

## **Praktische ervaring met nagels met zelfborende stangen voor de HSL-werken te Berchem**

ir. W. Maekelberg, ir. J. Maertens, Dienst Geotechniek, TUC RAIL N.V.

### **Samenvatting**

De HSL werken te Antwerpen-Berchem, die momenteel in uitvoering zijn, worden gefaseerd uitgevoerd. Als scheidingswand tussen twee uitvoeringsfazen is gebruik gemaakt van vernagelde wanden. Deze wanden werden gestabiliseerd met behulp van nagels met zelfborende stangen.

Bij de uitvoering van de nagels werd hun treksterkte gecontroleerd aan de hand van trekproeven. Uit de last verplaatsingsdiagrammen van deze proeven kunnen een aantal conclusies m.b.t. de werking van de nagels getrokken worden.

Bij de start van de huidige uitvoeringsfase werden de vernagelde wanden uit de vorige uitvoeringsfase verwijderd en werden bij wijze van proef een aantal nagels met zorg uitgegraven. Hierbij worden de conclusies m.b.t. de werking van de nagels bevestigd en zijn een aantal bijkomende vaststellingen gebeurd.

### **1. Inleiding**

Om de HSL -verbinding tussen Brussel en Amsterdam, de zogenaamde Noord-Zuid verbinding, te realiseren en mede om de huidige capaciteit van het Centraal station te Antwerpen in de toekomst te verhogen, wordt onder het station een tunnel gemaakt (zie figuur 1). Momenteel wordt de ruwbouw van het tunneldeel onder het station afgewerkt, terwijl men nog volop bezig is met de bouw van de toegangstunnel aan de kant Berchem. Recentelijk is men eveneens gestart met het verdere verloop van de tunnel onder de stad Antwerpen.

De bouw van de toegangstunnel aan de kant Berchem is verdeeld over twee aanbestedingen. In een eerste aanbesteding worden de zijwanden en de dakplaat van de toekomstige tunnel in het geklasseerde spoorwegviaduct gemaakt. Tevens worden de verschillende bestaande onderdoorgangen ondervangen.

Deze werken worden gefaseerd uitgevoerd en als scheidende wand tussen twee uitvoeringsfazen werd over de volledige lengte van de werken een vernagelde wand gemaakt. Voor het realiseren van de nagels is gebruik gemaakt van de techniek van nagels met zelfborende stangen (Type Ischebeck/Mai-Ibo)

### **2. De techniek van “nagels” met zelfborende stangen**

De techniek van nagels met zelfborende stangen bestaat erin dat de nagels geboord worden met de wapeningsstaaf van de nagel. Aan het uiteinde van de staaf wordt een niet recupereerbare boorkop geplaatst en de holle wapeningsstaaf wordt op diepte geboord door middel van een spoelboring. De boorspecie die gebruikt wordt, is meestal een cementspecie. Bij deze werken werd een mengverhouding voor de cementspecie W/C = 1 gebruikt.

Door het uitvoeren van een naïnjectie via de onderkant van de nagel wordt een opspanning van het terrein beoogd en aldus ook een verhoging van de treksterkte van de nagel. Deze naïnjectie wordt steeds uitgevoerd na een zekere verharding van de cementspecie rond de zelfborende stangen.

Als injectiespecie wordt eveneens gebruik gemaakt van een mengsel van water en cement, al dan niet met een andere mengverhouding als deze van de boorspecie. Voor deze werken werd steeds gebruik gemaakt van een mengverhouding  $W/C = 1$  voor de injectiespecie.

### **3. Het gebruik van nagels met zelfborende stangen**

De uitvoering van de huidige werken aan de toegangstunnel te Berchem is opgevat in verschillende fasen. In elk van de fasen is aan de ene zijde van het viaduct het spoor in dienst, teneinde de toegang voor het treinverkeer tot het centraal station te garanderen. Aan de andere zijde van de viaduct worden de werken uitgevoerd.

De vernagelde wand, die in een eerste fase de scheiding vormt tussen de werken en het spoor in dienst (zie figuur 2a), is aangelegd over de volledige lengte van de viaduct en heeft over het algemeen een te keren hoogte van 4m. Enkel ter hoogte van de onderdoorgangen in de spoorwegviaduct is een diepere beschoeiing gerealiseerd. De maximaal te keren grondhoogte is daar ongeveer 10m.

De vernagelde wand is verticaal uitgevoerd op een minimale afstand van het spoor in dienst. Om in de verschillende uitgravingfasen van de vernageling de stabiliteit van het spoor te garanderen, zijn voorafgaandelijk groutkolommen met een tussenafstand h.o.h. van 1m achter de wand geplaatst. De kolommen zijn uitgevoerd met een diameter van 0,50m.

Na guniteren van een eerste uitgravingfase worden de nagels met zelfborende stangen uitgevoerd. De nagels zijn uitgevoerd onder een helling van  $20^\circ$  en verankerd in de aanvulling tussen de steunmuren van de spoorwegberm. De lengte van de nagels werd beperkt door de afstand tot steunmuur.

In de tweede uitvoeringsfase is het spoor in dienst verplaatst op de reeds gerealiseerde dakplaat uit de eerste uitvoeringsfase. Tuhdens de werken in de tweede fase wordt de vernagelde wand afgebroken zoals aangegeven in figuur 2b.

### **4. Controle van de treksterkte van de nagels met zelfborende nagels**

#### **4.1 Uitvoeren en beproeven van de proefnagels**

Als controle van de treksterkte van de nagels zijn in het totaal 8 proefnagels gemaakt, die beproefd werden door middel van trekproeven.

De proefnagels zijn, net als de nagels van de vernagelde wand, verankerd in de aanvulling tussen de steunmuren van de spoorwegberm. De aanvulling tussen de spoorwegberm bestaat hoofdzakelijk uit heterogene aanvulgronden en zand met een gemiddelde conusweerstand in de aanvulling van ongeveer 2MPa. (zie figuur 3).

De proefnagels werden uitgevoerd met een vrije lengte die verwezenlijkt werd door het plaatsen van een PVC-buis over de eerste twee meter van de wapeningstaaf. Voor iedere proefnagel werd een verankeringslengte van 3m gebruikt. De gebruikte boorkop heeft een diameter van 75mm.

De proeven werden uitgevoerd volgens de procedure van het LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). Hierbij werd de maximale trekkracht aangebracht in 8 of 10 belastingsstappen met elk een duur van  $\frac{1}{2}$  uur. Als maximale trekkracht werd steeds 2 maal de vooropgestelde dienstlast van het anker gebruikt of de theoretische breuklast van het anker.

Bij het uitvoeren van de proeven worden, binnen de verschillende belastingsstappen en op vastgelegde tijdstippen, de verplaatsingen van de paalkop gemeten. De verplaatsingsmeters worden hierbij op een onafhankelijke wijze opgesteld van de rest van de proefopstelling.

Uit de gemeten verplaatsingen in de verschillende belastingsstappen worden 3 grafieken gedestilleerd :

- Een kruipdiagram : hierin worden de verplaatsingen van de ankerkop in functie van de tijd binnen de belastingsstap weergegeven (fig. 4a);
- Een lasthellingsdiagram : Hierin wordt de helling van de kruipcurven uitgezet i.f.v. de aangebrachte belasting (fig 4b);
- Een lastzakkingsdiagram : hierin wordt de aangebrachte belasting uitgezet i.f.v. de verplaatsing van de ankerkop op het einde van iedere belastingsstap (fig. 4c);

Wanneer de meetresultaten op deze manier voorgesteld worden, kan hieruit een vloeiwaarde van het anker bepaald worden. Deze vloeiwaarde stemt overeen met het knikpunt in het lasthellingsdiagram (zie figuur 4b). Uit de aldus bepaalde vloeiwaarde wordt de dienstlast van het anker bepaald met een veiligheidscoëfficiënt van 1,25. Uit het lastzakkingsdiagram kan de bijbehorende verplaatsing bepaald worden.

#### 4.2 Interpretatie van de proefresultaten

In tabel 1 worden de dienstlasten van de 8 proefnagels met hun bijbehorende verplaatsing samengevat. De aangegeven eenheidwrijvingsweerstand werd bepaald in de veronderstelling dat de volledige trekkracht gelijkmatig verdeeld wordt over de verankeringslengte van de nagel (3m) en het groutlichaam van de nagel een diameter van 0,15m heeft, zoals dit door de fabrikant van de nagel vooropgesteld wordt.

Tabel 1 : Vloeiwaarden van de proefnagels

		Dienstlast							
		V17-1	V19-1	V22-1	V22-2	V23-1	V23-2	V23-3	V26 1
Last	(kN)	64,0	80,8	94,4	123,2	128,4	56,0	134,4	103,2
Kracht per meter	(kN/m)	21,33	26,94	31,47	41,06	42,80	18,67	44,80	34,4
Eenheidswrijvingsweerstand	(kN/m <sup>2</sup> )	45,3	57,2	66,8	87,12	90,8	39,6	95,1	73,0
Verplaatsing	(mm)	3,30	4,60	6,70	9,30	6,80	0,72	7,50	4,70

De resultaten zijn grafisch weergegeven in figuur 5.

Bij het uitvoeren van de proeven zijn de proefnagels V17-1 en V23-2 voortijdig bezweken. Bij nazicht van de injectiefiches werd vastgesteld dat de injectiedruk van nagel V17-1 slechts 5bar bedroeg. De naïnjectie van nagel V23-2 werd onmiddellijk na het boren van deze nagel uitgevoerd, waardoor geen drukopbouw aan het uiteinde van de nagel mogelijk was en geen verdringing van de omliggende grond kon worden verwezenlijkt. Dit verklaart ook de lage waarde voor de dienstlast van deze nagels. Beide nagels hebben in vergelijking tot de andere nagels een minder stijf gedrag (zie figuur 5).

Uitgaande van de last-verplaatsingsdiagrammen van de overige nagels (figuur 5) kan gezegd worden dat het gedrag van de nagels vrij goed reproduceerbaar is voor belastingen lager dan de dienstlast van de nagel. Enkel wanneer de nagel nabij zijn breukwaarde belast wordt, is er een zekere diversiteit in het gedrag. Verder kan opgemerkt worden dat de verlenging van de nagel vrij

vlug de verlenging van de vrije lengte +  $\frac{1}{2}$  van de verankeringslengte overtreft. De kracht in de nagel wordt dus vrij vlug doorgegeven naar het uiteinde van de nagel.

Beide vaststellingen en het bezwijken van twee proefnagels geven duidelijk aan dat de naïnjectie van deze nagels van groot belang is voor de uiteindelijke treksterkte van de nagel.

Aangezien de last van de nagel vrij vlug naar het einde van de nagel doorgegeven wordt, is het berekenen van een eenheidwrijvingsweerstand over de schacht van de nagel weinig zinvol. Het anker zou dus eerder als een plaatanker dienen te worden berekend.

## **5. Vaststellingen bij uitgraven van de nagels**

Na het beëindigen van de uitvoeringsfase is het spoor in dienst verplaatst op het reeds uitgevoerde deel van de dakplaat van de toekomstige tunnel. In de tweede uitvoeringsfase wordt de dakplaat en de ondervanging van de onderdoorgangen verder gerealiseerd en wordt de vernagelde wand die in deze fase geen enkel nut meer heeft, afgebroken (zie figuur 2b).

Bij de uitgraving werd van de gelegenheid gebruik gemaakt om een aantal nagels met zorg uit te graven.

### **5.1 Uitgraven van de nagel en uitgevoerde metingen**

Hiervoor werd een zone aangeduid van 4 naast elkaar liggende nagel (zie figuur 6 a en b). De nagels werden deels met klein graafmateriaal en deels met de hand uitgegraven om beschadiging van de nagel tot een minimum te beperken. De vrijgegraven nagels hebben allen een totale lengte van 6m. De zelfborende stang heeft een buitendiameter van 30mm en een binnendiameter van 16mm.

Bij de uitgraving kon vastgesteld worden dat het bovenste deel van de nagels uitgevoerd is doorheen harde heterogene aanvulgrond. Het onderste deel van de nagels dat zich deels onder de gewelven van de muur bevond, was ingebed in matig gepakte homogene zanden.

Na het blootleggen van de verschillende nagels werd de omtrek van de nagel op verschillende afstanden van de onderzijde van de nagel opgemeten. Uit de gemeten omtrek werd de gemiddelde diameter van de nagel berekend. Uitgaande van de buitendiameter van de wapeningsstaaf (30mm) werd verder de omhullingsdikte van de cementspecie bepaald.

De diameter van de nagels evenals de omhullingsdikte van de cementspecie zijn in figuren 7a en 7b weergegeven in functie van de afstand tot de nagelkop (= bovenuiteinde).

### **5.2 Vaststellingen uitgaande van de meetresultaten**

Uitgaande van de vaststellingen tijdens de uitgravingen en de meetresultaten van de diameter van de nagel kan de nagellengte in 3 delen verdeeld worden.

In het eerste deel van de nagel was de nagel vrij moeilijk vrij te maken zonder beschadiging van de verharde cementomhulling te veroorzaken. Het opmeten van de nageldiameter was niet mogelijk. Bij het uitgraven van de nagel is evenwel vastgesteld dat de diameter van de nagel over dit deel gevoelig kleiner is dan bij de rest van de nagel (zie figuur 8a)

In een tweede deel van de nagel is de diameter vrij gelijkmatig (zie figuur 8b).

Het derde deel van de nagel komt overeen met de groutprop die gevormd werd door het uitvoeren van de naïnjectie. Deze was voor drie uitgegraven nagels zeer grillig van vorm waarbij de cementspecie zeer verre uitlopers had. Voor 1 nagel was er weinig verschil tussen het tweede deel van de nagel en het derde deel. In figuur 8c tot 8f worden de verschillende nagelkoppen afgebeeld.

In tabel 2 worden de meetwaarden en grondsoort in de 3 verschillende delen van de nagels samengevat.

Tabel 2 : De gemiddelde diameter van de nagels

	Deel 1	Deel 2	Deel 3
Afstand tot de nagelkop	0 – 2,00m	2,00 – 5,50m	5,50 – 6,00m
Grondsoort	Heterogene grond	zand	zand
Pakkingsdichtheid	Dicht	Matig	Matig
Diameter	30 – 40mm	70 – 130mm	110 – 260mm
Gemiddelde diameter	-	85mm	-
Gemiddelde Omhullingsdikte cementspecie	-	27mm	-

Uit tabel 2 en grafieken 7a en 7b is duidelijk vast te stellen dat de vooropgestelde diameter van de nagels (150mm voor een boorkop met diameter 75mm) in deze grond nergens gerealiseerd werd. Op het uiteinde van de nagel werd bij het uitvoeren van de naïnjectie in drie van de vier gevallen een duidelijke groutprop gevormd. De diameter van deze proppen varieerde tussen de 160mm en 260mm.

Bij het uitgraven werd eveneens vastgesteld dat in het nageldeel van de tweede zone tussen de buitenste omhulling en de wapeningsstaaf systematisch een holte aanwezig was (zie figuren 8g en 8h). Bij het doorslijpen van de nagel bevond zich in de centrale opening van de wapeningsstaaf zuiver water onder druk, niettegenstaande dat de nagels niet in het grondwater geboord werden.

Deze vaststellingen kunnen verklaard worden door het feit dat de W/C-factor van de cementspecie (W/C=1) te hoog was om een robuust groutlichaam te vormen. Door de hoge W/C-factor was het mengsel instabiel en heeft er zich gedurende het verhardingsproces een ontmenging van de groutspecie met een uitzakking van de cementdeeltjes naar het onderste deel van de nagel voorgedaan. Het water dat in eerste instantie de holte vulde, is vervolgens geleidelijk aan doorheen de buitenste cementomhulling weggesijpeld. In het inwendige van de wapeningsstaaf deed zich een soortgelijk ontmenging voor en was het water bij uitgraving nog aanwezig. De cementomhulling die de buitenste mantel van de nagel vormt, is afkomstig van de "cementcake" die zich tijdens het boren aan de omtrek van het boorgat heeft afgezet.

Om dergelijke holtes te voorkomen, is het gebruik van een mengverhouding  $W/C < 0,70$  aan te raden, zoals vermeld in [2]. Voor onsamenhangende grond is een W/C-factor voor de boorspecie en de injectiespecie aan te raden van  $W/C = 0,5$ .

## **6. Besluit**

Om de treksterkte van de nagels te controleren, werden een aantal trekproeven uitgevoerd op proefnagels.

Uit de resultaten van de trekproeven op de proefnagels kan geconcludeerd worden dat de uitvoering van de naïnjectie op deze nagels van vrij groot belang is voor de uiteindelijke treksterkte van de nagel. Uit de lastzakkingsdiagrammen kan tevens afgeleid worden dat de trekkracht op de nagel vrij vlug doorgegeven wordt naar het uiteinde van de nagel.

Bij het vrijgraven van de nagels werd vastgesteld dat de diameter van het groutlichaam relatief klein is t.o.v. de door de naïnjectie aan de nagelpunt verkregen groutprop, wat bovenstaande conclusie, betreffende het doorgeven van de trekkracht, bevestigt. Deze nagels zijn dus vooral einddragende nagels en zouden dan ook best op deze manier berekend worden.

Omheen de wapeningsstaaf kan systematisch een holte worden vastgesteld welke is ontstaan door het gebruik van een niet stabiele mengverhouding voor de cementspecie ( $W/C=1$ ). Om dergelijke holtes te voorkomen, is het gebruik van een mengverhouding  $W/C < 0,50$  à  $0,70$  aan te raden.

Door het vrijgraven van de nagels kon duidelijk worden vastgesteld welke fenomenen er zich bij het uitvoeren van de nagels en nagelproeven hebben voorgedaan. De daarbij gedane vaststellingen hebben geleid tot duidelijke conclusies m.b.t. de uitvoering en de dimensionering van dergelijke nagels. Aldus werd het nut van het vrijgraven duidelijk aangetoond.

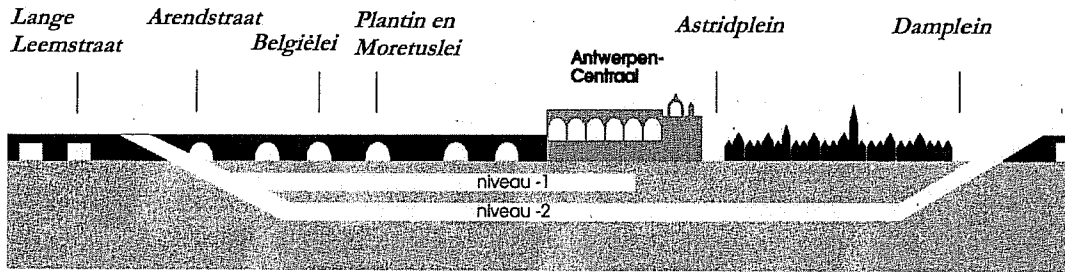
### **Referenties**

[1] Projet National Clouterre ; Recommandations CLOUTERRE, Pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 1991.

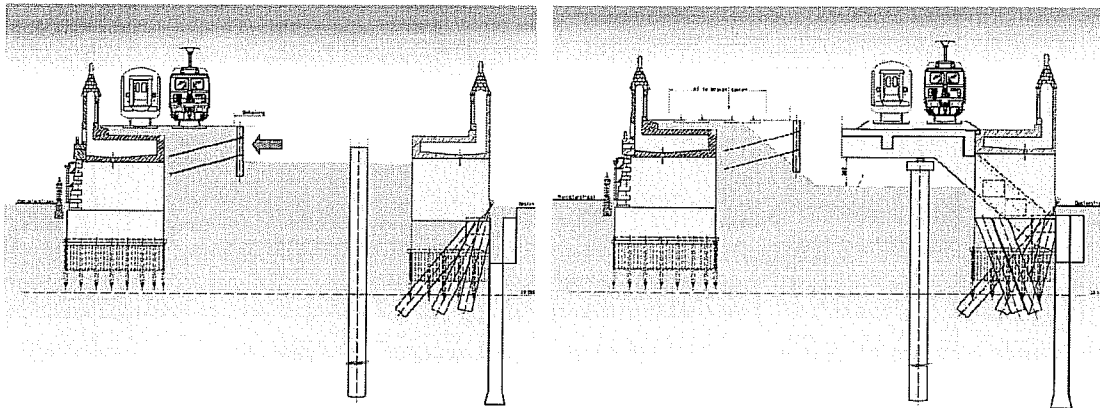
[2] Wichter, L en Meiniger, W. ; Verankerungen und vernagelungen im grundbau ; Bauingenieur-Praxis ; Ernst & Sohn 2000

Figuren

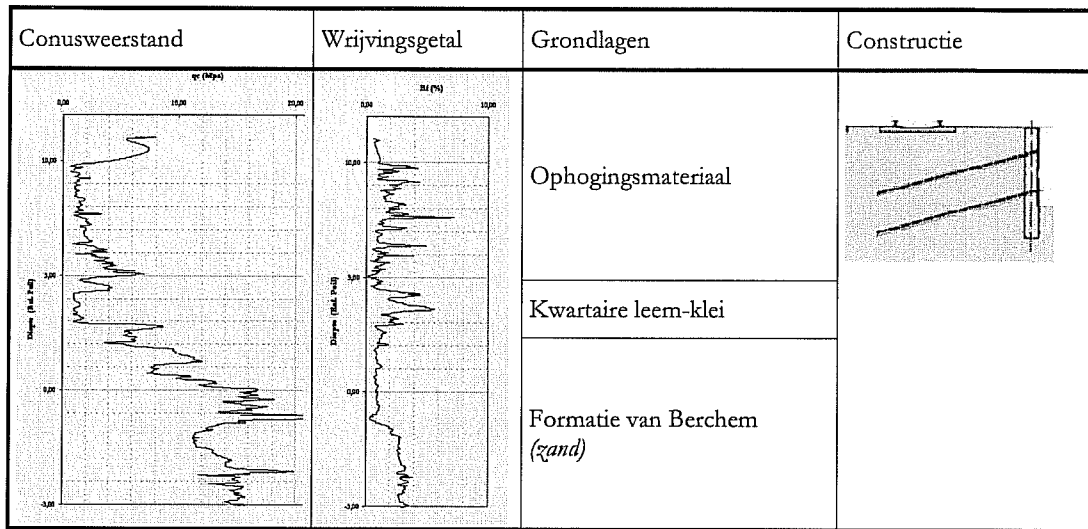
**Figuur 1 :** Tunnel onder het centraal station te Antwerpen



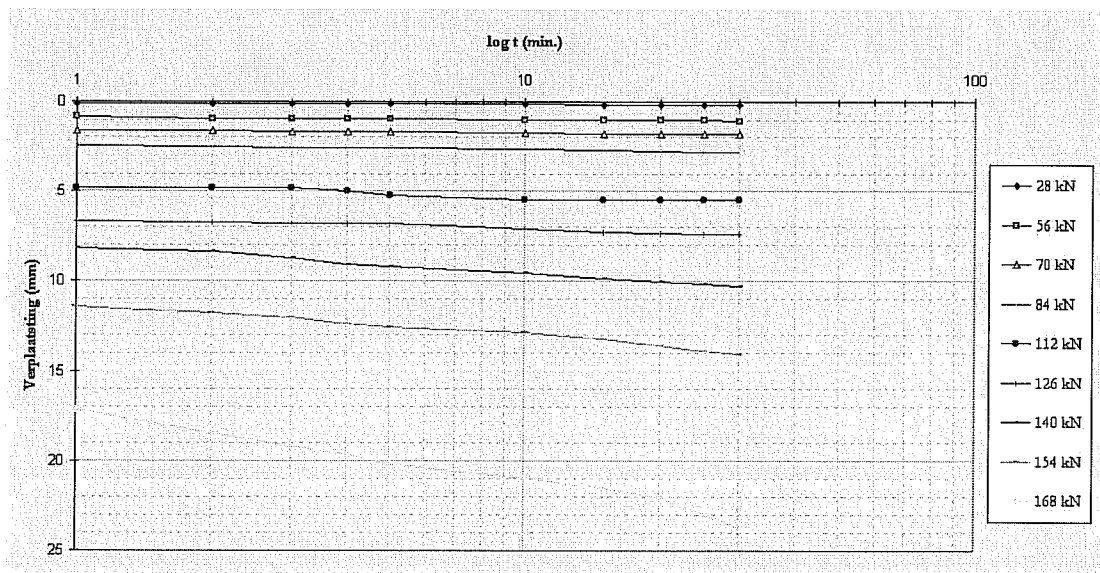
**Figuur 2a :** Situatie gedurende uitvoeringsfase 1 **Figuur 2b :** Situatie gedurende uitvoeringsfase 2



Figuur 3 : Grondkarakteristieken

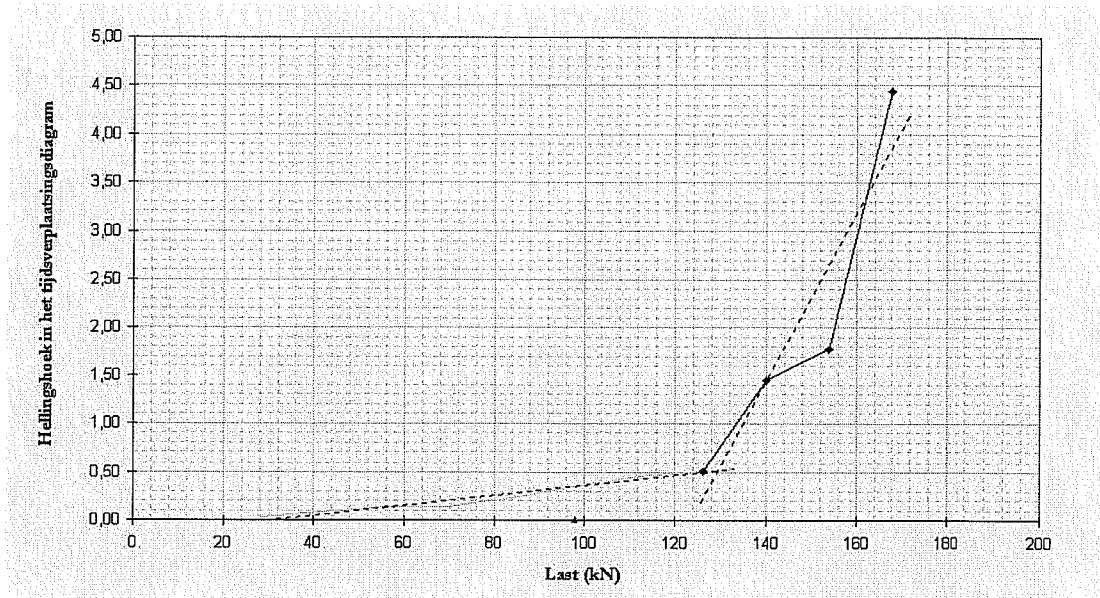


Figuur 4a : Tijd-verplaatsingsdiagram

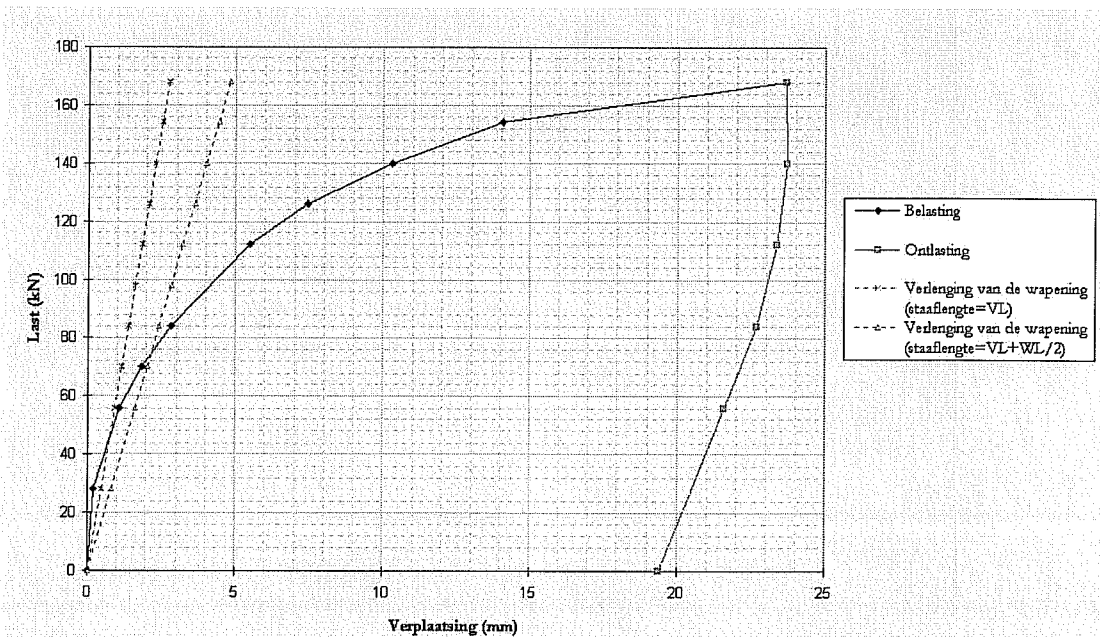




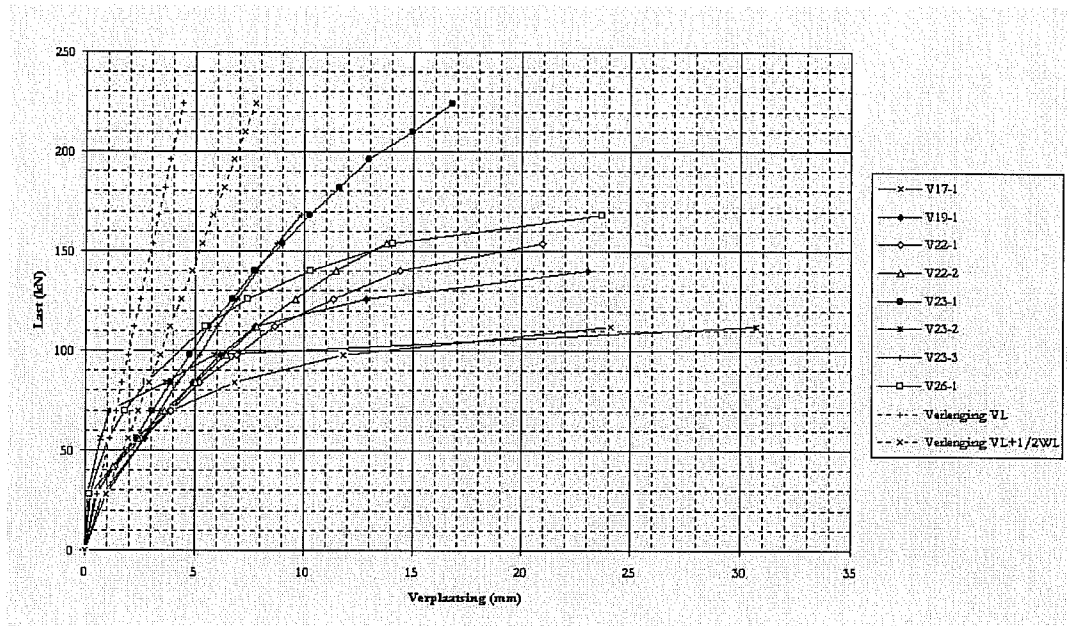
Figuur 4b : Last-hellingsdiagram



Figuur 4c : Last-verplaatsingsdiagram



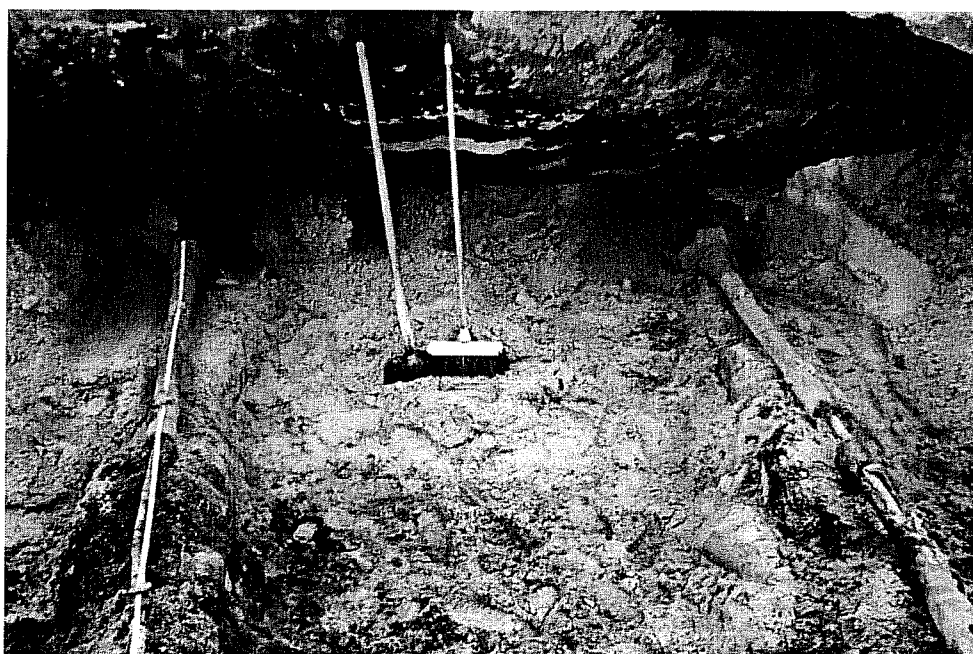
Figuur 5 : Vergelijking tussen de lastverplaatsingsdiagrammen van de proefnagels



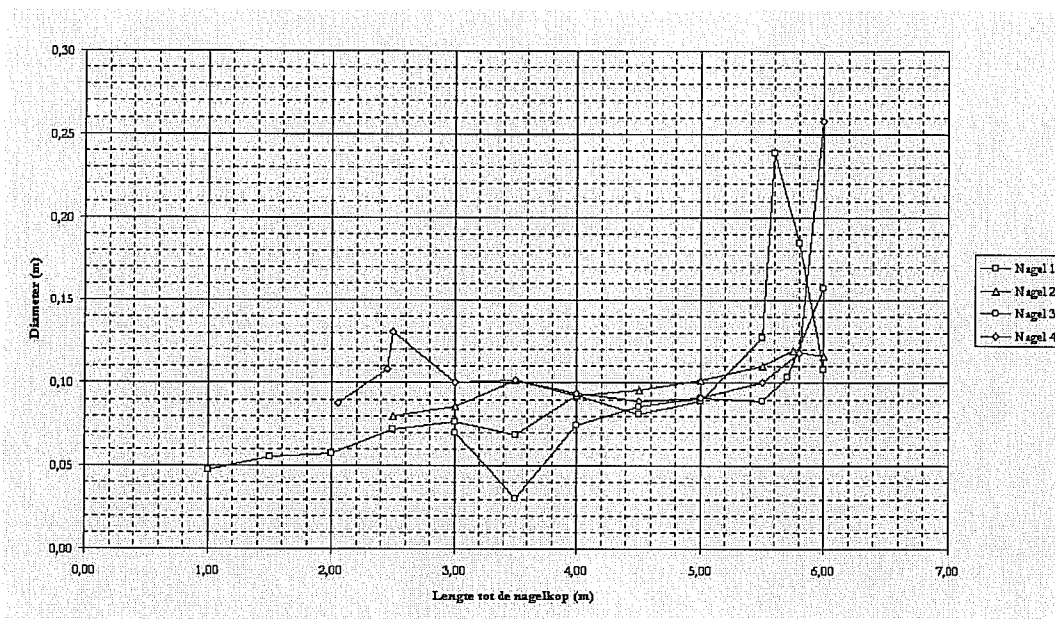
**Figuur 6a** : Vrijgegraven nagels 1 en 2



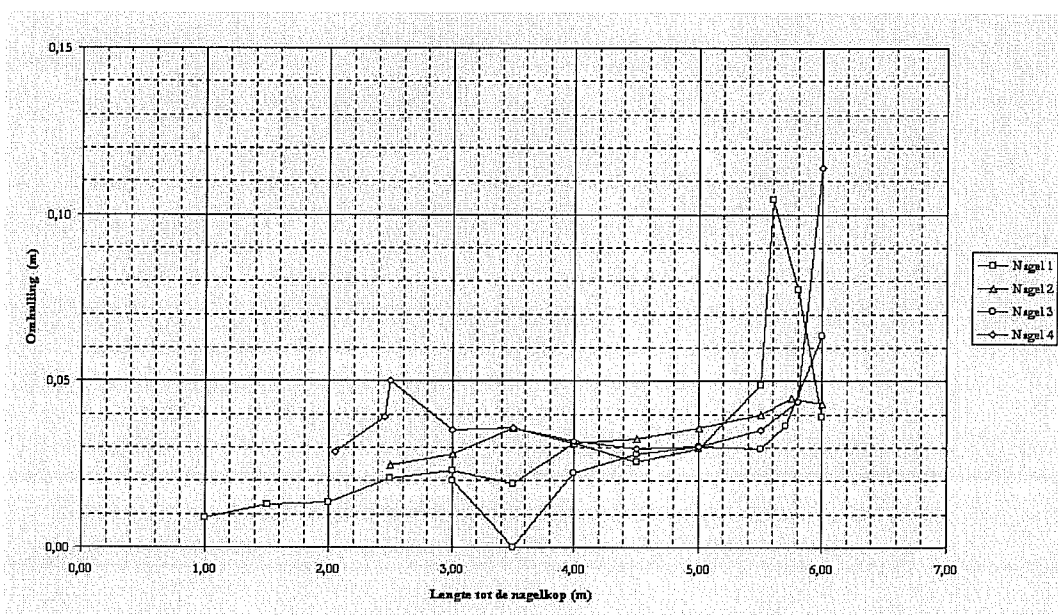
**Figuur 6b** : Vrijgegraven nagels 3 en 4



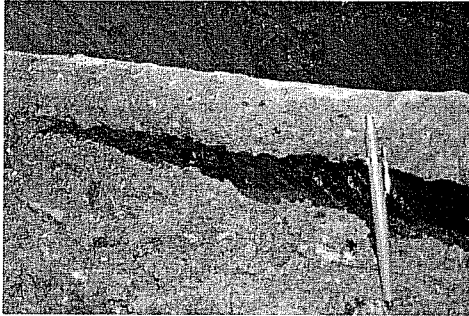
Figuur 7a : Diameter van de nagel in functie van de lengte tot de nagelkop



Figuur 7b : Omhullingsdikte van de cementspecie rond de nagel in functie van de lengte tot de nagelkop



**Figuur 8a:** Nageldiameter in deel 1



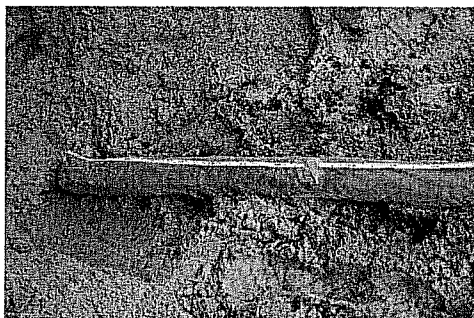
**Figuur 8b:** Nageldiameter in deel 2



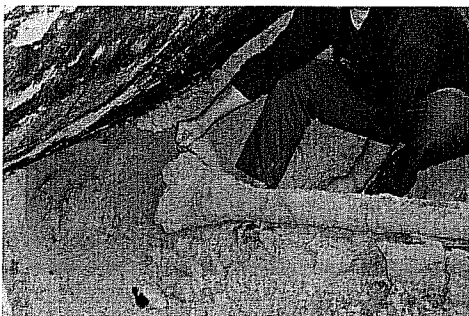
**Figuur 8c:** Cementprop bij nagel 1



**Figuur 8d:** Cementprop bij nagel 2



**Figuur 8e:** Cementprop bij nagel 3



**Figuur 8f:** Cementprop bij nagel 4



**Figuur 8g:** Holte in cementomhulling



**Figuur 8h:** Holte in cementomhulling

