

Intrillen van damplanken: Invloedparameters en voorspellingsmethodes



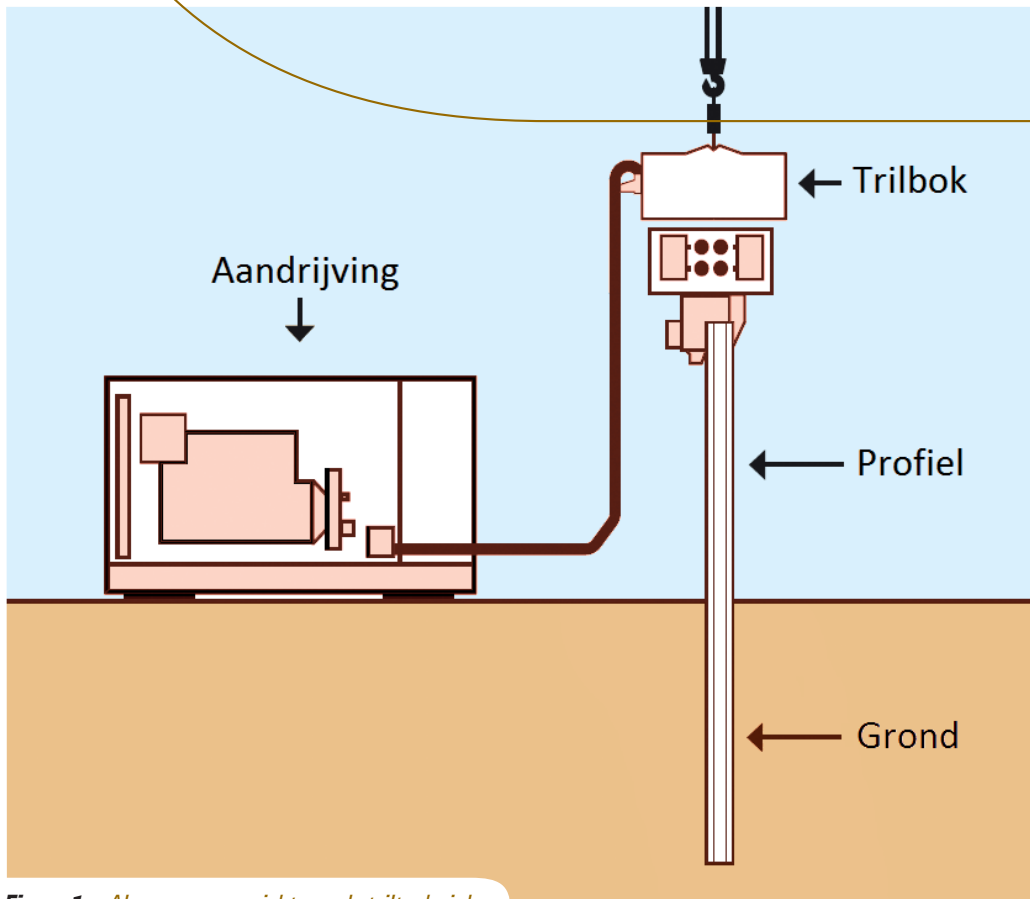
Dr. ir. Valérie Whenham
WTCB



Ir. Noël Huybrechts
WTCB



Prof. dr. ir. Alain Holeyman
Université catholique
de Louvain (UCL)



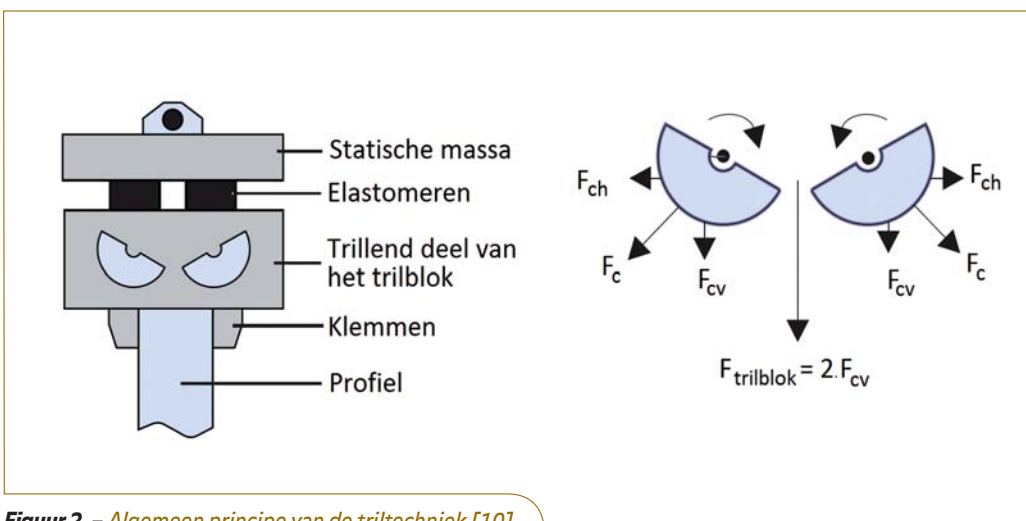
Figuur 1 - Algemeen overzicht van de triltechniek.

Inleiding

Het intrillen van funderingselementen gebeurt door bovenaan de profielen een trilkracht uit te oefenen. De techniek is gebaseerd op het feit dat de bodemweerstand afneemt onder invloed van trillingen [10], en biedt als voornaamste voordelen dat ze minder lawaai genereert en minder trillingen in de omgeving veroorzaakt dan de traditionele heitechnieken. De triltechniek biedt ook een aantal economische voordelen omwille van haar snelheid en het feit dat ze toegepast kan worden op moeilijk toegankelijke bouwplaatsen.

Toch roept het gebruik van de triltechniek tegenwoordig nog een aantal vragen op omtrent de optimale toepassing en de beperkingen ervan [5,11]. Uit een aantal geïnstrumenteerde uitvoeringsproeven met palen en damplanken die recentelijk verricht werden in België [14] en Frankrijk [1] is gebleken dat de hypothesen die traditioneel aangenomen worden in de rekenmethoden voor het intrillen een aantal lacunes vertonen. Deze hebben voornamelijk te maken met de beschrijving van de interacties tussen de trilmachines en de bodem. Een grondige analyse van de huidige rekenmethoden aan de hand van twee databanken uit België [4] en Nederland [6] bevestigt de mogelijkheid om de methoden die vandaag de dag gebruikt worden voor de voorspelling van de heikbaarheid van palen en damplanken gevoelig te verbeteren.

In dit artikel wordt eerst een overzicht gegeven van het principe van de triltechniek en van twee vereenvoudigde voorspellingsmethodes m.b.t. de bepaling van de intrildiepte en -snelheid. Vervolgens wordt er ingegaan op de interacties tussen de trilmachines en de grond, en op een analyse van de rekenmethodes aan de hand van



Figuur 2 - Algemeen principe van de triltechniek [10].

Samenvatting

Dit artikel focust op de interacties tussen de trilmachines, de damplank en de grond. De invoering van deze interacties, gecombineerd met de interpretatie van experimentele gegevens verbetert de betrouwbaarheid van de voorspellingsmethodes m.b.t. de bepaling van de intrildiepte en -snelheid.

uitvoeringsdatabanken. De bedoeling daarvan is de juistheid van de voorspellingsmethoden te kunnen verbeteren.

Algemeen principe van de triltechniek

Bij de triltechniek oefent men met een trilblok een verticale sinusoidale kracht uit bovenaan het in te trillen element (zie figuur 2). In het trillende deel van het trilblok worden excentrische massa's twee aan twee in beweging gebracht in tegengestelde richting, zodat er een 'zuivere' verticale kracht ontstaat. Het trillende deel wordt door middel van elastomeren afgeschermd van het statische deel.

De cyclische kracht die door het trilblok gegenereerd wordt heeft een amplitude van:

$$F_{\text{trilblok}} = me \cdot \omega^2 \quad (1)$$

met me het excentrisch moment [kg.m] en ω de rotatiefrequentie van de massa's [rad].

De amplitude van de cyclische verticale beweging van de vrije damplank (invloed van de grond buiten beschouwing gelaten) kan benaderend berekend worden met de volgende verhouding:

$$s_p = \frac{me}{M_{\text{dyn}}} \quad (2)$$

waarbij M_{dyn} de dynamische massa van het systeem is (i.e. de dynamische massa van de trilmachine + de klemmen + het in trilling gebrachte profiel). Door de elasticiteit van de damwandplank en de interactie met de grond zal de reële bewegingsamplitude van de plank doorgaans kleiner zijn.

Tijdens het trillen ondervindt de grond die rechtstreeks in contact staat met de damplank een cyclische degradatie waardoor hij zelfs kan vervloeien. Dankzij deze verminderde grondweerstand kan een statische kracht met lage amplitude (die gelijk is aan het eigengewicht van het systeem) de damplank in de grond stuwen. Verzadigd zand beschikt over de ideale voorwaarden voor een cyclische degradatie van de grond, aangezien het korrelskelet door de trillingen onstabiel wordt waardoor het zand verdicht. Zonder drainage leidt deze verdichtingstendens tot een verhoging van de interstitiële overdrukken en kan het de effectieve spanning in de grond tenietdoen, alsook de weerstand tegen afschuiven ervan (vervloeiings-

fenomeen). Indien de grond niet verzadigd is en/of een hoge cohesie bezit, zal deze cyclische degradatie zich minder uitgesproken voordoen, waardoor de triltechniek moeilijker toepasbaar wordt.

De cyclische degradatie van de grond hangt af van de volgende parameters:

- trilfrequentie
- trilamplitude
- aantal cycli
- bodemtype.

Bij niet-cohesieve grondsoorten (al dan niet verzadigd zand) is de trilfrequentie de belangrijkste parameter, aangezien een verhoging ervan de conus- en wrijvingsweerstand van de grond negatief beïnvloedt. Bij cohesieve gronden is dit effect echter veel minder evident (klei, leem). Een frequentieverhoging kan in deze gronden immers een verhoging van de grondweerstand teweegbrengen. Voor de degradatie van dit soort gronden is de trilamplitude dan ook de invloedrijkste factor [10].

Voorspellingsmethoden voor de triltechniek

In de volgende paragrafen wordt een overzicht gegeven van twee vereenvoudigde methoden voor het voorspellen van de heikbaarheid van in te trillen elementen.

De CUR 166-gids bevat enkele vuistregels voor de evaluatie van de intrilbaarheid van een profiel. Een eerste vuistregel bestaat uit het toekennen van een minimumwaarde aan het excentrische moment op basis van de dynamische massa van het systeem, zodat men een minimale trilamplitude verkrijgt. Een tweede, voorgestelde vuistregel steunt op de vergelijking van de trilkracht die uitgeoefend wordt door de trilmachine met de (verminderde) grondweerstand [2].

De HIPERVIB-I-methode [7,8,9] werd ontwikkeld in het kader van een onderzoeksproject onder leiding van het WTCB [4]. Met deze methode kan men de heikbaarheid evalueren aan de hand van de trilblok parameters en de grondweerstandparameters die afgeleid worden uit een sondering (CPT).

1. CUR 166 (2005)

Een eerste vuistregel uit de CUR 166-gids steunt op de hypothese dat een minimale verplaatsingsamplitude $s_{p;\min}$ van 5 mm nodig is om de degradatie van de grond te waarborgen en het in te trillen element te kunnen heien. Hieruit volgt de definitie van het minimale excentrische moment voor het trilblok:

$$me \geq M_{\text{dyn}} \cdot s_{p;\min} \quad (3)$$

De tweede vuistregel uit de CUR 166-gids steunt op de correlaties die S. Azzouzi ontwikkelde [2]. Hij legt namelijk een minimale excentrische kracht F_{trilblok} [kN] op die afhangt van de grondweerstand en afgeleid wordt uit een sondering (CPT).

$$F_{\text{trilblok}} \geq 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot L \cdot \chi \cdot q_{c;z;av} + 1,2 \cdot \Omega \cdot q_{c;z;av} \quad (4)$$

Waarbij:

| | |
|--------------|--|
| L | lengte van de indringing van het profiel in de grond [m] |
| $q_{c;z;av}$ | gemiddelde waarde van q_c [kPa] |
| Ω | profielsectie [m ²] |
| χ | profielomtrek [m] |

2. HIPERVIB I

Bij de Hipervib-I methode bekomt men de heikbaarheid uit het evenwicht tussen de neerwaartse en opwaartse bewegingen van het in te trillen element (figuur 3). In dit evenwicht wordt de grondweerstand berekend via interpolatie tussen een statische waarde en een vervloeide waarde. De formules voor de statische conusweerstand (q_s) en de schuifweerstand (τ_s) worden overgenomen uit de resultaten van de statische sondering (CPT E). De waarden van de vervloeide conus- (q_l) en wrijvingsweerstand (τ_l) kunnen berekend worden volgens de exponentiële wetten, die geïnspireerd zijn op de werken van Barkan [3]:

$$q_l = q_s \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{\Lambda} \right) \cdot e^{-100 \cdot c_b / FR} + \frac{1}{\Lambda} \right] \quad (5)$$

$$\tau_l = \tau_s \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{\Lambda} \right) \cdot e^{-100 \cdot c_s / FR} + \frac{1}{\Lambda} \right] \quad (6)$$

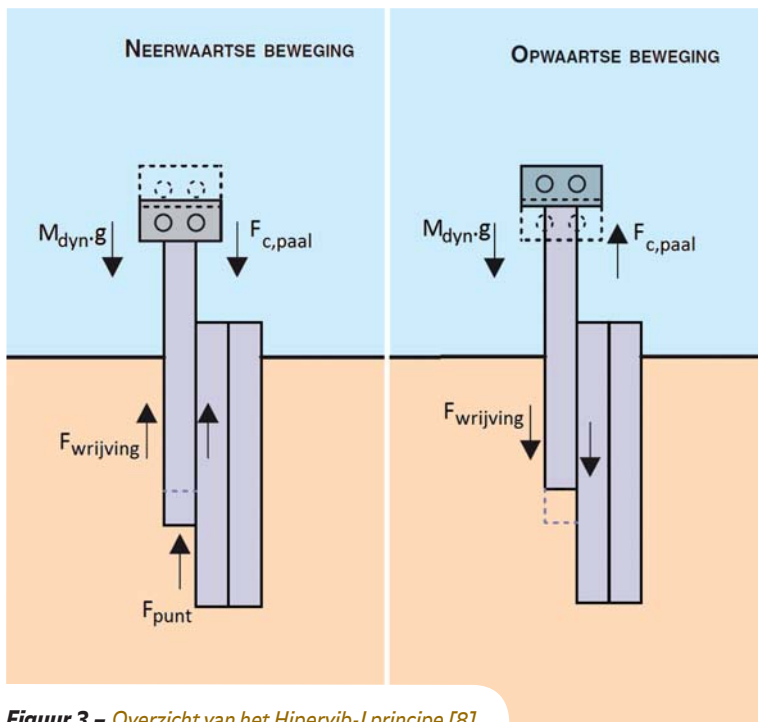
met FR het wrijvingsgetal en Λ , de (empirische) vloeiparameters.

De eenheidsweerstand tegen dynamische indringing q_d en de schuifweerstand τ_d kunnen volgens een exponentiële wet afgeleid worden uit de statische en vervloeide weerstandskrachten, afhankelijk van de versnellingsamplitude α (uitgedrukt in g):

$$q_d = (q_s - q_l) \cdot e^{-\alpha} + q_l \quad (7)$$

$$\tau_d = (\tau_s - \tau_l) \cdot e^{-\alpha} + \tau_l \quad (8)$$

Meer details over de Hipervib-I methode vindt men in [7,8,9] en [14].



Figuur 3 – Overzicht van het Hipervib-I principe [8].

Interacties tussen de trilmachines en de grond

In de hierboven beschreven voorspellingsmethoden zijn een aantal (impliciete) hypothesen ingevoerd, die niet altijd met de resultaten van de in situ proeven overeenkomen. Lacunes in de traditionele hypothesen hebben voornamelijk te maken met de beschrijving van interacties tussen de trilmachines, de damplank en de grond. In de volgende paragrafen wordt er gesproken over de belangrijkste lacunes m.b.t. de definitie van de trillingsfrequentie en de amplitude van de cyclische kracht die aan het profiel overgebracht wordt.

1. INVLOED VAN DE ENERGIEBRON OP DE TRILLINGSFREQUENTIE

Aan de hand van proefresultaten verzameld in [14] is het aan het licht gekomen dat de trillingsfrequentie vaak kleiner is dan de nominale frequentie van het trilblok. Een diepgaande analyse van de meetgegevens heeft verder aangetoond dat de reductie in trillingsfrequentie te wijten was aan een gebrek aan vermogen (energie per tijdseenheid, gegeven in kW) van de energiebron (meestal een hydraulisch aggregaat).

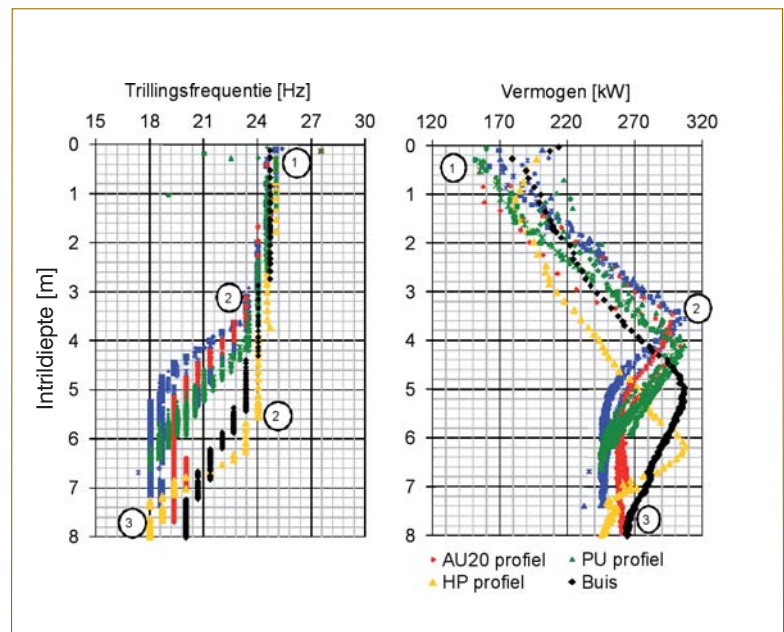
Een illustratie daarvan is gegeven in *figuur 4*, op basis van resultaten van 13 in situ proeven, verricht met hetzelfde trilblok maar met verschillende profielen op de site van Merville in Frankrijk (tertiaire klei). De op het profiel gemeten trillingsfrequentie (links) en het aan het profiel geleverde vermogen (rechts) worden uitgedrukt in functie van de intril-

diepte. Het vermogen werd berekend uit:

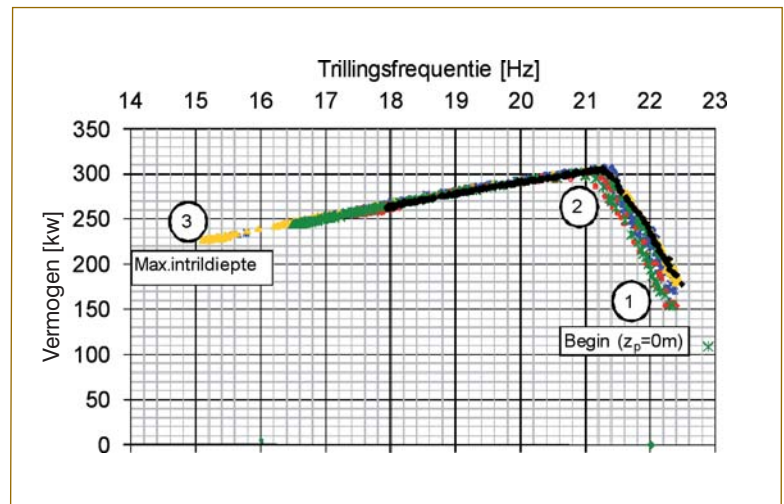
$$P_{trilblok} = \Delta p \cdot Q \tag{9}$$

met Δp [bar] de differentiële oliedruk en Q [L/min] het oliedebiet in het hydraulische aggregaat.

Omdat de wrijvingsweerstand toeneemt met toenemende intrildiepte dient meer vermogen aan het profiel geleverd te worden. Dit verklaart de toename in vermogen tussen (1) en (2) in *figuur 4*. Wanneer het maximaal vermogen dat de aandrijfgroep kan leveren (300kW) overschreden wordt (2), neem de trillingsfrequentie drastisch af. Dat is te wijten aan de eigenschappen van het hydraulische systeem, zoals in detail beschreven in [14].



Figuur 4 – (a) trillingsfrequentie (gemeten op de damplank) en (b) vermogen (gemeten op de aandrijvings groep), beide uitgedrukt in functie van de intrildiepte.



Figuur 5 – Relatie tussen het vermogen geleverd aan het profiel en de trilfrequentie gemeten op het profiel.

De combinatie van de frequentie en vermogensmetingen (*figuur 5*) toont aan dat de relatie tussen de trillingsfrequentie en het vermogen onafhankelijk is van het type van profiel. De evolutie van de trillingsfrequentie kan dus op basis van een schatting van het vermogensverbruik voorgesped worden (zie [14]).

2. CYCLISCHE KRACHT OVERGEBRACHT AAN HET PROFIEL

De meeste rekenmethoden voor de triltechniek beschouwen dat de amplitude van de cyclische kracht die aan het profiel overgebracht wordt gelijk is aan de cyclische kracht die door het trilblok gegenereerd wordt. Uit analyse van meetresulta-

ten ([14]) is het gebleken dat die hypothese onjuist is. In de werkelijkheid hangt de kracht die overgebracht wordt op het profiel van een aantal factoren af:

- cyclische kracht gegenereerd door het trilblok;
- verhouding tussen de massa van het trilblok en de massa van het profiel;
- impedantie van het profiel;
- grondkarakteristieken (stijfheid).

In een eerste benadering kan het profiel als een star lichaam (rigid body) beschouwd worden. Deze aanname leidt tot de volgende verhouding tussen de cyclische kracht gegenereerd door het trilblok (F_{trilblok}) en de cyclische kracht die aan het profiel overgebracht wordt ($F_{c,\text{paal}}$):

$$\frac{F_{c,\text{paal}}}{F_{\text{trilblok}}} = \frac{N_{\text{paal}}}{N_{\text{paal}} + N_{\text{trilblok}}} \quad (10)$$

waarbij N_{trilblok} de massa van het dynamische deel van het trilblok is. Deze verhouding toont aan dat indien b.v. $N_{\text{trilblok}} = N_{\text{paal}}$ de amplitude van de kracht die aan het profiel overgebracht wordt 2 maal kleiner is dan cyclische kracht gegenereerd door het trilblok. Dit is geïllustreerd in *figuur 6* op basis van metingen gekregen tijdens intrillingsproeven uitgevoerd op de site van Limelette (zie [14]).

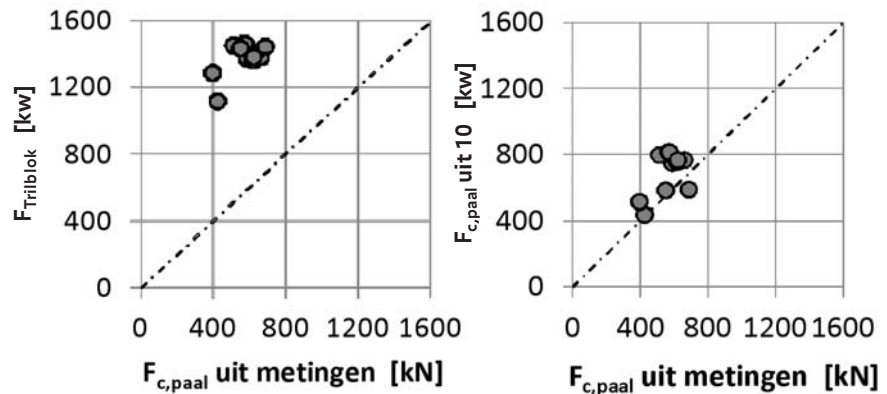
Een veralgemening van (10) krijgt men door het oplossen van de golfvergelijking (star lichaam hypothese buiten beschouwing gelaten), waarbij de invloed van de grondeigenschappen door de grensvoorwaarden methode kan ingevoerd worden (zie [15]). Met gewone damplanken en grondeigenschappen ziet men typisch een toename van de verhouding:

$$\frac{F_{c,\text{paal}}}{F_{\text{trilblok}}}$$

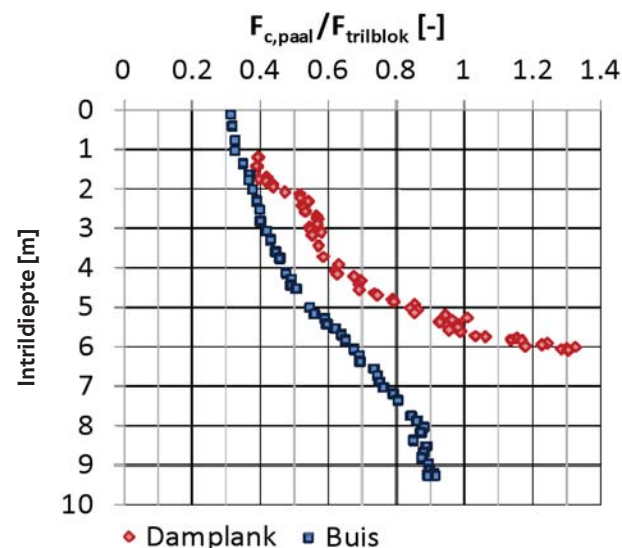
met de intrildiepte, zoals getoond in *figuur 7* op basis van twee proeven verricht in Frankrijk [14].

2. Analyse van databanken

De analyse van databanken en experimentele gegevens is van belang om de invloed van de verschillende parameters te kunnen bevestigen en om de (semi)-empirische parameters van de modellen te kunnen bepalen. De voornaamste conclusies betreffende de CUR-166 en Hipervib-I voorspellingsmethodes verkregen aan de hand van de analyse van de Hipervib en GeoBrain databanken zijn verzameld in de volgende paragrafen. Voor wat betreft de GeoBrain databank werd de studie beperkt tot 52 werfgegevens, die als representatief voor de gehele databank werden beschouwd. Resultaten zijn geïllustreerd in functie van de grondsoort: 'zand' ($FR < 1\%$ en $q_c > 10 \text{ MPa}$), 'klei' ($FR > 2\%$ en $q_c < 5 \text{ MPa}$) en 'heterogeen'. Werven waarbij 'problemen' gerapporteerd werden (ge-



Figuur 6 – Metingen vs. Theoretische cyclische kracht overgebracht aan de damplank (a) massa van het profiel buiten beschouwing gelaten, (b) met beschouwing van de massa van het profiel.



Figuur 7 – Evolutie van de verhouding

$$\frac{F_{c,\text{paal}}}{F_{\text{trilblok}}}$$

in functie van het intrildiepte – damplank en buis ingetrild in Frankrijk (Merville, tertiaire klei).

wenste diepte niet bereikt) zijn gedifferentieerd van de werven waarbij geen probleem gerapporteerd werden.

1. CUR-166

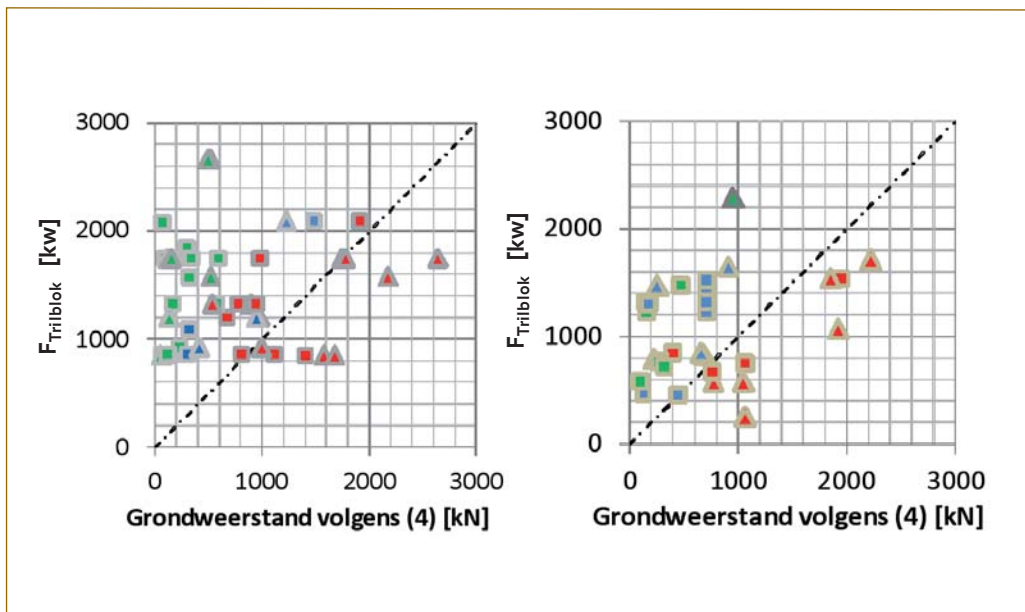
Resultaten van de systematische vergelijking tussen de CUR-166 rekenmethode voorspellingen en experimentele observaties verricht op basis van de GeoBrain en Hipervib databanken zijn gegeven in *figuur 8*. Volgens de CUR-166 vuistregel (4) is het alleen mogelijk om het profiel in te trillen voor de werfdata die boven de diagonale lijnen van *figuur 8* liggen. Men ziet dat de vergelijking (4) een te pessimistisch resultaat oplevert indien ze toegepast wordt op zanden, en daarentegen, een te optimistisch resultaat oplevert voor cohesieve gronden. Dat kan verklaard worden door het feit

dat het wrijvingsgetal uit de CPT buiten beschouwing is gelaten in (4), terwijl deze parameter van groot belang is voor de cyclische grondweerstand degradatie. Dezelfde opmerking geldt voor de vuistregel (3) die geen rekening houdt met het type grond.

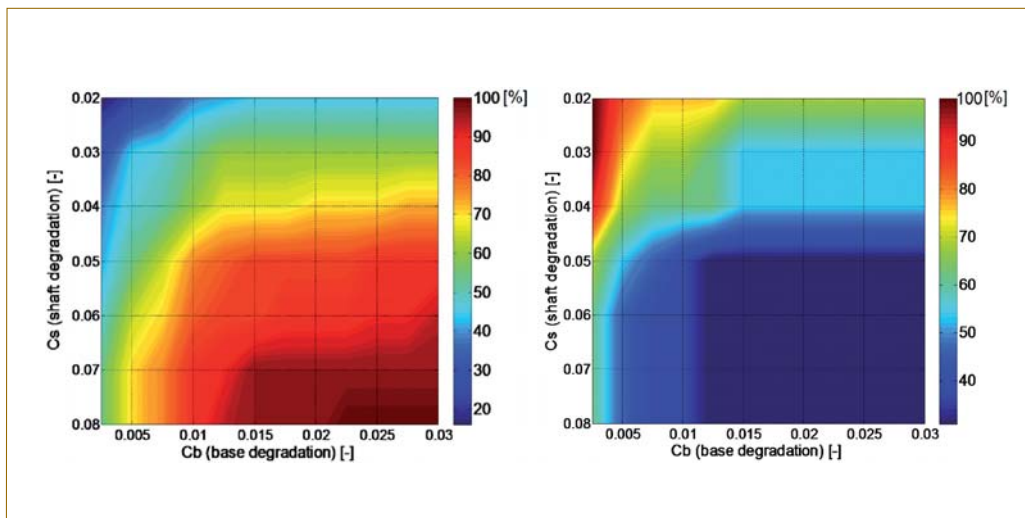
2. HIPERVIB-I

De Hipervib-I methode maakt gebruik van een aantal semi-empirische parameters. Een specifieke analyse van elke parameter aan de hand van de databanken is in detail beschreven in [14].

Als voorbeeld toont de *figuur 9* de resultaten van vergelijkingen tussen Hipervib-I simulaties en werfgegevens. Het percentage van simulaties die overeenkomen met de werfgegevens varieert in



Figuur 8 – Analyse van de CUR-166 vergelijking (4) aan de hand van (a) de GeoBrain databank en (b) de Hipervib databank.



Figuur 9 – % gevallen waarbij Hipervib-I resultaten overeenkomen met Geobrain gegevens: (a) gevallen waarbij geen problemen werden gerapporteerd; (b) gevallen waarbij problemen werden gerapporteerd.

functie van de c_b en c_s waarden in de vergelijkingen (5) en (6). Uit deze resultaten kan men de minimale ($c_b \geq 0.0225$ en $c_s \geq 0.08$) en maximale ($c_b \leq 0.0225$ en $c_s \leq 0.03$) waarden van die parameters bepalen zodat alle werfgegevens wel voorspeld kunnen worden. Het gebruik van beide koppels van waarden geeft dus een indicatie van de onzekerheid in de heikbaarheid van het profiel.

Conclusies

In dit artikel zijn de mogelijkheden onderzocht om huidige rekenmethodes m.b.t. de triltechniek te kunnen verbeteren. Ten eerste, tonen recente proefcampagnes die uitgevoerd werden op profielen in België en Frankrijk het belang aan van de fysische parameters waarmee geen rekening

gehouden wordt in de bestaande voorspellingsmethoden. Het betreft met name de invloed van de vermogenslimiet van de hydraulische groep die de trilmachine voedt en de bepaling van de kracht die aan het profiel overgebracht wordt. Ten tweede, hangt de juistheid van de voorspellingen ook sterk af van de correcte afstelling van de (semi)-empirische parameters uit de modellen. Systematische analyses van databanken en experimentele gegevens zijn daarvoor van groot belang om de rekenmethodes te kunnen verbeteren.

Dankwoord

De auteurs willen het Algemeen Directie (DG06) van de Publieke Dienst van Wallonië (SPW, België) bedanken voor de financiering van het promotie-

onderzoek van de eerste auteur [14]. De leden van het Franse Irex Project zijn bedanken voor het beschikbaar maken van informatie en metingen uit de Merville proeven program.

Literatuurlijst

[1] Arnould P., Canou J., Gonin H., Guillaume D., Keller P., Legendre Y., Legrand C., Rocher-Lacoste F., Sieffert J.-G., Vié D. *Vibrofonçage: Guide technique 2006*. Parijs, Presses de l'ENPC, 2006.
 [2] Azzouzi S. *Intrillen van stalen damwanden in niet-cohesieve gronden*. Delft, GeoDelft NL & TUDelft, 2003.
 [3] Barkan D. *Méthodes de vibration dans la construction*. Parijs, Dunod, 1963.
 [4] BBRI. *High PERFORMANCE VIBRATORY pile drivers based on novel electromagnetic actuation systems and improved understanding of soil dynamics*. BRITE/EURAM CT91-0561. Luxemburg, Office for official publications of the European Communities, 1994.
 [5] Gonin H., Holeyman A., Rocher-Lacoste F. (Eds). *TRANSVIB 2006*, Paris 2006, 400pp.
 [6] Hemmen B. & Bles T. *GeoBrain Funderings-techniek: ervaringsdatabase voorspelt uitvoeringsrisico*. Gorinchem, SJP Uitgevers, Civiele Techniek, 60-(2005)-2, 2005.
 [7] Holeyman A. *Hipervib-I – An analytically based computer program to evaluate the vibro-penetration of sheet piles*. Earthspectives, Irvine Ca., USA, prepared for BBRI, 25pp, June 1993.
 [8] Holeyman A. *Soil modeling for pile vibratory driving*. International Conference on design and construction of deep foundations. Orlando, FHWA (1994).
 [9] Holeyman A., Legrand C. *A method to predict the Drivability of Vibratory Driven Piles*. Stress-Wave '96, Orlando 1996.
 [10] Holeyman A. *Vibratory Driving*. Stress-Wave 2000. Sao Paulo, 2000.
 [11] Holeyman A., Vanden Bergh J.-F., Charue N. (Eds.) *TRANSVIB 2002*, Louvain-La-Neuve 2002, 233pp.
 [12] Holeyman A., Whenham V. *Sheet pile vibro-driving: Power pack-vibrator-sheet pile-soil interactions*. Stress-Wave 2008, Lisbon (2008).
 [13] Whenham V., Huybrechts N., Bles T., Holeyman A. *Intrillen van funderingselementen*. WTCB-Dossiers 16(2007).
 [14] Whenham V. *Power transfer and vibrator-pile-soil interactions within the framework of vibratory pile driving*. PhD thesis, UCL, Belgium, May 2011.
 [15] Whenham V., Holeyman A. *Loads transfers during vibratory driving*. Geotechnical and Geological Engineering (te verschijnen). ●