling van nieuwe mechanische wetmatigheden. Brussel, ongepubliceerd rapport (IWT 080736), 2009.