

Doorpersingen: observatie van uitvoeringsparameters en zettingen

A. Vervoort en J. Maertens, K.U.Leuven

D. Dewaele, Aquafin nv

Samenvatting

Het lopend onderzoek aan de KULeuven, Departement Burgerlijke Bouwkunde i.v.m. doorpersingen richt zich zowel naar het gedrag van de grond, als naar de uitvoeringsparameters. Het einddoel is het bepalen van correlaties tussen beiden, met het oog op het beter begrijpen van de doorperstechniek en het verklaren van mogelijk afwijkend gedrag. Tot dit laatste behoort zeker en vast het ontstaan van te grote zettingen met schade als gevolg.

Het koppel, de perskracht, de vooruitgangsnelheid en het volume afgegraven grond zijn de parameters die de meeste aandacht krijgen. Het koppel en de perskracht worden zeer frequent (om de 20 seconden) opgemeten; de twee andere parameters worden eerder uitgemiddeld per buis. Indien gewerkt wordt met een luchtdrugschild, wordt eveneens de luchtdruk gemeten.

Een evaluatie van deze parameters laat o.a. toe in-situ wrijvingshoeken te bepalen tussen het roterende lichaam gevormd door de spaken samen met de losgewerkte grondmassa en het front zelf. Voor een gronddrugschild werden de volgende waarden berekend op een site te Webbekom: de wrijving aan het front kwam overeen met een hoek die varieerde tussen 15° en 30° . De wrijving tussen de vooruit geperste buizen en de grondmassa werd geschat op 2 kN/m^2 in normale omstandigheden.

Voor het meten van zettingen aan de oppervlakte wordt beroep gedaan op twee systemen die gebaseerd zijn op de techniek van communicerende vaten. Telkens wordt 1 vat buiten de geschatte invloedszone geplaatst, en het andere vat boven het traject van de doorpersing. Aldus bekomt men absolute zettingen.

Gedurende meerdere dagen werden metingen uitgevoerd boven een doorpersing van buizen met een uitwendige diameter van 1.05 m en die op een diepte van 4 à 5 m werden geplaatst. Vooraleer het schild de meetopstelling bereikte, was de geïnduceerde zetting meestal verwaarloosbaar. Tijdens het persen merkte men telkens een kleine, maar duidelijke opstuiking van het grondoppervlak. Deze opstuiking schommelde tussen 0.1 en 0.4 mm. De totale geobserveerde zettingen bedroegen maximaal 1 mm en deze waarden werden bereikt nadat het schild 10 à 15 m verder was dan de meetopstelling. De kleine gemeten zettingen tonen aan dat de meettechniek nauwkeurig is; en zijn te verklaren door de kleine diameter van de buizen en de relatief diepe positie.

Naar de toekomst toe, is het de bedoeling van op meer sites zettingsmetingen uit te voeren, zodat er gezocht kan worden naar correlaties met de uitvoeringsparameters.

1. Inleiding

De belangrijkste handelingen aan het front zijn het uitgraven van de grondmassa, het ondersteunen van het front om te voorkomen dat de grond ongecontroleerd de tunnel binnendringt en het meten, en indien nodig, het aanpassen van de richting waarin men boort. Op de sites die in dit artikel worden besproken werd een gronddruckschild gebruikt. Bij dit type schild worden de grondwaterdrukken in evenwicht gehouden door de uitgegraven grond. Als het schild vooruitgaat, wordt de grond door openingen in een kamer geperst. De grond wordt uit deze kamer verwijderd met behulp van een schroef- of pompsysteem. Het debiet dat men zo afvoert, bepaalt de druk in de kamer. Om deze techniek te kunnen gebruiken, moet de grond een kleine doorlatendheid hebben, zoniet zou het grondwater de tunnel instromen. Indien de grond te doorlatend is, moeten er additieven zoals bentoniet of chemische producten zoals polymeren worden toegevoegd.

Bij het CBC-systeem (Controlled Bentonite Cutting-head) van de firma Smet-Boring wordt dit probleem opgelost door twee kamers vooraan in het schild te hebben (zie Figuur 1). Enerzijds is er boorkamer waarin het boorrad draait, en anderzijds is er de mengkamer. Deze staat in verbinding met de boorkamer via regelbare poorten. Door deze poorten verder te openen of te sluiten regelt men de druk in de boorkamer. Om de grond uit de mengkamer af te voeren, wordt er een transportvloeistof in de mengkamer gespoten. Deze transportvloeistof wordt gemengd met de afgegraven grond en vervolgens door een centrifugaalpomp naar de oppervlakte gestuwd. Mengsels met een dichtheid tot 1.4 t/m^3 kunnen nog gepompt worden. Omdat deze transportvloeistof geen front-ondersteunende functie heeft volstaat het meestal om water zonder toevoegstoffen te gebruiken. Indien er zwaardere deeltjes getransporteerd moeten worden, gaat men de dichtheid van de transportvloeistof verhogen om bezinking in de afvoerleidingen te voorkomen. Onderaan in de mengkamer kan er een breekinstallatie geplaatst worden om de grotere keien te verkleinen. Om het boorrad te koelen en te smeren is er een tweede aanvoerleiding die een smeervloeistof tot in de kamer brengt. Indien de doorpersing om een of andere reden gestaakt wordt, worden de poorten tussen boor- en mengkamer gesloten, zodat het front mechanisch ondersteund blijft. Dit heeft als groot bijkomend voordeel dat men de pompen niet moet laten draaien.

Bij gronddruckschilden, zoals hierboven besproken, zijn de twee belangrijkste uitvoeringsparameters de perskracht en het koppel om het boorrad met een constante rotatiesnelheid te laten draaien. In dit artikel worden resultaten getoond van beide parameters voor een site in Webbekom. De auteurs hebben vertrekkende van deze parameters in-situ grondkarakteristieken afgeleid. Andere uitvoeringsparameters zijn de hoeveelheid geïnjecteerde bentoniet achter de ondersteuning, het debiet van aangevoerd en weggepompt materiaal, de injectiedrukken en de vooruitgangssnelheid. Indien mogelijk worden deze parameters eveneens opgemeten. Indien een luchtdruckschild wordt gebruikt, wordt eveneens de luchtdruk gemeten.

Het grote voordeel van sleufloze technieken is dat de bevolking weinig of geen hinder ondervindt van de werken. Op sommige plaatsen kan het gebruik van de weginfrastructuur en de toegang tot gebouwen zelfs gedurende de volledige uitvoeringstermijn verzekerd blijven. De zettingen die aan de oppervlakte optreden zijn over het algemeen klein. Indien ze echter groot zijn, observeert men ze in het

wegoppervlak en kunnen ze de oorzaak zijn van schade (bijvoorbeeld aan gebouwen). Op een site in Wetteren werden twee meetinstrumenten geëvalueerd. Met deze instrumenten werden zeer nauwkeurig zettingen gemeten. Door bijkomende metingen uit te voeren hopen de auteurs op de eerste plaats een beter inzicht te verwerven in het gedrag van de grond rond een doorpersing. Daarnaast beogen ze op termijn een correlatie te leggen met de uitvoeringsparameters, waardoor deze laatste kunnen geoptimaliseerd worden om indien nodig zettingen aan de oppervlakte te beperken.

2. Observatie van uitvoeringsparameters

2.1. Site beschrijving

De meetresultaten die in dit artikel worden besproken werden verzameld op een site te Webbekom. Er werd een gekromd traject met een lengte van 96 m geboord. In totaal werden 29 buizen van 3.31 m lang geïnstalleerd. De binnendiameter bedroeg 1.2 m, terwijl de buitendiameter bijna 1.5 m was. De diameter van het schild was 1.5 m, waardoor er een oorspronkelijke ruimte van 5 mm ontstond rond de buizen. Ongeveer 2.6 m grondmassa was aanwezig boven de doorpersing. De helling van de doorpersing was licht opwaarts (ongeveer 0.1 %). De straal van de kromming in een horizontaal vlak was gelijk aan 367.2 m.

De grondsamenstelling was vooral zand. Tussen vooruitgang 45 m en 60 m, waren eveneens grindzones aanwezig. De top van de grondwatertafel lag op een diepte van 1.35 m.

2.2. Uitvoeringsparameters

In dit artikel gaat de aandacht naar de variatie van de perskracht en van het koppel. Het aan- en afgevoerd debiet, de vooruitgangsnelheid en de injectiedrukken werden eveneens gemeten en worden besproken in S.Smolders (1997).

Perskracht

De nodige perskracht wordt bepaald door de frontdruk en de weerstand tegen beweging van het schild en de buizen. De totale frontdruk bestaat uit de horizontale gronddruk, de grondwaterdruk (indien aanwezig) en de weerstand tegen indringing. De frontdruk moet groter zijn dan de actieve gronddruk en kleiner dan de passieve. De totale perskracht is gelijk aan de integraal van de bovenvermelde drie drukcomponenten over de booroppervlakte.

In Figuur 2, is de variatie van de gemiddelde perskracht (uitgemiddeld over 1 m intervallen) weergegeven voor de eerste 65 m van het traject. De gemiddelde waarden schommelden tussen 350 en 850 kN. Daarnaast zijn volgende punten interessant om te benadrukken:

- Tussen 4 en 10 m vooruitgang, wanneer geen smering werd toegepast, nam de gemiddelde perskracht met 65 kN per meter vooruitgang toe. Door deze waarde te delen door de bijkomende buisoppervlakte bekomt men een wrijvingsfactor van 13.8 kN/m².
- Na een vooruitgang van 17 m, startte men met regelmatig bentoniet te injecteren achter de buizen. Hierdoor daalde de perskracht gevoelig (daling van ongeveer 60 % voor een bijkomende vooruitgang van 8 m tot een totale afstand van 25 m).

– Na een vooruitgang van 25 m, wordt geen éénduidige en systematische toename van de perskracht geobserveerd. Dit kan veroorzaakt zijn door het rollen van het schild waardoor de perskracht diende bijgeregeld te worden. Wanneer de punten van 25 en 46 m toch met elkaar worden verbonden, bekomt men een gemiddelde toename van 11.4 kN per meter vooruitgang. Dit vertaalt zich in een wrijvingsfactor van 2.4 kN/m², gevoelig kleiner dan de hierboven berekende zonder smering. Voor 9 van de 29 buizen werden om de 20 seconden metingen uitgevoerd. In Figuur 3.a, wordt het histogram van al deze metingen gegeven. In Figuur 4.a, is de variatie in functie van de vooruitgang weergegeven voor buis 8. Deze buis werd net zoals de eerste buis geplaatst na een weekend. De eerste meting was meer dan tweemaal de normale waarde.

Koppel

Het koppel aan het front is noodzakelijk voor het draaien van het boorrad met een constante draaisnelheid. Dit koppel wordt vooral bepaald door de frontdruk, de wrijving tussen grondmassa en boorkamerwand en de wrijving door het draaien van twee massa's grond (de grond in de boorkamer en de grond ervoor; zie Figuur 1). Analooq als voor de perskracht is in Figuur 3.b de verdeling van de waarden van het koppel voor alle detail meetpunten en in Figuur 4.b de variatie van het koppel bij het persen van buis 8 weergegeven. Het koppel varieerde tussen 25 en 100 kN/m². Zoals voor de perskracht, was het koppel na het weekend ongeveer tweemaal zo groot dan de normale waarde voor deze buis. De normale waarde werd bereikt na ongeveer 0.5 m persen.

Relatie perskracht-koppel

Door Figuren 4.a en 4.b te vergelijken stelt men een zekere relatie vast tussen beide parameters. Dit wordt ook bevestigd in Figuur 4.c. Omwille van de natuurlijke variabiliteit van een grondmassa en omwille van het complexe procédé van een doorpersing is een correlatie in het domein van de geotechniek nooit perfect. De verhoogde waarden t.g.v. het weekend hebben uiteraard de correlatie voor buis 8 verbeterd, maar er dient opgemerkt te worden dat voor de meeste buizen de correlatiecoëfficiënt groter was dan 0.7 en voor alle onderzochte buizen deze correlatie positief was (S.Smolders, 1997).

2.3. Afgeleide grondkarakteristieken

Door het verband van de perskracht en het koppel systematisch te onderzoeken, werd de wrijving aan het front geschat. Indien men veronderstelt dat het nodige koppel vooral bepaald is door de wrijving t.g.v. het draaien van de twee grondvolumes (in boorkamer en ervoor), is de verhouding van de normaalkracht en de schuifkracht gelijk aan de tangens van de wrijvingshoek. De schuifkracht is rechtstreeks functie van het koppel. Indien men als eerste benadering veronderstelt dat de normaal en schuifspanningen niet variëren over het front, zijn volgende formules geldig:

$$T = \int_0^R \tau r(2\pi r) dr \quad \text{met} \quad \begin{array}{l} T, \text{ koppel (kNm)} \\ \tau, \text{ schuifspanning (kN/m}^2\text{)} \\ r, \text{ radiale pool coördinaat (m)} \\ R, \text{ maximale straal van het schild (m)} \end{array}$$

Voor een constant veronderstelde τ , kan men gemakkelijk berekenen dat:

$$\tau = (3.T)/(2.\pi.R^3)$$

$$F_N = \sigma.\pi.R^2 \quad \text{met } F_N, \text{ normaalkracht op het front (kN)}$$
$$\sigma, \text{ normaalspanning op het front (kN/m}^2\text{)}$$

of

$$\sigma = F_N / (\pi.R^2)$$

Gebaseerd op de formule, $\tau = \sigma \cdot \text{tg}(\phi)$ met ϕ wrijvingshoek, kan men deze wrijvingshoek eenvoudig afleiden:

$$\phi = \text{bgtg} [3.T / 2.R.F_N]$$

Indien de normaalkracht op het front gekend zou zijn, zou men met deze formule de wrijvingshoek eenvoudig kunnen berekenen. Het probleem is echter dat de opdeling van de totale perskracht in krachten verbonden met de frontdruk, de waterdruk aan het front en de wrijving langsheen de buizen niet gekend is. Daarom wordt niet de totale normaal- en schuifkracht aan het front beschouwd, maar de toename van de totale schuifkracht voor een bepaalde toename van de totale normaalkracht. Door het verschil te nemen tussen begin en einde van een buis valt de niet gekende waterdruk weg (plus en minus). Eveneens valt de wrijving langsheen de reeds geïnstalleerde buizen weg (opnieuw plus en minus). De toename in wrijving langsheen een deel van de buis die wordt geperst valt niet weg, maar wordt hier verondersteld verwaarloosbaar te zijn. De wrijvingshoek wordt dan bepaald met behulp van volgende formule:

$$\phi = \text{bgtg} [3.\Delta T / 2.R.\Delta F_N]$$

ΔT en ΔF_N zijn respectievelijk de toename in koppel en in perskracht.

Voor buis 8, bekomt men aldus een wrijvingshoek van 22.4° . Voor de andere buizen schommelde deze hoek tussen 15° en 30° .

3. Observatie van zettingen

3.1. Meetopstelling

Op een site te Wetteren werden twee meetinstrumenten gebruikt om de verticale verplaatsing van het grondoppervlak of m.a.w. de zetting te meten (J.Alaerts, 1998). De meting van een bepaald punt boven het doorpersingstraject startte steeds wanneer het front nog meerdere meters verwijderd was van dit punt. De meting werd slechts gestopt nadat het front reeds meerdere meters voorbij het betreffende punt was. Aldus verkrijgt men een vrij goed beeld van enerzijds de verticale beweging in de tijd en anderzijds de zettingen in functie van de afstand tot het front.

De meting van een verplaatsing is altijd een relatieve meting t.o.v. een ander punt, waarvan de verplaatsing gekend is, waarvan de verplaatsing opnieuw relatief t.o.v. een ander punt gemeten wordt of waarvan men met grote zekerheid kan aannemen dat het

stabiel is. Om de zettingen te meten boven een doorpersing wordt verondersteld dat men over een vast punt beschikt waar geen zettingen optreden. Daarnaast wordt het principe toegepast van communicerende vaten, waarbij 1 vat voldoende ver verwijderd is van de as van het doorpersingstraject en/of van het front. Het andere vat wordt uiteraard geplaatst op het te meten punt boven de as van het doorpersingstraject. Er wordt geopteerd om slechts twee vaten met elkaar te verbinden en indien nodig meerdere paren van vaten te gebruiken, i.p.v. meerdere meetpunten te verbinden met 1 vat op een stabiele plaats. Indien dit laatste zou toegepast worden, vereenvoudigt meestal de installatie en is het aantal vereiste vaten beperkter, maar wordt de interpretatie haast onmogelijk. Zoals in volgende paragraaf zal worden getoond, is het effect van het persen over een relatief grote afstand voelbaar voor, maar vooral achter het front.

Het verschil tussen de beide meetinstrumenten die werden gebruikt te Wetteren is de wijze van het meten van het waterniveau in de vaten. Bij het eerste systeem, vervaardigd door Geokon (USA), is er een gewicht gedeeltelijk ondergedompeld in het water en opgehangen aan een draad. Wanneer het waterniveau wijzigt, verandert het ondergedompelde volume van het gewicht en verandert bijgevolg de kracht in de draad, aangezien de Archimedes krachten veranderen. De kracht in de draad wordt gemeten door er de eigenfrequentie van te meten, die functie is van de trekspanning in de draad.

Het tweede systeem werd ontwikkeld in het laboratorium "Mécároches" van de F.P.Ms. (Bergen). Bij dit systeem (zie Figuur 5) wordt een vlotter geplaatst op het water en meet men de afstand tussen de vlotter en een meetkop bevestigd aan de top van het vat. De meting zelf gebeurt via een LVDT ("Linear Variable Differential Transducer"), dat gebruik maakt van wederzijdse inductantie. In de meetkop bevindt zich een spoel. Indien er een stroom wordt gestuurd door de spoel, is de vereiste spanning afhankelijk van de grootte van de luchtspleet tussen meetkop en vlotter. Dit systeem heeft als groot voordeel dat er geen rechtstreeks contact is tussen meetkop en het water. Een nadeel is dat de reikwijdte van de gebruikte meetkop beperkt is tot een 5-tal mm. De nauwkeurigheid is dan wel zeer goed (beter dan 0.1 mm). Indien men meetkoppen neemt met een grotere reikwijdte, daalt de nauwkeurigheid.

In Figuur 6, is een zicht weergegeven op beide systemen, geïnstalleerd boven het doorpersingstraject. Beide systemen gaven analoge en bevredigende resultaten. De installatie van het systeem dat gebruik maakt van de gewichten, was echter moeilijker en nam meer tijd in beslag. Daarnaast was dit systeem gevoeliger aan schommelingen in temperatuur en aan trillingen. In de toekomst, zullen de auteurs dan ook in eerste instantie verder werken met het systeem met de vlotters en de LVDT-meetkoppen. In volgende paragraaf worden de resultaten van dit laatste systeem geïllustreerd.

3.2. Zettingsmetingen

In Wetteren, werd een doorpersing gevolgd met een totale lengte van 76 m. De as van de buizen bevond zich op een diepte van 4.8 m t.o.v. het wegdek. Het waterpeil was op 1.2 m onder het grondoppervlak. De lengte van elke buis was 2 m; de binnen- en buitendiameter van elke buis was respectievelijk 0.8 m en 1.05 m. Het schild had een diameter die 3 mm groter was dan deze van de buizen. De metingen die in dit artikel worden weergegeven werden uitgevoerd met het systeem dat gebruik maakt van

vlotters en een LVDT meetkop. Hier worden eveneens slechts resultaten besproken van metingen op het geasfalteerde wegdek.

In Figuren 7.a en 7.b, is de evolutie van de zetting in functie van de tijd en in functie van de afstand t.o.v. het front weergegeven voor een bepaalde meetdag (30/03/1998). Het valt onmiddellijk op dat de totale zetting minder dan 1 mm bedroeg, maar dat zelfs voor deze kleine waarden er toch systematische variaties, die nog kleiner zijn, kunnen worden gedetecteerd.

Toen de metingen konden worden opgestart (omstreeks 9h40) waren reeds twee buizen geperst (nummers 2 en 3). Een persing van 1 buis van 2 m lang duurde ongeveer 15 minuten. Buis 4 werd vanaf 9h45 vooruit geperst en buis 5 vanaf 10h30. De persing ging onder het meetinstrument door tussen 12h15 en 12h30, bij het persen van buis 6. Op Figuur 7.b, ziet men duidelijk de zettingen die plaatsvonden tijdens het persen (opschuiving langsheen x-as) en de zettingen die geaccumuleerd werden tijdens de stilstaande fasen van het front (sprongen met 2 m intervallen). Zo ziet men duidelijk dat tijdens het persen van buizen 4 en 5 er nog geen enkel effect werd waargenomen aan het grondoppervlak 0.5 à 4.5 m voor het front. In de periode die volgde op de persing van buis 5 (na 10h45) werd er echter een systematische zetting waargenomen (zie Figuur 7.a; bijna 0.2 mm over een periode van 75 minuten). Wanneer men om 12h15 startte met buis 6 (tot ongeveer 12h30), werd eerst een deel van de reeds opgetreden zetting te niet gedaan of m.a.w. men kreeg een opstuiking. Dit is waarschijnlijk verbonden met het onder druk komen van het front bij het aanbrengen van de perskracht. Tijdens het persen keerde de richting van de verticale verplaatsing weer om (terug naar beneden). Nadat buis 6 geplaatst was, had er zich een totale zetting van ongeveer 0.3 mm voorgedaan (inclusief het effect van buis 5 en de opstuiking bij de start van buis 6). Na 12h30 en tot men opnieuw de perskracht aanbracht voor de volgende buis (7; 13h00), trad er opnieuw een tijdsafhankelijke zetting op (ongeveer een bijkomende zetting van 0.2 mm over een periode van 30 minuten).

Ook voor de volgende buizen, herhaalde dit fenomeen zich, namelijk een opstuiking tijdens het opstarten van het persen, gevolgd door een verdere zetting van de oppervlakte. Voor buis 10 (16h00-16h15) was dit effect zeer klein en voor de laatste buis van de dag (12; tussen 17h55 en 18h10) was dit fenomeen niet merkbaar. De totale zetting gemeten nadat het front ongeveer 6 uren was voorbijgetrokken en zich op een afstand van 13.5 m van het meetpunt bevond bedroeg 0.7 mm.

De observaties zoals weergegeven op Figuur 7 en hierboven besproken, werden de volgende meetdag (31/03/1998) eveneens geobserveerd. In Figuur 8, is een detail van de variatie van de zetting in de tijd weergegeven. Men ziet duidelijk de opstuiking tijdens het starten van het persen en de zetting die er uiteindelijk op volgt. De totale zetting bedroeg 1.0 mm (J.Alaerts, 1998).

4. Conclusies

Door gedetailleerde en frekwente metingen uit te voeren, is het mogelijk mits de juiste interpretatie om meer te weten te komen over grondkarakteristieken, karakteristieken die de interactie doorpersing-grond beschrijven en de reactie van de grondmassa op een doorpersing.

Voor een site in Webbekom met een zanderige bodem werd een wrijvingshoek aan het front afgeleid die schommelde tussen 15° en 30°. Deze wrijving ontstaat wanneer de grond in de boorkamer draait t.o.v. de grondmassa voor het boorrad. Wanneer grind in het front aanwezig was, werden plotse en korte variaties waargenomen van het koppel voor een bepaalde perskracht.

Op een site in Erembodegem (S.Smolders, 1997), die in dit artikel niet in detail werd besproken, werden eveneens realistische wrijvingshoeken berekend: voor een grond bestaande uit zand en klei, schommelde de wrijvingshoek tussen 20° en 25°.

De wrijving tussen de vooruitgeperste buizen en de grondmassa werd geschat op 14 kN/m² wanneer er geen smering werd toegepast en 2 kN/m² wanneer bentoniet regelmatig werd geïnjecteerd achter de buizentrein.

Het effect van de persing wordt slechts zeer kort voor het front aan het grondoppervlak waargenomen (0.5 à 1 m). Eenmaal dat het front onder het meetsysteem is voorbij gekomen, wordt het aanbrengen van de perskracht nog voor een lange periode (minstens 6 uren en/of wanneer het front reeds 13 m of verder vooruit is) systematisch waargenomen. Dit resulteert in een opstuiking, die op een site in Wetteren, regelmatig overeenkwam met de reeds opgetreden zetting (tussen 0.2 en 0.5 mm). De totale zetting die werd gemeten schommelde tussen 0.2 en 1.1 mm.

Op de sites die tot nu toe werden bestudeerd, hebben de auteurs kunnen vaststellen dat door een systematische meting van uitvoeringsparameters en van zettingen men een beter inzicht krijgt in doorpersingen en in het bijzonder in het gedrag en de eigenschappen van de grondmassa. Verdere metingen zijn gepland. Het ultieme doel is om gebaseerd op in-situ metingen de respons van de grond te kwantificeren.

Referenties

Alaerts J., Doorpersingen van rioolbuizen, correlatie tussen uitvoeringsparameters en grondgedrag, Eindwerk voor het behalen van het diploma Burgerlijk Mijnbouwkundig Ingenieur (KULeuven), 1998.

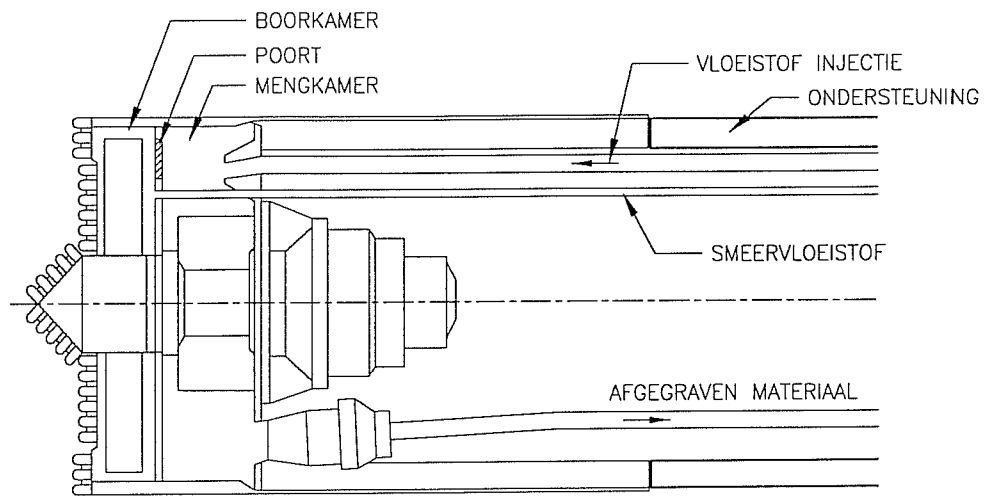
Maidl B., Herrenknecht M. and Anheuser L., Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb, Ernst & Sohn, Berlin, 1989 [in German]

Milligan G. and Marshall M., Ground movements due to construction of pipe-jacked tunnels, Proceedings of XI ECSMFE-Congress, DGF-Bulletin, Volume 3, 1995, p 3.191-3.200.

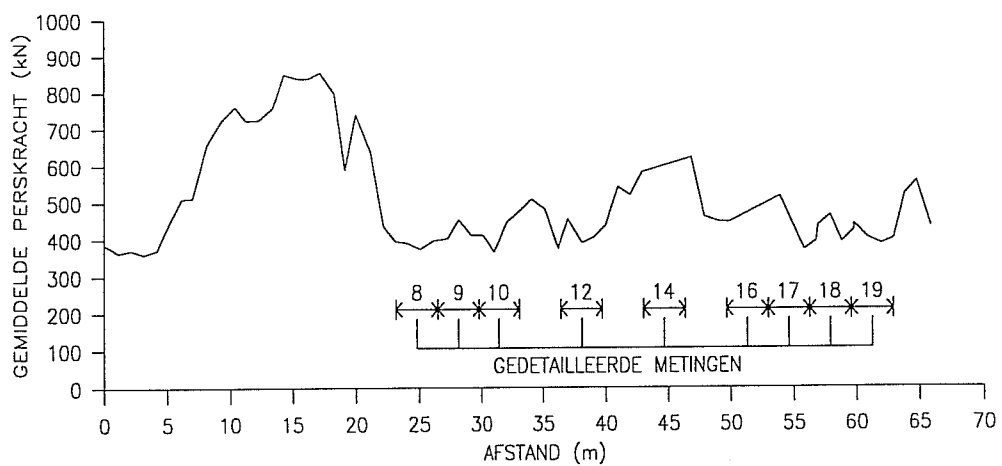
Smolders S., Doorpersingen, bestudering uitvoeringsparameters, Eindwerk voor het behalen van het diploma Burgerlijk Mijnbouwkundig Ingenieur (KULeuven), 1997.

Stein D., Möllers K. and Bielecki R., Microtunneling, Ernst & Sohn, Berlin, 1989.

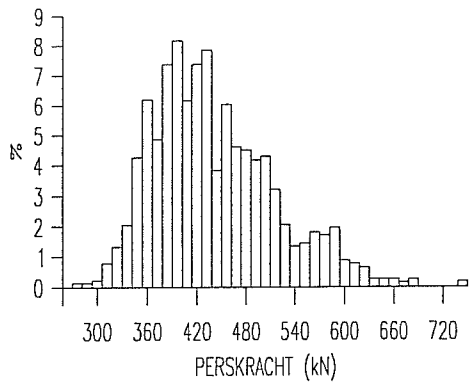
Thomson J., Pipejacking and microtunneling, Chapman & Hall, U.K., 1993.



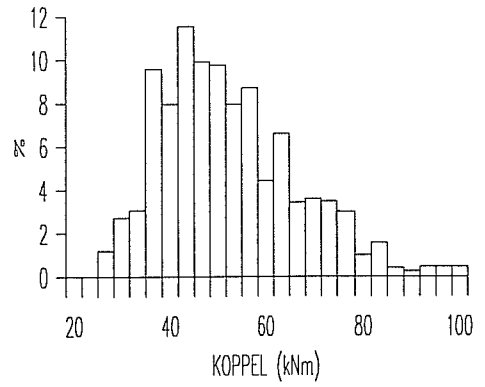
Figuur 1. Vereenvoudigd schema van een gronddrukschild (CBC-systeem, Smet-Boring)



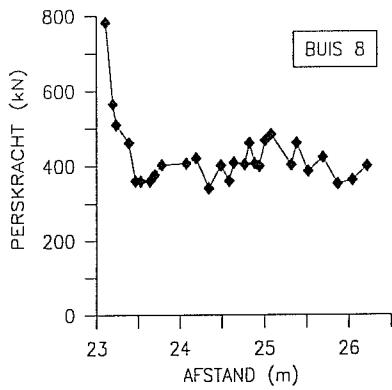
Figuur 2. Gemiddelde perskracht (per m vooruitgang) t.o.v. de geperste afstand [de positie van de buizen met gedetailleerde metingen is weergegeven]



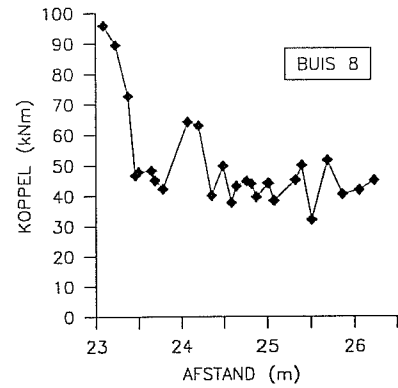
Figuur 3.a. Histogram van de perskracht [site Webbekom]



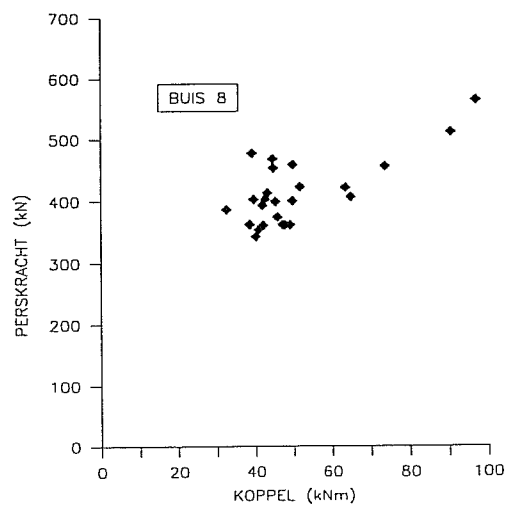
Figuur 3.b. Histogram van het koppel [site Webbekom]



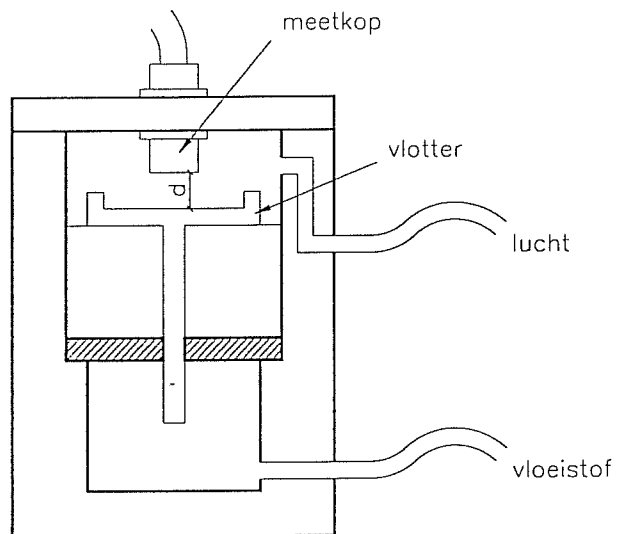
Figuur 4.a. Perskracht t.o.v. geperste afstand [site Webbekom; buis 8]



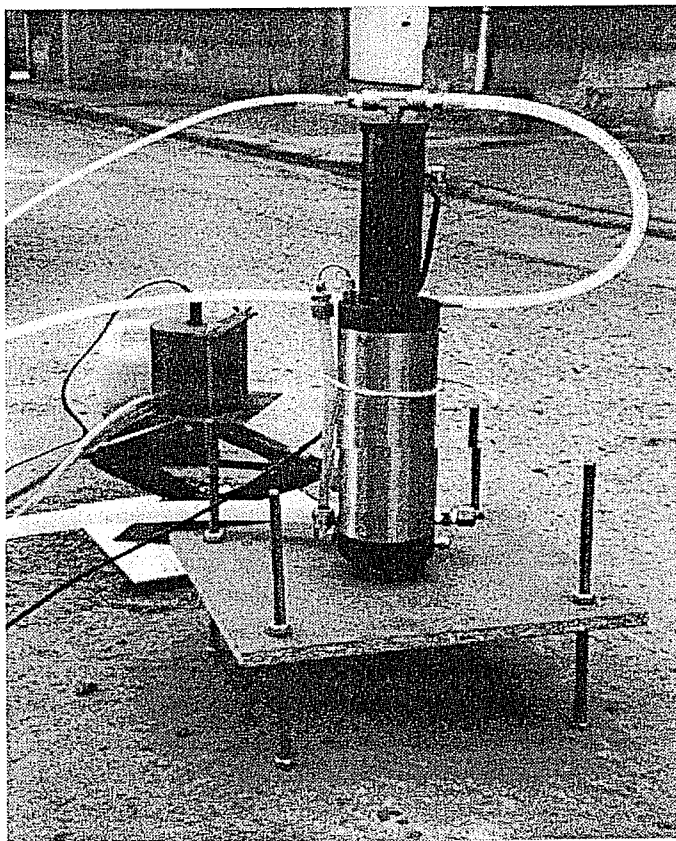
Figuur 4.b. Koppel t.o.v. geperste afstand [site Webbekom buis 8]



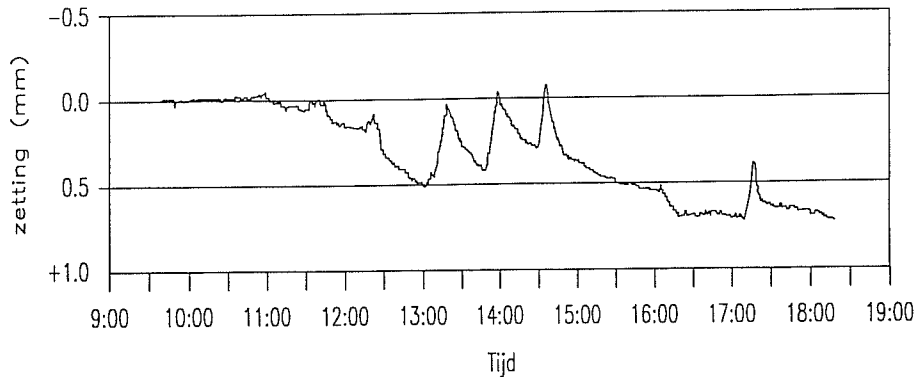
Figuur 4.c. Perskracht t.o.v. koppel [site Webbekom; buis 8]



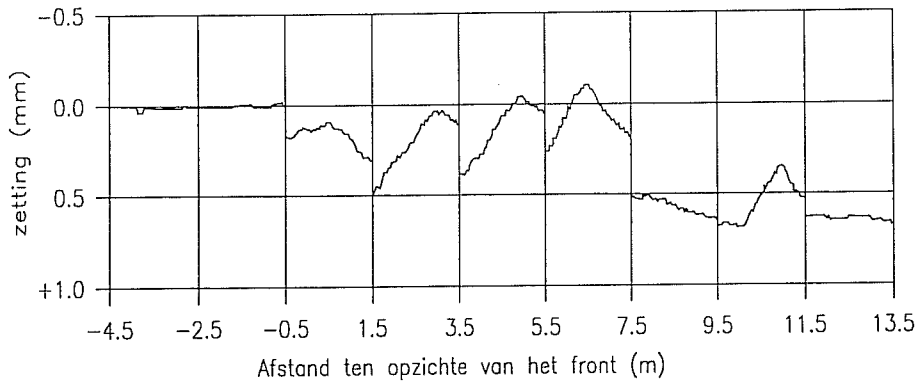
Figuur 5. Meetsysteem ontwikkeld in het laboratorium "Mécaroches" van de F.P.Ms. (Bergen)



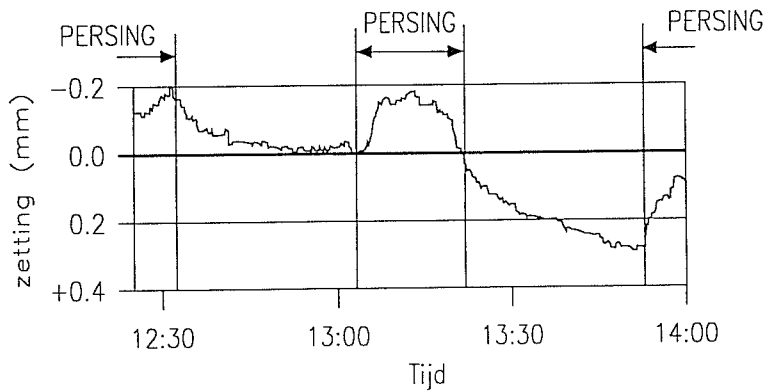
Figuur 6. Zicht op de meetinstrumenten Geokon (rechts) en F.P.Ms. (links)



Figuur 7.a. Variatie van de zetting in functie van de tijd [meting uitgevoerd te Wetteren op 30/03/1998]



Figuur 7.b. Variatie van de zetting in functie van de afstand t.o.v. het front [meting uitgevoerd te Wetteren op 30/03/1998]



Figuur 8. Variatie van de zetting in functie van de tijd [meting uitgevoerd te Wetteren op 31/03/1998]