

# Gedrag en ontwerp van wapeningskorven in CSM-beschoeiingswanden

Stef Jacobs

Maartje Nauwelaerts

master IW bouwkunde

master IW bouwkunde

## 1 INLEIDING

**Soilmixing** is een techniek waarbij de bodem ter plaatse wordt vermengd met een bindmiddel, zoals cement, om een groutstructuur te vormen. Naast grondverbetering wordt deze methode steeds vaker toegepast voor de uitvoering van **grond- en waterkerende wanden**, voornamelijk dankzij voordelen zoals minimale trillingen en hergebruik van grond.

De huidige richtlijnen schrijven **stalen profielen** voor als wapening in deze wanden, maar in praktijk kiezen aannemers vaak voor **wapeningskorven** als goedkoper alternatief. Voor deze alternatieve aanpak bestaat **geen gestandaardiseerde ontwerpprocedure**, Smet Group hanteert daarom bestaande **rekenregels voor betonwanden**.

Deze masterproef onderzoekt of de ontwerpprincipes voor betonwanden die voorgeschreven staan in Eurocode 2 ook toepasbaar zijn op CSM-wanden met wapeningskorven.



De driepuntsbuigproeven op vier proefstukken (1A-1B-2A-2B) toonden aan dat er **aanzienlijke verschillen** bestaan tussen theoretische berekeningen en experimenteel vastgestelde waarden. Tabel 1 en Tabel 2 geven een overzicht van deze resultaten.

Uit de analyse van de **sterkte** blijkt dat het **elastisch moment**  $M_{Rd,el}$  en het **plastisch moment**  $M_{Rd,pl}$  in de praktijk systematisch **hoger liggen dan de theorie** voorspelt. Dit wijst op de **bijdrage van het grout** aan de buigcapaciteit, een effect dat in de theorie onderbelicht blijft. De maximale momentcapaciteit  $M_{Rd,max}$  werd in geen enkele proef bereikt, dus de werkelijke capaciteit van de proefstukken kan nog hoger liggen dan in de metingen werd geregistreerd.

Tabel 1: Vergelijking van de resultaten op basis van sterkte

|    | $V_{Rd}$ [kN] |       | $M_{Rd,el}$ [kNm] |       | $M_{Rd,pl}$ [kNm] |       | $M_{Rd,max}$ [kNm] |       |
|----|---------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|--------------------|-------|
|    | T             | P     | T                 | P     | T                 | P     | T                  | P     |
| 1A | 1763          | > 224 | 211               | 266   | 253               | 314   | 409                | > 314 |
| 1B | 1636          | > 216 | 306               | > 303 | 367               | > 303 | 464                | > 303 |
| 2A | 502           | > 592 | 216               | 306   | 259               | 332   | 411                | > 332 |
| 2B | 500           | 624   | 335               | > 374 | 402               | > 374 | 550                | > 374 |

De vergelijking tussen theorie en praktijk laat ook duidelijke verschillen zien in **stijfheid**  $EI$ , vooral bij de ongescheurde en effectieve buigstijfheid. Deze afwijkingen zijn te verklaren door variaties in het materiaal en de **bepaalde nauwkeurigheid van de praktische bepaling**. De resultaten tonen wel dat het theoretische model voor de gescheurde stijfheid goed aansluit bij de werkelijkheid, en dat zowel de **gedrukte zone als de wapening na scheurvorming een belangrijke structurele bijdrage** blijven leveren.

Tabel 2: Vergelijking van de resultaten op basis van stijfheid

|    | $M_{cr}$ [kNm] |      | $EI_{ongescheurd}$ [Nmm <sup>2</sup> ] |                       | $EI_{gescheurd}$ [Nmm <sup>2</sup> ] |                       | $EI_{eff}$ [Nmm <sup>2</sup> ] |                       |
|----|----------------|------|----------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|
|    | T              | P    | T                                      | P                     | T                                    | P                     | T                              | P                     |
| 1A | 92,6           | 58,1 | $2,54 \times 10^{14}$                  | $1,71 \times 10^{14}$ | $3,86 \times 10^{13}$                | $1,36 \times 10^{13}$ | $1,46 \times 10^{14}$          | $1,27 \times 10^{13}$ |
| 1B | 82,3           | 80,5 | $2,25 \times 10^{14}$                  | $7,51 \times 10^{13}$ | $4,67 \times 10^{13}$                | $4,88 \times 10^{13}$ | $1,36 \times 10^{14}$          | $1,92 \times 10^{13}$ |
| 2A | 100,6          | 74,4 | $2,92 \times 10^{14}$                  | $9,63 \times 10^{13}$ | $4,02 \times 10^{13}$                | $4,29 \times 10^{13}$ | $1,66 \times 10^{14}$          | $2,05 \times 10^{13}$ |
| 2B | 101,7          | 36,5 | $2,84 \times 10^{14}$                  | $3,65 \times 10^{13}$ | $5,89 \times 10^{13}$                | $8,11 \times 10^{13}$ | $1,72 \times 10^{14}$          | $2,17 \times 10^{13}$ |

Deze studie biedt waardevolle inzichten in het gedrag van korfgewapende CSM-wanden. De **wandprestaties** blijken **sterk afhankelijk van variaties in materiaalgedrag**, wat het belang van kwaliteitscontrole tijdens de uitvoering benadrukt. De huidige rekenprocedure op basis van **Eurocode 2 wordt bevestigd als betrouwbaar**, ondanks de conservatieve benadering. Deze bevindingen vormen een belangrijke stap richting een **meer verfijnde en op praktijkresultaten gebaseerde ontwerpmethodologie** die kan bijdragen aan een breder en efficiënter gebruik van deze techniek.

## 4 CONCLUSIE

## 2 METHODE

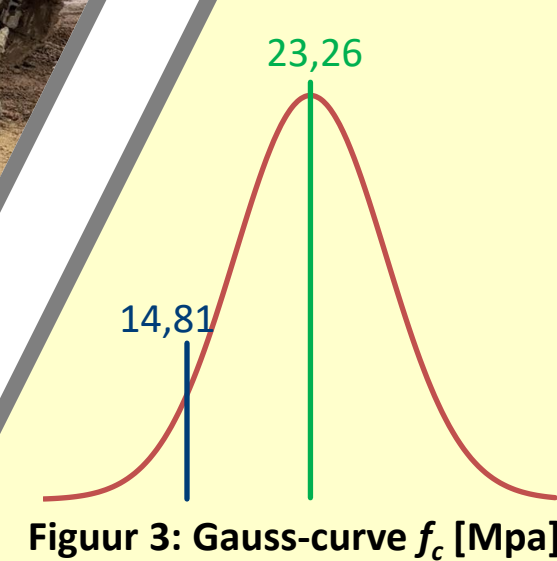
Er zijn vier **driepuntsbuigproeven** uitgevoerd op CSM-wanden met **verschillende wapeningsconfiguraties** (figuur 2). Proefstukken 1A en 1B hebben beugels om de 50 mm. Deze wanden zijn tijdens de proef in het midden belast om **buigfalen** uit te lokken. Proefstukken 2A en 2B hebben beugels om de 200 mm. Deze wanden zijn getest in een asymmetrische proefopstelling (figuur 1) om **dwarskrachtfalen** te veroorzaken.

De uitvoering van deze testen maakt het mogelijk om de theoretische modellen te vergelijken met het werkelijke wandgedrag, om zo de ontwerpprocedures te verfijnen.

Figuur 1: Asymmetrische proefopstelling



Figuur 2: Wapeningskorven



Figuur 3: Gauss-curve  $f_c$  [MPa]

De **groutsamenstelling** beïnvloedt de sterkte van de CSM-wanden. Daarom werden **kernen** uit het grout van de proefstukken getest op **druksterkte**  $f_c$  en **elasticiteitsmodulus**  $E_{mean}$ .

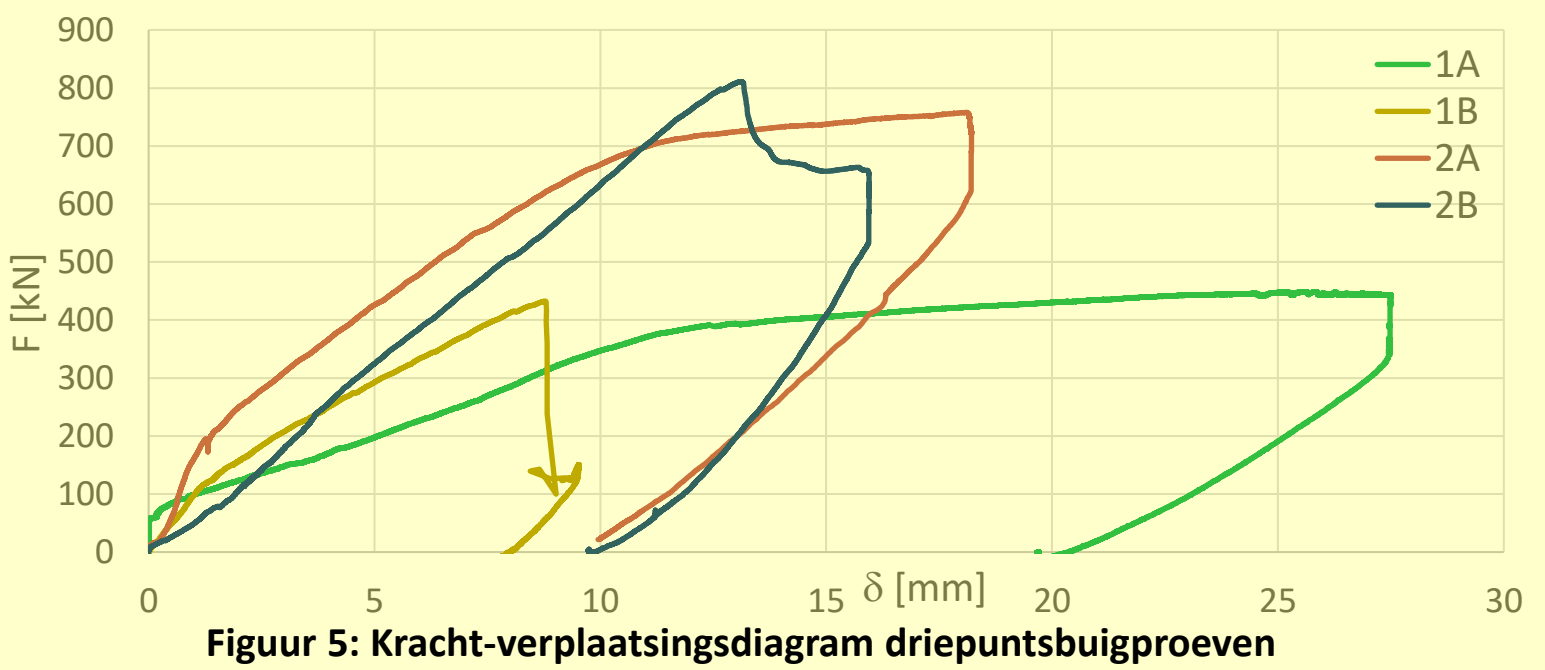
Vervolgens werden de kernen gerangschikt naar druksterkte (figuur 4), waarbij een duidelijke trend zichtbaar werd: sterk geoxideerde kernen hadden doorgaans een hogere sterkte. Een normaalverdeling van de druksterkte (figuur 3) gaf een gemiddelde  $f_{c,mean}$  van **23,26 MPa** en een karakteristieke waarde  $f_{c,k}$  van **14,81 MPa**. De gemiddelde elasticiteitsmodulus  $E_{mean}$  bedraagt **17,18 GPa**.



Figuur 4: Kernen gerangschikt naar druksterkte

Door de variërende wapeningsconfiguraties verschillen de buigweerstand  $M_{Rd}$  en dwarskrachtweerstand  $V_{Rd}$  per wand, wat leidt tot uiteenlopende testresultaten. Figuur 5 toont het **kracht-verplaatsingsdiagram** van elk proefstuk.

- Proefstukken **1A en 2A faalden op buiging**: de kracht stijgt lineair tot de vloeigrens van de wapening, gevolgd door een plateau. Verticale en schuine scheuren onder het belastingspunt bevestigen dit faalmechanisme (figuur 6).
- Proefstuk **1B faalde door verlies van hechting** tussen de wapening en het grout (figuur 7).
- Proefstuk **2B faalde op dwarskracht**: na een stijging tot de piekbelasting volgt een abrupte krachtvermindering zonder plateau en de schuine scheuren vanaf het steunpunt richting het belastingspunt zijn typisch voor dwarskrachtfalen (figuur 8).



Figuur 5: Kracht-verplaatsingsdiagram driepuntsbuigproeven



Figuur 6: Scheuren 1A



Figuur 7: Scheuren 1B



Figuur 8: Scheuren 2B

## 3 RESULTATEN

Promotoren / Copromotoren / Begeleiders

Prof. dr. ir. Herve Degée  
Bas Baeten

[1] A. Verruijt, *Grondmechanica*. Delft, Nederland: Technische Universiteit Delft, 2001.  
[2] I. Dik, *Analysis of the Capacity of a Reinforcement Detail in a Soil-Mix Wall: An Experimental and Numerical Approach*, Master's thesis, Dept. of Civil Engineering, Delft Univ. of Technology, Delft, Nederland, 2017.  
[3] P. Ganne, N. Huybrechts, F. De Cock, B. Lameire, and J. Maertens, "Soil mix-wanden als kerende constructies: kritische analyse van de ontwerpparameters," WTCB-Dossiers, no. 3, 2010.  
[4] N. Huybrechts and N. Denies, *Handboek Soilmix-wanden: Ontwerp en Uitvoering*. Delft, Nederland: SBRCURnet/WTCB, 2016.