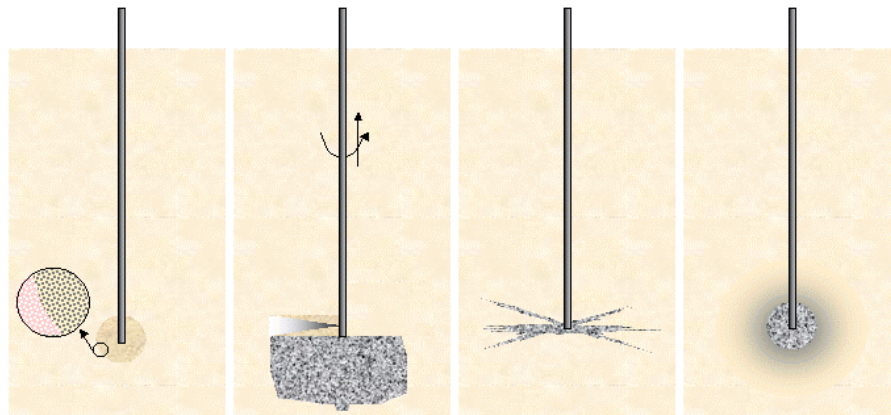


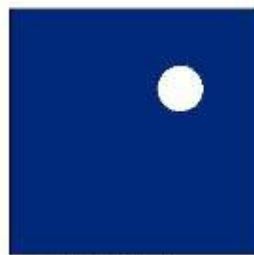
# Grouting bij funderingen

COBc/CUR dag 2 november 2006 Amsterdam



*Prof.dr.ir.ing. A.E.C. (Almer) van der Stoel,*

*sr. Geotechnisch Adviseur / directeur CRUX Engineering B  
&  
hoogleraar Civiele Techniek NLDA - KMA*



**CRUX**

Asterweg 20 L1  
1031 HN Amsterdam  
Telefoon: 020 – 494 30 70  
Fax: 020 – 494 30 71  
E-mail: info@cruxbv.nl  
Site: www.cruxbv.nl

## Inhoudsopgave

Inhoudsopgave .....	2
Grondverbetering en inkadering grouting .....	3
Inleiding .....	3
Grondverbeteringstechnieken .....	4
Injectietechnieken (grouting) .....	7
Inleiding.....	7
Bodeminjectie (permeation grouting).....	8
Jet grouten (jet grouting, VHP, HDI).....	8
Compenserend grouten (compensation grouting).....	8
Mechanische Grondmenging (soil mixing) .....	9
Inleiding.....	9
Techniek .....	9
Droge of natte methode .....	10
Vriestechnieken .....	11
Inleiding.....	11
Vriezen met behulp van pekkel / gesloten vriessysteem .....	11
Vriezen met behulp van vloeibare stikstof / open vriessysteem.....	11
Mogelijke toepassingen.....	12
Compensation grouting .....	13
Inleiding.....	13
Vooronderzoek .....	13
Plan van aanpak .....	13
Equipement.....	14
Richtlijnen voor het aanbrengen van een injectienetwerk .....	14
Het monitoren, beheersen en controleren van het injectieproces .....	14
Fracturing .....	15
Inleiding.....	15
Techniek .....	16
Uitvoering.....	16
Compaction grouting .....	17
Inleiding.....	17
Techniek .....	17
Uitvoering.....	17
Toepassingsgebied.....	18
Equipement.....	19
Conclusies .....	19
Literatuur .....	20

# Grondverbetering en inkadering grouting

## Inleiding

In zowel de Nederlandse als de internationale bouwpraktijk bestaat een steeds grotere behoefte om relatief ongunstige grondeigenschappen te verbeteren of zettingen ten gevolge van bouwactiviteiten te voorkomen of compenseren. Bij ondergrondse bouwprojecten en projecten waarbij funderingstechnieken een belangrijke rol spelen is hierbij de laatste jaren een toename van het gebruik van grondverbeteringstechnieken zoals grondbevriezing en de zogenaamde injectietechnieken (grouting) waar te nemen. Dit heeft er mede toe geleid dat veel informatie over het ontwerp en uitvoering van deze grondverbeteringstechnieken is verschenen.

In dit onderdeel wordt allereerst een overzicht gegeven van bestaande grondverbeteringstechnieken. Op zich is dit al een uitdaging, omdat het vaak onduidelijk is welke technieken wel en welke niet onder deze typering vallen. Een voor de hand liggende definitie voor grondverbeteringstechnieken is: "die technieken die de eigenschappen van de grond verbeteren". Zoals verderop zal worden uiteengezet blijkt de aard van deze technieken echter dusdanig te verschillen, dat groepering in een aantal subcategorieën mogelijk en noodzakelijk is.

De volgende ontwerpaspecten worden belicht:

- toepassingsmogelijkheden (in relatie tot de te behandelen grond);
- uitvoeringsaspecten (mogelijke wijzen van aanbrengen);
- sterkte- en stijfheideigenschappen;
- doorlatendheideigenschappen;

Daarnaast zal een aantal Nederlandse en internationale projecten worden behandeld om een duidelijk beeld te scheppen van hoe grondverbeteringsmethoden kunnen worden gebruikt om bijvoorbeeld:

- de risico's / schade ten gevolge van ondergrondse bouwprojecten te beperken;
- sterkte-, stijfheid- en doorlatendheid eigenschappen te beïnvloeden;
- nieuwe funderingen te maken;
- funderingsherstel te plegen.

Als afsluiting zal een overzicht van nieuwe ontwikkelingen op het gebied van grondverbeteringstechnieken en de gevolgen hiervan voor de inzetbaarheid worden gegeven.

## Grondverbeteringstechnieken

Onder grondverbeteringstechnieken kunnen in de ruimste zin van het woord al die technieken worden verstaan die de eigenschappen van de grond verbeteren. In deze paragraaf wordt getracht een zo volledig mogelijk beeld te geven van de beschikbare technieken. Hierbij wordt allereerst een onderscheid gemaakt tussen de onderstaande categorieën grondverbeteringstechnieken.

1. technieken ter versnelling van de consolidatie van de grond
2. gewapende grondtechnieken
3. injectietechnieken (grouting)
4. mechanische grondmenging (soil mixing)
5. grondbevriezingstechnieken

Binnen deze categorieën kan weer een onderscheid worden gemaakt tussen verschillende subcategorieën:

- 1. technieken ter vermindering / voorkomen van zetting**
  - a. verticale drainage
  - b. zand- of grindpalen
  - c. geotextiel ommantelde zandkolommen
  - d. onderheide zettingsvrije plaat
  - e. onderdruk consolidatie
  - f. oppervlakteverdichting
  - g. diepteverdichting
- 2. gewapende grondtechnieken**
  - a. grondvernageling
    - i. al dan niet gegroute stalen ankers
    - ii. al dan niet gegroute polymere ankers
  - b. wapening
    - i. geogrids (kunststof)
    - ii. draadgaas roosters (staal)
    - iii. strippen / vezels (kunststof / staal)
- 3. injectietechnieken (grouting)**
  - a. bodeminjectie (permeation grouting)
  - b. jet grouten (jet grouting, VHP, HDI)
  - c. compenserend grouten
    - i. grondscheurend grouten (fracturing)
    - ii. grondverdringend grouten (compaction grouting)
- 4. mechanische grondmenging (soil mixing)**
  - a. droog mechanisch mengen
  - b. nat mechanisch mengen
- 5. vriestechnieken**
  - a. pekels / gesloten vriessysteem
  - b. stikstof / open vriessysteem

In Figuur 1 is een overzicht van bovenstaande technieken opgenomen.

In deze cursus wordt met name gefocust op de injectietechnieken (3) en de vriestechnieken (5). Omdat afgeweken is van de oorspronkelijke gedachte de cursus te integreren met een cursus *No – Recess* technieken, waarin de technieken ter vermindering / voorkomen van zetting (1) en grondmenging (4) aan de orde komen, worden deze technieken in deze inleiding wat uitvoeriger behandeld. Op de injectietechnieken en de vriestechnieken wordt door de docenten ruimschoots in detail ingegaan.

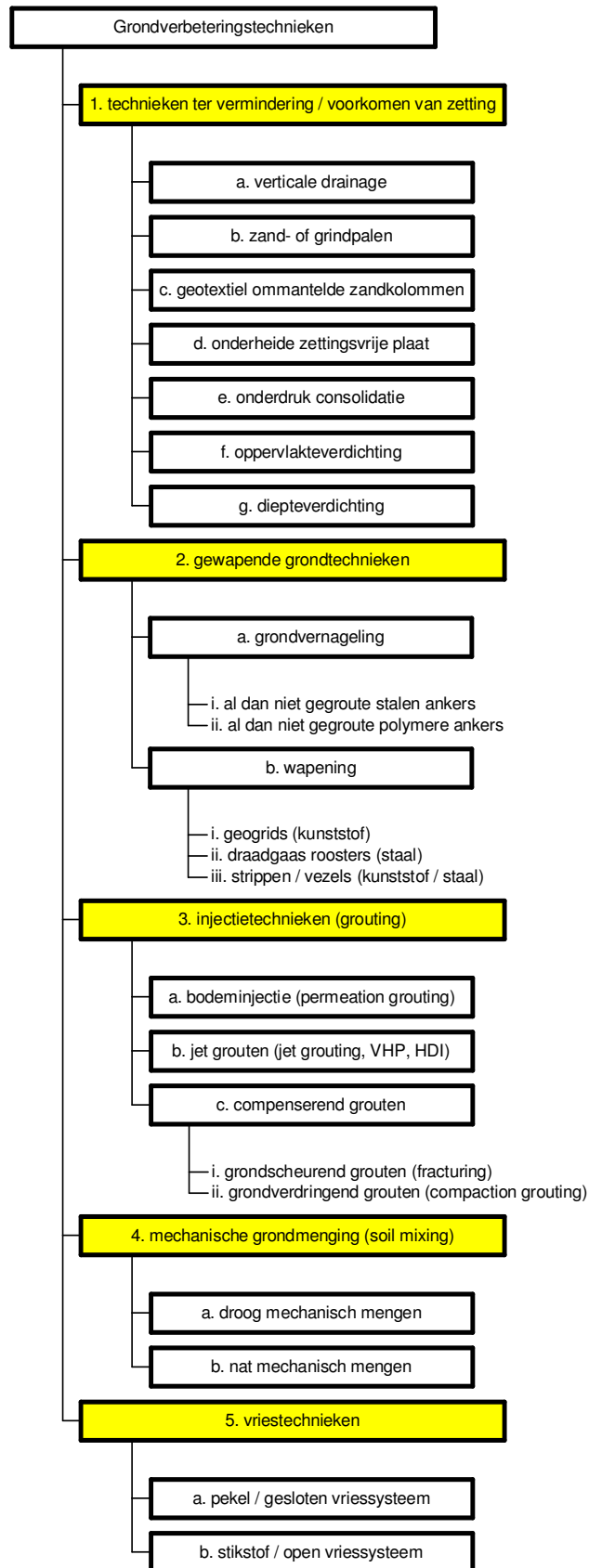
Voor het onderdeel gewapende grondtechnieken (2) bestaat reeds een PAO cursus, vandaar dat hierop in deze cursus niet in detail wordt ingegaan.

Tot slot wordt nog opgemerkt dat soms ook een keuze in andere categorieën voor grondverbeteringstechnieken wordt aangegeven. Een onderscheid valt bijvoorbeeld te maken naar:

- consolidatiemethoden en stabilisatiemethoden;
- methoden met tijdelijke of definitieve modificatie van de grond;
- methoden waarbij de korrelstructuur van de grond al dan niet intact blijft.

Bovendien bestaat bij sommige methoden een zekere overlap. Zo kunnen in de gekozen onderverdeling bijvoorbeeld compaction grouting en mechanische grondmenging ook als zettingsreductie worden beschouwd.

Strikt genomen is het ook nog de vraag op fracturing een grondverbeteringstechniek is, omdat het hoofddoel niet het verbeteren van de grond is, maar het compenseren van verplaatsingen. Hier is gekozen om deze methode wel als grondverbeteringstechnieken te beschouwen.



**Figuur 1** Overzicht grondverbeteringstechnieken

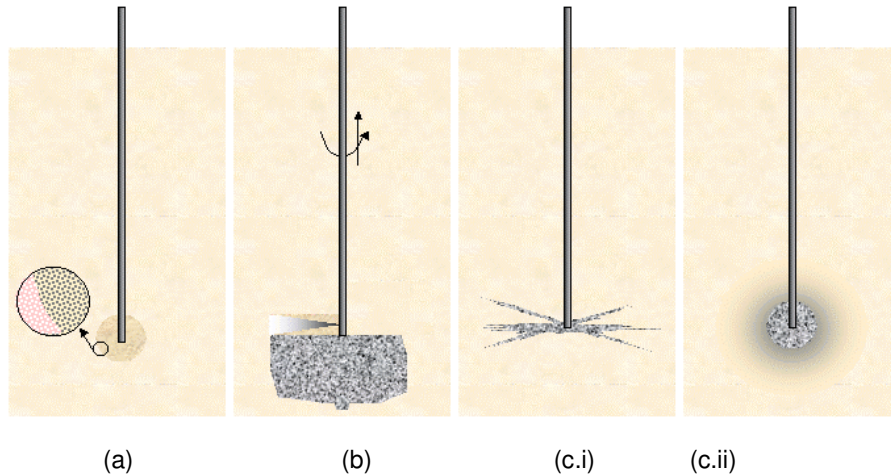
## Injectietechnieken (grouting)

### Inleiding

Opvallend is de accentverschuiving die de laatste jaren heeft plaatsgevonden, van injectietechnieken 'als lapmiddel' naar injectietechnieken als 'ontwerpgereedschap'. Door de voortdurende ontwikkelingen, geïnitieerd door zowel geotechnici als chemici, krijgt men steeds meer grip op het injectieproces, zodat de grens tussen predicties en resultaat steeds kleiner wordt en de inzetbaarheid wordt vergroot. Logisch gevolg daarvan is dat ontwerpers, die steeds meer geconfronteerd worden met ongunstige bodemomstandigheden, ruimtegebrek, het 'verbod' op sloop en de wens overlast te beperken in stedelijke gebieden, bodeminjecties in hun ontwerp integreren.

Wanneer de injectiemethoden nader worden beschouwd kan de volgende indeling gemaakt worden (zie ook Figuur 2):

- a. bodeminjectie (permeation grouting)
- b. jet grouten (jet grouting, VHP, HDI)
- c. compenserend grouten
  - i. grondscheurend grouten (fracturing)
  - ii. grondverdringend grouten (compaction grouting)



**Figuur 2 (a) bodeminjectie (b) Jet Grouten (c.i) Fracturing (c.ii) Compaction Grouting**

Primair valt een onderscheid naar functie te maken in **stabiliserende injecties** (sterkte en stabiliteit verhogend), **afdichtende injecties** (waterdoorlatendheid verlagend) en **compenserende injecties** (verdichtend of verplaatsend).

De reden dat in Nederland vaak verwarring omtrent de injectietechnieken bestaat, ligt in het feit dat de technieken veelal hun oorsprong in het buitenland hebben en op bodeminjectie na slechts in geringe mate in Nederland zijn toegepast. In Angelsaksische landen spreekt men in plaats van over injectie over *grouting*. Omdat in geval van permeation grouting in de Nederlandse terminologie zowel van de begrippen grout injectie als chemische injectie gebruik wordt gemaakt, is hier voor de term *injectie* gekozen. Het gebruik van *grouten* leidt over het algemeen tot te veel verwarring, omdat men bijvoorbeeld over het injecteren van grout spreekt, wanneer men eigenlijk bodeminjectie met chemische producten bedoelt, of omgekeerd.

In de navolgende paragrafen wordt kort op het karakter en de principiële verschillen van de injectietechnieken ingegaan. De docenten Huiden (bodeminjectie), Maertens en de Vleeschauer (jet grouten), Van der Stoel (compenserend grouten) en Admiraal (praktijkgeval) zullen meer in detail ingaan op de verschillende technieken.

### Bodeminjectie (permeation grouting)

In het Nederlands kan Permeation Grouting letterlijk worden vertaald als “doorlatend grouten”. De essentie van deze techniek berust dan ook op het feit dat de poriën in de grond worden gevuld met een injectievloeistof, terwijl de korrelstructuur intact wordt gelaten. Wanneer de grond een grove structuur heeft (grind) gaat dit makkelijker dan bij fijnmazige grondsoorten (fijn zand).

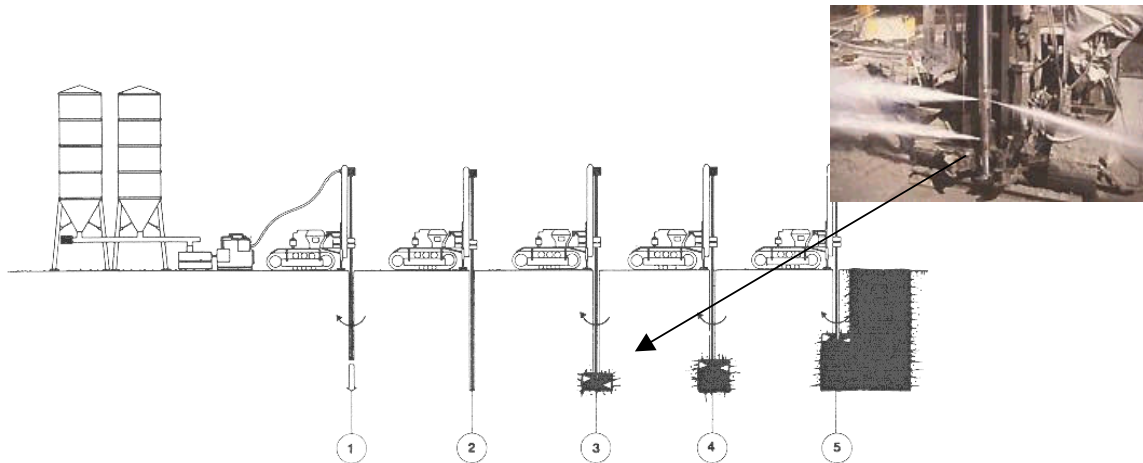
Permeation Grouting is de oudste van de injectietechnieken. De eerste toepassingen dateren reeds van 1802. In eerste instantie werd alleen gebruik gemaakt van injectievloeistoffen op basis van cement, zogenaamde grouts. Later, toen steeds meer de behoefte bestond om fijnmazige grondsoorten te behandelen, is eerst een accentverschuiving opgetreden naar klei/bentonietsuspensies en later naar chemische injectievloeistoffen. De reden voor het afnemen van de bruikbaarheid van grout in fijnere grondsoorten ligt in het feit dat het in een fijnmazige grondstructuur veel moeilijker is voor de relatief grove cementdeeltjes om het poriënsysteem van de grond binnen te dringen.

### Jet grouten (jet grouting, VHP, HDI)

Jet Grouting, in de ons omringende landen ook wel bekend als *Very High Pressure grouting (VHP)* of *Hohe Druck Injektion (DHI)*, is voor het eerst toegepast in Pakistan (circa 1950) en vervolgens in de zeventiger jaren ontwikkeld in Japan. Vervolgens is het geïntroduceerd in Europa en vooral in Italië geperfectioneerd. Het toepassingsgebied heeft zich door deze verbeteringen zover verbreed, dat bijna alle grondtypen kunnen worden behandeld.

Het principe van de techniek berust op onder hoge druk losspuiten van de grond en het mengen van deze grond met een mengsel van water en cement. De grond wordt hierbij deels vervangen, waarbij het effluent, de zogenaamde *spoil*, door de overdruk aan de onderzijde langs de injectielans naar het maaiveld wordt gestuwd, alwaar het wordt weggepompt. De werking is duidelijk eroderend, zodat de korrelstructuur in tegenstelling tot bij de bodeminjectie dus niet intact blijft.

Voor wat betreft de aanbrenghetechieken kan grofweg een onderscheid worden gemaakt tussen drie verschillende methoden. Deze methoden zijn allen gebaseerd op het principe van het inbrengen van een spuitlans in de grond met behulp van een boormachine. Vervolgens wordt grout (*1-fase*), grout in combinatie met water of lucht (*2-fase*) of grout in combinatie met water én lucht (*3-fase*) onder hoge druk in de grond gespoten.



**Figuur 3 Jet grout proces (inzet: water snijstralen)**

### Compenserend grouten (compensation grouting)

Het grondscheurend grouten, of *fracturing* is ontwikkeld in Frankrijk en is zowel daar als in het Verenigd Koninkrijk veelvuldig toegepast. Onwillekeurig is bij toepassing van bodeminjectie ook scheurvorming effecten opgetreden wanneer de injectiedebieten en/of -drukken te hoog waren. Fracturing, ook wel bekend als *hydrofracture grouting* is een techniek die tot doel heeft een breukvlak in de grond te creëren door het aanbrengen van een zeer vloeibare injectievloeistof (meestal water cement in 1:1 verhouding) onder zeer hoge druk. Het principiële verschil met bodeminjectie ligt in het



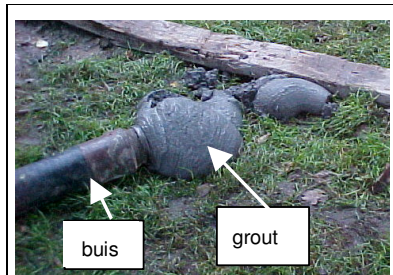
feit dat het doel niet het infiltreren van het korrelskelet, maar het verdringen (of "opkrikken") van de grond is. Wanneer de initiële horizontale korrelspanningen groter zijn dan de verticale, dan vormt de injectievloeistof overwegend horizontale lenzen in de grond; wanneer het omgekeerde het geval is scheurt de grond overwegend verticaal.

Deze techniek van het "scheuren van de grond" kan nuttig worden toegepast wanneer zettingen moeten worden gecompenseerd.

Het grondverdringend grouten of *compaction grouting* is een techniek die van oorsprong uit de Verenigde Staten komt. Buiten de VS wordt de methode (nog) niet veel gebruikt, wat deels te wijten is aan de onbekendheid met de methode en deels aan de (verkeerde) gedachte dat compaction grouting oncontroleerbaar zou zijn.

Compaction Grouting is een term die wordt gebruikt voor die injectiemethoden, waarbij de grond wordt *verdicht* middels verdringing van de grond rond het injectiepunt door grout (water, cement en zand, zie Figuur 4). De grond wordt hierbij verdicht en opgespannen. De redenen voor toepassing kunnen zijn het ongedaan maken van zettingen die zijn ontstaan door consolidatie of het compenseren van ontspanning veroorzaakt door bijvoorbeeld ontgraving of het boren van een tunnel.

De grout moet een dusdanige viscositeit en korrelverdeling bezitten dat de poriën in de grond niet worden gevuld en de injectiedrukken moeten dermate laag worden gehouden dat de grond niet kan scheuren. Hiermee is gelijk het essentiële verschil met bodeminjectie aangegeven, waar het doel juist indringing in de poriën en vervolgens 'verstening' van de grond is en met fracturing, waar juist het breken en heffen van het grondmassief als geheel het doel vormt.



**Figuur 4 Compaction Grout**

## Mechanische Grondmenging (soil mixing)

### Inleiding

Mechanische menging van grond, in het engels *Mechanical Mix in Place (MIP)* of kortweg *Soil Mixing* wordt vaak soms wel en soms niet als een injectietechniek beschouwd. Hoewel deze grondverbeteringstechniek namelijk wel een injectievloeistof (veelal grout) in de grond brengt, berust het principe meer op het mengen van de grond dan op het injecteren. Het product van de techniek wordt veel aangeduid als een *gestabiliseerde grondkolom*.

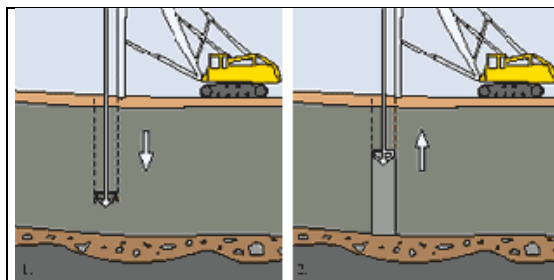
De eigenschappen van een middels grondmenging behandeld grondmassief grote overeenkomsten met de eigenschappen van een middels de injectiemethoden behandeld grondmassief, namelijk verbetering van doorlatendheid- en sterkte-eigenschappen.

Voor deze paragraaf zijn, naast het gebruik van diverse artikelen in congresverslagen, als voornaamste bronnen gebruikt: het *Handboek Ondergronds Bouwen*, *CUR Rapport 199* en productbladen en de website van *Hercules* (Zweden).

### Techniek

Bij het maken van gestabiliseerde grondkolommen wordt een bindmiddel (vaak kalk of cement) opgemengd met de grond. Het bindmiddel kan worden ingebracht middels een groot aantal verschillende methoden, die echter allen op hetzelfde principe berusten, namelijk het in de grond boren van een of meerdere mengschoepen (avegaar), waarbij tijdens in- en/of uitdraaien door de holle binnenbuis het bindmiddel wordt 'geïnjecteerd' (zie Figuur 5).

De verschillende methoden hebben geleid tot vele verschillende benamingen, afhankelijk van de toevoegingen: zoals Limix, kalkkolommen, kalk-cementkolommen, CSV of van de methode: Soil



**Figuur 5 Mechanische grondmenging**

Mixed Wall (SMW), Deep Soil Mixing (DSM), Shallow Soil Mixing (SSM), enkele, dubbele, driedubbele schoep of avegaar.

De veelal toegepaste avegaar heeft een relatief grote diameter van 0,5 à 1,0 meter en het is gebruikelijk dat een boorstelling meerdere avegaars bedient. Door de avegaars naast elkaar te plaatsen en een zekere overlap toe te passen kan de methode bijvoorbeeld worden gebruikt om wanden te creëren.

Een gestabiliseerde grondkolom kan, afhankelijk van de lokale grondgesteldheid, wat betreft doorlatendheid- en sterkte-eigenschappen concurreren met een kolom gevormd middels bodeminjectie of jet grouten. De techniek is geluidsarm en trillingsvrij.

Bij de constructie van gestabiliseerde grondkolommen wordt onderscheid gemaakt tussen de droge en de natte methode.

### *Droge of natte methode*

Bij de droge methode wordt het bindmiddel zonder water in de grond gemengd. Bij de natte methode is het bindmiddel van te voren gemengd met water. Naast de keuze voor droge of natte methode spelen druk-, trek- en draaisnelheid van de avegaar of schoep spelen een belangrijke rol in het resultaat. De keuze voor methode en uitvoeringsparameters hangen nauw samen met de grondgesteldheid. Zo zal zand logischerwijs makkelijker te mengen zijn dan veen- of kleigrond. Hiernaast spelen bij de constructie van gestabiliseerde grondkolommen de chemische processen (tussen grond en bindmiddel) een relatief belangrijke rol.

De gestabiliseerde grondkolommen techniek is met name ontwikkeld in Scandinavië en Japan.

In Scandinavische landen wordt voornamelijk de droge methode gebruikt, waarbij eerst alleen kalk (zogenaamde *Lime Columns*) en later tevens cement (zogenaamde *Lime/Cement Columns*) wordt toegevoegd middels een luchtdruk gestuurd doseringssysteem. Het gebruikte materieel is relatief licht. De voorraadcontainer kan los worden opgesteld (zie Figuur 6 *links*) of achter op de stelling (zie Figuur 6 *rechts*) worden geplaatst.



**Figuur 6 Stelling met losse voorraadcontainers (links) of geïntegreerde voorraadcontainers (rechts)**

De boormotor is gemaakt om veel omwentelingen te maken (100-200/min) en niet voor het leveren van een groot draaimoment. Hierdoor kunnen dieptes tot circa 15 meter en diameters tot circa 0,80m worden gerealiseerd. Het doorboren van dichtgepakte zandlagen wordt hierdoor lastig; dit kan echter worden opgelost door voor te boren. Tijdens het inboren tilt de schoep de grond iets op, tijdens het uitdraaien (in tegengestelde richting) drukt de schoep de grond weer aan.

In Japan wordt veelal de natte methode gebruikt en veelal alleen van kalk gebruik gemaakt. De apparatuur is relatief zwaar en veelal uitgevoerd met een avegaar of (al dan niet meervoudige) schoepen, die ook nog eens 2- of 3-voudig geschakeld kunnen staan. Hierdoor is een betere verticale menging te realiseren en kan door hardere lagen worden geboord.

Op de chemische processen die in de grond optreden wordt hier niet uitgebreid ingegaan. Volstaan wordt met aan te geven dat de stabiliserende werking berust op verdroging van de grond door de

hydraulische binding of verdamping, door de chemische en fysische reactie met kleimineralen en door puzzolane reacties tussen gebluste kalk en grond.

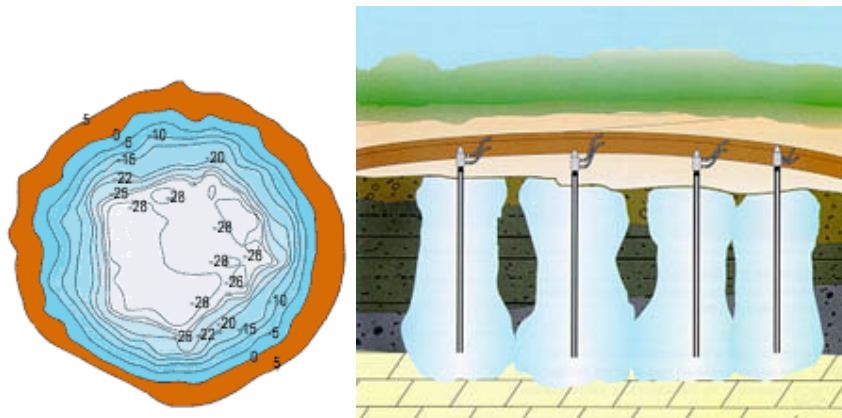
Om een afdoende reactie van de grond te verkrijgen is het noodzakelijk dat deze, bij de toevoeging van 100% kalk, voldoende klei bevat (>20% klei of >35% klei+silt). Wanneer organische klei of veen dient te worden behandeld, dient tevens cement te worden toegevoegd (cement : kalk verhouding 3:1).

Het toevoegen van extra cement resulteert in betere sterkte en stijfheidseigenschappen. De toevoeging van overige hulpstoffen is niet ongebruikelijk. Gebruikelijk is 5% tot 15% kalk (+cement) toe te voegen.

## Vriestechnieken

### Inleiding

Het bevroren van grond (of meer 'correct' van grondwater!) wordt veelal toegepast om problemen ten aanzien van (grond)water tijdens de bouw op te lossen. De techniek is ontstaan in de mijnbouw aan het eind van de 19<sup>e</sup> eeuw. Omdat grondbevrozing kostentechnisch gezien geen permanente oplossing vormt, wordt de techniek alleen toegepast voor het creëren van een tijdelijke stabilisatie of waterremming. Onderscheid kan worden gemaakt tussen het bevroren middels pekkel (relatief goedkoop en traag, vaak bij langere projectduur) en het bevroren middels stikstof (relatief duur en snel, vaak bij kortere projectduur). In Figuur 1 is het principe weergegeven.



Figuur 7 Grond bevroren

### Vriezen met behulp van pekkel / gesloten vriessysteem

Bij het 'pekkelvriezen' wordt gebruik gemaakt van vriesgassen die in een primair circuit in de vloeibare fase worden gebracht. In het secundaire circuit wordt een pekkeloplossing door deze vloeibare gassen afgekoeld. Tijdens deze afkoeling gaan de primaire vloeibare 'vriesgassen' weer over naar de gasfase. De pekkeloplossing die tot circa  $-40^{\circ}\text{C}$  kan afkoelen zorgt in het secundaire circuit voor het bevroren van de grond. Dit *gesloten vriessysteem* is relatief langzaam (duur van circa een maand eer de grond bevroren is) en goedkoper dan het hierna genoemde 'stikstof vriezen'.

### Vriezen met behulp van vloeibare stikstof / open vriessysteem

Grondbevrozing middels vloeibare stikstof is in Nederland voor het eerst toegepast bij de bouw van de Metro Oostlijn in Amsterdam. De stikstof wordt aangevoerd middels tankwagens en met behulp van een *open vriessysteem* wordt de grond bevroren. Het open vriessysteem bestaat uit veelal in serie geschakelde leidingen waarin de stikstof kan verdampen. Het systeem is snel en relatief kostbaar en wordt daarom alleen gebruikt bij kleinere projecten en calamiteiten.

## Mogelijke toepassingen

Hieronder is een overzicht opgenomen van mogelijke toepassingen van de verschillende grondverbeteringstechnieken in de categorieën (3) t/m (5), waarbij telkens is aangegeven in hoeverre de methode geschikt is in een bepaalde situatie. Hierbij staat (++) voor zeer geschikt tot (--) voor zeer ongeschikt.

**Tabel 1 Mogelijke toepassingen voor grondverbeteringstechnieken**

Toepassing	Bodeminjectie	Jet Grouten	Compaction Grouting	Fracturing	Mechanisch mixen	Bevriezen
<i>waterdichte horizontale lagen, zowel herstellen als creëren</i>	++	+	--	--	-/+	++ (tijdelijk)
<i>ondoorlatende wanden ten bate van IBC (isoleren, beheersen, controleren) bodemvervuiling</i>	++	++	--	--	-/+	--
<i>constructieve wand</i>	-/+	++	--	--	-	++ (tijdelijk)
<i>bouwputwanden / tijdelijke grondkering</i>	-	++	--	--	-/+	++ (tijdelijk)
<i>ondergronds stempel bouwput</i>	++	++	-	--	--	+/-
<i>verdiepen kelders</i>	++	++	--	--	-	++ (tijdelijk)
<i>draagkracht verbetering fundering</i>	+	-	++	-	--	--
<i>paalfundering (achteraf)</i>	+	++	--	--	--	--
<i>Ondervangen fundering</i>	++	++	+/-	--	+	++ (tijdelijk)
<i>zettingscompensatie TBM</i>	--	--	+	++	--	--
<i>zettingscompensatie bouwkuip</i>	--	--	++	-/+	--	--

## Compensation grouting

### *Inleiding*

Hier wordt een overzicht gegeven van enige zaken die in grote mate voor beide compensation grouting technieken opgaan. In de volgende hoofdstukken wordt meer in detail op fracturing respectievelijk compaction grouting ingegaan.

Zoals in de inleiding reeds opgemerkt berust het elementaire verschil tussen beide methoden in de samenstelling van de injectievloeistof, die bij fracturing zeer vloeibaar en bij compaction grouting zeer stijf is. Hierdoor is fracturing meerdere malen door dezelfde injectieopening te herhalen, terwijl compaction grouting een typische 'one shot' methode is. Desondanks worden beide methoden beide voornamelijk voor zettingscompensatie gebruikt.

*N.B. In dit hoofdstuk wordt voor compaction grouting steeds uitgegaan van toepassing ter compensatie van zettingen. De meeste zaken ten aanzien van samenstelling e.d. gaan echter ook op voor toepassing als verdichtingstechniek.*

### *Vooronderzoek*

Wanneer compensation grouting zonder een gedegen vooronderzoek wordt uitgevoerd, loopt men het risico dat de kwalijke gevolgen voor de te compenseren bebouwing door het groutproces worden versterkt in plaats van verzwakt. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn wanneer men zonder het te weten boven een sterk samendrukbare laag injecteert, waardoor de belasting op die laag sterk wordt verhoogd en de zettingen evenredig zullen toenemen.

In het vooronderzoek zullen over het algemeen de volgende punten behandeld moeten worden:

- een inventarisatie van de eigenschappen van de (funderings)grondslag;
- het (juridisch) vastleggen van de kwalitatieve toestand waarin het te compenseren gebouw zich bevindt door middel van foto's en een beschrijving van scheuren e.d.;
- het vaststellen van de bron van de zettingen (huidige en/of toekomstige bron);
- het opstellen van een globaal plan dat de methode van aanbrengen van de injectielichamen beschrijft, eventueel aangevuld met de beschrijving van een proefproject;
- het trekken van een conclusie omtrent de haalbaarheid van compensation grouting als oplossing van het probleem, middels een afweging van uitvoeringsmogelijkheden, verwachte effectiviteit en kosten.

### *Plan van aanpak*

Het is uiteraard niet reëel een plan van aanpak (PvA) te eisen waarvan de daarin voorspelde zettingen precies overeen dienen te komen met de werkelijk opgetreden zettingen. Het verdient veeleer de aanbeveling om het PvA dermate flexibel te houden, dat gegevens die beschikbaar komen gedurende het begin van het injectieproces direct kunnen worden verwerkt ten bate van het verbeteren van de resultaten van het verdere injectieproces. Het PvA moet echter wel zo grondig zijn opgesteld, dat het optreden van grote hoeveelheden meerwerk tijdens de uitvoering uitgesloten is.

Het belangrijkste aspect van het PvA vormt de omschrijving van het doel van het compenserend grouten. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen het compenseren van reeds opgetreden zettingen, het 'real time' compenseren van optredende zettingen en het heffen van de grond (overcompensatie). Hierbij dient het risico van nazakking volgend op het injectieproces te worden ingeschat en moet duidelijk worden vastgesteld wie hiervoor aansprakelijk is. Het is belangrijk dat hierbij een onderscheid wordt gemaakt tussen de technische- en de juridische aansprakelijkheid.

Verder dient het PvA een over het algemeen een omschrijving te bevatten van:

- de plaats van de injectiepunten (genummerd op een plattegrond);
- de diepte en hellingshoek van de injectielansen;
- de samenstelling van de injectievloeistof (de grout);
- de zettingen waarbij injectie plaats moet vinden en een schatting van de bijbehorende hoeveelheden te injecteren grout;

- de injectieprocedure (volgorde injecteren, injectiedrukken, enz.);
- de te volgen handelswijze bij het ontmoeten van obstakels.

### *Equipement*

Ten bate van het aanbrengen van een compensation grouting injectielichaam dienen over het algemeen de volgende zaken aanwezig te zijn:

- 1 een opslagplaats t.b.v. de opslag van de (droge) injectiemiddelen (zakken cement, zand);
- 2 een menginstallatie (mixer) t.b.v. samenstellen van de injectievloeistof;
- 3 een silo t.b.v. de opslag van een hoeveelheid injectievloeistof;
- 4 een boor- en/of persinstallatie t.b.v. het inbrengen van de injectielansen;
- 5 injectielansen of casing t.b.v. het in de grond brengen van de injectievloeistof;
- 6 koppelingsslangen voor de verbinding tussen de compressor/pomp en het injectiepunt;
- 7 een zuigerpomp t.b.v. het opwekken van voldoende pompdruk;
- 8 apparatuur t.b.v. het monitoren van het groutproces;
- 9 communicatiemiddelen t.b.v. het onderhouden van het contact tussen boor-, grout- en observatieploeg en controlers;
- 10 computerapparatuur ter onmiddellijke verwerking en eventueel visualisatie van de meetgegevens.

### *Richtlijnen voor het aanbrengen van een injectienetwerk*

Bij het aanleggen van het injectienetwerk, zijnde het patroon waarin de injectiepunten over het te behandelen terrein worden gespreid, wordt over het algemeen een zo regelmatig mogelijk patroon aangehouden. Afhankelijk van de aanwezige grondslag, de beoogde injectiediepte, eerder opgedane ervaring en de duur van de injectie wordt een onderlinge afstand tussen de injectiepunten gekozen. De volgende regels kunnen hierbij worden aangehouden:

- 1 Voor compaction grouting kunnen in losgepakte gronden de injectiepunten verder uit elkaar worden gesitueerd dan in dichtgepakte gronden, omdat het injectielichaam in losgepakte gronden een grotere diameter kan bereiken;
- 2 bij lichte, flexibele constructies kan de afstand tussen de injectiepunten groter worden genomen dan bij zware, starre constructies;
- 3 wanneer gedurende een langere periode wordt geïnjecteerd kunnen de injectiepunten met name bij compaction grouting verder uit elkaar gekozen worden.
- 4 Bij fracturing zullen de injectiepunten in langrichting circa 0,5m en dwarsrichting tussen de 1 en 4 meter uit elkaar liggen.

### *Het monitoren, beheersen en controleren van het injectieproces*

Het succes van het injectieproces staat of valt met het zorgvuldig monitoren ervan. Door de gegevens die beschikbaar komen in het begin van de uitvoering onmiddellijk te interpreteren, kan het verdere proces worden bijgesteld voorzover dat nodig is. Gezien het feit dat exacte gegevens omtrent de bodemopbouw (bij de aanvang van het project) vaak niet of niet volledig beschikbaar zijn, is bijstelling meer regel dan uitzondering.

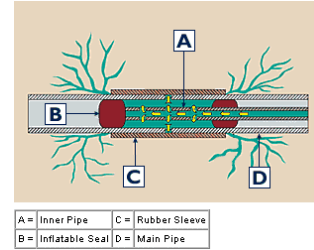
Het is raadzaam om vooral in de opstartfase een zo volledig mogelijk monitoring programma op te zetten, waarbij een intensieve begeleiding noodzakelijk is. Naarmate het injectieproces vordert en redelijkerwijs geen wijzigingen in de bodemopbouw kunnen worden verwacht, kan worden volstaan met het periodiek monitoren van hoekverdraaiingen en verplaatsingen. Het controleren van het injectieproces dient uiteraard wel continue plaats te vinden.

Het belang van de injectiewerkzaamheden en de competentie (vooral ervaringskwestie) van de aannemer bepalen in hoeverre de bouwdirectie dient te worden betrokken in de registratie en interpretatie van de monitoringgegevens.

## Fracturing

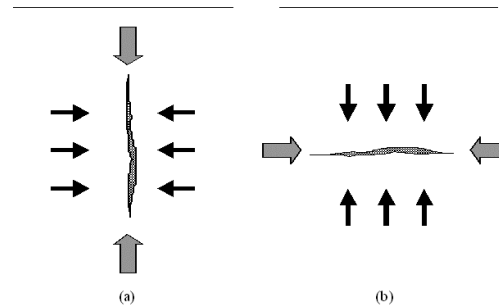
### Inleiding

Het grondscheurend grouten, of *fracturing* is ontwikkeld in Frankrijk en is zowel daar als in het Verenigd Koninkrijk veelvuldig toegepast. Onwillekeurig is bij toepassing van bodeminjectie ook scheurvorming effecten opgetreden wanneer de injectiedebieten en/of -drukken te hoog waren. Fracturing, ook wel bekend als *hydrofracture grouting* is een techniek die tot doel heeft een breukvlak in de grond te creëren door het aanbrengen van een zeer vloeibare injectievloeistof (meestal water cement in 1:1 verhouding) onder zeer hoge druk. Het ppprincieel verschil met bodeminjectie ligt in het feit dat het doel niet het infiltreren van het korrel skelet, maar het verdringen (of "opkrikken") van de grond is. Wanneer de initiële horizontale korrelspanningen groter zijn dan de verticale, dan vormt de injectievloeistof overwegend horizontale lenzen in de grond; wanneer het omgekeerde het geval is scheurt de grond overwegend verticaal. Deze techniek van het "scheuren van de grond" kan nuttig worden toegepast wanneer zettingen moeten worden gecompenseerd.



**Figuur 8 Fracturing (Keller)**

Rond het injectiepunt vormt zich een injectielichaam. Vlak langs dit injectielichaam vervormt de grond plastisch en daarbuiten elastisch (zie figuur 7.1). Het resultaat is een verdichting van de grond tot een zeker maximum, waarna de grond zou gaan scheuren. Wanneer de initiële horizontale korrelspanningen groter zijn dan de verticale ( $K_0 > 1$ ), dan scheurt de grond horizontaal. Wanneer het omgekeerde het geval is scheurt de grond verticaal (lensvorming).



**Figuur 9 (a)  $K_0 < 1$  Verticale scheur & (b)  $K_0 > 1$  Horizontale scheur**

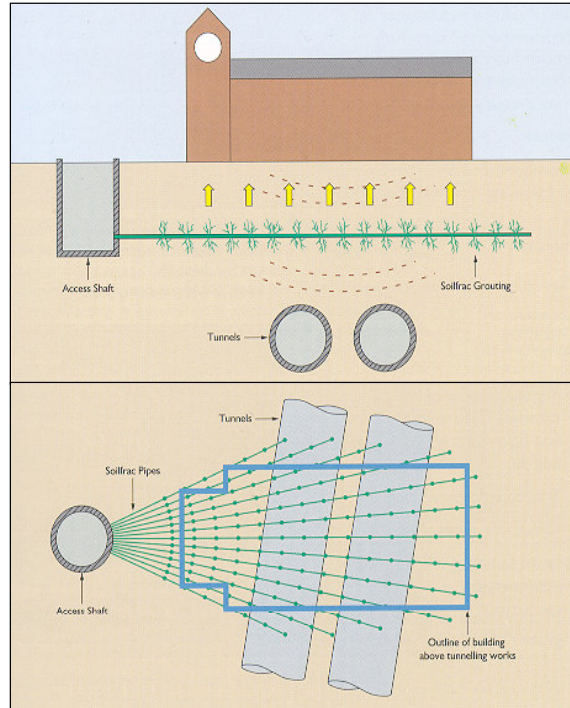


### Techniek

In Figuur 10 is (zeer schematisch) aangegeven hoe het fracturing proces uitgevoerd wordt bij toepassing tussen een tunnel en bebouwing.

Allereerst wordt een (verticale) schacht aangebracht, van waaruit een raster van tubes-à-manchette wordt geplaatst (zie ook hoofdstuk over bodeminjectie). Middels packers kan elke manchet afzonderlijk worden geïnjecteerd. Voor het eigenlijke compenseren van de zettingen worden alle manchetten een of twee maal geïnjecteerd tot een lichte heffing van het bouwwerk wordt geregistreerd. Dit is de zogenaamde *pre-conditioning* fase.

Ter plaatse van de bebouwing dienen de verplaatsingen te worden gemeten, waarna bij op basis van deze metingen een bepaalde hoeveelheid grout wordt ingebracht. Deze grout zorgt voor een verdichting van de grond (boven de tunnelling) en rondom het injectiepunt en voor een opvulling van het extra poriënvolume in de grond ontstaan door de verplaatsing. Bij voldoende injectiedruk en -debiet worden de verplaatsingen voorkomen. Soms wordt een lichte heffing bewerkstelligd in verband met tenietdoen van nog te verwachten consolidatie effecten.



**Figuur 10 Principe compensation grouting bij tunnels (Keller)**

### Uitvoering

Over het algemeen wordt 'versprongen' geïnjecteerd, wat wil zeggen dat tijdens de eerste injectiecyclus (dag) telkens een injectiepunt in de rij wordt overgeslagen en dat tijdens de volgende injectiecyclus (dag) alleen deze overgeslagen injectiepunten worden gebruikt. Wanneer vervolgens blijkt dat het groutverbruik in de tussenliggende gaten (tweede injectiecyclus) even groot is als in de gaten van de eerste injectiecyclus, dan wordt de afstand tussen de injectiepunten voor de rest van het project verkleind.

Ruimtelijk gezien wordt over het algemeen 'van buiten naar binnen' geïnjecteerd. Dit heeft als voordeel dat de buitenste injectielichamen horizontale steun verlenen aan de binnenste (opsluitingsprincipe), zodat bij nagenoeg gelijke verdichting de hoeveelheden te injecteren grout kleiner zullen zijn.



## Compaction grouting

### Inleiding

Het grondverdringend grouten of *compaction grouting* is een techniek die van oorsprong uit de Verenigde Staten komt. Buiten de VS wordt de methode (nog) niet veel gebruikt, wat deels te wijten is aan de onbekendheid met de methode en deels aan de (verkeerde) gedachte dat compaction grouting oncontroleerbaar zou zijn. De redenen voor toepassing van compaction grouting kunnen zijn het ongedaan maken van zettingen die zijn ontstaan door consolidatie of het compenseren van ontspanning veroorzaakt door bijvoorbeeld ontgraving of het boren van een tunnel.

### Techniek

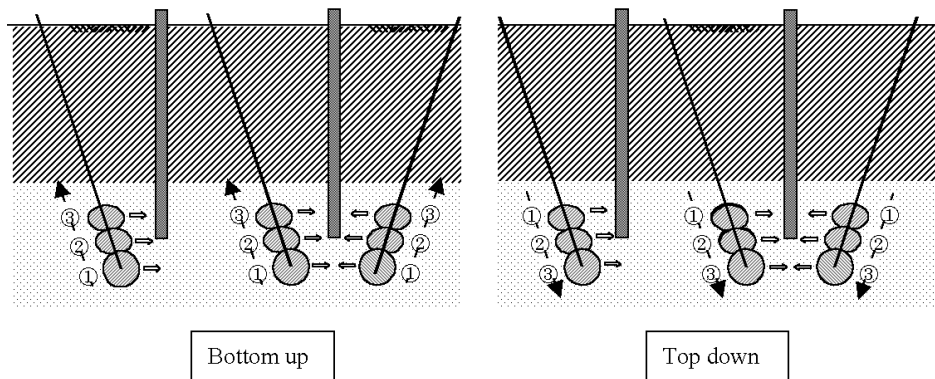
De techniek van compaction grouting berust op het in de grond brengen van een buis, waardoor een zeer stijve, niet mobiele grout in de grond wordt geperst. Tijdens het uitpersen van de grout dient de buis te worden getrokken of doorgedrukt. Door het inbrengen van de grout wordt de grond stijver en sterker. De techniek werkt het best in losgepakte, niet cohesieve lagen (in cohesieve lagen spelen consolidatie-effecten een rol).

De grout moet een dusdanige viscositeit en korrelverdeling bezitten dat de poriën in de grond niet worden gevuld en de injectiedrukken moeten dermate laag worden gehouden dat de grond niet kan scheuren. Hiermee is gelijk het essentiële verschil met bodeminjectie aangegeven, waar het doel juist indringing in de poriën en vervolgens 'verstening' van de grond is en met fracturing, waar juist het breken en heffen van het grondmassief als geheel het doel vormt.

### Uitvoering

Compaction grouting kan *top-down* of *bottom-up* worden uitgevoerd. Een voorbeeld voor een funderingspaal is gegeven in Figuur 12).

De injectiegaten worden geboord met behulp van een spoelboring. Het gebruik van percussieboormethoden wordt afgeraden, omdat deze het gebied rond de boorkop sterk verdichten, wat schade aan de bebouwing kan opleveren en bovendien het starten van de injectie ernstig kan belemmeren (door de vorming van een dichte prop onder aan de injectielans). Wanneer onder palen of anderszins op diepte moet worden geïnjecteerd, wordt gebruik gemaakt van een casing tot op de gewenste injectiediepte. Het injecteren onder obstakels zoals palen is mogelijk, maar de hellingshoek met de verticaal dient niet groter te worden dan 20°. Dit heeft te maken met het feit dat een verticaal geïnjecteerde groutkolom een betere verdichting (in horizontale richting) van de grond veroorzaakt dan een diagonale kolom.



**Figuur 12 bottom-up (links) en Top Down (rechts) grouten van een funderingspaal**

Bij de *top down* methode wordt de volgende procedure aangehouden:

1. er wordt een gat geboord tot aan de bovenkant van de te verdichten zone;
2. in dit gat wordt een casing (injectiepijp/lans) ingebracht, waarbij de ruimte tussen de casing en de grond wordt gevuld met sneldrogend cement;
3. vervolgens wordt grout geïnjecteerd tot de injectiedruk het aanvaardbare maximum bereikt of de grond en/of paal enigszins omhoog komt;
4. om het gat te verdiepen (0,9 m tot 2,4 m, nooit meer dan 3,7 m) wordt door de casing verder geboord;
5. nadat de eerder geïnjecteerde grout gehard is, worden de stappen 3,4 en 5 herhaald tot de gewenste verdichting is bereikt.

Bij deze *bottom up* methode wordt de volgende procedure aangehouden:

1. er wordt een gat geboord tot aan de onderkant van de te verdichten zone;
2. in dit gat wordt een casing ingebracht tot op ca. 30 cm van de onderkant van het gat; deze casing moet nauw sluiten, zodat soms zelfs het voorboren van het gat (1) wordt weggelaten en de casing is zijn geheel wordt gedrukt;
3. het injecteren van grout tot de injectiedruk het aanvaardbare maximum bereikt of de grond of de paal enigszins omhoog komt;
4. optrekken (0,9 m tot 2,4 m) van de casing;
5. nadat de eerder geïnjecteerde grout gehard is opnieuw injecteren van grout;
6. herhaling van de stappen 4 en 5 tot de gewenste verrichting of de bovenkant van de verdichtingszone is bereikt.

Als vuistregel kunnen onderlinge afstanden van 1,5 tot 4,5 meter worden aangehouden wanneer gedurende korte tijd wordt geïnjecteerd. Wanneer het injecteren enkele dagen duurt variëren deze afstanden van 4,5 tot 6,0 meter. Dit zal in de praktijk alleen goed werken wanneer de bebouwing op staal gefundeerd is en relatief grote afmetingen heeft. Het is dan namelijk wenselijk dat de ondersteuning in de vorm van het injectielichaam regelmatig verspreid onder de fundering wordt aangebracht. Bij een paalfundering is het wenselijk dat de steun onder de paalpunten wordt aangebracht of dat de paalpunten voldoende worden afgeschermd. Dit betekent in de eerste plaats dat op een grotere diepte moet worden geïnjecteerd en in de tweede plaats dat de spreiding van de injectiepunten niet meer regelmatig, maar meer geconcentreerd rond de paalpunten moet zijn. Wanneer het doel stabilisatie is wordt meestal bottom-up methode gebruikt. Voor ondiepe toepassingen en het heffen van grond/gebouwen is de top-down methode meer toepasbaar. Vanuit praktisch oogpunt is top-down werken niet efficiënt, omdat na elke injectie door het (reeds harde) gevormde injectielichaam naar beneden moet worden geboord. Wanneer diepe lagen worden gestabiliseerd worden beide methoden vaak gecombineerd (Bandimere, 1997).

### *Toepassingsgebied*

Compaction grouting is toe te passen in nagenoeg alle soorten grond, waarbij onderstaande kanttekeningen worden geplaatst.

**Silt:** verdichting van siltgronden onder en boven de grondwaterstand heeft plaatsgevonden; rekening moet worden gehouden met één tot enkele dagen voor dissipatie van de wateroverspanningen.

**Klei:** verdichting van losgepakte kleilagen boven de grondwaterstand heeft plaatsgevonden; het gebonden water kan niet weggeperst worden, maar het vrije water wel (echter zeer langzaam).

**Zand:** alle soorten zand kunnen probleemloos worden verdicht; het effect bij zand dat reeds een zeer dichte pakking bezit zal laag zijn.

**Veen:** over het algemeen wordt aangenomen dat veen kan worden verdicht, wanneer de doorlatendheid van het veen overeenkomt met die van silt.

**Gecementeerde grond:** compaction grouting is met succes toegepast in licht gecementeerd, siltig zand.

Voorbeelden van veel voorkomende toepassingen van compaction grouting zijn:

- 1 het verdichten van losgepakte natuurlijke gronden of kunstmatige aanvullingen;
- 2 het heffen van bebouwing en kunstwerken (veel toegepast bij olietanks);

- 3 het gebruik als fundering door groutkolommen te vormen;
- 4 combinaties van 1,2 en/of 3 (bv onder stuwdam: vergroten van de draagkracht en reduceren van de doorlatendheid van de ondergrond).

### Equipement

De grouting equipment bestaat uit een boorstelling (gecombineerd met een kraan om de buizen te trekken) and een injectie unit met groutbuizen. De stelling vertoont veel overeenkomsten met bodeminjectie of jet grouting stellingen. De buizen wordt geïnstalleerd middels een spoelboring, eventueel voorzien van een casing. De diameter hiervan bedraagt meestal zo'n 50 mm diameter, met uitschieters tot 150 mm (Bandimere, 1997).

De *injectie unit* bestaat uit een grout mixer en een pomp. Vanwege de hoge interne wrijving in het groutmengsel dienen een speciale mixer en (beton)pomp te worden gebruikt. Typisch zijn een druk tot 15 MPa en een debiet van 0.1 m<sup>3</sup>/min. Meer specifieke informatie kan worden gevonden in Müller and Bruce (2000) en Van der Stoel (2001).

### Conclusies

De volgende conclusies worden ten aanzien van compaction grouting getroffen.

- 1 Wanneer de injectiebuizen van te voren zijn geïnstalleerd kan het injectienetwerk zeer snel worden geïnitieerd. De injectie-installaties op zich zijn vrij licht en betekenen dus ook een geringe verstoring van de (leef)omgeving waarin ze geplaatst worden, dus zowel van de bodem als van het verkeer.
- 2 De apparatuur die nodig is voor compaction grouting neemt relatief zeer weinig ruimte in beslag in vergelijking met de benodigde apparatuur voor andere grondverbeteringstechnieken;
- 3 In vergelijking met bodeminjectie zijn veel minder injectiepunten en -buizen nodig, zodat de tijd om het systeem aan te brengen aanzienlijk lager is. Een bijkomend voordeel is dat ook de hoeveelheden geïnjecteerd grout relatief veel lager zijn dan bij 'normaal' injecteren. Deze factoren beperken de kosten van compaction grouting ten opzichte van bodeminjectie aanzienlijk.
- 4 De behandeling van kleine objecten is net zo goed mogelijk als van grote objecten en behandeling is zowel op geringe als op grote diepte mogelijk.
- 5 Het compaction groutproces is goed controleerbaar en flexibel.

De bovenstaande punten kunnen worden gerekend tot voordelen van compaction grouting. Daar tegenover staan de volgende nadelen:

- 6 Er is nog betrekkelijk weinig inzicht in de mechanische processen die zich in de grond afspelen tijdens het compaction grouting proces. Het modelleren van compaction grouting (en fracturing) stuit nog steeds op veel met name praktische problemen. De toename van rekencapaciteit van Pc's enerzijds en het steeds verder ontwikkelen van EEM programma's anderzijds biedt echter voldoende hoop voor de nabije toekomst.
- 7 Rekenregels zijn niet of nauwelijks beschikbaar. De beschikbare formules zijn van empirische aard en hebben vaak betrekking op een specifieke situatie, zodat een betrouwbare voorspelling van de resultaten van het compaction groutproces niet te geven is.

## Literatuur

Onderstaande literatuur is gebruikt of wordt aanbevolen voor meer informatie over grondverbeteringstechnieken voor funderingsherstel.

**Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics**, Proceedings ASCE Geotech. Conference, Geotechnical Special Publication no. 30, New Orleans, February 1992

**Grouting and Ground Treatment**, Proceedings 3<sup>rd</sup> ASCE Geotech. Conference, Geotechnical Special Publication no. 120, New Orleans, 2003

**CUR Rapport 162 Construeren met grond**

**CUR Rapport 198 Kerende constructies in gewapende grond**

**CUR Rapport 199 Handreiking toepassing No-Recess Technieken**

**Al-Alusi**, H.R., 1998, *Compaction Grouting: From Practice to Theory*; Grouting : Compaction, Remediation and Testing; Geotechnical Special Publication No. 66, Edt. C. Vipulanandan, Proceedings of the ASCE Geo-Logan '97 Conference, ASCE, New York, pp. 43- 53

**Bandimere**, S.W., 1997, *Compaction Grout Mechanism – State of the Practice 1997*; Grouting : Compaction, Remediation and Testing; Geotechnical Special Publication No. 66, Edt. C. Vipulanandan, Proceedings of the ASCE Geo-Logan '97 Conference, ASCE, New York, pp. 18- 31

**Baker**, W.H., E.J. Cording & H.H. MacPherson, 1983, *Compaction grouting to control ground movements during tunnelling*, Underground Space, Vol.7, January, pp. 205-212

**Baker**, W.H., 1985, *Embankment Foundation Densification by Compaction Grouting*, Proceedings, Issues in Dam Grouting, ASCE, New York, pp. 104-122

**Boulanger**, R.W. & R.F. Hayden, 1995, *Aspects of compaction grouting of liquefiable soil*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 121, No.12, paper #10013, December, 1995, pp. 844-855

**Bolton**, M.D., Y.C. Lu and J.S. Sharma, 1996, *Centrifuge Models of Construction and Compensation Grouting*, Proceedings of the Congress on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground 1996, London, Balkema Rotterdam, pp. 403-408

**Borden**, R.H. & K.B. Ivanetich, 1997, *Influence of fines content on the behaviour of compaction grout*, Grouting : Compaction, Remediation and Testing; Geotechnical Special Publication No. 66, Edt. C. Vipulanandan, Proceedings of the ASCE Geo-Logan '97 Conference, ASCE, New York, pp. 62 – 75

**Brown**, D.R. & J. Warner, 1973, *Compaction Grouting*; Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.99, August 1973, paper 9908

**Essler**, R.D., E.R.Drooff & E.Falk, 2000, *Compensation Grouting, Concept, Theory & Practice*, Advances in grouting and ground modification, Proceedings of sessions of Geo-Denver 2000, ASCE Geotechnical special publication #104, Denver, Colorado, pp. 1-15

**Faught**, K.L., 1997, *Compaction Grouting at tip of Sheet Piles*, Ground Treatment; Geotechnical Special Publication No. 69, Proceedings of the ASCE Geo-Institute, Logan, USA, pp.441-443

**Gelderloos**, H.C., M.S. Bornhäuser and K.F. Brons, *het heffen van een verzakte caisson van de IJ-tunnel*, Bouw en Waterbouwkunde 15, 5 december 1969, pp. 181-188, in Dutch

**Graf**, E.D., 1969, *Compaction Grouting Technique*; Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.95, September 1969

**Graf**, E.D., 1992, *Compaction Grout*, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Proceedings ASCE Geotech. Conference, Geotechnical Special Publication no. 30, New Orleans, February 1992, pp. 275-287

**Harris**, D.I., R.J.Mair, J.P. Love, R.N. Taylor, T.O. Henderson, 1994, *Observations of ground and structure movements for compensation grouting during tunnel construction at Waterloo station*, Géotechnique, No.4., pp. 691-713

**Mace**, N. & G.R. Martin, 1996, *Ground remediation – Aspects of the theory and approach to compaction grouting*, Proceedings of the 6th Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, Tokyo, Japan

**Mair**, R.J, D.I. Harris, , J.P. Love, D.Blakey, C.Kettle, 1994, *Compensation grouting to limit settlement during tunnelling at Waterloo station*, London, Tunnelling '94, Institution of Mining and Metallurgy, Chapman and Hall Publ., pp. 279-300

**PrEN12715**, Execution of special geotechnical works. Grouting, February 1997

**PrEN12716**, Execution of special geotechnical works. Jet grouting, February 1997

**Schmertmann**, J.H. & J.F. Henry, 1992, *A Design Theory For Compaction Grouting*, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Proceedings ASCE Geotech. Conference, Geotechnical Special Publication no. 30, New Orleans, February 1992, pp. 215-228

**Scherer**, S.D., R.L. Gay, 2000, *Compaction Grouting: Three Midwest case histories*, Advances in grouting and ground modification, Proceedings of sessions of Geo-Denver 2000, ASCE Geotechnical special publication #104, Denver, Colorado, pp. 65-82

**Soga**, K., R.J. Mair, M.D. Bolton, M.R. Jafari, S.K.A. Au, S.W. Lee and K. Komiya, 2001, *Laboratory Investigation of Compensation Grouting*, CIRIA Conference on Building Response to Tunnelling

- Stoel**, A.E.C. van der, 1998, *Soil Grouting: Full Scale Injection test North/South metro line Amsterdam*, Tunnels and Metropolises, Proceedings of the World Tunnel Congress 1998 on Tunnels and Metropolises São Paulo Brazil, Balkema Publ.
- Stoel**, A.E.C. van der; A.F. van Tol, 1998b, *Full Scale Injection Amsterdam: Results stage 1 and 2*, Proceedings of the ITA World Tunnel Congress 1999 Oslo Norway, Balkema Publ.
- Stoel**, A.E.C. van der; 1999a, *Praktijk Injectie Proef: resultaten en Evaluatie fase 0*, Adviesbureau Noord/Zuidlijn internal report R990786.D, in Dutch
- Stoel**, A.E.C. van der; 1999b, *Injection/grouting near pile foundations: Full Scale Test Amsterdam*, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, IS'99 Tokyo Japan, Balkema Publ.
- Stoel**, A.E.C. van der; 2001, *Praktijk Injectie Proef: resultaten en Evaluatie fase 1*, Adviesbureau Noord/Zuidlijn internal report, in Dutch
- Stoel**, A.E.C. van der, Haasnoot & Kaalberg, 2003, *Compensation Grouting Proef: Fracture Grouten onder houten paalfundering*, Geotechniek 7e jaargang, nummer 1
- Stoel**, A.E.C. van der, 2001, *Grouting for Pile Foundation Improvement*, Proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor aan de Technische Universiteit Delft, ISBN 90-407-2223-4
- Vesić**, A.S., 1972, *Expansion of Cavities in infinite soil mass*, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98 , SM3, Paper 8790, March 1972, pp. 265-290
- Warner**, J. & D. Brown, 1974, *Planning and performing compaction grouting*, ASCE, Journal of Geotechnical Engineers, paper #10606, july 1974
- Warner**, J., 1978, *Compaction grouting - A significant case history*, ASCE, Journal of Geotechnical Engineers, vol. 104, paper #13897, july 1978
- Warner**, J., 1992, *Compaction Grout; Rheology vs. effectiveness*, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Proceedings ASCE Geotech. Conference, Geotechnical Special Publication no. 30, New Orleans, February 1992, pp.229-239
- Warner**, J., N. Schmidt, J. Reed, D. Shepardson, R. Lamb & S. Wong, 1992, *Recent Advances In Compaction Grouting Technology*, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Proceedings ASCE Geotech. Conference, Geotechnical Special Publication no. 30, New Orleans, February 1992, pp. 252-264
- Warner**, J., 1997, *Compaction Grout Mechanism – What do we know?*, Grouting : Compaction, Remediation and Testing; Geotechnical Special Publication No. 66, Edt. C. Vipulanandan, Proceedings of the ASCE Geo-Logan '97 Conference, ASCE, New York, pp. 1 – 17
- Wong**, H.Y., 1973, *Compaction Grouting*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, GT5, ACSE Publ., 1974, May 1974, pp.556-559