

## Fundering van de Flevospoorlijn bij Almere/3

## Uitvoering van de grondverbetering

In dit derde en laatste artikel over de fundering van de Flevospoorlijn wordt de uitvoering beschreven van de diepteverdichting met een ingehaide buis. Ook worden de factoren die de verdichting beïnvloeden geanalyseerd; dit zijn de aard en oorspronkelijke dichtheid van de grond, de afstand tussen de verdichtingspunten en de hoeveelheid verwerkt zand. Tevens wordt in dit artikel de bestaande voorspellingsmethode verder verfijnd.

Grondverbetering wordt de laatste tien jaar meer en meer toegepast. Deze tendens kan, tot op zekere hoogte, uitgelegd worden door het feit dat het steeds moeilijker wordt geschikte terreinen te vinden voor het verwe-

- het feit dat slechts een laag van 5 m dikte moest worden verbeterd;
- de noodzaak om de waterdichte laag tussen twee watervoerende pakketten te handhaven.

ir. A. Holeyman, M.S.

zenlijken van grote infrastructurele werken, maar voornamelijk door het afnemen van de kosten van grondverbetering ten opzichte van meer traditionele methoden. Naar mate deze nieuwere methoden meer gebruikt worden, worden ook de noodzakelijke voorspellingsmethoden beter ontwikkeld.

Het is op dit moment uitvoerbaar grond ter plaatse te verbeteren tot gangbare diepten van 20 m en soms 30 m. De grondverbetering wordt verkregen door verdichten van doorlatende gronden en door versteviging van zachte of ondoorlatende gronden door middel van grindkolommen. Diepte verdichten van doorlatende gronden kan worden bereikt door:

- a. trillingen of schokken zonder bewust materiaal toe te voegen;
  - a.a. plaatselijk opgewekt op zekere diepte: explosieven;
  - a.b. plaatselijk opgewekt aan de oppervlakte: intensief aanstampen;
  - a.c. opgewekt langs een verticaal; vibrerend profiel, vibro-compaction.
- b. trillingen of schokken met toevoegen van geselecteerd materiaal;
  - b.a. opgewekt langs een verticaal: vibroflotatie, vibrerende casing;
  - b.b. plaatselijk opgewekt langs een verticaal: inslaan van zand of grind door een casing met een inwendig valblok.

– Voor de verdichting van doorlatende gronden, gebruikt Franki op dit moment de boven beschreven methoden (a.c, b.a en b.b).

– Alleen de laatste techniek, die werd toegepast voor de Flevolijn in Almere, zal worden besproken in dit artikel. Redenen waarom deze methode geschikt was voor het Flevolijn-project, uitgebreid beschreven in het artikel 'Grondverbetering op grotere diepte met verdichtingspalen' [1], waren onder andere:

het silo-effect, aan de buiswand kleeft.

De buis wordt met steeds zwaardere slagen op de prop in de buis naar de onderkant van het te verdichten pakket geheid.

Daar wordt de buis met behulp van zware trekkabels op zijn plaats gehouden, waarna de prop met zware slagen van het valblok wordt uitgeheid in de omringende grond. Tegelijkertijd wordt de buis over een beperkte lengte uit de grond getrokken.

Wanneer de hoogte van de prop in de heibuis voldoende verminderd is, wordt de buis met behulp van slagen van gemiddelde energie weer teruggeheid naar het diepste niveau van de te verdichten laag. De fase waarin materiaal wordt toegevoegd kan dan beginnen. Het gespecificeerde volume zand, dat groter is dan het volume van de inslagbuis in de te verdichten laag, wordt beetje bij beetje vanuit de vultrechter boven de inslagbuis in de buis gestort (fig. 2).

Het zand valt door de ruimte tussen het inwendig valblok en de inslagbuis op de prop, die uitgeslagen wordt, terwijl de inslagbuis tegelijkertijd wordt teruggetrokken (fig. 1b). Het terugtrekken van de casing wordt periodiek onderbroken, om het terugheien van de

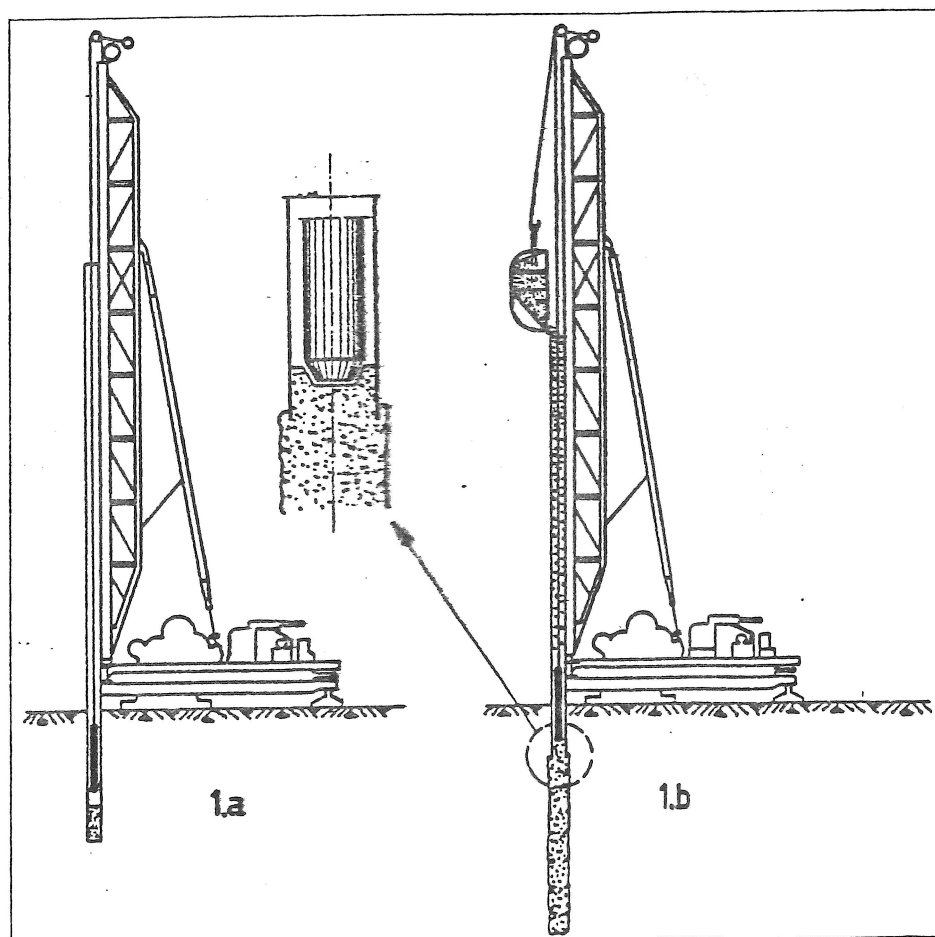
## Beschrijving van de methode

Er wordt gebruik gemaakt van een traditionele Franki-stelling, waarmee een zware stalen buis kan worden ingehaid met behulp van een door een lier bediend inwendig valblok (fig. 1a). Na het stellen wordt de buis op het maaiveld geplaatst en over voldoende hoogte gevuld met zand of grind. Met het inwendig valblok wordt het zand of grind enigszins verdicht in de buis.

Op deze manier wordt in de buis een prop gevormd, die door wrijving, veroorzaakt door

1a. Inheien van de Franki-buis.

1b. Inslaan van het zand.



Ir. A. Holeyman, M.S., adjunct directeur  
Onderzoek en Grondmechanica, SA Franki  
NV, Internationale Afdeling.

casing over een vastgestelde diepte mogelijk te maken. Tijdens het terugheien wordt het toegevoegde materiaal verder verdicht. Wanneer de bovenkant van het te verdichten pakket bij de laatste maal terugheien wordt bereikt, kan op twee manieren worden gehandeld, afhankelijk van de toepassing. Als het mogelijk en noodzakelijk is de weerstand van de hoger gelegen lagen te verbeteren, wordt een verdichte hoeveelheid zand gelijk aan het volume van de casing in de grond ingebracht.

Door continu op de prop in de buis te heien wordt deze hoeveelheid zand in de grond geslagen. Terugheien vindt niet plaats.

Als het niet nodig is de weerstand van de hoger gelegen lagen te verbeteren, wordt de inslagbuis met zand gevuld, het valblok wordt op de zandkolom geplaatst en de buis wordt getrokken. In het bijzondere geval van het werk 'Flevolijn' werden kleibolletjes in de kolom verdichte grond opgenomen, op het niveau van de natuurlijk aanwezige waterdichte formatie.

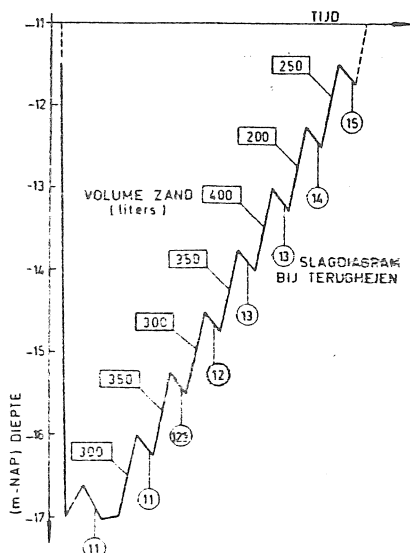
### Uitvoeringsparameters en controle

Tijdens het maken van de verdichtingspunten kan informatie worden verzameld, waaruit de verschillende aspecten van het verdichtingsproces beter kunnen worden begrepen.

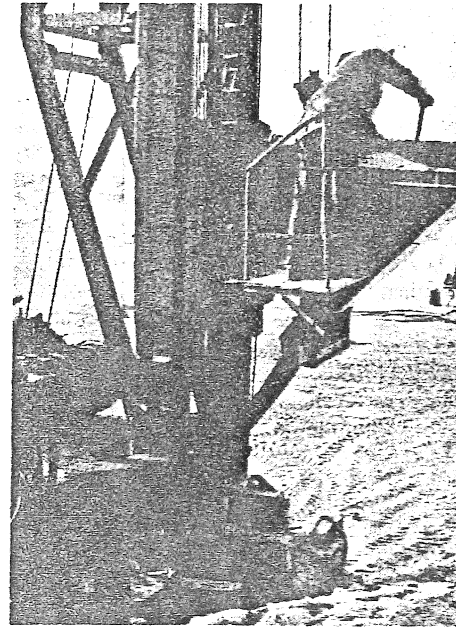
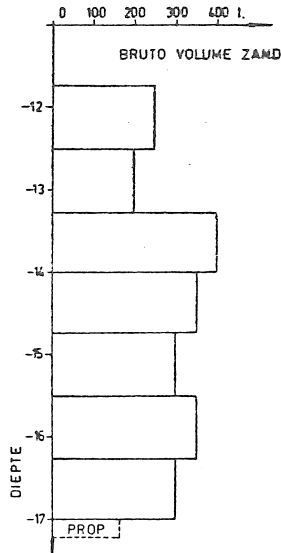
Enkele voorbeelden zijn:

**Kalender bij eerste maal inheien:** het heigedrag van de casing kan worden vastgelegd in de vorm van een slagdiagram. De kalender hangt onder andere af van de oorspronkelijke grondeigenschappen en maakt het mogelijk zones te ontdekken met lagere initiële korrel-dichtheden dan verwacht. De kalender bij het de eerste maal inheien hangt ook af van de afstand tot en het effect van eerder uitgevoerde verdichtingspunten.

3a. Beweging van de buis.



3b. Volumes van het ingebrachte zand.



2. Uitstorten van het zand in de buis op diepte.

**Kalender bij terugheien:** bij het van tijd tot tijd terugheien van de casing, kan de kalender ook worden geregistreerd. Deze kalender hangt hoofdzakelijk af van eigenschappen van de verbeterde grond in het invloedsg gebied van de casing. De vergelijking van de kalender bij de eerste maal inheien en bij het terugheien geeft een aanwijzing voor de relatieve verbetering van de grond.

**Volume zand ingebracht tijdens de opvolgende fasen van het terugtrekken van de casing:** deze hoeveelheden dienen overeen te komen met de specificaties, maar kunnen

plaatselijk hoger zijn door het voorkomen van zones met lagere oorspronkelijke pakingsdichtheid. Deze toename van het volume kan worden verklaard uit het feit dat het gemakkelijk is de prop uit te slaan in losser gepakte gronden.

Ter illustratie van het verdichtingsproces, zijn in figuur 3a in detail de parameters gegeven die geregistreerd zijn tijdens de uitvoering van verdichtingspunt nr. 13 voor pijler 2 van brug nr. 205. Figuur 3a toont de bewegingen van de inheibuis, figuur 3b de volumes verwerkt zand, terwijl figuur 3c een kalender bij de eerste maal inheien en een kalender bij terugheien toont samen met sonderingen uitgevoerd vóór en na verdichten. Voor routinecontrole echter, is het totale volume verwerkt zand en de kalender bij terugheien voldoende.

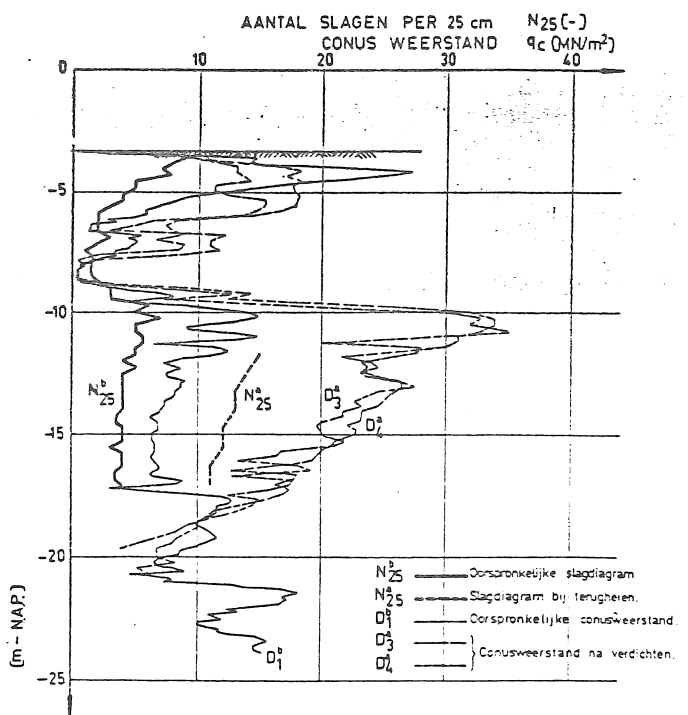
De grondverbetering wordt uiteindelijk gecontroleerd door middel van sonderingen, uitgevoerd binnen het patroon van verdichtingspunten.

In het onderhavige geval eiste de specificatie een minimum sondeerwaarde van 18-20 MN/m<sup>2</sup> in een laag schoon, matig fijn zand gelegen tussen in het algemeen 12 m en 17 m -NAP en tussen op sommige plaatsen 20 en 25 m -NAP.

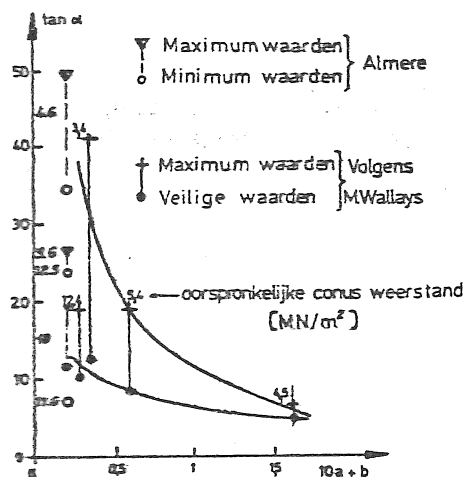
### Techniek van het verdichten en beperkingen van de methode

De kern van het verdichtingsproces [2] is de bestaande korrelstapeling teniet te doen, zodat een nieuwe stapeling ontstaat met een grotere dichtheid die eindelijk resulteert in betere mechanische grondeigenschappen. Het teniet doen van de bestaande stapeling kan het beste bereikt worden in fijne tot matig fijne verzadigde cohesieloze gronden, waar

3c. Slagdiagrammen en sonderingen vóór en na het verdichten.

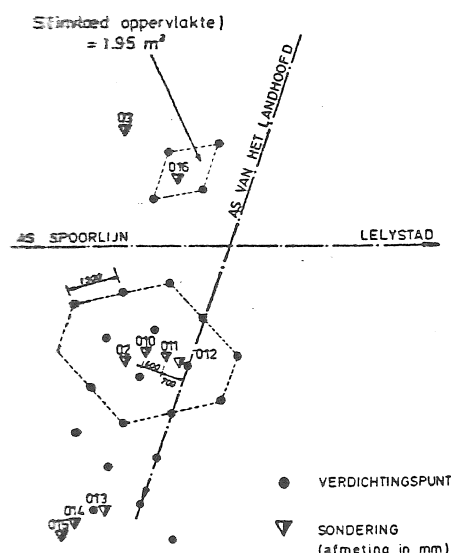


'liquefaction' veroorzaakt kan worden door opvolgende schokken en waar de grote doorlatendheid het mogelijk maakt dat water weg stroomt uit de zone met het gereduceerde porienvolume. In gedeeltelijk verzadigde gronden is het teniet doen van de stapeling moeilijker, maar het aanwezige gas kan gemakkelijker uit de poriën ontsnappen. Wanneer nieuw zand door een casing in de grond gebracht wordt en wanneer de casing teruggeheid wordt, resulteert deze volumeverplaatsing in schokgolven in de omringende grond die het zand plaatselijk doet vloeien. Omdat de casing niet volledig terugveert en omdat een zekere hoeveelheid zand in de ondergrond achterblijft, wordt het effect van het vloeien van het zand versterkt door restspanningen, opgewekt in de grond. Dit in tegenstelling tot het effect, geproduceerd door één enkele schok. Onder invloed van het opgewekte totaal-spanningsveld, vloeit poriënwater af naar het niet beïnvloede zand en weg uit de verdichtingszone. Bovendien brengen restspanningen de korrels dichter bij elkaar, nadat het inbrengen



4. Helling, bepalend voor de vermenigvuldigingsfactor versus de korrelverdelingsindex (gedeeltelijk uit [4]).

5a. Situatie verdichtingspunten.



van nieuw materiaal beëindigd is. Dit zou de verbetering van de grondeigenschappen in de tijd kunnen verklaren, of het verouderingseffect, zoals dat is gerapporteerd in de literatuur [2].

Hoe fijner de korrels in de aanwezige grond, des te groter de vereiste hoeveelheid energie om het bestaande korrelskelet te verstoren en des te langer het duurt voordat de grond kan profiteren van deze eventuele verstoring. Bij fijnkorrelige gronden wordt verdichting onuitvoerbaar, omdat cohesie voorkomt dat het bestaande korrelskelet teniet doet en omdat ondoorlatendheid optreedt, waardoor het uitstromen van water niet mogelijk is. Dit feit wordt gekwantificeerd door de grenscurves in het korrelverdelingsdiagram gegeven door Mitchell voor verdichten met 'Vibrocompaction' (zie fig. 3, pag. 8 van het artikel elders in dit nummer [1]).

Aangezien de energie per slag bij verdichtingspalen in de orde van 200 kNm ligt en grote verplaatsingen impliceert kunnen de grenscurves bij deze verdichtingsmethode iets naar buiten verschoven worden.

Een andere benadering kan, zoals we later zullen zien, gebaseerd worden op het wrijvingsgetal, gemeten met de elektrische conus, aangezien dit getal een maat is voor de cohesiecomponent van de grond en een indicatie geeft van de doorlatendheid.

### Eerste voorspelling

Na bevestiging dat de korrelverdelingscurve van het te verdichten zand ruim binnen de grenzen gegeven door Mitchell gelegen waren en dat het zand, dat beschikbaar was voor verwerking, grover was dan het te verdichten zand (zie fig. 1 pag. 7 [3]), moesten de afstanden van de verdichtingspunten en de hoeveelheden toe te voeren zand bepaald worden.

Uitgaande van de wens van de opdrachtge-

ver om geprefabriceerde betonpalen te heien in een relatief uniforme laag, werd aangenomen dat een driehoekig patroon met gelijke zijden van 1,50 m voldoende was voor een te verdichten laag van 5 m dikte.

Er werd gekozen voor een casing van 420 mm doorsnede voor de verdichtingswerkzaamheden.

Om de hoeveelheid te verwerken zand te specificeren, vóórdat proefverdichtingen worden uitgevoerd, wat de gebruikelijke methode is, heeft Franki gebruik gemaakt van de methode van Wallays [4], die uitgaat van de vermenigvuldigingsfactor 'f', die de verhouding geeft tussen de sondeerweerstand na verdichten en de sondeerweerstand vóór verdichten.

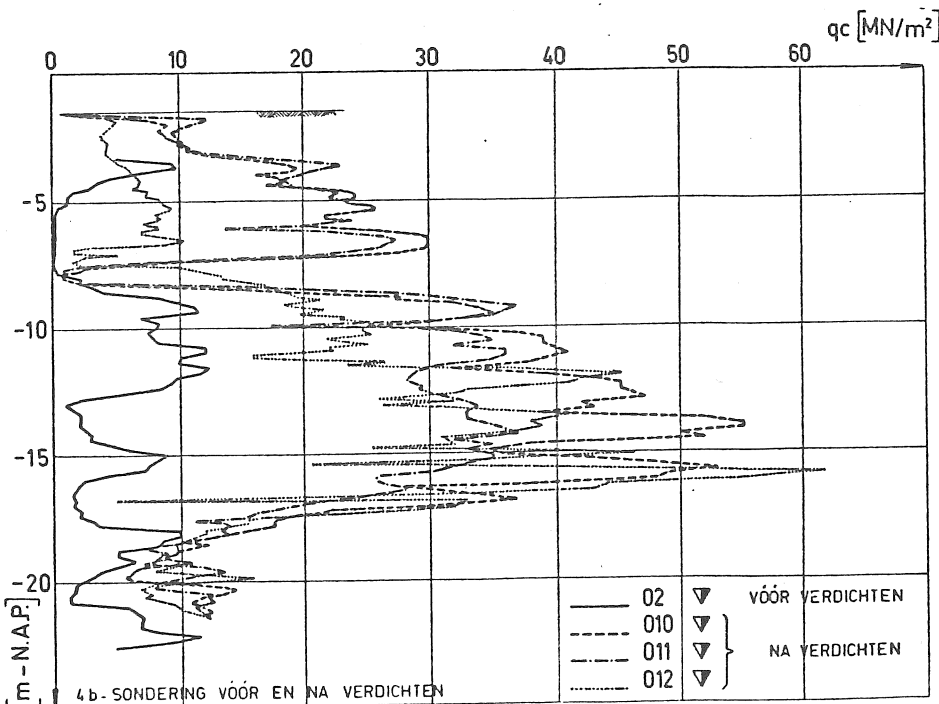
Aangenomen wordt dat deze vermenigvuldigingsfactor 'f' lineair afhankelijk is van het netto toegevoegde volume zand ten opzichte van het volume van het invloedsgebied S van een verdichtingspunt:

$$f = 1 + (\tan \alpha) \frac{S}{S} \quad 1$$

De waarde van de  $\tan \alpha$  hangt af van een korrelverdelingsindex en van de oorspronkelijke conusweerstand. Wallays heeft grafieken gepresenteerd [4] die de gemiddelde ( $\tan \alpha_m$ ) en veilige waarden ( $\tan \alpha_s$ ) voor  $\tan \alpha$  geven bij een oorspronkelijke conusweerstand van ongeveer 5 MPa als functie van een korrelverdelingsindex.

Deze korrelverdelingsindex is een dimensionloos getal gegeven door  $10a + b$ , waarin: a. de fractie is van deeltjes fijner dan 2  $\mu\text{m}$  en b. de fractie is van deeltjes fijner dan 74  $\mu\text{m}$ . Voor oorspronkelijke conusweerstand lager dan 5  $\text{MN/m}^2$  worden hogere waarden voor  $\tan \alpha$  aanbevolen (zie fig. 4 waar de oorspronkelijke conusweerstand gespecificeerd worden).

5b. Sondering vóór en na het verdichten.



Aangezien, het werkterrein voor de eerste test (pijler 1 van brug 017) gekarakteriseerd wordt door relatief lage conusweerstand, werd besloten om bij het begin uit te gaan van de veilige waarden van  $\tan \alpha$  voor het verkrijgen van resultaten, die het mogelijk maakten om de algemene uitvoeringsprocedures vast te leggen.

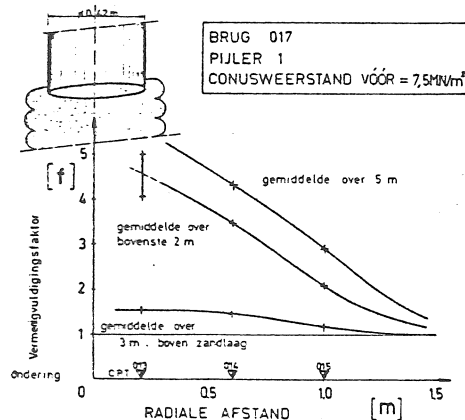
De gemiddelde conusweerstand over de te verdichten 5 m was  $4,6 \text{ MN/m}^2$ , met plaatselijk waarden van slechts  $1 \text{ MN/m}^2$ .

De vereiste gemiddeld te bereiken vermenigvuldigingsfactor  $f$  moest daarom in de orde van grootte van 4 tot 5 liggen (de gemiddelde vereiste minimale conusweerstand na verdichten was  $18\text{--}20 \text{ MN/m}^2$ ). De korrelverdelingscurve gaf een waarde  $b = 0,02$ ; voor  $a$  werd een waarde  $0,018$  aangehouden.

Voor een korrelverdelingsindex gelijk aan  $0,20$  ( $10 \times 0,018 + 0,02$ ), volgt uit de onderste curve van fig. 4 een  $\tan \alpha_s$ -waarde van 13 en uit de bovenste curve een  $\tan \alpha_m$ -waarde in de orde van grootte van 50.

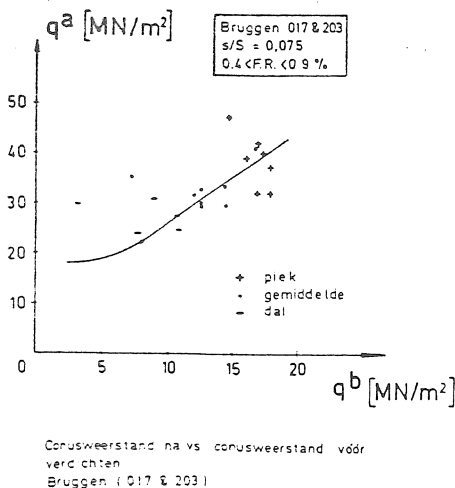
Deze waarden komen overeen met een netto toe te voegen volume zand van:

$$\text{maximale } \frac{s}{S} = \frac{f - 1}{\tan \alpha_s} = \frac{5 - 1}{13} = 0,31 \quad 2$$



6. Verandering van de vermenigvuldigingsfactor met de radiale afstand tot een verdichtingspunt.

7. Conusweerstand na versus conusweerstand vóór verdichten (bruggen 017 en 203).



$$\text{minimale } \frac{s}{S} = \frac{f - 1}{\tan \alpha_s} = \frac{4 - 1}{50} = 0,06 \quad 3$$

Uitgegaan werd van een veilige tussenwaarde van  $0,17$ , in gedachte houdend dat enerzijds een minimale conusweerstand verkregen moest worden, en dat anderzijds een waarde voor  $s = 31\%$  van  $S$  meer was dan wat op basis van ervaring, in zelfs los zand zou kunnen worden verwerkt [4]. De beïnvloede oppervlakte door een verdichtingspunt in een driehoekig patroon met gelijke zijden van  $1,50 \text{ m}$  is  $1,95 \text{ m}^2$  (fig. 5a). Rekening houdend met een factor  $1,25$  tussen het afgemeten bruto volume zand en het volume van het zand in verdichte toestand, verkrijgt men een hoeveelheid toe te voegen zand  $V1$  per  $\text{m}$  verdichting.

$$V1 = 1,25 \times 0,17 \times 1,95 = 414 \text{ l/m}$$

Aangezien het volume van de casing  $138,5 \text{ l/m}$  bedraagt, komt dit overeen met een bruto volume gelijk aan  $3 \times$  het volume van de casing.

Om het maximale groepseffect te verkrijgen, werden 14 verdichtingspunten uitgevoerd in een driehoekig patroon met gelijke zijden van  $1,50 \text{ m}$  en werd per punt een hoeveelheid zand, gelijk aan  $3 \times$  het volume van de casing toegevoegd.

Binnen de centraal gelegen ruitfiguur (fig. 5a) werden 3 controlesonderingen uitgevoerd (sonderingen 10...12). De resultaten van de controlesonderingen worden gepresenteerd in figuur 5b en samengevat in tabel 1 samen met resultaten van de sondering vóór verdichten en waarden van de vermenigvuldigingsfactor  $f$  tussen NAP  $-12 \text{ m}$  en  $-17 \text{ m}$ . Plaatselijk toonde de sondering piekwaarden van  $55 \text{ MN/m}^2$  maar ook teruggangen tot  $21 \text{ MN/m}^2$ . Gebaseerd op deze resultaten, en gebruik makende van formule 1, werd de waarde van  $\tan \alpha$  opnieuw berekend.

$$\tan \alpha = \frac{f - 1}{s/S} = \frac{9,5 \text{ tot } 6,8 - 1}{0,17} = 50 \text{ tot } 34$$

Men kan hieruit concluderen, dat de maximale waarde van 50 goed overeenkomt met de bovenste kromme, terwijl de minimale waarde boven de onderste kromme ligt.

### Gevolgde werkwijze

Gelet op de resultaten van de controlesonderingen en de tijd benodigd om de casing te heien en uit te trekken, werd overeengekomen het bruto volume toegevoegd zand te reduceren tot  $1,8 \times (s/S = 0,102)$  het volume

van de casing voor de verdichtingspunten binnenin en  $2 \times$  het volume van de casing ( $s/S = 0,114$ ) voor de punten aan de buitenkant. Op verschillende afstanden van een verdichtingspunt aan de buitenkant werd een aantal sonderingen uitgevoerd (onder andere sondering 013 in fig. 5a).

De radiale afstand werd met voldoende betrouwbaarheid gecorrigeerd met behulp van aflezingen van de hellingmeter in de sondeerconus.

Deze aflezingen werden noodzakelijk geacht en zijn nuttig gebleken in de loop van het werk vanwege het grote verloop van de sondeerstangen ten opzichte van het kleine driehoekige patroon met zijden van  $1,50 \text{ m}$  ( $0,50 \text{ m}$  verloop en soms afwijkingen van meer dan  $1 \text{ m}$ ).

Figuur 6 geeft een idee van het invloedsg gebied van een enkel verdichtingspunt waar de oorspronkelijke conusweerstand  $7,5 \text{ MN/m}^2$  was.

Figuur 6 geeft de vermenigvuldigingsfactor  $f$  als functie van de radiale afstand voor drie niveaus:

- het gemiddelde over de bovenste te verdichten  $5 \text{ m}$ ;
- het gemiddelde over de bovenste  $2 \text{ m}$  van deze laag;
- het gemiddelde over de  $3 \text{ m}$  boven de te verdichten laag, waar  $1,2$  tot  $1,4 \times$  het volume van de casing werd toegevoegd.

De lijn voor de bovenste  $2 \text{ m}$  is getekend, omdat bij de sondering, die het dichtst gelegen was bij het verdichtingspunt, het maximale meetbereik ( $q_c = 60 \text{ MN/m}^2$ ) werd overschreden en de conus niet verder gedrukt kon worden (de sondeerstangen knikten uit).

De figuur laat zien dat de diameter van het invloedsg gebied in de orde van grootte van  $7 \times$  de diameter van de casing ligt en van  $5 \times$  de diameter van de kolom verdicht, toegevoegd, zand.

Een andere sondering (punt 016, zie fig. 5a) werd uitgevoerd in het zwaartepunt van een driehoek, deel uitmakend van een serie van twee evenwijdige rijen ingesloten verdichtingspunten. De gemiddelde conusweerstand in deze sondering was toegenomen van  $11,6$  tot  $22,6 \text{ MN/m}^2$ , wat een vermenigvuldigingsfactor van  $1,95$  impliceert. De waarde voor  $\tan \alpha_s$  teruggerekend uit dit geval, bedraagt  $\frac{1,95 - 1}{0,114} = 8,30$ . Deze waarde is

$$\text{in figuur 4 aangegeven met een o.}$$

Tabel 1. Resultaten van de controlesonderingen.

| sondering | toestand         | $q_a$<br>gemiddelde conusweerstand tussen<br>NAP $-12 \text{ m}$ en $-17 \text{ m}$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | vermenigvuldigingsfactor $f$<br>[—] |
|-----------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 02        | vóór verdichting | 4.6                                                                                                         | (1)                                 |
| 010       | na verdichting   | 44                                                                                                          | 9.5                                 |
| 011       |                  | 31.5                                                                                                        | 6.8                                 |
| 012       |                  | 36.6                                                                                                        | 8                                   |

Deze laatste twee sonderingen toonden aan, dat, wanneer de verdichting uitgevoerd werd in grondcondities, representatief voor het gemiddelde, de onderlinge afstand tussen de verdichtingspunten vergroot kon worden en dat aldus het aantal verdichtingspunten kon worden gehandhaafd en bereikt. Voorwaarde is, dat het risico van plaatselijke lage conusweerstand in de te verdichten laag wordt geaccepteerd. Na analyse van de resultaten en een schatting van de gemiddelde oorspronkelijke grondcondities, werd besloten de oppervlakte per verdichtingspunt te vergroten van 1,95 m<sup>2</sup> naar 2,65 m<sup>2</sup>.

Het volume toegevoegd zand werd gehandhaafd op 1,8 en 2 x het volume van de casing voor respectievelijk de ingesloten punten en de punten aan de buitenkant. Deze nieuwe onderlinge afstand van 1,75 m werd uitgeprobeerd bij de tweede pijler van dezelfde brug (KW 017). Met een netto relatieve toevoeging van zand van ( $s/S = 0,075$ ) nam de gemiddelde conusweerstand toe van 9,6...12,5 tot 29,7...33,8 MN/m<sup>2</sup>, resulterend in een vermenigvuldigingsfactor van 2,7...3,0. De waarden van  $\tan \alpha$ , teruggerekend uit deze resultaten, zijn ca. 23...27. De punten, verkregen uit deze analyse, waarbij de waarde van  $s/S$  werd gevarieerd, vullen Wallays oorspronkelijke grafiek aan (fig. 4). Ze bevestigen de spreiding in de gemiddelde waarden van  $\tan \alpha$  voor dit type grond en tonen aan dat de minimum waarden, aangegeven in de grafiek ( $\tan \alpha_s$ ), werkelijk aan de veilige kant liggen.

Een mogelijke verklaring is dat de oorspronkelijke waarden gebaseerd zijn op een veelhoek van vier verdichtingspunten en niet op een volledig patroon.

Deze veronderstelling wordt gestaafd door het feit dat de laagste waarde voor  $\tan \alpha_s$  gemeten in Almere, verkregen werd bij een serie verdichtingspunten in twee evenwijdige rijen. Aangezien de meeste uitgevoerde conusproefresultaten geldig zijn voor één type grond, is het voornaamste doel van de analyse om in het volgende hoofdstuk de variatie van  $\tan \alpha$  met de oorspronkelijke conusweerstand te onderzoeken.

### Analyse van de resultaten

De verdichting werd op de volgende manier

beoordeeld. Voor elke te controleren zone werden de volgende parameters afgeleid uit de oorspronkelijke sondering:

$q^b$  de gemiddelde oorspronkelijke waarde voor de conusweerstand in MN/m<sup>2</sup>

$q_{\min}^b$  de minimale oorspronkelijke conusweerstand gemeten in het te verdichten pakket van 5 m in MN/m<sup>2</sup>

$q_{\max}^b$  de maximale oorspronkelijke conusweerstand gemeten in het te verdichten pakket van 5 m in MN/m<sup>2</sup>

$F.R._{\min}$  het wrijvingsgetal gemeten op het niveau van de beschouwde  $q_{\min}^b$

Voor de sonderingen, gemaakt na verdichten, definiëren we de corresponderende parameters:

$q^a$ ,  $q_{\min}^a$ ,  $q_{\max}^a$

Tabel 2 geeft een voorbeeld van de resultaten verkregen bij brug 203. Het is vervolgens mogelijk per vergelijking van een sondering ná met een sondering vóór verdichten 3 punten te plotten in de figuur die de relatie aangeeft tussen  $q^a$  en  $q^b$ :

- één geldend voor het gemiddelde, voorgesteld door het symbool 0;
- één geldend voor de maximale waarden, voorgesteld door het symbool +;
- één geldend voor de minimale waarde, voorgesteld door het symbool -.

Een voorbeeld van zo'n figuur is gegeven in figuur 7, afgeleid uit resultaten van sonderingen voor de bruggen nr. 203 en 017, waar verdichting plaatsvond in uniform zand, dat van plaats tot plaats dezelfde korrelverdeling had.

De netto toevoeging van zand was 7,5 % bij een onderlinge afstand tussen de verdichtingspunten van 1,75 m. Om een algemene trend af te leiden voor het te verdichten zand, worden de punten, geldend voor de minimale conusweerstand, waarvoor het wrijvingsgetal hoger dan 0,9 % was, weggelaten.

De invloed van deze variabele zal later geanalyseerd worden. De kromme in figuur 7 is daarom representatief voor de volgende condities:

( $s/S$ ) netto = 7,5 %

0,4 % < wrijvingsgetal < 0,9 %

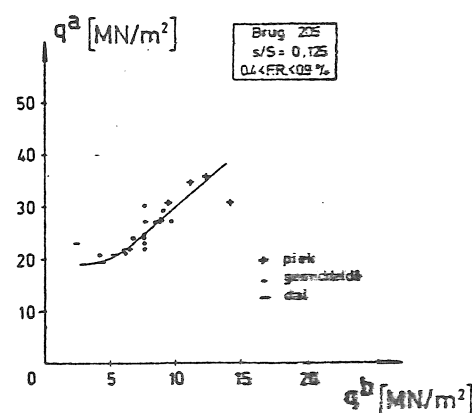
Met deze beperking kan men uit de spreiding van de punten waarnemen, dat de conusweerstand na verdichten toenemen met

de oorspronkelijke conusweerstand, maar dat de teruggangen in de conusweerstand na verdichten een neiging tot uitvlakken lijken te vertonen.

Dit lijkt erop te wijzen dat tijdens het verdichten een vermenging van slappere en stijvere zones plaatsvindt, alsof het toegevoegde zand zich bij voorkeur naar de slappere zones verplaatst.

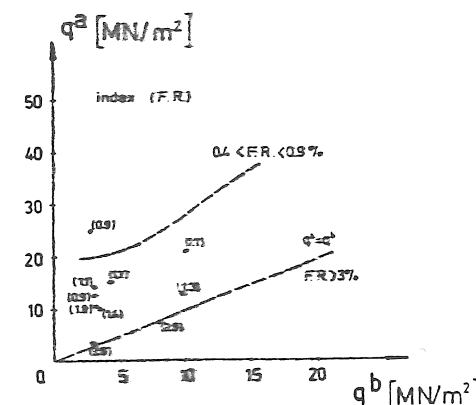
Ten gevolge van het bij brug 204 verschijnen van zones met slappere grond dan bij de brug, waarbij de algemene uitvoeringswijze vastgesteld werd, was het noodzakelijk bij de daarop volgende brug 205 te verdichten met een bruto volume toegevoegd zand gelijk aan 2,4 x het volume van de casing. Bij deze brug werd de afstand tussen de verdichtingspunten gehandhaafd op 1,75 m maar de netto relatieve toevoeging van zand werd verhoogd naar 12,5 %. In figuur 8 is het bewerkte resultaat van de sondering gepresenteerd. De figuur toont minder spreiding van de punten, hogere waarden voor de uiteindelijke conusweerstand en dezelfde tendens bij afnemende waarden van de oorspronkelijke conusweerstand. Bij vergelijking van de resultaten met die van andere bruggen, waar 7,5 % zand werd toegevoegd, kan men zien dat de verbetering niet evenredig is met het netto volume toegevoegd zand.

De benadering door een rechte lijn leidt echter voor een oorspronkelijke conusweer-



8. Conusweerstand na versus conusweerstand vóór verdichten (brug 205).

9. Invloed van het wrijvingsgetal op de verdichtingsresultaten.



Tabel 2. Samengevatte resultaten van de sonderingen voor brug 203.

| pijler<br>nr. | oorspronkelijke<br>sondering |                                 |                                     |                                     | sondering na verdichten |                                 |                                     |                                     |             |
|---------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
|               | nr.                          | $q_a^b$<br>(MN/m <sup>2</sup> ) | $q_{max}^b$<br>(MN/m <sup>2</sup> ) | $q_{min}^b$<br>(MN/m <sup>2</sup> ) | nr.                     | $q_a^a$<br>(MN/m <sup>2</sup> ) | $q_{max}^a$<br>(MN/m <sup>2</sup> ) | $q_{min}^a$<br>(MN/m <sup>2</sup> ) | F.R.<br>(%) |
| 1             | 404                          | 12,5                            | 17,8                                | 7,6                                 | 708                     | 30,2                            | 37                                  | 24,2                                | 0,6         |
|               | 343                          | 11,9                            | 14,6                                | 2,8                                 | 709                     | 31,5                            | 47                                  | 28,4                                | 3,6         |
|               |                              |                                 |                                     | 9,7                                 |                         |                                 |                                     | 12,8                                | 1,3         |
| 2             | 405                          | 14,3                            | 17,2                                | 10,8                                | 710                     | 33,2                            | 40                                  | 24,7                                | 0,75        |
| 3             | 345                          | 7,1                             | 16                                  | 3,2                                 | 711                     | 35,2                            | 39                                  | 30                                  | 0,55        |
| 4             | 346                          | 14,5                            | 17,8                                | 7,8                                 | 712                     | 30                              | 32                                  | 7,3                                 | 2,9         |



stand van  $10 \text{ MN/m}^2$  tot waarden van  $\tan \alpha_m = 20$  en  $\tan \alpha_s = 12$ .

Deze punten, die representatief zijn voor het gehele werkterrein, passen redelijk goed bij de krommen van figuur 4, gecorrigeerd voor een oorspronkelijke conusweerstand van meer dan  $5 \text{ MN/m}^2$ .

### Invloed van het wrijvingsgetal

Om gegevens te verzamelen, die alleen gelden voor het te verdichten zand, moesten sommige waarden van de conusweerstand weggelaten worden, omdat hun lage waarde gekoppeld was aan een hoog wrijvingsgetal.

Om dat punt nader uit te werken, zijn alle lage waarden van de conusweerstand na verdichten, waarvoor tevens het wrijvingsgetal groter of gelijk was dan  $0,9\%$  verzameld en geplot in figuur 9 als functie van hun corresponderende oorspronkelijke lage conusweerstand.

Elk punt is geïndexeerd met het wrijvingsgetal. De kromme, afgeleid uit de analyse van

de punten, waarvoor het wrijvingsgetal was gelegen tussen  $0,4$  en  $0,9\%$  en de lijn waarvoor geldt  $q^b = q^s$  zijn getekend.

Deze grafiek toont de gevoeligheid van de verdichtingsresultaten voor het wrijvingsgetal, die als volgt kan worden geschematiseerd.

Boven de bovenste lijn liggen punten, waarvoor het wrijvingsgetal lager is dan  $1\%$ ; aan de eis  $q_c \geq 18 \text{ MN/m}^2$  wordt voldaan. De punten waarvoor het wrijvingsgetal ongeveer  $3\%$  bedraagt liggen erg dicht bij de onderste lijn.

Het gebied tussen de twee lijnen is een overgangzone voor wrijvingsgetallen variërend van  $1$  tot  $3\%$ .

Het trekken van lijnen voor gelijke wrijvingsgetallen is te gedurfd, aangezien het aantal punten beperkt is en in het werk geen wrijvingsgetallen tussen  $1,8$  en  $2,9\%$  gemeten zijn. De verwachting is echter dat het wrijvingsgetal in dit geval kan worden gebruikt als indicatie voor de mogelijkheid de grond te verdichten.

Andere proeven zijn vereist om het belang van deze parameter te bevestigen en te kwantificeren. Het wrijvingsgetal is fundamenteel een functie van grondeigenschappen, die bepalend zijn voor verdichting namelijk de hoeveelheid fijne deeltjes, de cohesie en de doorlatendheid.

### Conclusies

Het Flevolijn-project in Almere was geschikt voor verdichting volgens de techniek met de ingeheidde buis. De oorspronkelijke uitvoeringsmethode moest worden aangepast aan de plaatselijke omstandigheden en aan de verfijningen van de specificaties aangebracht naar mate de ontwerper meer vertrouwen kreeg in de betrouwbaarheid van de verdichtingsmethode.

Er zijn goede ervaringen opgedaan door de opdrachtgever, de adviseur en de aannemer, door een positieve houding ten opzichte van de omschrijving van de uitvoeringsparameters en goede samenwerking bij het verkrijgen van controlegegevens in een zo vroeg mogelijk stadium.

De grote hoeveelheid gegevens verzameld op dit werk draagt bewijsmateriaal aan of bevestigt de volgende feiten:

- korrelverdelingsdiagrammen zijn vereist om de geschiktheid van de grond voor verdichting vast te stellen: er moet verwezen worden naar gepubliceerde grenzen, die de geschiktheid voor diepteverdichting aangeven, rekening houdende met de uitvoeringsmethode;
- aanvullende aanwijzingen voor dit gegeven kunnen verkregen worden uit het wrijvingsgetal; in het geval Almere, waar het wrijvingsgetal, verkregen met de elektrische conus, in het algemeen lager dan  $1\%$  was, waren de resultaten uitstekend. De lagen waarvoor het wrijvingsgetal ongeveer  $3\%$  was, gaven veel slechtere resultaten in Almere;
- bij het bepalen van de definitieve uitvoeringsmethode op basis van sonderingen, of

voor controledoeleinden, is het zinvol de plaats van de conus te weten binnen het verdichtingspatroon (bijvoorbeeld door hellingmetingen);

- de gemiddelde conusweerstand over de verdichte laag nam toe met de oorspronkelijke gemiddelde conusweerstand en met de netto relatieve zandtoevoeging. Dit was ook het geval voor plaatselijke piekwaarden of te ruggangen in de conusweerstand;

- de verdichtingsmethode met ingeheidde buis behandelt plaatselijke zones met lossere pakking naar verhouding beter dan zones met een oorspronkelijk dichtere pakking. De eindresultaten tonen voor het werk een consistente waarde van circa  $18 \text{ MN/m}^2$ ;

- dit feit is gekwantificeerd voor een bepaalde grond in figuur 10, waarin de waarde van  $\tan \alpha_m$  of indirect  $f'$  (vergelijking 1) gegeven is als functie van de oorspronkelijke gemiddelde conusweerstand.

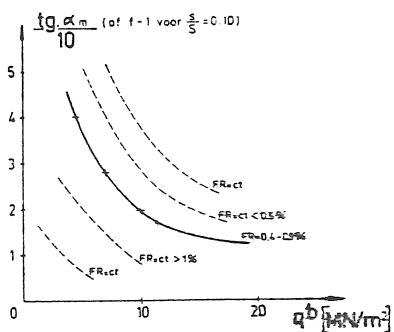
Men kan zich voorstellen dat andere soorten grond ook zouden kunnen worden gepresenteerd in dit diagram, waarin elke stippellijn correspondeert met een bepaald wrijvingsgetal of een bepaalde korrelverdelingsindex. Anderzijds kan Wallays grafiek aangevuld worden met een serie krommen corresponderend met verschillende oorspronkelijke conusweerstand (figuur 11).

In de toekomst is meer inspanning vereist om het beeld te completeren.

Door dit werk, is ervaring verkregen door alle betrokkenen in een gebied waar voorspellingsmethoden nog in ontwikkeling zijn.

### Literatuur

- [1] Broekman C.J.: 'Grondverbetering op grotere diepte, ontwerp en uitvoeringsaspecten van verdichtingspalen', PT/Civiele Techniek nr. 3, 1984.
- [2] Mitchell J.K.: 'Soil improvement - State-of-the-art Report', Session 12 of Xth I.C.S.M.F.E., vol. 4, pp. 509-565, Stockholm, 1981.
- [3] Meyvogel J.J.: 'Grondmechanisch onderzoek', PT/Civiele Techniek nr. 3, 1984.
- [4] Wallays M.: 'Deep Compaction by Casing Driving', Symposium on Soil Rock Improvement Techniques, Bangkok 29th November - 3rd December 1982.



10. Helling, bepalend voor de vermenigvuldigingsfactor versus de oorspronkelijke conusweerstand voor verschillende wrijvingsgetallen.

11. Helling, bepalend voor de vermenigvuldigingsfactor versus de korrelverdelingsindex voor verschillende oorspronkelijke conusweerstand.

