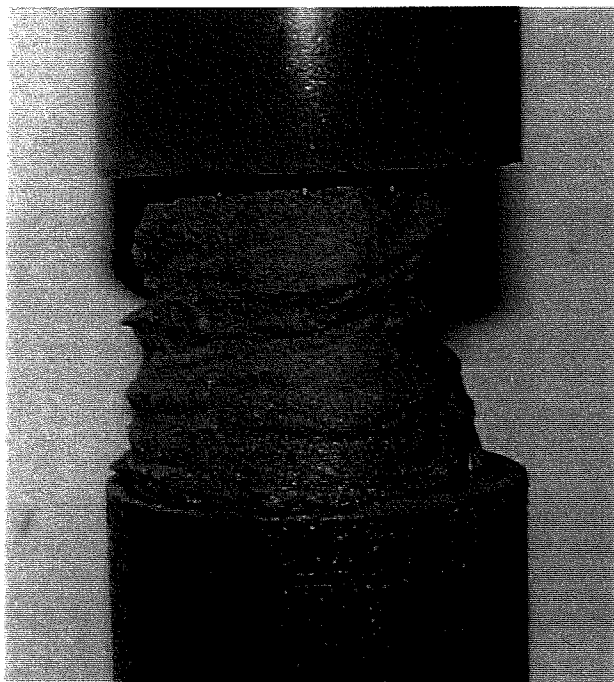


Het verkitten van zand

Een alternatieve methode voor erosiebestrijding

Eindverslag



A.A. Schouten

Delft, juli 1999

St.nr.

747307

Het verkitten van zand

Een alternatieve methode voor erosiebestrijding

Eindverslag

**A.A. Schouten
Delft, juli 1999
St.nr. 747307**

Afstudeercommissie

***Prof. Ir. K. d'Angremond, TU Delft
Ir. W.H. Tutuarima, TU Delft
Dr. ir. P.J. Visser, TU Delft
Ir. W. Op den Velde, Van Oord ACZ***

Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van de laatste fase van mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit in Delft. In samenwerking met Van Oord ACZ is gekozen voor het onderwerp 'het verkitten van zand, een alternatieve methode voor erosiebestrijding'. Het onderzoek bestaat uit twee delen: een literatuuronderzoek en een experimenteel onderzoek. Dit rapport bevat de belangrijkste feiten uit het literatuuronderzoek en het verslag van het experimentele onderzoek.

Deze versie van het rapport is gecensureerd. De voor van Oord ACZ strategische informatie is weggelaten.

Als eerste wil ik de leden van mijn afstudeercommissie bedanken: prof. ir. K. d'Angremond, ir. W.H. Tutuarima, dr. ir. P.J. Visser en ir. W. Op den Velde. De heren Tutuarima en Op den Velde wil ik in het bijzonder bedanken voor hun bijdragen en adviezen gedurende het gehele onderzoek. Daarnaast wil ik ing. L.J. van Elsen bedanken voor het bedenken van de alternatieve methode voor erosiebestrijding en voor zijn begeleiding in de beginperiode van het onderzoek.

Ik wil de heer Groen van CEBO Holland en de heer Collignon van Grondmechanica Rhon bedanken voor het beantwoorden van al mijn vragen over cement en bentoniet.

Tot slot wil ik iedereen bedanken die mij tijdens mijn experimenten geholpen heeft: vrienden, medewerkers van het laboratorium voor Vloeistofmechanica en medewerkers van het triaxiaal laboratorium van Grondmechanica Delft. Natuurlijk ook dank voor degenen die mijn teksten hebben doorgelezen.

Delft, juli 1999

Annemagreet Schouten

Samenvatting

Een offshore pijpleiding die op de bodem van de zee gelegd wordt, is vaak onderhevig aan uitwendige krachten die de constructie kunnen beschadigen. Om zo'n pijpleiding te beschermen tegen deze krachten, kan de leiding worden ingegraven. In zand kan de ingraving gerealiseerd worden door de bodem rondom de leiding te fluïdiseren, waarna de leiding in het zand-watermengsel wegzinkt onder invloed van zijn eigen gewicht. Na dit proces bezinkt het gefluïdiseerde zand en wordt de pijpleiding bedekt door een beschermende zandlaag. Onder bepaalde condities kunnen delen van de pijpleiding echter weer vrij aan het bodemoppervlak komen te liggen. Om dit te voorkomen wordt in veel gevallen plaatselijk een extra bodembescherming op de deklaag boven de pijpleiding aangebracht; meestal in de vorm van een steenbestorting of met erosiebestendige matten. Deze extra bodembescherming dient om de stabiliteit van de deklaag te waarborgen.

Daar de extra beschermingsconstructies kostbaar zijn, is er voortdurend gezocht naar goedkopere alternatieven. Een mogelijk alternatief berust op het vergroten van de erosiebestendigheid van de zandlaag op de pijpleiding, door in het gefluïdiseerde zand een bindend additief te injecteren. Hierdoor zal na het fluïdisatieproces de weerstand van de beschermende laag tegen erosie (of andere mechanische belastingen) toegenomen zijn. Dit alternatief gaat ervan uit, dat tussen het gefluïdiseerde zand een goede verspreiding van het additief mogelijk is.

Dit afstudeerverslag richt zich op het onderzoek naar de mogelijkheden van deze alternatieve erosiebescherming, waarbij met behulp van fluïdisatietechnieken een bindend additief in een zandbodem wordt verspreid. Hiertoe is literatuuronderzoek en experimenteel onderzoek verricht.

Tijdens het literatuuronderzoek is aandacht besteed aan grouten en groutmaterialen. Dit is gedaan, omdat bij grouten ook een additief aan de bodem wordt toegevoegd met het doel de eigenschappen van deze bodem te verbeteren. Bij grouten wordt een additief in de poriën van de plaatsvastе deeltjes van het in situ bodemmateriaal geïnjecteerd, terwijl bij dit onderzoek een geschikte methode wordt gezocht om een additief tussen de beweeglijke deeltjes van het gesuspendeerde materiaal te injecteren. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van cement-bentonietsuspensies als additief voor een zandbodem. Bij grouten zou een dergelijke suspensie niet toegepast kunnen worden, omdat de cementdeeltjes zouden worden uitgefilterd ten gevolge van de (beperkte) poriëngrootte van het in situ bodemmateriaal. Om een zandbodem met behulp van grouten te verstevigen, moet gebruik gemaakt worden van duurder additieven, zoals ultrafijne cement-bentonietsuspensies, of oplossingen van sodium-silicaat in water (silicagels).

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een cement-bentonietsuspensie om de eigenschappen van een zandbodem te verbeteren. Deze suspensies zijn goedkoper dan andere additieven en milieu-neutraal. Hoe lager de gebruikte water/cement-factor, hoe meer cement het additief per eenheid bevat, hoe duurder het additief zal zijn.

Tijdens het experimentele onderzoek is met name aandacht besteed aan de verspreiding van cement-bentonietsuspensies tussen het gesuspendeerde zand en de invloed van deze verspreiding op de eigenschappen van het eindproduct, het verkitten van zand. Daarnaast is de invloed van de samenstelling van de cement-bentonietsuspensie op de eigenschappen van het verkitten van zand bekeken.

Tijdens de experimenten is gebruik gemaakt van een roerder om het zand in suspensie te brengen. Dit was in opzet veel eenvoudiger te bewerkstelligen dan het fluïdiseren. Er is voorhands aangenomen dat het roeren geen ernstige afbreuk aan de resultaten van het onderzoek heeft gedaan.

In eerste instantie zijn in een perspex cilinder oriënterende roerproeven uitgevoerd. De cilinder ($d = 0,21$ m, $h = 0,5$ m) was gevuld met 5,4 kg zand en 10 liter zeewater. Tijdens deze proeven is bepaald dat het mogelijk is om door middel van roeren het zand in suspensie te brengen tot dichtheden die overeen komen met dichtheden die met behulp van fluïdisatietechnieken bereikt worden.

Vervolgens zijn er oriënterende injectieproeven uitgevoerd. Hierbij zijn verschillende cement-bentonietsuspensies (met een variërende water/cement-factor en een variërende bentonietgehalte) aangemaakt en geïnjecteerd in zeewater en tussen gesuspendeerd zand ($d_{50} = 165$ μm).

Tijdens de proeven bleek een groot aantal additiefsamenstellingen te viskeus om verwerkt te worden. De (Marsh-)viscositeit van deze additieven was groter dan de gestelde eis (60 s/l). Deze samenstellingen zijn niet gebruikt als additief. Daarnaast bleek de injectiedruk bepalend voor de vorm waarin het additief zich verspreidt. Als het additief met een lage druk geïnjecteerd wordt, zal het als een (slangvormige) eenheid bij elkaar blijven. Doordat het gesuspendeerde zand bezinkt, moet het additief echter snel geïnjecteerd worden. Voor deze snelle injectie is een redelijk grote druk nodig. Hierdoor gaat de samenhang van het additief verloren en zal het additief zich als een wolk tussen het gesuspendeerde bodemmateriaal verspreiden. Deze wolk van cement en bentoniet bezinkt niet als een mengsel met een bepaalde dichtheid, maar als afzonderlijke deeltjes (vlokken). Deze deeltjes zijn lichter dan de zandkorrels, waardoor ze langzamer dan deze korrels bezinken.

Wanneer de juiste injectietechniek wordt toegepast, verspreidt het additief zich redelijk homogeen door het zand en zal het verkitten zand homogene eigenschappen vertonen. Het additief verdunt ten gevolge van de injectiedruk, waardoor de water/cement-factor toeneemt. Desondanks is het mogelijk om een erosiebestendige zandlaag te creëren.

In PVC cilinders, met dezelfde afmetingen als de perspex cilinders, zijn monsters aangemaakt. Hierbij zijn verschillende additiefsamenstellingen geïnjecteerd tussen het gesuspendeerde zand. Na een uithardtijd van minimaal 8 dagen zijn de druksterkte en de erosiebestendigheid van het verkitten zand bepaald. De erosiebestendigheid werd bepaald in het erosietoestel van GeoDelft. In dit toestel wordt water rond een cilindrisch monster ($d = 6,6$ mm) bewogen door een roterende met schoepen bezette cilinder. Erosiebestendig houdt in dit onderzoek in, dat een aangemaakt monster geen gewichtsafname tijdens de erosieproef vertoont, nadat het monster steeds gedurende $2\frac{1}{2}$ uur wordt belast door stroomsnelheden van achtereenvolgens 0,5, 1,0 en 1,5 m/s.

In dit onderzoek is een eerste aanzet gegeven om te bepalen of een alternatieve methode voor erosiebestrijding toepasbare mogelijkheden heeft. Er kan geconcludeerd worden dat de alternatieve methode van erosiebestrijding perspectieven biedt, maar er zal nog nader onderzoek verricht moeten worden voordat de methode in praktijk gebracht kan worden. Dit onderzoek zal moeten beginnen met een diepgaander inzicht te verkrijgen voor de simulatie van de situatie op zee. Daarnaast zal de modellering van een fluïdisatie-apparaat waarmee het additief geïnjecteerd kan worden veel meer in detail moeten worden uitgezocht.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	iii
Samenvatting.....	iv
1. Inleiding.....	1-1
1.1. Achtergrond.....	1-1
1.2. Probleemstelling.....	1-2
1.3. Doelstellingen.....	1-2
1.4. Randvoorwaarden.....	1-3
1.5. Uitgangspunten.....	1-3
1.6. Aanpak en indeling.....	1-4
2. Fluïdisatietechnieken.....	2-1
2.1. Inleiding.....	2-1
2.2. Randvoorwaarden en uitgangspunten voor fluïdisatie.....	2-1
2.2.1. Vloeistof en bodem.....	2-1
2.2.2. Fluïdiseren.....	2-2
2.2.3. Wolk van gefluïdiseerd materiaal.....	2-3
2.2.4. Bezinken.....	2-4
2.3. Invloedsfactoren m.b.t. doorlatendheid van het gefluïdiseerde bodemmateriaal.....	2-5
3. Het additief.....	3-1
3.1. Inleiding.....	3-1
3.2. Randvoorwaarden en uitgangspunten voor het additief.....	3-1
3.2.1. Samenstelling additief.....	3-1
3.2.2. Aanmaken additief.....	3-2
3.2.3. Eigenschappen additief.....	3-2
3.2.4. Additief toevoegen aan bodem.....	3-3
3.2.5. Eigenschappen van de verstevigde bodem.....	3-3
3.3. Invloedsfactoren m.b.t. eigenschappen van de verstevigde bodem.....	3-4
4. Verwachtingen.....	4-1
4.1. Combinatie van de fluïdisatietechnieken en het additief.....	4-1
4.2. Het moment van injecteren.....	4-1
4.3. De injectiemethode.....	4-2
4.4. Verspreiding van additief in waterrijke omgeving.....	4-2
4.5. Verspreiding van additief tussen gefluïdiseerde zandkorrels.....	4-2
4.6. Het uitharden.....	4-3
5. Inleiding experimenten.....	5-1
5.1. Algemeen.....	5-1
5.2. Onderzoeksvragen.....	5-1
5.3. Wat te bepalen?.....	5-1
5.4. Wat te variëren?.....	5-2
6. Technische opzet experimenten.....	6-1
6.1. Algemeen.....	6-1
6.2. De roeropstelling.....	6-1
6.2.1. De opstelling.....	6-1
6.2.2. De opstelling nader bekeken.....	6-1
6.3. Het gesuspendeerde zand.....	6-4
6.4. Het additief.....	6-7
6.5. Het eindproduct.....	6-8
6.6. Opzet proevenprogramma.....	6-9
7. Fase 1: Oriënterende roerproeven.....	7-1
7.1. Algemeen.....	7-1
7.2. Doel.....	7-1
7.3. Constanten.....	7-1

7.4.	Variabelen	7-1
7.5.	Aanpak en resultaten van het oproeren van het grove zand (H32).....	7-2
7.5.1.	Algemeen.....	7-2
7.5.2.	Hoogte en berekende dichtheid zand-watermengsel bij een variërend toerental.	7-3
7.5.3.	Gemeten dichtheid van gesuspenderde zand.	7-4
7.5.4.	Sedimentatietijd van het gesuspenderde zand gerelateerd aan het toerental.....	7-6
7.5.5.	Positie van de roerder in de cilinder variëren.....	7-6
7.6.	Aanpak en resultaten van het oproeren van het fijne zand (S85).....	7-8
7.6.1.	Algemeen.....	7-8
7.6.2.	Hoogte en berekende dichtheid zand-watermengsel bij een variërend toerental.	7-8
7.6.3.	Gemeten dichtheid van het gesuspenderde zand.	7-10
7.6.4.	Sedimentatietijd van het gesuspenderde zand gerelateerd aan het toerental.....	7-11
7.7.	Conclusies fase 1	7-12
8.	Fase 2: Oriënterende injectieproeven.....	8-1
8.1.	Algemeen.....	8-1
8.2.	Doel	8-1
8.3.	Constanten	8-1
8.4.	Variabelen	8-2
8.5.	Aanpak en resultaten van de oriënterende injectieproeven.....	8-2
8.5.1.	Algemeen.....	8-2
8.5.2.	Eigenschappen van de verschillende mengselsamenstellingen	8-4
8.5.3.	Injectie van het additief in water	8-6
8.5.4.	Bezinken van de wolk additief	8-7
8.5.5.	Additief in combinatie met zand	8-8
8.5.6.	Toename van de viscositeit van het additief	8-8
8.6.	Conclusies fase 2.....	8-8
8.6.1.	Injectietechniek	8-8
8.6.2.	Eigenschappen van het additief.....	8-9
8.7.	Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	8-10
9.	Fase 3: Oriënterende combinatieproeven	9-1
9.1.	Algemeen.....	9-1
9.2.	Doel	9-1
9.3.	Constanten	9-1
9.4.	Variabelen	9-2
9.5.	Aanpak en resultaten van de oriënterende combinatieproeven	9-2
9.5.1.	Algemeen.....	9-2
9.5.2.	Oriënterende injecties.....	9-2
9.5.3.	Indicatie van de hoeveelheid additief tussen het bezonken zand	9-3
9.6.	Conclusies fase 3	9-6
9.7.	Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	9-7
10.	Fase 4: Eerste Monsterronde	10-1
10.1.	Algemeen.....	10-1
10.2.	Doel	10-1
10.3.	Constanten	10-1
10.4.	Variabelen	10-2
10.5.	Aanpak en resultaten van de eerste monsterronde	10-2
10.5.1.	Aanpak.....	10-2
10.5.2.	Resultaten algemeen.....	10-3
10.5.3.	Additiefsamenstellingen en -eigenschappen	10-3
10.5.4.	Eigenschappen eindproduct in het algemeen	10-4
10.5.5.	Eigenschappen monsters	10-7
10.5.6.	Opmerkingen bij de verschillende monsters	10-7
10.6.	Conclusies fase 4	10-10
10.6.1.	Eigenschappen additief.....	10-10

10.6.2.	Eigenschappen van het eindproduct	10-10
10.7.	Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	10-11
10.7.1.	Eigenschappen additief.....	10-11
10.7.2.	Eigenschappen van het eindproduct	10-11
11.	Fase 5: Tweede Monsterronde	11-1
11.1.	Algemeen.....	11-1
11.2.	Doel	11-1
11.3.	Constanten	11-1
11.4.	Variabelen	11-2
11.5.	Aanpak en resultaten van de tweede monsterronde	11-3
11.5.1.	Additiefsamenstellingen en -eigenschappen	11-3
11.5.2.	Eigenschappen eindproduct.....	11-3
11.6.	Conclusies fase 5	11-12
11.7.	Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	11-13
12.	Conclusies en aanbevelingen.....	12-1
12.1.	Conclusies	12-1
12.1.1.	Algemeen.....	12-1
12.1.2.	Eisen injectiemethode.....	12-1
12.2.	Aanbevelingen	12-2
12.2.1.	Algemeen.....	12-2
12.2.2.	Additief.....	12-3
12.2.3.	Injectiemethode	12-3
12.2.4.	Eindproduct	12-4

Bijlage 1: Terminologielijst

Bijlage 2: Principe van fluïdisatie

Bijlage 3: Originele hoofdstuk 'Verwachtingen'

Bijlage 4: Korrelverdeling zand S85

Bijlage 5: Gebruikte literatuur

1. Inleiding

1.1. Achtergrond

Een offshore pijpleiding die op de bodem van de zee gelegd wordt, is vaak onderhevig aan uitwendige krachten die de constructie kunnen beschadigen. Bij een normale ontwerpmethodiek wordt ernaar gestreefd de pijpleiding te beschermen tegen deze krachten. Hierbij is de stabiliteit van de pijpleiding een belangrijk aspect. De hydrodynamische krachten moeten in balans worden gehouden met de wrijving van de zeebodem en het eigen gewicht van de pijpleiding. Wanneer dit evenwicht niet mogelijk is, is er sprake van een instabiele pijpleiding. Een pijpleiding die geheel of gedeeltelijk in de bodem begraven is, ligt buiten het bereik van hydrodynamische belastingen en is dus stabiel dan een pijpleiding die op de bodem ligt. Bovendien ligt een ingegraven leiding buiten het bereik van bijvoorbeeld vallende en krabbende ankers en sleepnetten. Het is dus vaak gewenst de pijpleiding te beschermen door deze leiding in te graven. Vervolgens moet ervoor gezorgd worden dat de leiding op de ingegraven positie blijft liggen.

De ingraving wordt vaak gerealiseerd door de pijpleiding in een van tevoren gebaggerde geul te plaatsen. Deze geul wordt gegraven met behulp van baggermaterieel. Het is ook mogelijk dat de leiding pas nadat deze op de zeebodem is gelegd, wordt ingegraven. Dit wordt trenchen genoemd. Deze methode wordt vooral bij flexibele pijpleidingen toegepast. Het apparaat dat hiervoor gebruikt wordt, heet een trencher. In klei en harde grondsoorten gebeurt het trenchen vooral met behulp van mechanische graafmethoden. De aangewezen manier om een flexibele pijpleiding in zand te trenchen is met behulp van hydraulische methodieken. Dit is snel en veilig. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een fluïdisatieproces.

Bij het fluïdisatieproces wordt de flexibele pijpleiding ingegraven door het bodemmateriaal onder de pijpleiding in suspensie te brengen door het injecteren van water. In het aldus ontstane gefluïdiseerde zand kan de pijpleiding wegzakken. Dit zand kan als een dikke vloeistof worden beschouwd, die een bepaalde dichtheid heeft. De pijpleiding zinkt onder zijn eigen gewicht door het gesuspendeerde materiaal naar de bodem van het gefluïdiseerde gebied (de geul of trench genoemd).

Het zand dat met behulp van fluïdisatietechnieken in suspensie is gebracht, wordt niet weggebaggerd. Nadat het injecteren van water is gestopt, verliest het gesuspendeerde materiaal de specifieke eigenschappen van een dikke vloeistof. Het zand sedimenteert in de geul, rondom de leiding. Hoewel de bodem niet direct haar oorspronkelijke dichtheid terugkrijgt, blijft de pijp op de ingebedde diepte achter. In zand ontstaat in het algemeen een goede deklaag en zullen op den duur weinig gevolgen meer te zien zijn van het fluïdisatieproces dat heeft plaatsgevonden.

Het feit dat de pijpleiding is ingegraven en bedekt met een zandlaag, betekent niet dat de leiding voor altijd op deze ingegraven positie blijft liggen. Onder bepaalde condities (stroming, golven, trillingen of uitzettingen in de pijpleiding, zandgolven etc.) kunnen delen van de pijpleiding weer aan het bodemoppervlak komen te liggen. In dat geval is de kans op instabiliteit van de pijpleiding groter. Het verdwijnen van de deklaag op de leiding verhoogt de kans op een instabiliteit van de leiding.

Om te voorkomen dat de deklaag verdwijnt, wordt in veel gevallen plaatselijk een extra bodembescherming op de deklaag aangebracht; meestal in de vorm van een steenbestorting of erosiebestendige matten. Deze extra bodembescherming dient om de stabiliteit van de deklaag te waarborgen. Het eroderen en verweken van de deklaag wordt tegengegaan doordat het mobiele zand op zijn plaats wordt gehouden.

Daar deze beschermingsconstructies kostbaar zijn (vooral in diep water zijn het storten van stenen en het plaatsen van matten kostbare exercities), wordt er voortdurend gezocht naar goedkopere alternatieven. Ook Van Oord ACZ heeft zich bezig gehouden met mogelijke alternatieven. De hoofdgedachte bij dit onderzoek was, dat indien de zeebodem gestabiliseerd is, de pijpleiding dit ook is. Daarnaast moet de alternatieve bescherming aansluiten op de beschikbare expertise, met andere woorden het beschikbare materieel en de beschikbare methodieken bij Van Oord ACZ.

Aan de hand hiervan is het idee ontstaan om de erosiebestendigheid van de deklaag te verhogen door een bindend additief tussen de zandkorrels te injecteren. Hiertoe kan gebruik gemaakt worden van de trencher en het fluïdisatieproces. Door dit additief te injecteren, terwijl het bodemmateriaal zich in suspensie bevindt, is een goede verspreiding van het additief tussen de korrels mogelijk. De permeabiliteit van het gesuspendeerde materiaal is groter dan wanneer de korrels zich 'gewoon' op de bodem zouden bevinden en geeft daardoor geen beperkingen voor de verspreiding van het additief. Het is de bedoeling dat er een homogeen en samenhangend mengsel van bodemmateriaal en additief gevormd wordt, dat zich rondom de pijpleiding afzet. Na het fluïdisatieproces zal de weerstand van de deklaag tegen erosie (of andere mechanische belastingen) verbeterd zijn.

Als de methode zinvol blijkt te zijn voor het verbeteren van de erosiebestendigheid van de zandlaag, kan gekeken worden naar een groter toepassingsgebied. Mogelijke andere toepassingen betreffen het vastleggen van een zandbodem rondom een paal of pijler in stromend water, het stabiliseren van steile taluds, het vormen van een stevige fundering onder een offshore platform en het isoleren van een pijpleiding die warme vloeistoffen vervoert tegen afkoeling.

1.2. Probleemstelling

In hoeverre is het mogelijk om (rondom een afgezonken pijpleiding) met behulp van fluïdisatietechnieken een bindend additief in een zandbodem te verspreiden, waardoor deze zodanig verkit, dat een afdoende erosiebestendige deklaag boven een leiding wordt verkregen en de (thans nog gebruikelijke) bestorting van steen of erosiebestendige matten kan komen te vervallen?

1.3. Doelstellingen

Dit afstudeerproject richt zich op een onderzoek naar de mogelijkheden van een alternatieve erosiebescherming met behulp van fluïdisatietechnieken (zoals bijvoorbeeld met behulp van een trencher). Dit zal gebeuren aan de hand van een literatuuronderzoek en een experimenteel onderzoek.

Het hoofddoel is:

Meer inzicht verkrijgen in de mogelijkheden van een alternatieve methode om de erosiebestendigheid van een zandbodem te verbeteren. Bij deze alternatieve methode wordt met behulp van fluïdisatietechnieken een bindend additief tussen het korreelmateriaal verspreid, dat zorgt voor het verkitten van de bodem.

De subdoelen zijn te onderscheiden in:

- Geschikte stoffen vinden die:
 1. tussen het gefluïdiseerde bodemmateriaal geïnjecteerd kunnen worden en vervolgens mengen met het korreelmateriaal;
 2. de zeebodem zodanig verkitten, dat deze bestand is tegen optredende belastingen.
- Inzicht krijgen in de problemen, die kunnen optreden bij het aanbrengen van een bindend additief tussen gefluïdiseerd bodemmateriaal, en de invloedsfactoren die hierbij van belang zijn.
- Een uitspraak doen over de te bereiken erosieweerstand van de verkitte bodem.

1.4. Randvoorwaarden

De beoogde erosiebestendigheid van een zandbodem zal verbeterd moeten worden door gebruik te maken van fluïdisatietechnieken en een trencher. Het additief moet met behulp van de trencher tussen het bodemmateriaal geïnjecteerd kunnen worden en vervolgens met het bodemmateriaal gemengd kunnen worden.

Daar offshore pijpleidingen in zee liggen, moet het additief bestand zijn tegen de fysische eigenschappen van het zeewater.

Het toevoegen van een bindend additief aan het bodemmateriaal mag geen nadelige invloeden op het milieu en de omgeving hebben.

In verband met mechanische belastingen ten gevolge van bijvoorbeeld vallende ankers, is het gewenst dat de verstevigde deklaag, naast erosiebestendigheid ook enige sterkte heeft.

1.5. Uitgangspunten

Gedurende de rest van dit onderzoek wordt geen rekening gehouden met de aanwezigheid van de pijpleiding in de bodem (eventuele trillingen in de pijpleiding of temperatuurschommelingen ten gevolge van de stof die door de leiding stroomt zijn dus niet van belang). Het gaat om het verbeteren van de erosiebestendigheid van de deklaag van zand. De afmetingen en eigenschappen van de pijpleiding vereisen een bepaalde ingraafdiepte en daardoor een bepaalde grootte van het gebied, dat wordt gefluïdiseerd. De eigenschappen van de trencher bepalen uiteindelijk hoe groot het gebied kan zijn dat in suspensie wordt gebracht.

Naar verwachting lijkt een trencher, zoals deze op dit moment wordt gebruikt, niet geschikt voor het verspreiden van een bindend additief in de bodem. Het wegsputten van zand met behulp van de waterstralen uit een trencher is namelijk een turbulent proces, waardoor ongewenste verliezen van het additief kunnen optreden. Er zullen waarschijnlijk aanpassingen nodig zijn, waardoor het injecteren een controleerbaar proces wordt. Hoe deze aanpassingen eruit zullen zien, moet nog bepaald worden. In dit onderzoek wordt er van uitgegaan dat aanpassingen mogelijk zijn en dat een aangepaste trencher gebruikt kan worden voor het gecontroleerd injecteren van een bindend additief. De verliezen ten gevolge van turbulentie zullen dan minimaal zijn.

Ondanks het feit dat wordt aangenomen dat het injecteren gecontroleerd kan plaatsvinden, mag verwacht worden dat het aanbrengen van een bindend additief in de bodem met behulp van het fluïdisatieproces nog nadere problemen zal geven. Uit onderzoek zal moeten blijken in hoeverre deze problemen opgelost kunnen worden.

Bij dit onderzoek wordt ervan uitgegaan dat de permeabiliteit van het bodemmateriaal op het moment dat het bindende additief wordt geïnjecteerd, geen beperkingen oplegt ten aanzien van de stromingseigenschappen (het reologische gedrag) van het te gebruiken additief. Het additief verspreidt zich zonder problemen door het gehele gefluïdiseerde gebied. De benodigde injectiedruk en injectiesnelheid om dit te bereiken zijn (in eerste instantie) niet van belang.

De bodemeigenschappen tijdens de injectie van het bindende additief zijn voornamelijk afhankelijk van de korrelverdeling, de korrelgrootte en de korrelvorm van het gefluïdiseerde zand. Voor zover de bodemeigenschappen invloed hebben op de eindsterkte van de verkitte bodem, wordt aangenomen dat dit voornamelijk bepaald wordt door deze korreleigenschappen. Het lijkt aannemelijk dat de andere eigenschappen van de originele zandbodem (zoals de dichtheid, de sterkte en de hoek van inwendige wrijving) niet meer van toepassing zijn, nadat het zand gefluïdiseerd is geweest. Hoe deze

eigenschappen zich in de loop der tijd zullen ontwikkelen is afhankelijk van de genoemde korreleigenschappen en de belastingen.

Na het aanbrengen van het bindende additief tussen het bodemzand is het gewenst dat het mengsel van additief en korrelmateriaal een zekere mate van homogeniteit heeft. Bij het fluïdiseren van de bodem en het verspreiden van het additief tussen het bodemmateriaal, moet er gestreefd worden naar minimaal verlies van additief en bodemmateriaal.

Aangezien pijpleidingen over de hele wereld offshore worden gelegd, variëren de aanwezige omgevingscondities (golven, stroming, waterdiepte, bodemligging, bodemeigenschappen, morfologische omstandigheden enz.) per locatie. Uiteindelijk moet de alternatieve methode voor erosiebestrijding breed toepasbaar zijn.

In het onderzoek wordt uitgegaan van een horizontale zandbodem in diep water die belast wordt door stroming. De geotechnische eigenschappen van de bodem (zoals de dichtheid, de sterkte en de korrelverdeling) zijn constant verondersteld. Er treedt geen noemenswaardig sedimenttransport op gedurende de uithardtijd van het additief.

De fysische eigenschappen van het zeewater zijn gedurende dit onderzoek constant verondersteld.

Het effect van het bindende additief in de bodem moet qua erosiebestendigheid de stenen deklaag of de erosiebestendige matten kunnen vervangen. De economische levensduur van de verkitte bodemversteving moet vergelijkbaar zijn met de economische levensduur van de conventionele bodembeschermingen.

Dit onderzoek richt zich in eerste instantie op de technische haalbaarheid van de alternatieve methode voor erosiebestrijding. Pas als het technische haalbaar blijkt, kan gekeken worden naar de economische haalbaarheid.

Er wordt aangenomen dat wanneer de alternatieve methode voor erosiebestrijding in zeewater haalbaar is, er voor de toepassing in zoet water nauwelijks aanpassingen nodig zijn.

Als met behulp van deze methode de erosiebestendigheid van een zandlaag, belast door stroming, verbeterd kan worden, kan vervolgens gekeken worden naar het gedrag van een zandlaag onder andere belastingsomstandigheden, zoals een combinatie van stroming en golven. Daarnaast kan gekeken worden naar andere toepassingsgebieden voor het injecteren van een bindend additief met behulp van fluïdisatietechnieken.

1.6. Aanpak en indeling

Het onderzoek bestaat uit twee delen: een literatuuronderzoek en een experimenteel onderzoek. Het uitgebreide literatuuronderzoek is in een apart rapport opgenomen, dat gezien kan worden als naslagwerk. De belangrijkste feiten uit dit literatuuronderzoek zijn ook in dit eindverslag opgenomen.

In het eindverslag zullen in elk hoofdstuk puntsgewijs de belangrijke aspecten passeren. Deze punten zijn per hoofdstuk genummerd, zodat er op elk moment naar verwezen kan worden.

Het eindverslag van het onderzoek is als volgt ingedeeld:

Na de inleiding in hoofdstuk 1, zijn in hoofdstuk 2 en 3 de belangrijkste feiten uit het literatuuronderzoek samengevat in randvoorwaarden en uitgangspunten voor respectievelijk de fluïdisatie en het additief.

Wanneer een additief wordt geïnjecteerd tussen gefluïdiseerd bodemmateriaal, zijn andere factoren van belang dan bij injectieprocedures in 'normaal, in situ' bodemmateriaal. Aangezien op deze manier nog nooit een additief aan een bodem is toegevoegd, kan hier niets met zekerheid over gezegd

worden. Hoofdstuk 4 bevat de verwachtingen van een dergelijke injectie. Uit de experimenten zal blijken in hoeverre deze verwachtingen juist zijn.

De hoofdstukken 5 en 6 hebben betrekking op de voorbereiding van de experimenten. Als eerste wordt in hoofdstuk 5 besproken welke eigenschappen van het additief, het gefluïdiseerde zand, de injectie (van het additief tussen het zand) en het eindproduct (de gemodelleerde verstevigde bodem) tijdens de experimenten bepaald moeten worden. Tevens zijn de mogelijke variabelen in het proces van fluïdisatie en injectie van een additief, op een rijtje gezet. In hoofdstuk 6 wordt uitleg gegeven over de technische opzet van de experimenten.

Hoofdstuk 7 tot en met hoofdstuk 11 bevatten de uitvoering van het proevenprogramma en de resultaten van de experimenten. De experimenten zijn opgedeeld in vijf fasen. In elk hoofdstuk wordt een fase besproken.

- Oriënterende roerproeven (hoofdstuk 7).
- Oriënterende injectieproeven (hoofdstuk 8).
- Oriënterende combinatieproeven (hoofdstuk 9).
- Eerste monsterronde (hoofdstuk 10).
- Tweede monsterronde (hoofdstuk 11).

In hoofdstuk 12 volgen de conclusies van het onderzoek en zullen aan de hand van de resultaten aanbevelingen gedaan worden voor verder detailonderzoek en implementatie.

Bijlage 1 bevat een terminologielijst, waarin onbekende begrippen uit de tekst kunnen worden opgezocht.

Het literatuuronderzoek staat in een apart rapport. Het literatuurverslag is als volgt ingedeeld:

Na de inleiding van hoofdstuk 1, is in hoofdstuk 2 het fluïdisatieproces bekeken.

Vervolgens is er in hoofdstuk 3 aandacht besteed aan grouten en de daarbij gebruikte materialen. De reden hiervoor is dat in dit onderzoek, net als bij grouten, een additief aan de bodem wordt toegevoegd met het doel de eigenschappen van deze bodem te verbeteren. Aan de hand van de bestaande groutmaterialen komen cement-bentonietsuspensies naar voren als het meest geschikte materiaal voor het additief in dit onderzoek.

De samenstelling en eigenschappen van cement-bentonietsuspensies komen in hoofdstuk 4 uitgebreid aan bod. Aangezien dit laatste hoofdstuk redelijk uitgebreid is, wordt het aan het eind kort samengevat.

2. Fluïdisatietechnieken

2.1. Inleiding

Bij fluïdiseren wordt zand door het injecteren van water in suspensie gebracht. Het principe van fluïdisatie is gebaseerd op het feit dat een vloeistof die van beneden naar boven door een laag granulair materiaal stroomt, een opwaartse kracht uitoefent op elke individuele korrel in deze laag. Op het moment dat de opwaartse kracht groter is dan het eigen gewicht van de deeltjes verdwijnt het contact tussen de deeltjes onderling en worden de deeltjes ondersteund door de vloeistof. Er is een gefluïdiseerde massa ontstaan met een bepaalde dichtheid.

Door het gebruik van een trencher ontstaat een geul van gefluïdiseerd materiaal, waarin de pijpleiding onder invloed van zijn eigen gewicht kan wegzakken.

De dichtheid van het gefluïdiseerde materiaal moet ervoor zorgen dat wanden van de geul stabiel blijven, terwijl de pijpleiding naar de bodem van het gefluïdiseerde gebied zakt. Deze dichtheid moet groot genoeg zijn om voldoende steundruk aan de wanden te leveren. Daarnaast is de dichtheid bepalend voor de snelheid waarmee de pijpleiding naar de bodem van de geul zinkt. Als dit te snel gebeurt, bestaat de kans dat de spanningen in de leiding te groot worden en er scheurvorming in de leiding optreedt.

Voor informatie over de trencher, zijn werking en het gefluïdiseerde bodemmateriaal wordt verwezen naar hoofdstuk 2 van de literatuurstudie.

In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan de randvoorwaarden en uitgangspunten, die een rol spelen bij fluïdisatie. De randvoorwaarden en uitgangspunten volgen uit de literatuurstudie. Er wordt in dit hoofdstuk ingegaan op de volgende aspecten:

- Vloeistof en bodem
- Fluïdiseren
- Wolk van gefluïdiseerd materiaal
- Bezinken

Deze randvoorwaarden en uitgangspunten zijn genummerd zodat er in de tekst naar verwezen kan worden, als dat nodig is. Dit verwijzen gebeurt middels rechte haken om het nummer van het betreffende punt, bijvoorbeeld [F4].

Aan het eind van dit hoofdstuk worden de invloedsfactoren met betrekking tot de doorlatendheid van het gefluïdiseerde bodemmateriaal op een rijtje gezet.

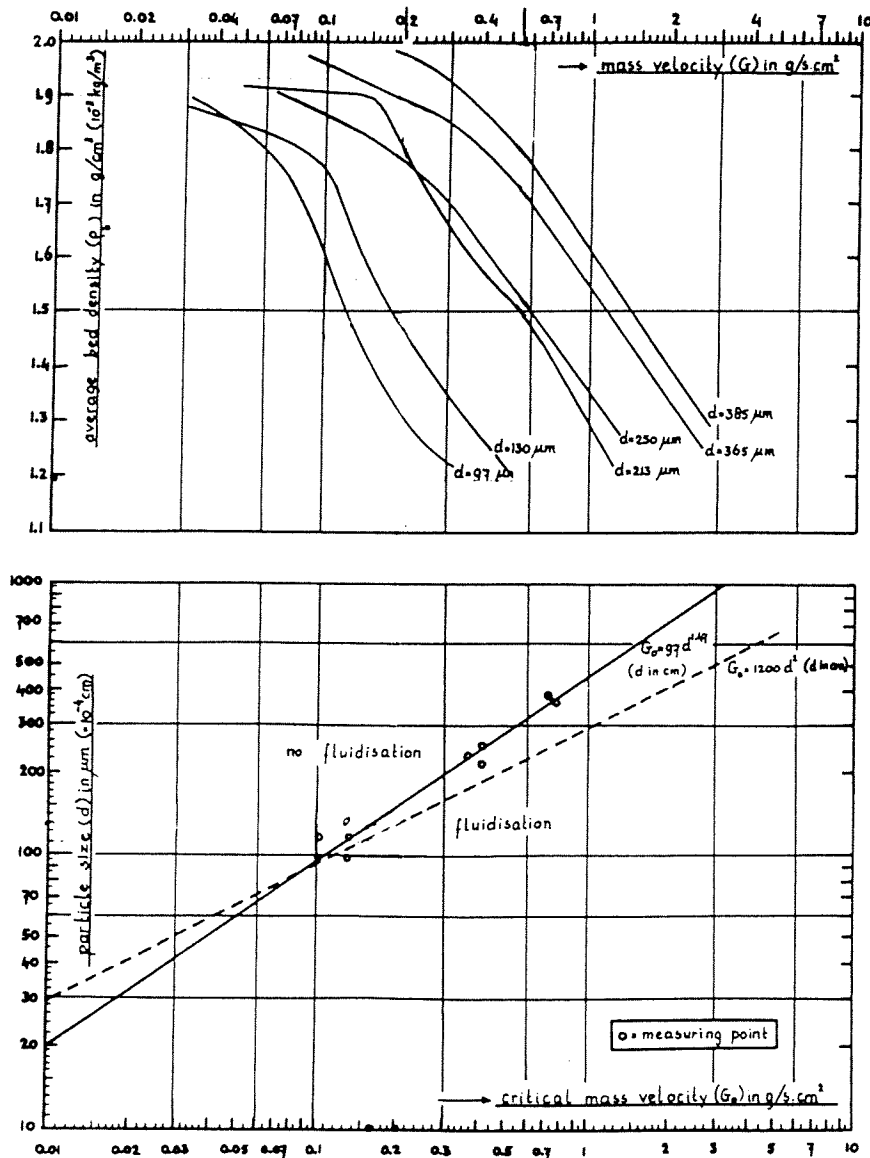
2.2. Randvoorwaarden en uitgangspunten voor fluïdisatie

2.2.1. Vloeistof en bodem

- F1** De vloeistof die gebruikt wordt om het bodemmateriaal te fluïdiseren, is (zee)water.
- F2** Het granulair materiaal is zand. Zand heeft een korrelgrootte, die ligt tussen de 0,063 en 2 mm.
- F3** De natte dichtheid van dit zand in situ is 2000 kg/m^3 , bij volledige verzadiging en een porositeitsindex van 0,4.

2.2.2. Fluidiseren

- F4** De stroming van water door een laag granulair materiaal geeft een wrijvingskracht tussen het water en het systeem van korrels. De kracht die door het water op de korrels wordt uitgeoefend per eenheid van volume, wordt de stromingsdruk genoemd (dit is eigenlijk geen druk, maar een volumekracht (kracht per volume)). Op het moment dat de stromingsdruk gelijk is aan het volumegewicht van de korrels onder water, worden de korrelspanningen nul. Deze situatie is kritiek. Tussen de korrels worden dan geen krachten meer overgedragen. De grond heeft dan geen enkele weerstand meer; er is drijfzand ontstaan.
- F5** De stromingsdruk is evenredig met de volumestroomdichtheid van het water. De benodigde volumestroomdichtheid (m^3/s per $\text{m}^2 = \text{m/s}$) om het zand te fluïdiseren kan worden uitgedrukt als een kritische massa-snelheid in kg/s.m^2 , door de volumestroomdichtheid te vermenigvuldigen met de dichtheid van het water. Een volumestroomdichtheid van het water door de zandlaag van $0,01 \text{ m/s}$ komt overeen met een massa-snelheid van 10 kg/s.m^2 .
- F6** De benodigde kritische massa-snelheid is onafhankelijk van de afmetingen (dikte, breedte) van de zandlaag.
- F7** In de kritieke toestand is de verticale snelheid van het water zo groot, dat de opwaartse wrijvingskracht op de korrels er toe leidt dat ze geen contact meer met elkaar hebben en geen samenhang meer vertonen. De minimaal benodigde volumestroomdichtheid om het zand te fluïdiseren, is afhankelijk van de korrelgrootte van het zand. Grotere korrels hebben een groter gewicht en vereisen een grotere volumestroomdichtheid. Als uitgangspunt voor de benodigde snelheid dient figuur 2.1 (in deze figuur is de massa-snelheid uitgedrukt in g/s.cm^2 , er geldt: $10 \text{ kg/s.m}^2 = 1 \text{ g/s.cm}^2$). In bijlage 2 wordt uitgebreider ingegaan op het principe van fluïdisatie.



Figuur 2.1: Benodigde snelheid om zand te fluïdiseren

2.2.3. Wolk van gefluïdiseerd materiaal

- F8** In dit onderzoek wordt alleen rekening gehouden met de gewenste dichtheid van het gefluïdiseerde zand voor de stabiliteit van de geulwanden (zie F13).
- F9** De dichtheid van het gefluïdiseerde materiaal is afhankelijk van de snelheid van het injectiewater. Een hogere snelheid (bij dezelfde korrelgrootte) geeft een kleinere dichtheid. Als uitgangspunt voor de dichtheid van het gefluïdiseerde materiaal dient figuur 2.1.
- F10** Een kleinere dichtheid van het gefluïdiseerde materiaal geeft een grotere doorlatendheid.
- F11** Bij een gelijke dichtheid van het gefluïdiseerde materiaal, zal de doorlatendheid bij grovere korrels groter zijn dan bij fijnere korrels.

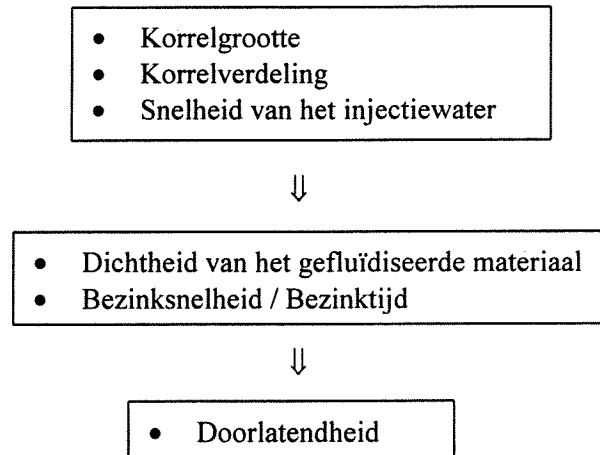
- F12** Bij een gegradeerde zandbodem neemt de dichtheid van het gefluïdiseerde bed van boven naar beneden toe. De grotere korrels bepalen de vereiste snelheid van het injectiewater. De kleinere korrels verplaatsen zich bij die snelheid naar de bovenzijde van het gefluïdiseerde gebied, de grovere korrels bevinden zich onderin.
- F13** Bij dit onderzoek is uitgegaan van een geul met een breedte van 0,65 m en een diepte van 1,5 m. Deze geul wordt in dit onderzoek per strekkende meter bekeken. Het gebied, dat gefluïdiseerd moet worden, is 1 m^3 .
- F14** De verticale wanden van de geul zijn stabiel, als de dichtheid van het gefluïdiseerde zand groter is dan 1300 kg/m^3 . Bij een dichtheid van 1300 kg/m^3 wordt dus de grootste doorlatendheid van het gefluïdiseerde materiaal in de geul bereikt [F9, F12]. Deze dichtheid zal dienen als uitgangspunt voor dit onderzoek.

2.2.4. Bezinken

- F15** De bezinksnelheid en de bezinktijd zijn afhankelijk van de korrelgrootte en de concentratie (dichtheid) van het gefluïdiseerde materiaal. Voor medium grove korrels met een diameter van 0,35 mm, duurt de bezinktijd ongeveer 32 seconden in de geul [F11]. Voor fijne korrels met een diameter van 0,15 mm duurt deze bezinktijd ongeveer 100 seconden.
- F16** Alleen het gefluïdiseerde materiaal dat zich in de geul bevindt, zal bezinken op de pijpleiding. Het materiaal dat zich buiten de geul verplaatst, zal worden meegevoerd met de aanwezige stroming of ter plaatse neerslaan. De wanden van de geul worden instabiel op het moment dat het gefluïdiseerde bodemmateriaal zo ver is bezonken, dat het geen voldoende steundruk meer geeft. Het bovenste deel van de geul wordt opgevuld door het zand van deze ingestorte wanden.
- F17** Nadat het zand weer is bezonken, zal dit zand minder dicht gepakt zijn dan in de oorspronkelijke situatie.

2.3. Invloedsfactoren m.b.t. doorlatendheid van het geïnfundeerde bodemmateriaal

In de volgende figuur zijn de invloedsfactoren met betrekking tot de doorlatendheid van het geïnfundeerde materiaal aangegeven. Een $\Downarrow$ betekent: 'hebben invloed op'



Figuur 2.2: Invloedsfactoren met betrekking tot de doorlatendheid

3. Het additief

3.1. Inleiding

In dit onderzoek wordt een additief aan het bodemmateriaal toegevoegd, met het doel de eigenschappen van de bodem te verbeteren. Dit additief wordt geïnjecteerd tussen het gesuspendeerde korrelmateriaal. De verbetering van de eigenschappen van de bodem ontstaat, doordat de injectievloeistof opstijft en verhardt, nadat die zijn uiteindelijke positie tussen het bodemmateriaal (zand) heeft bereikt. De zandkorrels zullen aan elkaar gekit worden door het additief.

Er is onderzoek verricht naar grouten, omdat bij grouten ook een additief aan de bodem wordt toegevoegd, met het doel de eigenschappen van de bodem te verbeteren. Voor meer informatie over grouten en groutmaterialen wordt verwezen naar hoofdstuk 3 van de literatuurstudie.

Aan de hand van een studie naar materialen die bij grouten worden gebruikt om de eigenschappen van een bodem te verbeteren, is besloten om cement-bentonietsuspensies als additief te gebruiken in dit onderzoek. Dergelijke suspensies zijn het goedkoopste alternatief, wanneer de permeabiliteit van de bodem de verspreiding van het additief niet beperkt. Bovendien zijn cement-bentonietsuspensies milieu-neutraal.

De toevoeging van bentoniet aan een cementsuspensie zorgt voor een stabiele, homogene suspensie. Daarnaast vergroot de toevoeging van bentoniet de weerstand tegen ontmenging en uitspoeling. Voor meer informatie over deze suspensie wordt verwezen naar hoofdstuk 4 van de literatuurstudie.

In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan de randvoorwaarden en uitgangspunten, die een rol spelen bij cement-bentonietsuspensies. Deze randvoorwaarden en uitgangspunten zijn uit de literatuur naar voren gekomen en zijn voor het experimentele deel van dit onderzoek van belang. Er wordt in dit hoofdstuk ingegaan op de volgende aspecten:

- Samenstelling additief
- Aanmaken additief
- Eigenschappen additief
- Additief toevoegen aan bodem
- Eigenschappen versterkte bodem.

Deze randvoorwaarden en uitgangspunten zijn genummerd zodat er in de tekst naar verwezen kan worden, als dat nodig is. Dit verwijzen gebeurt middels rechte haken om het nummer van het betreffende punt, bijvoorbeeld [A4].

Tot slot worden de invloedsfactoren met betrekking tot de eigenschappen van de versterkte bodem op een rijtje gezet.

3.2. Randvoorwaarden en uitgangspunten voor het additief

3.2.1. Samenstelling additief

- A1** De gebruikte cement-bentonietsuspensies bestaan uit hoogovencement (CEM III B 42,5) en geactiveerde natriumbentoniet, aangemaakt met zoet water.
- A2** In eerste instantie zal geen gebruik gemaakt worden van hulpstoffen, die het gedrag van de suspensie kunnen beïnvloeden.

- A3 De maalfijnheid van het cement is afhankelijk van de leverancier.
- A4 De water/cement-factor (W/C-factor) van de cement-bentonietsuspensie moet tussen de 0,8 en 8 liggen en het bentonietpercentage kan variëren van 1 tot 6 % (ten opzichte van het gewicht van het gebruikte water).

3.2.2. Aanmaken additief

- A5 Het aanmaken van de cement-bentonietsuspensie geschiedt door allereerst bentoniet met zoet water te mengen en dit mengsel enige uren te laten rijpen tot een stabiele suspensie is ontstaan. Vervolgens kan het cement in korrelvorm worden toegevoegd. Wanneer bentoniet wordt aangemaakt met zout water, zal er geen stabiele suspensie ontstaan. De bentonietkorrels zullen op de bodem van het mengvat blijven liggen.
- A6 Zowel het mengen van bentoniet met water als het mengen van cement met de bentoniet-suspensie geschiedt met hoge toeren mengers.

3.2.3. Eigenschappen additief

- A7 Een cement-bentonietsuspensie is een Binghamse vloeistof en heeft dus een grensschuifspanning. Deze grensschuifspanning wordt de cohesie van de suspensie genoemd en mag niet hoger dan 50 Pa zijn [Kutzner, 1996]. Bij de suspensies die in dit onderzoek gebruikt zullen worden, wordt deze cohesie niet bereikt.
- A8 Een cement-bentonietsuspensie is verwerkbaar (verpompbaar/injecteerbaar) als geldt dat de Marsh-viscositeit < 60 s/l is [CUR, 1997 en Bruce e.a., 1997]. De Marsh-viscositeit wordt bepaald met de Marsh-trechter. De uitstroomtijd (s) van een liter (l) vloeistof in deze trechter is een maat voor de viscositeit van die vloeistof. De uitstroomtijd van water is ongeveer 28 s/l.
- A9 De viscositeit van de suspensie wordt beïnvloed door de mengenergie. Dit is de energie die tijdens het aanmaken van de suspensie wordt gebruikt. Meer mengenergie leidt tot een lagere viscositeit. De toegevoegde hoeveelheid mengenergie wordt bepaald door het toerental en de roertijd.
- A10 In dit onderzoek zal met stabiele suspensies gewerkt worden. Deze stabiliteit is nodig in verband met de verwerkbaarheid van het additief. Op het moment dat een instabiele suspensie stilstaat in een leiding, zal deze suspensie uitzakken en de leiding verstoppen. Met name bij activiteiten offshore, is dit ongewenst. Een suspensie is stabiel als geldt dat $dH/H < 10\%$ [Kutzner, 1997]. Een stabiele suspensie is een homogene suspensie met constante eigenschappen. Als een suspensie stil staat, treedt er sedimentatie op. De vaste deeltjes (de korrels) van de suspensie zullen bezinken. Boven deze bezonken deeltjes blijft een laagje vrij water staan. De stabiliteit van een suspensie kan worden gemeten in een cilinder. De verhouding tussen de dikte van de laag vrij water (dH) en de dikte van de laag bezonken korrels (H) is een maat voor de stabiliteit. Hoe meer deeltjes een suspensie bevat, hoe stabielere de suspensie is.
- A11 Een hogere W/C-factor vermindert de cohesie, de viscositeit en de stabiliteit van de suspensie.
- A12 Een hoger bentonietpercentage vergroot de cohesie, de viscositeit en de stabiliteit van de suspensie.

3.2.4. Additief toevoegen aan bodem

- A13** De afzettijd is de tijdsduur dat de cement-bentonietsuspensie verwerkbaar is, vanaf het moment dat het cement aan de bentonietsuspensie wordt toegevoegd. De afzettijd van cement-bentonietsuspensies duurt 2 tot 4 uur [Kutzner, 1996]. Dit is lang genoeg om het additief zonder problemen als vloeistof te verpompen en te injecteren tussen het bodemmateriaal.
- A14** Tijdens het injecteren moet het aantal interrupties beperkt worden, aangezien een interruptie de kans op verstopping van de injectiepunten en leidingen vergroot.
- A15** Voor een goede verspreiding van cement-bentonietsuspensies moet de permeabiliteit van het bodemmateriaal groter dan 10^{-4} m/s zijn. In dit onderzoek is deze eis niet van toepassing, omdat het gesuspendeerde zand tijdens de injectie van het additief zal worden verdrongen. Zandkorrels in suspensie hebben geen onderling contact meer. Hierdoor kunnen ze geen weerstand bieden aan de injectiedruk. De permeabiliteit van het bezonken zand is te klein voor een goede verspreiding van cement-bentonietsuspensies.
- A16** Bij een vloeistof met een grote viscositeit zal voor een zelfde verspreiding een grotere druk nodig zijn dan bij een vloeistof met een kleine viscositeit.
- A17** Het is gewenst dat het water dat zich tussen het korrelmateriaal bevindt, wordt vervangen door additief, met minimale verdunning, ontmenging of verslechtering van de eigenschappen van het additief.
- A18** Om verslechtering van de eigenschappen van het additief te voorkomen, wanneer dit in een waterrijke omgeving wordt geïnjecteerd, zijn een grote cohesie en viscositeit vereist. Een vloeistof met een lage viscositeit wordt verdrongen door een vloeistof met een hogere viscositeit.
- A19** De invloed van het zeewater op de eigenschappen van cement-bentonietsuspensies is gering tot matig.

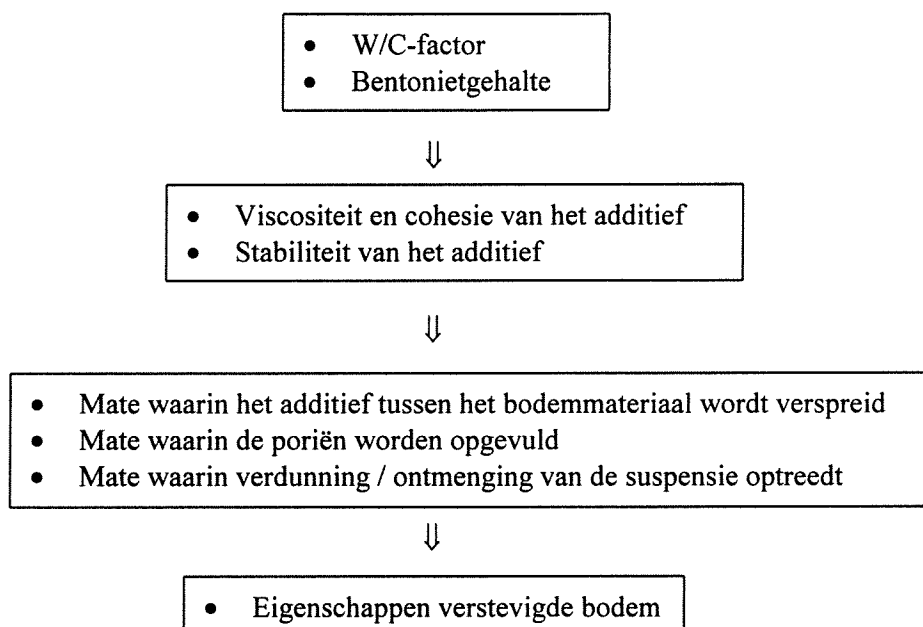
3.2.5. Eigenschappen van de verstevigde bodem

- A20** Het toevoegen van een additief aan een bodem heeft meer effect, qua sterkte en afdichting, wanneer de poriën beter opgevuld worden en wanneer een homogeen mengsel van bodemmateriaal en additief ontstaat.
- A21** De permeabiliteit van het verstevigde gebied is afhankelijk van:
- A21.1** Mate waarin het additief tussen het bodemmateriaal wordt verspreid.
 - A21.2** Mate waarin de poriën worden opgevuld.
 - A21.3** Permeabiliteit van de suspensie (m.n. afhankelijk van het gebruikte bentonietpercentage).
 - A21.4** W/C-factor bij het begin van het uitharden.
- A22** De druksterkte van het verstevigde gebied is afhankelijk van:
- A22.1** Mate waarin het additief tussen het bodemmateriaal wordt verspreid.
 - A22.2** Mate waarin de poriën worden opgevuld.
 - A22.3** W/C-factor bij het begin van uitharden.
- A23** Het verlies aan sterkte van het uitgeharde materiaal, dat ontstaat door het toevoegen van bentoniet, is verwaarloosbaar tot een toevoeging van 6% bentoniet.

- A24** Toevoeging van bentoniet vergroot de vervormingscapaciteit van een cement-bentonietsuspensie en verkleint de elasticiteitsmodulus. Wanneer zand aan dit mengsel wordt toegevoegd, leidt dit tot een hogere elasticiteitsmodulus.
- A25** Door het toevoegen van een cement-bentonietsuspensie aan de zandbodem zal in de loop der tijd een (zacht of hard) rotsachtig materiaal ontstaan.
- A26** Door de aanwezigheid van langsstroming kan de verstevigde bodem desintegreren. Kruipdeformaties van uitgeharde cement-bentonietsuspensies, die kunnen ontstaan ten gevolge van een langdurige belasting, blijken relatief klein te zijn; er treedt brosse breuk op. Dit zal ook gebeuren wanneer deze suspensies met zand gemengd zijn, want de aanwezigheid van het zand vergroot de stijfheid.
- A27** Nadat het additief is uitgehard, zal geen dehydratatie of heroplossing ten gevolge van het aanwezige zeewater optreden.

3.3. Invloedsfactoren m.b.t. eigenschappen van de verstevigde bodem

In de volgende figuur zijn de invloedsfactoren met betrekking tot eigenschappen van de verstevigde bodem aangegeven. Een $\Downarrow$ betekent: 'hebben invloed op'



Figuur 3.1: Invloedsfactoren met betrekking tot eigenschappen van de verstevigde bodem

4. Verwachtingen

4.1. *Combinatie van de geïndustrialiseerde technieken en het additief*

Nadat het bodemmateriaal is geïndustrialiseerd, heeft het een grotere porositeit en daardoor een grotere doorlatendheid dan het insitu materiaal. In dit onderzoek wordt hiervan gebruik gemaakt door een additief te injecteren terwijl het bodemmateriaal is geïndustrialiseerd. Er is aangenomen dat de ruimte tussen de geïndustrialiseerde korrels (de doorlatendheid) op dat moment voldoende is voor een goede verspreiding van het additief. Naar aanleiding van berekeningen in hoofdstuk 2 van de literatuurstudie, met betrekking tot de toename van de porositeit en de afmetingen van het geïndustrialiseerde gebied ten opzichte van de insitu situatie, lijkt deze aanname wel redelijk. Bovendien wordt verwacht dat het gesuspendeerde zand zal worden verdrongen wanneer het additief wordt geïnjecteerd [A15], ongeacht de aanwezige permeabiliteit van het bodemmateriaal en de viscositeit van het additief.

Tijdens het injecteren van het additief tussen het geïndustrialiseerde bodemmateriaal is gewenst dat:

- Het water uit de ruimte tussen de geïndustrialiseerde korrels wordt verdrongen door het additief.
- Het mengsel van additief en korrelmateriaal een zekere mate van homogeniteit heeft.

Nadat het mengsel van additief en bodemmateriaal is bezonken, moet een versterkt gebied ontstaan.

Wanneer een additief wordt geïnjecteerd tussen geïndustrialiseerd bodemmateriaal, zijn andere factoren van belang dan bij injectieprocedures in 'normaal, in situ' bodemmateriaal. Aangezien op deze manier nog nooit een additief aan een bodem is toegevoegd, kon moesten experimenten meer zekerheid geven over deze factoren en hun invloed. In dit hoofdstuk wordt kort besproken wat de verwachtingen waren van wat er zou gebeuren, wanneer een additief wordt geïnjecteerd, nadat een bodem is geïndustrialiseerd. Aan de hand van deze verwachtingen zijn de experimenten opgezet en zijn de onderzoeksvragen van hoofdstuk 5 geformuleerd. In dit hoofdstuk zijn de oorspronkelijk geformuleerde verwachtingen in verkorte versie beschreven. Het originele hoofdstuk met de verwachtingen is opgenomen in bijlage 3. Uit de experimenten is achteraf gebleken in hoeverre deze verwachtingen juist waren. Hiervoor wordt verwezen naar hoofdstuk 8, waarin de conclusies van dit onderzoek worden beschreven.

Er zal in dit hoofdstuk worden ingegaan op de volgende aspecten:

- Moment van injecteren
- Injectiemethode
- Verspreiding van additief in waterrijke omgeving
- Verspreiding van additief tussen geïndustrialiseerde zandkorrels
- Uitharden.

4.2. *Het moment van injecteren*

Het additief moet geïnjecteerd worden, nadat met het injecteren van water gestopt is en de turbulentie is verminderd. Hierdoor zullen de verdunning en ontmenging van het additief minimaal zijn. Daarnaast moet het additief geïnjecteerd worden voordat de doorlatendheid van het bezinkende bodemmateriaal te klein wordt voor een goede verspreiding. Ook moet het additief tussen het geïndustrialiseerde bodemmateriaal geïnjecteerd worden, voordat de wanden van de geul instorten.

4.3. De injectiemethode

Als het injecteren van een bindend additief wordt gekoppeld aan een trencher, zal dit een continu proces worden, waarbij het injectiepunt (of de injectiepunten) zich verplaatst. In eerste instantie zal in dit onderzoek geen bewegend injectiepunt worden gebruikt.

Wanneer het additief onder in de geul wordt geïnjecteerd, wordt verwacht dat de verliezen van het additief minimaal zullen zijn.

4.4. Verspreiding van additief in waterrijke omgeving

Door de aanwezigheid van bentoniet in de suspensie zijn de cohesie en de viscositeit van het additief zo groot, dat er geen ontmenging en verdunning optreedt, wanneer het additief wordt geïnjecteerd in water. Als er actief gemengd wordt tijdens de injectie van het additief zal de suspensie wel met het zeewater mengen en verdunnen (de W/C-factor neem toe). De sterkte zal hierdoor afnemen.

4.5. Verspreiding van additief tussen gefluidiseerde zandkorrels

Voor dit onderzoek is met name de mate waarin de cement-bentonietsuspensie zich zal verspreiden tussen en mengen met het gefluidiseerde zand, een onzekere factor. De mate waarin deze verspreiding en menging optreden, is bepalend voor de eigenschappen van het eindproduct.

Wanneer de dichtheid van het gefluidiseerde bodemmateriaal groter is, zal er minder bodemmateriaal verloren gaan. Er zal meer bodemmateriaal in de geul aanwezig zijn, waartussen het additief geïnjecteerd kan worden. Een grotere dichtheid geeft echter een mindere doorlatendheid, waardoor de verspreiding minder gunstig verloopt. Dit kan negatief zijn in verband met de eigenschappen van het eindproduct.

Het is mogelijk dat het geïnjecteerde additief zich wel verspreidt, maar niet mengt met de gefluidiseerde korrels. De grote cohesie en viscositeit van het additief zorgen er in dat geval voor dat het additief tijdens het injecteren zowel het water als het korrelmateriaal verdringt. Nadat gestopt is met de injectie van additief, zal het additief de bezonken zandkorrels dragen, maar er niet mee mengen. Dit draagvermogen ontstaat ook ten gevolge van de grote cohesie en viscositeit van het additief.

Bij een lage viscositeit van het additief vergroot de kans op ontmenging en verdunning, maar kan de menging van het additief met het gefluidiseerde bodemmateriaal eventueel beter tot stand komen. Het additief heeft minder draagvermogen, waardoor de zandkorrels wel bezinken tussen het additief en er eventueel betere eigenschappen van het eindproduct ontstaan. Er zal een viscositeit van het additief gevonden moeten worden, waarbij de ontmenging/verdunning van het additief minimaal is en de verspreiding tussen en menging met het korrelmateriaal maximaal (invloed van draagvermogen minimaal).

Eventueel kunnen de verspreiding en menging verbeterd worden door actief te mengen, terwijl het additief tussen het gefluidiseerde bodemmateriaal wordt geïnjecteerd. Er zal verdunning optreden en daarmee een afname van de sterkte-involed van het additief. Ondanks deze afname, is het mogelijk dat de ontwikkelde sterkte voldoende is om de aanwezige stroming te weerstaan. De eigenschappen van het eindproduct zullen beter zijn dan wanneer er niet actief gemengd wordt.

Er wordt niet verwacht dat het additief, wanneer het een dichtheid heeft die lager is dan de dichtheid van het gefluidiseerde korrelmateriaal, zich door het korrelmateriaal heen omhoog, tot buiten de geul

zal verplaatsen. Zowel het additief als het korrelmateriaal hebben een grotere dichtheid dan water en zullen ten gevolge van de zwaartekracht bezinken.

Nadat gestopt is met het injecteren van de vloeistof storten de wanden van de geul in [F14]. Het korrelmateriaal uit deze wanden zal op het verkitte bezonken zand gaan liggen. Het bovenste deel van de geul is dus opgevuld met niet verkit, loskorrelig materiaal.

4.6. *Het uitharden*

Het is mogelijk dat de hydratatie van het cement (en dus het verstevigen van de bodem) niet snel genoeg verloopt. Hierdoor kan het bodemmateriaal inclusief het additief door de aanwezige stroming worden weggespoeld, voordat er een verstevigd gebied is ontstaan. In dit onderzoek wordt hier verder geen rekening mee gehouden, omdat verwacht wordt dat de aanwezige stroming eerst het niet verstevigde korrelmateriaal (van de ingestorte wanden [F14]) moet afvoeren, voordat de verstevigde deklaag wordt bereikt en deze zijn functie moet gaan vervullen. De tijd die nodig is om dit losse materiaal af te voeren, is voor het additief waarschijnlijk lang genoeg om voldoende sterkte te ontwikkelen.

Zolang de afzettijd van het additief nog niet is verstreken, kan het additief zich verplaatsen. Hierdoor is er een kans op uitzakking van het additief ten opzichte van het bezonken bodemmateriaal. Doordat de doorlatendheid van het bezonken materiaal en het in situ materiaal beperkt is, wordt verwacht dat deze uitzakking ook beperkt zal zijn.

De mate waarin een bodem, waaraan een additief wordt toegevoegd, is verdicht, heeft invloed op de eigenschappen van het eindproduct. Nadat het geïnduseerde bodemmateriaal is bezonken, zal er in dit onderzoek echter niet verdicht worden.

Nadat de bodem verstevigd is, is het mogelijk dat er aan de randen van het verstevigde gebied erosie optreedt. Deze erosie ontstaat doordat de verstevigde deklaag het natuurlijke morfologische proces verstoort. In dit onderzoek wordt hier verder niet naar gekeken.

5. Inleiding experimenten

5.1. Algemeen

De doelstelling van dit onderzoek is het verbeteren van de erosiebestendigheid van een zandbodem door met behulp van fluïdisatietechnieken een additief in de zandbodem te verspreiden.

Tijdens de experimenten zal met name aandacht worden besteed aan de verspreiding van het additief tussen het gesuspendeerde bodemmateriaal en de invloed van deze verspreiding op de eigenschappen van het eindproduct, de verstevigde zandbodem.

Bij de experimenten zal gebruik gemaakt worden van een roerder om het zand in suspensie te brengen. Roeren is net als fluïdiseren een middel om het zand in suspensie te krijgen. Roeren is echter veel makkelijker te bewerkstelligen dan fluïdiseren. Het bouwen van een fluïdisatie-apparaat werd te ingewikkeld geacht en kostte veel tijd. Voor meer informatie over de opstelling wordt verwezen naar hoofdstuk 6.

Door de samenstelling van het additief, de hoeveelheid additief, de injectiemethode en het moment van de injectie (dichtheid van het gefluïdiseerde materiaal tijdens de injectie) te variëren, kan bepaald worden op welke manier het beste eindresultaat wordt verkregen. Vervolgens moet bekeken worden of dit eindresultaat een voldoende erosiebestendige deklaag oplevert.

Aan de hand van de resultaten van de experimenten kunnen aanbevelingen gedaan worden voor de vorm en uitvoering van het benodigde trencher in de praktijk. Er kunnen bepaalde injectietechnieken en mengsamenstellingen worden aangedragen, die leiden tot het beste eindresultaat.

5.2. Onderzoeksvragen

Tijdens de experimenten zal geprobeerd worden een antwoord te vinden op de volgende vragen:

- Hoe verspreidt het additief zich tussen het gesuspendeerde bodemmateriaal?
- Waarvan is deze verspreiding afhankelijk?
- Wat zijn de (sterkte) eigenschappen van het eindproduct?
- Waarvan zijn deze eigenschappen afhankelijk?
- Hoe kunnen de “beste” eigenschappen van het eindproduct bereikt worden?

5.3. Wat te bepalen?

Om de onderzoeksvragen te beantwoorden, zijn verschillende eigenschappen van het additief, het gesuspendeerde materiaal, de injectie van het additief tussen het gesuspendeerde korrelmateriaal en het eindproduct van belang. De volgende eigenschappen zullen tijdens de experimenten bepaald moeten worden:

Additief

- Marsh-viscositeit.
- Dichtheid.
- Draagvermogen.
- Gedrag in zout water.

Gesuspendeerde bodemmateriaal

- Dichtheid op moment dat additief wordt geïnjecteerd.

Injectie van additief tussen gesuspendeerde bodemmateriaal

- Verspreiding door gesuspendeerde gebied.
 - Afmetingen eindvorm.
 - Geometrie eindvorm.
- Vorm van verspreiding (mate van menging van additief met zand).
 - Samenstelling van het bodemmateriaal, waarin een additief is geïnjecteerd, nadat het is bezonken (verdringing of menging, een zekere mate van homogeniteit?).
 - Invloed van een verschil in dichtheid tussen het additief en het gesuspendeerde bodemmateriaal (segregatie/ontmenging).

Eindproduct

- Samenstelling van eindproduct.
 - In hoeverre is er een homogeen eindproduct ontstaan met constante eigenschappen, of variëren deze eigenschappen binnen de deklaag, waardoor de sterkte niet overal constant is.
- Sterkte eigenschappen.
 - Dichtheid.
 - Druksterkte.
 - Erosiebestendigheid / weerstand tegen uitschuring.
- Bezwijkmechanisme.
- Structuur van de verstevigde bodem (bros/flexibel, zacht/hard).

5.4. Wat te variëren?

De eigenschappen van het additief, het gesuspendeerde materiaal, de injectie van het additief tussen het gesuspendeerde korrelmateriaal en het eindproduct kunnen worden beïnvloed door de waarden van de volgende variabelen aan te passen:

Additief

- Water/cement-factor.
- Bentonietpercentage.
- Hoeveelheid.
- Viscositeit (naast samenstelling, afhankelijk van mengenergie).

Gefluïdiseerde bodemmateriaal

- Korrelgrootte.
- Dichtheid op het moment dat het additief wordt geïnjecteerd.

Injectie van additief tussen gesuspendeerde bodemmateriaal

- Moment van injectie (nadat gestopt met roeren of tijdens het roeren).
- Injectiedruk.
- Plaats van injectie.
- Aantal injectiepunten (eventueel richting waarin geïnjecteerd wordt).

Bij de eerste reeks experimenten zal aan de variabelen een waarde worden toegekend (zie hoofdstuk 7). Vervolgens kan gekeken worden hoe de variabelen kunnen worden aangepast om betere eigenschappen van het eindproduct te verkrijgen.

6. Technische opzet experimenten

6.1. Algemeen

In dit hoofdstuk wordt besproken op welke manier tijdens de experimenten het fluïdisatieproces en de injectie van het additief gemodelleerd zullen worden en op welke manier de eigenschappen van het eindproduct bepaald kunnen worden.

In het vorige hoofdstuk is al aan de orde gekomen dat het zand door middel van roeren in suspensie zal worden gebracht, aangezien het bouwen van een fluïdisatie-apparaat te ingewikkeld was en veel tijd kostte. Dit roeren zal gebeuren in een cilinder, gevuld met zand en zeewater. Met behulp van een roerder zal zand in suspensie worden gebracht. Het additief kan tussen het opgeroerde zand geïnjecteerd worden tijdens het roeren of net nadat gestopt is met roeren. Nadat de combinatie van zand en additief is bezonken, is er een monster ontstaan, dat na een bepaalde uithardtijd verder beproefd kan worden.

Puntsgewijs zal in dit hoofdstuk aandacht worden besteed aan de volgende aspecten:

- Roeropstelling.
- Gesuspenderde bodemmateriaal.
- Additief.
- Eindproduct.

De punten zijn per paragraaf genummerd, zodat er naar verwezen kan worden als dat nodig is. Dit verwijzen gebeurt middels rechte haken om het nummer van het betreffende punt, bijvoorbeeld [O5].

Aan het eind van dit hoofdstuk wordt de opzet van het proevenprogramma besproken. De experimenten zijn opgedeeld in vijf fasen.

In de tekst wordt verschillende malen naar foto's verwezen. Deze foto's zijn aan het eind van dit hoofdstuk bijgevoegd.

6.2. De roeropstelling

6.2.1. De opstelling

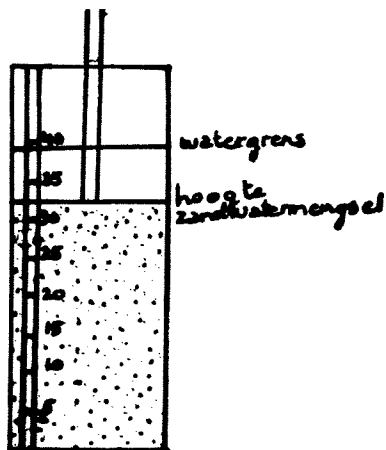
De opstelling die gebruikt wordt tijdens de experimenten bestaat uit:

- Een cilinder ($d = 0,21$ m, $h = 0,5$ m) met zand en zeewater.
- Een roerder, die met een bepaald toerental ($1/\text{min} = \text{tpm}$) draait.
- Injectieflessen en injectietuiten.
- Monsterslangen.

6.2.2. De opstelling nader bekeken

Cilinders

- O1** Tijdens de oriënterende proeven zal gebruik gemaakt worden van doorzichtige perspex cilinders (foto 6.1), zodat het proces dat in de cilinder plaatsvindt bekeken kan worden (voor zover dat mogelijk is).
- O2** Op de perspex cilinders is een maatverdeling aanwezig, zodat de volumetoename van het gesuspenderde zand bepaald kan worden (zie figuur 6.1). Deze maatverdeling meet de hoogte in de cilinder vanaf de bodem.



Figuur 6.1: Maatverdeling op de cilinder

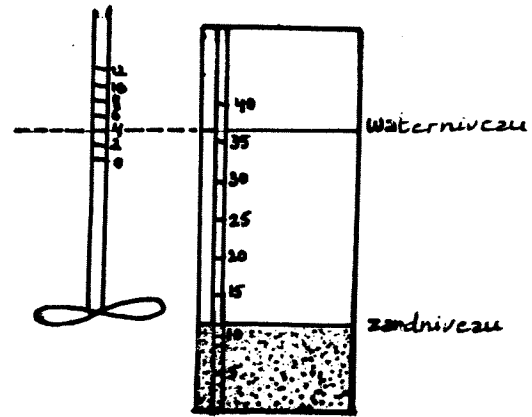
- O3** De monsters zullen aangemaakt worden in PVC cilinders (foto 6.1). Deze kunnen eventueel worden open gebroken om de uitgeharde monsters te bekijken. Dit openbreken moet voorzichtig gebeuren, zodat de eigenschappen van het monster zo min mogelijk worden aangetast. Er wordt vanuit gegaan dat de processen die tijdens de oriënterende proeven in de perspex cilinders plaatsvinden, ook in de PVC cilinders optreden (zoals een bepaalde hoogte van het zand-watermengsel bij een bepaald toerental).
- O4** De afmetingen van de cilinders zijn als volgt bepaald:
1. De originele geul [F12] is gemodelleerd tot een cilinder met dezelfde inhoud (1 m^3). Dit geeft een cilinder met een diameter van 0,9 m (bij een hoogte van 1,5 m).
 2. De diameter van de buis is, aan de hand van wat een praktisch roerbare afmeting lijkt en aan de hand van de leverbare afmetingen, vastgesteld op 0,21 m (0,9/4,3). De hoogte van de buis is volgens dezelfde verhouding verkleint tot 0,35 m (1,5/4,3). Het volume van dit gebied is $0,012 \text{ m}^3$. Er is dus een factor 1/83 toegepast ten opzichte van het volume van de originele geul.
 3. De hoogte van de cilinder is vergroot, ten opzichte van de in punt 2 berekende hoogte tot 0,5 m. Dit is gedaan in verband de toename van het waterniveau in de cilinder ten gevolge van het roeren, de plaatsing van de injectiestuiten en het geïnjecteerde volume additief.

Roerder

- O5** De gebruikte roerder is te zien op foto 6.2. De roerder wordt in het midden van de cilinder geplaatst, heeft een lengte van 65 cm en kan op elke gewenste hoogte in de cilinder gehouden worden. Door een maatverdeling op de roerder te bevestigen en hierop de positie van het waterniveau af te lezen, kan de hoogte van de roerder in de cilinder bepaald worden (zie tabel 6.1 en figuur 6.2). Om de verschillende posities van de roerder aan elkaar te relateren, moet het gebruikte waterniveau in de cilinder bij elke proef hetzelfde zijn.

Positie waterniveau op roerder (cm)	Hoogte roerder in cilinder (cm)
0	15
1	14
2	13
3	12
4	11
5	10
6	9
7	8
8	7
9	6
10	5
11	4
12	3

Tabel 6.1: Positie roerder in cilinder



Figuur 6.2: Positie roerder in cilinder

- O6** Tijdens de oriënterende roerproeven zal het toerental worden gevarieerd en de invloed van het toerental op de dichtheid van het gesuspenderde zand worden bekeken. Het maximale toerental, waarmee deze roerder kan draaien is 1500 tpm.
- O7** De roerder zal steeds opnieuw gebruikt worden en moet dus makkelijk verwijderd kunnen worden, nadat het gesuspenderde zand is bezonken.

Injectieflessen en injectie

- O8** Het injecteren gebeurt door te knijpen in de injectieflessen (foto 6.3).
- O9** In eerste instantie is het gewenst zo snel mogelijk te injecteren. Dit is vastgesteld naar aanleiding van het feit dat de trencher beweegt, waardoor de tijd voor de injectie van het additief beperkt is. Daarnaast beperkt het bezinkende zand de injectietijd.
- O10** De hoeveelheid additief die geïnjecteerd wordt, wordt bepaald door het gewicht van de injectieflessen voor en na de injectie van het additief te meten.
- O11** Tijdens de oriënterende injectieproeven zal de juiste knijpmethodiek bepaald worden.
- O12** De injectieflessen hebben injectietuiten met een diameter van 0,5 mm. Deze diameter zal niet meer gevarieerd worden.
- O13** De injectieflessen en -tuiten zullen steeds opnieuw gebruikt worden en moeten dus makkelijk verwijderd kunnen worden, nadat het gesuspenderde zand is bezonken. De aangemaakte monsters moeten minimaal verstoord worden door het verwijderen van deze injectiemiddelen.
- O14** De positie van het injectiepunt moet in elk monster (ongeveer) gelijk zijn.
- O15** Tijdens de oriënterende injectie- en combinatieproeven zal de positie van de injectietuiten, die bij het aanmaken van de monsters toegepast moet worden, bepaald worden. Afhankelijk van de verspreiding die vervolgens ontstaat, kunnen eventueel aanbevelingen worden gedaan met betrekking tot de plaats, het aantal en de richting van de injectiepunten.

Monsterslangen

- O16** Om tijdens de oriënterende roerproeven de dichtheid van het gesuspenderde zand te bepalen, kan gebruik gemaakt worden van monsterslangen (foto 6.4). Deze slangen worden aan de rand van de cilinder bevestigd op een gewenste hoogte. De positie van de monstername wordt afgelezen op de maatverdeling op de perspex cilinder. Door tijdens het roeren zand-watermengsel aan te zuigen, dit over te hevelen in een maatslinder en vervolgens het gewicht en het volume van het additief in de maatslinder te bepalen, kan de dichtheid van het zand-watermengsel gemeten worden. Na een monstername moeten het zand en het water zoveel mogelijk in de cilinder teruggegooid worden.

6.3. Het gesuspenderde zand

- Z1** Tijdens de experimenten wordt gebruik gemaakt van een redelijk homogeen zand-watermengsel. Om dit te bereiken moet het zand smal gegradeerd zijn. Een verhouding $d_{60}/d_{10} < 2$ houdt in dat het zand smal gegradeerd is.
- Z2** Tijdens de oriënterende roerproeven wordt gekeken naar zand van twee samenstellingen:
1. Zand met medium grove korrels (H32)
 2. Zand met fijne korrels (S85).
- H32: $d_{10} = 225 \mu\text{m}$, $d_{50} = 332 \mu\text{m}$, $d_{90} = 450 \mu\text{m} \rightarrow d_{90}/d_{10} = 2$.
 S85: $d_{10} = 111 \mu\text{m}$, $d_{50} = 163 \mu\text{m}$, $d_{90} = 233 \mu\text{m} \rightarrow d_{90}/d_{10} = 2,1$.
 Voor de korrelverdeling van S85 wordt verwezen naar bijlage 4. Van H32 was geen korrelverdeling aanwezig. Hiervan zijn alleen de opgegeven drie waarden van de verschillende diameters van het zand bekend.
- Z3** Tijdens de oriënterende roerproeven zal bepaald worden welke dichtheid het gesuspenderde zand, ten gevolge van het roeren, kan bereiken (hierbij wordt het toerental gevarieerd). Aan de hand van het resultaat van deze proeven zal bepaald worden bij welk toerental (en daarbij horende dichtheid) het additief geïnjecteerd zal worden. Een dichtheid van ongeveer 1300 kg/m^3 is hierbij gewenst. Dit is de kleinste dichtheid, waarbij de wanden van de geul stabiel blijven staan. Bij deze dichtheid wordt daardoor de grootst mogelijke doorlatendheid van het gesuspenderde materiaal bereikt [F13].
- Z4** De volgende berekening is gedaan om een orde van grootte te geven van de hoeveelheid materiaal die in de originele geul bezinkt en waartussen het additief kan worden geïnjecteerd. Hierbij geldt:
- n = porositeit van het zand (-)
 V_{geul} = volume van de geul (m^3)
 $\rho_{\text{zandkorrels}}$ = dichtheid van de zandkorrels (kg/m^3) = 2650 kg/m^3
 G_{zand} = gewicht van het zand dat in de geul bezinkt (kg)
1. Als het gefluïdiseerde materiaal een dichtheid van 1300 kg/m^3 heeft, zal de wolk van gefluïdiseerd materiaal een porositeit van 0,83 en een afmeting van $3,5 \text{ m}^3$ hebben (zie hoofdstuk 2 van de literatuurstudie).
 2. Alleen het materiaal, dat zich in de geul (1 m^3) bevindt, zal bezinken. Het overige materiaal zal worden afgevoerd door de aanwezige stroming [F15]. Er zal $(1-n) * V_{\text{geul}} * \rho_{\text{zandkorrels}} = (1-0,83) \times 1 \text{ m}^3 \times 2650 \text{ kg/m}^3 = 450,5 \text{ kg}$ korrelmateriaal (zand) in de geul bezinken.
 3. Er wordt aangenomen dat de porositeit van het bezonken materiaal 0,45 is. De afmeting van het gebied waarin het zand zich zal afzetten, is dan $G_{\text{zand}} / (\rho_{\text{zandkorrels}} * (1-n)) = 450,5 / (2650 * (1-0,45)) = 0,31 \text{ m}^3$.

- Z5** De hoeveelheid zand, die tijdens de experimenten wordt gebruikt, is bepaald aan de hand van O4.2 en Z4. Het volume van de cilinder is bepaald door een schaalfactor van 1/83 toe te passen ten opzichte van het volume van de originele geul. Als deze factor ook wordt toegepast op de hoeveelheid zand die in de geul bezinkt, is er in de cilinder $1/83 * 450,5 = 5,4$ kg zand nodig (bij overeenkomstige porositeit).
- Z6** De dichtheid van het gesuspenderde zand kan bepaald worden aan de hand van het volume dat het zand-watermengsel inneemt in de cilinder. De hoeveelheid zand in de cilinder is 5,4 kg [Z4].
Door de cilinder te voorzien van een maatverdeling kunnen op elk moment het volume en de dichtheid van het gesuspenderde zand worden berekend (bij het gebruik van 5,4 kg zand).

$$V = h * \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$n = 1 - \frac{5,4}{V * 2650}$$

$$\rho_{\text{zand-watermengsel}} = \rho_{\text{zandkorrels}} - n(\rho_{\text{zandkorrels}} - \rho_{\text{water}})$$

Hierbij geldt: V = volume van gesuspenderde zand-watermengsel in de cilinder (m^3).

h = hoogte van zand-watermengsel in de cilinder (m).

d = diameter van de cilinder (m).

n = porositeit van het gesuspenderde zand (-).

$\rho_{\text{zand-watermengsel}}$ = dichtheid van het gesuspenderde zand (kg/m^3).

$\rho_{\text{zandkorrels}} = 2650 \text{ kg/m}^3$.

$\rho_{\text{water}} = 1025 \text{ kg/m}^3$.

In de volgende tabel is aangegeven welke porositeit en dichtheid het zand-watermengsel in de cilinder heeft bij verschillende hoogtes van het zand-watermengsel. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de minimale dichtheid die het zand-watermengsel kan hebben 1300 kg/m^3 is [F13].

Hoogte in cilinder (m)	Porositeit n	Dichtheid (kg/m ³)
0,35	0,832	1300
0,34	0,827	1310
0,33	0,822	1310
0,32	0,816	1320
0,31	0,810	1330
0,30	0,804	1340
0,29	0,797	1350
0,28	0,790	1370
0,27	0,782	1380
0,26	0,774	1390
0,25	0,765	1410
0,24	0,755	1420
0,23	0,744	1440
0,22	0,733	1460
0,21	0,720	1480
0,20	0,706	1500
0,19	0,690	1530
0,18	0,673	1560
0,17	0,654	1590
0,16	0,632	1620
0,15	0,608	1660

Tabel 6.2: Dichtheid van het zand-watermengsel bij verschillende hoogtes van het zand-watermengsel

Z7 Tijdens de oriënterende roerproeven zullen er monsters genomen worden om te bekijken of de in Z6 berekende dichtheden kloppen. Daarnaast kan door het nemen van monsters bepaald worden of de dichtheid van het opgeroerde, gesuspendeerde materiaal homogeen verdeeld is of dat deze varieert over de hoogte. Deze monsters kunnen worden genomen met de in O15 besproken monsterslangen.

Z8 Het water in de cilinder zal volgens het voorbeeld in O4.2 staan tot 0,35 m. Er wordt aangenomen dat het zand dat op de bodem van de cilinder ligt, voordat het in suspensie wordt gebracht een porositeit van 0,4 heeft. Dit zand wordt volledig door het water verzadigd. Aan de hand van deze aannames kan het volume dat het zand inneemt worden berekend en vervolgens de benodigde hoeveelheid water per monster.

Hierbij geldt: G_{zand} = gewicht van het zand dat in de cilinder bezinkt (kg).

$\rho_{\text{zandkorrels}}$ = dichtheid van de zandkorrels (kg/m³) = 2650 kg/m³.

n = porositeit van het zand (-).

V_{zand} = volume van het zand in de cilinder (m³).

h_{water} = hoogte van het waterniveau vanaf de bodem van de cilinder (m).

h_{zand} = hoogte van de zandlaag vanaf de bodem van de cilinder (m).

Het volume dat het zand inneemt is: $G_{\text{zand}} / (\rho_{\text{zandkorrels}} * (1-n)) = 5,4 / (2650 * (1-0,4)) = 3,4 \cdot 10^{-3}$ m³, over een hoogte van 10 cm. Er is dus $n * V_{\text{zand}} + \frac{1}{4} * (h_{\text{water}} - h_{\text{zand}}) * \pi * d^2 = 0,4 * 3,4 \cdot 10^{-3} + \frac{1}{4} * 0,25 * \pi * 0,21^2 = 0,01$ m³ (= 10 dm³) water per monster nodig.

Z9 Er wordt aangenomen dat het zand, nadat het in suspensie is gebracht en vervolgens is bezonken, een porositeit van 0,45 heeft. In de cilinder is dit een zandlaag met een dikte van 10,7 cm.

6.4. Het additief

- S1 Als additief kan (bij de oriënterende injectieproeven) worden uitgegaan van de in tabel 6.3 aangegeven suspensies van cement en bentoniet. De in het grijs aangegeven suspensies zijn niet stabiel [Kutzner, 1996] en worden in eerste instantie niet bekeken.

		→ Toenemende Water/Cement-factor				
← Toenemend bentoniet-gehalte	A0	A1	A2	A3	A4	A5
	B0	B1	B2	B3	B4	B5
	C0	C1	C2	C3	C4	C5
	D0	D1	D2	D3	D4	D5
	E0	E1	E2	E3	E4	E5
	F0	F1	F2	F3	F4	F5
	G0	G1	G2	G3	G4	G5

Tabel 6.3: Gebruikte suspensies bij oriëntatieproeven

Licht grijs: Niet stabiel

- Naar aanleiding van de resultaten van de oriënterende injectie- en combinatieproeven zullen 5 suspensies gekozen worden, die in de eerste monsterronde tussen het gesuspendeerde zand geïnjecteerd zullen worden. Aan de hand van de resultaten van de eerste monsterronde kan eventueel gekozen worden voor een grotere W/C-factor in de tweede monsterronde.
- S2 Het bentoniet zal minimaal 16 uur in water moeten rijpen, voordat het cement kan worden toegevoegd. Na het aanmaken, blijft de aangemaakte bentonietsuspensie weken lang bruikbaar als deze wordt bewaard in een afgesloten vat.
- S3 Aangezien de gebruikte mengenergie bij het aanmaken van de suspensie invloed heeft op de viscositeit van de suspensie, zullen alle monsters worden aangemaakt met ongeveer dezelfde mengenergie. Tijdens de oriënterende experimenten zal bepaald worden met hoeveel toeren per minuut de suspensies zullen worden aangemaakt en hoe lang er geroerd zal worden bij dit aanmaken.
- S4 Voordat de suspensies tussen het gesuspendeerde zand worden geïnjecteerd, zal van alle suspensies de Marsh-viscositeit en de dichtheid bepaald worden. Een Marsh-viscositeit die groter is dan 60 s/l, is in principe niet gewenst [A8].
- S5 Tijdens de oriënterende proeven zal het draagvermogen van het additief worden bekeken door zand op het additief te strooien.
- S6 De invloed van het zeewater op de suspensies [A19] kan getest worden door de suspensies zowel in kraanwater als in zeewater te injecteren en vervolgens te bekijken of er verschil is in de verspreiding van het additief.

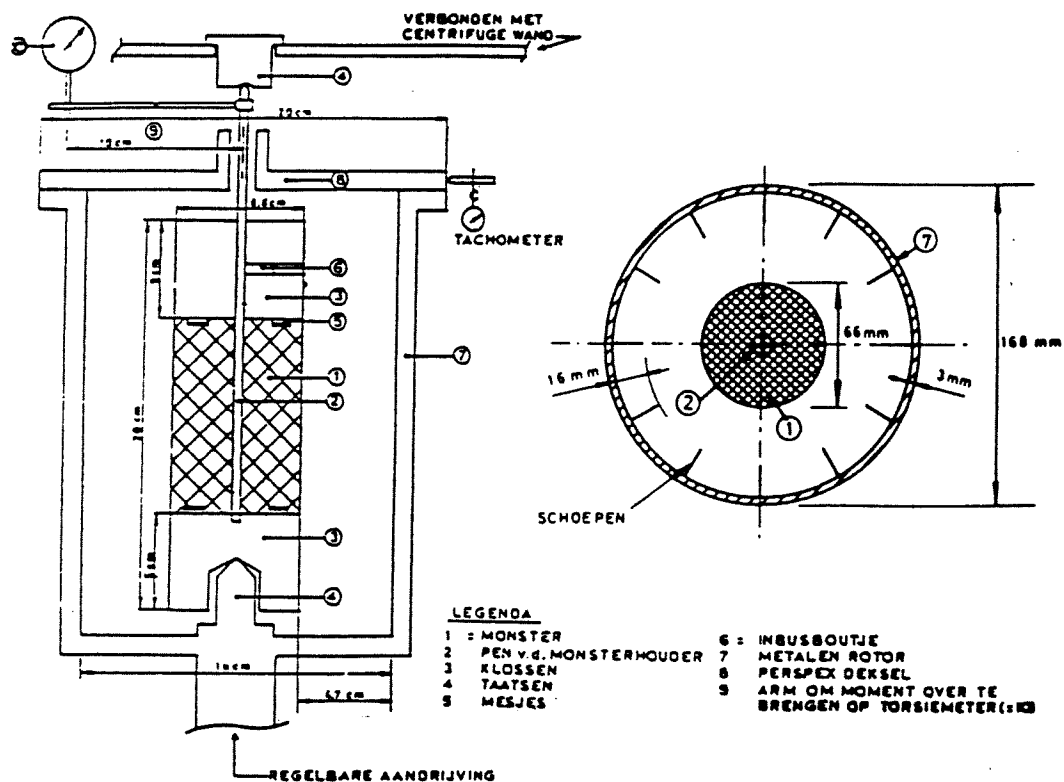
- S7 Tijdens de oriënterende injectieproeven zal bepaald worden welke hoeveelheid additief geïnjecteerd kan worden in de cilinder. Deze hoeveelheid zal vooral bepaald worden door de ruimte die de roerder overlaat om te injecteren, de bezinktijd van het gesuspenderde zand, het volume van de aanwezige spuitflessen en de diameter van de injectietuiten. Bovendien wordt de snelheid waarmee geïnjecteerd kan worden, beperkt door de afmetingen van de cilinder.

6.5. Het eindproduct

- E1 Aangezien de manier waarop het additief zich tussen de gesuspenderde korrels verspreidt niet goed is aan te geven, kunnen geen kwantitatieve eisen worden gesteld, waaraan de monsters moeten voldoen. Om de eigenschappen van de verschillende monsters te beoordelen, zullen deze tijdens de experimenten onderling vergeleken worden.
- E2 Om de aangemaakte monsters onderling te kunnen vergelijken, hoeft niet gewacht te worden tot de cement-bentoniet-suspensie volledig is uitgehard. Na 7 dagen kunnen de dichtheid, de druksterkte en de erosiebestendigheid van de verschillende monsters onderling worden vergeleken. Deze sterkte-eigenschappen zeggen echter nog niets over de eigenschappen van het eindproduct, aangezien het totale uitharden langer duurt dan deze 7 dagen. In principe moet het verkitten na deze 7 dagen in staat zijn de stroombelastingen te weerstaan. Als dit niet het geval is, zullen het zand en het additief in de praktijk worden weggespoeld.
- E3 De verspreiding van het additief tussen de zandkorrels kan bepaald worden door het monster uit de cilinder te halen en vervolgens schoon te spoelen en/of door te snijden. Op het moment dat dit gebeurt, moet het monster voldoende zijn uitgehard. Als dit niet het geval is, kunnen er opmerkelijke structuurveranderingen plaatsvinden, waardoor de samenstelling van het monster niet meer representatief is. Er wordt vanuit gegaan dat dit na 7 dagen uitharden mogelijk is (eventueel kan blijken dat langer uitharden nodig is, dit wordt niet verwacht).
- E4 Eventueel kunnen niet alleen na 7 dagen, maar ook na 14 en 28 dagen uitharden, druktesten gedaan worden om een indicatie van de sterkte-ontwikkeling in de tijd te krijgen. In eerste instantie lijkt dit echter niet nodig.
- E5 De druktesten zullen uitgevoerd worden met een pocket-penetrometer (zie foto 6.5). Dit apparaat moet tot een bepaalde diepte (aangegeven op het apparaat) in het monster geduwd worden. Ondertussen wordt de kracht (in kg/cm^2) gemeten die daarvoor nodig is. Met dit apparaat kan op verschillende plaatsen in de monsters worden gestoken. De maximale kracht die met de pocket-penetrometer gemeten kan worden is 6 kg/cm^2 . $1 \text{ kg/cm}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$. De druksterkte wordt gemeten, terwijl er een koker om het monster aanwezig is, die zorgt voor steundruk. De gemeten waarden moeten gezien worden als een indicatie van de sterkte van het monster (waardoor de verschillende monsters onderling kunnen worden vergeleken), niet als een absolute sterkte.
- E6 De erosiebestendigheid kan worden bepaald met behulp van een uitschuringsproef/slijtproef. In dit onderzoek wordt gebruikt gemaakt van het erosietoestel van GeoDelft. In dit toestel wordt water rond een cilindrisch monster ($d = 6,6 \text{ cm}$) bewogen door een roterende met schoepen bezette cilinder (zie figuur 6.3). De schoepen op de roterende cilinder bevinden zich op een afstand van ongeveer 35 mm van het monster. Door het toerental van de roterende cilinder te variëren, kan de stroombelasting op de monsters worden gevarieerd. De gewichtsafname van de monsters is een maat voor de opgetreden erosie. Op foto 6.6 is een monster te zien, zoals deze in een houder in het erosie-apparaat wordt geplaatst.

Bij het meten van de gewichtsafname is er altijd een meetfout aanwezig. Dit wordt de ruis van het apparaat genoemd. Deze ruis schommelt rond de $\pm 2\%$. Na de erosieproef moet het monster ook visueel worden bekeken (niet alleen afgaan op de gewichtafname). Door middel van deze visuele inspectie kan een (grote) meetfout van het erosie-apparaat worden opgemerkt.

- E7 In de monsterrondes zullen van elke samenstelling twee cilinders met monsters gemaakt worden. De samenstelling van deze monsters is nooit exact hetzelfde, omdat de geïnjecteerde hoeveelheid nooit precies hetzelfde is.



Figuur 6.3: Schematische doorsnede van het erosietoestel van GeoDelft

6.6. Opzet proevenprogramma

De uitvoering van de experimenten is opgedeeld in 5 fasen. In de hierna volgende hoofdstukken zullen alle fasen van het proevenprogramma één voor één worden doorlopen.

De eerste drie fasen bestaan uit oriënterende experimenten, uitgevoerd in de perspex cilinders.

1. Tijdens oriënterende roerproeven zal bekeken worden in hoeverre door middel van roeren het zand in suspensie kan worden gebracht (hoofdstuk 7).
2. Tijdens oriënterende injectieproeven wordt bepaald op welke wijze het additief aan het gesuspenderde zand kan worden toegevoegd (hoofdstuk 8).
3. Met behulp van oriënterende combinatieproeven (roeren en injecteren) wordt de menging en verspreiding van het additief tussen het gesuspenderde zand bekeken, voor zover dat mogelijk is zonder dat het additief uithardt (hoofdstuk 9).

Naar aanleiding van deze oriënterende proeven zal aan een aantal variabelen een waarde worden toegekend.

Na de oriënterende experimenten volgen twee fasen waarin monsters zullen worden aangemaakt in de PVC cilinders. Deze monsters zullen na minimaal 7 dagen uitharden [E2] worden beproefd op hun eigenschappen [E3 t/m E7].

4. In de eerste monsterronde zal de samenstelling van het additief gevarieerd worden. Naar aanleiding van deze ronde kan de invloed van de W/C-factor en het bentonietpercentage op de verspreiding en menging van het additief tussen het gesuspendeerde bodemmateriaal en de eigenschappen van het eindproduct bepaald worden (hoofdstuk 10).
5. Aan de hand van de resultaten van deze eerste monsterronde wordt bekeken, welke variatie van mengselsamenstelling verder beproefd zal worden en welke eigenschappen daarbij zullen worden gevarieerd om in de tweede monsterronde tot een geschikt eindproduct te komen. Met betrekking tot andere eigenschappen kunnen aanbevelingen worden gedaan (hoofdstuk 11).

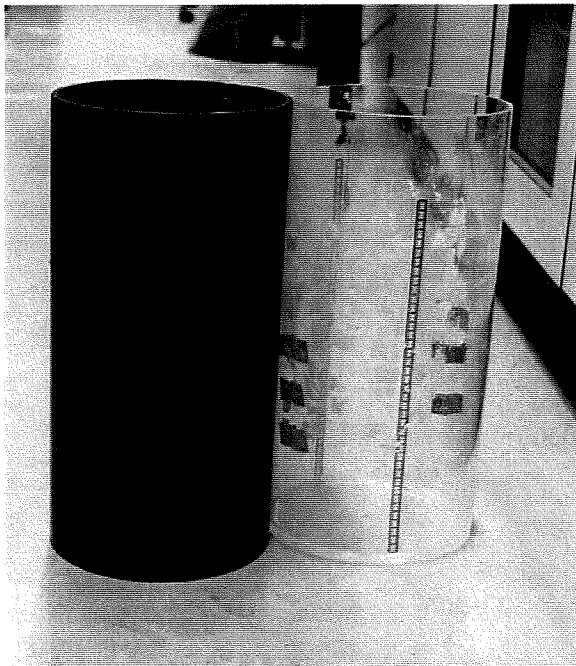


Foto 6.1: Een PVC cilinder en een perspex cilinder



Foto 6.2: De gebruikte roerder

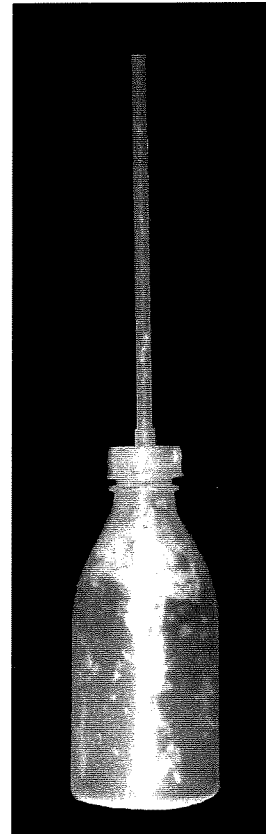


Foto 6.3: Een injectiefles

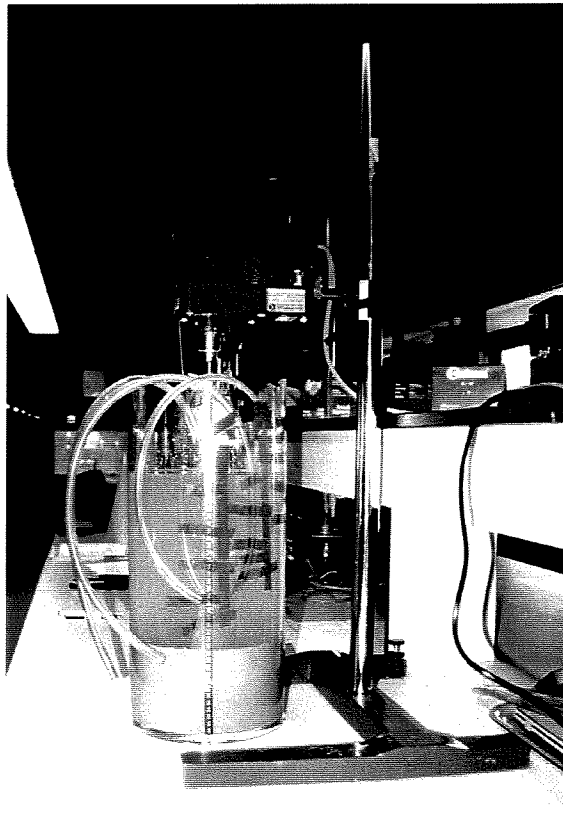


Foto 6.4: Perspex cilinder met
monsterslangen

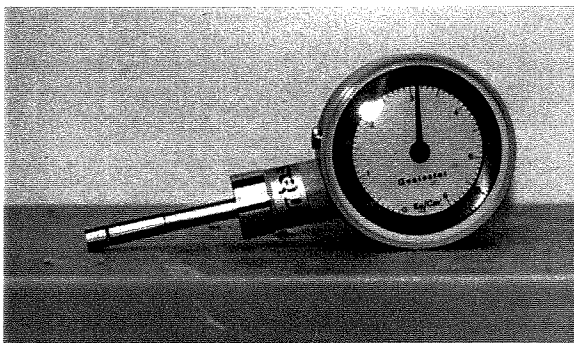


Foto 6.5: Pocket-penetrometer

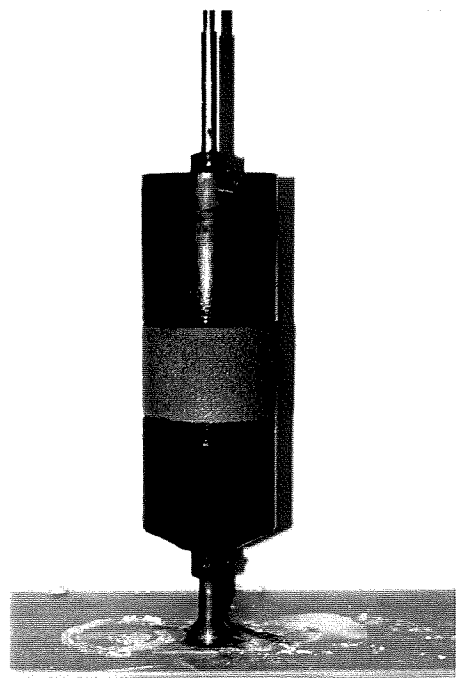


Foto 6.6: Monster in houder van het
erosie-apparaat

7. Fase 1: Oriënterende roerproeven

7.1. Algemeen

Deze fase zal worden beschreven aan de hand van het doel, de constanten, de variabelen, de resultaten en de conclusies met betrekking tot deze fase. In de tekst wordt verschillende malen naar foto's verwezen. Deze foto's zijn aan het eind van dit hoofdstuk bijgevoegd.

7.2. Doel

- Bepalen of het mogelijk is door middel van roeren het zand in suspensie te brengen tot een dichtheid, die overeen komt met dichtheden die met behulp van fluïdisatietechnieken bereikt kunnen worden. De dichtheid van het gesuspendeerde zand moet hiervoor ongeveer 1300 kg/m^3 zijn [F13, Z3].
- De invloed van het toerental op de dichtheid van het gesuspendeerde zand bekijken.
- Bekijken in hoeverre de dichtheid van het gesuspendeerde zand varieert over de hoogte van de cilinder bij een constant toerental.
- De sedimentatietijd van het gesuspendeerde zand bepalen bij verschillende toerentallen.
- De invloed van de korrelgrootte van het zand op de dichtheid van het gesuspendeerde materiaal en de sedimentatietijd bekijken.
- Invloed van de positie van de roerder op de dichtheid van het gesuspendeerde materiaal bekijken.
- Een zandsoort kiezen, die gedurende de rest van de experimenten gebruikt zal worden.
- Eén toerental vaststellen, waarmee het zand in suspensie zal worden gebracht, voordat het additief geïnjecteerd wordt.
- Een positie van de roerder kiezen, die in de rest van het onderzoek gehandhaafd zal worden.

7.3. Constanten

- Afmetingen cilinder.
- Hoeveelheid zand in cilinder: 5,4 kg. Dit staat tot een hoogte van 10,5 cm in de cilinder.
- Hoeveelheid water in cilinder: 10 dm^3 . Dit staat tot een hoogte van 36 cm in de cilinder.

7.4. Variabelen

In deze fase zullen drie variabelen worden bekeken:

- Toerental.
- Korrelgrootte van het zand.
- Positie van roerder in cilinder.

Het toerental heeft invloed op de dichtheid van het gesuspendeerde zand en daardoor op de sedimentatietijd van het zand, nadat gestopt is met roeren.

De korrelgrootte van het zand heeft invloed op bezinksnelheid van de individuele zandkorrels en op de dichtheid van het gesuspenderde zand bij een constant toerental.

Welke invloed van de positie van de roerder heeft, zal moeten worden bekeken tijdens de proeven.

Als eerste zal aandacht besteed worden aan het oproeren van het grove zand (H32). Vervolgens zal het oproeren van het fijne zand (S85) worden bekeken. Pas nadat beide zandsoorten zijn bekeken, zal een toerental worden vastgesteld, dat in de rest van het onderzoek gebruikt zal worden.

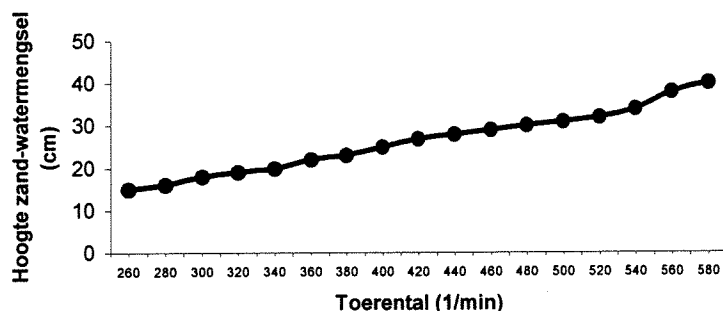
7.5. Aanpak en resultaten van het oproeren van het grove zand (H32)

7.5.1. Algemeen

1. De oriënterende mengproeven zijn uitgevoerd in kraanwater. Bij gebruik van zeewater is het soortelijk gewicht van het water iets hoger (1025 kg/m^3 in plaats van 1000 kg/m^3). Dit kan een verschil geven in de gemeten dichtheid van het zand-watmengsel. Dit verschil is zo klein dat het in de afronding al wordt meegenomen (zie ook punt 4). Voor de berekende dichtheden is wel uitgegaan van zeewater. De hoogte van het zand-watmengsel is in zeewater gelijk aan de hoogte van het zand-watmengsel in kraanwater bij hetzelfde toerental.
2. Aangezien het roeren turbulent verloopt, is de hoogte van het zand-watmengsel niet eenduidig af te lezen. Deze hoogte varieert met het passeren van de roerbladen in een soort golfbeweging (foto 7.1). De afgelezen hoogte van het zand-watmengsel, is ongeveer de gemiddelde hoogte van dit zand-watmengsel.
3. Bij het roeren moet ervoor gezorgd worden dat het zand-watmengsel niet tot het wateroppervlak reikt. Het wateroppervlak houdt dan het zand tegen, dat zich ten gevolge van het toerental nog hoger zou willen verplaatsen. Hierdoor bevindt zich bij het wateroppervlak extra zand, waardoor daar een grotere dichtheid ontstaat. Dit is niet gewenst. Er moet gebruik gemaakt worden van een overschot aan water boven in de cilinder (zie figuur...). Het maximale toerental dat gebruikt kan worden bij H32 is hierdoor 500 tpm. Bij dat toerental komt het zand-watmengsel tot een hoogte van 34 cm het water tot een hoogte van 37 cm (inclusief monsterslangen).
4. De gemeten dichtheid van het zand-watmengsel wordt afgerond op 50 kg/m^3 in verband met meetfouten van het gewicht (zand en/of water op cilinder, $\pm 1,5 \text{ g}$) en het volume (adhesie aan wand, $\pm 1,5 \text{ ml}$) in de meetcilinder.
5. De berekende dichtheid wordt ook afgerond op 50 kg/m^3 in verband met afleesfouten van de hoogte van het zand-watmengsel (t.g.v. golfbeweging, $\pm 1 \text{ cm}$).
6. Tijdens het roeren ontstaat er een vortex ter plaatse van de roerder. Hoe groter het toerental is, hoe dieper deze vortex reikt. Bij hoge toerentallen komt de vortex bijna tot de bodem.
7. De monsters worden aan de rand van de cilinder genomen. Ten gevolge van de centrifugaal kracht die door het roeren wordt opgewekt, wordt waarschijnlijk extra zand naar deze randen geduwd. De dichtheid die met behulp van de monsters wordt gemeten, kan daardoor hoger zijn dan de dichtheid iets van de wand af.
8. Alle meetgegevens zijn opgenomen in bijlage 5.

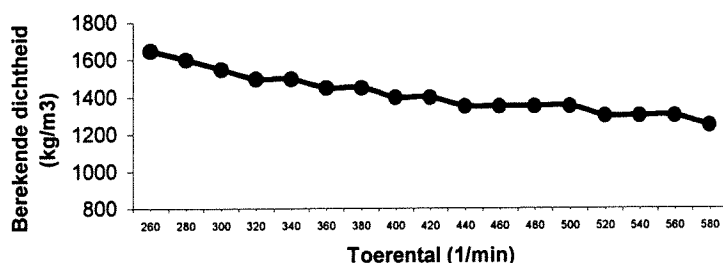
7.5.2. Hoogte en berekende dichtheid zand-watmengsel bij een variërend toerental.

In de grafiek 7.1 is de hoogte van het zand-watmengsel gegeven bij een variërend toerental. De roerder is geplaatst op 6 cm boven de bodem van de cilinder.



Grafiek 7.1: Hoogte zand-watmengsel als functie van het toerental (H32)

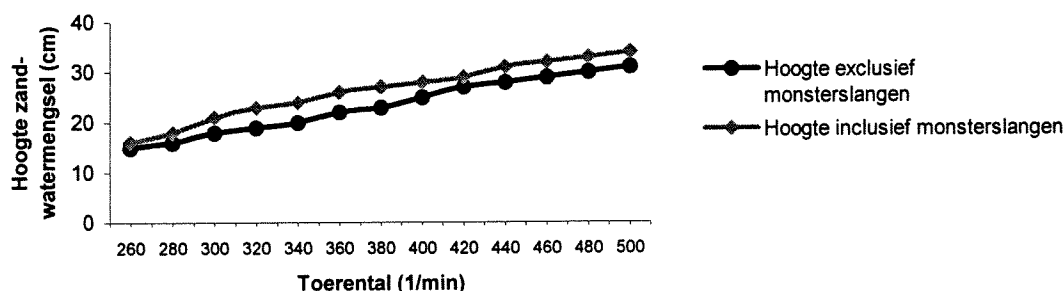
In de grafiek 7.2 is de dichtheid van het gesuspendeerde zand aangegeven bij een variërend toerental. Deze dichtheden zijn berekend aan de hand van de hoogte die het zand-watmengsel bereikt bij het variërende toerental (zie Z6, tabel 6.2 en grafiek 7.1).



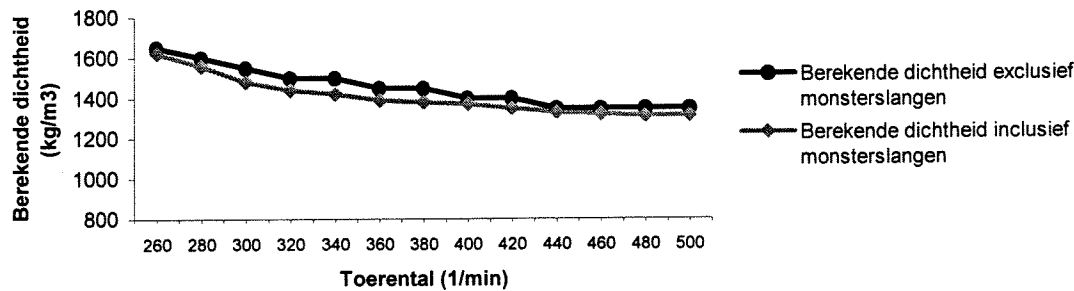
Grafiek 7.2: Berekende dichtheid als functie van het toerental (H32)

⇒ Het is duidelijk dat een hoger toerental ervoor zorgt dat het zand-watmengsel tot hoger in de cilinder reikt en daarbij dus een kleinere dichtheid heeft.

Voor het nemen van monsters zijn er monsterslangen bevestigd (O15). Deze monsterslangen beïnvloeden de hoogte die het zand-watmengsel bereikt en dus de berekende dichtheid, doordat er turbulentie rond de slangen ontstaat. Dit is te zien in grafiek 7.3 en 7.4.



Grafiek 7.3: Invloed monsterslangen op hoogte zand-watmengsel

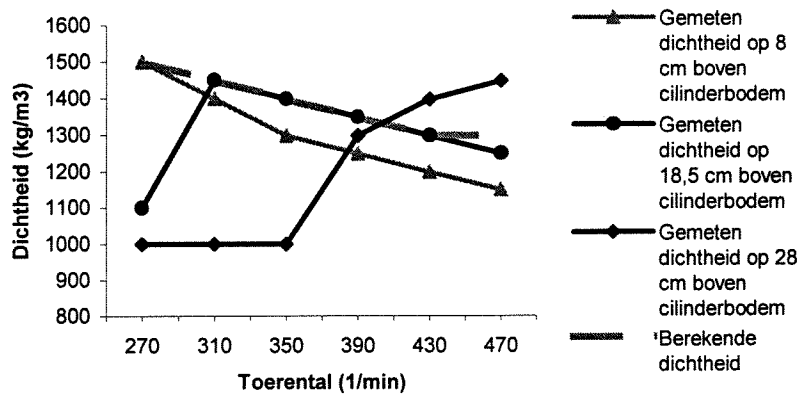


Grafiek 7.4: Invloed monsterslangen op berekende dichtheid van het zand-watermengsel

- ⇒ Door de aanwezigheid van de monsterslangen neemt de hoogte van het zand-watermengsel iets toe. De extra turbulentie die om de slangen ontstaat, zorgt hiervoor. Door deze toename van hoogte neemt de (berekende) dichtheid van het gesuspendeerde zand iets af. Deze afname is echter minimaal zoals in grafiek 7.4 te zien is.
- ⇒ In de monsterrondes zullen geen monsterslangen aanwezig zijn. Aangezien de invloed van de monsterslangen op de berekende dichtheden minimaal is, wordt ervan uitgegaan dat de met behulp van de monsterslangen gemeten dichtheden ook representatief zijn voor de situatie zonder slangen.
- ⇒ De monsterslangen hebben enige invloed op de diepte van de vortex. Zonder monsterslangen reikt deze tot een grotere diepte. In dat geval ligt de grens, waarbij de vortex reikt tot in het zand-watermengsel bij 380 tpm. Aangezien het zand-watermengsel zonder monsterslangen minder hoog komt, verschilt deze grens niet zo veel van de grens inclusief monsterslangen (zie volgende paragraaf). Beide effecten heffen elkaar op.

7.5.3. Gemeten dichtheid van gesuspendeerde zand.

In grafiek 7.5 is de dichtheid aangegeven, die door het zuigen van monsters is bepaald. Het toerental is hierbij gevarieerd. De monsters zijn genomen op een hoogte van 8, 18,5 en 28 cm, gemeten vanaf de bodem van de cilinder. Deze posities zijn zo gekozen, omdat aan de hand van de dichtheden op deze hoogtes een beeld gekregen kan worden van de variatie van de dichtheid over de verticaal in de cilinder. Er wordt vanuit gegaan dat deze metingen voldoende informatie bevatten om ook iets over de dichtheid op de tussenliggende hoogtes te kunnen zeggen. Door de hoogte van het zand-watermengsel te meten, kan de dichtheid van het zand-watermengsel bovendien berekend worden. Deze berekende dichtheid is ook aangegeven. De roerder staat 6 cm boven de bodem van de cilinder.

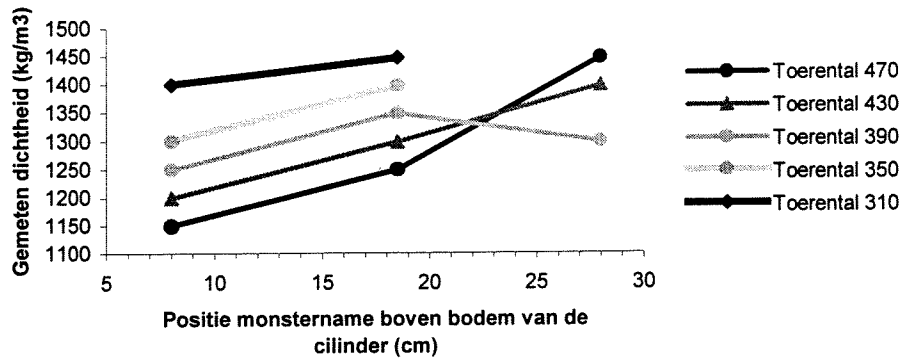


Grafiek 7.5: Gemeten dichtheid van het gesuspendeerde materiaal (H32)

- ⇒ De gemeten dichtheden op 28 cm boven de bodem van de cilinder zijn tot en met een toerental van 350 tpm gelijk aan de dichtheid van water. De hoogte van het zand-watermengsel is bij deze metingen lager dan de positie van de monstername, zodat er water wordt aangezogen bij het nemen van monsters. Dit principe geldt ook voor de meting op 18,5 cm boven de bodem van de cilinder bij een toerental van 270 tpm. De dichtheid is hier iets groter dan die van water, omdat de golfbeweging die door het roeren ontstaat, ervoor zorgt dat er nog wat zand mee komt tijdens de monstername.
- ⇒ De gemeten dichtheden op 28 cm boven de bodem van de cilinder zijn bij de hogere toerentallen (430 en 470 tpm) groter dan de berekende dichtheden, omdat bij die metingen de vortex tot voorbij de positie van de monstername reikt. Door de aanwezigheid van de vortex kan het zand zich binnen een veel kleiner volume verplaatsen. Als het toerental kleiner is dan 410 tpm, bereikt de vortex het zand-watermengsel niet meer. Bij een toerental dat kleiner is dan 310 tpm, is er nauwelijks nog een vortex aanwezig.
- ⇒ De gemeten dichtheden op 8 cm boven de bodem van de cilinder zijn lager dan de berekende dichtheden, omdat de positie van de monstername zich in de buurt van de roerder bevindt. In de buurt van de roerder is het zand-watermengsel turbulenter dan in de rest van de cilinder. Dit is te zien op foto 7.2. De roerder bevindt zich op een hoogte van 6 cm vanaf de bodem van de cilinder. Bij lagere toerentallen is de invloed van de roerder minder merkbaar.
- ⇒ De gemeten dichtheden op 18,5 cm boven de bodem van de cilinder komen goed overeen met de berekende waarden.

Aan de hand van de kleur van het zand-watermengsel lijkt de dichtheid redelijk homogeen verdeeld te zijn. Ter plaatse van de roerder lijkt de dichtheid iets kleiner dan in de rest van de cilinder. Deze waarneming klopt met de gemeten dichtheden.

In het algemeen is de dichtheid van het gesuspendeerde zand niet homogeen. De op verschillende hoogtes gemeten dichtheden liggen ongeveer 100 tot 300 kg/m³ uit elkaar. Bij de lagere toerentallen zijn de verschillen kleiner. In grafiek 7.6 is dit duidelijker te zien dan in grafiek 7.5. In deze grafiek zijn de, bij verschillende toerentallen, gemeten dichtheden uitgezet tegenover de positie van de monstername. Alleen de metingen, waarbij de hoogte van het zand-watermengsel boven de positie van de monstername kwam, zijn weergegeven. Hoe horizontaler de lijn loopt, hoe homogener het zand-watermengsel is verdeeld.

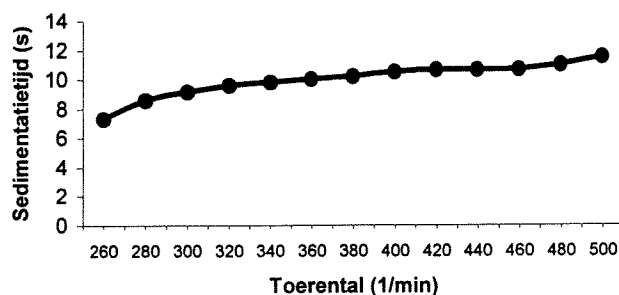


Grafiek 7.6: Gemeten dichtheid als functie van de positie van de monstername (H32)

- ⇒ Bij een toerental van 390 tpm is de dichtheid in de cilinder het meest homogeen verdeeld. Bij dat toerental is er geen invloed van de vortex meer op de dichtheid van het zand-watermengsel op 28 cm boven de bodem van de cilinder.

7.5.4. Sedimentatietijd van het gesuspendeerde zand gerelateerd aan het toerental.

In grafiek 7.7 is de sedimentatietijd van het zand aangegeven als functie van het toerental. De hoogte van het zand-watermengsel is afhankelijk van het toerental (inclusief monsterslangen), zoals is aangegeven in grafiek 7.3. De sedimentatietijd is gemeten vanaf het moment dat de roerder wordt stilgezet, tot het moment dat al het zand is bezonken en er geen ronddraaiend zand meer te zien is.



Grafiek 7.7: Sedimentatietijd als functie van het toerental (H32)

- ⇒ Bij een hoger toerental bereikt het zand-watermengsel een grotere hoogte en is de sedimentatietijd langer. Tussen 320 en 460 tpm zijn de verschillen echter minimaal.
- ⇒ Als het sedimentatieproces van het grove zand gevolgd wordt, lijken de eerste vier seconden nadat gestopt is met roeren, geschikt voor het injecteren van het additief. Na deze tijd is de sedimentatie nog niet afgelopen, maar is het zand al zo ver bezonken en de dichtheid zo toegenomen, dat een goede verspreiding niet meer mogelijk lijkt.

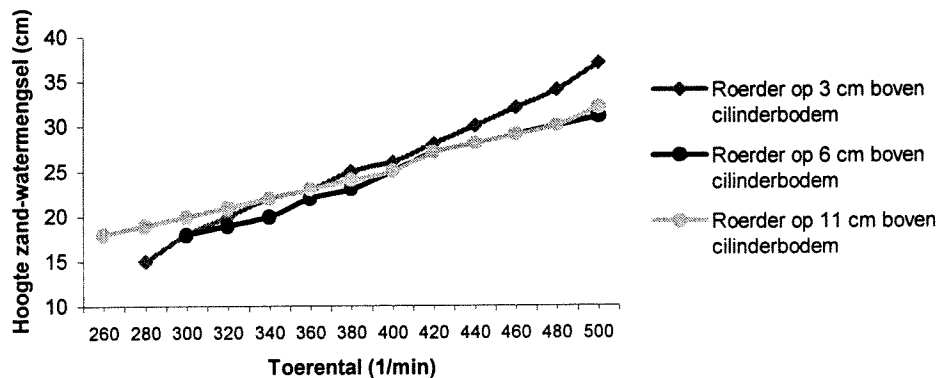
7.5.5. Positie van de roerder in de cilinder variëren.

De roerder is hoger en lager in de cilinder geplaatst dan bij de voorgaande metingen om te kijken of deze plaatsing invloed heeft op de hoogte van het zand-watermengsel. Bij de voorgaande metingen stond de roerder 6 cm boven de bodem van de cilinder.

De metingen zijn uitgevoerd inclusief en exclusief monsterslangen. In grafiek 7.8 zijn de resultaten van de metingen zonder monsterslangen weergegeven. De metingen inclusief monsterslangen gaven

een grotere hoogte van het zand-watermengsel, zoals in grafiek 7.3 te zien is. De invloed van de positie van de roerder op de hoogte van het zand-watermengsel was verder hetzelfde.

Er zijn ook metingen gedaan waarbij de roerder op 8 en 4 cm boven de bodem van de cilinder stond. De resultaten van die metingen waren ongeveer gelijk aan de resultaten van de meting met de roerder op 6 cm boven de bodem van de cilinder. Een meting met de roerder op 10 cm boven de bodem van de cilinder gaf ongeveer dezelfde resultaten als de meting met de roerder op 11 cm boven de bodem van de cilinder. Alleen de metingen met de roerder op 3, 6 en 11 cm boven de bodem van de cilinder zijn weergegeven.



Grafiek 7.8: Invloed van positie roerder op hoogte van het zand-watermengsel

- ⇒ De invloed van de positie van de roerder op de hoogte van het zand-watermengsel is beperkt. Als de roerder dieper staat, bereikt het zand-watermengsel bij de hogere toerentallen een grotere hoogte. Als de roerder hoger staat, bereikt het zand-watermengsel bij de lagere toerentallen een grotere hoogte. Bij een hogere positie van de roerder gedraagt het zand-watermengsel zich turbulenter bovenin.
- ⇒ Als de roerder dieper in het zand staat is er een hoger toerental nodig om het zand in suspensie te brengen. Eenmaal in suspensie kan het toerental verlaagd worden zonder dat het zand bezinkt.
- ⇒ De sedimentatietijd wordt niet beïnvloed door de positie van de roerder.
- ⇒ Als de roerder hoger staat, is het gebied met extra turbulentie ten gevolge van de aanwezigheid van de roerder groter. Dit zou een reden kunnen zijn om de roerder dieper te plaatsen. Echter hoe dieper de roerder staat, hoe lastiger het is om de roerder te verwijderen, nadat het additief is geïnjecteerd en de combinatie van zand en additief is bezonken. Het is onmogelijk om de roerder direct nadat gestopt is met roeren weg te halen, terwijl het zand bezinkt. Het weghalen is namelijk lastig en kost redelijk wat tijd, bovendien verstoort dit weghalen het bezinkproces van het zand. Om deze reden is ervoor gekozen om de roerder 11 cm boven de bodem van de cilinder te plaatsen. De roerder staat dan net op het zand en kan zonder al te veel verstoring verwijderd worden. De extra turbulentie die door deze positie ontstaat is onvermijdelijk. Bij fluïdisatie zal het er ook behoorlijk turbulent aan toe gaan.
- ⇒ Er is nog enige aandacht besteed aan de mogelijkheid om de roerder boven het zand te plaatsen in plaats van op het zand. In dat geval is er geheel geen verstoring bij het weghalen van de roerder (ook niet in het bovenste deel van het bezonken zand). Als de roerder op 15 of 14 cm boven de bodem van de cilinder wordt geplaatst, blijkt de hoogte van het zand-watermengsel veel lastiger af te lezen ten gevolge van extra turbulentie. Bovendien is er veel

meer verloop van dichtheid in het grensgebied. Bij lage toerentallen blijft er zand op de bodem liggen, dat niet in suspensie komt. Als in de volgende fasen van de experimenten blijkt dat het bovenste deel van het bezonken zand een belangrijk gebied is en enige verstoring door de roerder daar niet gewenst is, zal de positie van de roerder veranderd worden.

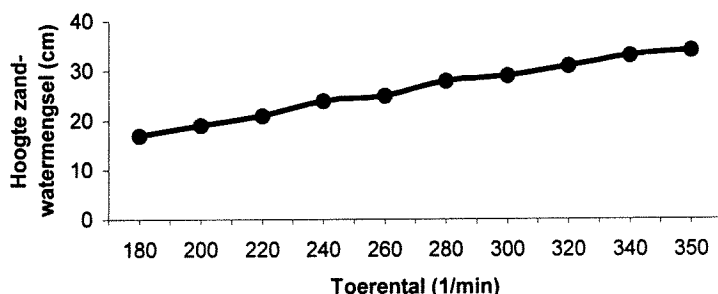
7.6. Aanpak en resultaten van het oproeren van het fijne zand (S85)

7.6.1. Algemeen

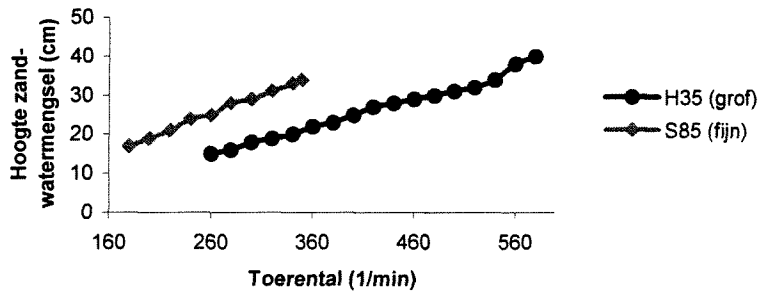
1. Zie punt 1 t/m 8 in paragraaf 7.5.1 voor H32.
2. Het maximale toerental dat gebruikt kan worden is 350 tpm. Bij hogere toerentallen bereikt het zand-watmengsel het wateroppervlak. Dit is ongewenst (zie ook punt 3 in paragraaf 7.5.1).
3. Naar aanleiding van de resultaten bij het roeren in het grove zand (paragraaf 7.5.1) is de positie van de roerder vastgesteld op 11 cm boven de bodem van de cilinder. Deze positie is in het vervolg van dit onderzoek gehandhaafd.

7.6.2. Hoogte en berekende dichtheid zand-watmengsel bij een variërend toerental.

In de grafiek 7.9 is de hoogte van het zand-watmengsel (S85) gegeven bij een variërend toerental. De metingen zijn uitgevoerd zonder monsterslangen. Grafiek 7.10 bevat de hoogtes van zowel het H32 zand, als het S85 zand, bij een variërend toerental.

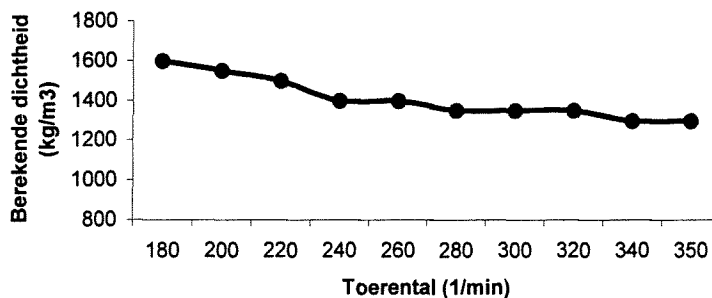


Grafiek 7.9: Hoogte zand-watmengsel als functie van het toerental (S85)

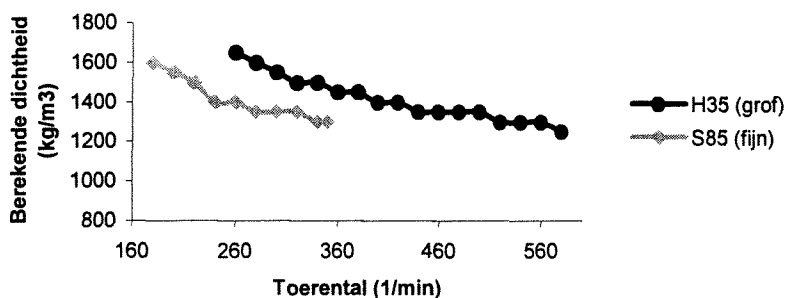


Grafiek 7.10: Hoogte van het zand-watermengsel als functie van het toerental voor H32 en S85

In grafiek 7.11 is de dichtheid van het gesuspendeerde zand (S85) aangegeven als functie van het toerental. Deze dichtheden zijn berekend aan de hand van de hoogte van het zand-watermengsel (zie Z6, tabel 6.2 en grafiek 7.10). Grafiek 7.12 bevat de berekende dichtheden van zowel het H32 zand, als het S85 zand, bij een variërend toerental.



Grafiek 7.11: Berekende dichtheid als functie van het toerental (S85)



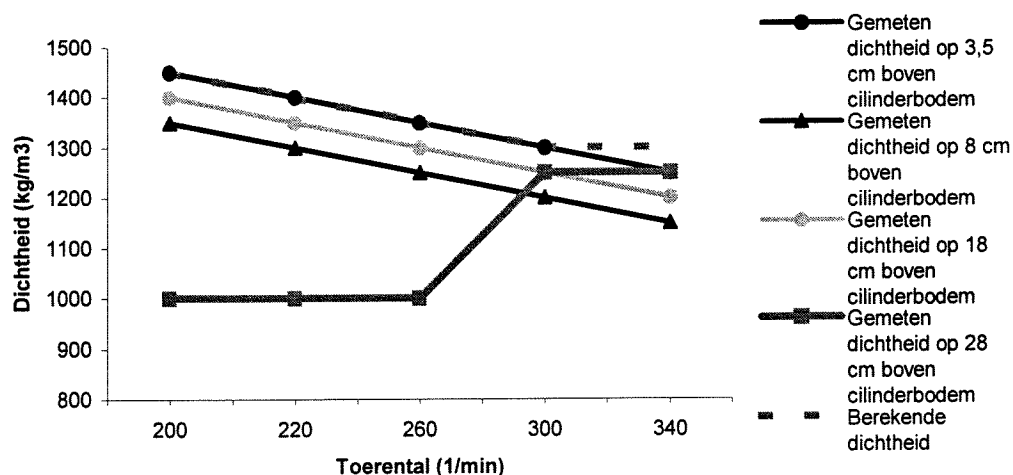
Grafiek 7.12: Berekende dichtheid als functie van het toerental voor H32 en S85

- ⇒ Het is duidelijk dat een zand-watermengsel met fijner zand bij hetzelfde toerental, een grotere hoogte en daarmee een kleinere dichtheid bereikt.
- ⇒ Doordat het fijne zand bij met behulp van een lager toerental in suspensie gebracht kan worden, is de invloed van de vortex minder. Dit is zo, omdat de vortex groter is, naarmate het toerental groter is.

- ⇒ Als de roerder met 200 tpm roert, blijft er 1 cm fijn zand op de bodem van de cilinder liggen. Als de roerder met 180 tpm roert blijft er 2 cm zand liggen. Dit zand komt dan niet in suspensie.
- ⇒ De invloed van monsterslangen op de hoogte (en dus de dichtheid) van het zand-watermengsel is bij het fijne zand gelijk aan de invloed bij het grove zand. Voor deze invloed wordt verwezen naar de grafieken 7.3 en 7.4.

7.6.3. Gemeten dichtheid van het gesuspendeerde zand.

In grafiek 7.13 is de dichtheid aangegeven, die door het nemen van monsters is bepaald. Het toerental is hierbij gevarieerd. De monsters zijn genomen op een hoogte van 3,5, 8, 18 en 28 cm, gemeten vanaf de bodem van de cilinder. Deze posities zijn zo gekozen, omdat aan de hand van de dichtheden op deze hoogtes een beeld gekregen kan worden van de variatie van de dichtheid over de verticaal in de cilinder. Er wordt vanuit gegaan dat deze metingen voldoende informatie bevatten om ook iets over de dichtheid op de tussenliggende hoogtes te kunnen zeggen. Door de hoogte van het zand-watermengsel te meten, kan de dichtheid ook berekend worden. Deze berekende dichtheid is ook aangegeven.

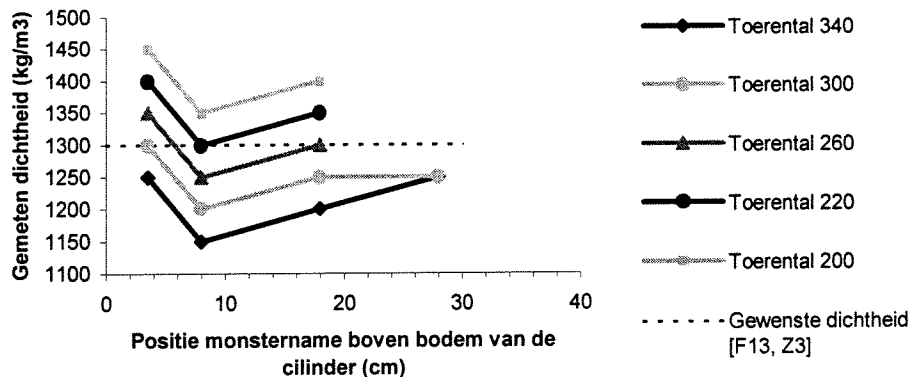


Grafiek 7.13: Gemeten dichtheid van het gesuspendeerde materiaal (S85)

- ⇒ De gemeten dichtheden op 28 cm boven de bodem van de cilinder zijn tot en met een toerental van 260 tpm gelijk aan de dichtheid van water. De hoogte van het zand-watermengsel is bij deze metingen lager dan de positie van de monsternamen, zodat er water wordt aangezogen bij het nemen van monsters.
- ⇒ De gemeten dichtheden bij de hogere toerentallen zijn op een hoogte van 28 cm boven de bodem van de cilinder niet groter dan de berekende dichtheden (zoals het geval is bij het grove zand). Dit komt doordat de aanwezige vortex niet reikt tot in het zand-watermengsel. Net als bij het grove zand is er bij een toerental kleiner dan 310 tpm nauwelijks nog een vortex aanwezig. Hier is opnieuw het verschil tussen het grove en het fijne zand duidelijk; het fijne zand bereikt al bij veel lagere toerentallen (en dus bij een kleinere vortex) een minimale dichtheid.
- ⇒ De gemeten dichtheid op 3,5 cm boven de bodem van de cilinder komt het best overeen met de berekende dichtheid.
- ⇒ De gemeten dichtheid op 8 cm boven de bodem van de cilinder is bij elk toerental (behalve als er water gezogen wordt) het laagst. Dit komt doordat dit meetpunt zich het dichtst bij de

roerder bevindt. In de buurt van de roerder is het zand-watermengsel turbulenter dan in de rest van de cilinder. Dit is te zien op foto 7.2.

De homogeniteit van het zand-watermengsel is weergegeven in grafiek 7.14. In deze grafiek zijn de dichtheden (bij de verschillende toerentallen) uitgezet tegenover de positie van de monstername. Hoe horizontaler de lijn loopt, hoe homogener het zand-watermengsel is verdeeld.

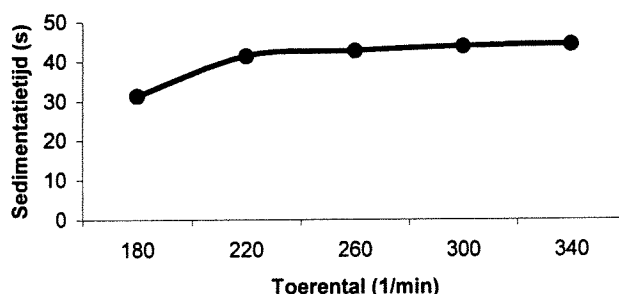


Grafiek 7.14: Gemeten dichtheid als functie van de positie van de monstername (S85)

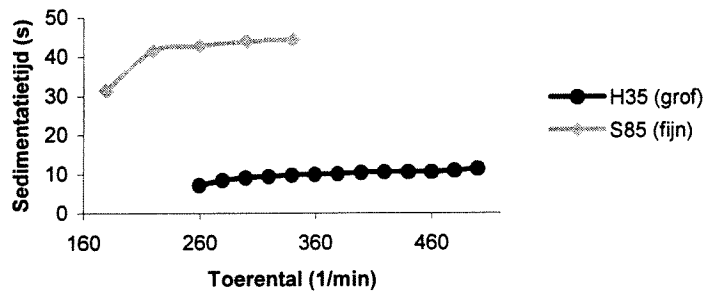
- ⇒ Grafiek 7.14 kan vergeleken worden met grafiek 7.6. De dichtheid van het fijne zand is in het algemeen homogener verdeeld dan de dichtheid van het grove zand. Dit wordt vooral veroorzaakt door het lagere toerental dat in het fijne zand kan worden gebruikt om het zand in suspensie te brengen. Het maximale dichtheidsverschil is 100 kg/m^3 .
- ⇒ Van de onderzochte toerentallen, komt de verdeling van de dichtheid van het zand-watermengsel bij een toerental van 260 tpm het meest overeen met de gewenste dichtheid.

7.6.4. Sedimentatietijd van het gesuspendeerde zand gerelateerd aan het toerental

In grafiek 7.15 is de sedimentatietijd van het zand S85 aangegeven als functie van het toerental. Grafiek 7.16 bevat de sedimentatietijden van zowel het H32 zand, als het S85 zand, bij een variërend toerental.



Grafiek 7.15: Sedimentatietijd als functie van het toerental (S85)



Grafiek 7.16: Sedimentatietijd als functie van het toerental voor H32 en S85

- ⇒ Zoals te verwachten was, bezinkt het fijnere zand langzamer dan het grovere zand.
- ⇒ Net als bij het grove zand duurt de sedimentatietijd langer, wanneer het zand-watermengsel een grotere hoogte heeft bereikt (deze grotere hoogte wordt bereikt bij een hoger toerental).
- ⇒ Als het sedimentatieproces van het fijne zand gevolgd wordt, lijken de eerste 12 seconden nadat gestopt is met roeren geschikt voor het injecteren van het additief. Na deze tijd is de sedimentatie nog niet afgelopen, maar is het zand al zo ver bezonken en de dichtheid zo toegenomen, dat een goede verspreiding niet meer mogelijk lijkt. Het zand blijft nog vrij lang in beweging, terwijl het al bijna geheel bezonken is. Bij dit fijne zand is de periode die geschikt lijkt voor injectie beduidend langer dan bij het grove zand.

7.7. Conclusies fase 1

- Het is mogelijk door middel van roeren het zand in suspensie te brengen tot een dichtheid die overeen komt met de dichtheden die met behulp van fluidisatietechnieken bereikt worden. De dichtheid die door middel van roeren bereikt kan worden, varieert tussen de 1150 en 1450 kg/m³.
- Een hoger toerental zorgt voor een kleinere dichtheid van het gesuspendeerde zand.
- De dichtheid van het gesuspendeerde zand is niet homogeen verdeeld over de verticaal in de cilinder bij een constant toerental. De variatie in dichtheid wordt vooral veroorzaakt door de turbulentie in de omgeving van de roerder en aanwezigheid van een vortex bij de hogere toerentallen.
- De sedimentatietijd van het zand wordt voornamelijk bepaald door de korrelgrootte van het zand. Voor het grove zand (H32) is de sedimentatietijd ongeveer 10 seconden. Voor het fijne zand (S85) is de sedimentatietijd ongeveer 40 seconden. De invloed van het toerental op deze sedimentatietijd is beperkt; een lager toerental geeft een kortere sedimentatietijd.
- Het fijne zand komt bij een lager toerental (eerder) in suspensie dan het grovere zand. De minimale dichtheid wordt in het fijne zand dan ook bij een lager toerental bereikt.
- Naar aanleiding van de invloed van de korrelgrootte op de sedimentatietijd en het toerental waarbij het zand in suspensie komt, is besloten om in het vervolg van dit onderzoek verder te gaan met het fijne zand. De tijdsduur die geschikt lijkt voor het injecteren van het additief, is bij het fijne zand beduidend langer. Daarnaast komt het fijne zand bij een lager toerental in suspensie, waardoor het benodigde toerental om de gewenste dichtheid te bereiken lager kan zijn. Hierdoor zijn zowel de invloed van de vortex als de invloed van de turbulentie om de roerder minder.

- Als het sedimentatieproces van het fijne zand gevolgd wordt, lijken de eerste 12 seconden nadat gestopt is met roeren geschikt voor het injecteren van het additief. Na deze tijd is de sedimentatie nog niet afgelopen, maar is het zand al zo ver bezonken en de dichtheid zo toegenomen, dat een goede verspreiding niet meer mogelijk lijkt. Tijdens de oriënterende injectie- en combinatieproeven moet bekeken worden of dit klopt.
- De invloed van de positie van de roerder op de hoogte van het zand-watermengsel is beperkt. De positie van de roerder is vastgesteld op een hoogte van 11 cm, gemeten vanaf de bodem van de cilinder. De roerder staat dan net op het zand en kan zonder al te veel verstoring verwijderd worden.
- In de volgende fasen zal verder gegaan worden met een toerental van 260 tpm. Bij dit toerental varieert de dichtheid van het gesuspendeerde (fijne) zand het meest rond de 1300 kg/m^3 . Deze dichtheid was gewenst [F13, Z3].

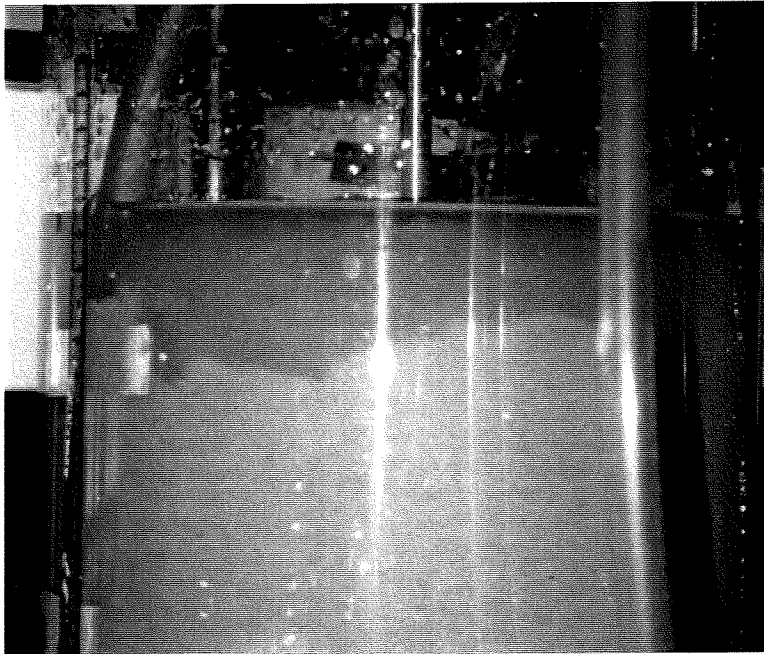


Foto 7.1: Golfbeweging van de hoogte van het zand-watermengsel ten gevolge van het passeren van de roerbladen



Foto 7.2: Turbulenter zand-watermengsel in de buurt van de roerder

8. Fase 2: Oriënterende injectieproeven

8.1. Algemeen

In fase 2 worden de mogelijkheden met betrekking tot het injecteren van het additief in water onderzocht. Deze fase dient als voorbereiding voor fase 3. Na fase 3 wordt pas echt bepaald wat de meest geschikte injectietechniek is, aangezien in die fase pas de invloed van de injectietechniek op de verspreiding van het additief tussen het zand bekeken wordt.

Fase 2 zal worden beschreven aan de hand van het doel, de constanten, de variabelen, de resultaten en de conclusies met betrekking tot deze fase. In de tekst wordt verschillende malen naar foto's verwezen. Deze foto's zijn aan het eind van dit hoofdstuk bijgevoegd.

8.2. Doel

- Bepalen welke additiefsamenstellingen geschikt zijn om te injecteren in water (en daarmee tussen het gesuspendeerde bodemmateriaal).
- De invloed van de injectiedruk (en daarmee van de injectiesnelheid) op de verspreiding van het additief in water bepalen.
- De invloed van de samenstelling van het additief op de verspreiding van het additief bepalen.
- Bekijken binnen welk tijdsinterval een bepaalde hoeveelheid additief geïnjecteerd kan worden. Hierbij moet rekening gehouden worden met de sedimentatietijd, die in fase 1 bepaald is.
- Een geschikte injectietechniek bepalen (hoeveelheid/tijd/snelheid/hoogte/positie).
- Vaststellen wat er gebeurt, wanneer het additief in zeewater wordt geïnjecteerd in plaats van in kraanwater.

8.3. Constanten

Opstelling

- Afmetingen cilinder.
- Hoeveelheid water: 10 dm³.

Roeren

- Toerental: 260 tpm.
- Positie roerder: 11 cm boven de bodem van de cilinder.

Injecteren

- Injectiediameter: 0,5 cm.

8.4. Variabelen

In deze fase zullen de volgende variabelen worden bekeken (een ↓ houdt in: ‘heeft/hebben invloed op’):

Additief

- Samenstelling additief.
↓
- Eigenschappen additief

Injecteren

- Injectiedruk
- Injectietijd
↓
- Injectiesnelheid
- Injectiehoeveelheid

- Positie injectiepunt

Opstelling

- Kraanwater/zeewater

8.5. Aanpak en resultaten van de oriënterende injectieproeven

8.5.1. Algemeen

- Er zijn 6 bentoniet suspensies aangemaakt, dit gebeurde op de volgende manier:
 - De bentoniet suspensies zijn aangemaakt in de PVC-cilinders. Volgens de CUR (1997) moeten de suspensies worden aangemaakt in een cilindrisch vat, waarvoor geldt hoogte/diameter > 1. De PVC-cilinders voldoen hieraan.
 - De roerder die voor het in suspensie brengen van het zand wordt gebruikt, is ook gebruikt voor het aanmaken van de bentoniet suspensie. Volgens CUR (1997) moet gelden: mengblad-diameter/mengvatdiameter = 0,4-0,67. In dit onderzoek is dat 0,12 m / 0,21 m = 0,57, dus die waarde voldoet. De roerder is ongeveer 1 cm boven de bodem van de cilinder geplaatst.
 - De bentonietkorrels worden in de vortex gegooid, die ontstaat ten gevolge van het roeren van het water.
 - Na het toevoegen van de bentonietkorrels is er steeds 21 minuten geroerd, met een toerental van 400 tpm.
Bij de CUR (1997) wordt met een toerental van 1500 tpm geroerd. Bij dit toerental ontstaat er echter luchtaanzuiging tijdens het roeren, dit is ongewenst. Om deze reden moet een lager toerental worden toegepast. Bij een lager toerental ontstaat er ook minder klontvorming op de roerder.
Bij de CUR (1997) wordt de combinatie van bentoniet en water 10 minuten geroerd. Na 10 minuten bleken er in de meeste suspensies echter nog klonten aanwezig, deze klonten verdwenen grotendeels als het roeren met 11 minuten verlengd werd.

- Na het roeren moet de bentonietsuspensie minimaal 16 uur rijpen, voordat het cement kan worden toegevoegd. Tijdens dit rijpen zwelt de bentoniet door de opname van water. Het totale volume van water en bentoniet blijft gelijk.
- Hoe meer bentoniet de suspensie bevat, hoe viskeuzer de gerijpte bentonietsuspensie is. De suspensies met meer dan 3% bentoniet vertonen duidelijk thixotropisch gedrag, waardoor ze zich gedragen als een soort pudding.
- Een cement-bentonietsuspensie wordt als volgt aangemaakt:
 - Per keer wordt $1,7 \text{ dm}^3$ cement-bentonietsuspensie aangemaakt.
 - De mogelijke additiefsamenstellingen staan in hoofdstuk 6, in tabel 6.3, aangegeven. De hoeveelheden cement en bentonietsuspensie die per additiefsamenstelling nodig zijn, zijn weergegeven in bijlage 6. In deze bijlage is ook de dichtheid van het additief per samenstelling berekend.
 - Het cement wordt toegevoegd, terwijl er met 350 tpm in de bentonietsuspensie wordt geroerd. De bentonietsuspensie moet worden losgeroerd, voordat het cement kan worden toegevoegd.
 - Meestal “pakt” de roerder het mengsel niet meer, net nadat al het cement is toegevoegd. Het mengsel wordt dan te viskeus en de roerder is niet meer in staat het cement door de bentonietsuspensie te mengen. Als het toerental even wordt verhoogd (tot ongeveer 500 tpm), pakt de roerder het mengsel weer, waarna het toerental weer verlaagd kan worden.
 - Nadat het cement aan de bentonietsuspensie is toegevoegd, wordt er 10 minuten doorgeroerd met 400 tpm. Bij de mengsels zonder bentoniet (A) wordt geroerd met 350 tpm, anders stroomt de maatbeker over. Bij de mengsels met een hoog bentonietpercentages (F en G) wordt geroerd met 450 tpm, anders verloopt het mengen niet goed.
- Er gaat altijd bentoniet en/of cement verloren tijdens het toevoegen van de droge korrels. Een deel blijft op de wand van de cilinder zitten en een deel stuift wolkvormig weg. Ook blijven er tijdens het roeren druppels water of bentonietsuspensie op de wand zitten, die niet mee worden gemengd. Deze (minimale) verliezen vallen in principe binnen de meetnauwkeurigheden.

⇒ Toch moeten (onder andere) om deze reden de eigenschappen van het additief altijd bepaald worden, ook al is een additief van dezelfde samenstelling al eerder bekeken.
- Het meten van de Marsh-viscositeit gaat als volgt (CUR, 1997):
 - De inhoud van de Marsh-trechter is 1500 cm^3 . Het vulniveau is door middel van een rand aangegeven. Aan de bovenzijde is een draadzeef bevestigd met een zeefopening van 1,6 mm. De Marsh-trechter wordt verticaal op een statief bevestigd (zie foto 8.1).
 - De uitstroomopening wordt dichtgehouden. Ondertussen wordt de te onderzoeken suspensie met een kunststofbeker via de draadzeef in de trechter gegoten tot aan de merkstreep.
 - Nadat de trechter gevuld is, laat men deze uitstromen terwijl tegelijkertijd de stopwatch wordt gestart.
 - De suspensie stroomt, bij geringe valhoogte, in de onder de trechter staande maatcilinder. Exact bij 1000 ml wordt de stopwatch weer ingedrukt, waarmee de benodigde uitstroomtijd voor 1000 ml bepaald is.

- De Marsh-viscositeit moet direct na het aanmaken van het additief worden gemeten. De suspensies met een groot bentonietgehalte vertonen dan nog geen thixotropisch gedrag en stromen zonder problemen door de Marsh-trechter. Als dergelijke suspensie even stilstaan (10-20 min) gaat het thixotropische gedrag een rol spelen. De suspensies gaan zich gedragen als een soort “pudding” en verstoppert hierdoor de Marsh-trechter. Door deze suspensies los te roeren kan het thixotropische gedrag worden opgeheven. Suspensies met een hoog bentonietpercentage hebben een grote viscositeit en vertonen al direct na het aanmaken thixotropisch gedrag. De Marsh-viscositeit kan bij die suspensies niet worden gemeten, omdat beide eigenschappen ervoor zorgen dat een goede doorstroming niet mogelijk is. Suspensies waar de Marsh-viscositeit niet van gemeten kan worden, zijn te viskeus en daardoor niet geschikt voor injectie.
- Als controle is de Marsh-viscositeit van water is gemeten. Deze is 28,62 s/l. Dit klopt met de gegevens uit de literatuur. De gebruikte Marsh-trechter is dus geschikt voor het meten van de Marsh-viscositeit.
- Doordat de suspensie door de draadzeef van de Marsh-trechter wordt gegoten, zijn er geen klonten meer aanwezig. Alleen additief dat op deze manier gezeefd is, wordt gebruikt voor injectie.
- Het additief wordt geïnjecteerd door te knijpen in injectieflessen [O8].
 - Aangezien het onbekend is of de hoeveelheid additief die wordt toegevoegd voldoende is voor het verkitten van het zand, wordt in eerste instantie gekozen voor injectie van het additief met behulp van twee middenmaat injectieflessen. Met behulp van deze flessen wordt per injectie tussen de 0,5 en 0,6 dm³ additief toegevoegd. De tijd waarin deze hoeveelheid wordt geïnjecteerd is 10-13 seconden.
 - Doordat het additief wordt geïnjecteerd door te knijpen in de flessen, is het onmogelijk om twee monsters te maken met precies dezelfde samenstelling. Er kan nooit exact een van tevoren bepaalde hoeveelheid additief worden geknepen. De orde van grootte van de hoeveelheid die wordt toegevoegd, zal wel ongeveer hetzelfde zijn.
 - Er kan bij het injecteren maar één keer in de spuitfles worden geknepen. Bij meer keer knijpen wordt er water in de injectiefles gezogen.
 - Nadat het additief is geïnjecteerd, is er altijd nog wat additief in de injectietuiten aanwezig ($V = \frac{1}{4} * \pi * (0,5 \cdot 10^{-2})^2 * 0,345 = 6,774 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$, dit is ongeveer 6,8 ml.). Deze hoeveelheid additief wordt wel als gewichtsverlies van de injectiefles gemeten, maar niet geïnjecteerd tussen het gesuspenderde zand. Het verschil is echter te verwaarlozen (minder dan 2 %).

8.5.2. Eigenschappen van de verschillende mengsamenstellingen

- Er zijn verschillende additiefsamenstellingen aangemaakt, uitgaande van de in S1 en tabel 6.3 genoemde suspensies. Van deze samenstellingen zijn de Marsh-viscositeit en de dichtheid bepaald. Bij sommige samenstellingen is gekeken naar het draagvermogen door zand op het additief te strooien. Nadat de eigenschappen van het additief bepaald zijn, is het additief in de meeste gevallen geïnjecteerd in water.

- Aan de hand van eigenschappen van additieven met een bepaalde samenstelling, kunnen eigenschappen van andere additieven bepaald worden, zonder deze te meten.
 - ⇒ Uit de tabel 4.6 in hoofdstuk 4 van de literatuurstudie blijkt dat suspensie C0 niet voldoet aan de eis voor de Marsh-viscositeit (< 60 s/l). Als C0 niet voldoet, dan voldoen D0, E0, F0 en G0 ook niet. Deze suspensies hebben dezelfde W/C-factor, maar een groter bentonietgehalte, waardoor ze viskeuzer zijn dan C0. Uit dezelfde tabel blijkt dat D1 niet voldoet aan de eis voor de Marsh-viscositeit. Als D1 niet voldoet, dan voldoen E1, F1 en G1 ook niet. Deze additiefsamenstellingen zullen niet beproefd en gebruikt worden.
- De gemeten Marsh-viscositeit en dichtheid van de verschillende additiefsamenstellingen zijn in tabel 8.1 weergegeven. Ook de berekende dichtheid van het additief is aangegeven.

Additief-samenstelling	Marsh-viscositeit (s/l)	Gemeten dichtheid (kg/m^3)	Berekende dichtheid (kg/m^3)
A0	41,72/41,49	1525/1521	1579
C1	40,8	1446	1492
E2	48,43	1243	1291
E4	46,65	1141	1173
E5	43,91/45,78	1110/1126	1144
F2	64	-	1304
F3	56,68	1247	1222
F4	55,91/54,10	1144/1144	1174
G3	91	1192	1226
G4	80	1152	1181
G5	te hoog	1133	1155

Tabel 8.1: Marsh-viscositeit en dichtheid van verschillende additiefsamenstellingen

- ⇒ Als E2 voldoet aan de eis voor de Marsh-viscositeit, dan voldoen E3 t/m E5 ook. Deze suspensies hebben hetzelfde bentonietgehalte, maar een grotere W/C-factor, waardoor ze minder viskeus zijn dan E2. Hetzelfde geldt voor F4 en F5, omdat F3 voldoet aan de eis voor de Marsh-viscositeit.
- ⇒ Als F2 niet voldoet aan de eis voor de Marsh-viscositeit, dan voldoet F1 ook niet. Deze suspensie heeft hetzelfde bentonietgehalte en een lagere W/C-factor, waardoor deze viskeuzer is dan F2. Hetzelfde geldt voor G1 en G2, omdat G3 niet voldoet aan de eis voor de Marsh-viscositeit.

- ⇒ In tabel 8.2 is te zien welke suspensies overblijven naar aanleiding van de voorgaande resultaten, als optie voor de additiefsamenstellingen die gebruikt zullen worden tijdens het aanmaken van de monsters. Alleen deze suspensies zijn geschikt om geïnjecteerd te worden in water en tussen het gesuspenderde bodemmateriaal.

		→ Toenemende Water/Cement-factor				
← Toenemend bentoniet-gehalte	A0	A1	A2	A3	A4	A5
	B0	B1	B2	B3	B4	B5
		C1	C2	C3	C4	C5
			D2	D3	D4	D5
			E2	E3	E4	E5
				F3	F4	F5

Licht grijs: Niet stabiel

Donker grijs: Te grote viscositeit

Tabel 8.2: Suspensies die geschikt zijn voor injectie

- Het draagvermogen is bekeken voor de mengsels A0, C1, E5, en F4. Hierbij is in een kleine maatbeker droog zand op het additief gestrooid. Dit zand blijft in eerste instantie als een soort pannenkoek op het additief liggen. De pannenkoek lijkt een beetje additief op te zuigen. Als het additief weinig tot geen bentoniet bevat (A0, C1), zakt de pannenkoek in de loop der tijd langzaam naar de bodem van de maatbeker. Als het additief veel bentoniet bevat (E5, F4), blijft de pannenkoek op het additief liggen en zakt niet in de loop der tijd naar de bodem.

- ⇒ Een suspensie met meer bentoniet vertoont meer draagvermogen. Dit draagvermogen ontstaat door de thixotropische eigenschappen van het additief.

8.5.3. Injectie van het additief in water

- Wanneer het additief in zeewater wordt geïnjecteerd, gebeurt hetzelfde als bij een injectie in kraanwater. De samenstelling van het zeewater heeft geen invloed op de verspreiding van het additief.
- Het additief wordt langs de wand van de cilinder, verticaal in het water geïnjecteerd (foto 8.2 en foto 8.3). Met deze manier van injecteren wordt vooruit gelopen op de fase waarin monsters moeten worden aangemaakt. Door de tuit langs de wand te plakken kan de positie gefixeerd worden, daarnaast zal de verstoring van het aangemaakte monster minimaal zijn bij het weghalen van verticale injectietuiten. Als blijkt dat de verspreiding van het additief in water niet goed is bij deze injectiemethode moet gezocht worden naar een alternatief.
- De volgende additiefsamenstellingen zijn in water geïnjecteerd: A0, C1, E5, F4 en G5.

- Een suspensie die bestaat uit alleen cement en geen bentoniet (A0), verspreidt zich als een wolk, nadat deze in water is geïnjecteerd. De wolk additief verspreidt zich in de onderste 10 cm van de cilinder en bezinkt langzaam (foto 8.4 en foto 8.5).
- Suspensies, bestaande uit cement en bentoniet, vertonen samenhang als deze met een lage druk in water worden geïnjecteerd. Als er zacht in de injectiefles wordt geknepen (lage druk), verspreidt het additief zich slangvormig. Deze slangetjes zakken direct naar de bodem van de cilinder en blijven daar op een hoopje liggen (foto 8.6 en foto 8.7). Het additief verspreidt zich in de buurt van het injectiepunt. Naarmate de suspensie meer bentoniet bevat, is deze samenhang duidelijker te zien en ontstaan de slangetjes ook als er met iets meer druk wordt geïnjecteerd.
 - ⇒ Deze manier van injecteren kost te veel tijd. In 28 seconden kan met één injectiefles slechts 95 ml additief worden geïnjecteerd. In fase 1 van dit onderzoek is geconcludeerd, dat er slechts gedurende ongeveer 12 seconden geïnjecteerd kan worden. Daarna is het zand zo ver bezonken dat een goede verspreiding van het additief niet meer mogelijk lijkt. Voor een langzame injectie met slangetjes additief die samenhang vertonen, is waarschijnlijk geen tijd.
- Als suspensies, bestaande uit cement en bentoniet, onder grote druk (hard knijpen in injectiefles) worden geïnjecteerd, ontstaat er een wolk additief in het water (foto 8.4 en foto 8.5). Deze wolk additief bezinkt langzaam. Door de grote injectiedruk en injectiesnelheid gaat de samenhang van het additief verloren. In de wolk zijn nog kleine vlokjes aanwezig, die duiden op enige (minimale) samenhang. Op foto 8.8 zijn deze vlokjes te zien in een al grotendeels bezonken laag additief. Deze vlokjes zijn groter naarmate het additief meer bentoniet bevat. Het additief verspreidt zich door het gehele onderste deel van de cilinder over een hoogte van ongeveer 10 cm. net als het cement.
 - ⇒ Bij deze manier van injecteren kan in ± 11 seconden ongeveer 275 ml additief worden geïnjecteerd met één spuitfles.
 - ⇒ Ook een additief met een te grote Marsh-viscositeit (G5) verspreidt zich als een wolk, wanneer het onder grote druk in water wordt geïnjecteerd.

8.5.4. Bezinken van de wolk additief

- Nadat het additief als wolk is geïnjecteerd, zal het additief bezinken en zich in een laag op de bodem van de cilinder afzetten. Deze laag additief is heel licht en gemakkelijk in suspensie te brengen. Als het additief in suspensie wordt gebracht (door het met de hand op te roeren), duurt het daaropvolgende bezinken langer dan 2 minuten. De draaibeweging, die ten gevolge van het roeren in het water aanwezig is, neemt het additief elke keer mee. Hierdoor duurt het bezinken extra lang. Als het additief in suspensie wordt gebracht, verspreidt het zich door de gehele cilinder. Tijdens het injecteren verspreidt het additief zich alleen in het onderste deel van de cilinder. Het bezinken na het injecteren duurt dan ook korter dan het bezinken nadat het additief in suspensie is gebracht.
- De wolk additief zet zich op de bodem van de cilinder af, als een laag met een bepaalde dikte. In de loop der tijd klinkt deze laag in tot een veel dunnere laag, en wordt een deel van het water dat in eerste instantie in de laag aanwezig is, eruit geduwd. Er is 500 g E4 geïnjecteerd met een dichtheid van 1141 kg/m^3 . Dit is een volume van $0,438 \text{ dm}^3$. Nadat deze hoeveelheid additief is bezonken, heeft de laag additief een dikte van 4 cm. Dit betekent dat het additief na het bezinken een volume van $1,385 \text{ dm}^3$ inneemt. Er is dus verdunning

opgetreden. Het volume van het additief is met een factor van 3,2 toegenomen. Bij andere metingen ligt de waarde van deze factor steeds in dezelfde orde van grootte.

- ⇒ Aan de hand hiervan kan geconcludeerd worden dat er verdunning optreedt wanneer het additief onder grote druk wordt geïnjecteerd in water. Of deze mate van verdunning ook optreedt bij een injectie tussen gesuspendeerd zand is onbekend. Als het additief slangvormig wordt geïnjecteerd, treedt er geen verdunning op.

8.5.5. Additief in combinatie met zand

- Er is op drie manieren zand gestrooid op de laag additief, die zich op de bodem van de cilinder bevindt; in een keer snel een grote hoeveelheid, langzaam strooiend een gemiddelde hoeveelheid en heel zachtjes strooiend een kleine hoeveelheid.
 - Als er in één keer een grote hoeveelheid zand in de cilinder wordt gegooid, brengt dit zand de laag additief op de bodem van de cilinder in suspensie. Het zand bezinkt vervolgens door de wolk additief heen naar de bodem van de cilinder. Het additief bezinkt erboven op. Het zand bezinkt duidelijk sneller dan het additief, waardoor er segregatie van additief en zand ontstaat. Dit principe treedt ook op als het zand in één keer op een hoopje slangvormig additief wordt gestrooid.
 - Als het zand langzaam op de laag additief wordt gestrooid, komt alleen de bovenste laag van het additief in suspensie. Het zand zakt dan op het deel van het additief dat is blijven liggen. Op het zand zakt het deel van het additief dat in suspensie is gebracht. Als zand langzaam op een hoopje slangvormig additief wordt gestrooid, verplaatst dit zand zich tussen de slangetjes. Het is echter de vraag of er bij deze verspreiding verkitting van het zand door het slangvormig additief mogelijk is.
 - Als het zand heel zachtjes op het additief wordt gestrooid, blijft het zand boven op het additief liggen.
- ⇒ Het draagvermogen van het additief onder water is anders dan boven water en lijkt niet van belang als het additief als een wolk geïnjecteerd wordt.
- Als de combinatie van additief en zand wordt opgeroerd en deze vervolgens bezinkt, gaat het zand op de bodem van de cilinder liggen en bezinkt het additief daar bovenop.
 - ⇒ Opnieuw is de segregatie van zand en additief duidelijk.

8.5.6. Toename van de viscositeit van het additief

- Als het additief twee uur, nadat het is aangemaakt, wordt losgeroerd en vervolgens de Marsh-viscositeit wordt gemeten, is het duidelijk dat het uitharden reeds is begonnen. De Marsh-viscositeit kan in dat geval namelijk niet meer gemeten worden, aangezien het niet meer lukt om 1000 ml uit de trechter te laten stromen. Het uitharden (de toename van de viscositeit) is duidelijk zichtbaar.

8.6. Conclusies fase 2

8.6.1. Injectietechniek

- De injectiedruk is bepalend voor de vorm waarin het additief zich verspreidt. Bij een grote injectiedruk verspreidt het additief zich als een wolk, ongeacht de samenstelling van het additief.

Als de injectiedruk klein is, zal het additief zich als samenhangende slangetjes verspreiden, wanneer in de suspensie voldoende bentoniet aanwezig is.

- Het additief moet als een wolk geïnjecteerd worden en verliest daarbij zijn samenhang. De sedimentatie van het gesuspenderde zand beperkt de injectietijd. Hierdoor is een langzame injectie (kleine injectiedruk), waarbij het additief zich slangvormig verspreidt, niet mogelijk. Bovendien is het de vraag of er in dat geval goede menging van zand en additief optreedt.
- Bij gebruik van twee middenmaat injectieflessen kan onder grote druk in één keer 500-600 ml additief worden geïnjecteerd, in een tijdsduur van 10-13 seconden.
- Als het additief als wolk wordt geïnjecteerd, bezinkt het niet als een mengsel met een bepaalde dichtheid, maar als afzonderlijke deeltjes (vlokken). Deze vlokken zijn lichter dan de zandkorrels, waardoor ze langzamer bezinken. Vergroting van de dichtheid van het additief door toevoeging van meer cement, heeft geen invloed op het bezinkgedrag (deeltjes blijven even licht).
- Een homogeen mengsel van zand en additief in suspensie, zal niet tot het gewenste resultaat leiden. Als een dergelijk mengsel bezinkt, zal er segregatie optreden; na het bezinken ligt er een laag additief op een zandlaag. Het additief en het bodemmateriaal zullen in dat geval niet of nauwelijks mengen.
- Op het moment dat het additief slangvormig bij elkaar blijft, bezinkt het wel als mengsel met een bepaalde dichtheid. Dit ontstaat echter alleen bij langzame injectie (en een groot genoeg bentonietgehalte), wat niet zal worden toegepast in het vervolg van dit onderzoek.
- Als het additief verticaal langs de wand wordt geïnjecteerd, verspreidt de wolk additief zich door de gehele cilinder. De injectietuit kan zonder verstoring van het bezinkende materiaal verwijderd worden.
- Een additief met een te grote Marsh-viscositeit (ten gevolge van een hoog bentonietgehalte) kan wel in water worden geïnjecteerd. Bij een grote injectiedruk verspreidt een dergelijk additief zich ook als wolk. De eis dat de Marsh-viscositeit kleiner moet zijn dan 60 s/l, is echter gesteld in verband met de verwerkbaarheid van het additief. Het verpompen van het additief verloopt waarschijnlijk minder goed dan het injecteren. In de volgende fase zal kort aandacht worden besteed aan de mogelijkheid om een additief met een te grote Marsh-viscositeit te injecteren tussen het gesuspenderde zand.

8.6.2. Eigenschappen van het additief

- Als het additief onder grote druk in water wordt geïnjecteerd, verspreidt het zich als wolk en treedt er verdunning van het additief op.
- Een additief met meer bentoniet heeft een hogere viscositeit, een groter draagvermogen en vertoont meer samenhang. Dit is vooral merkbaar wanneer het additief meer dan 5% bentoniet bevat. De samenstelling van het additief heeft niet veel invloed op de manier waarop het additief zich verspreidt, na injectie onder grote druk in water.
- De functie van het bentoniet is het zorgen voor een stabiele suspensie. Doordat het additief met een grote druk wordt geïnjecteerd, verdwijnt de functie van het bentoniet met betrekking tot samenhang en minimale verdunning (ondanks de minimale vlokvorming).
- Zeewater heeft geen invloed op de eigenschappen van het additief.

- Het draagvermogen van een laagje additief onder water voor ‘vallend’ zand is niet van belang, wanneer het additief als een wolk geïnjecteerd is. Het zand blijkt door het additief heen te vallen.
- Het additief moet geroerd worden tot het moment van injectie. Als suspensies, waaraan bentoniet is toegevoegd even stilstaan (10-20 min) gaat het thixotropische gedrag een rol spelen. De suspensies gaan zich gedragen als een soort “pudding” en zijn niet meer goed injecteerbaar. Door deze suspensies los te roeren kan het thixotropische gedrag worden opgeheven.
- De eigenschappen van een additief zijn niet altijd hetzelfde, ook al zijn de samenstelling en de aanmaakprocedure in principe wel hetzelfde. Waarschijnlijk ontstaan dichtheidsverschillen, doordat tijdens het aanmaken korrelmateriaal, water en/of bentonietsuspensie verloren gaan. Verschillen in Marsh-viscositeit ontstaan ook door deze verliezen of doordat er tijdens het aanmaken van het additief op een of andere manier toch niet constant wordt geroerd of eventueel door veroudering van de bentonietsuspensie.
- Het is het onmogelijk om in dit onderzoek twee monsters te maken met precies dezelfde samenstelling, aangezien de hoeveelheid additief die geïnjecteerd wordt nooit twee keer precies hetzelfde kan zijn.

8.7. Aanbevelingen voor verder onderzoek

- In de volgende fase zal kort aandacht worden besteed aan de mogelijkheid om een additief met een te grote Marsh-viscositeit te injecteren tussen het gesuspendeerde zand.
- Een additief dat bestaat uit cement en bentoniet, is een suspensie. In een suspensie zijn vaste deeltjes aanwezig. Deze deeltjes zijn lichter dan het bodemmateriaal en bezinken daardoor langzamer. Als het zand en het additief gezamenlijk bezinken, zal er segregatie optreden.

In een oplossing zijn geen vaste deeltjes aanwezig. Het is mogelijk dat er geen segregatie ontstaat, wanneer een oplossing met een bepaalde dichtheid als additief wordt gebruikt. Hierdoor zouden er minder strenge eisen aan de injectietechniek gesteld kunnen worden. Silicagels zijn oplossingen die geschikt lijken. Silicagels zijn oplossingen van natrium-silicaat in water. Deze silicagels zijn evenals cement en bentoniet milieu-neutraal (in tegenstelling tot de meeste andere oplossingen). Ze zijn duurder dan cement-bentonietsuspensies, maar goedkoper dan de meeste andere oplossingen. De dichtheid van dergelijke oplossingen kan met behulp van verzwaarders worden aangepast. Het de vraag in hoeverre er verdunning zal optreden wanneer dergelijke stoffen onder grote druk in water worden geïnjecteerd. Er zou meer onderzoek verricht moeten worden naar de mogelijkheden van silicagels.

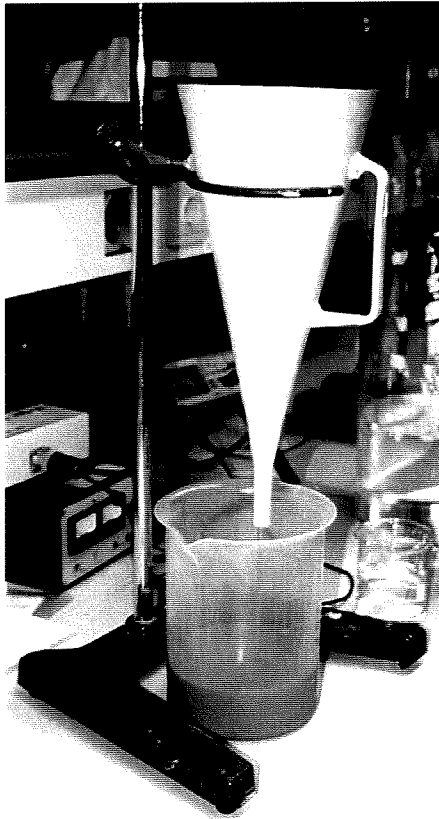


Foto 8.1: De Marsh-trechter

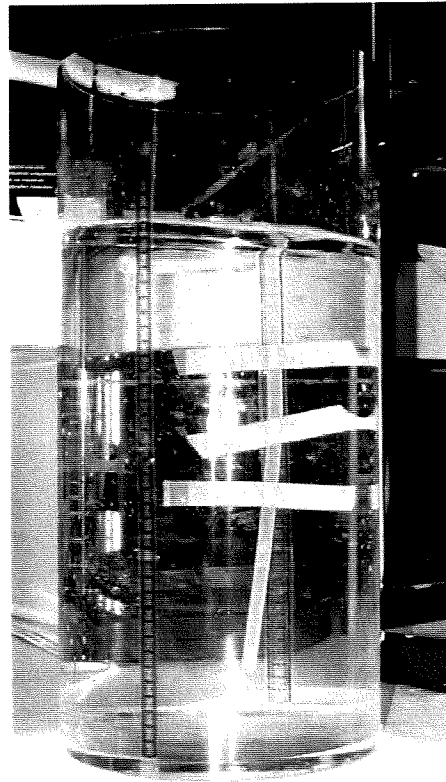


Foto 8.2: Injectietuit, verticaal langs de wand van de cilinder

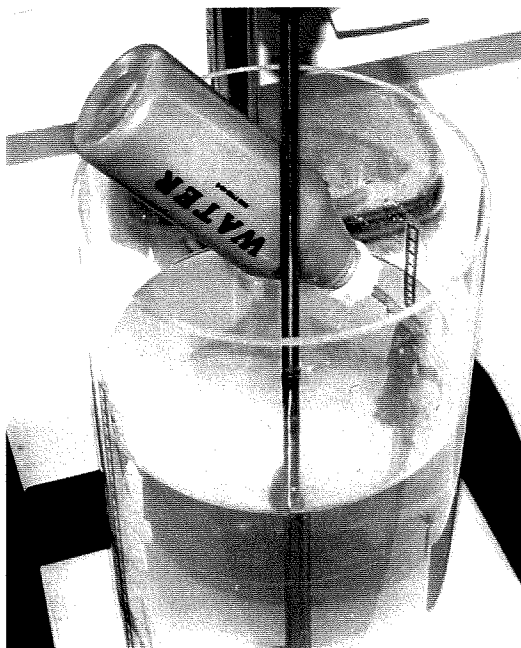


Foto 8.3: Injectie van het additief met een spuitfles, verticaal langs de wand van de cilinder

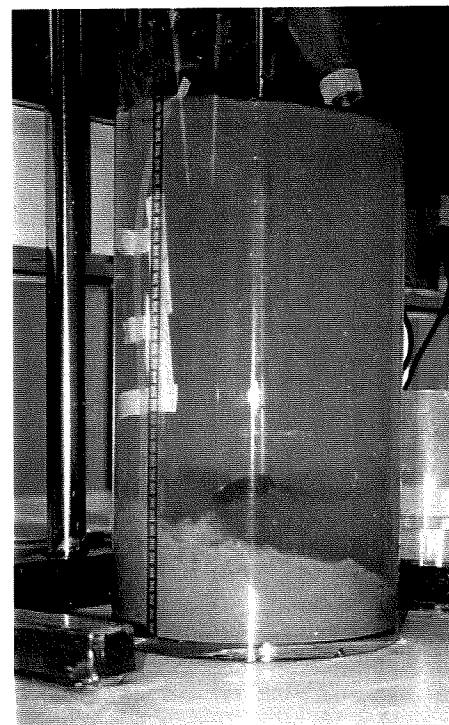


Foto 8.4: Het additief verspreidt zich als een wolk bij een injectie onder grote druk



Foto 8.5: De wolk additief verspreidt zich in de onderste 10 cm van de cilinder

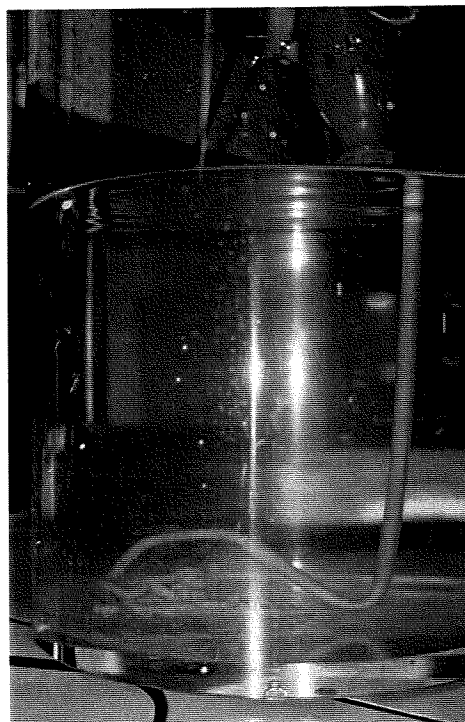


Foto 8.6: Het additief verspreid zich slangvormig bij een injectie onder lage druk



Foto 8.7: De slangetjes additief blijven op een hoopje op de bodem liggen

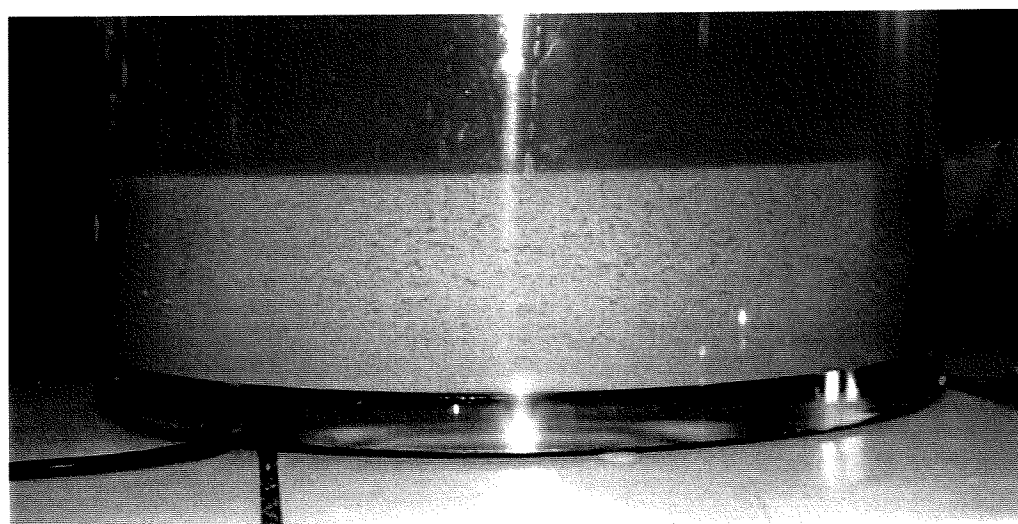


Foto 8.8: Vlokjes additief in een al grotendeels bezonken laag additief, die duiden op enige samenhang

9. Fase 3: Oriënterende combinatieproeven

9.1. Algemeen

Deze fase zal worden beschreven aan de hand van het doel, de constanten, de variabelen, de resultaten en de conclusies met betrekking tot deze fase. In de tekst wordt verschillende malen naar foto's verwezen. Deze foto's zijn aan het eind van dit hoofdstuk bijgevoegd.

Voor de bepaling van de hoeveelheid additief tussen het zand, is gebruik gemaakt van monstersamenstellingen uit fase 4 en fase 5.

9.2. Doel

Aan de hand van de vorige twee fasen is bepaald op welke manier het additief tussen het gesuspenderde zand moet worden geïnjecteerd (zie constanten in paragraaf 9.3). In deze fase wordt bekeken op welke manier het additief zich tussen het gesuspenderde zand verspreidt, als gebruik gemaakt wordt van de ontwikkelde injectietechniek.

9.3. Constanten

Opstelling

- Afmetingen cilinder.
- Hoeveelheid zand: 5,4 kg.
- Hoeveelheid zeewater: 10 dm³.
- Zandsoort S85.

Roeren

- Toerental: 260 tpm.
- Positie roerder: 11 cm boven de bodem van de cilinder.

Injecteren

- Injectiediameter: 0,5 cm.
- Injectiedruk: één grote kneep in de spuitfles (grote druk).
- Injectietijd: 10-13 seconden (tijdsduur van één grote kneep).
- Injectiehoeveelheid: ongeveer 600 ml.
- Positie injectiepunt: 4 cm boven de bodem van de cilinder.
- Injectiemoment: direct nadat gestopt is met roeren.

9.4. Variabelen

Additief

- Samenstelling additief. De volgende additiefsamenstellingen tijdens de oriënterende injecties tussen het gesuspendeerde zand geïnjecteerd: F3, F4, A0 en E5. De volgende samenstellingen zijn voor de bepaling van de hoeveelheid additief tussen het zand geïnjecteerd tussen het gesuspendeerde zand: A0, C1, D3, F3 en F5.

9.5. Aanpak en resultaten van de oriënterende combinatieproeven

9.5.1. Algemeen

De oriënterende injecties zijn uitgevoerd met één injectiefles. Tijdens het aanmaken van monsters wordt gebruik gemaakt van twee injectieflessen. Voor de bepaling van de hoeveelheid additief tussen het bezonken zand is ook gebruik gemaakt van twee injectieflessen.

9.5.2. Oriënterende injecties

- Injectie van F4 en F3 tussen het gesuspendeerde zand.
 - Het additief wordt tussen het gesuspendeerde zand geïnjecteerd, nadat gestopt is met roeren. Vervolgens bezinkt de combinatie van zand en additief. Na het bezinken ligt er een laagje additief van enkele millimeters op het zand en zit er ter plaatse van het injectiepunt een beetje additief op de wand van de cilinder geplakt (foto 9.1). Het is niet duidelijk te zien of de rest van het additief met het zand is gemengd.
 - Om te bepalen of de rest van het zand met additief is gemengd, is de combinatie van bezonken zand en additief opgeroerd. Er ontstaat een mengsel van zand en additief in suspensie. Als dit mengsel bezinkt, treedt er segregatie van zand en additief op. Op het zand ligt een laag additief van enkele centimeters (foto 9.2).
 - ⇒ Er moet additief tussen de zandkorrels aanwezig zijn geweest. Dit blijkt uit de toename van de dikte van de laag additief op het zand.
 - ⇒ Bij het vastzetten van de injectieflessen op de injectietuiten, gaat er altijd enig additief verloren (stroomt uit de flessen). Dit additief mengt met het gesuspendeerde zand, aangezien er tijdens het vastzetten van de flessen nog geroerd wordt. Na het bezinken, zal dit additief op het zand liggen.
- Injectie van A0 tussen het gesuspendeerde zand.
 - Na de injectie van het additief en het bezinken van het zand en het additief, ligt er op het zand een laagje additief van enkele millimeters. Onder in de cilinder ligt een laag zand van ongeveer 1 centimeter. Het overige zand lijkt redelijk met het additief te zijn gemengd. Dit blijkt uit de groenere kleur ten opzichte van de gelere kleur van de laag zand op de bodem van de cilinder.
 - Nadat de combinatie van zand en additief is opgeroerd en vervolgens bezonken, ligt er een laag additief van 1 cm op het zand.
 - ⇒ Hieruit blijkt dat er additief tussen de bezonken zandkorrels aanwezig is geweest.

- Injectie van E5 tussen het gesuspendeerde zand.
 - Na de injectie van het additief en het bezinken, ligt er op het zand een laagje additief van 0,5 centimeter. Onder in de cilinder ligt een laag zand van ongeveer 0,5 centimeter. Het overige zand lijkt redelijk met het additief te zijn gemengd. Dit blijkt uit de groenere kleur ten opzichte van de gelere kleur van de laag zand op de bodem van de cilinder. Het geheel lijkt minder goed gemengd dan de menging bij injectie van additief A0. In de volgende fase zal moeten blijken of dat waar is. Ter plaatse van het injectiepunt zit enig additief op de wand geplakt, net als bij de injectie van F4.
 - ⇒ Het additief dat aan de wand is geplakt, is waarschijnlijk het additief dat op het laatste moment geïnjecteerd is. Op dat moment is het zand al grotendeels bezonken, waardoor de verspreiding van het additief minder goed kan verlopen. Er is meer weerstand, waardoor de injectie langzamer verloopt. Het geïnjecteerde additief vertoont hierdoor meer samenhang en blijft tegen de wand plakken.
 - Nadat de combinatie van zand en additief is opgeroerd en vervolgens bezonken, ligt er een laag additief van 1,5 cm op het zand.
 - ⇒ Hieruit blijkt dat er additief tussen de bezonken zandkorrels aanwezig is geweest.
- Als de combinatie van zand en additief wordt opgeroerd, ontstaat er eigenlijk tijdens het roeren al segregatie. Het lichtere additief wordt door de roerder tot boven in de cilinder verplaatst. Het zwaardere zand komt minder hoog in de cilinder. Hierdoor wordt de segregatie die tijdens het bezinken ontstaat alleen maar bevorderd. Het lichtere additief, dat langzamer bezinkt, moet een grotere afstand afleggen dan het zwaardere zand en heeft daardoor een extra lange bezinktijd.
- Er is geprobeerd om een additief met een veel te hoge Marsh-viscositeit (> 80 s/l) te injecteren tussen het gesuspendeerde zand (G5). In water kan een dergelijke suspensie zonder problemen geïnjecteerd worden, in zand verloopt deze injectie minder soepel. De te grote viscositeit en het snel ontwikkelde thixotropische gedrag zorgen hiervoor. Het additief verspreidt zich niet tussen het gesuspendeerde zand, maar blijft ter plaatse van het injectiepunt aan de wand zitten. De dichtheid van het gesuspendeerde zand is, net nadat gestopt is met roeren, al te groot voor een goede verspreiding van het viskeuze additief. Doordat het additief zich niet verspreidt, raken vervolgens de injectietuiten verstopt.

9.5.3. Indicatie van de hoeveelheid additief tussen het bezonken zand

Om te schatten hoeveel additief er tussen het bezonken zand aanwezig is, is gebruik gemaakt van de monstersamenstellingen uit de eerste monsterronde. Er zijn twee indicatieve methodes toegepast. Bij de eerste methode zijn aparte proeven gedaan, waarbij in een perspex cilinder alle monsters van fase 4 opnieuw zijn aangemaakt. De tweede methode maakt gebruik de natte dichtheid van de aangemaakte monsters in fase 4 en van meetgegevens van de eerste methode.

Methode 1, aan de hand van de toename van de dikte van de laag additief

- In een perspex cilinder zijn alle monsters (opnieuw) na elkaar aangemaakt. In tabel 9.1 zijn de eigenschappen van deze additieven en de geïnjecteerde hoeveelheden weergegeven.

Additief	Marsh-viscositeit (s/l)	Dichtheid (kg/m ³)	Geïnjecteerd gewicht (g)	Geïnjecteerd volume (dm ³)
A0	40,47	1526	832,4	0,545
C1	42,25	1463	800,8	0,547
D3	39,59	1173	658,6	0,561
F3	60,74	1168	517,7	0,443
F5	74	1111	515,5	0,464

Tabel 9.1: Eigenschappen additieven bij bepaling van de hoeveelheid zand tussen het additief

- Nadat de combinatie van additief en zand volledig is bezonken, wordt de dikte van de laag additief op het bezonken zand gemeten (foto 9.3).
- Het geheel wordt vervolgens opgeroerd. Door dit oproeren ontstaat een mengsel van zand en additief in suspensie. Tijdens het bezinken van het mengsel treedt er segregatie van zand en additief op. De dikte van de laag additief op het zand, is na het oproeren en bezinken groter dan de dikte van de laag additief die voor het oproeren werd gemeten (foto 9.4).
- Het volume van de dikkere laag additief kan worden berekend. Aangezien ook bekend is hoeveel additief er geïnjecteerd is, kan de toename van het volume van het additief bepaald worden. Deze toename van het volume, is ontstaan door verdunning van het additief tijdens de injectie tussen het gesuspenderde zand. Door de verdunning is er meer water in het additief aanwezig. De factor van verdunning en de W/C-factor van het additief na de verdunning kunnen bepaald worden, als er vanuit wordt gegaan, dat na het oproeren al het additief in een laag op het zand ligt en er geen additief meer tussen het zand aanwezig is. Daarnaast moet er vanuit worden gegaan dat het oproeren geen extra verdunning van het additief geeft. Dit alles is tabel 9.2 weergegeven.

Additief	Dikte laag na oproeren (cm)	Volume verdunde additief (dm ³)	Factor van verdunning
A0	3,33	1,153	2,1
C1	4,03	1,396	2,6
D3	4,10	1,420	2,5
F3	4,15	1,437	3,2
F5	3,95	1,368	2,9

Tabel 9.2: Mate van verdunning van het additief

- ⇒ De mate van verdunning lijkt niet afhankelijk van de samenstelling van het additief. Er is geen verband tussen de factor van verdunning en de geïnjekteerde W/C-factor. Waarschijnlijk zijn de injectiedruk en de turbulentie van het gesuspenderde materiaal bepalend voor de mate van verdunning.
- ⇒ De toename van de W/C-factor is veel groter bij de additieven die minder cement bevatten. Dit is logisch als de mate van verdunning bij alle additieven ongeveer gelijk is.
- ⇒ Het geïnjekteerde bentonietgehalte is niet voldoende groot om de verdunde suspensie tussen de poriën van het bezonken zand stabiel te houden. De

functie van het bentoniet beperkt zich dus tot het stabiel houden van het additief in verband met de verwerkbaarheid [A10].

- De toename van de dikte van de laag additief ten gevolge van het oproeren, geeft aan hoeveel additief tussen het zand aanwezig is geweest na de injectie (zie tabel 9.3). Het additief is na de injectie verdund, hierdoor is het volume additief dat tussen het zand aanwezig was, groter dan het geïnjecteerde volume.

Additief	Dikte laag na injectie (cm)	Dikte laag na oproeren (cm)	Toename dikte laag (cm)	Volume additief tussen zand (dm ³)	Percentage van totale volume additief in de poriën
A0	0,98	3,33	2,35	0,814	70 %
C1	1,25	4,03	2,78	0,963	69 %
D3	1,88	4,10	2,22	0,769	54 %
F3	1,60	4,15	2,55	0,883	61 %
F5	1,83	3,95	2,12	0,734	54 %

Tabel 9.3: Methode 1, hoeveelheid additief tussen het zand, na de injectie.

- De hoeveelheid additief met deze methode berekend, geeft een indicatie van de hoeveelheid additief, die tussen het zand aanwezig zijn bij de uitgeharde en beproefde monsters. Er zijn veel aannames gedaan bij deze berekening, waardoor de berekende waarden slechts als globale indicatie gezien moeten worden.

Methode 2, aan hand de natte dichtheid van de uitgeharde monsters

- Het verkitten bezonken zand heeft in de monsters van fase 4 een hoogte van ongeveer 11 cm. De porositeit van dit verkitten zand is dan 0,465. De poriën worden opgevuld met additief en zeewater.
- Aan de hand van de natte dichtheid van het monster kan de hoeveelheid additief in de poriën bepaald worden:

$$(1-0,465) * \rho_{\text{zand}} + x * \rho_{\text{zeewater}} + y * \rho_{\text{additief}} = \rho_{\text{natte monster}}$$

$$x + y = 0,465$$

- Dit zijn twee vergelijkingen met twee onbekenden (x en y). De hoeveelheid additief in het bezonken zand kan bepaald worden door het volume van het bezonken zand ($\frac{1}{4} \pi (0,21)^2 \cdot 0,11 = 3,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$) te vermenigvuldigen met de berekende factor y.
- De dichtheid van het gebruikte zeewater is bepaald. Deze is 1012,9 kg/m³. Dit betekent dat het water 1,1% zout bevat (gewichtsperscentage). De dichtheid van zand is 2650 kg/m³. De dichtheid van het additief en het natte monster zijn berekend tijdens de experimenten.
- Wanneer wordt uitgegaan van dezelfde mate van verdunning als bij methode 1, kan ook bij methode 2 het percentage additief worden bepaald, dat tussen het zand aanwezig is.

- Een en ander is weergegeven in tabel 9.4.

Additief	ρ_{additief} (kg/m ³)	$\rho_{\text{natte monster}}$ (kg/m ³)	x	y	Volume additief in zand (dm ³)	Percentage van totale volume additief in de poriën
A0	1511	1967	0,307	0,158	0,602	49 %
C1	1452	1953	0,318	0,147	0,560	41 %
D3	1174	1914	0,308	0,157	0,598	41 %
F3	1192	1916	0,312	0,153	0,583	35 %
F5	1132	1947	-	>0,465	1,772	> 100 %

Tabel 9.4: Methode 2, hoeveelheid additief tussen het zand, na de injectie.

- ⇒ Het natte monster met additiefsamenstelling F5 bevat bij deze berekening meer dan 100% additief. Dit kan niet; de berekening klopt dus niet. De gemeten dichtheid van het natte monster met additiefsamenstelling F5 lijkt te hoog. Het monster zou een kleinere dichtheid moeten hebben dan de monsters met additiefsamenstellingen F3 en D3. Dan zou het berekende volume additief tussen het zand beter kloppen met het berekende volume bij methode 1. Waarschijnlijk is de porositeit van het natte monster met additiefsamenstelling F5 minder geweest dan 0,465 (hoogte van het verkitte zand < 11 cm). Hierdoor is de gemeten dichtheid groter, dan verwacht wordt aan de hand van de gemeten dichtheden van de monsters met additiefsamenstelling F3 en D3.
- ⇒ Het volume additief dat tussen het zand aanwezig, is bij deze tweede berekeningsmethode minder dan bij de eerste methode.
- Het is mogelijk dat het oproeren bij de eerste methode toch zorgt voor extra verdunning, waardoor de totale hoeveelheid additief toeneemt. Bij de berekening wordt de totale toename van het volume gezien als additief dat voor het oproeren tussen het zand aanwezig was. In werkelijkheid kan een deel van deze toename zijn ontstaan door extra verdunning.
 - Als de mate van verdunning afhankelijk is van de injectiedruk, is het mogelijk dat de injectiedrukken bij het injecteren van het additief in de perspex cilinders voor methode 1, anders waren dan bij het aanmaken van de monsters. Hierdoor kan de mate van verdunning niet zomaar worden gelijkgesteld. Dit zou ook een verklaring kunnen zijn voor het verschil van de dikte van de laag additief op de monsters.

9.6. Conclusies fase 3

- Aan de hand van de resultaten van deze fase kan geen oordeel worden gegeven over de manier waarop het additief zich tussen het korrelmateriaal verspreidt. Het is duidelijk dat er additief tussen het korrelmateriaal aanwezig is, nadat het additief is geïnjecteerd. Het is echter niet mogelijk om tussen het korrelmateriaal te kijken om de mate van menging van additief en zand te bepalen. In de vierde fase worden monsters aangemaakt. Deze kunnen nadat ze zijn uitgehard, een betere indruk geven van de manier waarop het additief zich verspreidt en de mate van menging.
- Als te lang gewacht wordt met de injectie van het additief, nadat gestopt is met roeren, is de dichtheid van het zand dusdanig toegenomen, dat een goede verspreiding van het additief niet

meer mogelijk is. Het additief blijft in de buurt van het injectiepunt liggen. De injectiedruk kan niet meer voor een goede verspreiding zorgen, wat bij lagere dichtheden van het gesuspendeerde zand wel lukt. In dat geval wordt door middel van de injectiedruk een wolk additief in de cilinder verspreid, waarin het zand vervolgens bezinkt. De injectiedruk duwt het aanwezige zand weg; dit lukt bij grotere dichtheden van het gesuspendeerde zand niet meer. Het injectiemoment blijft gehandhaafd. Direct nadat gestopt is met roeren, wordt het additief geïnjecteerd met één grote kneep in de injectieflessen (gedurende 10-13 seconden).

- Naar aanleiding van de resultaten van deze fase wordt verwacht dat het gebied waar de roerder zich bevindt (net boven op het bezonken zand) geen invloedrijk gebied zal zijn. De positie van de roerder wordt dus gehandhaafd op 11 cm boven de bodem van de cilinder.
- Een additief met een veel te grote Marsh-viscositeit (>80 s/l) kan niet geïnjecteerd worden tussen het gesuspendeerde zand. Een dergelijk additief kon wel zonder problemen in water geïnjecteerd worden.
- Nadat de combinatie van geïnjecteerd additief en gesuspendeerd zand bezonken is, ligt er een laagje additief bovenop. In de praktijk zal dit laagje worden meegevoerd door de aanwezige stroming.
- Er zijn twee methoden gebruikt om te schatten hoeveel additief er tussen het bezonken zand aanwezig is. De eerste methode geeft aan dat meer dan 50% van de geïnjecteerde hoeveelheid additief zich verspreidt tussen het korrelmateriaal. De tweede methode geeft aan dat meer dan 35% van het geïnjecteerde additief zich verspreidt tussen het korrelmateriaal.
- Ten gevolge van de injectie tussen het gesuspendeerde zand verdunt het additief met een factor die varieert van 2,1 tot 3. De mate van verdunning is waarschijnlijk afhankelijk van de injectiedruk en de aanwezige turbulentie in het gesuspendeerde zand. De samenstelling van het additief heeft geen invloed op de mate van verdunning. Door de verdunning neemt de W/C-factor van het additief toe (dit geeft een verslechtering van de eigenschappen van het additief).

9.7. Aanbevelingen voor verder onderzoek

- Silicagels zijn minder viskeus dan cement-bentonietsuspensies en bevatten geen deeltjes die uitgefilterd kunnen worden. Silicagels kunnen hierdoor eventueel geïnjecteerd worden op een later moment, wanneer het gesuspendeerde zand meer bezonken is en een grotere dichtheid heeft. Hier zou verder onderzoek naar verricht kunnen worden.

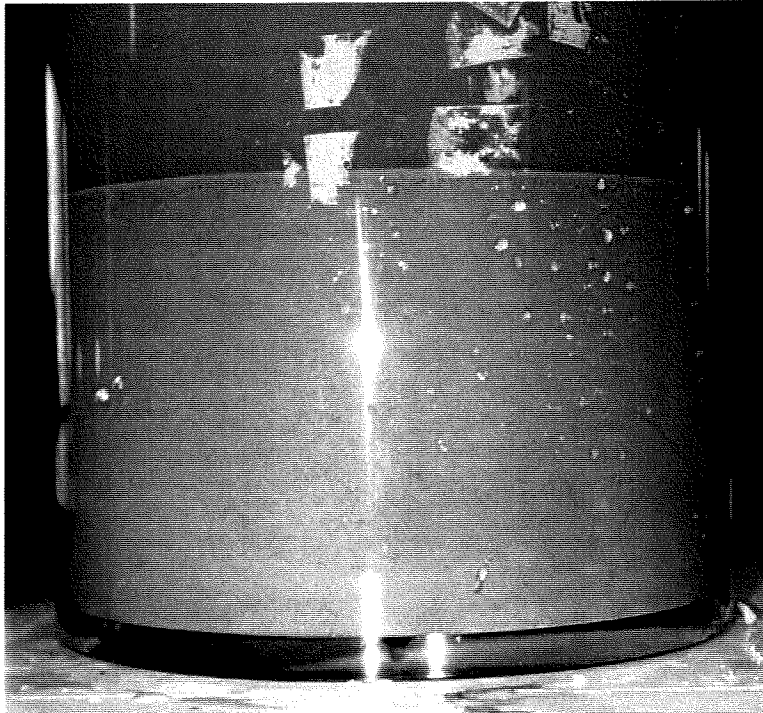


Foto 9.1: Na de injectie ligt er een laagje additief van enkele millimeters op het zand en zit er ter plaatse van het injectiepunt een beetje additief op de wand van de cilinder geplakt



Foto 9.2: Nadat het geheel is opgeroerd ligt er een laag additief van enkele centimeters op het zand

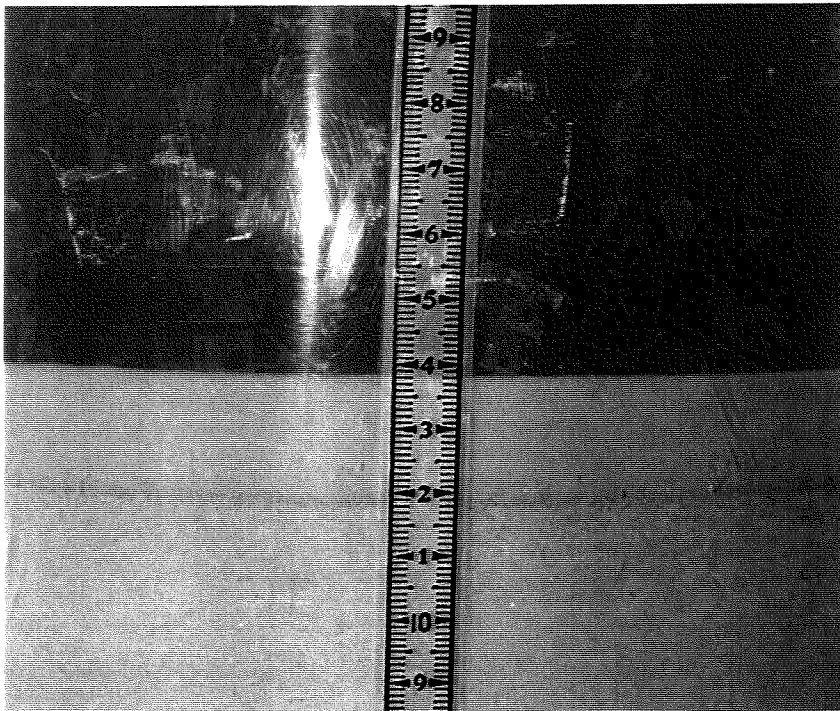


Foto 9.3: Dikte van de laag additief na de injectie

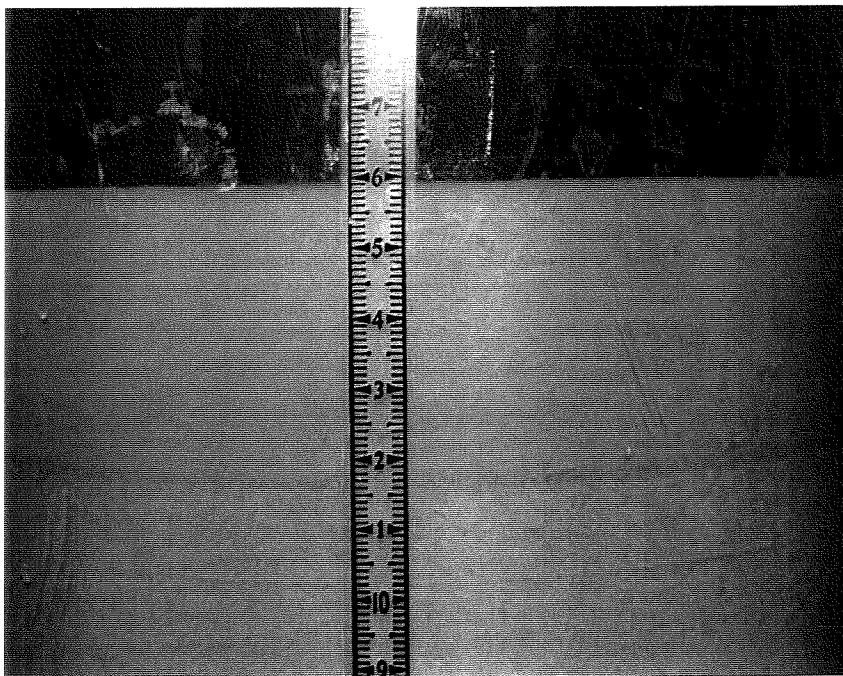


Foto 9.4: Na het oproeren van de combinatie van zand en additief, ligt er een dikkere laag additief op het zand

10. Fase 4: Eerste Monsterronde

10.1. Algemeen

Deze fase zal worden beschreven aan de hand van het doel, de constanten, de variabelen, de resultaten en de conclusies met betrekking tot deze fase. In de tekst wordt verschillende malen naar foto's verwezen. Deze foto's zijn aan het eind van dit hoofdstuk bijgevoegd.

10.2. Doel

In deze eerste monsterronde wordt de invloed van de samenstelling van het additief op de eigenschappen van het eindproduct bepaald.

10.3. Constanten

Opstelling

- Afmetingen cilinder.
- Hoeveelheid zand: 5,4 kg.
- Hoeveelheid zeewater: 10 dm³.
- Zandsoort S85.

Roeren

- Toerental: 260 tpm.
- Positie roerder: 11 cm boven de bodem van de cilinder.

Injecteren

- Injectiediameter: 0,5 cm.
- Injectiedruk: één grote kneep in de spuitfles (grote druk).
- Injectietijd: 10-13 seconden (tijdsduur van één grote kneep).
- Injectiehoeveelheid: ongeveer 600 ml.
- Positie injectiepunt: 4 cm boven de bodem van de cilinder.
- Injectiemoment: direct nadat gestopt is met roeren.

10.4. Variabelen

Samenstelling additief.

In tabel 10.1 staan opnieuw de suspensies aangegeven die geschikt zijn om geïnjecteerd te worden tussen het gesuspenderde bodemmateriaal. In deze tabel staan in het donker grijs de additiefsamenstellingen aangegeven, die in deze eerste monsterronde zijn bekeken.

→ Toenemende Water/Cement-factor						
← Toenemend bentoniet-gehalte	A0	A1	A2	A3	A4	A5
	B0	B1	B2	B3	B4	B5
		C1	C2	C3	C4	C5
			D2	D3	D4	D5
			E2	E3	E4	E5
				F3	F4	F5

Middel grijs: Niet stabiel

Donker grijs: Te grote viscositeit

Licht Grijs: Additiefsamenstellingen in eerste ronde

Tabel 10.1 Additiefsamenstellingen in eerste monsterronde

A0 is een additiefsamenstelling zonder bentoniet. C1 is een additiefsamenstelling die veel gebruikt wordt bij grouten. D3 en F3 hebben dezelfde W/C-factor, maar een verschillend bentonietgehalte. Door de eigenschappen van de monsters met deze additiefsamenstellingen met elkaar te vergelijken, kan de invloed van het bentonietgehalte op de eigenschappen van het eindproduct bepaald worden. F3 en F5 hebben hetzelfde bentonietgehalte, maar een verschillende W/C-factor. Door de eigenschappen van de monsters met deze additiefsamenstellingen met elkaar te vergelijken, kan de invloed van de W/C-factor op de eigenschappen van het eindproduct bepaald worden.

10.5. Aanpak en resultaten van de eerste monsterronde

10.5.1. Aanpak

Aan de hand van de resultaten van de vorige fasen is bepaald op welke manier de monsters moeten worden aangemaakt. Het zand in de cilinders is opgeroerd met een toerental van 260 tpm. Hierdoor heeft het gesuspenderde zand een dichtheid van ongeveer 1300 kg/m^3 . Direct nadat gestopt is met roeren, wordt het additief geïnjecteerd met behulp van twee injectieflessen. Hiermee wordt in 10 tot 13 seconden ongeveer 600 ml additief geïnjecteerd. De injectiepunten bevinden zich 4 cm boven de bodem van de cilinder en hebben een diameter van 0,5 cm. Nadat het additief is geïnjecteerd en de combinatie van zand en additief is bezonken, is de cilinder weggezet om het geheel te laten uitharden.

10.5.2. Resultaten algemeen

- Uit één cilinder (één groot monster ($d = 21$ cm) kunnen na het uitharden met behulp van steekblikken vier (kleinere) monsters ($d = 6,6$ cm) gestoken worden (foto 10.1). Nadat de monsters uit het steekblik gehaald zijn, zullen deze monsters zullen gebruikt worden voor:
 - Het bekijken van het monster, waarbij de mate van verspreiding en de breekbaarheid bepaald worden.
 - Het bepalen van de dichtheid.
 - Het bepalen van de druksterkte.
 - Het bepalen van de erosiebestendigheid.
 De andere cilinder met dezelfde monstersamenstelling kan gebruikt worden om de eigenschappen van een langer uitgehard monster te bepalen of als er iets fout gaat.
- Het testen van de erosiebestendigheid van een monster duurt ongeveer een dag. Aangezien er maar één erosie-apparaat aanwezig is, is het onmogelijk om de erosiebestendigheid van de monsters met verschillende additiefsamenstellingen na precies evenveel dagen uitharden onderling te vergelijken. Per dag is één monster bekeken.
- Het was logistiek onmogelijk om de druksterkte van de monsters met verschillende additiefsamenstellingen op één dag te bepalen en de monsters vervolgens te bewaren voor de erosieproef. De druksterkte van elk monster met een bepaalde additiefsamenstelling is op dezelfde dag bepaald als de erosiebestendigheid van dat monster. Op deze manier kan de druksterkte wel worden gerelateerd aan de erosiebestendigheid.

10.5.3. Additiefsamenstellingen en -eigenschappen

- Elke additiefsamenstelling is in twee cilinders geïnjecteerd tussen het opgeroerde zand. In totaal zijn er dus 10 cilinders met verkit zand aangemaakt in de eerste monsterronde. In tabel 10.2 staan de eigenschappen van de verschillende additieven en de geïnjecteerde hoeveelheden aangegeven.

Additief	Marsh-viscositeit (s/l)	Dichtheid (kg/m^3)	Geïnjecteerd gewicht (g)	Geïnjecteerd volume (dm^3)
A0	43,87	1522	859,0	0,564
C1	41,38	1439	776,7	0,540
D3	38,97	1170	707,2	0,604
F3	67,81	1186	584,7	0,493
F5	64,5	1132	469,8	0,415
A0	42,60	1511	880,7	0,581
C1	41,78	1452	762,5	0,522
D3	40,41	1174	683,4	0,582
F3	68,03	1192	619,2	0,511
F5	65,78	1104	585,1	0,529

Tabel 10.2: Eigenschappen en geïnjecteerde hoeveelheden van de additieven in fase 4

: Gebruikt bij proeven bij Grondmechanica Delft

: Gebruikt voor beproeven van een langer uitgehard monster in fase 5

⇒ De additieven F3 en F5 hadden beide keren een te hoge Marsh-viscositeit. Aangezien de Marsh-viscositeit niet veel te groot was, zijn deze additieven toch geïnjecteerd tussen het gesuspendeerde zand. In fase 3 is gebleken, dat het injecteren tussen het gesuspendeerde bodemateriaal een probleem wordt als de Marsh-viscositeit groter is

dan 80 s/l, dat was hier niet het geval. F3 is tijdens de oriënterende fasen ook een keer aangemaakt en had toen een Marsh-viscositeit van 56,68 s/l. Hieruit blijkt opnieuw dat de eigenschappen van een additief niet altijd hetzelfde zijn, ook al zijn de samenstelling en de aanmaakprocedure in principe wel hetzelfde. Een oorzaak van de hoge Marsh-viscositeit kan de oudheid van de bentonietsuspensie zijn.

10.5.4. Eigenschappen eindproduct in het algemeen

- *De mate van verspreiding van het additief in de monsters*

- De dikte van de laag verkit, bezonken zand is in elke cilinder ongeveer 11 cm. Zonder additief zou een dergelijke laag zand een porositeit van 0,465 hebben. Verzadigd met water geeft dit een dichtheid van 1894 kg/m³.
- Op de laag verkit, bezonken zand is een laag additief aanwezig (foto 10.2). Deze laag heeft een dikte die in de verschillende cilinders varieert van 1 tot 1,8 cm. Binnen een cilinder is de dikte van de laag niet constant, maar varieert deze enkele millimeters. Ondanks het feit dat het additief onder in de cilinder wordt geïnjecteerd, treedt er toch segregatie op.
 - ⇒ Een deel van deze segregatie ontstaat door verlies van additief tijdens het bevestigen van de spuitflessen (er wordt dan nog geroerd). Een ander deel ontstaat door het verschil in bezinksnelheid van het zand en het additief. Door het additief vanaf een lager punt te injecteren, kan dit deel van de segregatie misschien worden voorkomen.
- Aan de hand van de groene kleur van de gestoken monsters lijkt het additief redelijk homogeen door het bezonken zand te zijn verspreid, zowel in horizontale als in verticale richting. Dit is duidelijk te zien, als de monsters in stukken worden gebroken. Op foto 10.3 staan brokstukken van een monster met additiefsamenstelling C1. Hier is te zien dat er weinig kleurverschil is binnen het monster. Random in de monsters zijn enkele gelere plekken aanwezig, die duiden op minder additief (foto 10.4).
- Onderling verschillen de monsters wel van kleur. De monsters met een lagere W/C-factor (en dus meer cement) zijn duidelijk groener dan de monsters met een hogere W/C-factor. Dit is te zien op foto 10.5 t/m foto 10.9.
- Bij sommige monsters (F3, D3) is onder in de cilinder, in het midden minder additief aanwezig dan aan de randen. Op foto 10.10 is duidelijk een gele plek met minder additief (D3) te zien, in het midden, aan de onderzijde van een cilinder. Op foto 10.2 is in een gestoken monster een deel van deze gelere plek te zien aan de onderkant van het monster. Deze plek is minder verkit dan de rest van het monster, waar het additief redelijk homogeen verspreid lijkt.
 - ⇒ De oorzaak hiervan is waarschijnlijk dat het zand nog niet volledig in suspensie was, op het moment het additief werd geïnjecteerd.

- **Samenhang**

- Om aan te tonen dat de monsters samenhang vertonen, is er een aparte proef gedaan. Hiervoor is er onderwater los zand in een cilindervormige koker ($h = 7$ cm, $d = 6,6$ cm) gestrooid. Dit zand is verdicht. Als vervolgens de koker wordt weggehaald, valt al het zand uiteen. Dit is te zien op foto 10.11 tot en met foto 10.13. De druksterkte van het losse zand kon niet gemeten worden met de pocket-penetrometer.
- Alle aangemaakte monsters blijven onder water als een eenheid staan en vallen niet uit elkaar (foto 10.14). Deze proef toont aan verkitting van het zand is opgetreden. De aanwezigheid van het additief tussen de zandkorrels zorgt ervoor, dat het zand niet meer uit elkaar valt. Bij het monster F5 vielen de gelere delen van het monster uiteen, nadat het monster in het water was geplaatst. Het grootste deel van het monster (groen) bleef echter gewoon staan.
- Alle monsters breken makkelijk als er met twee vingers op wordt geduwd. De monsters zijn nauwelijks elastisch, breken bros en voelen zanderig aan.

- **Dichtheid**

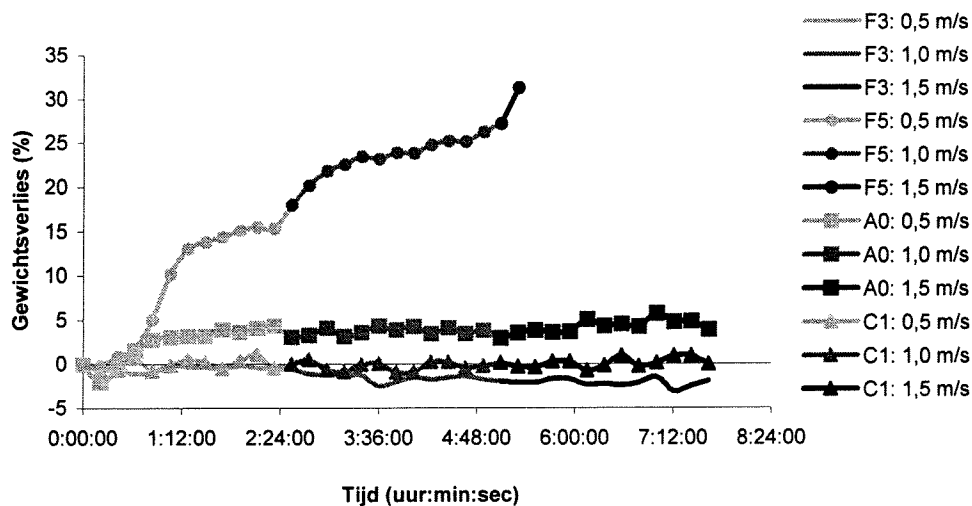
- Van alle monsters zijn de natte en de droge dichtheid bepaald. De natte dichtheid van de monsters is in alle gevallen groter dan de dichtheid die berekend wordt als het bezonken zand volledig met water verzadigd is en een hoogte van 11 cm inneemt (1894 kg/m^3). Er moet dus additief tussen de poriën van het zand aanwezig zijn, dat zorgt voor deze toename in dichtheid.
Door het drogen verdwijnt het water uit het monster (zowel het poriënwater, als het water in het additief). Een gedroogd monster bestaat uit zand, additief in poedervorm en zout. De droge dichtheid van de monsters is in alle gevallen hoger dan de dichtheid die berekend wordt als droog zand hoogte van 11 cm inneemt (1418 kg/m^3). Er moet dus additief tussen de poriën van het zand aanwezig zijn, dat zorgt voor de toename in dichtheid.
- Als een monster na het drogen in water wordt gezet, valt dit monster uit elkaar. Het verkitte zand is alleen in een natte omgeving in staat om zijn functie te vervullen.

- **Druksterkte**

- De druksterkte is in elk monster redelijk homogeen over de hoogte verdeeld. Helemaal bovenin, net onder de laag additief, is de druksterkte bij sommige monsters iets minder dan in de rest van het monster.
- De afmetingen van het monster hebben invloed op de gemeten druksterkte. In het onderste deel van het monster (het monster heeft dan nog maar een hoogte van 2 à 3 cm) wordt een lagere druksterkte gemeten, dan in de rest van het monster. Dit is ook het geval als het monster op zijn kop wordt getest. De pocket-penetrometer drukt door een te klein monster heen. Dit betekent dus niet dat de sterkte onder in het monster minder is dan in de rest van het monster.
- Om de monsters onderling te kunnen vergelijken, is in elk monster de druksterkte bepaald op een hoogte van (ongeveer) 7 cm. Deze druksterkte wordt op 4 posities in het monsteroppervlak gemeten, waarna de gemiddelde waarde als druksterkte wordt opgegeven. In het algemeen verschillen de waarden niet veel van elkaar. De gemeten druksterktes zijn in paragraaf 10.5.4 in tabel 10.3 aangegeven. Een monster met een lagere W/C-factor heeft een grotere druksterkte dan een monster met een hogere W/C-factor.

• Erosiebestendigheid

- In deze eerste monsterronde is elk monster in het erosie-apparaat belast door stroomsnelheden van 0,5, 1,0 en 1,5 m/s (64, 128 en 192 tpm). Deze stroomsnelheden dienen als indicatie voor de stroomsnelheden op de bodem van de zee in diep water. Elk monster wordt steeds gedurende 2½ uur belast met de verschillende stroomsnelheden. Om de 12 minuten en 44 seconden wordt de gewichtsafname van het monsters gemeten (tijdsduur die in het apparaat was ingesteld). Deze gewichtsafname is een maat voor de erosie.
- Na de erosieproef hebben alle monsters een ruwere wand dan voordat ze in het apparaat werden geplaatst. Deze ruwheid ontstaat doordat het losse korrelmateriaal aan de rand van het monster wordt weggespoeld. Dit gebeurt in het algemeen al direct nadat het monster in het water is geplaatst.
- De procentuele gewichtsafname van de verschillende monsters tijdens de erosieproef is in grafiek 10.1 te zien. Voor de meetwaarden wordt verwezen naar bijlage 7.



Grafiek 10.1: Procentuele gewichtsafname van verschillende monsters in het erosie-apparaat

Opmerkingen bij grafiek 10.1:

- De monsters met additiefsamenstellingen C1 en F3 tonen (af en toe) een gewichtstoename tijdens de erosieproef. Deze gewichtstoename schommelt rond de 2% en moet gezien worden als ruis, een soort meetfout in het apparaat.
- Er zijn twee monsters met additiefsamenstelling D3 in het erosie-apparaat geplaatst. De resultaten van beide erosieproeven zijn niet weergegeven. De gemeten waarden van de eerste proef komen ongeveer overeen met de gewichtsafname (en -toename) van de monsters met de additiefsamenstellingen C1 en F3. Als deze waarden ook in de grafiek zouden worden weergegeven, wordt deze onleesbaar. De gemeten gewichtsafname bij de tweede proef is niet weergegeven in de grafiek, omdat de gemeten gewichtsafname niet klopt met de visuele beschouwing van het monster.
- Het monster met additiefsamenstelling A0 vertoont een gewichtsafname van ongeveer 4%. Deze gewichtsafname is ontstaan op plaatsen waar het monster verstoord was. In principe is het monster wel erosiebestendig.

- Alleen het monster met additiefsamenstelling F5 is niet erosiebestendig. Een toename van de stroomsnelheid zorgt bij dit monster in het begin voor een toename van de erosiesnelheid. Dit is te zien aan de steilheid van de lijn in de grafiek (gewichtsafname/tijdseenheid). In de loop der tijd neemt de erosiesnelheid weer af. Dit kan erop duiden dat wisselende stroomsnelheden in de praktijk een extra groot effect op de erosiesnelheid van een niet erosiebestendige (verkitte) bodem kunnen hebben.

10.5.5. Eigenschappen monsters

In tabel 10.3 zijn de gemeten eigenschappen van de verschillende monsters aangegeven. Elk monster had een volume van 0,2395 dm³.

	A0	C1	D3	F3	F5
Aangemaakt	Ma 7 juni	Ma 7 juni	Ma 7 juni	Ma 7 juni	Ma 7 juni
Beproefd	Do 17 juni	Ma 21 juni	Di 15 juni en Vr 25 juni	Vr 18 juni	Do 17 juni
Toegevoegd in cilinder (dm³)	0,583	0,525	0,582	0,519	0,415
Dikte laag additief op zand (cm)	1	1	1,2	1,3	1,8
Volume van laag additief in cilinder (dm³)	0,346	0,346	0,416	0,450	0,623
Gewicht natte monster (g)	471,21	467,70	458,40	458,9	466,29
Gewicht droge monster (g)	366,51	366,82	344,88	349,79	358,23
Natte dichtheid (kg/m³)	1967	1953	1914	1916	1947
Droge dichtheid (kg/m³)	1530	1532	1440	1460	1500
Druksterkte (N/m²)	$> 58,86 \cdot 10^4$	$> 58,86 \cdot 10^4$	$28,45 \cdot 10^4$	$25,02 \cdot 10^4$	$5,88 \cdot 10^4$
Gewichtsafname in erosieproef (%)	4	0	8,5% *zie opmerkingen D3	0	> 30

Tabel 10.3: Gemeten eigenschappen van de verschillende monsters

10.5.6. Opmerkingen bij de verschillende monsters

Additiefsamenstelling A0

- **Samenhang**
Het monster voelt hard aan. Het zand is duidelijk verkit. Het monster kan niet zomaar in de gewenste vorm voor het erosie-apparaat gesneden worden (trimmen). Het zand moet echt worden uitgehouwen. Dit monster is hard, maar nog steeds zanderig. Het monster breekt redelijk makkelijk en duidelijk bros.
- **Druksterkte**
De druksterkte van het monster met additiefsamenstelling A0 is groter dan 6 kg/cm² (de maximale waarde die de pocket-penetrometer kan meten).
- **Erosieproef**
Op foto 10.15 is het monster voor de erosieproef te zien. Aan de onderrand van het monster zijn scheuren aanwezig. Deze zijn ontstaan bij het trimmen van het monster. Dit monster is minder flexibel dan monsters met een hogere W/C-factor. Het is harder en daardoor brosser.

Op foto 10.16 staat het monster na de erosieproef. Onderin zijn ter plaatse van de scheuren, stukken van het monster afgebrokkeld. Aan de hand van de resultaten van de erosieproef kan geconcludeerd worden, dat de desintegratie van het monster regelmatig verliep (zie grafiek 10.1). De snelheid van het omstromende water had niet veel effect op dit proces. In principe is het monster wel erosiebestendig, want het gewichtsverlies is ontstaan op plaatsen waar het monster verstoord was.

Additiefsamenstelling C1

- Samenhang

Het monster voelt hard aan. Het zand is duidelijk verkit. Het monster kan niet zomaar in de gewenste vorm voor het erosie-apparaat gesneden worden (trimmen). Het zand moet echt worden uitgehouwen. Dit monster is hard, maar nog steeds zanderig. Het monster breekt makkelijker over een verticale doorsnede dan over een horizontale doorsnede.

- Druksterkte

De druksterkte van het monster met additiefsamenstelling C1 is, net als de druksterkte van het monster met additiefsamenstelling A0, groter dan 6 kg/cm^2 (de maximale waarde die de pocket-penetrometer kan meten). De kracht waarmee de pocket-penetrometer in het monster geduwd moet worden, lijkt bij het monster met additiefsamenstelling A0 minder dan bij het monster met additiefsamenstelling C1. Dit is ook te verwachten in verband met de grotere W/C-factor van C1.

- Erosieproef

Op foto 10.17 is het monster voor de erosieproef te zien. Op foto 10.18 staat het monster na de erosieproef. Tijdens de erosieproef is er geen gewichtsverlies gemeten (zie grafiek 10.1). Bij de visuele inspectie van het monster blijkt één brokje van het monster te zijn afgebroken. Deze gewichtsafname is niet gemeten, maar kan liggen in de ruis van het erosie-apparaat.

Additiefsamenstelling D3

- Algemeen

Er zijn twee keer testen gedaan op een monster met additiefsamenstelling D3. Namelijk op dinsdag 15 juni en op maandag 21 juni. De eerste test diende als een soort oefentest om te kijken of het erosie-apparaat functioneerde en of de monsters geschikt waren om in het erosie-apparaat getest te worden. Bij de tweede test zijn de natte en droge dichtheid van het monster bepaald en zijn de foto's van het monster met additiefsamenstelling D3 genomen.

- Samenhang

Het monster met additiefsamenstelling D3 voelt zachter aan dan de monsters met additiefsamenstellingen A0 en C1. Het monster lijkt op nat zand. Er is wel enige verkitting opgetreden.

- Druksterkte

De druksterkte die bij de tweede test werd gemeten ($13,7 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$), was minder groot dan de druksterkte die bij de eerste test werd gemeten ($28,4 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$). Dit is onlogisch, aangezien het monster bij de tweede test 10 dagen langer was uitgehard. Waarschijnlijk zijn extra waterspanningen de oorzaak hiervan. Deze zijn opgewekt, toen het (tweede) monster uit de steekbuis werd gehaald (dat liep niet zo soepel). In eerste instantie wordt de sterkte die uit de eerste test volgde aangehouden. Deze sterkte komt ook beter overeen met de sterkte van een monster met additiefsamenstelling F3 (met dezelfde W/C-factor).

In de tweede monsterronde is opnieuw een monster met additiefsamenstelling D3 aangemaakt. Dit monster is aangemaakt om te bekijken bij welke stroomsnelheid het monster bezwijkt. Bij

die test is de druksterkte van het monster met additiefsamenstelling D3 opnieuw gemeten. De sterkte bleek toen $24,5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$.

- Erosieproef bij eerste test

De erosieproef bij de eerste test was een oefenproef. Deze is niet uitgevoerd met zout water en er is gebruik gemaakt van een geroerd monster. Tijdens de gehele erosie-procedure, is er geen gewichtsafname van het monster gemeten. De meting van de gewichtsafname is niet weergegeven in grafiek 10.1.

- Erosieproef bij tweede test

Op foto 10.19 is het monster voor de erosieproef te zien. Op foto 10.20 staat het monster na de erosieproef. Er zijn nauwelijks veranderingen aan het monster te zien. Alleen aan de boven- en benedenrand van het monster, is een klein beetje zand weggespoeld. Het erosie-apparaat gaf na deze testprocedure een gewichtsafname van 8,5% aan. Deze meting klopt niet met de visuele waarneming. Op foto 10.21 is te zien dat er ook geen zand aan de binnenkant van het monster is weggespoeld (het gat in het monster is voor de houder van het erosie-apparaat). De gemeten gewichtsafname klopt niet; het moet een meetfout van het apparaat zijn. Het gewicht van het monster (inclusief de houder van het erosie-apparaat) is met een weegschaal gewogen. Daaruit is gebleken, dat het gewicht constant gebleven is (gewicht voor erosieproef: 1126,1 g, gewicht na erosieproef 1129,6 g). De gemeten gewichtsafname is niet weergegeven in grafiek 10.1, omdat de meting niet klopt. De meetfout kan veroorzaakt zijn door verlies van water tijdens het draaien van het erosie-apparaat.

⇒ Uit dit resultaat volgt dat, de resultaten van de erosieproef mede aan de hand van de visuele waarneming dienen te worden geïnterpreteerd.

Additiefsamenstelling F3

- Samenhang

Het monster met additiefsamenstelling F3 voelt zachter aan dan de monsters met additiefsamenstellingen A0 en C1. Het lijkt stevig nat zand. Er is wel enige verkitting opgetreden.

- Erosieproef

Op 10.22 is het monster voor de erosieproef te zien. Op foto 10.23 staat het monster na de erosieproef. Er is geen gewichtsverlies gemeten (zie grafiek 10.1). Het gemeten gewicht is zelfs iets toegenomen. Deze gewichtstoename schommelt rond de 2% en moet gezien worden als ruis, een soort meetfout in het apparaat.

Additiefsamenstelling F5

- Samenhang

Het monster voelt zeer slap aan. Het lijkt op nat zand. Van verkitting is nauwelijks sprake.

- Erosieproef

Op foto 10.24 is het monster voor de erosieproef te zien. Op foto 10.25 staat het monster na de erosieproef. Het erosie-apparaat is stilgezet op het moment dat het monster 30% van zijn gewicht had verloren. Het monster was op dat moment pas 12 minuten en 44 seconden belast door een stroomsnelheid van 1,5 m/s. Als de erosieproef langer was doorgezet, was het gehele monster verdwenen en de vorm van de erosie niet meer te zien. Het monster is vooral aan één kant in klontjes geërodeerd. Hieruit blijkt dat sommige delen van het monster sterker kunnen zijn dan andere delen.

10.6. Conclusies fase 4

10.6.1. Eigenschappen additief

- Zowel F3 als F5 zijn geïnjecteerd tussen het gesuspendeerde zand, terwijl de Marsh-viscositeiten respectievelijk 68,03 en 65,78 s/l waren. Deze additieven leken beide redelijk homogeen verspreid tussen het korrelmateriaal, ondanks de te grote Marsh-viscositeit. F5 was tijdens de erosieproef niet sterk genoeg, maar dit is een gevolg van de samenstelling, niet van de mate van verspreiding (en dus niet van de te hoge Marsh-viscositeit).

10.6.2. Eigenschappen van het eindproduct

Algemeen

- De eigenschappen van het eindproduct zijn afhankelijk van de toegevoegde W/C-factor. Het bentonietgehalte van het additief heeft geen invloed op de eigenschappen van het eindproduct. D3 en F3 hebben dezelfde W/C-factor en een verschillende bentonietgehalte, maar vertonen geen duidelijk verschil in eigenschappen (zie tabel 10.3).
- Als een monster nadat het gedroogd is in water wordt gezet, valt dit monster uit elkaar. Het verkitten van zand is alleen in een natte omgeving in staat om zijn functie te vervullen.

De mate van verspreiding van het additief in de monsters

- Het additief is redelijk homogeen verspreid door het zand, wanneer het vanuit twee injectiepunten wordt geïnjecteerd. Random zijn in de verschillende monsters kleine gelere plekken aanwezig met minder additief. Bij enkele monsters is onder in de cilinder in het midden een laag van enkele centimeters aanwezig, waar geen additief tussen het zand zit. Dit zand was waarschijnlijk nog niet in suspensie op het moment dat het additief geïnjecteerd werd.
- Op het verkitten, bezonken zand is in elke cilinder een laag additief aanwezig. Er treedt dus enige segregatie op, ondanks het feit dat het additief onder in de cilinder wordt geïnjecteerd. Een deel van deze segregatie ontstaat door verlies van additief tijdens het bevestigen van de spuitflessen. Een ander deel ontstaat door het verschil in bezinksnelheid van het zand en het additief. Door het additief vanuit een nog lager punt te injecteren (lager dan vanuit een punt op 4 cm boven de bodem van de cilinder), kan dit deel van de segregatie misschien worden voorkomen.

Samenhang

- Alle aangemaakte monsters blijven onderwater als een eenheid staan en vallen niet uit elkaar. Zand zonder additief valt onderwater wel uiteen. Dit betekent dat er in de aangemaakte monsters verkitting van het zand is opgetreden. De aanwezigheid van het additief tussen de zandkorrels zorgt ervoor, dat het zand niet meer uit elkaar valt.

Dichtheid

- De natte dichtheid van alle monsters is groter dan de dichtheid die berekend wordt als het bezonken zand volledig met water verzadigd is. Er moet dus additief tussen de poriën van het zand aanwezig zijn, dat zorgt voor deze toename in dichtheid.

Druksterkte

- De druksterkte van het verkitten van zand is hoger, naarmate de W/C-factor van het geïnjecteerde additief lager is. Alle monsters breken makkelijk als er met twee vingers op wordt gedrukt. De monsters zijn nauwelijks elastisch, breken bros en voelen zanderig aan. De monsters met een hogere druksterkte (A0 en C1) zijn minder flexibel dan de monsters met een lagere druksterkte. Dit blijkt bij het in de juiste vorm snijden voor de erosieproef. A0 en C1 zijn brosser dan D3, F3 en F5.

- De druksterkte lijkt redelijk homogeen verdeeld over de hoogte van het verkitte zand. Net onder de laag additief is de druksterkte van het verkitte zand bij sommige monsters iets minder, dan in de rest van het monster.

Erosiebestendigheid

- F5 is het slapste monster met een druksterkte van $83,4 \text{ kN/m}^2$. Dit monster toont na de erosieproef de grootste gewichtsafname en wordt daardoor niet als erosiebestendig aangeduid. De gewichtsafname vond vooral plaats aan één kant van het monster. Het monster is in klontjes geërodeerd. Hieruit blijkt dat sommige delen van het monster sterker kunnen zijn dan andere delen.
- De monsters met additiefsamenstellingen A0, C1, D3 en F3 hebben een grotere druksterkte dan F5 en kunnen worden aangeduid als erosiebestendig. Hierbij moet worden opgemerkt dat het monster A0 wel gewichtsafname vertoonde, maar dat is ontstaan ten gevolge van beschadigingen in het monster. Een random geel plekje in een monster met een van de bovengenoemde samenstellingen, zal afbrokkelen op het moment dat het monster in water wordt geplaatst. Dit plekje bestaat uit los zand en bevat geen additief. Dergelijke plekjes hebben geen invloed op de erosiebestendigheid van het gehele monster (als ze niet te groot zijn, maar dat was niet het geval bij de beproefde monsters).

Kosten

- Als alleen de kosten beschouwd worden, lijkt het additief D3 het meest interessant. Van de additieven die als erosiebestendig kunnen worden aangeduid, is dit additief is het goedkoopst per liter additief. Wanneer een grotere druksterkte dan $284,5 \text{ kN/m}^3$ na 8 dagen uitharden gewenst is, moet gekozen worden voor een ander additief. Deze grotere druksterkte kan gewenst zijn in verband met bijvoorbeeld vallende ankers en sleepnetten.

10.7. Aanbevelingen voor verder onderzoek

10.7.1. Eigenschappen additief

- Er moet beter gekeken worden naar de eis dat de Marsh-viscositeit kleiner dan 60 s/l moet zijn. Voor de verspreiding van het additief tussen het gesuspendeerde korrelmateriaal lijkt deze eis te streng en lijkt een eis voor een maximale Marsh-viscositeit van 80 s/l beter geschikt (zie fase 3). Naar de mogelijkheden om vloeistoffen met een te grote Marsh-viscositeit te verpompen moet verder onderzoek worden verricht.
- Als de additieven worden aangemaakt in grotere hoeveelheden, kan met een hoger toerental geroerd worden, zonder dat er lucht wordt aangezogen. Dit hogere toerental heeft invloed op de Marsh-viscositeit; deze zal afnemen. De invloed van de roersnelheid en roertijd op de Marsh-viscositeit moet gekwantificeerd worden (in hoeverre is het mogelijk een Marsh-viscositeit door extra roeren terug te brengen van 65 tot 50 s/l).

10.7.2. Eigenschappen van het eindproduct

- In de volgende fase van dit onderzoek zal worden bepaald of:
 - langer uitharden invloed heeft op de erosiebestendigheid van een monster.
 - het toevoegen van meer additief de erosiebestendigheid van het monster vergroot.
 - een monster met een additief met een tussenliggende W/C-factor ook erosiebestendig is.
 - het toevoegen van minder additief invloed heeft op de erosiebestendigheid van een monster.
- Een toename van de stroomsnelheid zorgt bij het niet erosiebestendige monster in het begin voor een toename van de erosiesnelheid. In de loop der tijd neemt de erosiesnelheid weer af. Dit kan

erop duiden dat wisselende stroomsnelheden in de praktijk een extra groot effect op de erosiesnelheid van een niet erosiebestendige (verkitte) bodem kunnen hebben. Hier zal extra onderzoek naar moeten worden verricht.



Foto 10.1: Uit één cilinder (één groot monster) kunnen met behulp van steekblikken vier (kleinere) monsters gestoken worden

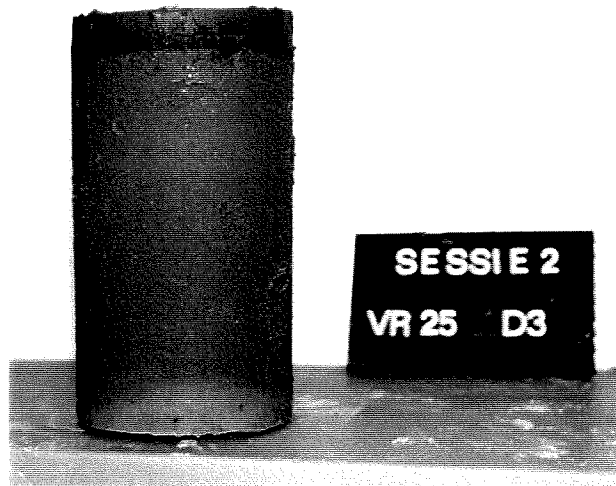


Foto 10.2: Bovenop het bezonken zand is een laag additief aanwezig

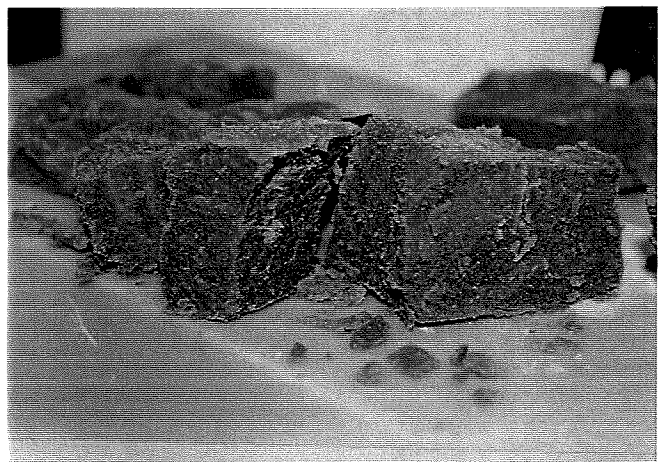


Foto 10.3: Brokstukken van een monster met additiefsamenstelling C1

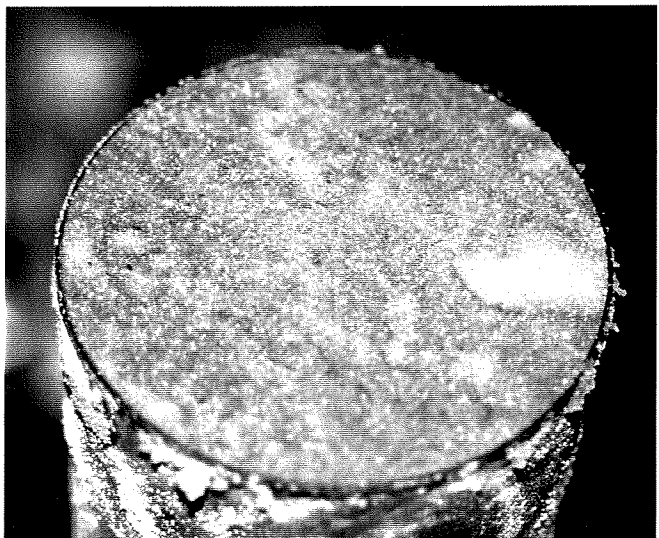
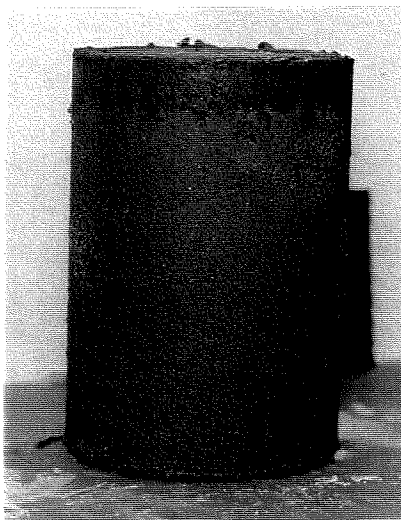


Foto 10.4: Random in de monsters zijn enkele gelere plekken aanwezig, die duiden op minder additief



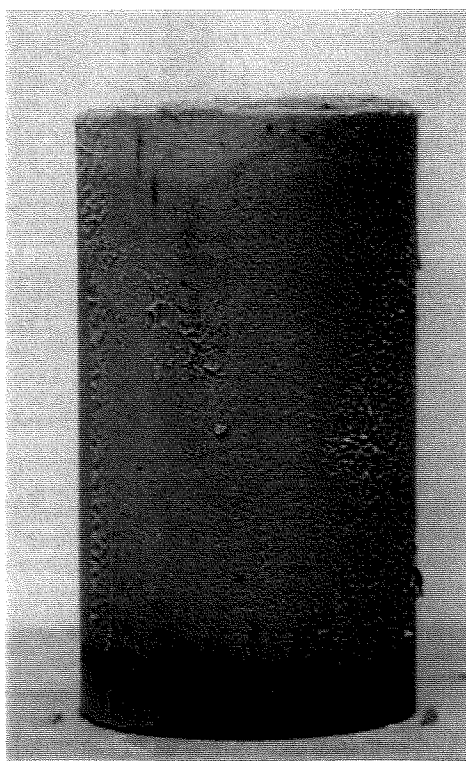
*Foto 10.5: Monster met
additiefsamenstelling A0*



*Foto 10.6: Monster met
additiefsamenstelling C1*



*Foto 10.7: Monster met
additiefsamenstelling D3*



*Foto 10.8: Monster met
additiefsamenstelling F5*



*Foto 10.9: Monster met
additiefsamenstelling F5*

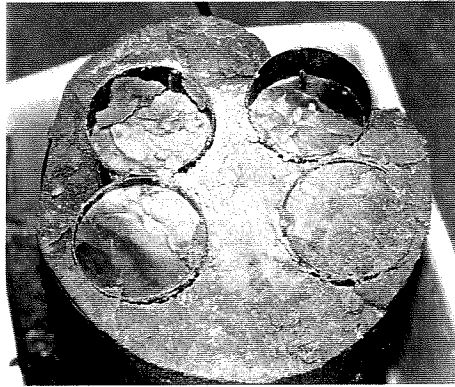


Foto 10.10: De inhoud van een omgekeerde cilinder. In het midden, aan de onderzijde van de cilinder is duidelijk een gele plek met minder additief (D3) te zien.

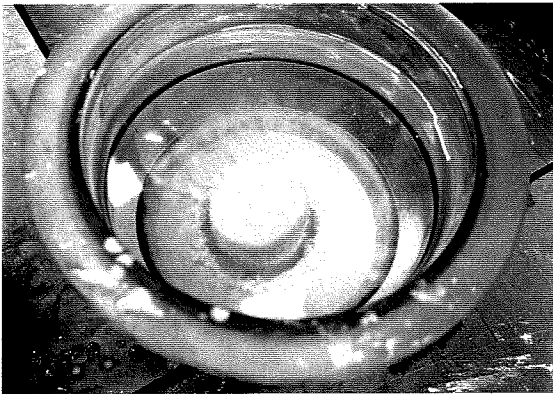


Foto 10.11: Los zand valt uiteen onder water (A)

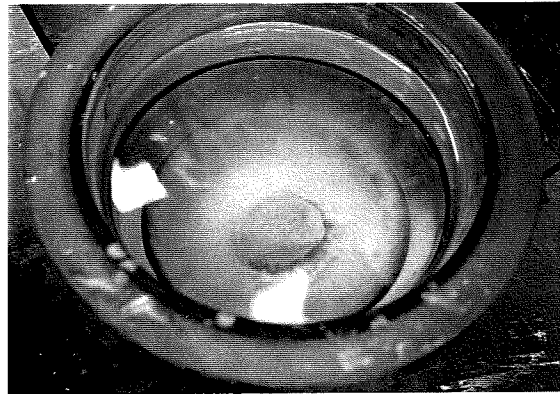


Foto 10.12: Los zand valt uiteen onder water (B)

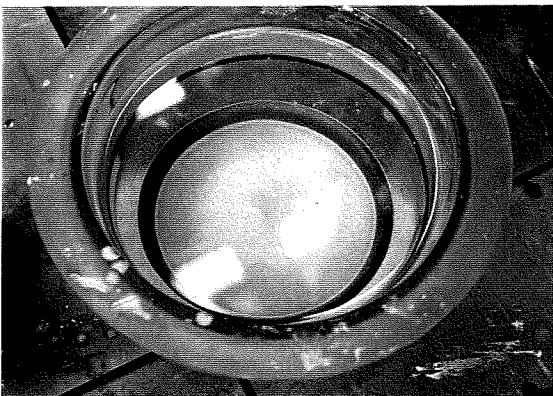


Foto 10.13: Los zand valt uiteen onder water (C)

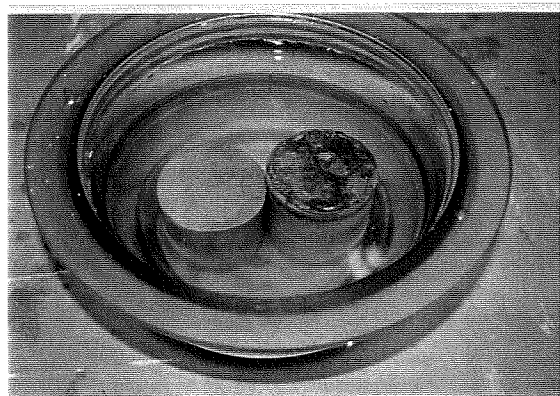


Foto 10.14: Alle aangemaakte monsters blijven onderwater als een eenheid staan

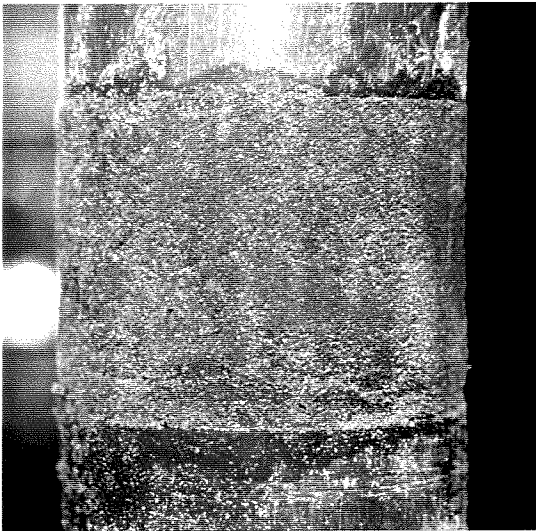


Foto 10.15: Monster met additiefsamenstelling A0 voor de erosieproef

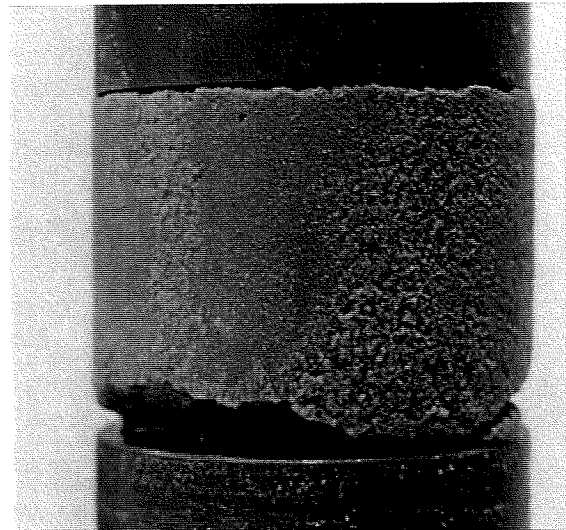


Foto 10.16: Monster met additiefsamenstelling A0 na de erosieproef

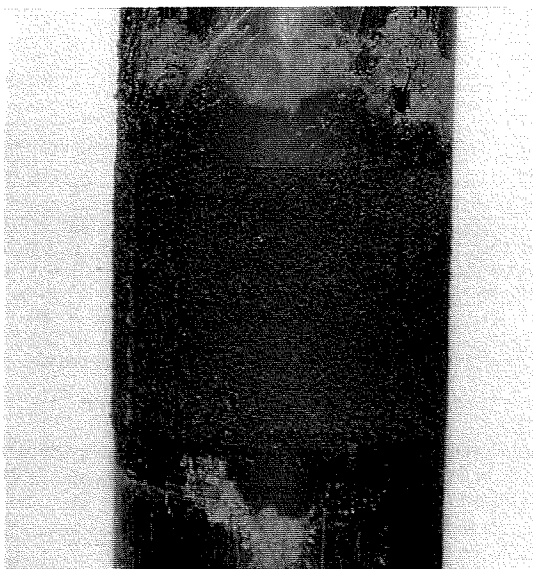


Foto 10.17: Monster met additiefsamenstelling C1 voor de erosieproef

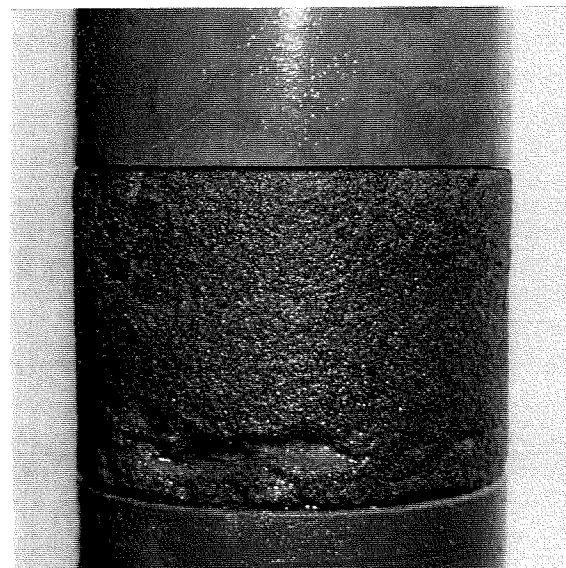


Foto 10.18: Monster met additiefsamenstelling C1 na de erosieproef

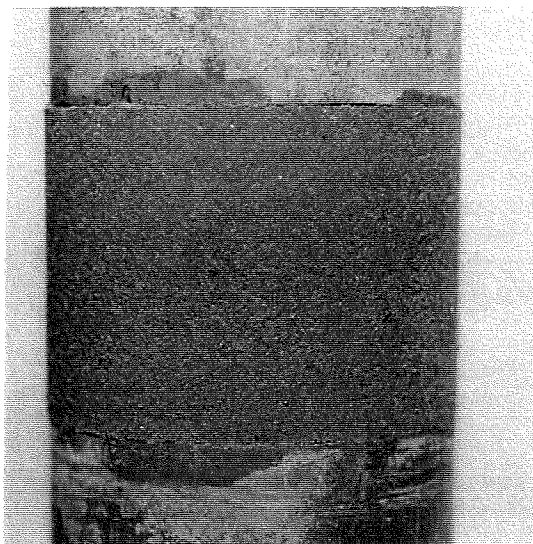


Foto 10.19: Monster met additiefsamenstelling D3 voor de erosieproef

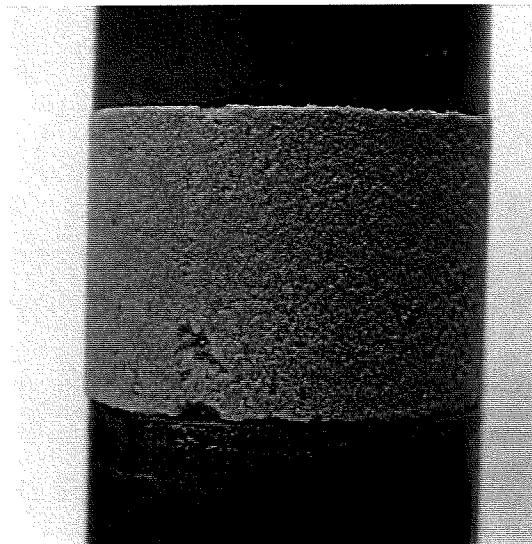


Foto 10.20: Monster met additiefsamenstelling D3 na de erosieproef

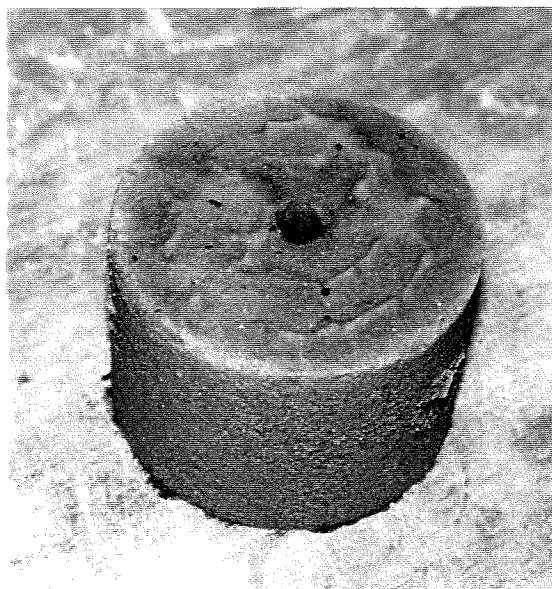


Foto 10.21: Er is geen zand aan de binnenkant van het monster met additiefsamenstelling D3 weggespoeld



Foto 10.22: Monster met additiefsamenstelling F3 voor de erosieproef

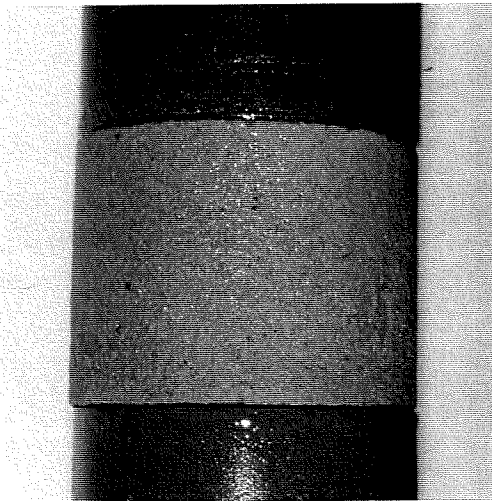


Foto 10.23: Monster met additiefsamenstelling F3 na de erosieproef

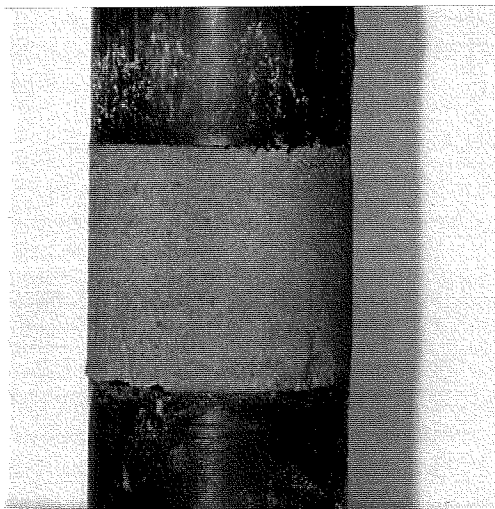


Foto 10.24: Monster met additiefsamenstelling F5 voor de erosieproef

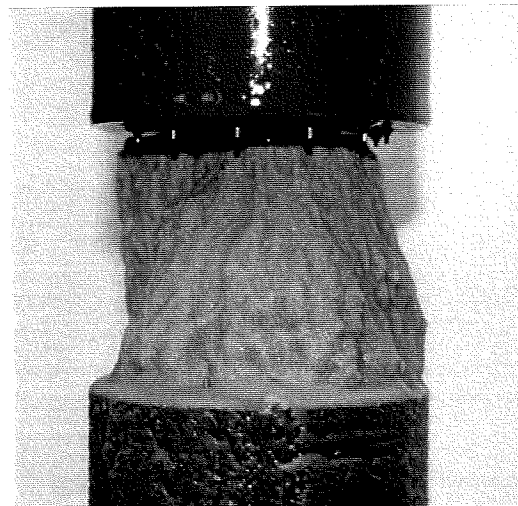


Foto 10.25: Monster met additiefsamenstelling F5 na de erosieproef

11. Fase 5: Tweede Monsterronde

11.1. Algemeen

Deze fase zal worden beschreven aan de hand van het doel, de constanten, de variabelen, de resultaten en de conclusies met betrekking tot deze fase. In de tekst wordt verschillende malen naar foto's verwezen. Deze foto's zijn aan het eind van dit hoofdstuk bijgevoegd.

11.2. Doel

Naar aanleiding van de resultaten van de vorige monsterronde zijn de waarden van enkele variabelen veranderd om te kijken in hoeverre deze invloed hebben op de eigenschappen van het eindproduct.

- Bepalen in hoeverre een monster waaraan een W/C-factor wordt toegevoegd, die ligt tussen de W/C-factor van een monster dat in de eerste monsterronde wel erosiebestendig was en de W/C-factor van een monster dat in de eerste monsterronde niet erosiebestendig was, erosiebestendig is.
- Bepalen in hoeverre het toevoegen van meer additief de erosiebestendigheid van een monster, dat in de eerste monsterronde niet erosiebestendig was, vergroot.
- Bepalen in hoeverre monsters, die in de eerste monsterronde erosiebestendig waren, dit ook zijn, wanneer er minder additief wordt toegevoegd.
- Bepalen in hoeverre een langere uithardtijd de erosiebestendigheid van een monster, dat in de eerste monsterronde niet erosiebestendig was, vergroot.
- Bepalen bij welke stroomsnelheid monsters, die in de eerste monsterronde erosiebestendig waren, bezwijken. De stroomsnelheid in het erosie-apparaat wordt steeds opgevoerd.

11.3. Constanten

Opstelling

- Afmetingen cilinder.
- Hoeveelheid zand: 5,4 kg.
- Hoeveelheid zeewater: 10 dm³.
- Zandsort S85.

Roeren

- Toerental: 260 tpm.
- Positie roerder: 11 cm boven de bodem van de cilinder.

Injecteren

- Injectiediameter: 0,5 cm.
- Injectiedruk: één grote kneep in de spuitfles (grote druk).
- Injectietijd: 10-13 seconden (tijdsduur van één grote kneep).
- Injectiehoeveelheid: ongeveer 600 ml.
- Positie injectiepunt: 4 cm boven de bodem van de cilinder.
- Injectiemoment: direct nadat gestopt is met roeren.

Bij drie monsters wordt de injectiehoeveelheid gevarieerd. Dit is duidelijk vermeld bij de resultaten van de experimenten met desbetreffende monsters. Alle andere waarden blijven bij die monsters constant.

11.4. Variabelen

1. Samenstelling van het additief

In de vorige monsterronde bleek het monster met een additief F5 niet erosiebestendig en de monsters met een additief D3 en F3 wel. In deze monsterronde zal worden bekeken in hoeverre een monster met een additiefsamenstelling die daartussen ligt wel erosiebestendig is, wanneer het wordt onderworpen aan dezelfde erosieproef. Er is gekozen voor de goedkoopste additiefsamenstelling, die ertussen ligt.

2. Hoeveelheid additief die wordt toegevoegd vergroten

In de vorige monsterronde bleek het monster met additiefsamenstelling F5 niet erosiebestendig te zijn. In deze monsterronde zal worden bekeken in hoeverre een monster met dezelfde additiefsamenstelling wel erosiebestendig is, wanneer er meer additief wordt toegevoegd. Het additief F5 zal met drie flessen (ongeveer anderhalf keer zoveel additief) worden geïnjecteerd tussen het gesuspenderde zand, in plaats van met twee flessen.

3. Hoeveelheid additief die wordt toegevoegd verkleinen

In de vorige monsterronde bleken de monsters met de additiefsamenstellingen A0, C1, D3 en F3 erosiebestendig te zijn. In deze monsterronde zal worden bekeken in hoeverre deze monsters ook erosiebestendig zijn, wanneer er minder additief wordt toegevoegd. De additieven A0 en D3 zullen met één fles (ongeveer de halve hoeveelheid additief) geïnjecteerd worden tussen het gesuspenderde zand, in plaats van met twee flessen. D3 is de goedkoopste additiefsamenstelling, die als erosiebestendig kan worden aangeduid. A0 is de duurste additiefsamenstelling (met de hoogste druksterkte), maar ook de enige samenstelling zonder bentoniet. Deze samenstelling wordt interessant, wanneer de kosten van het aanmaken van de bentoniet suspensie met zoet water hoog worden. Dit kan het geval zijn, wanneer de suspensie op zee moet worden aangemaakt. Zoet water moet dan naar een offshore locatie vervoerd worden of er moet ter plekke water ontzout worden.

4. Uithardtijd van het additief verlengen

In de vorige monsterronde bleek het monster met additiefsamenstelling F5 niet erosiebestendig te zijn tijdens de erosieproef. Dit monster was, op het moment dat het beproefd werd, 10 dagen uitgehard. In deze monsterronde zal worden bekeken in hoeverre een monster met dezelfde additiefsamenstelling na langer uitharden wel erosiebestendig is. Hiervoor zal gebruik gemaakt worden van het tweede monster met additiefsamenstelling F5.

5. Toenemende belasting in het erosie-apparaat

In de vorige monsterronde zijn alle monsters steeds gedurende 2½ uur belast door stroomsnelheden van 0,5, 1,0 en 1,5 m/s. In deze monsterronde zal worden bekeken bij welke stroomsnelheid de monsters D3 en E4 (als dit monster voldoende erosiebestendig blijkt te zijn in de eerste erosieproef) het zullen begeven, wanneer de stroomsnelheid om de 25 minuten en 28 seconden met 0,5 m/s (64 tpm) wordt opgevoerd (tot een maximale stroomsnelheid van 8,0 m/s (1024 tpm)).

11.5. Aanpak en resultaten van de tweede monsterronde

11.5.1. Additiefsamenstellingen en -eigenschappen

In de tweede monsterronde zijn monsters met 6 verschillende additiefsamenstellingen aangemaakt. In tabel 11.1 staan de eigenschappen van de verschillende additieven en de geïnjecteerde hoeveelheden aangegeven.

Additief	Marsh-viscositeit (s/l)	Dichtheid (kg/m ³)	Geïnjecteerd gewicht (g)	Geïnjecteerd volume (dm ³)	Opmerking
A0	40,98	1502	397,0	0,264	Halve hoeveelheid
D3	39,53	1180	287,8	0,244	Halve hoeveelheid
D3	39,78	1172	735,2	0,627	Toename belasting
E4	45,34	1140	661,9	0,581	Nieuwe samenstelling
E4	43,20	1144	574,7	0,502	Toename belasting
F5	56,59	1118	823,5	0,737	Meer additief

Tabel 11.1: Eigenschappen en geïnjecteerde hoeveelheden van de additieven in fase 5

11.5.2. Eigenschappen eindproduct

De variabelen die in paragraaf 11.4 zijn besproken, zijn een voor een veranderd. Hieronder staan de resultaten per proef weergegeven. De resultaten zijn per proef hetzelfde genummerd als de variabelen.

1. Samenstelling additief variëren

De eigenschappen van een monster met additiefsamenstelling E4 staan aangegeven in tabel 11.2.

Elk monster had een volume van 0,2395 dm³. Om deze eigenschappen te kunnen vergelijken met de eigenschappen van andere monsters zijn ook de eigenschappen van monsters met additiefsamenstellingen D3 en F5 aangegeven (de W/C-factor van E4 ligt tussen de W/C-factoren van D3 en F5 in). Er is geen gewichtsafname gemeten tijdens de erosieproef.

	D3	E4	F5
Aangemaakt	Ma 7 juni	Ma 21 juni	Ma 7 juni
Beproefd	Di 15 juni en Vr 25 juni	Vr 29 juni	Do 18 juni
Toegevoegd in cilinder (dm³)	0,582	0,581	0,415
Dikte laag additief (cm)	1,2	1,3	1,8
Volume van laag additief in cilinder (dm³)	0,416	0,450	0,623
Gewicht natte monster (g)	458,40	475,47	466,29
Gewicht droge monster (g)	344,88	361,45	358,23
Natte dichtheid (kg/m³)	1914	1985	1947
Droge dichtheid (kg/m³)	1440	1509	1500
Druksterkte (N/m²)	28,45.10 ⁴	25,67.10 ⁴	5,9.10 ⁴
Gewichtsafname in erosieproef (%)	8,5 *zie opmerkingen D3 fase 4	0	Ongeveer 30

Tabel 11.2: Gemeten eigenschappen van additiefsamenstelling E4 in vergelijking met D3 en F5

Opmerkingen bij E4

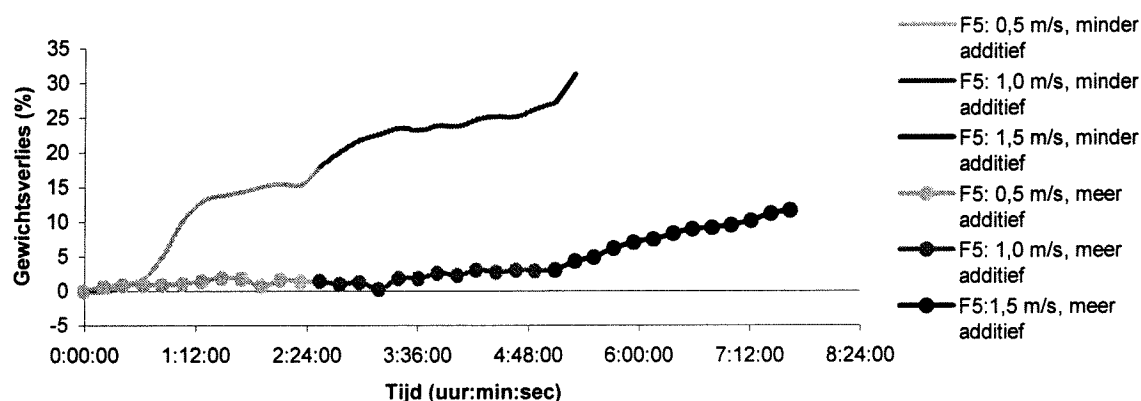
- Het additief is homogeen verspreid door het bezonken zand. Net als bij de monsters in de vorige monsterronde bevinden zich random enkele gelere plekken in het monster, die duiden op minder additief.
- Onder in de cilinder is in het midden minder additief aanwezig dan aan de randen. Ook dit verschijnsel is in de vorige monsterronde al gesignaleerd bij enkele monsters. Het ontstaat waarschijnlijk doordat het zand nog niet voldoende in suspensie was, op het moment dat het additief werd geïnjecteerd.
- Het verschil in druksterkte over de hoogte van het monster is minimaal. De druksterkte lijkt relatief hoog in vergelijking met de druksterktes van monsters met additiefsamenstellingen D3 en F5. De druksterkte het monster met additiefsamenstelling E4 komt namelijk in de richting van de druksterkte van het monster met additiefsamenstelling D3. Door de hogere W/C-factor van E4 ten opzichte van D3, wordt een lagere druksterkte verwacht.
- Op foto 11.1 is het monster voor de erosieproef te zien. Op foto 11.2 staat het monster na de erosieproef. Er wordt geen gewichtsverlies tijdens de erosieproef gemeten. Bij de visuele inspectie van het monster blijkt één brokje van het monster te zijn afgebroken. Dit brokje was waarschijnlijk een stukje los zand (een random gelere plek in het monster), dat direct is weggespoeld, toen monster in het water werd geplaatst. Het monster met additiefsamenstelling E4 kan als erosiebestendig aangeduid worden.

2. Hoeveelheid additief die wordt toegevoegd vergroten

De verschillen tussen de eigenschappen van twee beproefde monsters, waaraan verschillende hoeveelheden F5 zijn toegevoegd, staan aangegeven in tabel 11.3. Elk monster had een volume van $0,2395 \text{ dm}^3$. In grafiek 11.1 is het verschil tussen het gewichtsverlies van beide monsters te zien, tijdens de erosieproef.

	F5 (minder additief)	F5 (meer additief)
Aangemaakt	Ma 7 juni	Ma 21 juni
Beproefd	Do 17 juni	Wo 30 juni
Toegevoegd in cilinder (dm^3)	0,415	0,737
Dikte laag additief op zand (cm)	1,8	2,5
Volume van laag additief in cilinder (dm^3)	0,623	0,866
Gewicht natte monster (g)	466,29	477,39
Gewicht droge monster (g)	358,23	372,49
Natte dichtheid (kg/m^3)	1947	1993
Droge dichtheid (kg/m^3)	1500	1555
Druksterkte (N/m^2)	$5,9 \cdot 10^4$	$11,8 \cdot 10^4$
Gewichtsafname in erosieproef (%)	> 30	11,63

Tabel 11.3: Verschillende eigenschappen ten gevolge van het toevoegen van minder of meer additief F5



Grafiek 11.1: Verschil in gewichtsafname ten gevolge van het toevoegen van meer of minder additief F5

Opmerkingen bij F5 met meer additief

- De druksterkte onder in het monster is iets groter dan de druksterkte bovenin. Het monster lijkt onderin ook iets groener.
- Op één plek onder in het monster, ter plaatse van een injectiepunt, is het verkitte zand aan de rand groener dan in de rest van het monster. Waarschijnlijk was de dichtheid van het gesuspendeerde zand te groot was, op het moment dat het laatste beetje additief werd geïnjecteerd vanuit dit injectiepunt. Hierdoor kon de verspreiding van het additief minder goed verlopen. Het geïnjecteerde additief bleef gedeeltelijk tegen de wand plakken, waardoor de groene plek aan de rand van de cilinder is ontstaan. Verder is het monster overal redelijk homogeen van kleur.
- Onder in de cilinder is in het midden minder additief aanwezig dan aan de randen. Dit verschijnsel is in de vorige monsterronde al gesignaleerd.
- Op foto 11.3 is het monster voor de erosieproef te zien. Op foto 11.4 staat het monster na de erosieproef. Aan de hand van de visuele beschouwing lijkt het monster gelijkmatig geërodeerd in klontjes. De rand van de houder van het erosie-apparaat heeft eventueel een kleine invloed op dit proces. Door het toevoegen van meer additief nemen de druksterkte en de erosiebestendigheid van het monster toe. Ondanks dat, ontstaat er tijdens de erosieproef een gewichtsafname van 11,6%. Hierdoor kan het monster met 1½ keer zoveel F5 niet als erosiebestendig worden aangeduid.

3. Hoeveelheid additief die wordt toegevoegd verkleinen

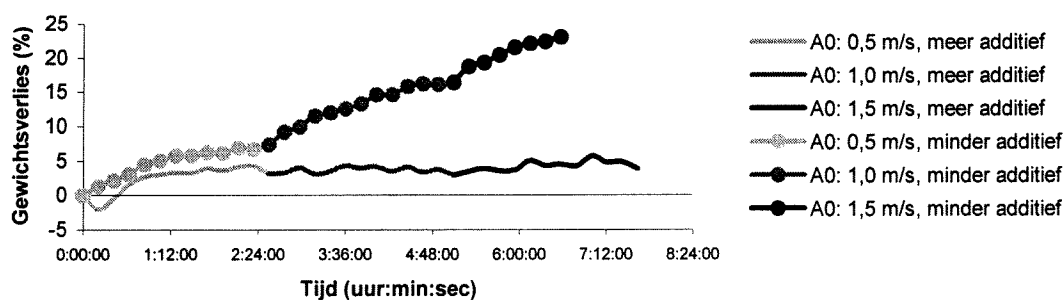
De verschillen tussen de eigenschappen van beproefde monsters, waaraan verschillende hoeveelheden A0 en D3 zijn toegevoegd, staan aangegeven in tabel 11.4. Elk monster had een volume van 0,2395 dm³. In grafiek 11.2 is het verschil tussen het gewichtsverlies van beide monsters met additiefsamenstelling A0 tijdens de erosieproef te zien. Het monster waaraan de halve hoeveelheid van additiefsamenstelling D3 is toegevoegd, viel in water grotendeel uit elkaar en was daardoor niet geschikt voor de erosieproef.

	A0 (meer additief)	A0 (minder additief)	D3 (meer additief)	D3 (minder additief)
Aangemaakt	Ma 7 juni	Ma 21 juni	Ma 7 juni	Ma 21 juni
Beproefd	Do 17 juni	Di 29 juni	Di 15 juni en Vr 25 juni	Wo 30 juni
Toegevoegd in cilinder (dm³)	0,583	0,264	0,582	0,244
Dikte laag additief op zand (cm)	1	0,3	1,2	-
Volume van laag additief in cilinder (dm³)	0,346	0,104	0,416	-
Gewicht natte monster (g)	471,21	463,94	458,40	467,54
Gewicht droge monster (g)	366,51	353,69	344,88	362,40
Natte dichtheid (kg/m³)	1967	1937	1914	1952
Droge dichtheid (kg/m³)	1530	1477	1440	1513
Druksterkte (N/m²)	$> 58,86 \cdot 10^4$	$25,51 \cdot 10^4$ *zie opm A0	$28,45 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^4$ *zie opm D3
Gewichtsafname in erosieproef (%)	4	> 23	8,5 *zie opmerkingen D3 fase 4	-

Tabel 11.4: Verschillende eigenschappen ten gevolge van het toevoegen van meer of minder A0 en D3

Opmerking bij tabel 11.4

De druksterkte van de monsters met minder additief was niet homogeen verdeeld over de hoogte. In deze tabel is de druksterkte op een hoogte van 7 cm (als het monster rechtop staat) weergegeven.



Grafiek 11.2: Verschil in gewichtsafname ten gevolge van het toevoegen van meer of minder additief A0

Opmerkingen bij A0 met minder additief

- Onderop in de cilinder is in het midden minder additief aanwezig dan aan de randen. Dit verschijnsel is in de vorige monsterronde al signaleerd.
- Net als in de monsters in de vorige monsterronde bevinden zich in het monster random gelere plekken. Deze plekken zijn bij dit monster groter dan bij de voorgaande monsters. Dit duidt op een inhomogene verspreiding van het additief door het verkitten zand. Dit is te zien op foto 11.5.

- Ten gevolge van de inhomogene verspreiding van het additief is de druksterkte in het monster plaatsafhankelijk. De druksterktes van twee monsters uit één cilinder hebben duidelijk verschillende waarden (zie tabel 11.5).

Tijdens het meten van de druksterkte hebben de monsters op de kop gestaan. Het was namelijk onmogelijk om deze monsters rechtop uit de steekbuizen te krijgen. In tabel 11.4 is de gemiddelde waarde van de druksterkte op een hoogte van ongeveer 4 cm (= 7 cm, als het monster rechtop staat) als druksterkte van het monster opgegeven.

Hoogte 1 (cm)	Druksterkte 1 (N/m ²)	Hoogte 2 (cm)	Druksterkte 2 (N/m ²)
10,6	35,4.10 ⁴	10,9	26,5.10 ⁴
9,3	23,5.10 ⁴	10	39,2.10 ⁴
7	22,6.10 ⁴	8,4	47,1.10 ⁴
5,7	23,5.10 ⁴	7	31,4.10 ⁴
4,1	20,6.10 ⁴	4,5	30,4.10 ⁴

Tabel 11.5: Verschil in druksterkte binnen een cilinder (halve hoeveelheid A0 geïnjecteerd).

- ⇒ De inhomogene verspreiding van het additief is waarschijnlijk ontstaan, doordat het additief slechts vanuit één punt geïnjecteerd is.
- ⇒ Het lijkt alsof de wolken additief bij de injectie vanuit twee punten op elkaar stoten en zich vervolgens gezamenlijk omhoog verspreiden. Bij de injectie vanuit één punt verplaatst de wolk additief zich voornamelijk via het onderste deel van het gesuspendeerde zand naar de andere kant van de cilinder.
- Op foto 11.6 is het monster voor de erosieproef te zien. Op foto 11.7 staat het monster na de erosieproef. Het erosie-apparaat is stilgezet op het moment dat het monster 23% van zijn gewicht had verloren. Het monster was op dat moment pas 1 uur, 32 minuten en 48 seconden belast door een stroomsnelheid van 1,5 m/s. Als de erosieproef langer was doorgezet, was het erosieproces gestaagd verder gegaan en was de vorm van de erosie niet meer te zien.

Aan de hand van de visuele beschouwing van het geërodeerde monster blijkt dat het gewichtsverlies overal in het monster heeft plaatsgevonden. Het monster lijkt in lagen te zijn geërodeerd. Deze vorm van erosie ontstaat, doordat het additief niet homogeen door het zand verspreid is. De inhomogene verspreiding van het additief bleek ook uit de metingen van de druksterkte en de visuele beschouwing van het monster uit de steekbuis.

- Doordat er minder additief is toegevoegd, nemen zowel de druksterkte als de erosiebestendigheid van het monster af. Het monster, waaraan de halve hoeveelheid additiefsamenstelling A0 is toegevoegd, is niet erosiebestendig. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de inhomogene verspreiding van het additief tussen het bezonken zand. Deze is waarschijnlijk het gevolg van de injectie vanuit één punt.

Opmerkingen bij D3 met minder additief

- Op één plek onder in het monster, ter plaatse van het injectiepunt, is het verkitten van zand aan de rand groener dan in de rest van het monster. De oorzaak hiervan kan zijn dat de dichtheid van het gesuspendeerde zand al te groot was, op het moment dat het laatste beetje additief werd geïnjecteerd. Hierdoor kon de verspreiding van het additief minder goed verlopen en bleef een deel van het geïnjecteerde additief aan de wand van de cilinder plakken.
- Het additief heeft zich zeer slecht verspreid in verticale richting. Het bovenste deel van het monster bestaat uit puur zand, zonder additief (foto 11.8). De dikte van deze laag zand is ongeveer 5 cm. Het grootste deel van het monster valt direct uit elkaar, wanneer het monster

in water wordt geplaatst (foto 11.9). Het deel van het monster dat niet uit elkaar valt, is te klein om in het erosie-apparaat geplaatst te worden. Er ligt geen laag additief op het bezonken zand.

⇒ Een laag additief op het zand geeft aan dat de wolk additief na de injectie voldoende hoogte heeft bereikt, om goed met het zand te mengen in verticale richting. Geen laag additief op het zand geeft aan dat de wolk additief zich niet tot voldoende hoogte verspreid heeft om goed met het zand te mengen. Een hele dunne laag additief op het zand (zoals bij A0, met halve hoeveelheid) ontstaat ten gevolge van verlies van additief bij het bevestigen van de spuitflessen. Een dunne laag geeft daardoor ook aan dat het additief niet goed met het zand gemengd is.

- Aan de hand van de gemeten druksterkte kan ook geconcludeerd worden, dat het additief in verticale richting slecht gemengd is met het bezonken zand. Het bovenste deel van het monster is erg slap en nauwelijks verkit. In het onderste deel van het monster komen de gemeten druksterktes meer overeen met waarden die worden gemeten, als additiefsamenstelling D3 met twee flessen wordt geïnjecteerd. De variatie van de druksterkte in een monster met de halve hoeveelheid D3 is te zien in tabel 11.6. In tabel 11.4 is de druksterkte op de hoogte 7,2 cm als druksterkte van het monster opgegeven. In dit monster is er op die hoogte nog nauwelijks verkitting opgetreden.

Hoogte (cm)	Druksterkte (N/m ²)	Opmerkingen bij monsteroppervlak
8,3	$8,1 \cdot 10^4$	duidelijk geler (= minder additief)
7,2	$7,2 \cdot 10^4$	
5,5	$12,9 \cdot 10^4$	
3,9	$18,6 \cdot 10^4$	
2,0	$16,7 \cdot 10^4$	duidelijk groener (= meer additief)

Tabel 11.6: Verschil in druksterktes over de verticaal binnen een monster (halve hoeveelheid D3 geïnjecteerd)

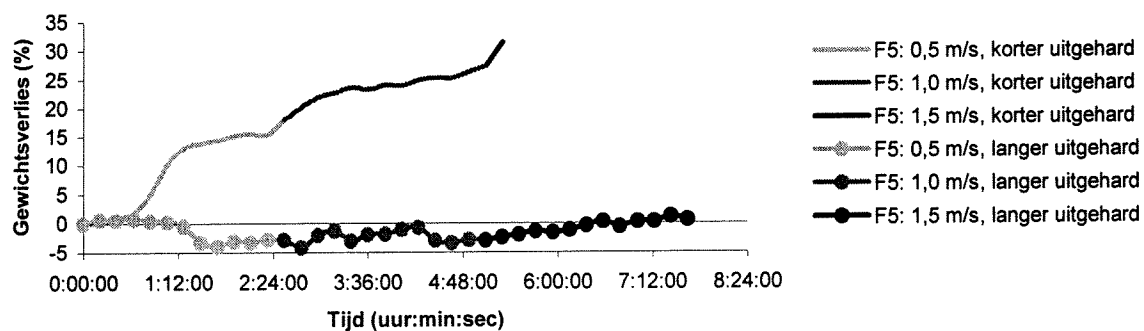
- Doordat er minder additief is toegevoegd, nemen zowel de druksterkte als de erosiebestendigheid van het monster af. Het monster, waaraan de halve hoeveelheid additiefsamenstelling D3 is toegevoegd, is absoluut niet erosiebestendig. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de inhomogene verspreiding van het additief tussen het bezonken zand. Deze is waarschijnlijk het gevolg van de injectie vanuit één punt.
- De gemeten dichtheden van het verkitte zand met minder additief (dus onder in de cilinder) zijn groter dan de dichtheden van het verkitte zand met meer additief. Aangezien het additief zich bij de injectie vanuit één punt alleen in het onderste deel van de cilinder heeft verspreid, is er daar waarschijnlijk meer additief tussen het korrelmateriaal aanwezig, dan bij de injectie vanuit twee punten.

4. Uithardtijd van het additief verlengen

De verschillen tussen de eigenschappen van twee monsters met een verschillende uithardtijd, waaraan additiefsamenstelling F5 is toegevoegd staan aangegeven in tabel 11.7. Elk monster had een volume van 0,2395 dm³. In grafiek 11.3 is het verschil tussen het gewichtsverlies van beide monsters te zien, tijdens de erosieproef.

	F5 (korter uitgehard)	F5 (langer uitgehard)
Aangemaakt	Ma 7 juni	Ma 7 juni
Beproefd	Do 17 juni	Wo 28 juni
Toegevoegd in cilinder (dm ³)	0,415	0,529
Dikte laag additief op zand (cm)	1,8	0,6
Volume van laag additief in cilinder (dm ³)	0,623	0,208
Gewicht natte monster (g)	466,29	473,78
Gewicht droge monster (g)	358,23	370,98
Natte dichtheid (kg/m ³)	1947	1978
Droge dichtheid (kg/m ³)	1500	1549
Druksterkte (N/m ²)	$5,9 \cdot 10^4$	$14,7 \cdot 10^4$
Gewichtsafname in erosieproef (%)	Ongeveer 30	11,63

Tabel 11.7: Verschillende eigenschappen ten gevolge van het korter of langer uitharden van F5



Grafiek 11.3: Verschil in gewichtsafname ten gevolge van het korter of langer uitharden van additief F5

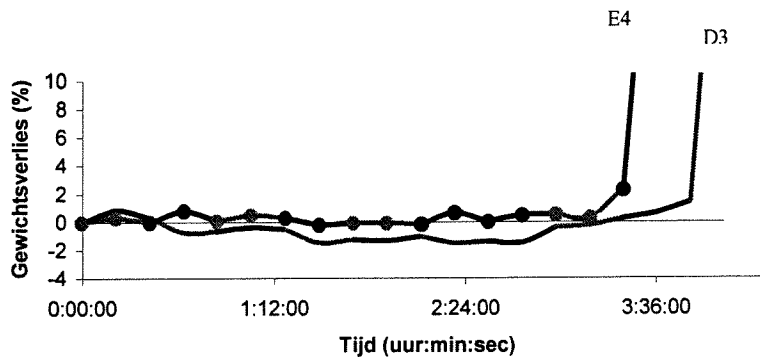
Opmerkingen bij langer uitgeharde F5

- Het additief lijkt minder homogeen verspreid door het zand dan in het monster met dezelfde samenstelling dat in fase 4 is bekeken. De laag additief op het monster is erg dun.
- Op foto 11.10 is het monster voor de erosieproef te zien. Op foto 11.11 staat het monster na de erosieproef. Er is geen gewichtsverlies in het erosie-apparaat gemeten. Uit de visuele beschouwing blijkt dat er toch zand is weggespoeld. Dit is vooral gebeurd bij de randen van de houder van het erosie-apparaat. Dit monster kan wel worden aangeduid als erosiebestendig. Het wegspoelen van het zand is waarschijnlijk ontstaan, doordat het monster is verstoord, toen het in het erosie-apparaat werd geplaatst.
- Langer uitharden vergroot de druksterkte en de erosiebestendigheid van het monster. Het is echter de vraag of in de praktijk een langere uithardtijd mogelijk is. Als de uithardtijd te lang

is, zullen het zand en het additief door de aanwezige stroming worden weggespoeld, voordat er voldoende verkitting is opgetreden.

5. Toenemende belasting in het erosie-apparaat

Het gewichtsverlies van de monsters met additiefsamenstellingen D3 en E4, dat ontstaat door een toenemende stroombelasting in het erosie-apparaat, is weergegeven in grafiek 11.4. De verandering van de kleur van de lijnen van zwart naar grijs en van grijs naar zwart, betekent steeds een toename van de stroomsnelheid met 0,5 m/s.



Grafiek 11.4: Gewichtsverlies van monsters D3 en E4, blootgesteld aan een toenemende belasting

Opmerkingen bij andere belastingprocedure

- De eigenschappen van de monsters zijn niet opnieuw weergegeven; deze komen overeen met eerdere testen op monsters met additiefsamenstelling D3 en E4, geïnjecteerd met twee flessen.
- Het monster met additiefsamenstelling E4 was slapper dan het eerder in deze fase geteste monster met dezelfde samenstelling (zie punt 1 in deze paragraaf op pagina 11-3 tot en met 11-5). De druksterkte van het eerste monster was $25,7 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$; de druksterkte van het tweede monster was $17,7 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$. Het eerste monster met additiefsamenstelling E4 leek relatief sterk in vergelijking met de monsters met additiefsamenstellingen D3 en F5. Hierdoor lijkt de sterkte van het tweede monster meer representatief voor de sterkte van een monster met additiefsamenstelling E4. Daarnaast was de natte dichtheid van het tweede monster E4 minder dan de natte dichtheid van het eerste monster: 1885 kg/m^3 tegenover 1985 kg/m^3 . Deze dichtheid lijkt logischer als gekeken wordt naar de dichtheden van de monsters uit de vorige monsterronde (exclusief F5, dat monster heeft een ongewoon hoge dichtheid).

⇒ Het blijkt dat meer monsters met dezelfde additiefsamenstelling bekeken moeten worden. Pas dan kan meer gezegd worden over het gebied waarbinnen de eigenschappen van het eindproduct zullen liggen.

- De monsters breken bros ten gevolge van de toenemende belasting. D3 breekt bij een stroomsnelheid van 5 m/s en E4 breekt bij een stroomsnelheid van 4,5 m/s.
- Op foto 11.12 is het monster met additiefsamenstelling D3 voor de erosieproef te zien. Er is niks bijzonders aan het monster te zien. Op foto 11.13 staat dit monster na de erosieproef. Op foto 11.14 is het monster met additiefsamenstelling E4 voor de erosieproef te zien. Na de erosieproef was er niks meer van het monster over (foto 11.15).

- Het verschil tussen een duurbelasting en een belastingtoename is duidelijk te zien. Bij een duurbelasting breken er steeds brokjes van het additief af. Bij de belastingtoename valt het monster plotseling uit elkaar. Als de monsters worden blootgesteld aan een duurbelasting, wordt verwacht dat beide monsters klontvormig zullen eroderen bij een lagere stroomsnelheid dan de bezwijkstroomsnelheid. D3 erodeert waarschijnlijk bij een stroomsnelheid tussen de 4 en 5 m/s en E4 bij een stroomsnelheid van tussen de 3,5 en 4,5 m/s. De desintegratie van de monsters begint al bij lagere stroomsnelheden dan de bezwijkstroomsnelheid. Doordat de stroomsnelheid al na ongeveer 25 minuten wordt opgevoerd met 0,5 m/s, is er geen tijd voor het monster om volledig klontvorming te eroderen. Bij de grotere stroomsnelheid wordt de bezwijkbelasting bereikt en breekt het monster vervolgens brokjes.
- ⇒ Het is interessant om te zien hoe de monsters zich gedragen, wanneer ze langer dan 2½ uur worden blootgesteld aan een duurbelasting, die iets kleiner is dan de bezwijkbelasting.

11.6. Conclusies fase 5

Samenstelling additief

- Een monster met een additief met een tussenliggende W/C-factor is erosiebestendig. Dit monster is per liter additief goedkoper dan D3, maar heeft een lagere druksterkte. Er zijn twee verschillende druksterktes gemeten bij twee monsters met additiefsamenstelling E4, uit verschillende cilinders. De hoogste waarde ($25,7 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$) komt ongeveer overeen met de druksterkte van een monster met additiefsamenstelling D3 ($28,45 \cdot 10^4$). E4 heeft een grotere W/C-factor dan D3 en daardoor in principe een lagere sterkte. Hierdoor lijkt de laagste waarde ($17,7 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$) meer representatief voor de sterkte van een monster met additiefsamenstelling E4.

Hoeveelheid additief die wordt toegevoegd vergroten

- Het toevoegen van meer additief vergroot de druksterkte en de erosiebestendigheid van een monster met additiefsamenstelling F5. Ondanks dat kan het monster niet worden aangeduid als erosiebestendig; het gewichtsverlies tijdens de erosieproef is nog steeds redelijk groot.

Hoeveelheid additief die wordt toegevoegd verkleinen

- Het toevoegen van minder additief vermindert zowel de druksterkte als de erosiebestendigheid van de monsters met additiefsamenstellingen A0 en D3. Deze afname wordt vooral veroorzaakt door het feit dat het additief minder homogeen over het korrelmateriaal verdeeld is (zowel in horizontale als in verticale zin). Er is minder additief toegevoegd door het additief te injecteren met één fles vanuit één punt in plaats van met twee flessen vanuit twee (tegenover elkaar gelegen) punten. De injectie is dus minder homogeen en daardoor de verspreiding van het additief tussen het korrelmateriaal ook. Beide monsters kunnen niet als erosiebestendig worden aangeduid.
- De dikte van de laag additief op het verkitten bezonken zand is minimaal, wanneer de halve hoeveelheid additief wordt geïnjecteerd. Dit geeft aan dat de wolk additief zich voornamelijk in het onderste deel van de cilinder heeft verplaatst. In het bovenste deel van het bezonken zand is minder additief aanwezig. Dit blijkt ook uit de gemeten druksterktes; deze zijn in het bovenste deel van het monster lager dan in het onderste deel. De dikte van de laag additief is dus een soort referentie voor de verspreiding van het additief over de verticaal in het bezonken zand. Er moet een optimum gevonden worden voor de dikte van deze laag. Een te dikke laag betekent dat er veel additief verloren is gegaan (dit zit niet tussen het bezonken zand). Door het additief vanuit een dieper punt te injecteren, kan het verlies aan additief verminderd worden. Hierdoor zal de laag additief op het verkitten bezonken zand dunner worden. Een te dunne laag betekent echter dat de verspreiding van het additief over de verticaal niet homogeen is en dat het verkitten zand bovenin slapper is dan onderin.

- Het additief moet zo homogeen mogelijk geïnjecteerd worden. Dit lijkt aardig te lukken bij een injectie vanuit twee punten, maar bij een injectie vanuit één punt is de verspreiding van het additief duidelijk veel minder homogeen. Het lijkt alsof de wolken additief bij de injectie vanuit twee punten op elkaar stoten en zich vervolgens gezamenlijk omhoog verspreiden. Bij injectie vanuit één punt verplaatst de wolk zich voornamelijk via het onderste deel van het gesuspendeerde zand.

Uithardtijd van het additief verlengen

- Door de uithardtijd te verlengen nemen zowel de druksterkte als de erosiebestendigheid van monster met additiefsamenstelling F5 toe. Het monster kan nu als erosiebestendig worden aangeduid. De vraag is echter in hoeverre in de praktijk een langere uithardtijd mogelijk is. Als de uithardtijd te lang is, zullen het zand en het additief door de aanwezige stroming worden weggespoeld, voordat er voldoende verkitting is opgetreden.

Toenemende belasting in het erosie-apparaat

- Wanneer monsters met additiefsamenstellingen D3 en E4 worden blootgesteld aan een toenemende stroombelasting, breken deze bros bij het bereiken van de bezwijkstroomsnelheid. D3 breekt bij een stroomsnelheid van 5 m/s en E4 breekt bij een stroomsnelheid van 4,5 m/s.
- Als de monsters met additiefsamenstellingen D3 en E4 worden blootgesteld aan een duurbelasting, wordt verwacht dat beide monsters klontvormig zullen eroderen bij een lagere stroomsnelheid dan de bezwijkstroomsnelheid. D3 erodeert waarschijnlijk bij een stroomsnelheid tussen de 4 en 5 m/s en E4 bij een stroomsnelheid van tussen de 3,5 en 4,5 m/s. De desintegratie van de monsters begint al bij lagere stroomsnelheden dan de bezwijkstroomsnelheid. Doordat de stroomsnelheid al na ongeveer 25 minuten wordt opgevoerd met 0,5 m/s, is er geen tijd voor het monster om volledig klontvorming te eroderen. Bij de grotere stroomsnelheid wordt de bezwijkbelasting bereikt en breekt het monster vervolgens bros.

11.7. Aanbevelingen voor verder onderzoek

- Om meer te kunnen zeggen over de eigenschappen van een monster met een bepaalde additiefsamenstelling zullen meerdere monsters met in principe dezelfde samenstelling bekeken moeten worden.
- Verder onderzoek is nodig om te bepalen of de verschillende monsters wel erosiebestendig zijn, wanneer de halve hoeveelheid additief homogeen wordt geïnjecteerd. Aan de hand van dat onderzoek zouden per additiefsamenstelling de kosten van de hoeveelheid additief die nodig om een m³ zand te verkitten bepaald kunnen worden. Vervolgens kan op grond daarvan het goedkoopste additief worden gekozen.
- Het verkitte zand moet redelijk snel een bepaalde sterkte hebben om de aanwezige stroming te kunnen weerstaan. Op het verkitte zand is een buffer van los zand aanwezig van de ingestorte wanden van de geul. De verkitte bodem moet in staat zijn om zijn functie te vervullen op het moment dat deze buffer is verdwenen. Per locatie moet onderzoek verricht worden naar de aanwezige stroming. Aan de hand hiervan kan bepaald worden na welke uithardtijd de verkitte bodem in staat moet zijn om zijn functie te vervullen. Aan de hand daarvan kan het goedkoopste additief worden geselecteerd.
- Het is interessant om te zien hoe de verschillende monsters zich zullen gedragen, wanneer ze langer dan 2½ uur worden blootgesteld aan een duurbelasting, die iets kleiner is dan de bezwijkbelasting. Voor monsters met additiefsamenstelling A0, C1, F3 moet de bezwijkbelasting nog bepaald worden.

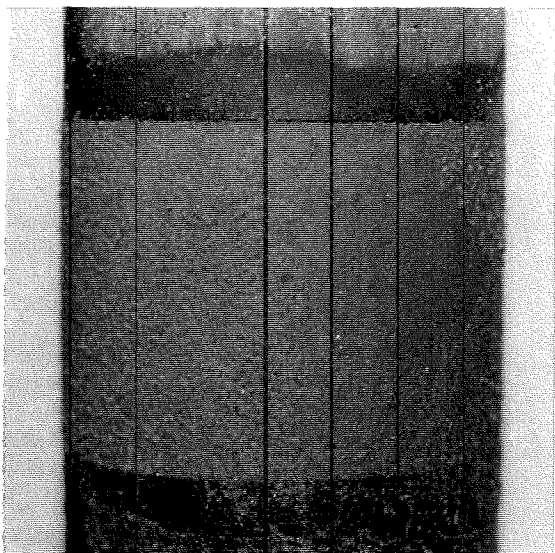


Foto 11.1: Monster met additiefsamenstelling E4 voor de erosieproef



Foto 11.2: Monster met additiefsamenstelling E4 na de erosieproef

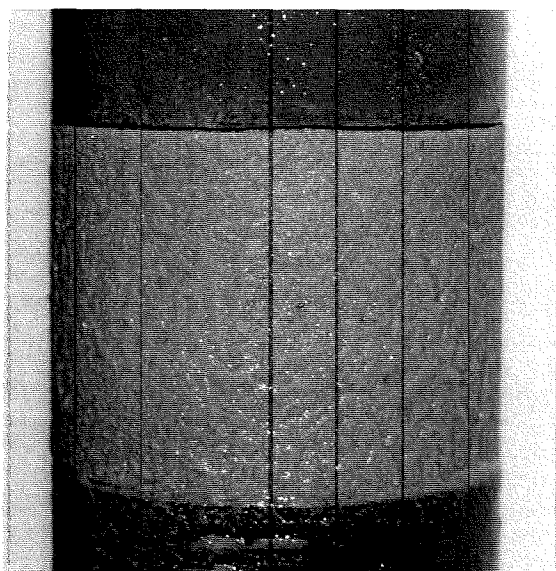


Foto 11.3: Monster met meer additiefsamenstelling F5 voor de erosieproef

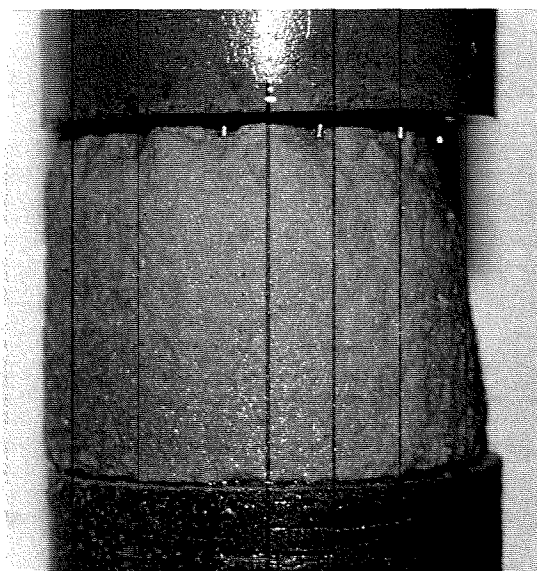


Foto 11.4: Monster met meer additiefsamenstelling F5 na de erosieproef

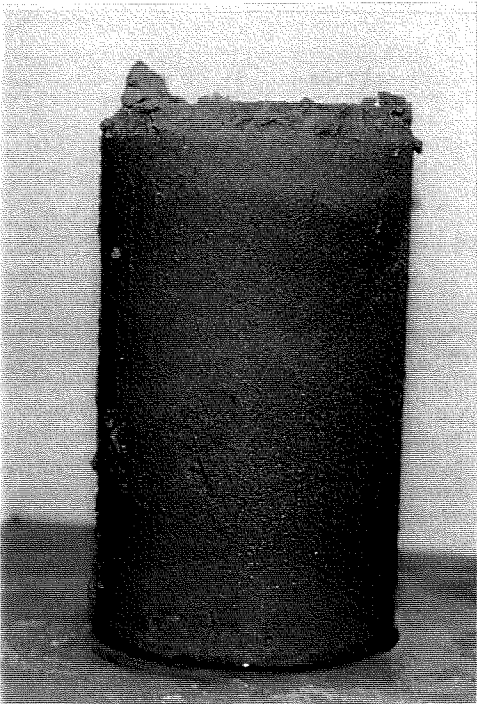


Foto 11.5: Geen homogene verspreiding van het additief A0 in het monster waaraan de halve hoeveelheid additief is toegevoegd

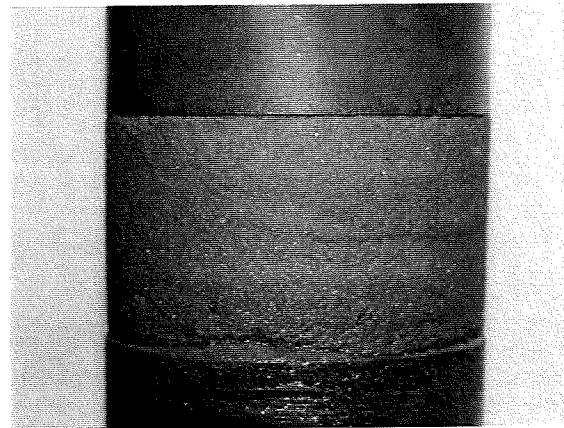


Foto 11.6: Monster met minder additiefsamenstelling A0 voor de erosieproef

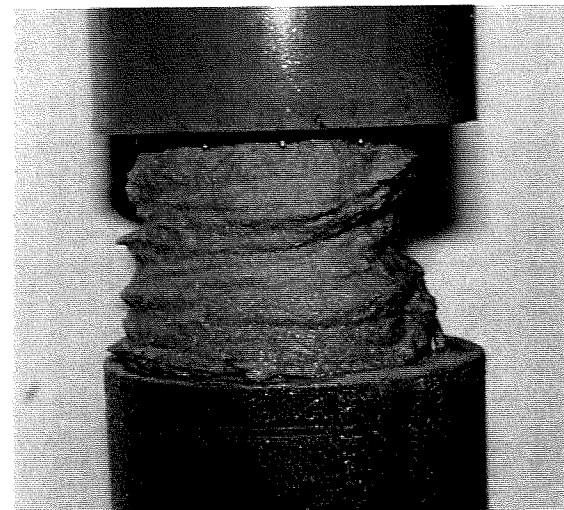


Foto 11.7: Monster met minder additiefsamenstelling A0 na de erosieproef

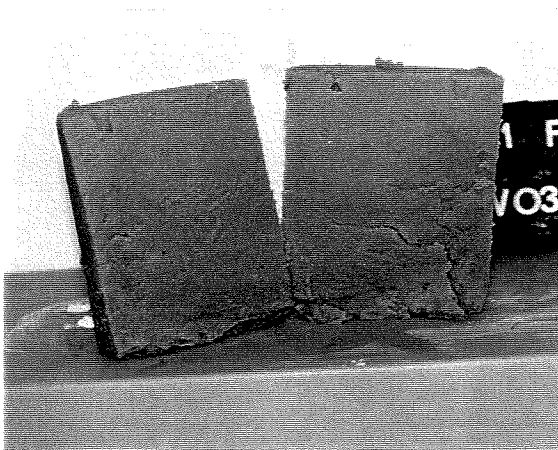


Foto 11.8: Het bovenste deel van het monster met minder D3 bestaat uit puur zand, zonder additief

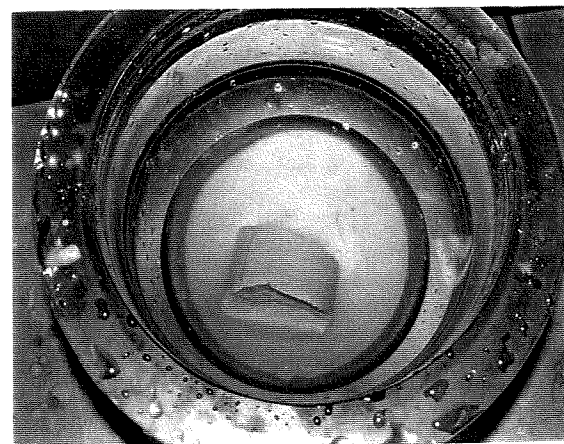


Foto 11.9: Het grootste deel van het monster met minder D3 valt direct uit elkaar, wanneer het monster in water wordt geplaatst

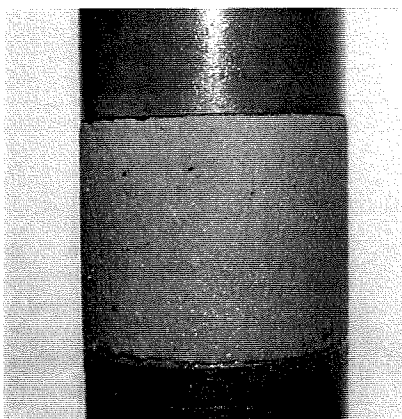


Foto 11.10: Monster met langer uitgeharde additiefsamenstelling F5 voor de erosieproef

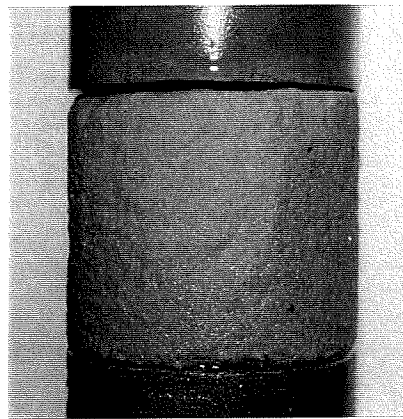


Foto 11.11: Monster met langer uitgeharde additiefsamenstelling F5 na de erosieproef

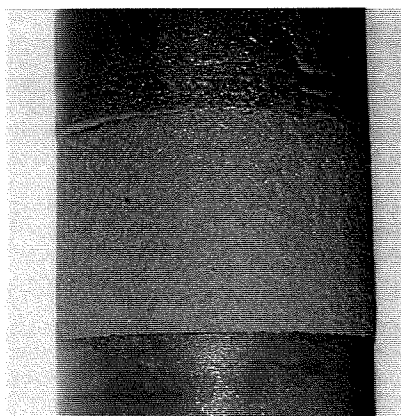


Foto 11.12: Monster met additiefsamenstelling D3 voor de erosieproef met een toenemende belasting

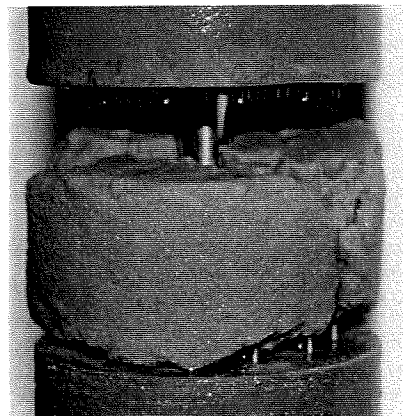


Foto 11.13: Monster met additiefsamenstelling D3 na de erosieproef met een toenemende belasting

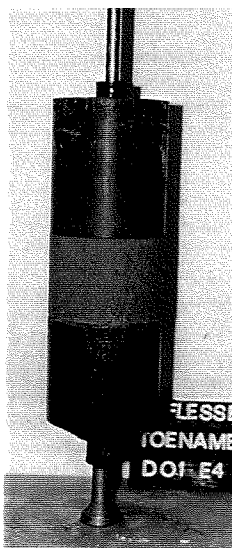


Foto 11.14: Monster met additiefsamenstelling E4 voor de erosieproef met een toenemende belasting

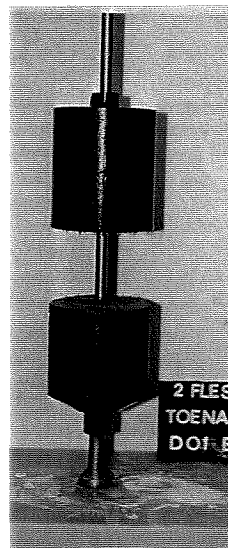


Foto 11.15: Monster met additiefsamenstelling D3 na de erosieproef met een toenemende belasting

12. Conclusies en aanbevelingen

12.1. Conclusies

12.1.1. Algemeen

- Het is mogelijk om een bindend additief tussen gesuspendeerde zandkorrels te injecteren en daarmee de erosiebestendigheid van een zandbodem te verbeteren. Om voldoende erosiebestendigheid te verkrijgen moet het additief zo homogeen mogelijk met het zand gemengd zijn, wanneer het geheel bezonken is. Dit kan bereikt worden als de injectie aan bepaalde eisen voldoet (zie 12.1.2 in dit hoofdstuk).
 - *Bij de experimenten is een roertechniek gebruikt om het zand in suspensie te brengen. Er wordt aangenomen dat het injecteren van het additief in een zandsuspensie verkregen door fluïdisatietechnieken, vergelijkbare resultaten zal opleveren.*
- Cement-bentonietsuspensies vormen het goedkoopste additief dat gebruikt kan worden om een zandbodem te verkitten. Deze suspensies zijn milieu-neutraal. De functie van het bentoniet in een dergelijke suspensie is te zorgen voor stabiliteit van de suspensie. Zonder de aanwezigheid van de bentoniet zal de suspensie uitzakken, waardoor deze niet meer verwerkbaar is.
- De eigenschappen van het eindproduct met betrekking tot de sterkte en de erosiebestendigheid worden voornamelijk bepaald door de water/cement-factor van het geïnjecteerde additief en de mate waarin het additief zich homogeen over het korrelmateriaal heeft verspreid. Het toevoegen van meer additief vergroot de druksterkte en de erosiebestendigheid van het verkitte gebied.
- De invloed van het bentonietgehalte op de eigenschappen van het verkitte zand is klein. Doordat het additief met een grote druk geïnjecteerd wordt, verdwijnt de functie van het bentoniet. Na de injectie treedt er verdunning op. Het aanwezige bentonietgehalte is dan niet meer in staat om te zorgen voor stabiliteit van de suspensie.
- Erosiebestendigheid houdt in, dat een aangemaakt monster geen gewichtsafname tijdens de erosieproef vertoont, nadat het monster steeds gedurende 2½ uur wordt belast door stroomsnelheden van 0,5, 1,0 en 1,5 m/s.
- Het verkitte zand is alleen in een natte omgeving in staat om zijn functie te vervullen. Als het verkitte zand uitdroogt en vervolgens weer nat wordt, zal het niet meer erosiebestendig zijn. Dit bleek uit de experimenten.

12.1.2. Eisen injectiemethode

- Doordat het gesuspendeerde zand bezinkt, moet het additief snel geïnjecteerd worden (in dit onderzoek is er tussen 5,4 kg (2040 ml) zand, 500-600 ml additief geïnjecteerd in 10-13 seconden door een injectieopening met een diameter van 0,5 cm). Voor deze snelle injectie is een redelijk grote druk nodig. Door de grote injectiedruk en injectiesnelheid gaat de samenhang van het additief verloren, het additief verspreidt zich als een wolk tussen het gesuspendeerde bodemmateriaal. De injectiedruk duwt het gesuspendeerde zand tijdens de injectie weg, na de injectie bezinken de korrels tussen de wolk additief. Hoe grover het korrelmateriaal, hoe sneller het additief geïnjecteerd moet worden.
- Door de grote injectiedruk en injectiesnelheid verdunt het additief met een factor 2 à 3. Door deze verdunning neemt de water/cement-factor van het additief toe en verslechteren de eigenschappen

van het additief. Dit kan niet worden voorkomen. Ondanks deze verdunning kan er wel een voldoende erosiebestendig gebied ontstaan.

- De wolk van cement en bentoniet bezinkt niet als een mengsel met een bepaalde dichtheid, maar als afzonderlijke deeltjes (vlokken). Deze vlokken zijn lichter dan de zandkorrels, waardoor ze langzamer bezinken. Vergroting van de dichtheid van het additief door toevoeging van meer cement heeft geen invloed op het bezinkgedrag (deeltjes blijven relatief veel lichter dan de zandkorrels).
- Door het additief op voldoende diepte te injecteren, kan het verlies van additief ten gevolge van segregatie geminimaliseerd worden. Als het additief echter te diep geïnjecteerd wordt, zal het bovenste deel van het gesuspendeerde zand niet in de wolk additief bezinken en daardoor minder verkit worden (in de praktijk hoeft dit niet altijd een probleem te zijn). Er moet een optimum gevonden worden voor de diepte van het injectiepunt. Het is ook mogelijk om meerdere injectiepunten over de verticaal toe te passen, waarbij een variërende hoeveelheid additief geïnjecteerd wordt (onderin meer dan bovenin). Verder onderzoek is nodig.

12.2. Aanbevelingen

In dit onderzoek is een eerste aanzet gegeven om te bepalen of een alternatieve methode voor erosiebestrijding mogelijkheden heeft. Er kan geconcludeerd worden dat de onderzochte methode voor erosiebestrijding perspectieven biedt, maar er zal nog meer onderzoek verricht moeten worden voordat de methode in praktijk gebracht kan worden. In deze paragraaf zullen enkele aanbevelingen voor verder onderzoek worden gedaan. Voor dit verder onderzoek hoeft niet noodzakelijk gebruik gemaakt te worden van zeewater.

12.2.1. Algemeen

- De uitgevoerde proeven zijn indicatieve 1-dimensionale proeven. De afmetingen van de cilinder geven randeffecten voor de verspreiding van het additief in het horizontale vlak. In de praktijk zullen de wanden van de geul de verspreiding van het additief slechts in één richting beperken. Daarnaast zijn de aangemaakte monsters in dit onderzoek onder ideale omstandigheden uitgehard. In de praktijk zullen deze omstandigheden minder ideaal zijn. Er zal onderzoek verricht moeten worden waarbij de situatie op zee wordt gesimuleerd. Hierbij zal bekeken moeten worden op welke manier het additief zich in die situatie verspreidt, welke eigenschappen de verkitte bodem dan heeft en in hoeverre de eigenschappen van het verkitte gebied constant zijn, wanneer er additief over een groot oppervlak (continu) wordt geïnjecteerd.
- Bij de modellering van een trencher zal rekening gehouden moeten worden met de eisen die aan de injectiemethode gesteld worden. Er zal veel aandacht moeten worden besteed aan de injectiediameter, injectiesnelheid en injectiedruk.
- De onderzochte methode voor erosiebestrijding lijkt als resultaat van dit onderzoek technisch haalbaar. Een volgende stap is het bekijken van de economische haalbaarheid van deze methode voor erosiebestrijding. Hierbij geldt dat de kosten van de alternatieve methode voor erosiebestrijding stijgen naarmate de geïnjecteerde hoeveelheid additief toeneemt en naarmate de water/cement-factor van het geïnjecteerde additief afneemt.
 - Er moet verder onderzoek verricht worden om een uitspraak te kunnen doen over de benodigde hoeveelheid additief voor het verkitten van 1 m³ zand. Per additiefsamenstelling moet bepaald worden hoeveel er nodig is om een bepaalde hoeveelheid zand te verkitten. Aan de hand daarvan kunnen voor elke additiefsamenstelling de kosten bepaald worden, van de hoeveelheid additief die per m³ zand nodig is om voldoende erosiebestendigheid te creëren.

Hierbij wordt verwacht dat er minder additief nodig is, naarmate de geïnjecteerde water/cement-factor kleiner is.

- Door de uithardtijd te verlengen nemen zowel de druksterkte als de erosiebestendigheid van de verkitten bodem toe. Een bodem die na 10 dagen uitharden niet erosiebestendig is (doordat het toegevoegde additief een te grote water/cement-factor heeft), is dit na 21 dagen uitharden (eventueel) wel. De vraag is echter in hoeverre in de praktijk een langere uithardtijd mogelijk is. Boven op de verkitten zandlaag is een buffer van los zand aanwezig ten gevolge van het instorten van de wanden van de geul. Zodra deze buffer van zand is verdwenen moet de verkitten bodem voldoende sterk zijn om de aanwezige stroming te weerstaan. Per locatie moet bepaald worden na welke uithardtijd de verkitten bodem in staat moet zijn om de aanwezige stroming te weerstaan. Hierbij geldt dat hoe hoger de geïnjecteerde water/cement-factor is, hoe langer het duurt voordat de verkitten bodem erosiebestendig is.
- Een bentonietsuspensie moet aangemaakt worden met zoet water. Dit kan hoge kosten met zich meebrengen, wanneer dit water naar de locatie van de pijpleiding vervoerd moet worden, of wanneer het water ter plekke ontzout moet worden. De kosten van het vervoer of aanmaken van zoet water moeten worden afgewogen tegen de kosten van een cementsuspensie zonder bentoniet met een water/cement-factor van 0,8. Daarnaast brengt de benodigde ruimte voor het rijpen van de bentonietsuspensie extra kosten met zich mee.

12.2.2. Additief

- In verband met de verwerkbaarheid van het additief, is de eis gesteld, dat de Marsh-viscositeit (zie terminologielijst) van het additief kleiner moet zijn dan 60 s/l. Er moet beter gekeken worden naar deze eis. Voor de verspreiding van het additief tussen het gesuspendeerde korrelmateriaal lijkt deze eis te streng en lijkt een eis van een maximale Marsh-viscositeit van 80 s/l beter geschikt. Aan de mogelijkheden om vloeistoffen met een te grote Marsh-viscositeit te verpompen is in dit onderzoek geen aandacht besteed.
- Als de additieven worden aangemaakt in grotere hoeveelheden dan in dit onderzoek, kan er harder geroerd worden zonder dat er lucht wordt aangezogen. Dit hardere roeren heeft invloed op de Marsh-viscositeit; deze zal afnemen. De invloed van de roersnelheid en roertijd op de Marsh-viscositeit moet gekwantificeerd worden (in hoeverre is het mogelijk een Marsh-viscositeit door extra roeren terug te brengen van 65 tot bijvoorbeeld 50 s/l).
- In een cement-bentonietsuspensie zijn vaste deeltjes aanwezig. Deze deeltjes zijn lichter dan het bodemmateriaal, waardoor er segregatie optreedt, wanneer het zand en het additief gezamenlijk bezinken. In een oplossing zijn geen vaste deeltjes aanwezig. Het is mogelijk dat er geen segregatie ontstaat, wanneer een oplossing gezamenlijk met zandkorrels bezinkt. Hierdoor zouden er minder strenge eisen aan de injectietechniek gesteld kunnen worden. Silicagels zijn oplossingen die eventueel geschikt lijken. Er zou meer onderzoek verricht moeten worden naar de mogelijkheden van silicagels.

12.2.3. Injectiemethode

- Er zal beter onderzoek verricht moeten worden naar de maximale dichtheid van het gesuspendeerde materiaal waartussen een cement-bentonietsuspensie nog kan worden geïnjecteerd. Door de injectiedruk te vergroten, kan het additief eventueel op een later moment worden geïnjecteerd, zonder dat de verspreiding problemen oplevert. Bij de injectie met de spuitflessen in dit onderzoek, kon hier niet naar worden gekeken.

12.2.4. Eindproduct

- In dit onderzoek zijn de eigenschappen van een groot aantal monsters met een bepaalde additiefsamenstelling eenmalig bepaald. De enkele keer dat de eigenschappen van een zelfde additiefsamenstelling in verschillende monsters zijn bekeken, toonden deze verschillen. Om meer te kunnen zeggen over de eigenschappen van een monster met een bepaalde additiefsamenstelling, zullen meerdere monsters met in principe dezelfde samenstelling bekeken moeten worden. Op deze manier kan met statistische methoden een gebied met een bepaalde betrouwbaarheid worden aangegeven, waarin de eigenschappen van het additief zich zullen bevinden.
- De erosiebestendigheid van een verkitte bodem moet bekeken worden, terwijl deze gedurende een lange periode met een bepaalde stroomsnelheid worden belast. Daarnaast is het interessant om te bepalen bij welke stroomsnelheden allerlei verschillende additiefsamenstellingen het begeven. Per locatie kan dan het meest geschikte additief worden gebruikt.
- Er moet onderzoek verricht worden naar het optreden van eventuele randerosie, nadat er een verkit gebied is ontstaan op de zeebodem.
- Er zal onderzoek moeten worden verricht naar de eigenschappen van het verkitte gebied onder andere belastingsomstandigheden, dan alleen stroming.
- In dit onderzoek is gekeken naar de erosiebestendigheid en de druksterkte van het verkitte zand. Aan andere eigenschappen, zoals bijvoorbeeld de permeabiliteit van het verkitte gebied, is geen aandacht besteed. Hier zal meer onderzoek naar moeten worden verricht, als het injecteren van een additief tussen gesuspendeerd materiaal voor andere toepassingsgebieden zal worden gebruikt.

Bijlagen

- A. Bijlage 1: Terminologielijst**
 - B. Bijlage 2: Principe van fluïdisatie**
 - C. Bijlage 3: Originele hoofdstuk Verwachtingen**
 - D. Bijlage 4: Korrelverdeling zand S85**
 - E. Bijlage 5: Gebruikte literatuur**
-

A. Bijlage 1: Terminologielijst

Additief:	Stof (of combinatie van stoffen) die aan de bodem wordt toegevoegd om de eigenschappen van deze bodem te verbeteren.
Afzettijd:	Tijdsduur, vanaf het moment dat het cement aan de bentonietsuspensie wordt toegevoegd, dat de cement-bentonietsuspensie verwerkbaar (verpompbaar/injecteerbaar) is en dus verplaatst kan worden. Na het verstijven van de afzettijd heeft de viscositeit zijn eindwaarde bereikt en is zo toegenomen, dat de cement-bentonietsuspensie niet meer verplaatsbaar is.
Bentonietpercentage:	Hoeveelheid bentoniet in de cement-bentonietsuspensie, uitgedrukt als gewichtspercentage ten opzichte van de totaal gebruikte hoeveelheid water bij het aanmaken van de cement-bentonietsuspensie.
Bezinktijd:	Tijdsduur vanaf het moment dat gestopt wordt met fluïdiseren tot het moment dat het gefluïdiseerde korrelmateriaal weer "gewoon" op de bodem ligt.
Binghamse vloeistof:	Vloeistof die wordt gekenmerkt door een grensschuifspanning (= cohesie).
Cement-bentonietsuspensie:	Vloeibaar mengsel van cement, bentoniet, water en eventuele toevoegingen.
Cohesie:	Beginweerstand die moet worden overwonnen, voordat een vloeistof in beweging komt ten gevolge van een (schuif)snelheidsgradiënt (= grensschuifspanning).
Deklaag:	Beschermende laag zand op een ingegraven pijpleiding om de pijpleiding te beschermen tegen krachten van buitenaf.
Doorlatendheid:	Mate waarin een materiaal gas of vloeistof doorlaat (= permeabiliteit).
Draagvermogen:	Mate waarin de cement-bentonietsuspensie bezinkende zandkorrels draagt. Afhankelijk van de cohesie en viscositeit (schuifspanning) van de cement-bentonietsuspensie. Kan worden gemeten met behulp van het Kugelharfengerät (= zwichtspanning).
Eindproduct:	Het uitgeharde monster, als model van de verstevigde deklaag.
Fluïdisatietechnieken:	Door het injecteren van water wordt een zandbodem gefluïdiseerd tot een zand-watmengsel met een bepaalde dichtheid. Een pijpleiding zakt vervolgens onder invloed van zijn eigen gewicht in de ontstane geul. Na dit proces bezinkt het gefluïdiseerde zand en wordt de pijpleiding bedekt door een beschermende zandlaag.
Grensschuifspanning:	Zie cohesie.
Grouten:	Het onder druk persen van vloeistoffen (grouts) in de open ruimtes van de ondergrond, met het doel de permeabiliteit te reduceren en/of de sterkte van de ondergrond te vergroten.
Kritische massa-snelheid:	Manier waarop de kracht die nodig is om zand te fluïdiseren wordt uitgedrukt [kg/s.m^2].

Kugelharfengerät:	Apparaat om de schuifspanning (en dus het draagvermogen) in een cement-bentonietuspensie te meten.
Marsh-trechter:	Gestandaardiseerde trechter van kunststof volgens API, om de viscositeit van een vloeistof te relateren aan die van water. De uitstroomtijd (s) van een liter (l) vloeistof is een maat, waarmee de viscositeit van deze vloeistof gerelateerd kan worden aan die van water. De uitstroomtijd van water is ongeveer 28 s/l.
Marsh-viscositeit:	Viscositeit (s/l) bepaald met de Marsh-trechter.
Mengenergie:	Hoeveelheid energie, die wordt gebruikt bij het aanmaken van de cement-bentoniet suspensies.
Pinhole proef:	Proef waarmee inzicht kan worden verkregen in de gevoeligheid van het eindproduct voor mechanische (en chemische) erosie.
Permeabiliteit:	Zie doorlatendheid.
Porositeit:	Volume van de poriën gedeeld door het totale volume van de grond ($n = V_p/V_g$).
Sedimentatie:	Het bezinken van de in de suspensie aanwezige korrels.
Stabiliteit:	Een suspensie is stabiel, als geldt dat $dH/H < 10\%$. Een stabiele suspensie is een homogene suspensie, met constante eigenschappen. Als een suspensie stil staat, treedt er sedimentatie op. De vaste deeltjes (de korrels) van de suspensie zullen bezinken. Boven op deze bezonken deeltjes blijft een laagje vrij water staan. De stabiliteit van een suspensie kan worden gemeten in een cilinder. De verhouding tussen de dikte van de laag vrij water (dH) en de dikte van de laag bezonken korrels (H) is een maat voor de stabiliteit.
Suspensie:	Vloeibaar mengsel van cement, bentoniet, water en eventuele toevoegingen.
Thixotropisch gedrag:	Samenhang die ontstaat als een vloeistof met deze eigenschap stil staat. De vloeistof wordt minder vloeibaar en gaat zich gedragen als een soort "pudding".
Trencher:	Fluïdisatie-apparaat.
Verstevigde gebied:	Deel van de beschermende zandlaag op de pijpleiding, dat ten gevolge van de injectie van het additief, betere eigenschappen heeft verkregen.
Verwerkbaarheid:	Een suspensie is verwerkbaar, dat wil zeggen verpompbaar, injecteerbaar en verplaatsbaar, zolang de viscositeit voldoende laag is.
Viscositeit:	De inwendige wrijving die een vloeistof ondervindt bij stroming.
Vortex:	Verlaging van het waterniveau rondom de roerder, ontstaat door het draaien van de roerder.
Water/cement-factor:	De massaverhouding (kg/kg) tussen de totale hoeveelheid water en de hoeveelheid cement (= W/C-factor).

Zand-watermengsel: Het zand dat door middel van roeren in suspensie is gebracht.

B. Bijlage 2: Principe van fluïdisatie

Inleiding

Het principe van fluïdisatie is gebaseerd op het feit dat een vloeistof die van beneden naar boven door een laag granulair materiaal stroomt, een opwaartse kracht uitoefent op de korrels in die laag. Op het moment dat de opwaartse kracht groter wordt dan het eigen gewicht van de deeltjes verdwijnt het contact tussen de deeltjes en worden de deeltjes ondersteund door de vloeistof. Er ontstaat een gefluïdiseerde massa.

In de komende paragrafen wordt de theorie achter dit principe besproken.

Dit gebeurt aan de hand van de evenwichtsvergelijkingen van de spanningen in stilstaand en stromende water, de wet van Darcy, de stromingsdruk, de doorlatendheid van de grond en de (grond)waterstroming.

Stilstaand water

In niet stromend water is de spanningsverdeling hydrostatisch. De evenwichtsvergelijkingen van de spanningen voor een klein blokje water zijn dan:

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial z} + \gamma_w &= 0\end{aligned}\tag{1}$$

Hierbij geldt dat γ_w het volumegewicht van het water is; dit kan constant verondersteld worden en is ongeveer 10 kN. Daarnaast is aangenomen dat in het water geen schuifspanningen optreden.

De z-as wijst verticaal omhoog. Uit de formules volgt dat de druk p onafhankelijk is van de coördinaten in het horizontale vlak, x en y .

De derde evenwichtsvergelijking kan worden geïntegreerd tot:

$$p = -\gamma_w z + C\tag{2}$$

Hierbij is C een integratieconstante.

Stromend water

Als het water door het korrelmateriaal heen stroomt, is de drukverdeling niet meer hydrostatisch; de evenwichtsvergelijkingen in de vorm van (1) zijn dan niet meer volledig. Er is namelijk een interactie tussen het water en het korrelskelet in de vorm van onderlinge wrijvingskrachten:

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial x} - f_x &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial y} - f_y &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial z} + \gamma_w - f_z &= 0\end{aligned}\tag{3}$$

f_x , f_y en f_z zijn de componenten van de kracht die per eenheid van volume door het korrelskelet op het water wordt uitgeoefend. Door een beschouwing van het evenwicht in bijvoorbeeld de x -richting, kan het teken geverifieerd worden. Als de druk in die richting toeneemt moet er een kracht in positieve x -

richting op het water werken, om het evenwicht te verzekeren. Beide termen in de eerste vergelijking zijn dan positief.

Wanneer de stroomsnelheid van het water toeneemt (versnelt) moeten in het rechterlid van de vergelijkingen de termen pa_x , pa_y en pa_z worden toegevoegd. Deze worden in het vervolg van deze beschouwing verwaarloosd.

De wrijvingskracht tussen de korrels en het water is afhankelijk van de snelheid van het water ten opzicht van de korrels; de kracht neemt toe met een toenemende snelheid en is er tegen in gericht. Daarnaast is de wrijvingskracht groter, bij dezelfde snelheid, naarmate de doorstromende vloeistof viskeuzer is. Bij niet al te grote snelheden van het water, is er een lineair verband tussen de wrijvingskracht en de snelheid van het water ten opzichte van het korrelskelet. Als de grond in alle richtingen dezelfde eigenschappen heeft (isotroop is), kan dit als volgt in formule worden gebracht:

$$\begin{aligned} f_x &= -\frac{\mu}{\kappa} q_x \\ f_y &= -\frac{\mu}{\kappa} q_y \\ f_z &= -\frac{\mu}{\kappa} q_z \end{aligned} \quad (4)$$

q_x , q_y en q_z zijn componenten van het specifieke debiet, of de volumestroomdichtheid. De waarde van q_x is gedefinieerd als de volumestroom door een oppervlak met zijn normaal in de x-richting, gedeeld door de grootte van dat oppervlak. De eenheid is dan m^3/s per m^2 ; deze eenheid reduceert tot m/s . Dit is niet de gemiddelde stroomsnelheid van het water, omdat daarvoor de volumestroom gedeeld zou moeten worden door het oppervlak van de poriën (een fractie n kleiner dan het totale oppervlak, als n de porositeit is). Het specifieke debiet is wel evenredig met de gemiddelde snelheid van het water, $v = q/n$.

De evenredigheidsconstante is weergegeven als μ/κ (= dynamische viscositeit / intrinsieke doorlatendheid). De waarde $1/\kappa$ is een maat voor de grootte van de wrijving. In het algemeen geldt dat κ groter is, naarmate de afmetingen van de poriën groter zijn; er is dan minder wrijving. Substitutie van de formules (4) in (3) geeft:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\kappa} q_x &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\kappa} q_y &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial z} + \gamma_w + \frac{\mu}{\kappa} q_z &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Deze vergelijking is een evenwichtsvergelijking voor het water in een elementje waarin zich een groot aantal poriën bevinden. De vergelijking kan ook als volgt beschreven worden:

$$\begin{aligned} q_x &= -\frac{\kappa}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \\ q_y &= -\frac{\kappa}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ q_z &= -\frac{\kappa}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \gamma_w \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Deze vergelijkingen vormen de wet van Darcy. Hiermee kunnen de componenten van het specifieke debiet uitgerekend worden, als de drukverdeling bekend is.

Als in het vervolg van de beschouwing wordt uitgegaan van een homogene vloeistof, kan een nieuwe grootheid worden ingevoerd, de stijghoogte (h). De stijghoogte h is gedefinieerd als: $h = z + p/\gamma_w$. Als het water niet stroomt is de stijghoogte overal in de bodem gelijk. Als de stijghoogte niet constant is stroomt het water, van plaatsen met een grote waarde van de stijghoogte naar plaatsen met een kleinere stijghoogte. Het water streeft ernaar dat de stijghoogte overal gelijk wordt.

Bij een constant volumegewicht γ_w geldt:

$$\begin{aligned}\frac{\partial h}{\partial x} &= \frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial h}{\partial y} &= \frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial h}{\partial z} &= \frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \gamma_w \right)\end{aligned}\tag{7}$$

Hierdoor kan de wet van Darcy (6) ook geschreven worden als:

$$\begin{aligned}q_x &= -k \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -k \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -k \frac{\partial h}{\partial z}\end{aligned}\tag{8}$$

$k = \text{doorlatendheidscoëfficiënt} = \kappa \gamma_w / \mu$

Stromingsdruk

Stroming van water door de bodem geeft een wrijvingskracht tussen het water en het systeem van korrels. De wrijvingskracht die de korrels op het water uitoefenen is gelijk aan (zie (3)):

$$\begin{aligned}f_x &= \frac{\partial p}{\partial x} \\ f_y &= \frac{\partial p}{\partial y} \\ f_z &= \frac{\partial p}{\partial z} + \gamma_w\end{aligned}\tag{9}$$

Met $h = z + p/\gamma_w$ kan dit in de stijghoogte worden uitgedrukt. Hierbij is aangenomen dat γ_w constant is.

$$\begin{aligned}
 f_x &= \gamma_w \frac{\partial h}{\partial x} \\
 f_y &= \gamma_w \frac{\partial h}{\partial y} \\
 f_z &= \gamma_w \frac{\partial h}{\partial z}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

De kracht die door het water op de korrels wordt uitgeoefend, per eenheid van volume, zal worden aangegeven met j . Op grond van het principe van actie en reactie is dit het tegengestelde van de kracht f . Men noemt deze vectorgrootte de stromingsdruk, ookal is het eigenlijk geen druk, maar een volumekracht (kracht per volume). Er geldt:

$$\begin{aligned}
 j_x &= -\gamma_w \frac{\partial h}{\partial x} \\
 j_y &= -\gamma_w \frac{\partial h}{\partial y} \\
 j_z &= -\gamma_w \frac{\partial h}{\partial z}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

De stromingsdruk is vooral van belang voor de analyse van het lokale evenwicht in de grond. De gronddeeltjes kunnen lokaal instabiel worden als de snelheid te groot wordt. Van dit principe wordt bij fluïdisatie gebruik gemaakt.

Doorlatendheid

De doorlatendheid k van een laag granulair materiaal kan in een laboratorium worden gemeten. Bij een dergelijk proef wordt het debiet Q , als gevolg van een verschil in stijghoogte tussen de beide uiteinden, gemeten. Als het oppervlak van de buis waarin de grond zich bevindt A is, en de lengte van het grondmonster L , dan geldt er:

$$Q = kA \frac{h_1 - h_2}{L} \tag{12}$$

Door Q te meten, kan k bepaald worden. k is de doorlatendheidscoëfficiënt. Voor zand ligt deze waarde tussen de 10^{-6} m/s en de 10^{-3} m/s. De doorlatendheid is ongeveer evenredig met het kwadraat van de korreldiameter.

De doorlatendheid hangt ook af van de viscositeit van de doorstromende vloeistof. Voor een taai vloeistof is de weerstand tegen stroming groter. Dit is te zien aan de formule $k = \kappa \gamma_w / \mu$. Hierin is μ de dynamische viscositeit van de vloeistof. Hoe groter μ , hoe kleiner de doorlatendheid en hoe groter weerstand tegen stroming. De grootte κ (de intrinsieke doorlatendheid) hangt alleen af van de geometrie van het korrelskelet. Hiervoor wordt de formule van Kozeny-Carman gebruikt:

$$\kappa = cd^2 \frac{n^3}{(1-n)^2} \tag{13}$$

Hierin is d een maat voor de korreldiameter, n de porositeit en c een constante die afhangt van de warrigheid en de vorm van het stelsel van poriën. De waarde is ongeveer $1/180$. Het is makkelijker de k -waarde te meten met behulp van een doorlatendheidsproef dan deze met behulp van de voorgaande formules te berekenen. De formules zijn vooral van belang om de afhankelijkheid van de doorlatendheid van de porositeit en de korrelgrootte af te leiden.

(Grond)waterstroming

Met behulp van de wet van Darcy kan uit de drukverdeling of de verdeling van de stijghoogte, de stroming van het water worden afgeleid. In veel gevallen is de drukverdeling onbekend en moet deze voorspeld worden op basis van berekeningen. Hiervoor is de wet van Darcy alleen niet voldoende. Er moet nog een vergelijking in rekening worden gebracht: de continuïteitsvergelijking (behoud van massa van het water, (grond)waterbalans).

Er wordt hierbij aangenomen dat de grond isotroop is, en volledig verzadigd met een homogene vloeistof). Daarnaast wordt aangenomen dat de stroming onafhankelijk is van de tijd.

Stroming in een verticaal vlak

Waterstroming in een verticaal vlak met de coördinaten x en z , geeft als relevante componenten van de wet van Darcy:

$$\begin{aligned} q_x &= -k \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_z &= -k \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (14)$$

Behoud van massa vereist nu, dat er geen water bijkomt of verdwijnt uit een elementair blokje met afmetingen dx en dz . Dit betekent dat:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

Hierbij is verondersteld dat de dichtheid van de vloeistof constant is, zodat behoud van massa overeenkomt met behoud van volume. De voorgaande twee vergelijkingen leiden tot de volgende differentiaal vergelijking, waarbij extra gesteld wordt dat de doorlatendheid van de bodem constant is:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (16)$$

Dit is de vergelijking van Laplace, waarmee tezamen met de randvoorwaarden de stroming van het (grond)water beschreven wordt (bij een homogene en isotrope grond en een constante vloeistofdichtheid; daarnaast is aangenomen dat er geen berging kan optreden, d.w.z. dat de grond niet vervormt en volledig verzadigd is). Deze vergelijking moet opgelost worden om de waterstroming te kunnen beschrijven.

Opwaartse stroming

Een zeer eenvoudige oplossing is die voor een uniforme stroming in x -richting of in z -richting. Voor een stroming in z -richting (zoals bij fluïdisatie wordt toegepast) is die oplossing: $h = iz$, waarin i een constante is, die een maat is voor het specifieke debiet (volumestroomdichtheid). De grootte i ($= dh/dz$) wordt het verhang (of de gradiënt) genoemd. Er geldt bij een stroming in z -richting $q_x = 0$ en $q_z = -ki$. Als het specifieke debiet in verticale richting q_0 is, geldt $i = -q_0/k$. In het algemeen geldt $h = z + p/\gamma_w$, waardoor er voor de druk in het water geldt:

$$p = -\gamma_w z(1 - i) = -\gamma_w z \left(1 + \frac{q_0}{k} \right) \quad (17)$$

De eerste term is de hydrostatische druk, en de tweede term hangt samen met de verticale stroming.

In een laag waar water doorstroomt in verticale richting kunnen de korrelspanningen kleiner worden dan in het geval zonder waterstroming, omdat de waterspanningen groter zijn dan in het hydrostatische geval. Het is mogelijk dat de stijghoogte van het doorstromende water zo groot is dat de korrelspanningen nul worden (kleiner kunnen ze niet worden, omdat korrels niet aan elkaar kunnen trekken).

De situatie waar de korrelspanningen nul zijn is kritiek (en voor fluïdisatie van belang). Tussen de korrels worden dan geen krachten meer overgedragen. De grond heeft dan geen enkele weerstand meer; er is drijfzand ontstaan. De grootte van het verhang dh/dz waar dat bij optreedt, wordt het kritieke verhang genoemd.

Als het volumegewicht van de natte grond wordt aangegeven met γ_n , dan zijn de grondspanningen:

$$\sigma_{zz} = -\gamma_n Z \quad (18)$$

De waterspanningen (zie 17) zijn gelijk aan de grondspanningen als $i = i_{kr}$, met:

$$i_{kr} = -\frac{\gamma_n - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (19)$$

Een dergelijke negatieve gradiënt betekent, omdat de z -as positief is naar boven, dat de stijghoogte naar beneden toe toeneemt. De orde van grootte van het kritieke verhang is in absolute waarde gelijk aan 1 omdat γ_n meestal ongeveer twee keer zo groot is als γ_w .

In de kritieke toestand is de verticale snelheid zo groot, dat de opwaartse wrijvingskracht op de korrels er toe leidt dat ze geen contact meer met elkaar hebben en geen samenhang meer vertonen. Er is een gefluïdiseerde massa ontstaan.

Het kritieke verhang kan ook bepaald worden met behulp van het begrip stromingsdruk. Hierbij worden de krachten zoals die op het korrelskelet worden uitgeoefend beschouwd. Dit zijn als eerste de krachten door het eigen gewicht. Deze komen erop neer dat de korrelspanningen lineair met de diepte toenemen, met een vermenigvuldigingsfactor $\gamma_n - \gamma_w$ (volumegewicht van de korrels onder water):

$$\sigma'_{zz} = -(\gamma_n - \gamma_w)Z \quad (20)$$

De stromingsdruk is (zie 11) in absolute zin, $j = \gamma_w i$. De twee volumekrachten kunnen elkaar opheffen als de waarden gelijk en tegengesteld zijn, dus als $i = i_{kr}$, met

$$|i_{kr}| = \frac{\gamma_n - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (21)$$

Dit komt overeen met de waarde gevonden in 19.

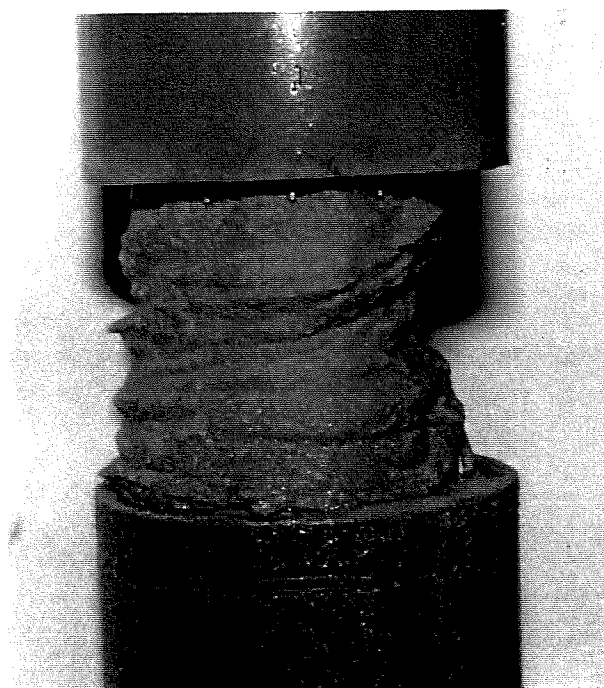
Slotoverweging

Door water met een bepaalde snelheid in een laag granulair materiaal te injecteren, kan het kritische verhang opgewekt worden. Op het moment dat het kritische verhang optreedt verliezen de deeltjes hun onderlinge samenhang. Er kunnen geen schuifspanningen meer worden overgedragen tussen de zandkorrels. Er is een gefluïdiseerde massa ontstaan. De dichtheid van het gefluïdiseerde korrelmateriaal tijdens het ontstaan van het kritische verhang, is gelijk aan de natte dichtheid van de bodem. Door de snelheid van het doorstromende injectiewater te laten toenemen, neemt deze dichtheid af.

Het verkitten van zand

Een alternatieve methode voor erosiebestrijding

Literatuuronderzoek



A.A. Schouten
Delft, juli 1999

St.nr.
747307



Het verkitten van zand

Een alternatieve methode voor erosiebestrijding

Literatuuronderzoek

**A.A. Schouten
Delft, juli 1999
St.nr. 747304**

Afstudeercommissie

Prof. Ir. K. d'Angremond, TU Delft

Ir. W.H. Tutuarima, TU Delft

Dr. ir. P.J Visser, TU Delft

Ir. W. Op den Velde, Van Oord ACZ

Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van de laatste fase van mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit in Delft. In samenwerking met Van Oord ACZ is gekozen voor het onderwerp 'het verkitten van zand, een nieuwe methode voor erosiebestrijding'. Het onderzoek bestaat uit twee delen: een literatuuronderzoek en een experimenteel onderzoek. Dit rapport bevat het literatuuronderzoek.

Als eerste wil ik de leden van mijn afstudeercommissie bedanken: prof. ir. K. d'Angremond, ir. W.H. Tutuarima, dr. ir. P.J. Visser en ir. W. Op den Velde. De heren Tutuarima en Op den Velde wil ik in het bijzonder bedanken voor hun bijdragen en adviezen gedurende het gehele onderzoek. Daarnaast wil ik ing. L.J. van Elsen bedanken voor het bedenken van de alternatieve methode voor erosiebestrijding en voor zijn begeleiding in de beginperiode van het onderzoek.

Ik wil de heer Groen van CEBO Holland en de heer Collignon van Grondmechanica Rhooen bedanken voor het beantwoorden van al mijn vragen over cement en bentoniet.

Tot slot wil ik iedereen bedanken die mij tijdens mijn experimenten geholpen heeft: vrienden, medewerkers van het laboratorium voor Vloeistofmechanica en medewerkers van het triaxiaal laboratorium van Grondmechanica Delft. Natuurlijk ook dank voor degenen die mijn teksten hebben doorgelezen.

Delft, juli 1999

Annemagreet Schouten

Samenvatting

Een offshore pijpleiding die op de bodem van de zee gelegd wordt, is vaak onderhevig aan uitwendige krachten die de constructie kunnen beschadigen. Om zo'n pijpleiding te beschermen tegen deze krachten, kan de leiding worden ingegraven. In zand kan de ingraving gerealiseerd worden door de bodem rondom de leiding te fluïdiseren, waarna de leiding in het zand-watermengsel wegzinkt onder invloed van zijn eigen gewicht. Na dit proces bezinkt het gefluïdiseerde zand en wordt de pijpleiding bedekt door een beschermende zandlaag. Onder bepaalde condities kunnen delen van de pijpleiding echter weer vrij aan het bodemoppervlak komen te liggen. Om dit te voorkomen wordt in veel gevallen plaatselijk een extra bodembescherming op de deklaag boven de pijpleiding aangebracht; meestal in de vorm van een steenbestorting of met erosiebestendige matten. Deze extra bodembescherming dient om de stabiliteit van de deklaag te waarborgen.

Daar de extra beschermingsconstructies kostbaar zijn, is er voortdurend gezocht naar goedkopere alternatieven. Een mogelijk alternatief berust op het vergroten van de erosiebestendigheid van de zandlaag op de pijpleiding, door in het gefluïdiseerde zand een bindend additief te injecteren. Hierdoor zal na het fluïdisatieproces de weerstand van de beschermende laag tegen erosie (of andere mechanische belastingen) toegenomen zijn. Dit alternatief gaat ervan uit, dat tussen het gefluïdiseerde zand een goede verspreiding van het additief mogelijk is.

Dit afstudeerverslag richt zich op het onderzoek naar de mogelijkheden van deze alternatieve erosiebescherming, waarbij met behulp van fluïdisatietechnieken een bindend additief in een zandbodem wordt verspreid. Hiertoe is literatuuronderzoek en experimenteel onderzoek verricht.

Tijdens het literatuuronderzoek is aandacht besteed aan grouten en groutmaterialen. Dit is gedaan, omdat bij grouten ook een additief aan de bodem wordt toegevoegd met het doel de eigenschappen van deze bodem te verbeteren. Bij grouten wordt een additief in de poriën van de plaatsvastе deeltjes van het in situ bodemmateriaal geïnjecteerd, terwijl bij dit onderzoek een geschikte methode wordt gezocht om een additief tussen de beweeglijke deeltjes van het gesuspendeerde materiaal te injecteren. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van cement-bentonietsuspensies als additief voor een zandbodem. Bij grouten zou een dergelijke suspensie niet toegepast kunnen worden, omdat de cementdeeltjes zouden worden uitgefilterd ten gevolge van de (beperkte) poriëngrootte van het in situ bodemmateriaal. Om een zandbodem met behulp van grouten te verstevigen, moet gebruik gemaakt worden van duurder additieven, zoals ultrafijne cement-bentonietsuspensies, of oplossingen van sodium-silicaat in water (silicagels).

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een cement-bentonietsuspensie om de eigenschappen van een zandbodem te verbeteren. Deze suspensies zijn goedkoper dan andere additieven en milieu-neutraal. Hoe lager de gebruikte water/cement-factor, hoe meer cement het additief per eenheid bevat, hoe duurder het additief zal zijn.

Tijdens het experimentele onderzoek is met name aandacht besteed aan de verspreiding van cement-bentonietsuspensies tussen het gesuspendeerde zand en de invloed van deze verspreiding op de eigenschappen van het eindproduct, het verkitten van zand. Daarnaast is de invloed van de samenstelling van de cement-bentonietsuspensie op de eigenschappen van het verkitten van zand bekeken.

Tijdens de experimenten is gebruik gemaakt van een roerder om het zand in suspensie te brengen. Dit was in opzet veel eenvoudiger te bewerkstelligen dan het fluïdiseren. Er is voorhands aangenomen dat het roeren geen ernstige afbreuk aan de resultaten van het onderzoek heeft gedaan.

In eerste instantie zijn in een perspex cilinder oriënterende roerproeven uitgevoerd. De cilinder ($d = 0,21$ m, $h = 0,5$ m) was gevuld met 5,4 kg zand en 10 liter zeewater. Tijdens deze proeven is bepaald dat het mogelijk is om door middel van roeren het zand in suspensie te brengen tot dichtheden die overeen komen met dichtheden die met behulp van fluïdisatietechnieken bereikt worden.

Vervolgens zijn er oriënterende injectieproeven uitgevoerd. Hierbij zijn verschillende cement-bentonietsuspensies (met een variërende water/cement-factor en een variërende bentonietgehalte) aangemaakt en geïnjecteerd in zeewater en tussen gesuspendeerd zand ($d_{50} = 165 \mu\text{m}$).

Tijdens de proeven bleek een groot aantal additiefsamenstellingen te viskeus om verwerkt te worden. De (Marsh-)viscositeit van deze additieven was groter dan de gestelde eis (60 s/l). Deze samenstellingen zijn niet gebruikt als additief. Daarnaast bleek de injectiedruk bepalend voor de vorm waarin het additief zich verspreidt. Als het additief met een lage druk geïnjecteerd wordt, zal het als een (slangvormige) eenheid bij elkaar blijven. Doordat het gesuspendeerde zand bezinkt, moet het additief echter snel geïnjecteerd worden. Voor deze snelle injectie is een redelijk grote druk nodig. Hierdoor gaat de samenhang van het additief verloren en zal het additief zich als een wolk tussen het gesuspendeerde bodemmateriaal verspreiden. Deze wolk van cement en bentoniet bezinkt niet als een mengsel met een bepaalde dichtheid, maar als afzonderlijke deeltjes (vlokken). Deze deeltjes zijn lichter dan de zandkorrels, waardoor ze langzamer dan deze korrels bezinken.

Wanneer de juiste injectietechniek wordt toegepast, verspreidt het additief zich redelijk homogeen door het zand en zal het verkitte zand homogene eigenschappen vertonen. Het additief verdunt ten gevolge van de injectiedruk, waardoor de water/cement-factor toeneemt. Desondanks is het mogelijk om een erosiebestendige zandlaag te creëren.

In PVC cilinders, met dezelfde afmetingen als de perspex cilinders, zijn monsters aangemaakt. Hierbij zijn verschillende additiefsamenstellingen geïnjecteerd tussen het gesuspendeerde zand. Na een uithardtijd van minimaal 8 dagen zijn de druksterkte en de erosiebestendigheid van het verkitte zand bepaald. De erosiebestendigheid werd bepaald in het erosietoestel van GeoDelft. In dit toestel wordt water rond een cilindrisch monster ($d = 6,6$ mm) bewogen door een roterende met schoepen bezette cilinder. Erosiebestendig houdt in dit onderzoek in, dat een aangemaakt monster geen gewichtsafname tijdens de erosieproef vertoont, nadat het monster steeds gedurende $2\frac{1}{2}$ uur wordt belast door stroomsnelheden van achtereenvolgens 0,5, 1,0 en 1,5 m/s.

In dit onderzoek is een eerste aanzet gegeven om te bepalen of een alternatieve methode voor erosiebestrijding toepasbare mogelijkheden heeft. Er kan geconcludeerd worden dat de alternatieve methode van erosiebestrijding perspectieven biedt, maar er zal nog nader onderzoek verricht moeten worden voordat de methode in praktijk gebracht kan worden. Dit onderzoek zal moeten beginnen met een diepgaander inzicht te verkrijgen voor de simulatie van de situatie op zee. Daarnaast zal de modellering van een fluïdisatie-apparaat waarmee het additief geïnjecteerd kan worden veel meer in detail moeten worden uitgezocht.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	iii
Samenvatting van gehele onderzoek.....	v
1. Inleiding.....	1-1
1.1. Achtergrond	1-1
1.2. Probleemstelling	1-2
1.3. Doelstellingen	1-2
1.4. Randvoorwaarden	1-3
1.5. Uitgangspunten	1-3
1.6. Aanpak en indeling	1-4
2. Het fluïdisatieproces.....	2-1
2.1. Inleiding	2-1
2.2. Ingraven met behulp van het fluïdisatieproces	2-1
2.2.1. Fluïdisatie-apparaat.....	2-1
2.2.2. Toepassing in dit onderzoek	2-2
2.3. Uitgangspunten voor dit onderzoek	2-3
2.3.1. Zeebodem.....	2-3
2.3.2. Principe van fluïdisatie	2-5
2.3.3. Wolk van geïnduseerd materiaal.....	2-7
3. Grondinjecties en grouten	3-1
3.1. Inleiding	3-1
3.1.1. Algemeen	3-1
3.1.2. Definitie	3-1
3.2. Geschiedenis	3-1
3.3. Omgeving.....	3-3
3.4. Grouttechnieken	3-3
3.4.1. Algemeen	3-3
3.4.2. Overzicht.....	3-3
3.4.3. Verdringingsgrouten	3-5
3.4.4. Straalgrouten.....	3-7
3.5. Groutmateriaal	3-9
3.5.1. Algemeen	3-9
3.5.2. Overzicht.....	3-9
3.5.3. Groutsamenstellingen en criteria voor een eerste selectie.....	3-10
3.5.4. Enkele belangrijke grouteigenschappen	3-12
4. Toepassing van cement en bentoniet, de belangrijkste eigenschappen.....	4-1
4.1. Inleiding	4-1
4.2. Cement	4-2
4.2.1. Algemeen	4-2
4.2.2. Cementsoorten	4-2
4.2.3. Hydratatie van cement	4-3
4.2.4. Invloedsfactoren	4-4
4.2.5. Conclusies wat betreft de cementsoort	4-6
4.2.6. Functie van cement	4-7
4.3. Bentoniet.....	4-7
4.3.1. Algemeen	4-7
4.3.2. Soorten bentoniet.....	4-7
4.3.3. Eigenschappen van bentoniet	4-8
4.3.4. Functie van bentoniet.....	4-8
4.4. Zeewater.....	4-9
4.4.1. Algemeen	4-9

4.4.2.	Samenstelling van zeewater.....	4-9
4.4.3.	Cement en zeewater	4-10
4.4.4.	Bentoniet en zeewater	4-10
4.4.5.	Functie	4-10
4.5.	Cement-bentonietsuspensies	4-11
4.5.1.	Algemeen	4-11
4.5.2.	De combinatie van cement en bentoniet	4-11
4.5.3.	Eigenschappen cementsuspensies met toevoeging van bentoniet	4-12
4.5.4.	Cement-bentonietsuspensies en zeewater	4-23
4.5.5.	Veel gebruikte mengselsamenstellingen	4-23
4.5.6.	Mogelijke opties voor de bentoniet	4-24
4.6.	Hulpstoffen.....	4-25
4.6.1.	Algemeen	4-25
4.6.2.	Plastificeerders.....	4-25
4.6.3.	Versnellers en vertragers	4-25
4.6.4.	Recente ontwikkelingen.....	4-26
4.6.5.	Hulpstoffen tegen uitspoeling	4-26
4.7.	Samenvatting van belangrijkste eigenschappen	4-27
4.7.1.	Algemeen	4-27
4.7.2.	Cement.....	4-27
4.7.3.	Bentoniet.....	4-28
4.7.4.	Suspensie aanmaken met zeewater	4-28
4.7.5.	Cement-Bentoniet	4-28
4.7.6.	Hulpstoffen	4-29
4.7.7.	Additief aanbrengen in een omgeving met water	4-29
4.7.8.	Cement-bentonietsuspensies injecteren tussen het gesuspendeerde bodemmateriaal	4-29
4.7.9.	Invloed W/C-factor en bentonietgehalte van cement-bentonietsuspensies	4-30
4.7.10.	Gewenste materiaaleigenschappen	4-31
4.7.11.	Kort samengevat	4-32

Bijlage 1: Gebruikte literatuur

Bijlage 2: Terminologielijst

1. Inleiding

1.1. Achtergrond

Een offshore pijpleiding die op de bodem van de zee gelegd wordt, is vaak onderhevig aan uitwendige krachten die de constructie kunnen beschadigen. Bij een normale ontwerpmethodiek wordt ernaar gestreefd de pijpleiding te beschermen tegen deze krachten van buitenaf. Hierbij is de stabiliteit van de pijpleiding een belangrijk aspect. Indien een pijpleiding op de bodem ligt, is deze onderhevig aan hydrodynamische krachten, die in balans moeten worden gehouden door de wrijving van de zeebodem en door het eigen gewicht van de pijpleiding. Wanneer dit evenwicht niet mogelijk is, is er sprake van een instabiele pijpleiding. Een pijpleiding die geheel of gedeeltelijk in de bodem begraven is, ligt buiten het bereik van hydrodynamische belastingen en is dus stabielere dan een pijpleiding die op de bodem ligt. Bovendien ligt een ingegraven leiding buiten het bereik van bijvoorbeeld vallende en krabbende ankers en sleepnetten. Het is dus vaak gewenst de pijpleiding te beschermen door deze leiding in te graven. Vervolgens moet gezorgd worden dat de leiding op de ingegraven positie blijft liggen.

De ingraving wordt vaak gerealiseerd door de pijpleiding in een van tevoren gebaggerde geul te plaatsen. Deze geul wordt gegraven met behulp van baggermateriaal. Het is ook mogelijk dat de leiding pas nadat deze op de zeebodem is gelegd, wordt ingegraven. Dit wordt trenchen genoemd. Deze methode wordt vooral bij flexibele pijpleidingen toegepast. Het apparaat dat hiervoor gebruikt wordt, heet een trencher. In klei en harde grondsoorten gebeurt het trenchen vooral met behulp van mechanische graafmethoden. De aangewezen manier om een flexibele pijpleiding in zand te trenchen is met behulp van hydraulische methodieken. Dit is snel en veilig. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een fluïdisatieproces, met behulp van waterstralen.

Bij het fluïdisatieproces wordt de flexibele pijpleiding ingegraven door het bodemmateriaal onder de pijpleiding in suspensie te brengen door het injecteren van water. In het aldus ontstane gefluïdiseerde zand kan de pijpleiding wegzakken. Dit zand kan als een dikke vloeistof worden beschouwd, die een bepaalde dichtheid heeft. De pijpleiding zinkt onder zijn eigen gewicht door het gesuspendeerde materiaal naar de bodem van het gefluïdiseerde gebied (de geul of trench genoemd).

Het zand dat met behulp van fluïdisatietechnieken in suspensie is gebracht, wordt niet weggebaggerd. Nadat het injecteren van water is gestopt, verliest het gesuspendeerde materiaal de specifieke eigenschap van een dikke vloeistof. Het zand sedimenteert in de geul, rondom de leiding. Hoewel de bodem niet direct haar oorspronkelijke dichtheid terugkrijgt, blijft de pijp op de ingebedde diepte achter. In zand ontstaat in het algemeen een goede deklaag en zullen op den duur weinig gevolgen meer te zien zijn van het fluïdisatieproces dat heeft plaatsgevonden.

Het feit dat de pijpleiding is ingegraven en bedekt met een zandlaag, betekent niet dat de leiding voor altijd op deze ingegraven positie blijft liggen. Onder bepaalde condities (stroming, golven, trillingen of uitzettingen in de pijpleiding, zandgolven etc.) kunnen delen van de pijpleiding weer vrij aan het bodemoppervlak komen te liggen. In dat geval is de kans op instabiliteit van de pijpleiding weer groter. Een instabiele zeebodem verhoogt de kans op een instabiele pijpleiding.

Om dit te voorkomen wordt in veel gevallen plaatselijk een extra bodembescherming op de deklaag boven de pijpleiding aangebracht; meestal in de vorm van een steenbestorting of erosiebestendige matten. Deze extra bodembescherming dient om de stabiliteit van de deklaag te waarborgen. Het eroderen en verweken van de deklaag wordt tegengegaan door het mobiele zand op zijn plaats te houden.

Daar deze beschermingsconstructies kostbaar zijn (vooral op diep water zijn het storten van stenen en het plaatsen van matten kostbare exercities), is er voortdurend gezocht naar goedkopere alternatieven. Ook Van Oord ACZ is hiermee bezig geweest. De hoofdgedachte hierbij is, dat indien de zeebodem gestabiliseerd is, de pijpleiding dit ook is. Daarnaast moet de alternatieve bescherming aansluiten op de beschikbare expertise, het beschikbare materieel en de beschikbare methodieken bij Van Oord ACZ.

Aan de hand hiervan is het idee ontstaan om de erosiebestendigheid van de deklaag te verhogen door een bindend additief tussen de zandkorrels te injecteren. Hiertoe kan gebruik gemaakt worden van de trencher en het fluïdisatieproces. Door dit additief te injecteren, terwijl het bodemmateriaal zich in suspensie bevindt, is een goede verspreiding van het additief tussen de korrels mogelijk. De permeabiliteit van het gesuspendeerde materiaal is groter dan wanneer de korrels zich 'gewoon' op de bodem zouden bevinden en geeft daardoor geen beperkingen voor de verspreiding van het additief. Het is de bedoeling dat er een homogeen en samenhangend mengsel van bodemmateriaal en additief gevormd wordt, dat zich rondom de pijpleiding afzet. Na het fluïdisatieproces zal de weerstand van de deklaag tegen erosie (of andere mechanische belastingen) verbeterd zijn.

Als de methode zinvol blijkt voor het verbeteren van de erosiebestendigheid van de zandlaag, kan gekeken worden naar een groter toepassingsgebied. Mogelijke andere toepassingen betreffen het vastleggen van een zandbodem rondom een paal of pijler in stromend water, het stabiliseren van steile taluds, het vormen van een stevige fundering onder een offshore platform en het isoleren van een pijpleiding die warme vloeistoffen vervoert tegen afkoeling, door het beperken van de permeabiliteit van een beschermingsconstructie.

1.2. Probleemstelling

In hoeverre is het mogelijk om (rondom een afgezonken pijpleiding) met behulp van fluïdisatietechnieken een bindend additief in een zandbodem te verspreiden waardoor deze zodanig verkit, dat een afdoende erosiebestendige deklaag boven de leiding wordt verkregen en de (thans nog gebruikelijke) bestorting van steen (of erosiebestendige matten) kan vervallen?

1.3. Doelstellingen

Dit afstudeerproject richt zich op een onderzoek naar de mogelijkheden van een alternatieve erosiebescherming met behulp van fluïdisatietechnieken (zoals bijvoorbeeld met behulp van een trencher). Dit zal gebeuren aan de hand van een literatuuronderzoek en een experimenteel onderzoek.

Het hoofddoel is:

Meer inzicht verkrijgen in de mogelijkheden van een nieuwe methode om de erosiebestendigheid van een zandbodem te verbeteren. Bij deze nieuwe methode wordt met behulp van fluïdisatietechnieken een bindend additief tussen het korrelmateriaal verspreid, dat zorgt voor het verkitten van de bodem.

De subdoelen zijn te onderscheiden in:

- Geschikte stoffen vinden die:
 1. tussen het gefluïdiseerd bodemmateriaal geïnjecteerd kunnen worden en vervolgens mengen met het korrelmateriaal;
 2. de zeebodem zodanig verkitten, dat deze bestand is tegen optredende belastingen.
- Inzicht krijgen in de problemen die kunnen optreden bij het aanbrengen van een bindend additief tussen gefluïdiseerd bodemmateriaal en de invloedsfactoren die hierbij van belang zijn.
- Een uitspraak doen over de te bereiken erosieweerstand van de verkitte bodem.

1.4. Randvoorwaarden

De beoogde erosiebestendigheid van een zandbodem zal verbeterd moeten worden door gebruik te maken van fluïdisatietechnieken en een trencher. Het additief moet met behulp van de trencher tussen het bodemmateriaal geïnjecteerd kunnen worden en vervolgens met het bodemmateriaal gemengd kunnen worden.

Daar offshore pijpleidingen in zee liggen, moet het additief bestand zijn tegen de fysische eigenschappen van het zeewater.

Het toevoegen van een bindend additief aan het bodemmateriaal mag geen nadelige invloeden op het milieu en de omgeving hebben.

Naast erosiebestendigheid, is het ook gewenst dat de verstevigde deklaag enige sterkte heeft, in verband met mechanische belastingen ten gevolge van vallende ankers.

1.5. Uitgangspunten

Gedurende de rest van dit onderzoek wordt geen rekening gehouden met de aanwezigheid van de pijpleiding in de bodem (eventuele trillingen in de pijpleiding of temperatuurschommelingen ten gevolge van de stof die door de leiding stroomt zijn dus niet van belang). Het gaat om het verbeteren van de erosiebestendigheid van de deklaag van zand. De afmetingen en eigenschappen van de pijpleiding vereisen een bepaalde ingraafdiepte en daardoor een bepaalde grootte van het gebied dat wordt gefluïdiseerd. De eigenschappen van de trencher bepalen uiteindelijk hoe groot het gebied kan zijn dat in suspensie wordt gebracht.

Naar verwachting lijkt een trencher, zoals deze op dit moment wordt gebruikt, niet geschikt voor het verspreiden van een bindend additief in de bodem. Het wegsputten van zand met behulp van de waterstralen uit een trencher is namelijk een turbulent proces, waardoor ongewenste verliezen kunnen optreden. Er zullen waarschijnlijk aanpassingen nodig zijn, waardoor het injecteren een controleerbaar proces wordt. Hoe deze aanpassingen eruit zullen zien, moet nog bepaald worden. In dit onderzoek wordt er in eerste instantie van uitgegaan dat deze aanpassingen mogelijk zijn en dat een trencher gebruikt kan worden voor het gecontroleerd injecteren van een bindend additief. De verliezen ten gevolge van turbulentie zullen dan minimaal zijn.

Ondanks het feit dat wordt aangenomen dat het injecteren gecontroleerd kan plaatsvinden, zal het aanbrengen van een bindend additief in de bodem met behulp van het fluïdisatieproces nog nader te bevestigen problemen geven. Uit het onderzoek zal moeten blijken in hoeverre deze problemen opgelost kunnen worden.

Bij dit onderzoek wordt ervan uitgegaan dat de permeabiliteit van het bodemmateriaal op het moment dat het bindende additief wordt geïnjecteerd, geen beperkingen oplegt ten aanzien van de stromingseigenschappen (het reologische gedrag) van het te gebruiken additief. Het additief verspreidt zich zonder problemen door het gehele gefluïdiseerde gebied. De benodigde injectiedruk en injectiesnelheid om dit te bereiken zijn (in eerste instantie) niet van belang.

De bodemeigenschappen tijdens de injectie van het bindende additief zijn voornamelijk afhankelijk van de korrelverdeling, de korrelgrootte en de korrelvorm van het gefluïdiseerde zand. Voor zover de bodemeigenschappen invloed hebben op de eindsterkte van de verkitten bodem wordt aangenomen dat dit voornamelijk bepaald wordt door deze korreleigenschappen. Er is aangenomen dat de andere eigenschappen van de originele zandbodem (o.a. de dichtheid, de sterkte en de hoek van inwendige wrijving) niet meer van

toepassing zijn, nadat het zand geïnduseerd is geweest. Hoe deze eigenschappen zich in de loop der tijd zullen ontwikkelen is afhankelijk van de genoemde korreleigenschappen en de belastingen.

Na het aanbrengen van het bindende additief tussen het bodemzand is het gewenst dat het mengsel van additief en korrelmateriaal een zekere mate van homogeniteit heeft. Bij het fluïdiseren van de bodem en het verspreiden van het additief tussen het bodemmateriaal, moet er gestreefd worden naar minimaal verlies van additief en bodemmateriaal.

Aangezien pijpleidingen over de hele wereld, over de gehele zeebodem worden gelegd variëren de aanwezige omgevingscondities (golven, stroming, waterdiepte, bodemligging, bodemeigenschappen, morfologische omstandigheden enz.) per locatie. Uiteindelijk moet de alternatieve methode voor erosiebestrijding breed toepasbaar zijn. In het onderzoek wordt uitgegaan van een horizontale zandbodem in diep water die belast wordt door stroming. De geotechnische eigenschappen van de bodem (zoals de dichtheid, de sterkte en de korrelverdeling) zijn constant verondersteld. Er treedt geen noemenswaardig sedimenttransport op gedurende de uithardtijd van het additief.

De fysische eigenschappen van het zeewater zijn gedurende dit onderzoek constant verondersteld.

Het effect van het bindende additief in de bodem moet qua erosiebestendigheid de stenen deklaag of de erosiebestendige matten kunnen vervangen. De economische levensduur van de verkitte bodemverstevinging moet vergelijkbaar zijn met de economische levensduur van de conventionele bodembeschermingen. Dit onderzoek richt zich in eerste instantie op de technische haalbaarheid van de alternatieve methode voor erosiebestrijding. Pas als het technische haalbaar blijkt, kan gekeken worden naar de economische haalbaarheid.

Er wordt aangenomen dat wanneer de alternatieve methode voor erosiebestrijding in zeewater haalbaar is, er voor de toepassing in zoet water nauwelijks aanpassingen nodig zijn.

Als de methode zinvol blijkt voor het verbeteren van de erosiebestendigheid van een zandlaag die door stroming belast wordt, kan gekeken worden naar het gedrag van een zandlaag onder andere belastingomstandigheden, zoals een combinatie van stroming en golven. Daarnaast kan gekeken worden naar andere toepassingsgebieden voor het injecteren van een bindend additief met behulp van fluïdisatietechnieken.

1.6. Aanpak en indeling

Het onderzoek bestaat uit twee delen: een literatuuronderzoek en een experimenteel onderzoek. Het uitgebreide literatuuronderzoek is in dit rapport opgenomen, dat gezien moet worden als naslagwerk. De belangrijkste feiten uit dit literatuuronderzoek zijn ook in het eindverslag opgenomen.

Het literatuurverslag is als volgt ingedeeld:

Na de inleiding van hoofdstuk 1, is in hoofdstuk 2 het fluïdisatieproces bekeken.

Vervolgens is er in hoofdstuk 3 aandacht besteed aan grouten en de daarbij gebruikte materialen. De reden hiervoor is dat in dit onderzoek net als bij grouten een additief aan de bodem wordt toegevoegd met het doel de eigenschappen van deze bodem te verbeteren. Aan de hand van de bestaande groutmaterialen komen cement-bentonietsuspensies naar voren als het meest geschikte materiaal voor het additief in dit onderzoek. De samenstelling en eigenschappen van cement-bentonietsuspensies komen in hoofdstuk 4 uitgebreid aan bod. Aangezien dit laatste hoofdstuk redelijk uitgebreid is, wordt het aan het eind kort samengevat.

In het eindverslag zullen in elk hoofdstuk puntsgewijs de aspecten passeren die van belang zijn. Deze punten zijn per hoofdstuk genummerd zodat er op elk moment naar verwezen kan worden.

Het eindverslag van het onderzoek is als volgt ingedeeld:

Na de inleiding in hoofdstuk 1, zijn in hoofdstuk 2 en 3 de belangrijkste feiten uit het literatuuronderzoek samengevat in randvoorwaarden en uitgangspunten voor respectievelijk fluïdisatie en additief.

Wanneer een additief wordt geïnjecteerd tussen gefluïdiseerd bodemmateriaal, zijn andere factoren van belang dan bij injectieprocedures in 'normaal, in situ' bodemmateriaal. Aangezien op deze manier nog nooit een additief aan een bodem is toegevoegd, kan hier niets met zekerheid over gezegd worden. Hoofdstuk 4 bevat de verwachtingen van een dergelijke injectie. Uit de experimenten zal blijken in hoeverre deze verwachtingen juist zijn.

De hoofdstukken 5 en 6 hebben betrekking op de voorbereiding van de experimenten. Als eerste wordt in hoofdstuk 5 besproken welke eigenschappen van het additief, het gefluïdiseerde zand, de injectie en het eindproduct (de gemodelleerde verstevigde bodem) tijdens de experimenten bepaald moeten worden. Tevens zijn de mogelijke variabelen in het proces van fluïdisatie en injectie van een additief, op een rijtje gezet. In hoofdstuk 6 wordt uitleg gegeven over de technische opzet van de experimenten.

Hoofdstuk 7 tot en met 11 bevatten de uitvoering van het proevenprogramma en de resultaten van de experimenten. Er zijn verschillende additiefsamenstellingen geïnjecteerd tussen gesuspendeerd zand. Na een bepaalde uithardtijd zijn de eigenschappen van deze monsters bekeken en onderling vergeleken.

In hoofdstuk 12 volgen de conclusies van het onderzoek en zullen aan de hand van de resultaten aanbevelingen gedaan worden voor verder detailonderzoek en implementatie.

Bijlage 1 bevat de gebruikte literatuur.

Bijlage 2 bevat een terminologielijst, waarin onbekende begrippen uit de tekst kunnen worden opgezocht.

2. Het fluïdisatieproces

2.1. Inleiding

Pijpleidingen worden ingegraven om schade aan de leiding te voorkomen. Deze schade kan ontstaan door hydrodynamische en mechanische belastingen.

Voor het ingraven van pijpleidingen in het originele bodemmateriaal bestaan verschillende methodes:

- Baggeren
- Ploegen
- Jetten
- Fluïdiseren

Baggeren en ploegen zijn mechanische ingraafmethodes, die vooral in klei en harde grondsoorten gebruikt worden. Voor dit onderzoek zijn deze apparaten verder niet van belang.

Jetten en fluïdiseren zijn hydraulische methodes, waarbij door het injecteren van water de bodem in suspensie wordt gebracht en de pijpleiding daar vervolgens in wegzakt. De bodem in dit onderzoek bestaat uit zand en de aangewezen manier om een pijpleiding in zand in te gaven is met behulp van één van deze technieken.

Wanneer de zandbodem met behulp van jetten in suspensie wordt gebracht, wordt het gesuspendeerde materiaal met behulp van baggerpompen verwijderd. De pijpleiding wordt vervolgens met zand bedekt, doordat de wanden van de gegraven geul instabiel zijn en instorten.

Voor dit onderzoek is het van belang dat het gesuspendeerde materiaal niet wordt weggepompt, maar dat het zich afzet op de pijpleiding. De wanden van de gegraven geul moeten stabiel blijven. Het doel van dit onderzoek is het verbeteren van de eigenschappen van de deklaag op een pijpleiding, door met behulp van fluïdisatietechnieken, een bindend additief aan de zandbodem toe te voegen. Het injecteren van het bindend additief tussen het gesuspendeerde bodemmateriaal heeft weinig effect, als de pijpleiding niet wordt bedekt door hetzelfde bodemmateriaal. Door gebruik te maken van fluïdisatietechnieken is dit mogelijk.

In paragraaf 2.2 wordt het ingraven met behulp van het fluïdisatieproces besproken, waarbij eerst aandacht wordt besteed aan het fluïdisatie-apparaat en vervolgens aan de toepassing voor dit onderzoek. In paragraaf 2.3 komen de uitgangspunten voor dit onderzoek aan bod. Deze hebben betrekking op de zeebodem, het principe van fluïdisatie en de wolk van gefluïdiseerd materiaal.

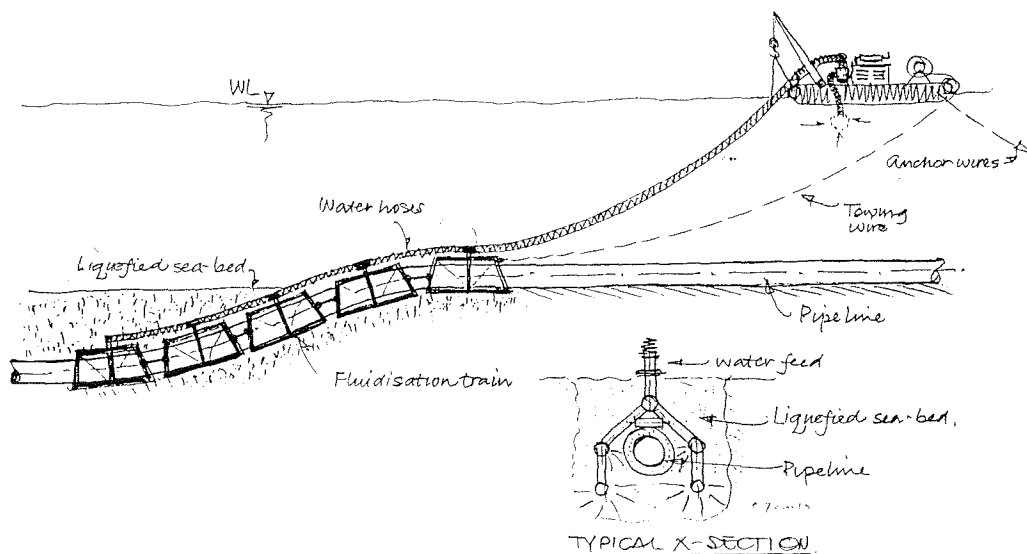
2.2. Ingraven met behulp van het fluïdisatieproces

2.2.1. Fluïdisatie-apparaat

Bij het fluïdisatie proces wordt een flexibele pijpleiding, die reeds op de zeebodem ligt, ingegraven door de zandbodem onder de pijpleiding te fluïdiseren door het injecteren van water (zie figuur 2.1).

Onder lage druk (3-5 bar) komen waterstralen uit gaten in het fluïdisatie-apparaat, aan beide zijden van de pijpleiding. Deze stralen verbreken het contact tussen de individuele korrels en veranderen de bodem in een dikke vloeistof (voor het principe van fluïdisatie wordt verwezen naar paragraaf 2.3.2). Deze dikke vloeistof heeft een bepaalde soortelijke massa. Deze soortelijke massa is afhankelijk van de hoeveelheid water die per vierkante meter per seconde wordt geïnjecteerd en de verdeling van de korreldiameter van het zand.

Als het specifieke gewicht van de pijpleiding groter is dan het specifieke gewicht van de dikke vloeistof, kan de pijpleiding wegzakken in de geul van gefluïdiseerd materiaal. De overdruk in de gefluïdiseerde geul zorgt ervoor dat deze open blijft terwijl de pijpleiding onder zijn eigen gewicht door het gesuspendeerde materiaal heen naar de bodem van het gefluïdiseerde gebied zinkt.



Figuur 2.1: Fluïdisatie-apparaat

Een fluïdisatie-apparaat bestaat in het algemeen uit een aantal leidingen met waterjets, in een omgekeerde U-vorm (zie figuur 2.1), die om de pijpleiding worden geplaatst. De lengte van het gehele systeem (en dus de lengte van het gefluïdiseerde gebied) wordt bepaald door gewenste ingraafdiepte en de minimaal toegestane S-bocht, die de leiding tijdens het zakken mag ondergaan. Dit is van belang in verband met de maximale spanningen en vervormingen, die in de leiding zijn toegestaan. De straalgaten zijn in het algemeen aan de voorzijde en langs de onderzijde van het frame geplaatst.

Als de pijpleiding de gewenste diepte heeft bereikt, wordt het injecteren gestopt (het gehele fluïdisatie-apparaat is dan dus gepasseerd). De gefluïdiseerde bodem verliest haar specifieke eigenschap van dikke vloeistof. Het zand zal bezinken en de pijpleiding bedekken. Hoewel de bodem niet direct haar oorspronkelijke stevigheid terugkrijgt, blijft de pijp op de ingebedde diepte achter. De praktijk heeft uitgewezen dat slechts weinig zand uit de geul wordt weggespoeld.

2.2.2. Toepassing in dit onderzoek

In dit onderzoek is aangenomen, dat een bindende stof geïnjecteerd kan worden nadat het bodemmateriaal in suspensie is gebracht. Er wordt vanuit gegaan dat de permeabiliteit op dat moment geen beperkingen oplegt, wat betreft de verspreiding van de bindende stof. Het additief moet geïnjecteerd worden, net nadat het injecteren van water is gestopt, anders zou verdunning kunnen optreden. Alleen de situatie van het gesuspendeerde bodemmateriaal op dat moment is van belang. Er wordt verwacht dat het additief tijdens de injectie het gesuspendeerde zand zal verdringen, ongeacht de aanwezige permeabiliteit. Dit gebeurt doordat de gesuspendeerde zandkorrels geen onderlinge samenhang meer hebben en daardoor geen weerstand kunnen bieden aan de injectiedruk. Tijdens het bezinken kan toch nog enige menging van additief en bodemmateriaal optreden, waardoor een verstevigd gebied kan ontstaan.

Voor dit onderzoek is dus dichtheid van het gesuspendeerde materiaal van belang. Deze moet voldoende zijn om ervoor te zorgen dat de wanden van de geul stabiel blijven, daarnaast moet deze dichtheid zo zijn dat een goede verspreiding mogelijk is. Over de ontwikkeling van de wolk van gesuspendeerd materiaal in de tijd is weinig informatie bekend. Bij Van Oord ACZ wil men in de toekomst experimenten gaan uitvoeren om hier meer over te weten te komen. Voor dit onderzoek zullen aannames gedaan moeten worden met betrekking tot de eigenschappen van deze wolk. Dit gebeurt in paragraaf 2.3.3.

Aan de specifieke materieelkundige eigenschappen van het fluïdisatie-apparaat, zoals het aantal jets, de jetdiameter, de benodigde injectiedruk en -snelheid, de lengte van het fluïdisatie-apparaat en de voorwaartse snelheid van het apparaat (in de orde van 300m/u), wordt verder geen aandacht besteed. Deze kunnen, zeker in zand, zo worden aangepast dat de gewenste dichtheid van het gesuspendeerde materiaal ontstaat.

2.3. Uitgangspunten voor dit onderzoek

2.3.1. Zeebodem

In de zee bevinden zich een groot aantal deeltjes, die ontstaan zijn op het land, in de atmosfeer, in de zee zelf of uit levende organismen. Als deze deeltjes zich op de bodem ophopen, worden ze sediment genoemd. Oceanografen beschrijven de sedimenten aan de hand van hun bron, de plaats waar ze afgezet zijn, hun chemische samenstelling, hun deeltjesgrootte, hun ouderdom en hun kleur.

Voor dit onderzoek zijn met name de chemische samenstelling en de korrelgrootte van het bodemmateriaal van belang.

Oxygen	47.0%
Silicon	28.0%
Aluminum	8.0%
Iron	5.0%
Calcium	3.6%
Sodium	2.8%
Potassium	2.6%
Magnesium	2.1%
All others together	0.9%

Tabel 2.1: Percentages van de verschillende elementen, aanwezig aan het aardoppervlak

In tabel 2.1 (Stowe, 1987) is te zien in welke percentages de verschillende elementen, waarmee de chemische samenstelling van de sedimenten gekarakteriseerd kan worden, aan het aardoppervlak aanwezig zijn. Aangezien silicium en zuurstof in overvloed aanwezig zijn, is het logisch dat de meest aan het aardoppervlak voorkomende mineralen silicaten (SiO_4^-) zijn (aluminium-, ijzer- en calciumsilicaten). Logischerwijs is siliciumdioxide (SiO_2) een ander veel voorkomend sedimentmateriaal. Dit materiaal vormt de bekende kwartszanden, die ook voor dit onderzoek gebruikt zullen worden. Naast kwartszanden bestaan er ook carbonaatzanden en aluminiumzanden, hier zal verder geen aandacht aan worden besteed.

Descriptive Name		Diameter (mm)	Phi Size [†]	Sinking Rate (mm/s)
Gravel	Boulder	>256	<-8	$>4.29 \times 10^6$
	Cobble	64-256	-6 to -8	2.68×10^5 to 4.29×10^6
	Pebble	4-64	-2 to -6	1.05×10^3 to 2.68×10^5
	Granule	2-4	-1 to -2	2.62×10^2 to 1.05×10^3
Sand	Very coarse	1-2	0 to -1	65.5-262
	Coarse	0.5-1	+1 to 0	16.4-65.5
	Medium	0.25-0.5	+2 to +1	4.09-16.4
	Fine	0.125-0.25	+3 to +2	1.02-4.09
	Very fine	0.0625-0.125	+4 to +3	0.256-1.02
Mud	Silt	0.0039-0.0625	+8 to +4	9.96×10^{-4} to 2.56×10^{-1}
	Clay	<0.0039	>8	$<9.96 \times 10^{-4}$

[†]Phi size = the negative of the power of 2 required to equal the particle diameter in millimeters

Tabel 2.2: Korrelgrootte en valsnelheid van sediment

De korrelgrootte van sediment kan variëren van grote keien tot fijne klei. De bezinksnelheid van de deeltjes wordt bepaald door hun grootte (zie tabel 2.2 (Duxbury, 1996)). Geologen gebruiken een phi-schaal om deze grootte te beschrijven. Hiervoor dient de korrelgrootte uitgedrukt te worden als 2^X . De waarde van de X-macht moet met -1 vermenigvuldigd worden om de phi-waarde te verkrijgen. Een deeltje van 64 mm. ($= 2^6$ mm.), heeft een phi-waarde van -6. Een deeltje van 1/128 mm. ($= 2^{-7}$ mm), heeft een phi-waarde van 7. Hoe kleiner een deeltje is, hoe langzamer het bezinkt. Kleine deeltjes blijven veel langer in suspensie waardoor de kans dat ze verplaatsen veel groter is.

Toepassing in dit onderzoek

In het algemeen is zeezand goed gegradeerd, dat wil zeggen dat zeezand een continue korrelverdeling heeft, waarin weinig pieken voorkomen van een bepaalde korrelgrootte (Kaldenbach, 1976).

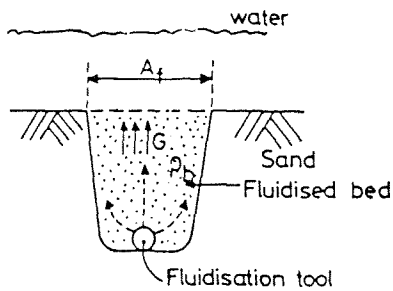
Dit is positief met betrekking tot dit onderzoek, want in goed gegradeerde gronden ontstaat in het algemeen een hogere sterkte, nadat een additief is toegevoegd, dan in slecht gegradeerde gronden (Kutzner, 1996). In het algemeen neemt de sterkte toe bij een grotere bodemdichtheid en een afnemende effectieve korrelgrootte (D_{10}). Nadat het zand in suspensie is gebracht, is de dichtheid van de originele zeebodem echter niet meer van belang.

Aan de hand van de experimenten, zal de invloed van de korrelgrootte moeten worden bepaald. Zand heeft een diameter, die tussen de 0,063 en 2 mm. ligt. In dit onderzoek wordt in eerste instantie uitgegaan van medium grof zand met een gemiddelde korreldiameter in de orde van grootte van 0,35 mm en fijn zand met een korreldiameter in de orde van grootte van 0,15 mm.

De porositeit en permeabiliteit van het originele bodemmateriaal zijn voor dit onderzoek niet van belang, omdat dit materiaal in suspensie wordt gebracht voordat (of terwijl) het additief wordt geïnjecteerd. Er wordt vanuit gegaan dat de porositeit van het bodemmateriaal voordat het in suspensie wordt gebracht 40% is en dat de zeebodem volledig verzadigd is. De permeabiliteit van zand varieert tussen de 10^{-3} en 10^{-6} m/s.

2.3.2. Principe van fluïdisatie

Wanneer een vloeistof met een bepaalde snelheid van beneden naar boven door een laag granulair materiaal stroomt (zie figuur 2.2), ontstaat er een bepaald drukverval over dit bed (druk neemt af).



Figuur 2.2: Principe van fluïdisatie

Dit drukverval is afhankelijk van de deeltjesgrootte. Door de vloeistofsnelheid te vergroten neemt het drukverval toe. De drukgradiënt, die ontstaat ten gevolge van het drukverval, oefent een opwaartse kracht (G in figuur 2.2) uit op elk individueel deeltje in het bed. Deze opwaartse kracht wordt uitgedrukt als een kritische massa-snelheid in kg/s.m^2 . Door de snelheid te vergroten neemt deze opwaartse kracht toe. Op het moment dat de opwaartse kracht groter is dan het eigen gewicht van de deeltjes, verdwijnt het contact tussen de deeltjes en worden de deeltjes door de vloeistof ondersteund. Er is een gefluïdiseerde massa ontstaan, die geen schuifspanningen meer overdraagt en die zich gedraagt als een vloeistof in rust.

In een onderzoek van Shell, aan de hand van een aantal simpele experimenten (van Daalen e.a., 1970) in een cilindervormige buis, is de benodigde snelheid om een laag zand te fluïdiseren bepaald. Voor Noordzeezand ($d_m = 0,035 \text{ cm}$) is een minimale snelheid van $0,7 \text{ cm/s}$ nodig. Deze snelheid bleek onafhankelijk van de diameter van de buis en de dikte van de zandlaag.

Volgens de grafieken in figuur 2.3 bedraagt de dichtheid van het gesuspendeerde materiaal dan ongeveer 1600 kg/m^3 . Een kritische massa-snelheid van 1 g/s.cm^2 komt overeen met een snelheid van 1 cm/s . De bron van deze figuur is niet bekend. Er wordt vanuit gegaan dat de gegevens kloppen, omdat ook de resultaten van de Shell-experimenten met deze figuur overeen komen.

Tijdens de experimenten zal de dichtheid van het gesuspendeerde materiaal wel bepaald moeten worden.

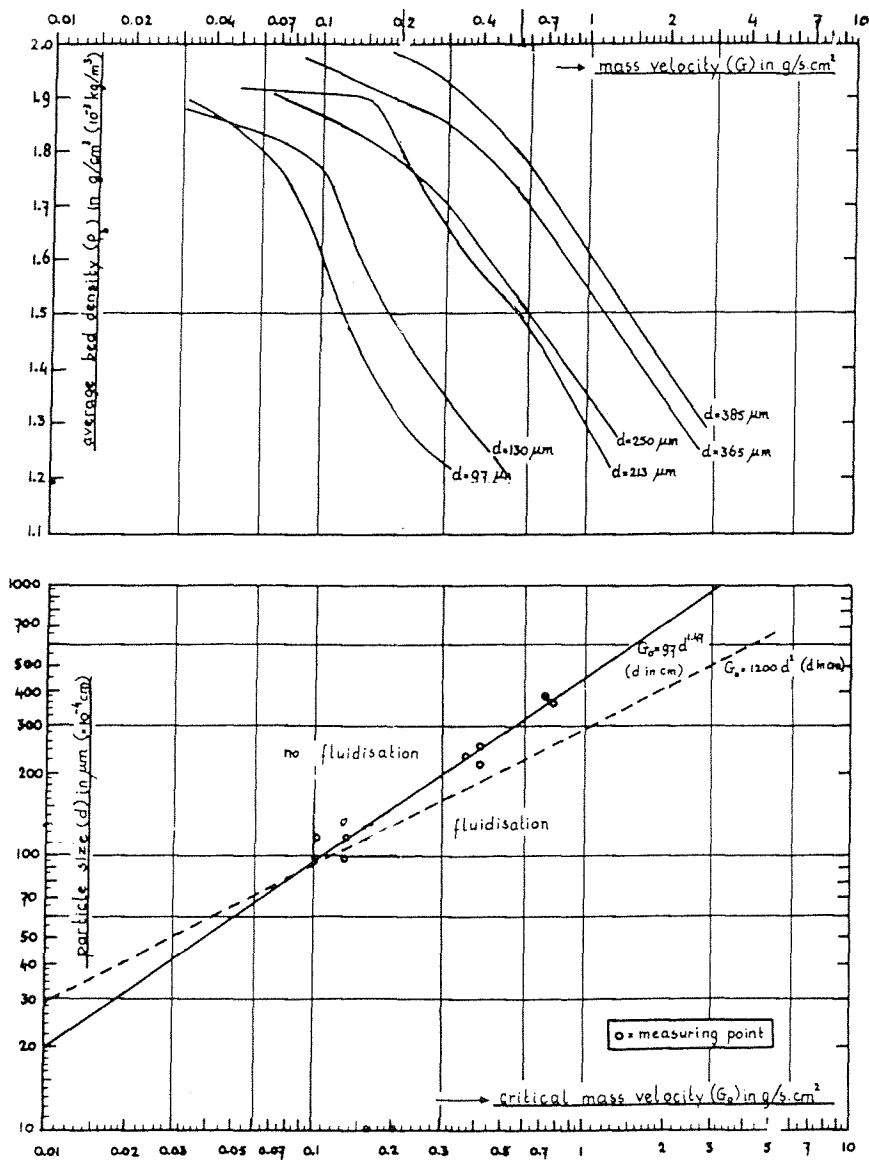
Een hogere snelheid zorgt ervoor dat de dichtheid van het gesuspendeerde materiaal met dezelfde korrelgrootte minder wordt (zie figuur 2.3).

Grotere korrels vereisen een grotere snelheid om in suspensie gebracht te worden dan kleinere. Bij een bodem die bestaat uit verschillende korrelgroottes bepalen de grotere korrels de vereiste snelheid. Deze snelheid is voor de kleinere korrels te groot, deze verplaatsen zich dan ook naar de bovenzijde van het gefluïdiseerde gebied. De grovere korrels bevinden zich in het onderste deel. In een gefluïdiseerd bed met verschillende korrelgroottes dat zich in een evenwichtstoestand bevindt, neemt de dichtheid van boven naar beneden toe. In de rest van dit onderzoek wordt uitgegaan van een homogeen mengsel in de geul.

Een gemiddelde korrelgrootte van $0,15 \text{ mm}$ vereist een snelheid van $0,24 \text{ cm/s}$. De gemiddelde dichtheid van gefluïdiseerde gebied is in dat geval ongeveer 1500 kg/m^3 .

De bepaalde snelheid, die nodig is om het zand te fluïdiseren, kan vervolgens worden gebruikt om de materieelkundige eigenschappen van het fluïdisatie-apparaat, zoals het aantal jets, de jetdiameter, de

benodigde injectiedruk en -snelheid, te berekenen. Deze eigenschappen zijn voor dit onderzoek verder niet van belang.



Figuur 2.3: Relatie tussen minimaal benodigde snelheid, korrelgrootte en dichtheid van het gesuspendeerde materiaal

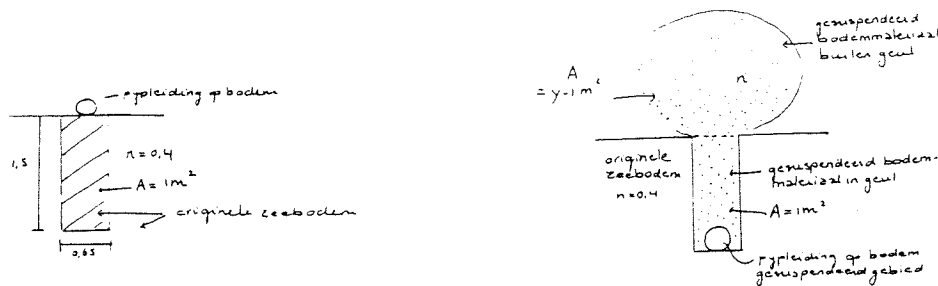
Toepassing in dit onderzoek

Tijdens de experimenten kan gebruik gemaakt worden van een dergelijke cilindervormige buis waarin het materiaal aan de hand van dit principe wordt gefluïdiseerd en vervolgens het additief wordt geïnjecteerd. De grafieken uit figuur 2.3 zullen als uitgangspunt dienen voor de benodigde snelheid. Tijdens deze experimenten zal de dichtheid van het gesuspendeerde materiaal wel bepaald moeten worden. Door de snelheid te variëren kan de dichtheid gevarieerd worden.

2.3.3. Wolk van gefluidiseerd materiaal

Afmetingen per strekkende meter geul

Als uitgangspunt voor de geul van gesuspendeerd materiaal worden de volgende waarden aangenomen (zie figuur 2.4).



Figuur 2.4: Bodem voordat en nadat het materiaal in suspensie wordt gebracht

- Breedte geul: 65 centimeter (Een pijpleiding/kabel van 25 cm en aan weerszijden een extra ruimte van 20 cm.).
- Diepte geul: 1,5 meter.
- Het totale gebied dat in gefluidiseerd moet worden is dus $1 \times 1,5 \times 0,65 = 0,975 \text{ m}^3 \cong 1 \text{ m}^3$.
- De dichtheid van het zeewater is 1025 kg/m^3 en de dichtheid van het korrelmateriaal is 2650 kg/m^3 .
- De porositeit van bodemmateriaal voordat het in suspensie wordt gebracht: $n = V_p/V_g = 0,4$.
- De zandbodem is volledig verzadigd.
- De natte dichtheid van de zandbodem is dan

$$\rho_{nattebodem} = n * \rho_{water} + (n - 1) * \rho_{zand} = 0,4 * 1025 + 0,6 * 2650 = 2000 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad 2.1$$

Er is aangenomen (naar aanleiding van gegevens die bij Van Oord ACZ beschikbaar waren), dat de geul stabiel is wanneer de dichtheid van het gesuspendeerde materiaal groter is dan 1300 kg/m^3 . Hierbij is aangenomen dat deze dichtheid homogeen verdeeld is, over het gehele gesuspendeerde gebied. Aan de hand hiervan kunnen de porositeit en de afmetingen van de wolk van het gesuspendeerde materiaal bepaald worden.

- Een dichtheid van 1300 kg/m^3 , in een gebied van 1 m^3 , betekent een porositeit van 0,83.

$$n = \frac{\rho_{zand} - \rho_{mengsel}}{\rho_{zand} - \rho_{water}} = \frac{2650 - 1300}{2650 - 1025} = 0,83 \quad 2.2$$

De hoeveelheid korrelmateriaal in het gehele gefluidiseerde gebied moet gelijk zijn aan de hoeveelheid korrelmateriaal, die zich bevond in de originele bodem. De wolk van gesuspendeerd materiaal zal zich dus buiten de geul verplaatsen (zie figuur 2.4).

- De hoeveelheid korrelmateriaal is 1590 kg. De porositeit is in het gehele gefluidiseerde gebied constant verondersteld. De afmetingen van het gefluidiseerde gebied kunnen op deze manier worden bepaald:

$$0,17 \times y \text{ m}^3 \times 2650 \text{ kg/m}^3 = 1590 \text{ kg} \quad 2.3$$

Hieruit volgt dat de afmeting van het gefluidiseerde $3,5 \text{ m}^3$ moet zijn.

Er bevindt zich dus $2,5 \text{ m}^3$ gesuspendeerd materiaal buiten de geul. Dit materiaal zal door de aanwezige stroming worden afgevoerd. Alleen het materiaal dat zich in de geul bevindt, zal boven op de pijpleiding

zakken, nadat het injecteren van water wordt gestopt. Vervolgens zullen de wanden van de geul instorten, omdat er geen dikke vloeistof meer aanwezig is, die ervoor zorgt dat de wanden stabiel blijven staan. Het additief moet dus geïnjecteerd worden voordat het materiaal boven op de pijpleiding zakt en de wanden instorten.

Dezelfde berekeningen zijn gedaan voor een dichtheid van 1350, 1400, 1450, 1500, 1550 en 1600 kg/m³ in de geul van gesuspenderd materiaal. De resultaten zijn in tabel 2.3 weergegeven.

	Porositeit n (-)	Afmeting gefluidiseerde gebied (m ³)	Hoeveelheid materiaal buiten de geul (m ³)
Dichtheid (kg/m ³)			
1300	0,83	3,5	2,5
1350	0,80	3	2
1400	0,77	2,6	1,6
1450	0,74	2,3	1,3
1500	0,71	2,1	1,1
1550	0,68	1,9	0,9
1600	0,65	1,7	0,7

Tabel 2.3: Invloed van dichtheid van het gesuspenderde materiaal op de afmetingen van de wolk

Conclusie

Aan de hand van de toename van de afmetingen van het gefluidiseerde gebied, ten opzichte van de afmeting van de originele bodem (1 m³), wordt geconcludeerd, dat de aanname dat de doorlatendheid van het gefluidiseerde gebied voldoende is voor de verspreiding van het additief, redelijk lijkt. Uit de experimenten zal dit verder moeten blijken.

Bij een bodem die bestaat uit verschillende korrelgroottes, zullen de kleinere korrels, die zich naar de bovenzijde van het van het gefluidiseerde gebied hebben verplaatst, worden weggespoeld. De grovere korrels bevinden zich in het onderste deel en deze zullen bezinken op de pijpleiding.

Er wordt aangenomen dat de verliezen, die optreden ten gevolge van de stroming, niet van belang zijn voor het ontwikkelen van een verstevigd gebied, nadat het additief is geïnjecteerd en het korrelmateriaal is bezonken. Bij een grotere dichtheid van het gesuspenderde materiaal zal er minder bodemmateriaal verloren gaan. Dit betekent dat het additief tussen meer korrels verspreid kan worden. Op deze manier heeft de dichtheid van het gesuspenderde materiaal invloed. Deze invloed zal moeten blijken uit de experimenten.

Bezinken

Nadat met injecteren wordt gestopt zullen de deeltjes, die zich in de geul bevinden bezinken. De snelheid waarmee dit gebeurt is afhankelijk van de grootte van de korrels en de viscositeit van het water.

- De bezinksn snelheid van zandkorrels kan met behulp van de volgende formule (Mastbergen, 1988) bepaald worden:

$$w_0 = \frac{10v}{d} \left[\sqrt{1 + \frac{\Delta g d^3}{100v^2}} - 1 \right] \quad 2.4$$

Hierbij geldt:

- w_0 = valsnelheid van een individuele korrel (m/s)
- d = korreldiameter, $100 \leq d \leq 1000 \mu\text{m}$ (m)
- $\nu = \eta/\rho$ = kinematische viscositeit water (m^2/s)
- η = dynamische viscositeit water (Ns/m^2)
- ρ = dichtheid water (kg/m^3)
- Δ = de relatieve dichtheid van een korrel: $(\rho_k - \rho_w / \rho_w) = 1,58$ (-)
- g = versnelling van de zwaartekracht = $9,81 \text{ m/s}^2$

Als wordt aangenomen dat geldt $\nu_{\text{zeewater}} = \eta_{\text{zeewater}}/\rho_{\text{zeewater}} = 1,01 \cdot 10^{-3}/1025 = 9,9 \cdot 10^{-7}$, dan is de bezinksnelheid voor korrels met een diameter van 0,15 mm, 15,7 mm/s. Voor korrels met een diameter van 0,35 mm is de bezinksnelheid in dat geval 50,6 mm/s

- De bezinksnelheid van de korrels wordt beïnvloed door de concentratie via het effect van “hindered settlement”.

$$w_s = w_0 (1 - C_{\text{bodem}})^\alpha \quad 2.5$$

Hierbij geldt:

- $\alpha = 4$ voor medium zand.
- $C_{\text{bodem}} = 1 - n$

De C_{bodem} is afhankelijk van de dichtheid van het gesuspendeerde materiaal. Deze dichtheid neemt toe gedurende het bezinkproces.

Als de dichtheid van het gesuspendeerde materiaal 1300 kg/m^3 is, zal de valsnelheid direct nadat het injecteren is gestopt, beperkt worden door de valsnelheid van een enkel deeltje te vermenigvuldigen met een factor $(1 - 0,17)^4 = 0,47$

$$w_s = 0,47 * 15,7 = 7,4 \text{ mm/s}, d = 0,15 \text{ mm}$$

$$w_s = 0,47 * 50,6 = 23,8 \text{ mm/s}, d = 0,35 \text{ mm}$$

- Aangenomen wordt dat de gemiddelde afstand, die een deeltje tijdens het bezinken in de geul, aflegt 0,75 meter (=750 mm) is. Deze afstand zal door een deeltje van 0,15 mm, bij een begindichtheid van 1300 kg/m^3 in minimaal 100 seconden worden afgelegd. Doordat de C_{bodem} toeneemt gedurende het bezinken zal het deeltje er waarschijnlijk langer overdoen. Wanneer de dichtheid van het gesuspendeerde materiaal groter is dan 1300 kg/m^3 zal het bezinken ook langer duren. Een deeltje met een diameter van 0,35 mm, bij een begindichtheid van 1300 kg/m^3 legt deze afstand in minimaal 32 seconden af. Ook hier zal C_{bodem} in de loop der tijd toenemen.
- Als het zand zich afzet met een porositeit van 0,45, kan met behulp van de volgende formule de sedimentatiesnelheid van het zand-watmengsel bepaald worden:

$$v_s = \frac{c}{c_{\text{res}} - c} w_s \quad 2.6$$

Hierbij geldt: c_{res} = de concentratie van resedimentatie = $1 - n = 0,55$.

Als het gesuspendeerde materiaal een dichtheid van 1300 kg/m^3 heeft, betekent dit een concentratie van 0,17. De sedimentatiesnelheid is in dat geval $0,447 * 7,4 = 3,3 \text{ mm/s}$, bij een korreldiameter van 0,15 mm en $0,447 * 23,8 = 10,6 \text{ mm/s}$, bij een korreldiameter van 0,35 mm.

Toepassing voor dit onderzoek

Uit de experimenten zal moeten blijken in hoeveel tijd het materiaal zal bezinken. Er kan bekeken worden op welk moment het additief geïnjecteerd moet worden, nadat met het injecteren van water is gestopt, om de beste verspreiding en eigenschappen van het verstevigde gebied te verkrijgen. Ook zal moeten blijken in hoeverre de dichtheid van het gesuspendeerde materiaal in de geul invloed heeft op de verspreiding van het additief en de eigenschappen van het eindproduct.

3. Grondinjecties en grouten

3.1. Inleiding

3.1.1. Algemeen

Bij grouten wordt net als in dit onderzoek een additief aan de bodem toegevoegd om de eigenschappen van de bodem te verbeteren. Grouten en de gebruikte grouts zullen als uitgangspunt dienen voor dit onderzoek.

In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan grouten aan de hand van de volgende aspecten:

- de geschiedenis van het grouten (3.2);
- de omgeving (3.3);
- grouttechnieken (3.4), waarbij specifiek aandacht wordt besteed aan verdringingsgrouten (3.4.3) en straalgrouten (3.4.4);
- groutmaterialen (3.5), waarbij een algemeen overzicht wordt gegeven van de bestaande materialen (3.5.2) en hun eigenschappen (3.5.3). In deze paragraaf wordt de keuze gemaakt voor cement-bentonietsuspensies, als additief.

3.1.2. Definitie

Grondinjecteren of grouten betekent het onder druk persen van vloeistoffen (grouts) in de open ruimtes van de ondergrond met het doel de permeabiliteit van de ondergrond te reduceren en/of de sterkte van de ondergrond te vergroten. De injectievloeistof stijft op nadat deze zijn uiteindelijke plaats in de open ruimtes heeft bereikt. In het vakgebied kan onderscheid worden gemaakt tussen het injecteren in gesteenten en rotsgronden enerzijds en injecties in loskorrelige afzettingen anderzijds.

In dit onderzoek wordt uitgegaan van een zandbodem. De open ruimtes zijn de poriën tussen de zandkorrels. In het vervolg van deze literatuurstudie wordt geen aandacht besteed aan groutoperaties in gesteenten en rotsgronden.

3.2. Geschiedenis

De eerste keer in de geschiedenis dat de ondergrond werd gegroot was ongeveer 200 jaar geleden. De Franse ingenieur Charles Bérigny gebruikte een suspensie van klei en kalk en een percussie pomp om de open ruimtes in de fundering van een sluis op te vullen, die beschadigd was ten gevolge van zettingen en erosie. De alluviale afzettingen ter plaatste werden afgedicht en gestabiliseerd. Hij gebruikte hiervoor technieken die hij “het injectieproces” noemde.

Na de ontwikkeling van hydraulische bindmiddelen en de uitvinding van het Portlandcement in 1821 werden de grouttechnieken vervolgens succesvol toegepast in de water- en mijnbouw voor het controleren van de waterstroom door gespleten gesteente.

Tussen 1900 en 1920 werden het groutmaterieel en de toegepaste technieken gemoderniseerd. Deze ontwikkelingen zorgden ervoor dat in die periode op grote schaal gebruik werd gemaakt van grouttechnieken bij het construeren van tunnels en damfunderingen. Vooral cement en klei-cement grouts dienden in grote hoeveelheden om de ondergrond te consolideren en om spleten onder de fundering van dammen af te dichten. Gedurende deze periode ontwikkelden zich gedetailleerde specificaties voor het toepassen van deze techniek van grouten op basis van cement.

Ondertussen ontstond de wens om ook loskorrelige gronden af te dichten of te stabiliseren met het doel de hydraulische eigenschappen en de draagcapaciteit te verbeteren. Cement was hier minder geschikt voor. De cementdeeltjes waren niet in staat te penetreren in de kleine kanaaltjes tussen de poriën, waardoor deze in het korrelskelet uitgefilterd werden. Rond 1915 kon cement worden toegepast in medium tot grof grind, voor gronden met kleinere korrels was cement niet geschikt. De oorzaak hiervan was de relatieve grofheid van het toenmalige cement.

Een grote stap voorwaarts was pas mogelijk na de ontwikkeling van chemische groutmaterialen op basis van oplossingen door de Nederlander H. Joosten in 1926. Deze oplossingen bevatten geen vaste deeltjes, waardoor het penetratievermogen groter werd. Het originele Joosten-systeem kon worden toegepast in grind en in medium grof tot grof zand. Hoog geconcentreerde sodium-silicaat en calcium-chloride oplossingen werden eerst apart geïnjecteerd en vormden vervolgens een silicaatgel nadat ze met elkaar in contact waren gekomen (een zogenaamde 'two-shot solution'). Het gegroute gebied ontwikkelde zich tot ondoorlatende zandsteen, met een sterkte tot 5Mpa.

Na de Tweede Wereldoorlog werden de chemische grouts snel ontwikkeld. Er ontstonden chemische grouts die zeer dun vloeibaar waren (zoals AM-9). Deze konden aan het oppervlak gemixt worden en werden vervolgens in één keer in de ondergrond geïnjecteerd (een zogenaamde 'one-shot solution'). Deze materialen konden penetreren tot in zeer fijn zand, waarbij het poriënvolume gelijkmatig werd opgevuld. De mechanische eigenschappen van de geïnjecteerde gronden, nadat de grout een vaste fase hadden bereikt, werden systematisch onderzocht.

In Frankrijk werd tegelijkertijd een systeem ontwikkeld (de tube-a-manchette) waarmee duidelijk definieerbare groutzones konden worden gemaakt. Daarnaast werd het met dit systeem mogelijk om achtereenvolgens verschillende materialen in grondlagen met een verschillende permeabiliteit te injecteren. Het voordeel van deze ontwikkelingen was dat het injectieproces gecontroleerd kon plaatsvinden en aangepast kon worden aan de gewenste vorm van het gegroute gebied.

Zowel de kennis van de mechanische eigenschappen van het gegroute gebied, als het gebruik van de tube-a-manchette zorgden ervoor dat ingenieurs de eigenschappen van een gegroute gebied konden meenemen in hun constructieve berekeningen. De gegroute zones vormden zo een structureel element bij het ontwerp van constructies. Grouten werd niet alleen meer gebruikt voor herstelwerkzaamheden.

Na 1980 werd in Europa steeds minder gebruik gemaakt van chemische groutmaterialen. Andere technieken werden ontwikkeld, omdat het injecteren van chemische stoffen in de ondergrond slecht bleek voor het milieu en het grondwater. In veel gevallen werd het straalgrouten, een mix-in-place methode met water en cement (zie paragraaf 3.3.3), de opvolger van het chemische grouten. Cement heeft geen nadelige gevolgen voor het milieu. Karol (1993) meldt tevens dat grouts op basis van silicaten ook geen giftige elementen bevatten.

Daarnaast werd het, in verband met het milieu, interessant om de bestaande techniek van het cementgrouten verder te ontwikkelen. De maalfijnheid van het cement werd verbeterd, zodat nu korrelgronden met deeltjes van 0,6 tot 2 mm (grof zand) met cement geïnjecteerd konden worden. De cementsuspensie werd geïnjecteerd met behulp van hydraulische hoge druk pompen, terwijl het groutmateriaal automatisch werd geprepareerd met behulp van doseringsinstallaties en mixers met een hoge snelheid. Druk en afvoer werden tegelijkertijd, automatisch geregistreerd. Met behulp van dergelijke procedures konden nu gegroute gebieden worden gevormd met een complexe vorm, onder moeilijke geologische omstandigheden.

De laatste ontwikkelingen op het injectiegebied zijn het gebruik van kunsthars en schuimrubber. Kunsthars wordt gebruikt voor het penetreren van fijne zanden en schuimrubber voor het opvullen van grote spleten.

3.3. Omgeving

Voordat een groutoperatie wordt uitgevoerd (ongeacht welke techniek hiervoor wordt gebruikt), is het van groot belang om een grondig bodemonderzoek te doen, daar de toepasbaarheid van de methode sterk afhankelijk is van de bodemeigenschappen.

Dit bodemonderzoek moet informatie geven over:

- de oppervlakte toestand van de bouwplaats;
- de hydrologische en geologische omstandigheden in de bodem;
- het bodemprofiel;
- de in situ bodemeigenschappen (zoals de permeabiliteit en de porositeit).

De bodem en het grondwater (in dit onderzoek het zeewater) mogen geen chemische bestanddelen bevatten, die een ongewenste reactie met het grout zullen geven.

In dit onderzoek is nog geen specifieke locatie van toepassing. Er kan dus geen echt bodemonderzoek worden uitgevoerd. Met name de samenstelling van de zeebodem en het zeewater zijn van belang. In hoofdstuk 2 (het fluïdisatieproces) wordt in paragraaf 2.3.1 de zeebodem besproken en in hoofdstuk 4 (toepassing van cement en bentoniet, de belangrijkste eigenschappen) komen in paragraaf 4.4 het zeewater en de combinatie van zeewater met het additief aan bod.

3.4. Grouttechnieken

3.4.1. Algemeen

Grouten heeft zich, zoals blijkt uit paragraaf 3.2 over de geschiedenis van het grouten, ontwikkeld in de praktijk en niet aan de hand van theoretische overwegingen. Het opvullen van de poriën in de ondergrond, zorgt voor stabilisatie en/of afdichting. Het doel dat door het injecteren van een grout moet worden bereikt, bepaalt de manier waarop het materiaal zich ontwikkelt na de vloeibare injectiefase.

Een groutprocedure heeft meer effect, qua sterkte en/of afdichting, wanneer de poriën beter opgevuld worden. Het korrelmateriaal zelf kan gezien worden als vast en waterdicht, het is volumestabiel. Wanneer open ruimtes in de ondergrond beter met elkaar verbonden zijn, zal het geheel opvullen ervan makkelijker verlopen. Hoe groter de permeabiliteit van de bodem, hoe makkelijker een vloeistof in deze bodem kan penetreren.

De uniformiteit en de mechanische eigenschappen van de gegroute bodem zijn afhankelijk van:

- de originele bodemeigenschappen;
- de groutparameters (druk, type grout, injectiesnelheid enz.);
- de samenstelling van het grout;
- de gebruikte hoeveelheid grout.

3.4.2. Overzicht

In de loop der jaren zijn er verschillende injectietechnieken ontwikkeld, om de eigenschappen van de bodem te verbeteren. De momenteel gebruikte injectietechnieken zijn:

- verdringingsgrouten;
- breukgrouten;
- samenpersgrouten;
- straalgrouten.

Deze injectietechnieken zullen hierna kort worden besproken.

Verdringingsgrouten (in het Engels permeation grouting).

Het doel is het opvullen van de bestaande poriën zonder opmerkelijke veranderingen in de structuur van de ondergrond. Het grondwater, dat in de poriën aanwezig is, wordt verplaatst. Het grout wordt geïnjecteerd met een druk, die minder is dan de druk (korrelspanning) in de grond ten gevolge van de bovenbelasting, om scheurvorming in de ondergrond te voorkomen. De structuur van de ondergrond blijft gehandhaafd. Verdringingsgrouten dient om de waterbewegingen in de ondergrond te stoppen of te verminderen (afdichten), of om de ondergrond te versterken of te consolideren (stabiliseren). Er ontstaat een samenhangend gegrout gebied. In dit onderzoek blijft de structuur van de ondergrond niet gehandhaafd, waardoor deze techniek in niet van toepassing lijkt. Er is wel verder onderzoek naar deze methode gedaan omdat met name de gebruikte grouts, de eigenschappen van deze grouts en de eigenschappen van het gegroute gebied in eerste instantie van belang lijken voor dit onderzoek. In paragraaf 3.4.3 wordt verder op deze techniek ingegaan.

Straalgrouten (in het Engels jet grouting).

Het doel is het afdichten en stabiliseren van de ondergrond. Bij deze methode wordt de ondergrond losgemaakt en gedeeltelijk geërodeerd door middel van een straal water of groutmateriaal met een zeer hoge druk (tot 60 Mpa). De ruimte die door deze procedure wordt gevormd, wordt vervolgens opgevuld met een mix van groutmateriaal en losgemaakte grond. De structuur van de ondergrond blijft dus niet gehandhaafd. In het algemeen wordt cement als groutmateriaal gebruikt. Met behulp van deze procedure wordt een samenhangende zone gecreëerd met verbeterde eigenschappen. In paragraaf 3.4.4 wordt verder op deze techniek ingegaan.

Breukgrouten (in het Engels fracture grouting).

Het doel is het opvullen en afdichten van kunstmatige en natuurlijke poriën met een opmerkelijke verandering in de structuur van de ondergrond en het poriënsysteem. Naast de bestaande poriën worden kunstmatig nieuwe ruimtes gecreëerd door de hoge hydraulische druk waarmee het groutmateriaal wordt geïnjecteerd. Deze ruimtes worden gedeeltelijk opgevuld en gedeeltelijk afgedicht en samengedrukt. De structuur van de ondergrond blijft bij deze techniek niet gehandhaafd. Breukgrouten dient ook om de ondergrond af te dichten of te stabiliseren. Bij gebruik van deze methode in zand zal echter geen samenhangend gebied ontstaan. Om deze reden is breukgrouten in het verdere onderzoek buiten beschouwing gelaten.

Samenpersgrouten (in het Engels compaction grouting).

Het doel is het opvullen van een kunstmatig gecreëerde holte, direct om de pijp waarmee het groutmateriaal onder hoge druk in de grond wordt geïnjecteerd. De holte ontstaat door verplaatsing en samenpersing van de grond door het groutmateriaal in de buurt van deze pijp (ten gevolge van de hoge injectiedruk). De structuur van de ondergrond wordt verstoord. Samenpersgrouten zorgt door middel van verdichting voor een vergroting van de draagcapaciteit van de ondergrond. Er ontstaat geen samenhangend gebied. Om deze reden is samenpersgrouten in het verdere onderzoek buiten beschouwing gelaten.

Voor meer informatie breukgrouten en samenpersgrouten wordt verwezen naar de relevante literatuur (respectievelijk o.a. Samol en Priebe, 1985 en o.a. Warner, 1997 en Bandimere, 1997).

3.4.3. Verdringingsgrouten

Algemeen

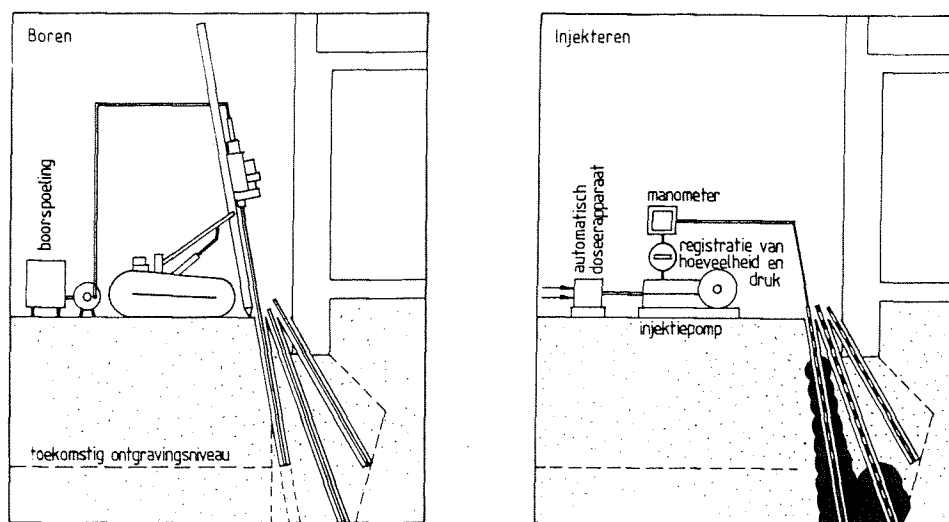
Bij deze manier van grouten wordt de lucht of het water, dat in de poriën in een zandbodem aanwezig is, verdrongen door een injectievloeistof. Deze vloeistof stroomt vanaf het injectiepunt min of meer bolvormig de ondergrond in ten gevolge van de injectiedruk.

De stroomsnelheid van het grout door de ondergrond wordt bepaald door:

- de injectiedruk;
- de permeabiliteit van de bodem;
- de viscositeit van het grout.

Methode

In figuur 3.1 (Van Weele, 1993) is te zien hoe de methode in z'n werk gaat. Eerst worden er gaten in de bodem geboord, waardoor de poriën bereikbaar worden voor het groutmateriaal. Vervolgens wordt de ondergrond geïnjecteerd met groutmateriaal. De kosten van de boorgaten zijn hoger dan de kosten van het grouten. Het is dus van belang de gaten zo goed mogelijk ten opzichte van elkaar te rangschikken, waardoor het aantal gaten beperkt kan worden. Bij grove zanden met een goede doorlatendheid zijn minder boorgaten nodig dan in gronden met een kleinere doorlatendheid.



Figuur 3.1: Boren, plaatsen van manchetbuizen en injecteren bij verdringingsgrouten

Met behulp van een manchetbuis (tube-a-manchetta) wordt het groutmateriaal in de bodem gebracht. De buizen worden geplaatst in de geboorde gaten. De ruimte tussen de buis en de gatwand wordt opgevuld met een suspensie (vaak een mengsel van cement, bentoniet en water).

De injectieopeningen in de buiswand bevinden zich op korte afstand boven elkaar, bijvoorbeeld 0,33 m. Elke serie openingen is aan de buitenwand afgedekt door een rubber manchet, die bewerkstelligt dat de injectievloeistoffen wel van binnen naar buiten kunnen stromen, maar niet omgekeerd.

Nadat de omhulling voldoende is verhard, kan het verpompen van de vloeistoffen beginnen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een zogenaamde 'dubbel-packer', die in de manchetbuis wordt geschoven en elke perforatie apart kan bedienen. Meestal wordt van onder naar boven gewerkt. De onderlinge afstand tussen de injectieopeningen bepaalt de hoeveelheid vloeistof die per punt wordt verwerkt.

Toepassing

In eerste instantie bepalen de bodemeigenschappen of een bepaald groutmateriaal (met een bepaalde viscositeit) met behulp van verdringingsgrouten, geïnjecteerd kan worden. De structuur van de ondergrond mag niet worden verstoord. De injectiedruk mag dus niet te groot worden. Een kleinere permeabiliteit van de bodem, vereist een grotere injectiedruk. Als gevolg hiervan is het gebied dat vanuit één injectiepunt bereikt kan worden beperkt. Door het graven van verschillende boorgaten op enige afstand van elkaar is het mogelijk een heel poriënsysteem met behulp van verdringingsgrouten op te vullen.

Het groutmateriaal dat bij verdringingsgrouten wordt gebruikt is afhankelijk van de permeabiliteit van de ondergrond. Ten gevolge van de beperkte permeabiliteit van een zandbodem, wordt in zand voornamelijk gebruik gemaakt van chemische grouts met een lage viscositeit. Bij grovere gronden wordt ook gebruik gemaakt van natuurlijke grouts.

Grout

Gedurende het injecteren moet het grout vloeibaar blijven. Te vroeg uitharden belemmert de penetratie. Ook sedimentatie van vaste deeltjes in een suspensie beïnvloedt de penetratie nadelig. Bovendien moet het grout in staat zijn het poriënwater te verdringen zonder verdunning en zonder verslechtering van de grouteigenschappen. Als dit mogelijk is, wordt het grensvlak tussen het grout en het water stabiel genoemd.

Door Scheidegger en Johnson (1969) is aangetoond dat een vloeistof met een lage viscositeit wordt verplaatst door een vloeistof met een hogere viscositeit. Hoe groter het verschil in viscositeit, hoe gemakkelijker deze verdringing plaatsvindt.

Indien de dichtheid van het grout groter is dan de dichtheid van het grondwater, heeft de gegroute massa de neiging tot uitzakken. Dit ontstaat ten gevolge van de zwaartekracht. Zolang het verdringen van het poriënwater sneller gaat dan dit uitzakken, zal de vorm van de gegroute massa niet veel veranderen. Op het moment dat met pompen wordt gestopt terwijl het grout nog vloeibaar is, zal dit grout uitzakken totdat het uithardt. Meer informatie over de gebruikte groutmaterialen volgt in paragraaf 3.5.

Belang van verdringingsgrouten voor dit onderzoek

Over het algemeen spelen bij de theoretische en experimentele onderzoeken over verdringingsgrouten de volgende verschijnselen een rol:

- het stromings- en uithardgedrag van de geïnjecteerde materialen;
- de injectiedruk;
- het te bereiken gebied;
- de verwerkingstijd;
- het toepassingsgebied.

In dit onderzoek zijn het stromings- en uithardgedrag en de verwerkingstijd van belang. De overige verschijnselen zijn buiten beschouwing gelaten. Dit is naar aanleiding van de veronderstelling dat het additief zich zonder problemen door het gehele gefluïdiseerde gebied kan verplaatsen. Ook andere eigenschappen van het groutmateriaal, dat gebruikt wordt bij verdringingsgrouten, zijn van toepassing in dit onderzoek.

Daarnaast is het ook in dit onderzoek gewenst dat, het water dat tussen het gesuspendeerde bodemmateriaal aanwezig is, wordt vervangen door het toegevoegde additief. Hierbij moet voorkomen worden dat het additief verdund of de eigenschappen van het additief verslechteren.

In paragraaf 3.5.4 zullen het stromings- en uithardgedrag, de verwerkingstijd en andere eigenschappen van de geïnjecteerde materialen worden besproken.

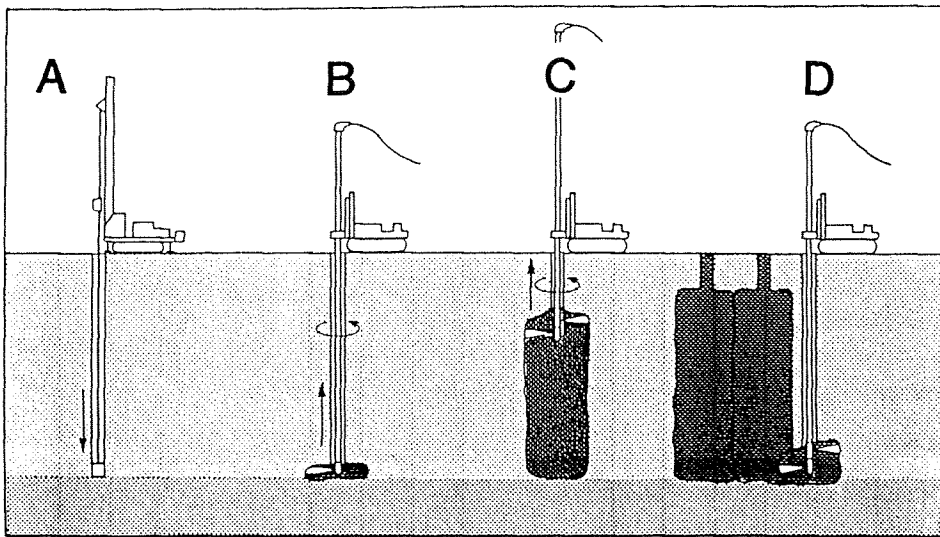
3.4.4. Straalgrouten

Algemeen

De straalgrouttechniek houdt in dat de grond in situ wordt losgemaakt, door een straal water of grout met een hoge druk. Vervolgens wordt de grond gemengd met een grout. Het is een mix-in-place methode. Het groutmateriaal dat bij straalgrouten wordt gebruikt, zijn cementsuspensies. Deze hebben een bepaalde water/cement-factor (W/C-factor), die bepalend is voor eigenschappen van het eindproduct.

Methode

In figuur 3.2 (Kutzner, 1996) is te zien hoe de methode in z'n werk gaat.



Figuur 3.2: Het principe van straalgrouten

- Als eerste wordt er een gat geboord tot de gewenste diepte (A).
- Vervolgens wordt begonnen met het eroderen van de bodem en de mix-in-place procedures. Dit gebeurt onder hoge druk en met rotatie en translatie van de boorstang (B).
- Het geërodeerde materiaal wordt gedeeltelijk gemengd met het grout. Er ontwikkelt zich een kolomvormig element, bestaande uit grond en cement, in de ondergrond (C). Een deel van het mengsel zal naar het oppervlak stromen langs de ringvormige ruimte om de boorstang. Dit is onvermijdelijk. Bovendien zorgt dit voor noodzakelijke drukvermindering.
- Vervolgens wordt dezelfde procedure net naast de reeds gevormde kolom herhaald. Hierbij overlappen de kolomvormige elementen gedeeltelijk. Uiteindelijk wordt een plaatvormige structuur verkregen (D). Door in fase B de boorstang niet te roteren, is het ook mogelijk om vlakvormige panelen te produceren.

Bij straalgrouten worden drie verschillende systemen gebruikt:

- een enkel vloeistoffensysteem;
- een twee vloeistoffensysteem;
- een drie vloeistoffensysteem.

De opstelling van de straalbuisjes en de ontwikkelde kolomgroottes verschillen per systeem.

Straalbuisjes dienen om een vloeistofstroming onder hoge druk in een pijp of leiding om te zetten in een vloeistofstraal met grote snelheid. De grootte van de diameter van de straalbuis bepaalt de grootte van deze snelheid.

Het type grond dat wordt behandeld, bepaalt welk systeem gebruikt wordt. De naam van het systeem verwijst naar het aantal materialen dat het systeem verpompt. Voor meer informatie over de verschillende systemen wordt verwezen naar Kutzner (1996).

Het systeem dat het meest overeenkomt met de methode die in dit onderzoek gebruikt zal worden, is een twee vloeistoffensysteem. Hierbij wordt de erosie door een hogedruk waterstraal veroorzaakt en wordt de cementsuspensie tegelijkertijd met een aparte straal geïnjecteerd. De kolombreedte en het eroderende effect van de straal nemen toe, bij toename van de gebruikte injectiedruk en -snelheid. Bij de twee vloeistoffensystemen is een hogedrukpomp (20 tot 60 Mpa.) nodig voor de injectie van het water. Een mediumdrukpomp (5 tot 12 Mpa) is vervolgens voldoende om het cement te injecteren. Tijdens het injecteren moet het aantal interrupties geminimaliseerd worden, daar een interruptie de kans op het verstopen van de straalpijpen vergroot.

Toepassing

Een voordeel van straalgrouten is dat een grote variëteit aan gronden (van grind tot klei) met behulp van een simpele cementgrout kan worden behandeld. Dit komt doordat een effectieve bodemverbetering kan worden bereikt, zonder dat de permeabiliteit van deze bodem beperkingen oplegt wat betreft de penetratie. Er hoeft geen gebruik gemaakt te worden van chemische grouts, die mogelijk giftig zijn en een beperkte duurzaamheid hebben. Als gevolg hiervan heeft straalgrouten in veel gevallen de toepassing van verdringingsgrouten met chemische materialen vervangen (zie ook paragraaf 3.2).

De toepassing van het straalgrouten wordt slechts beperkt door de sterkte van de ondergrond die geërodeerd moet worden en eventueel door economische redenen. Hoe sterker de ondergrond is, hoe groter de benodigde specifieke energie om de bodem te eroderen. In niet cohesieve gronden geeft de bodemdichtheid de sterkte aan. In zand met een hoge dichtheid kan straalgrouten nog worden toegepast.

Grout

Bij straalgrouten in permeabele gronden is het mogelijk dat een aanzienlijke hoeveelheid water uit de bodem en het geïnjecteerde grout stroomt, ten gevolge van de gevormde boorgaten. Dit bevordert de sterkte van de gegroute zone (afname van de W/C-factor).

De sterkteontwikkeling van een bepaalde cementsoort, die gemengd wordt met een bepaald type grond, is afhankelijk van uiteindelijk bereikte W/C-factor. Hierbij moet dan wel een homogeen grond/grout mengsel zijn ontstaan. In paragraaf 3.5.4 zal meer aandacht worden besteed aan deze sterkteontwikkeling, aangezien de sterkteontwikkeling van cement altijd afhankelijk is van de W/C-factor. Dit is dus geen specifieke ontwikkeling bij het straalgrouten.

De permeabiliteit van een gegroute kolom neemt in het algemeen af bij een toenemende sterkte, omdat er in dat geval meer cement in de kolom aanwezig is. Als het grout niet gelijkmatig in de kolom verspreid is, zijn de sterkte en de permeabiliteit van de kolom plaatsafhankelijk.

Belang van straalgrouten voor dit onderzoek

Net als bij straalgrouten geldt in dit onderzoek dat de permeabiliteit van de bodem geen beperkingen oplegt wat betreft de penetratie. Ook in dit onderzoek hoeft er waarschijnlijk geen gebruik gemaakt te worden van chemische grouts, die mogelijk giftig zijn en een beperkte duurzaamheid hebben. Een simpel cementgrout kan voldoende zijn.

Bij straalgrouten is voornamelijk het stromingsgedrag van het additief tijdens de injectie van belang. Bovendien heeft de druk die nodig is om de grond te eroderen invloed. Deze druk is bepalend voor de kolombreedte die wordt bereikt. In dit onderzoek is dit stromingsgedrag ook van belang, in paragraaf 3.5.4 wordt hier verder op ingegaan. Voor het bepalen van de snelheid die nodig is om de bodem in suspensie te brengen wordt verwezen naar hoofdstuk 2. Uit experimenten zal moeten blijken welke afmetingen het verstevigde gebied zal hebben.

Doordat bij straalgrouten, net als bij dit onderzoek, gebruik gemaakt wordt van cement (zie paragraaf 3.5.3), wordt in hoofdstuk 4 (toepassing van cement en bentoniet, de belangrijkste eigenschappen), in paragraaf

4.5.2 enige aandacht besteed aan de eigenschappen van gegroute kolommen. Uiteindelijk zullen de experimenten laten zien welke sterkte in dit onderzoek ontwikkeld zal worden.

Straalgrouten lijkt in eerste instantie redelijk overeen te komen met het verkitten van zand met behulp van fluïdisatietechnieken. Er zijn echter belangrijke verschillen:

Straalgrouten:

- Het water wordt verticaal *in de grond* geïnjecteerd.
- Het grout wordt onder *grote druk* toegevoegd.
- In de grond wordt het grout *actief gemixt* met het geërodeerde bodemmateriaal (noodzakelijk ten gevolge van beperkte permeabiliteit).
- Uiteindelijk ontstaat er een verstevigde kolomstructuur *in de grond*.

Fluïdisatietechnieken

- Het water wordt continu *langs het bodemoppervlak* geïnjecteerd.
- Het additief verspreidt zich ten gevolge van de (*beperkte*) *injectiedruk* tussen het gesuspendeerde materiaal.
- Extra *mixen lijkt niet nodig*, daar de permeabiliteit voldoende wordt geacht voor een goede verspreiding.
- Er ontstaat een verstevigde structuur *langs het oppervlak*.

Daarnaast is het grote verschil, dat in dit onderzoek onder water een additief zal worden geïnjecteerd. Straalgrouten heeft niet te maken met een overschot aan water.

3.5. Groutmateriaal

3.5.1. Algemeen

Wat betreft de bestaande groutmaterialen en hun eigenschappen is in eerste instantie gekeken naar de materialen, die bij het verdringingsgrouten worden gebruikt. Hierbij komen vanzelf de cementsuspensies, die bij straalgrouten worden gebruikt aan bod. De eigenschappen van de materialen die bij beide methodes gebruikt worden zijn gelijk. Doordat verschillende technieken worden gebruikt om het grout aan de bodem toe te voegen, zijn er andere eigenschappen van het eindproduct mogelijk.

3.5.2. Overzicht

Tijdens het injecteren zijn de grouts vloeibaar. Materiaalkundig kan het groutmateriaal volgens Kutzner (1996) dan worden ingedeeld in:

- oplossingen;
- suspensies;
- emulsies.

Deze zullen hieronder worden besproken.

Oplossingen

Een oplossing bestaat uit een originele vloeibare, vaste of gasvormige massa en een oplosmiddel. De fysieke toestand is een complete mix van de moleculen van beide bestanddelen. De grootte van de moleculen is ongeveer 10^{-2} micron. De verschillende bestanddelen van een oplossing kunnen niet met behulp van mechanische middelen gescheiden worden. Voorbeelden zijn de meeste chemische grouts zoals silicaten, kunstharsen en andere synthetische producten.

Suspensies

Een suspensie is een mix van een vloeistof en een verpulverde vaste massa. In eerste instantie lijkt de toestand van deze mix geheel niet op een eenheid. De vaste deeltjes zijn op z'n minst 100 keer groter dan de moleculen van de vloeistof. De diameter van deze deeltjes ligt in de orde van 1 tot 100 micron. Suspensies zijn onstabiel als de componenten van elkaar scheiden ten gevolge van sedimentatie. De componenten van een stabiele suspensie scheiden niet van elkaar. Sedimentatie kan bij stabiele suspensies met behulp van mechanische middelen tot stand worden gebracht. Een voorbeeld van een suspensie is een water-cementmengsel, voordat de hydratatie begint.

Emulsies

Een emulsie is een mix van twee of meer vloeistoffen met verschillende eigenschappen, die in eerste instantie geen eenheid vormt. In de ene vloeistof ontstaan druppelvormige deeltjes van de andere vloeistof. Vaak is water een van de twee vloeistoffen. De grootte van de druppels in het water ligt in de orde van 1 tot 10 micron. De componenten van een emulsie kunnen met behulp van mechanische middelen van elkaar gescheiden worden. Voorbeelden van emulsies die als grout worden gebruikt zijn harsemulsies en emulsies van bitumen en water. Emulsies worden verder buiten beschouwing gelaten. Harsemulsies zijn in het algemeen zeer kostbaar en hebben een slechte invloed op het milieu. Emulsies op basis van bitumen worden om praktische redenen weinig toegepast. Ze zijn zeer gevoelig voor temperatuursveranderingen en zijn zeer oplosbaar.

3.5.3. Groutsamenstellingen en criteria voor een eerste selectie

In tabel 3.1 (naar Skipp, 1975) wordt een algemeen overzicht gegeven van de meest gebruikte groutsamenstellingen bij het verdringingsgrouten in alluviale grond. Het verschil tussen 'one-shot solutions' en 'two-shot solutions' in paragraaf 3.2 uitgelegd.

Supensoids	Two-shot solutions	Single-shot solutions
Cement	Sodium silicate–calcium chloride	Chrome–lignin, Sumisol [*] , T.D.M.
Cement–sand	Hydrochloric acid–urea formaldehyde monomer	Sodium silicate–sodium bicarbonate
Cement–clay		Sodium silicate–sodium aluminate
Cement–bentonite		Sodium silicate–ethyl acetate [†]
Cement–bentonite, P.F.A.		Sodium silicate–mixed esters (Durcisseur [*])
Waste mine slurries		Sodium silicate–formamide (base) (Siroc [*])
Bentonite–gel (with sodium silicate and acid phosphate)		Sodium silicate–oxalate salt (Cemex) [†]
		Resorcinol–formaldehyde (acid or alkali catalysis) [†]
		Polyphenolic–formaldehyde, alkali catalyst (MQ44, MQ5 [*] , Terranier [†])
		Acrylamide, AM9 [*] , Progil R.1295 [*]

*Proprietary grouts on sale.

[†]Patent protected.

Tabel 3.1: Groutsamenstellingen, die worden toegepast in alluviale grond

De keuze van het juiste groutmateriaal is belangrijk om de groutoperatie succesvol te laten verlopen. Vaak is het mogelijk om meerdere grouts toe te passen. Bij een eerste selectie voor een geschikt groutmateriaal moeten de volgende criteria in overweging worden genomen:

1. de permeabiliteit van de bodem;
2. de kosten van het groutmateriaal;
3. de sterkteontwikkeling;
4. de chemische bestanddelen van de bodem en het grondwater.

1. Bij de selectie van een groutmateriaal speelt als eerste de permeabiliteit van de ondergrond een grote rol. In dit onderzoek legt de permeabiliteit van het bodemmateriaal tijdens de injectie van het bindende additief, geen beperkingen op ten aanzien van het stromingsgedrag van dit additief. Dit criterium valt dus af.
2. Vervolgens bepalen de kosten welke grouts in aanmerking komen. In tabel 3.2 (Littlejohn, 1993) worden de kosten van verschillende groutmaterialen met elkaar vergeleken.

Formulation	Relative cost of materials
Cement-bentonite	
w/c =3, 5% bentonite by wt. of water	1.0
w/c=2, 3% bentonite by wt. of water	1.3
w/c=1, 1% bentonite by wt. of water	2.3
Cement	
(w/c =0.5)	3.4
Silicate-bentonite	
20% bentonite, 7% silicate (by wt. of water)	1.3
Silicate-chloride (Joosten)	4.0
Silicate-ester	
37% silicate, 4.4% ester (by volume)	5.0
47% silicate, 5.6% ester (by volume)	6.5
Silicate-aluminate	
46% silicate, 1.4% aluminate (by weight)	5.0
Phenol-formaldehyde	
13% (by volume)	10.5
19% (by volume)	15.3
Acrylate	
10% (by weight)	18.5
Resorcinol-formaldehyde	
21% (by volume)	23.0
28% (by volume)	31.0
Polyacrylamide	
5% (by volume)	20.0
10% (by volume)	40.0

Tabel 3.2: Kosten van verschillende groutmaterialen

Aan de hand van deze kostentabel kan geconcludeerd worden dat cement-bentonietsuspensies en silicaat-bentonietsuspensies wat betreft kosten interessant zijn.

3. Als echter naar het volgende criterium (sterkte-ontwikkeling) wordt gekeken vallen de silicaat-bentonietsuspensies af. Een silicaat-bentonietsuspensie is namelijk een dikke brei, die voornamelijk voor isolatie- en afdichtdoeleinden wordt gebruikt. Voor het verstevigen van de bodem in dit onderzoek is deze stof niet interessant, omdat de sterkteontwikkeling niet voldoende zal zijn (met name in verband met de vallende ankers). Ook de andere silicaten waarvan de kosten nog betrekkelijk laag zijn in vergelijking met andere chemische oplossingen, ontwikkelen minder sterkte dan cement-bentonietsuspensies.
4. Het laatste criterium komt in hoofdstuk 4 (toepassing van cement en bentoniet, de belangrijkste eigenschappen) aan bod. In paragraaf 4.4 wordt het zeewater besproken en de combinatie van zeewater met cement en bentoniet.

Conclusie

Voor dit onderzoek blijkt dat cement-bentonietsuspensies het best aan de bovenstaande criteria voldoen. De voornaamste reden hiervoor is dat (net als bij straalgrouten) de permeabiliteit van de bodem geen beperkingen oplegt wat betreft de verspreiding. Naast het feit dat chemische oplossingen veel duurder zijn kunnen ze mogelijk giftig zijn en hebben ze in het algemeen een beperkte duurzaamheid.

In dit onderzoek wordt verder alleen nog aandacht besteed aan cement en bentoniet en aanverwante materialen. Op het moment dat cement-bentoniet suspensies naar aanleiding van de experimenten niet geschikt blijken, kan eventueel naar de mogelijkheden van silicaten (silicagels) gekeken worden.

3.5.4. Enkele belangrijke grouteigenschappen

Algemeen

In deze paragraaf komen de grouteigenschappen aan bod, die in het algemeen van toepassing zijn bij het verbeteren van de bodemeigenschappen van een bepaald gebied. Hierbij wordt gekeken naar eigenschappen die in eerste instantie van toepassing lijken voor dit onderzoek. Door gebruik te maken van hulpstoffen kunnen de eigenschappen van het grout worden aangepast aan de gewenste situatie.

In dit hoofdstuk zullen de materiaaleigenschappen in het algemeen worden besproken. In hoofdstuk 4 zullen deze eigenschappen specifiek worden bekeken voor cement en bentoniet. In dat hoofdstuk wordt bovendien aandacht besteed aan de hulpstoffen.

De volgende eigenschappen zullen worden besproken:

- viscositeit en viscositeitsontwikkeling;
- verwerkingstijd;
- stabiliteit;
- duurzaamheid;
- permeabiliteit en interne erosie;
- vervormingscapaciteit;
- giftigheid;
- groutsterkte.

Viscositeit en viscositeitsontwikkeling

De viscositeit bepaalt in veel gevallen of een materiaal geschikt is om in een gebied met een bepaalde permeabiliteit te penetreren. Deze eigenschap is in dit onderzoek echter niet van toepassing, omdat is aangenomen dat de permeabiliteit van het gesuspendeerde bodemmateriaal geen beperkingen oplegt voor de verspreiding van het additief.

Voor dit onderzoek zijn de viscositeit en de viscositeitsontwikkeling van het additief van belang voor:

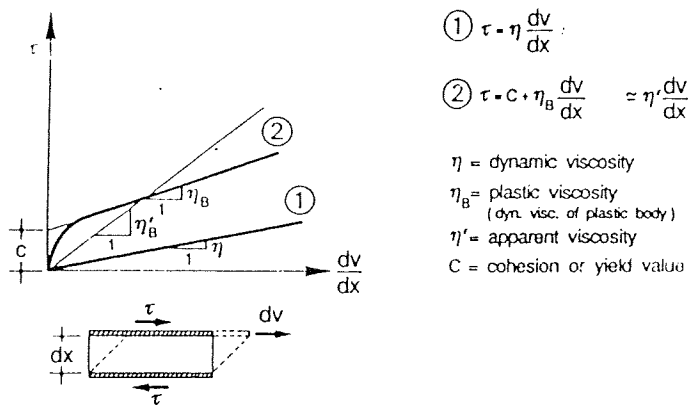
- de verwerkbaarheid;
- de verdringing van het water tussen de geïnduseerde korrels;
- de mate waarin ontmenging optreedt in een waterrijke omgeving;
- de kans dat stroming het zand inclusief additief wegspoelt; hoe langzamer toename van de viscositeit verloopt, hoe groter de kans op verliezen.

In de beginfase, wanneer het groutmateriaal vloeibaar is, gedragen alle materialen zich als een Newtonse of een Binghamse vloeistof. In figuur 3.3 (Gause & Bruce, 1997) zijn voor een Newtonse en een Binghamse vloeistof de snelheidsgradiënt (dv/dx) en de schuifspanning (τ) tegen elkaar uitgezet. In deze figuur wordt uitgegaan van een constante viscositeit.

Curve 1 geeft het stromingsgedrag van een Newtonse vloeistof weer. Er wordt gesproken van een Newtonse vloeistof als het verband tussen de schuifspanning τ en de (schuif)snelheidsgradiënt dv/dx lineair is. Een voorbeeld van een Newtonse vloeistof is water.

Curve 2 geeft het stromingsgedrag van een Binghamse vloeistof weer. Binghamse vloeistoffen worden gekenmerkt door een grensschuifspanning. Er moet een beginweerstand c worden overwonnen, voordat de vloeistof in beweging komt ten gevolge van een (schuif)snelheidsgradiënt. Deze beginweerstand wordt ook

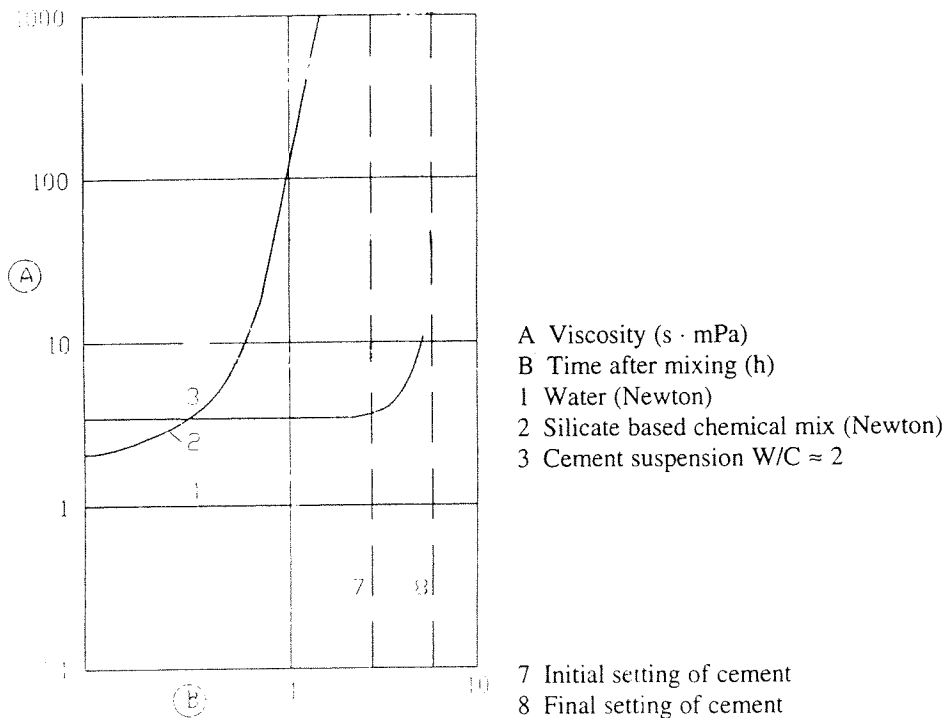
wel de cohesie van de vloeistof genoemd. Hierna zijn de schuifspanning τ en de (schuif)snelheidsgradiënt dv/dx evenredig met elkaar. Een voorbeeld van een Binghamse vloeistof is een stabiele cement-bentonietsuspensie.



Figuur 3.3: Stroomingsgedrag van een Newtonse en een Binghamse vloeistof

Voor het bepalen van de viscositeit en de grensschuifspanning bestaan verschillende apparaten. De viscositeit wordt in laboratoria met vaak met behulp van een Marsh-trechter bepaald. Hierbij wordt gemeten in hoeveel seconden een liter vloeistof uit de trechter stroomt. De Marsh-viscositeit van water is ongeveer 28 s/l. Deze Marsh-viscositeit is recht evenredig met de schuifsterkte van een suspensie. Meer informatie hierover is te vinden in publicatie 189 van de CUR over cement-bentonietschermen. De grensschuifspanning kan worden gemeten met een apparaat dat is ontworpen door Lombardi (1985).

In werkelijkheid is de viscositeit van de groutmaterialen afhankelijk van de tijd. De viscositeit neemt toe vanaf het moment dat de bestanddelen van het additief met elkaar in aanraking komen en er chemische reacties kunnen gaan plaatsvinden. De viscositeit van verschillende grouts als een functie van de tijd kan in figuur 3.4 (Kutzner, 1996) worden bekeken.



Figuur 3.4: De viscositeit als functie van de tijd

De viscositeit van chemische grouts neemt in eerste instantie geleidelijk toe. Na ongeveer 30 minuten neemt de viscositeit snel toe.

Gedurende de eerste 2 tot 4 uur is de viscositeit van cementsuspensies ongeveer constant. Daarna begint het uitharden, waarbij de viscositeit snel toeneemt tot een eindwaarde. Het moment waarop de viscositeit zijn eindwaarde heeft bereikt, wordt de afzettijd genoemd. Nadat de eindviscositeit is bereikt en de afzettijd voorbij is, zal de sterkteontwikkeling (het uitharden) van het cement nog doorgaan.

Een relatief simpele methode om de viscositeitsontwikkeling in de tijd en daarmee het afzetgedrag van een mengsel te bepalen, is het bekijken van de penetratie van een bepaald soort naald in een monster. Deze naald wordt een Vicat-naald (ASTM C-472) genoemd.

De viscositeit en de viscositeitsontwikkeling zijn afhankelijk van de temperatuur. Dit geldt voor water, cementsuspensies en chemische grouts. De viscositeit van water neemt af bij een toename van de temperatuur. De viscositeit van cementsuspensies en grouts op basis van silicaten neemt toe bij een toename van de temperatuur. De oorzaak hiervan is het feit dat de chemische reacties sneller plaatsvinden door de hogere temperatuur. Ook de pH-waarde van de omgeving heeft invloed op de viscositeitsontwikkeling. Een hogere pH geeft een snellere viscositeitsontwikkeling.

Verwerkingstijd

Met de verwerkingstijd wordt de tijd bedoeld dat het materiaal verwerkbaar en dus verpompbaar en injecteerbaar is. Het feit dat de benodigde verwerkingstijd afhankelijk is van de toegestane injectiedruk en de gewenste grootte van het injectiegebied wordt buiten beschouwing gelaten.

Nadat het uitharden van een cementsuspensie is begonnen, neemt de viscositeit snel toe en is het materiaal niet meer verwerkbaar. De verwerkingstijd kan geschat worden op ongeveer 70% van de afzettijd. Een toename van de W/C-factor, verlengt de verwerkingstijd. Voor cementsuspensies duurt deze periode ongeveer 2 tot 4 uur. Voor normale chemische grout duurt deze periode 20 tot 60 minuten. Andere speciale materialen zoals schuimrubber zijn al na enkele seconden of minuten niet meer verpompbaar.

De stromingseigenschappen en daarmee de verwerkbaarheid worden voornamelijk bepaald door de ontwikkeling van de viscositeit en de grensschuifspanning. Deze kunnen gevarieerd worden door de samenstelling van het mengsel aan te passen. Bij suspensies is bovendien het sedimentatiegedrag van belang voor de verwerkbaarheid.

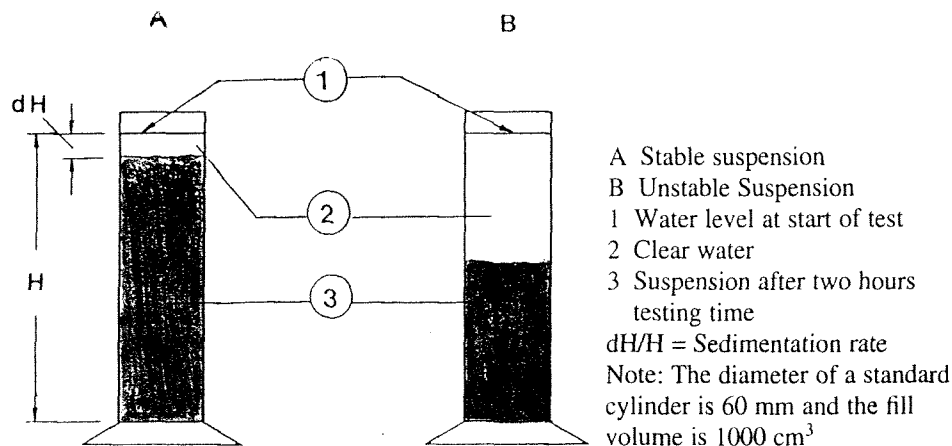
Zoals al in paragraaf 3.4.4 is opgemerkt, moet tijdens het injecteren (en verpompen) het aantal interrupties geminimaliseerd worden. Een rustperiode tussen roerperioden (verwerkingsperioden), kan resulteren in een lagere druksterkte. Hiermee wordt bedoeld dat het materiaal dat na het injecteren tot rust is gekomen, niet opnieuw in beweging moet worden gebracht. Op de permeabiliteit hebben rustperiodes weinig effect.

Stabiliteit

Een stabiel mengsel is een homogeen mengsel, met constante eigenschappen.

Chemische grouts zijn oplossingen en zijn sowieso stabiel.

Bij suspensies kunnen de componenten (vaste deeltjes en vloeistof) van elkaar scheiden ten gevolge van sedimentatie (uitzakking) en coagulatie (uitvlokking) van de vaste deeltjes. Boven op deze bezonken deeltjes blijft vervolgens een laagje vrij water staan.



Figuur 3.5: Sedimentatie in een cilinder

De stabiliteit van een suspensie kan worden gemeten in een cilinder (zie figuur 3.5). De verhouding tussen de dikte van de laag vrij water (dH) en de dikte van de laag bezonken korrels (H) is een maat voor de stabiliteit. In het algemeen wordt aangenomen dat een verhouding van $dH/H < 10\%$ aanduidt dat een suspensie stabiel is. Wanneer een suspensie instabiel is, zijn de vaste deeltjes niet meer homogeen (gelijkmatig) over de gehele suspensie verdeeld. Hierdoor zijn ook de eigenschappen van de suspensie niet meer constant. Het sedimentatiegedrag moet voor elke suspensie op zich worden bekeken aan de hand van een proefmengsel. Meer informatie hierover is te vinden in publicatie 189 van de CUR over cement-bentonietschermen.

Het is ongewenst dat een suspensie in de poriën tussen het korrelmateriaal sedimenteert. Er zal zich in dat geval water ophopen onder de individuele korrels, waardoor de onderkant van de korrels minder goed gebonden zal worden. Dit is nadelig voor de sterkte en de doorlatendheid van het gegroute gebied (Bowen, 1981).

Daarnaast verkleint sedimentatie de verwerkbaarheid van het additief in leidingen en pompen. In de praktijk blijkt dan ook dat constante eigenschappen van de suspensie tijdens het verpompen gewenst zijn.

De hoeveelheid sedimentatie is afhankelijk van:

- de grootte van de vaste deeltjes in de suspensie;
- het verschil in (eenheids)gewicht van de vloeistof en de gesuspendeerde vaste deeltjes;
- de bezinktijd van de vaste deeltjes;
- de temperatuur;
- afmetingen van de cilinder.

Gemiddelde waarden voor de hoeveelheid sedimentatie in cementsuspensies worden gegeven in paragraaf 4.5.2.

Een andere vorm van instabiliteit van een suspensie wordt synerese genoemd. Hierbij wordt de afscheiding van water uit waterrijke mengsels met een poreuze matrix bedoeld, die ontstaat ten gevolge van krimp van deze matrix. In dit onderzoek wordt aangenomen dat deze vorm van instabiliteit niet zal optreden.

Duurzaamheid

Bij de duurzaamheid wordt gekeken naar het behoud van de kwaliteit van het grout gedurende de minimaal vereiste levensduur. De duurzaamheid van de bodemversterking wordt onder andere bepaald door de resistentie tegen invloeden van buitenaf.

Het grout waarmee de bodem verstevigd is, mag niet worden aangetast door de agressieve chemicaliën in het zeewater. Dit geldt zowel voor de uitgeharde als voor de vloeibare fase. In de vloeibare fase mogen de chemicaliën niet in de suspensie worden opgenomen. Hierdoor zou het verhardingsproces negatief beïnvloed kunnen worden en daarmee de te ontwikkelen eigenschappen van het eindproduct.

De gevoeligheid van cement en bentoniet voor diverse chemicaliën komt in paragraaf 4.5.2 aan bod. In dit onderzoek wordt verder alleen gekeken naar de mogelijke invloeden van het zeewater op de kwaliteit van het additief en het eindproduct.

Een ander aspect is dat het grout niet mag worden opgelost in of reageren of mengen met het aanwezige water. Hierdoor is de verstevigde bodem niet meer in staat haar functie te vervullen, omdat de eigenschappen van het grout zijn aangetast. Dit geldt zowel in de vloeibare als in de uitgeharde fase.

Tot slot moet de verstevigde bodem in staat zijn de belasting door stroming te weerstaan.

Permeabiliteit en interne erosie

De permeabiliteit is vooral van belang wanneer de deklaag een isolerende functie heeft. Daarnaast kan een beperkte permeabiliteit leiden tot drukopbouw onder de deklaag (zie vervormingscapaciteit).

Met de permeabiliteit wordt in dit geval het vermogen van het grout bedoeld, om de passage van water door het uitgeharde gebied tegen te gaan. De passage van water zal ontstaan door de aanwezigheid van een hydraulische gradiënt. Het doorstromende water zal fijn materiaal meevoeren, omdat de aanhechting tussen de korrels onderling onvoldoende is om de stromingsdruk te weerstaan. Hierdoor worden de poriën en de permeabiliteit groter. Dit heeft een progressief effect op de uitspoeling. Deze interne erosie kan vermeden worden door voldoende additief toe te voegen, waardoor de aanhechting tussen het korrelmateriaal wordt versterkt.

Aangezien het onderzoek zich toespitst op voldoende diep water, is een dergelijke hydraulische gradiënt in eerste instantie niet aanwezig. De hoeveelheid water die door de verstevigde deklaag stroomt, is hierdoor verwaarloosbaar. Er zal geen interne erosie optreden. Op het moment dat golven het verstevigde gebied zullen belasten, in ondiep water, wordt de stroming door het verstevigde gebied wel van belang. In dat geval is de invloed van golven op de hydraulische druk wel van belang.

In eerste instantie is de permeabiliteit voor het vervolg van dit onderzoek niet van belang. Het kan echter interessant zijn om te kijken hoe de permeabiliteit zich ontwikkelt, nadat een additief tussen het gesuspenderde bodemmateriaal is geïnjecteerd. Aangezien het onbekend is hoe efficiënt het mengen van het bodemmateriaal met de suspensie zal verlopen, kan de permeabiliteit eventueel een indicatie voor de mate van menging geven.

De permeabiliteit wordt onder andere met behulp van een triaxiaalcel gemeten. Meer informatie hierover is te vinden in de publicatie 189 van de CUR over cement-bentonietschermen.

Vervormingscapaciteit

De vervormingscapaciteit is afhankelijk van de structuur de verstevigde bodem na het uitharden. Deze structuur kan stijf of flexibel zijn. De elasticiteitsmodulus en de kruipeigenschappen van het verstevigde gebied zijn bepalend voor de vervormingscapaciteit.

De permeabiliteit heeft invloed op de mate waarin de vervormingscapaciteit van het verstevigde gebied wordt aangewend. Een kleine permeabiliteit zou kunnen zorgen voor een grote drukopbouw onder dit gebied. Als het gebied een flexibele structuur heeft, zal dit geen problemen geven. Bij een stijve en brosse structuur kan breuk- en scheurvorming optreden. Hierbij geldt echter opnieuw dat in dit onderzoek geen drukopbouw zal ontstaan. Er is sprake van voldoende diep water en alleen een belasting door stroming.

Giftigheid

In dit onderzoek zal alleen gebruikt gemaakt worden van natuurlijke stoffen, die niet schadelijk voor het milieu zijn.

Groutsterkte

Met de groutsterkte worden de schuifsterkte en de druksterkte van het verstevigde gebied bedoeld. De groutsterkte zal in laboratoriumtesten bepaald worden. Het te testen grout moet hiervoor worden geïnjecteerd en gemengd met het bodemmateriaal.

Voor dit onderzoek is de schuifsterkte van belang in verband met de erosiebestendigheid. Deze schuifsterkte neemt ten gevolge van het grouten toe, doordat er samenhang tussen de zanddeeltjes ontstaat na de toevoeging van het additief.

Deeltjes aan het oppervlak van het verstevigde gebied kunnen worden afgevoerd door het langsstromende water. Deze manier van erosie wordt bij cement-bentonietschermen contacterosie genoemd en kan met behulp van een pinhole proef getest worden (CUR publicatie 189, 1997).

Naast erosiebestendigheid, is het ook gewenst dat de verstevigde deklaag enige druksterkte heeft, met het oog op mechanische belastingen ten gevolge van vallende ankers. Wat betreft de druksterkte kan vermeld worden dat deze sterk afhankelijk is van de W/C-factor. Daarnaast heeft de gebruikte cementsoort enige invloed (CUR publicatie 189, 1997). Voor meer informatie hierover wordt verwezen naar paragraaf 4.5.2.

De korrelgrootte en korrelverdeling hebben ook invloed op de ontwikkelde sterkte, zoals al in paragraaf 2.2.1 aan de orde kwam. In het algemeen neemt de sterkte toe bij een grotere dichtheid en een afnemende effectieve korrelgrootte (D_{10}). In goed gegradeerde gronden ontwikkelt zich een groter sterkte dan in uniforme gronden met dezelfde effectieve korrelgrootte.

De ontwikkelde schuif- en druksterkte zijn afhankelijk zijn van de mate van menging van het bodemmateriaal met het additief.

4. Toepassing van cement en bentoniet, de belangrijkste eigenschappen

4.1. Inleiding

In het vorige hoofdstuk is in paragraaf 3.5.3 geconcludeerd, dat cement-bentonietsuspensies het meest geschikte additief lijken. De voornaamste reden hiervoor is dat de permeabiliteit van de bodem geen beperkingen oplegt wat betreft de verspreiding, waardoor gekozen kan worden voor het goedkoopste additief. Naast het feit dat chemische oplossingen veel duurder zijn kunnen ze mogelijk giftig zijn en hebben ze in het algemeen een beperkte duurzaamheid. Daarnaast moet het verstevigde gebied enige sterkte kunnen ontwikkelen in verband met de vallende ankers. Cement-bentonietsuspensies kunnen dat.

In dit hoofdstuk zal meer aandacht worden besteed aan dergelijke suspensies. Alleen cement, of alleen bentoniet, zal waarschijnlijk niet worden gebruikt. Cement is te duur (zie tabel 3.2). Bentoniet is, net als een silicaat-bentonietsuspensie, een dikke brei. De sterkteontwikkeling van deze brei zal niet voldoen aan de gewenste mechanische eigenschappen van de deklaag.

In dit hoofdstuk zullen de stoffen, cement, bentoniet en zeewater en hun onderlinge beïnvloeding worden besproken

Als eerste wordt aandacht besteed aan cement (paragraaf 4.2), de verschillende cementsoorten en hun samenstelling. Ook wordt uitleg gegeven over het verloop van het hydratatieproces en de functie van het cement in dit onderzoek.

In paragraaf 4.3 worden de verschillende bentonietsoorten, de eigenschappen van het bentoniet en de functie van het bentoniet in dit onderzoek besproken.

Om een cement-bentonietsuspensie aan te maken, is water nodig. Aangezien het injecteren van het additief op zee gebeurt, is in paragraaf 4.4 aandacht besteed aan zeewater en de mogelijkheden om zeewater met de stoffen cement en bentoniet te mengen.

Vervolgens wordt in paragraaf 4.5 uitleg gegeven over cement-bentonietsuspensies en hun specifieke eigenschappen, zoals de viscositeitsontwikkeling, de stabiliteit, de verwerkbaarheid, en de groutsterkte. Tot slot worden mengselsamenstellingen besproken, die veel gebruikt worden bij het verdringingsgrouten.

Om bepaalde eigenschappen van de suspensie of het eindproduct te verbeteren, worden hulpstoffen toegepast. De hulpstoffen dienen voornamelijk om het reologische karakter en het opstijvingsgedrag te beïnvloeden. In paragraaf 4.6 wordt aandacht besteed aan plastificeerders, versnellers, recente ontwikkelingen en hulpstoffen, die gebruikt worden om uitspoeling te voorkomen.

Aan het eind van dit hoofdstuk volgt een samenvatting met de belangrijkste conclusies.

4.2. Cement

4.2.1. Algemeen

Voor het productieproces van cement en de chemische samenstelling wordt verwezen naar de relevante literatuur (o.a. Pratt, 1994). Cement is genormeerd volgens NEN 3550.

In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan:

- cementsoorten;
- hydratatie van cement;
- invloedsfactoren;
- functie van cement.

4.2.2. Cementsoorten

Algemeen

In principe kunnen de volgende cementsoorten worden onderscheiden.

- Portlandcement (CEM I)
- Hoogovencement (CEM III)
- Portlandvliegascement (CEM II/A of CEM II/B-V)
- Portlandcomposietcement (CEM II/B-M)
- Metselcement

Voor dit onderzoek is gekeken naar portlandcement en hoogovencement.

Portlandcement

Portlandcement wordt gemaakt door het branden van grondstoffen tot portlandcementklinker en deze daarna tot cement te malen onder toevoeging van een kleine hoeveelheid calciumsulfaat (CaSO_4) als bindtijdregelaar.

Hoogovencement

Hoogovencement wordt gemaakt door het tezamen malen van portlandcementklinker en gegranuleerde hoogovenslak onder toevoeging van een kleine hoeveelheid calciumsulfaat (CaSO_4) als bindtijdregelaar.

Bindtijdregelaar

Cement bevat een bindtijdregelaar in de vorm van calciumsulfaat (CaSO_4). Deze component zorgt ervoor dat de cement een normaal opstijvingsgedrag heeft. Omdat CaSO_4 in meerdere kristalstructuren kan voorkomen, wordt het SO_3 -gehalte gelimiteerd.

Samenstelling cementsoorten

In tabel 4.1 (CUR, 1997) is de samenstelling van de genoemde cementsoorten in Nederland weergegeven.

Cementsoort	Portlandcement (CEM I)	Hoogovencement (CEM III)
Component		
PC-klinker	96	17-31
Hoogovenslak		66-80
SO_3	3,5-4	4

Tabel 4.1: Samenstelling van Nederlandse cementsoorten (% m/m)

De cementsoorten zijn geclassificeerd in sterkteklassen. Deze klassen zijn 32,5, 42,5, 52,5 en 62,5. Dit komt overeen met de sterkte na 28 dagen uitharden in N/mm^2 ($1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ Mpa}$). Elke klasse is onderverdeeld in L, N en R, wat staat voor een lage, normale of hoge aanvangsterkte.

4.2.3. Hydratatie van cement

Algemeen

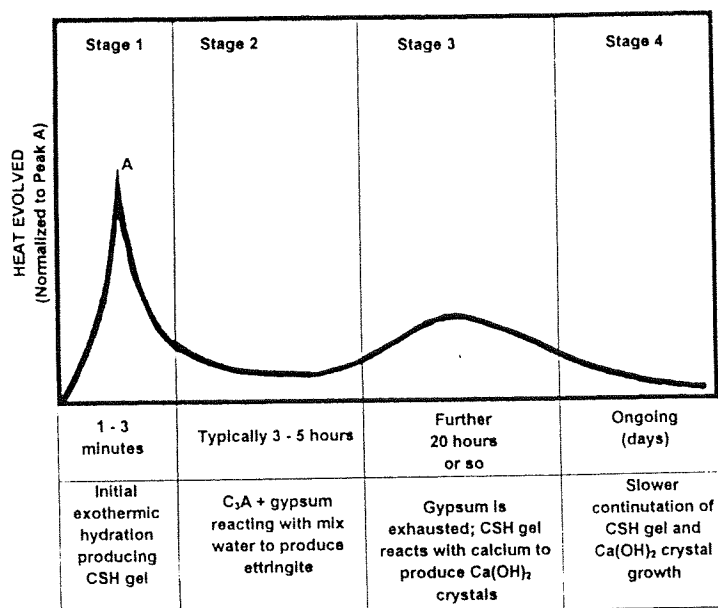
Tijdens het uitharden van cement vormen water- en cementmineralen een stijve matrix, genaamd calciumsilicaathydraat-gel (CSH-gel). Dit proces wordt hydratatie genoemd. In tabel 4.2 (Gause, 1997) staan de belangrijkste mineralen van de portlandcementklinker vermeld, die meedoen aan dit hydratatieproces.

Chemische naam	Volledige chemische formule	Verkorte chemische formule
Tricalciumsilicaat	3CaO SiO_2	C_3S
Dicalciumsilicaat	2CaO SiO_2	C_2S
Tricalciumaluminaat	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Calciumaluminiumferriet	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Tabel 4.2: Mineralogische samenstelling portlandcementklinker

Reactie

Door de reactie met water worden de klinkermineralen omgezet in hydraten. Hierbij zijn 4 fasen te onderscheiden (zie figuur 4.1 (Gause & Bruce, 1997)).



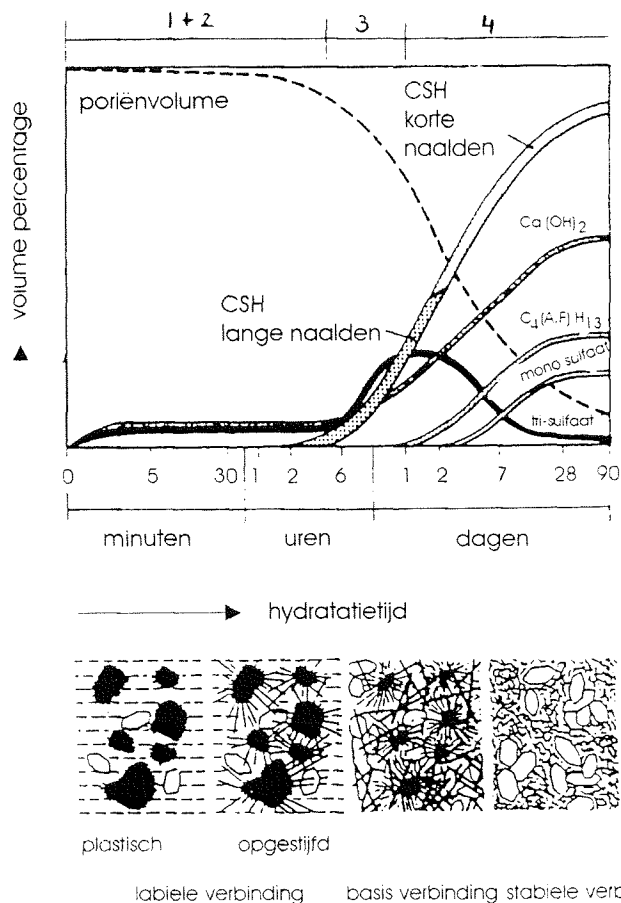
Figuur 4.1: Fasen tijdens de hydratatie van cement

1. Tricalciumaluminaat (C_3A) reageert als eerste zeer snel met water en veroorzaakt het begin van het opstijven van de specie. Hierbij ontstaan calcium-ionen in de oplossing, die een CSH-gel om de cementdeeltjes vormen. Bij dit proces komt veel warmte vrij.
2. Na enkele minuten neemt deze warmteontwikkeling af. Door het toevoegen van de bindtijdregelaar CaSO_4 (kalk, in het Engels 'gypsum') wordt een te snelle hydratatie voorkomen en daarmee vroegtijdig opstijven. Dit CaSO_4 reageert met opgelost aluminaat en water tot ettringiet, dat op het oppervlak van de reactieve cementdeeltjes kristalliseert. Hierdoor ontstaat een membraan dat vertragend werkt op de verdere hydratatie van het C_3A . Na verloop van tijd is het CaSO_4 opgebruikt. Het ettringiet rekristalliseert, waardoor de hydratatie van het cement voortgang kan vinden. Dit resulteert in het opstijven en afbinden van de specie. Na deze fase is de afzettijd van het cement voorbij. De viscositeit

van het cement is zo toegenomen dat het cement niet meer verwerkt en verplaatst kan worden. Deze fase van het hydratatieproces is bepalend voor de verwerkingstijd van het cementgrout.

3. Door hydratatie van C_3S en C_2S treedt verharding op onder verdere vorming van calciumsilicaathydraat (CSH). In deze fase vindt vervolgens kristallisatie plaats, waarbij lange naaldvormige kristallen worden gevormd (zie figuur 4.2). De fijne lange CSH-naalden overbruggen de met water gevulde ruimte tussen de korrels en vormen een verweven netwerk. Ook ontstaan er calciumhydroxide kristallen. In deze fase is het cement al afgezet, maar is het nog niet volledig uitgehard.
4. Door de verdergaande hydratatie worden de resterende poriën met korte naaldvormige CSH-structuren langzaam gevuld. Er treedt een verdere toename van de sterkte op. Aan het eind van deze fase wordt de eindsterkte bereikt en is de uithardtijd verstreken.

Het een en ander is in figuur 4.2 (CUR, 1997) schematisch weergegeven.



Figuur 4.2: Schematische weergave van de hydratatie van cement

4.2.4. Invloedsfactoren

Invloed maalfijnheid

De maalfijnheid wordt beschreven aan de hand van het specifieke oppervlak. Dit is het totale oppervlak van alle deeltjes per eenheid van gewicht van het materiaal. Het wordt uitgedrukt in m^2/kg . Het gemiddeld specifiek oppervlak wordt vaak bepaald met de proef van Blaine (NEN-EN 196-6). De maalfijnheid heeft invloed op de afzettijd, de uithardtijd en de verhardingssnelheid.

Door een grotere maalfijnheid zal de verhardingssnelheid gedurende de eerste 7 dagen toenemen als gevolg van het grotere specifieke oppervlak. Na verloop van tijd neemt het effect van de maalfijnheid op deze snelheid sterk af.

De maalfijnheid van het cement bepaalt of een bodem met een bepaalde permeabiliteit gepenetreerd kan worden, zonder dat de cementdeeltjes worden uitgefilterd. Een kleinere maalfijnheid verlaagt bovendien de viscositeit van het cement en verhoogt de eindsterkte. Conventionele cementsoorten hebben een specifiek oppervlak dat varieert van 250 tot 500 m²/kg en korrelgroottes die tussen de 1 en 60 micrometer liggen. Gronden met een permeabiliteit van 10⁻¹ m/s kunnen met conventionele cementsoorten gepenetreerd worden. Met een combinatie van cement en klei kunnen gronden met een permeabiliteit van 10⁻⁴ m/s gepenetreerd worden (Gallavresi, 1997).

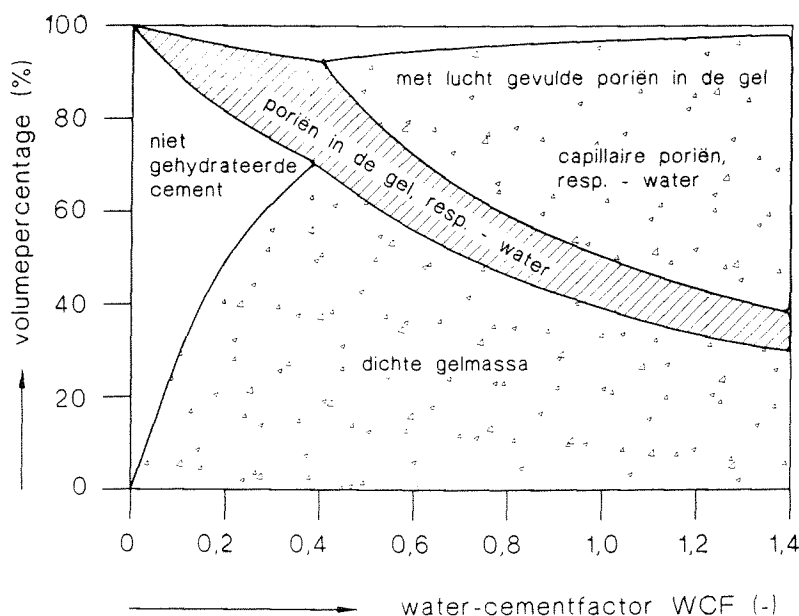
De laatste jaren zijn er ultra fijne cementsoorten ontwikkeld (Gause, 1997). Deze hebben een specifiek oppervlak van 625 tot 950 m²/kg en korrelgroottes van 0,1 tot 20 micrometer. De waarden van de cohesie en de viscositeit van deze cementen zijn veel kleiner dan voor conventionele cementen. Deze cementen zijn daarnaast stabiel en conventionele cementen. Deze cementsoorten zijn in staat om in fijne zanden met een permeabiliteit van 10⁻⁶ te penetreren. Voor meer informatie over deze ultrafijne cementsoorten wordt verwezen naar Schwarz & Krizek (1992) en Håkansson e.a. (1992).

Invloed water/cement-factor (W/C-factor)

Naast de maalfijnheid is de water/cement-factor bepalend voor de structuur en de eigenschappen van de cementsteen. De water/cement-factor wordt in het algemeen gedefinieerd in kg/kg.

Voor de hydratatie van cement is minimaal 40% water nodig ten opzichte van het gewicht van het gebruikte cement. Dit komt overeenkomt met een W/C-factor van 0,4.

Verhoging van de hoeveelheid water vergroot de afstand tussen de cementdeeltjes. Hierdoor vertraagt de hydratatie in de beginperiode. Fase 1 en 2 (zie figuur 4.1) duren langer. De eindsterkte zal bij een grotere hoeveelheid water (een hogere W/C-factor) sneller bereikt worden. Vooral fase 4 verloopt in dat geval sneller. De verdeling van de poriën in de cementsteen is afhankelijk van de water/cement-factor. Dit is te zien in figuur 4.3 (CUR, 1997).



Figuur 4.3: Invloed van water/cement-factor op verdeling van de verschillende soorten poriën in cementsteen.

Uit deze figuur blijkt dat het aantal poriën toeneemt bij een hogere W/C-factor. Een hogere W/C-factor geeft dan ook een grotere permeabiliteit en een lagere eindsterkte. In paragraaf 4.5.2 wordt verder ingegaan op deze eigenschappen en de invloed van de W/C-factor.

Effect van het toevoegen van hoogovenslak

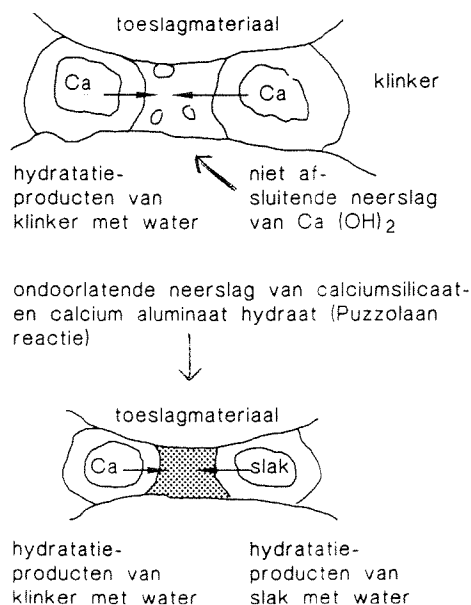
Bij hoogovencement wordt, naast portlandcementklinker en calciumsulfaat (CaSO_4), gegranuleerde hoogovenslak toegevoegd.

Hoogovenslak wordt gebruikt in cement, indien de chemische samenstelling voldoet aan de formule (NEN 3550):

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \geq 1 \quad 4.1$$

Bij de verharding van hoogovencement vindt een wisselwerking tussen twee reacties plaats. De eerste reactie is de hydratatie van de portlandcementklinker, waarbij onder andere calciumhydroxide vrij komt. Dit calciumhydroxide activeert de tweede reactie, de hydratatie van de hoogovenslak.

In het algemeen verhardt hoogovencement iets trager dan portlandcement. Er is geen verschil in eindsterkte. De hydratatiwarmte, die bij het verhardingsproces van hoogovencement wordt ontwikkeld, is lager dan die bij portlandcement. Het verhardingsproduct van hoogovencement bevat minder vrij calciumhydroxide. Hoogovencement leidt uiteindelijk tot een dichtere poriënstructuur dan portlandcement, dit is te zien in figuur 4.4. Voor meer informatie over het ontstaan van deze dichtere structuur wordt verwezen naar de CUR (1997).



Figuur 4.4: Hydratatie van portland- en hoogovencement

4.2.5. Conclusies wat betreft de cementsoort

- In dit onderzoek zal gebruik gemaakt worden van conventionele cementsoorten, daar deze goedkoper zijn dan ultra fijne cementsoorten. Er is aangenomen dat de permeabiliteit van het gefluidiseerde bodemmateriaal geen beperkingen oplegt voor de gewenste verspreiding. De cementdeeltjes zullen niet worden uitgefilterd. Als tijdens de experimenten blijkt dat deze aanname onjuist is geweest, zijn de ultra fijne cementsoorten een optie.

- Naar aanleiding van het bovenstaande kan geconcludeerd worden dat de permeabiliteit van het gesuspenderde materiaal minimaal 10^{-4} moet zijn. Onder water zal het additief tijdens de injectie echter het gefluïdiseerde bodemmateriaal verdringen, ongeacht de aanwezige permeabiliteit. De gesuspenderde zandkorrels kunnen namelijk geen weerstand bieden tegen de injectiedruk. Nadat het injecteren is gestopt, zullen de zandkorrels en het additief gezamenlijk bezinken. Uit de experimenten zal moeten blijken hoe dit bezinken verloopt en in hoeverre het additief en de zandkorrels tijdens het bezinken mengen.
- De maalfijnheid van de conventionele cementsoort die gebruikt wordt, is een gegeven. Deze maalfijnheid is afhankelijk van de leverancier. Tijdens de experimenten zal de maalfijnheid niet gevarieerd worden.
- Naast de maalfijnheid is de water/cement-factor maatgevend voor de structuur en de eigenschappen van de cementsteen. Een hogere W/C-factor geeft een grotere permeabiliteit en een lagere eindsterkte. De W/C-factor kan in dit onderzoek nog gevarieerd worden.
- Hoogovencement geeft een dichtere poriënstructuur van de cementsteen dan portlandcement.

4.2.6. Functie van cement

De functie van het cement in het additief is:

- het bereiken van de gewenste mechanische eigenschappen, zoals de druksterkte, de waterdoorlatendheid en de elasticiteitsmodulus.
- het vergroten van de weerstand tegen erosie.

De CSH-gel slaat neer op de bentonietdeeltjes en bedekt deze. Hierbij blijft de oorspronkelijke structuur behouden. Er kan een relatief sterk mengsel ontstaan. De CSH-gel lijmt als het ware de bentonietdeeltjes aan elkaar.

4.3. Bentoniet

4.3.1. Algemeen

Bentoniet is de naam van een delfstof die voornamelijk bestaat uit het kleimineraal montmorilloniet. Het is ontstaan door chemische en geologische processen op afzettingen van vulkanische asregens in zoute binnenmeren. Voor de vorming van de kleimineralen en de chemische samenstelling van bentoniet wordt verwezen naar de relevante literatuur (o.a. CUR, 1997). Bentoniet bezit de eigenschap om door waterabsorptie te kunnen zwellen.

De afgelopen jaren is bentoniet in combinatie met grond gebruikt om de flexibiliteit van de ondergrond te verbeteren en de permeabiliteit van de ondergrond te verminderen. Bentoniet kan alleen worden gebruikt of in combinatie met andere toevoegingen zoals cement.

In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan:

- soorten bentoniet;
- eigenschappen van bentoniet;
- functie van bentoniet.

4.3.2. Soorten bentoniet

Er bestaat calciumbentoniet en natriumbentoniet. Beide soorten bentoniet zijn sterk verschillend in eigenschappen. Dit geldt vooral voor het zwellend vermogen, dat bij natriumbentoniet aanmerkelijk groter is dan bij calciumbentoniet.

Calciumbentoniet is eenvoudig om te zetten in natriumbentoniet door het toevoegen van soda (Na_2CO_3). Hierbij worden de calciumionen van de montmorilloniet vervangen door natriumionen uit de soda. Door deze activering neemt het zwelvermogen aanmerkelijk toe. Calciumbentoniet in de niet-geactiveerde vorm wordt weinig toegepast.

4.3.3. Eigenschappen van bentoniet

Kaartenhuisstructuur

In water gedispergeerde bentonietdeeltjes hebben in eerste instantie de neiging om onder invloed van fysische krachten (Van der Waalskrachten) aan elkaar te kleven. Hierdoor klitten de deeltjes samen tot in het water zwevende vlokken die een netwerk kunnen vormen (coagulatie).

In water gedispergeerde deeltjes zijn vaak elektrisch geladen; gelijksoortige deeltjes hebben een gelijke lading en stoten elkaar af. De grootte van de reikwijdte van de elektrische lading op de deeltjes wordt weergegeven door de zogenaamde zeta-potentiaal. Deze is onder andere afhankelijk van de zoutconcentratie van de oplossing. Een geringe reikwijdte en een lage oppervlaktelading resulteren in een lage zeta-potentiaal. Bij een lage zeta-potentiaal verloopt de coagulatie meestal snel. Bij een te hoge zetapotential treedt geen coagulatie meer op.

Deeltjes van natriumbentoniet, natuurlijk of geactiveerd, zijn in water sterk negatief geladen, hierdoor treedt er geen coagulatie op.

De ontwikkelde stevigheid van bentonietsuspensies wordt toegeschreven aan een ongelijkmatige verdeling van de positieve en negatieve lading over de plaatvormige bentonietdeeltjes. Door deze ongelijkmatige verdeling zijn netwerkvormende interacties mogelijk. Het oppervlak van de bentonietdeeltjes is enigszins negatief geladen en de randen zijn enigszins positief geladen. Deze randen worden aangetrokken door de oppervlakken, waardoor een kaartenhuisstructuur ontstaat en de suspensie een gelvorm krijgt.

Volumevermeerdering

Door opname van water, het zogenaamde rijpen, kan de natriumbentoniet 5 tot 15 maal in volume toenemen. Deze volumevermeerdering is nodig voor het vormen van de kaartenhuisstructuur. Ten gevolge van deze volumevermeerdering en de vorming van een netwerk neemt de waterdoorlatendheid van een bentonietmassa af. De doorlatendheid is bij zout of verontreinigd water hoger dan bij zoet water. Het wateropnemend vermogen van natriumbentoniet is bovendien sterk afhankelijk van de pH-waarde van de omgeving (CUR, 1997).

Omgevingscondities

De omgevingscondities kunnen de eigenschappen van de bentonietsuspensie sterk beïnvloeden. Binnen dit onderzoek is hierbij vooral van belang, dat de aanwezigheid van oplosbare zouten in het aanmaakwater zorgt voor vermindering van het waterabsorptievermogen van de bentoniet.

4.3.4. Functie van bentoniet

Het toevoegen van bentoniet aan een cementsuspensie heeft de volgende gevolgen (Bruce e.a., 1997):

- Er ontstaat een stabiele, samenhangende suspensie, met een vermogen om cement- en gronddeeltjes te dragen. Hierdoor worden en blijven de deeltjes gelijkmatig over het volume verdeeld.
- De weerstand tegen uitspoeling neemt toe.
- De grensschuifspanning en de viscositeit van de suspensie nemen toe.

- De permeabiliteit wordt gereduceerd.
- De totale hydratatie tijd (uithardtijd) van het cement neemt toe.
- De afzettijd neemt af (fase 1 en 2).
- De ontwikkelde sterkte neemt af (doordat een hogere W/C-factor gebruikt wordt).
- De vervormingscapaciteit neemt toe.

Voor dit onderzoek zijn vooral de eerste drie eigenschappen van het bentoniet van belang.

4.4. Zeewater

4.4.1. Algemeen

Voor het aanmaken van een cement-bentonietsuspensie is water nodig. Deze cement-bentonietsuspensie zal offshore worden geïnjecteerd tussen gefluidiseerd bodemmateriaal. In eerste instantie wordt ervan uitgegaan dat er offshore onvoldoende zoet water aanwezig is om de cement-bentonietsuspensie aan te maken. Dit zal dus moeten gebeuren met behulp van zeewater, als dat mogelijk is. Vooral de mogelijkheid om bentoniet met zout water aan te maken lijkt twijfelachtig naar aanleiding van datgene wat in paragraaf 4.3.3. is besproken. In paragraaf 4.4.4 wordt hier op ingegaan.

In deze paragraaf wordt verder aandacht besteed aan:

- samenstelling van zeewater;
- cement en zeewater;
- bentoniet en zeewater;
- functie van zeewater.

4.4.2. Samenstelling van zeewater

In zeewater zijn opgeloste zouten in de vorm van ionen aanwezig. In tabel 4.2 (Duxbury, 1996) is een overzicht gegeven van de voornaamste bestanddelen van zeewater. Hier is te zien dat zes bestanddelen, namelijk chloride, natrium, sulfaat, magnesium, calcium en kalium, samen 99% van de zouten in het zeewater vormen. Natrium- en chloride-ionen vormen samen 86% van de zoutionen die in het zeewater aanwezig zijn. Alle andere elementen die in het zeewater zijn opgelost, zijn aanwezig in concentraties van minder dan 1 deeltje per miljoen deeltjes. Deze elementen worden spoorelementen genoemd.

Constituent	Symbol	g/kg in Seawater ¹	Percentage by Weight
Chloride	Cl ⁻	19.35	55.07
Sodium	Na ⁺	10.76	30.62
Sulfate	SO ₄ ²⁻	2.71	7.72
Magnesium	Mg ²⁺	1.29	3.68
Calcium	Ca ²⁺	0.41	1.17
Potassium	K ⁺	0.39	1.10
Bicarbonate	HCO ₃ ⁻	0.14	0.40
Bromide	Br ⁻	0.067	0.19
Strontium	Sr ²⁺	0.008	0.02
Boron	B ³⁺	0.004	0.01
Fluoride	F ⁻	0.001	0.01
Total		~ 35.00	99.99

¹Salinity = 35‰.

Tabel 4.3: Voornaamste bestanddelen van zeewater

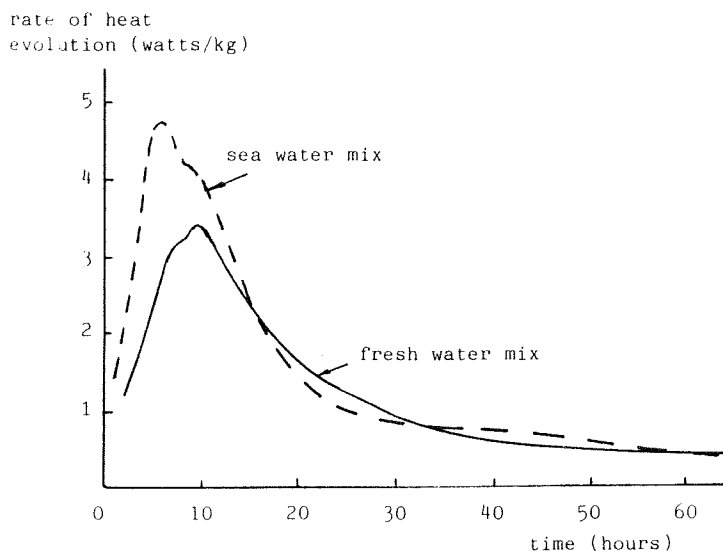
Zeewater is een goed gemengde oplossing, waardoor de onderlinge verhouding van de voornaamste bestanddelen van het zeewater overal in de oceaan gelijk is. Het zoutgehalte in de oceanen kan variëren van 33 tot 37 ‰, afhankelijk van de hoeveelheid zoetwater die ter plaatse wordt toegevoegd en de plaatselijke verdamping. Het gemiddelde zoutgehalte van de oceanen is 35 ‰. Dit betekent dat zeewater bevat 96,5% water en 3,5% opgeloste stoffen bevat.

Daarnaast bevat het oceaanwater nog een grote variëteit aan voedingsstoffen en organische substanties. Voedingsstoffen zijn aanwezig in de vorm van nitraat- (NO_3^-), fosfaat- (PO_4^{3-}) en silicaationen (SiO_4^-). Organische substanties zijn eiwitten, koolhydraten, vetten, vitaminen, hormonen en hun afbraakproducten. Deze stoffen zijn slechts in lage concentraties in het oceaanwater aanwezig en worden verder niet relevant geacht voor dit onderzoek.

4.4.3. Cement en zeewater

Het gebruik van zeewater als aanmaakwater voor cement geeft een versnelling van het uithardproces en een verhoging van de hydratatiwarmte in de eerste 3 fasen. Dit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van calciumchloride in het zeewater, dat werkt als een versneller (zie paragraaf 4.6.3). In figuur 4.5 (Pratt, 1997) is het versnellende effect van het zeewater te zien.

Voor de totale uithardtijd en voor de eindsterkte maakt het niet uit of het cement met zeewater of met zoet water wordt aangemaakt.



Figuur 4.5: Het versnellende effect van zeewater op de hydratatie van cement

4.4.4. Bentoniet en zeewater

De literatuur over de combinatie van bentoniet en zeewater is beperkt. In de literatuur bestaan voornamelijk gegevens over cement-bentonietsuspensies in combinatie met zeewater.

Naar aanleiding van een gesprek met de heer Groen van de CEBO, een leverancier van zand-bentoniet, is het volgende geconcludeerd:

*Bentoniet is in zeewater niet in staat te zwellen. De bentoniet korrels blijven bij elkaar op de bodem van de menginstallatie liggen. Er zal geen kaartenhuisstructuur ontstaan. **Het bentoniet moet dus met behulp van zoet water worden aangemaakt** (zie paragraaf 4.5.1).*

4.4.5. Functie

Bij het aanmaken van een bentonietsuspensie heeft het aanmaakwater de functie om tezamen met de bentoniet een stabiele suspensie te vormen. Een deel van het water wordt gebonden aan de bentonietdeeltjes. Nadat het cement is toegevoegd, is het water nodig voor de hydratatie van het cement.

4.5. Cement-bentonietsuspensies

4.5.1. Algemeen

De hiervoor besproken basismaterialen, eventueel in combinatie met additieven, dienen:

- in de vloeibare fase tot een goed verwerkbaar, stabiel mengsel gecombineerd te worden;
- in de opstijvingsfase stabiel te blijven;
- in de verharde fase aan de gewenste eisen met betrekking tot de eigenschappen te voldoen.

In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan:

- de combinatie van cement en bentoniet;
- de eigenschappen van cementsuspensies met toevoeging van bentoniet;
- cement-bentonietsuspensie en zeewater;
- veel gebruikte mengselsamenstellingen.

4.5.2. De combinatie van cement en bentoniet

Aanmaken

Het aanmaken van een cement-bentonietsuspensie gebeurt door allereerst bentoniet in (zoet) water enige uren te laten rijpen tot een stabiele suspensie. Vervolgens wordt het cement in korrelvorm toegevoegd.

In dit project kan de bentoniet op een van de volgende manieren met zoet water worden aangemaakt:

- *Bij de kust aanmaken met zoet water en vervolgens per schip naar de locatie van de trencher vervoeren.*
- *Aan boord aanmaken met zoet water uit geïnstalleerde tanks op het werkschip.*

Beide methoden brengen extra kosten met zich mee.

Met behulp van de experimenten kan bepaald worden hoeveel m^3 additief per m^3 bodemmateriaal nodig is. Vervolgens kan dan berekend worden hoeveel m^3 bentonietsuspensie zal moeten worden aangemaakt voor een bepaald project.

Zowel het mengen van de bentoniet met water, als van het cement met de bentonietsuspensie geschiedt met hoge toeren mixers. De viscositeit van de suspensie wordt door de mengenergie beïnvloed. Meer mengenergie leidt tot een lagere viscositeit (CUR, 1997).

Reactie van cement en bentoniet

De toevoeging van Ca^{2+} -ionen uit het cement leidt in het bijzonder bij geactiveerde bentoniet tot een uitwisseling tussen Na- en Ca-ionen. Het resultaat van deze uitwisseling is dat de zeta-potentiaal wordt gereduceerd en coagulatie kan optreden. De bentonietvlokken die hierbij ontstaan, geven de suspensie stevigheid en draagvermogen. Dit proces, dat ontstaat door de toevoeging van cement, verhoogt de viscositeit van de suspensie.

Invloed van gebruikte bentoniet- en cementsoort

De soort bentoniet die wordt gebruikt, heeft tijdens de eerste twee fases van het hydratatieproces van het cement invloed. In die fases zijn de soort bentoniet en de hoeveelheid bentoniet die wordt gebruikt bepalend voor de viscositeit en de stabiliteit van de suspensie. Op de eigenschappen van het eindproduct heeft de gebruikte bentonietsoort weinig invloed.

Omdat het niet mogelijk is de specifieke kwaliteitseisen van een bentonietsoort te definiëren, is tot op heden altijd empirisch onderzoek nodig om de geschiktheid van deze soort vast te stellen. In Nederland wordt geactiveerde natriumbentoniet toegepast.

De toegepaste cementsoort, portland of hoogoven, leidt tot verschillen in het opstijvingsgedrag van de suspensie en in de eigenschappen van het eindproduct. Dit is besproken in paragraaf 4.2.4.

In combinatie met bentoniet wordt in het algemeen *hoogovencement* gebruikt. Dit geeft betere mechanische eigenschappen (Bruce e.a., 1997). De heer Groen van de CEBO beaamt dit. Bovendien bleek uit een gesprek met de heer Gladines van het ENCI dat hoogovencement goedkoper is dan portlandcement.

4.5.3. Eigenschappen cementsuspensies met toevoeging van bentoniet

Viscositeitsontwikkeling

In hoofdstuk 3 (paragraaf 3.5.4) is het verschil tussen Newtonse en Binghamse vloeistoffen besproken. Ook is de ontwikkeling van de viscositeit van een cementsuspensie in de tijd (afzetgedrag) aan bod gekomen. Gemengd met zand zal deze viscositeit zich op dezelfde manier ontwikkelen.

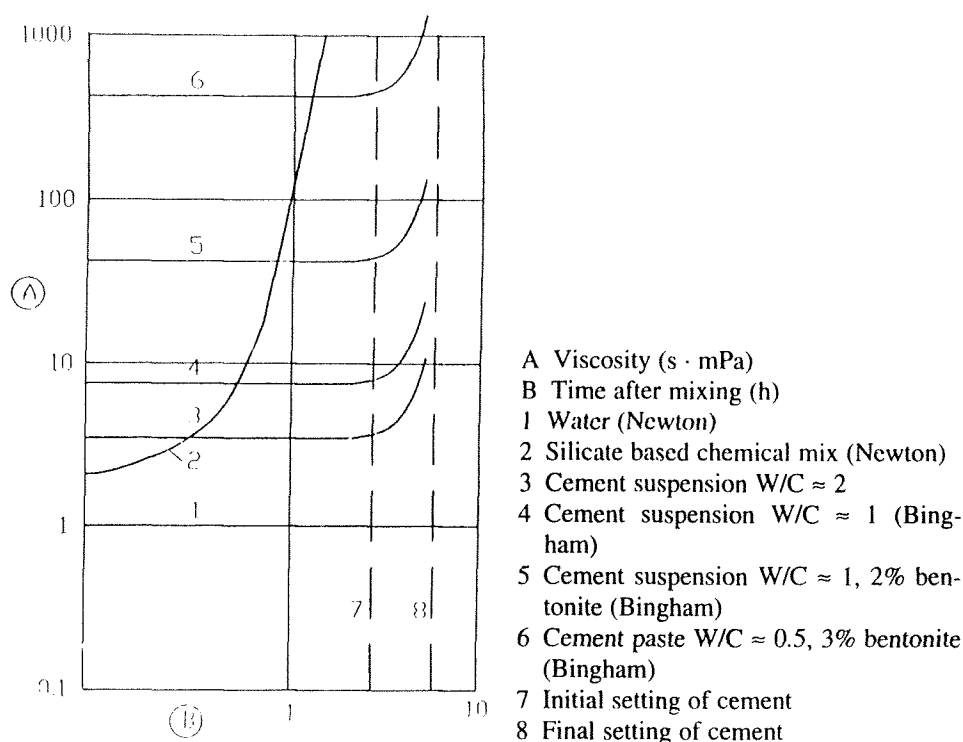
In dit onderzoek wordt gebruikt gemaakt van suspensies. Dit zijn over het algemeen Binghamse vloeistoffen. De grensschuifspanning van deze vloeistoffen heeft invloed op de injectieprocedure. De injectiedruk moet namelijk hoog genoeg zijn om deze grenswaarde te overschrijden. Vloeistoffen met een grensschuifspanningen tot 50 Pa kunnen met standaardmaterieel verwerkt worden.

Cementsuspensies met een water/cement-factor < 2 hebben duidelijk een Bingham's gedrag. Cementsuspensies met een water/cement-factor van 2 zitten tussen Newtonse en Binghamse vloeistoffen in. Door sedimentatie van de cementdeeltjes zal een laag water op de suspensie ontstaan. Deze laag zal zich als een Newtonse vloeistof gedragen, terwijl de rest van de suspensie Bingham's gedrag vertoont. Door de toevoeging van bentoniet aan de cementsuspensie vermindert de sedimentatie. Cement-bentoniesuspensies met een W/C-factor > 2 zullen zich dan ook als een Binghamse vloeistof gedragen. De grensschuifspanning van dergelijke suspensies ligt tussen de 1 Pa (suspensies met W/C=1) en de 30 Pa (een pasta van W/C=0,5 en 3% bentoniet).

In figuur 4.6 (Kutzner, 1997) is opnieuw de ontwikkeling van de viscositeit in de tijd aangegeven. In deze figuur is nu ook de invloed van de cementconcentratie en het toegevoegde percentage bentoniet te zien. Gedurende de eerste 2 tot 3 uur is de viscositeit van cementsuspensies ongeveer constant. Daarna begint het uitharden, waarbij de viscositeit snel toeneemt tot een eindwaarde. Het moment waarop de viscositeit zijn eindwaarde heeft bereikt, wordt de afzettijd (fase 1 en 2) genoemd. Nadat de eindviscositeit is bereikt en de afzettijd voorbij is, zal de sterkteontwikkeling van het cement nog doorgaan (fase 3 en 4). Een hoger cementpercentage verlengt deze uithardtijd. Als de suspensie wordt verdund door het aanwezige water zal het uitharden sneller verlopen.

In de figuur kan worden afgelezen dat de beginviscositeit van cementsuspensies afhankelijk is van de W/C-factor en van de toegevoegde hoeveelheid bentoniet. Hierbij geldt dat een suspensie met meer deeltjes (een hogere cementconcentratie) een grotere viscositeit heeft. Een groter percentage bentoniet in de suspensie vergroot de viscositeit. De waarden uit de figuur zijn voorbeelden van gemiddelde waarden. De exacte waarden moeten voor elke suspensie op zich bepaald worden.

Voor meer informatie over de gewenste (begin)viscositeit wordt verwezen naar de verwerkbaarheid, verderop in deze paragraaf.



Figuur 4.6: Viscositeitsontwikkeling

Viscositeit met het oog op voorkomen ontmenging en verdunning bij een overschot aan water

Wanneer onder een betonnen offshore constructie op zee wordt gegrout, is een hoge cohesie van de groutvloeistof gewenst (Kennedy, 1978). Deze cohesie zorgt ervoor, dat er een groutfront gevormd kan worden, waarmee het zeewater verplaatst kan worden. Het is ongewenst dat het grout met het zeewater mengt en daardoor verdunt. Naast een grote cohesie is er een lage viscositeit gewenst in verband met de verwerkbaarheid. Er moet een optimum gevonden worden.

In dit onderzoek wordt het additief ook op zee, onder water geïnjecteerd. Hierbij is het ook ongewenst dat het grout met het zeewater mengt en daardoor verdunt. Het additief moet dus enige cohesie hebben om dit te voorkomen.

Naar aanleiding van een gesprek met de heer Groen van de CEBO en enkele experimenten aldaar, is geconcludeerd dat cement-bentonietsuspensies voldoende samenhang hebben om niet vanzelf met het zeewater te mengen. Door de toevoeging van de bentoniet zijn de cohesie en viscositeit van het additief zo groot, dat er geen ontmenging optreedt. Hierbij is het van belang dat er niet actief gemengd wordt, wanneer de suspensie tussen het bodemmateriaal wordt geïnjecteerd. Bij actief mengen zal de suspensie wel verdunnen (de W/C-factor neem toe). Dit heeft gevolgen voor de eigenschappen van het verstevigde gebied (afname van de sterkte). Cementsuspensies, zonder bentoniet, hebben nauwelijks samenhang en zullen, als ze onder water geïnjecteerd worden, direct mengen met het zeewater.

In verband met de menging van het additief met het gefluidiseerde korrelmateriaal zijn een lage cohesie en viscositeit gewenst. Een te hoge cohesie en viscositeit kunnen niet alleen het zeewater, maar eventueel ook de korrels verdringen. Het additief zal niet mengen met het zeewater, maar ook niet met het korrelmateriaal. Als het mogelijk is, moet hier een optimum gevonden worden.

Zoals al eerder aan de orde kwam (4.2.5), wordt er echter verwacht, dat het additief tijdens de injectie onder water, het gefluidiseerde bodemmateriaal zal verdringen. Dit gebeurt ongeacht de

aanwezige permeabiliteit en cohesie en viscositeit van het additief. De geïnduseerde zandkorrels kunnen namelijk geen weerstand bieden tegen de injectiedruk. Nadat het injecteren is gestopt, zullen de zandkorrels en het additief gezamenlijk bezinken. De viscositeit en cohesie van het additief zijn op dat moment bepalend voor draagvermogen van het additief. Dit draagvermogen zorgt ervoor dat de zandkorrels na het bezinken door het additief gedragen zullen worden of dat de zandkorrels in (tussen) het additief kunnen bezinken en er een mengsel ontstaat. Ook in dit verband zijn een lage cohesie en viscositeit gewenst.

Uit de experimenten zal moeten blijken:

- *hoe het gezamenlijke bezinken verloopt;*
- *in hoeverre het additief en de zandkorrels mengen;*
- *wat de invloed van het draagvermogen van het additief op dit gezamenlijk bezinken en mengen is;*
- *wat de invloed van de dichtheid van het geïnduseerde materiaal, op het moment dat het additief wordt geïnjecteerd, op dit gezamenlijk bezinken en mengen is;*
- *welke invloed dit bezinken en dit mengen op de eigenschappen van het eindproduct heeft.*

Het zou mooi zijn als er een cohesie en viscositeit gevonden kunnen worden, waarbij de ontmenging en verdunning van het additief minimaal zijn, maar de menging met het korrelmateriaal maximaal.

Verwerkbaarheid

In hoofdstuk 3 (paragraaf 3.5.4) is uitgelegd wat bedoeld wordt met de verwerkingstijd.

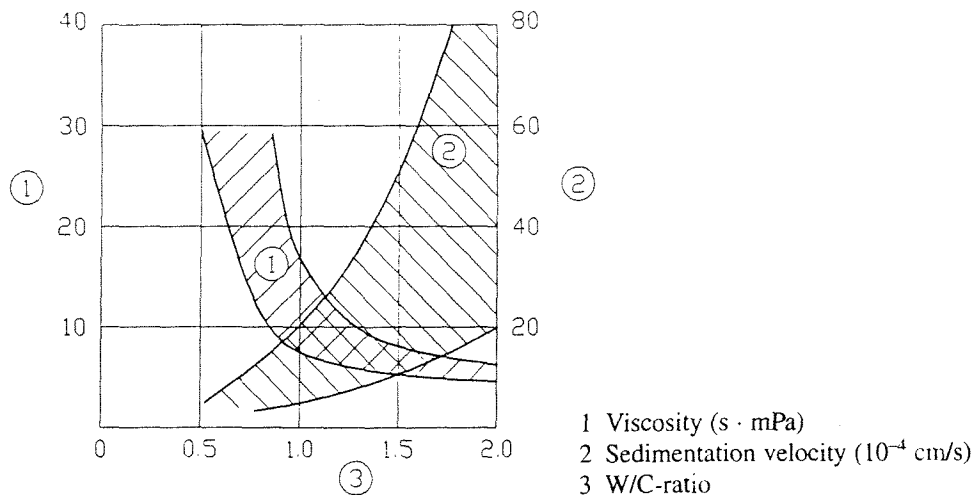
Een mengsel is verwerkbaar als de Marsh-viscositeit kleiner is dan 60s/liter (CUR, 1997 en Bruce e.a., 1997).

Uitgedrukt in s.mPa betekent dit dat de beginviscositeit van deze suspensies kleiner moet zijn dan 100 s.mPa, om praktisch verwerkbaar te zijn. Het mengsel blijft verwerkbaar en dus verpompbaar totdat het uitharden begint. Hierbij neemt de viscositeit snel toe tot een eindwaarde. Vloeistoffen met een viscositeit tot ongeveer 800 à 1000 s.mPa kunnen met standaard materiaal verwerkt worden. In het algemeen duurt de verwerkingstijd 2 tot 4 uur (zie figuur 4.6). Door gebruik te maken van hulpstoffen kan deze tijd gevarieerd worden. Deze hulpstoffen worden besproken in paragraaf 4.6.

Om verwerkbaar te zijn mag de grensschuifspanning van suspensies niet groter zijn dan 50 Pa (Kutzner 1997) en mogen de stroomomstandigheden geen essentiële veranderingen ondergaan, tijdens het pompen. Zulke veranderingen kunnen ontstaan ten gevolge van coagulatie en sedimentatie.

In figuur 4.7 (Kutzner, 1997) staan de gemiddelde beginviscositeit en de sedimentatiesnelheid van cementsuspensies aangegeven. In deze figuur wordt de viscositeit in s.mPa uitgedrukt. De beginviscositeit neemt snel af bij een toenemend watergehalte. Dit figuur geldt voor cementsuspensies met W/C-factoren tussen de 0,7 en 2. Een hoger watergehalte laat de viscositeit niet verder afnemen. Suspensies met een lagere W/C-factor gedragen zich als een soort pasta's met een viscositeit van 300 tot 500 s.mPa. Deze pasta's zijn lastig te verpompen.

Het uitharden van cement begint vanaf het moment dat er aanzienlijke hydratatie gaat plaatsvinden. De viscositeit neemt dan in principe snel toe. Cementsuspensies die gebruikt worden voor grouten, worden voortdurend geroteerd met behulp van een agitator. Hierdoor blijven deze suspensies, zelfs nadat het hydratatieproces is begonnen, verpompbaar. Het verpompen en injecteren van suspensies waarbij het hydratatieproces al is begonnen, heeft echter een negatieve invloed op de eindsterkte van het gegroute materiaal. Het is hierdoor niet gewenst om reeds hydraterende suspensies te gebruiken, ook al zijn deze nog steeds verpompbaar (CUR, 1997).



Figuur 4.7: Gemiddelde viscositeit en sedimentatiesnelheid van cementsuspensies

Verwerkbaarheid op zee

Wanneer onder een betonnen offshore constructies op zee wordt gegroot, is een afzettijd van minimaal twee uur vereist (Kennedy, 1978). Hierdoor is het mogelijk dat de pompoperatie tijdelijk stil kan liggen zonder dat de injectieleidingen worden geblokkeerd.

In dit onderzoek wordt het additief ook op zee geïnjecteerd. Cement-bentoniesuspensies voldoen in het algemeen aan deze eis.

Daarnaast moet bij injectiewerkzaamheden op zee het aantal bestanddelen van het grout zo veel mogelijk beperkt worden. Hierdoor kunnen problemen die kunnen optreden bij het (droog)mixen, transporteren en opslaan worden beperkt. Deze stappen zijn namelijk bijzonder kritiek in de offshore-logistiek.

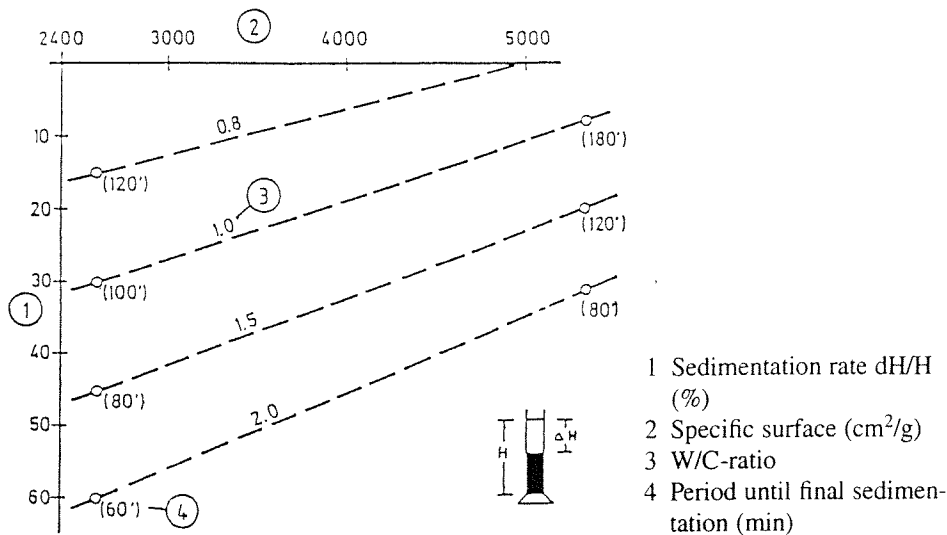
Stabiliteit

Een stabiel mengsel is een homogeen mengsel, met constante eigenschappen. In hoofdstuk 3 (paragraaf 3.5.4) is uitgelegd dat sedimentatie en coagulatie zorgen voor instabiliteit van een suspensie. Een homogeen en samenhangend mengsel is gewenst in verband met de verwerkbaarheid van de suspensie en de eigenschappen van het eindproduct.

In het algemeen wordt aangenomen dat een verhouding van $dH/H < 10\%$ aangeeft dat een suspensie stabiel is.

In figuur 4.8 (Kutzner, 1997) staan de gemiddelde sedimentatieshoeveelheden van cementsuspensies aangegeven, gerelateerd aan de W/C-factor en de maalfijnheid van het cement. De hoeveelheid sedimentatie neemt af, bij een afnemende W/C-factor. De tijdsduur, waarin de sedimentatie plaatsvindt, neemt toe met een afnemende W/C-factor. Er bevinden zich in dat geval meer cementdeeltjes in de suspensie, waardoor het bezinken langzamer verloopt.

Uit de figuur blijkt dat alleen suspensies met een W/C-factor kleiner dan 0,8 en suspensies bestaande uit microfijn cement voldoen aan de eis $dH/H < 10\%$.



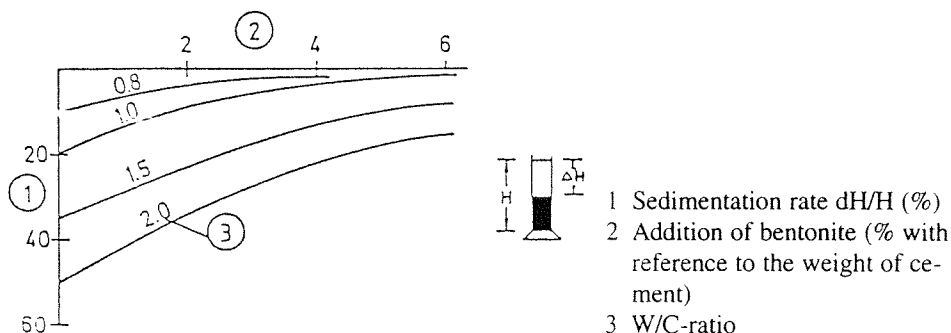
Figuur 4.8: Gemiddelde sedimentatiehoeveelheden van cementsuspensies

Bij een lage W/C-factor is de gebruikte cementconcentratie groot. Een grotere cementconcentratie brengt hogere kosten met zich mee. Hetzelfde geldt voor een fijnere maalfijnheid. Om deze reden hebben cementen die in het algemeen worden gebruikt bij grouten, een grotere W/C-factor en een grovere maalfijnheid. Hierdoor zijn ze van zichzelf instabiel. Deze cementen moeten gestabiliseerd worden.

In dit onderzoek zal ook gebruik gemaakt worden van dergelijke suspensies.

Om dit grout te stabiliseren wordt gebruik gemaakt van bentoniet. Normaal wordt tussen de 1 en 6 % bentoniet toegevoegd (in gewichtsverhouding ten opzichte van het gewicht van de totaal gebruikte hoeveelheid water voor het aanmaken van de cement-bentoniet-suspensie). De hoeveelheid bentoniet die moet worden toegevoegd, is afhankelijk van de gewenste eigenschappen van het eindproduct.

In figuur 4.9 (Kutzner, 1997) is de gemiddelde hoeveelheid sedimentatie te zien van cementsuspensies, die door het toevoegen van bentoniet zijn gestabiliseerd. Deze figuur geldt voor cementdeeltjes met een specifiek oppervlak van $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ (conventioneel cement). In de figuur is het toegevoegde percentage bentoniet aangegeven als gewichtsverhouding ten opzichte van het gewicht van het gebruikte cement.



Figuur 4.9: Gemiddelde hoeveelheid sedimentatie van gestabiliseerde suspensies.

In deze figuur is te zien dat de hoeveelheid sedimentatie, bij een W/C-factor van 1, afneemt van 20% tot 10 en 5%, door het toevoegen van respectievelijk 2 en 4% bentoniet. Deze afname wordt veroorzaakt door het absorptievermogen van de bentoniet en het grotere aantal fijne deeltjes in de suspensie.

Het verlies aan sterkte van het uitgeharde materiaal, dat kan ontstaan door het toevoegen van bentoniet, is verwaarloosbaar tot een toevoeging van 6% bentoniet. Door de toevoeging van bentoniet nemen de

viscositeit en cohesie van de suspensie toe. Dit is nadelig voor de verwerkbaarheid, maar voordelig in verband met de weerstand tegen uitspoeling en ontmenging.

Stabiliteit in dit onderzoek

Elke gestabiliseerde suspensie moet in een laboratorium getest worden om de precieze stromings- en stabilisatie-eigenschappen te bepalen. Hierbij kan bepaald worden in hoeverre de eis van $dH/H < 10\%$ noodzakelijk is in verband met de verwerkbaarheid en de eigenschappen van het eindproduct.

Aangezien het onbekend is in welke mate het additief zal mengen met het bodemmateriaal, is het mogelijk dat enige sedimentatie van het additief terwijl het zich tussen het korrelmateriaal bevindt, nauwelijks nadelig effect heeft op de sterkteontwikkeling van het eindproduct.

Duurzaamheid

In hoofdstuk 3 (paragraaf 3.5.4) is uitgelegd wat wordt verstaan onder duurzaamheid.

De gevoeligheid van cement en bentoniet in cement-bentonietschermen voor diverse chemicaliën is in tabel 4.4 weergegeven.

Duurzaamheid in dit onderzoek wat betreft de aantasting door de agressieve chemicaliën

Voor dit onderzoek is in tabel 4.4 vooral de invloed van het zeewater op het filtraatverlies van belang. Het filtraatverlies is een maat voor de stabiliteit van de suspensie. Het zeewater heeft een gering tot matig effect op de stabiliteit van de suspensie.

De invloed van andere stoffen zal verder buiten beschouwing worden gelaten. Hierbij is aangenomen dat de invloed van stoffen die zich in het zeewater bevinden, niet op zich hoeven te worden bekeken. Deze stoffen zullen namelijk alleen als onderdeel van het zeewater voorkomen. Ook de invloed van temperatuur en elektrische stroming door het materiaal is verder buiten beschouwing gelaten. Andere gegevens uit de tabel zijn niet van belang voor dit onderzoek.

verontreinigingen ¹⁾	dikte filterkoek ²⁾	stabiliteit filterkoek ³⁾	filtraat- verlies ⁴⁾	Marsh- viscositeit ⁵⁾
zouten				
calcium of magnesium		—	—	
calcium of magnesium (bij hoge concentratie)	--	--		
natriumsulfaat				—
natriumchloride			—	
magnesiumsulfaat			--	
calciumsulfaat				--
calciumchloride (bij hoge concentratie)			---	
ammoniumnitraat	--	--		
zoutzuur (1%)		—	—	
zwavelzuur (1%)	--	—	—	
zoutzuur (5%)		-- /---	-- /--- *	
natriumhydroxide (1%)	--	--		
calciumhydroxide (1%)	--	--		
natriumhydroxide (5%)	--	-- /--- *		
zeewater		--	-- /---	
brine		—	—	
mijnwater, pH = 3 (ijzersulfaat)	—	—		
organisch ligniet	--	—		
alcohol		---	-- /---	
fenol			—	—
trichlooretheen	--			
cocktail oplossing (Griftpark)		---		
benzine		--	--	
olie		--	--	

¹⁾ — = gering effect

-- = matig effect

--- = sterk effect

* = gedeeltelijke oplossing van het mengsel.

²⁾ filterkoek: membraanachtige laag van slecht doorlatend vast materiaal op sleufwand.

³⁾ stabiliteit filterkoek: de mate waarmee de filterkoek tegen de sleufwand blijft staan.

⁴⁾ filtraatverlies: maat voor stabiliteit van de suspensie.

⁵⁾ Marsh-viscositeit: uitlooptijd uit de Marsh-trechter in seconden.

Een vak zonder aanduiding betekent dat geen informatie bekend is.

Tabel 4.5: De gevoeligheid van cement en bentoniet in cement-bentonietsschermen voor diverse chemicaliën

Het additief mag niet oplossen in, reageren of mengen met het aanwezige (zee)water. Dit geldt zowel tijdens het injecteren als in de uitgeharde fase. Om dit tijdens het injecteren te bereiken kunnen hulpstoffen gebruikt worden. Deze worden besproken in paragraaf 4.6. In de uitgeharde fase zal er geen reactie met het water optreden.

Bruce e.a.(1997) vermelden dat klei (en dus ook bentoniet) onoplosbaar is. De kleideeltjes vormen een beschermende laag om de cementdeeltjes, waardoor wordt voorkomen dat de cementdeeltjes door het water worden meegenomen. Grouts bestaande uit cement en klei zijn hierdoor redelijk duurzaam. Dit zou een extra voordeel kunnen zijn van het gebruik van bentoniet.

Zoals al in de paragraaf over de 'viscositeit met het oog op voorkomen ontmenging en verdunning bij een overschot aan water' is vermeld, vergroot de toevoeging van bentoniet de viscositeit en cohesie van het additief. Hierdoor zal het additief minder snel mengen met het omgevingswater.

De weerstand die de verstevigde bodem tegen belasting heeft, zal tijdens de experimenten bepaald worden.

Permeabiliteit en interne erosie

In hoofdstuk 3 (paragraaf 3.5.4) is uitgelegd wat bedoeld wordt met de permeabiliteit en in hoeverre de permeabiliteit relevant is voor dit onderzoek.

De permeabiliteit van een gegroute gebied (dat bepaalde bodemeigenschappen heeft) is afhankelijk van:

- de permeabiliteit van de suspensie (deze wordt voornamelijk bepaald door het gebruikte bentonietgehalte);
- de W/C-factor bij het begin van het uitharden;
- de mate waarin het grout zich tussen het bodemmateriaal heeft verspreid;
- de mate waarin de poriën zijn opgevuld.

Door een cementgrout met behulp van straalgrouten aan een zandbodem toe te voegen, kan een permeabiliteit in de orde van 10^{-8} tot 10^{-9} m/s worden bereikt (Kutzner, 1997). Het toevoegen van bentoniet zorgt voor een nog grotere afname van de permeabiliteit, in de orde van 10^{-9} tot 10^{-11} m/s. Een reductie van de permeabiliteit met een factor van 10^{-4} tot 10^{-5} wordt gezien als een goed resultaat. Bij gebruik van hoogovencement ontstaat een kleinere permeabiliteit dan bij portlandcement (CUR, 1997). Een hoger slakgehalte geeft bovendien een kleinere permeabiliteit.

Permeabiliteit in dit onderzoek bij beperkte menging

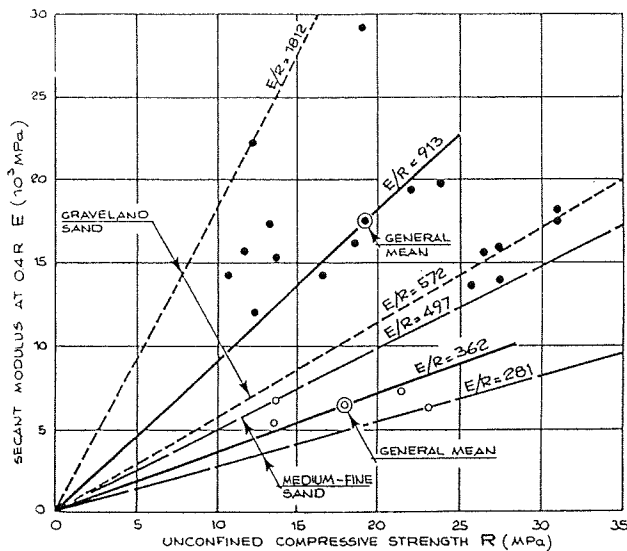
Zoals al in deze paragraaf, onder het kopje 'viscositeit met het oog op voorkomen ontmenging en verdunning bij een overschot aan water', en in paragraaf 4.2.5 aan de orde is gekomen, is in dit onderzoek de mate waarin het additief zich zal mengen met het gefluidiseerde bodemmateriaal een onzekere factor. Het is goed mogelijk dat het mengen niet effectief verloopt, waardoor de verspreiding van het materiaal door de bodem niet gelijkmatig is. Ondanks deze ongelijkmatige verspreiding zou toch een verstevigd gebied kunnen ontstaan, met een redelijk grote permeabiliteit. Dit zal tijdens de experimenten moeten worden onderzocht.

Vervormingscapaciteit

In hoofdstuk 3 (paragraaf 3.5.4) is aangegeven waar de vervormingscapaciteit van afhankelijk is.

Uit onderzoek naar mengsels van bentoniet en hoogovencement met een variërend slakgehalte, bleek dat een hoger slakgehalte behalve tot een hogere druksterkte, ook leidt tot een hogere elasticiteitsmodulus (CUR, 1997). Toevoeging van bentoniet vergroot de flexibiliteit en verkleint dus de elasticiteitsmodulus. Als er zand aan dit mengsel wordt toegevoegd, leidt dit tot een hogere elasticiteitsmodulus.

Volgens Gallavresi (1992) neemt de verhouding (E/R) tussen de elasticiteitsmodulus (E) en de druksterkte (R) lineair toe met R van 200 à 300 tot 1000. In figuur 4.10 (Gallavresi, 1992) is een plot te zien van de elasticiteitsmodulus ten opzichte van de druksterkte op 40% van de maximale sterkte. Deze gegevens resulteren uit nauwkeurige testen op monsters van grondsoorten die variëren van medium-fijn zand tot grind en die door straalgrouten behandeld zijn.



Figuur 4.10: Elasticiteitsmodulus ten opzichte van de druksterkte op 40% van de maximale sterkte.

Het onderzoek naar het kruipgedrag van cement-bentonietsuspensies is tot op heden beperkt gebleven (CUR, 1997). Kruipdeformaties van uitgeharde cement-bentonietsuspensies blijken relatief klein te zijn en er treedt brosse breuk op. Dit zal ook gebeuren wanneer deze suspensies met zand gemengd zijn, want de aanwezigheid van het zand vergroot de stijfheid.

Groutsterkte

Schuifsterkte

De schuifsterkte van de grond neemt ten gevolge van verdringingsgrouten toe. De zandkorrels hebben inwendige wrijving. Na toevoeging van het additief ontstaat bovendien cohesie tussen de zandkorrels. Deze cohesie is gelijk aan de cohesie van het uitgeharde additief. Een groter cementgehalte geeft een grotere cohesie. De wrijving tussen het korrelmateriaal blijft bestaan zo lang de poriën worden opgevuld zonder structuurveranderingen.

Bij dit onderzoek wordt het bodemmateriaal eerst in suspensie gebracht. Er treden dus wel degelijk structuurveranderingen op. Welke gevolgen dit proces heeft voor de inwendige wrijving van het korrelmateriaal en de eigenschappen van het eindproduct, zal tijdens de experimenten bepaald moeten worden.

Volgens Kutzner (1997) zijn er geen onderzoeken bekend, die informatie geven over de schuifsterkte van gronden, die met cementsuspensies zijn behandeld. Volgens de CUR (1997) kan contacterosie (zie hoofdstuk 3, paragraaf 3.5.4) bij een cementbentonietscherm worden voorkomen bij een minimale drukvastheid van het schermmateriaal van 0,1 MPa.

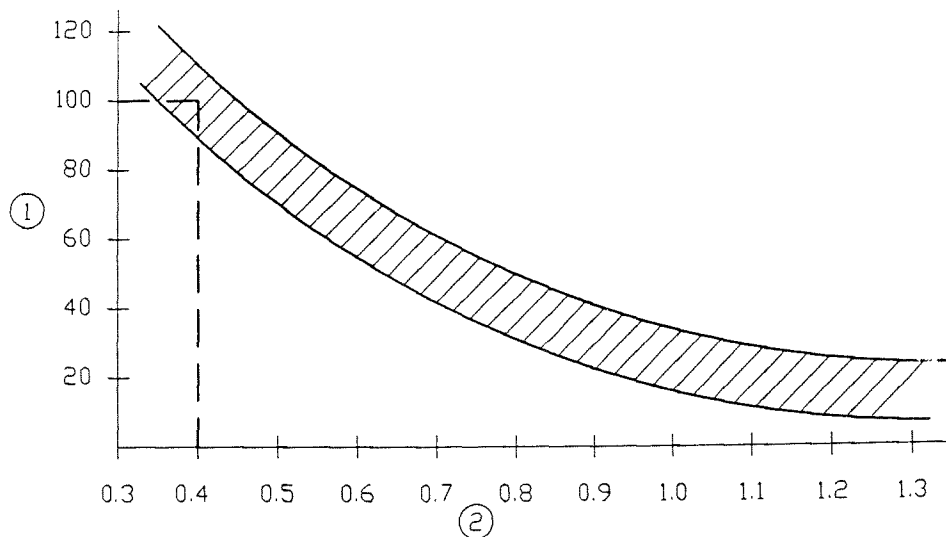
Door het toevoegen van een cement-bentonietsuspensie aan een zandbodem zal een zacht of hard, rotsachtig materiaal ontstaan. Door de aanwezigheid van langsstroming zal dit materiaal desintegreren. Er zullen waarschijnlijk geen schuifervormingen optreden, maar eerder brosse breuk (zie ook het kopje 'vormingscapaciteit' in deze paragraaf). Hoe de verstevigde bodem reageert op langsstroming zal tijdens de experimenten bekeken moeten worden.

Druksterkte

De druksterkte van cementsuspensies is afhankelijk van:

- de W/C-factor bij het begin van het uitharden;
- de mate waarin het grout tussen het bodemmateriaal wordt verspreid;
- de mate waarin de poriën worden opgevuld.

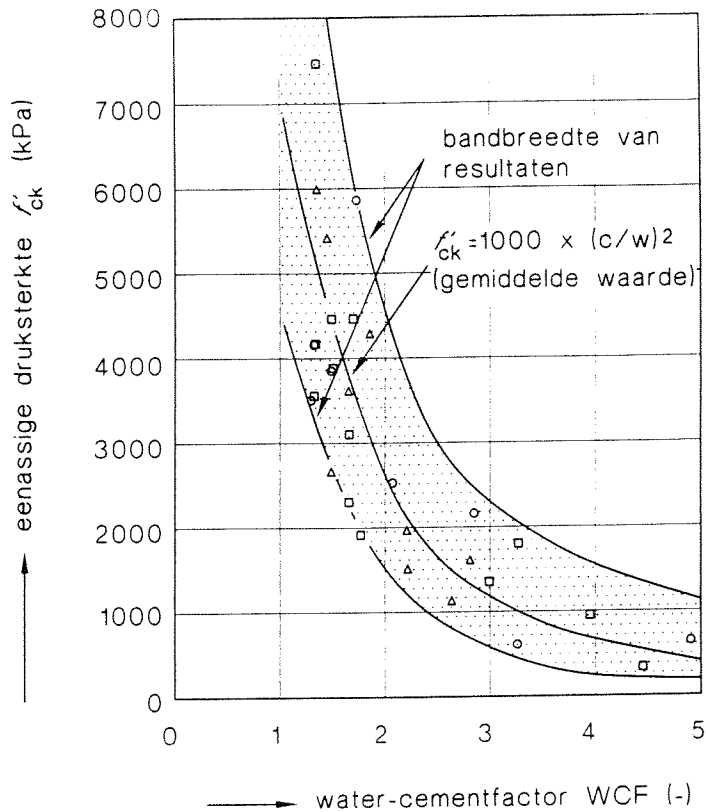
In figuur 4.11 (Kutzner, 1997) is de invloed van de W/C-factor op de druksterkte van een cementsuspensie te zien. Voor cement-bentonietsuspensies (figuur 4.12 (CUR, 1997)) is deze invloed van de W/C-factor ook aanwezig. Als een cement-bentonietsuspensie wordt gemengd met zand blijft de druksterkte afhankelijk van de W/C-factor.



Compressive strength of cement suspensions after 28 days with reference to W/C-ratio = 0.4.

- 1 Compressive strength (%)
2 W/C-ratio

Figuur 4.11: Druksterkte van cementsuspensie gerelateerd aan de W/C-factor 0,4

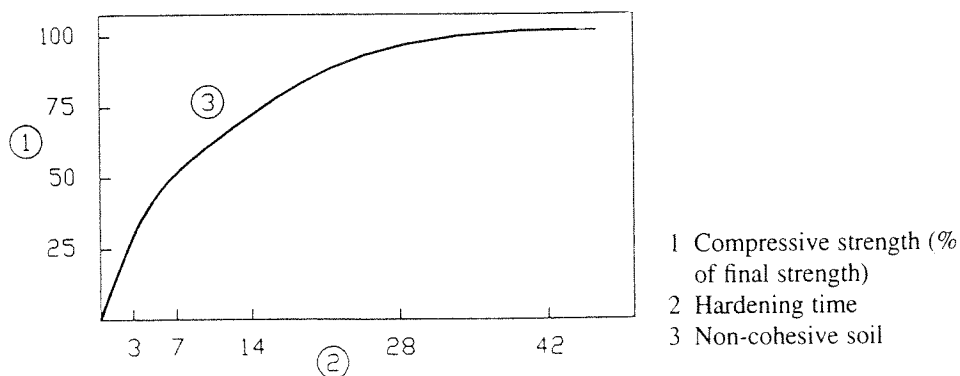


Figuur 4.12: Druksterkte na 28 dagen verharden van cement-bentonietsuspensies als functie van de W/C-factor

Met behulp van verdringingsgrouten kan in zand, na 28 dagen uitharden, een druksterkte van ongeveer 10 MPa worden bereikt, als een cementsuspensie met een W/C-factor van 1 wordt geïnjecteerd. Bij een onderzoek (Kutzner, 1997) bleek dat 36 van de 46 monsters in slecht gegraadeerd zand hieraan voldeden.

Met behulp van straalgrouten kan in zand een druksterkte van ongeveer 10-30 MPa worden bereikt, als een cementsuspensie met een W/C-factor tussen de 0,5 en 1 wordt gebruikt. Door stabiele cement-bentonietsuspensies, met een lager cementgehalte (dus een hogere W/C-factor) te gebruiken, neemt de sterkte die bereikt kan worden af (Gallavresi, 1992). Dit kan technisch of economisch (minder cement is goedkoper) gewenst zijn.

In figuur 4.13 (Kutzner, 1997) is voor zand dat is verstevigd met behulp van straalgrouten, de ontwikkeling van de sterkte in de tijd te zien. Het verloop van deze ontwikkeling in de tijd komt overeen de ontwikkeling van de sterkte van cementsuspensies in de tijd.



Figuur 4.13 Ontwikkeling van de sterkte in de tijd, van zand behandeld met behulp van straalgrouten

Bij straalgrouten is de sterkte van een gegROUT element (zie paragraaf 3.4.4) niet alleen afhankelijk van de W/C-factor. De hoeveelheid suspensie die zich in het element bevindt, heeft ook invloed op de sterkte. Bij niet-cohesieve gronden, zoals zand, is de relatie tussen de sterkte en de hoeveelheid suspensie evenredig. 50% suspensie in het element geeft een sterkte van het element, die 50% van de sterkte van de pure suspensie is.

Een (economisch) optimale sterkte zal worden bereikt bij het compleet opvullen van de poriën. Dit houdt een percentage van 25-30% suspensie in het element in. Als de sterkte van de pure suspensie op 50 MPa is, wordt in dat geval in het element een sterkte van 12-16 MPa bereikt. Dit komt overeen met 25-30% van de sterkte van de pure suspensie.

Sterkte bij beperkte menging

Zoals al een aantal maal in deze paragraaf aan de orde is gekomen, blijft de mate waarin het additief zich zal mengen met het bodemmateriaal een onzekere factor. Vooral het compleet opvullen van de poriën is in dit onderzoek twijfelachtig. Tijdens de experimenten zal de mate van menging van het additief en het zand bekeken moeten worden en zal de invloed hiervan op de ontwikkelde sterkte bepaald moeten worden.

Daarnaast zal aan de hand van experimenteel onderzoek bepaald moeten worden welke hoeveelheid additief aan de bodem moet worden toegevoegd. Bij een poriënvolume van 40% van de grond in situ, kan in eerste instantie bijvoorbeeld $0,4 \text{ m}^3$ mengsel per m^3 zand worden toegevoegd. Aan de hand van de opvulling, verspreiding en de ontwikkelde eigenschappen kan vervolgens bepaald worden of er meer of minder mengsel per m^3 grond nodig is.

4.5.4. Cement-bentonietsuspensies en zeewater

Zie paragraaf 4.5.3 onder het kopje 'viscositeit met het oog op voorkomen ontmenging en verdunning bij een overschot aan water'.

4.5.5. Veel gebruikte mengselsamenstellingen

Een veel gebruikte standaardmix bij verdringingsgrouten is de volgende:

W/C-factor 1,0

Specifiek oppervlak van cement: $\geq 300 \text{ m}^2/\text{kg}$

Deeltjesgrootte van het cement: $\geq 90\%$ onder de 0,05 mm.

Bentoniet als additief: 2% ten opzichte van het gewicht van het gebruikte water

In tabel 4.6 (Kutzner, 1997) en in tabel 4.7 (Bruce e.a., 1997) staan een aantal groutmengsels en hun reologische en sterkte-eigenschappen weergegeven. De tabellen moeten op zich bekeken worden en niet onderling vergeleken worden. Dit is omdat er voor de het bepalen van de eigenschappen van de mengsels voor elke tabel andere meetapparatuur gebruikt is. De marsh-time en de flow-cone zijn een voorbeeld van verschillende apparaten die worden gebruikt voor het meten van een uitstroomtijd. In tabel 4.6 zijn de mengsels van cement en bentoniet extra omlijnd.

De stromings- en sedimentatie-eigenschappen zullen voor elk mengsel op zich onderzocht moeten worden. De reden hiervoor is dat alle cement- en bentonietsoorten de eigenschappen van het mengsel op een andere manier beïnvloeden.

Bij verdringingsgrouten wordt het aangeraden te werken met stabiele mengsels met W/C-factoren tussen de 0,8 en 2,0 (Kutzner, 1997). In het algemeen wordt tussen de 1 en 6 % bentoniet toegevoegd (in gewichtsverhouding ten opzichte van het gebruikte water). De hoeveelheid die wordt toegevoegd is afhankelijk van de gewenste eigenschappen van het eindproduct. Bij het straalgrouten worden suspensies met een W/C-factor van 0,8 tot 1,5 gebruikt. Factoren boven de 1,5 zijn hierbij niet geschikt.

Cement suspensions						Stabilized cement suspensions					
Water	(l)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Cement	(kg)	50	67	100	120	50	100	120	100	167	212
Water/solid-ratio		2.0	1.5	1.0	0.8	2.0	1.0	0.8	1.0	0.6	0.5
Bentonite	(kg)	-	-	-	-	2.0	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0
Liquefier	(kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Unit weight	(kN/m ³)	13	14	15	16	13	15	16	15	17	19
Viscosity	(s. mPa)	3	6	10	15	20	40	80	100	200	400
Flow limit	(Pa)	0.1	0.4	1	3	2	5	20	25	25	35
MARSH-time ⁵	(s)	28	30	35	35	35	50	> 60	> 60	> 60	> 60
Sedimentation dH/H ⁶	(%)	50	40	20	10	35	8	4	5	1	1
Compressive strength after 28 days	(MPa)	<10	10	25	40	<10	10	25	40	60	75

Tabel 4.6: Een aantal groutmengsels en hun reologische en sterkte-eigenschappen

Water/Cement ratio by weight	Bentonite by weight of water (t)	Pleets t		Wet Density (Mg/m ³)	Flow Cone (sec) (water=10 sec)	HAAKE Viscometer RV20-MV2 (1Pa/s = 1000cP)		Unconfined Compressive Strength of 100 mm Cubes			
		3 hrs	24 hrs			Yield Stress (Pa)	Plastic Viscosity (Pa/s)	3 Days (MPa)	7 Days (MPa)	14 Days (MPa)	28 Days (MPa)
1	2	5	2	1.514	15	31	0.020	3.6	5.2	6.9	9.4
1.2	3	3	3	1.434	20	80	0.025	1.8	4.9	6.7	7.6
1.25	2.5	5	3	1.427	14	50	0.023	1.6	4.0	4.9	5.3
1.5	3	7	2	1.340	13	30	0.025	0.9	1.7	2.3	2.8
2	4	2	2	1.250	15	48	0.028	0.5	1.2	1.5	2.0
2	5	1	3	1.290	16	54	0.020	0.6	1.4	1.9	2.2
2	6	1	0	1.290	20	75	0.025	0.8	1.4	1.9	2.3
3	4	4	0	1.189	22	60	0.023	0.3	1.4	0.61	0.71
4	5	2	1	1.170	12	25	0.017	0.09	0.51	0.22	0.27
5	6	1	3	1.120	18	32	0.023	0.03	0.14	0.06	0.14

All the grouts were mixed in a colloidal mill mixer. Firstly 50kg water was put in the mixer and the bentonite was sprinkled into the water over a period of about 30 seconds. This slurry was mixed for 2 minutes and then discharged to an agitation tank. Temperatures: °C - Ambient 16 to 19, Grout 17 to 22.

Tabel 4.7: Een aantal groutmengsels en hun reologische en sterkte-eigenschappen

Deze gegevens over de samenstelling van cement-bentonietsuspensies zullen een uitgangspunt vormen voor het experimentele onderzoek.

Hierbij moet wel opgemerkt worden dat bij beide groutmethodes de belangrijkste aspecten het verstevigen of het waterdicht maken van de bodem zijn. Bij afdichtingswanden en groutwerkzaamheden voor compensatiedoeleinden wordt gebruik gemaakt van hogere W/C-factoren. Wanneer blijkt dat ook bij gebruik van hogere W/C-factoren de erosiebestendigheid voldoende toeneemt, kan dit economisch voordelig zijn. De maximale W/C-factor, die kan worden toegepast is 8 (Bruce e.a., 1997).

Over de hoeveelheid additief die aan de bodem moet worden toegevoegd is in paragraaf 4.5.3 onder het kopje druksterkte al even gesproken. De benodigde hoeveelheid zal tijdens de experimenten moeten worden bepaald.

4.5.6. Mogelijke opties voor de bentoniet

In de offshore praktijk wordt veel gebruik gemaakt van cement-silicaatmengsels voor het stabiliseren platformfunderingen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een W/C-factor, die varieert van 1 tot 5 en een hoeveelheid sodium-silicaat die varieert tussen de 1 en 10%. Deze mengsels ontwikkelen een druksterkte in de orde van 0,1 tot 5 N/mm² (zonder toevoeging van zand), wat in principe niet erg hoog is. Silicaten kunnen met zeewater gemengd worden en zorgen voor het stabiliseren van de cementsuspensie. Omdat bentoniet in combinatie met zeewater ongeschikt blijkt, kunnen deze silicaten een optie zijn, als het

aanmaken van bentoniet met zoet water te kostbaar is. Silicaten zijn in het algemeen duurder dan bentoniet. Het zal dus van de kosten afhangen van het vervoer van de in zoet water gerijpte bentonietsuspensie of cement-bentonietsuspensies gebruikt zullen worden. In eerste instantie wordt hier niet verder op ingegaan.

Een andere optie is om alleen cement te gebruiken met een lage W/C-factor. In dat geval zal er zeker ontmenging optreden, maar het is mogelijk dat de ontwikkelde sterkte-eigenschappen voldoende zijn om de stromingsbelasting op de deklaag te weerstaan. Bovendien is het draagvermogen van cementsuspensies beperkt, waardoor de zandkorrels tussen de suspensie kunnen bezinken, ook dit kan zorgen voor een beter eindresultaat. Dit kan tijdens de experimenten getest worden.

4.6. Hulpstoffen

4.6.1. Algemeen

Om bepaalde eigenschappen van het additief of het eindproduct te verbeteren worden hulpstoffen toegepast. De hulpstoffen hebben hierbij in hoofdzaak tot doel het reologische karakter en het opstijvingsgedrag te beïnvloeden. Bentoniet is eigenlijk al een voorbeeld van een hulpstof, omdat het zorgt voor een stabiele suspensie. Vooral als hoge doseringen vaste stof verwerkt worden, zijn additieven meestal onontbeerlijk. In deze paragraaf zal aandacht besteed worden aan:

- plastificeerders;
- versnellers en vertragers;
- recente ontwikkelingen;
- hulpstoffen tegen uitspoeling.

4.6.2. Plastificeerders

Plastificeerders hebben de functie het additief te verdunnen of vloeibaarder te maken, waardoor de verwerkbaarheid verbeterd wordt. Meer water toevoegen geeft een vloeibaarder mengsel. Hierdoor ontstaat echter een grotere kans op sedimentatie, een lagere sterkte en een grotere permeabiliteit.

Plastificeerders laten het cement vloeibaarder worden, terwijl de W/C-factor niet verandert. De eigenschappen van deze stoffen en de concentratie mogen er niet voor zorgen dat de cementhydratatie te lang wordt uitgesteld.

Plastificeerder zorgen voor een betere verspreiding van de cementdeeltjes in het mengsel. Hierdoor wordt het mengsel vloeibaarder. Daarnaast kan de beginsterkte zich sneller ontwikkelen. Volgens de CUR (1997) zijn lignosulfonaten goed geschikt. Voor meer informatie over de werking van deze stoffen wordt verwezen naar Pratt (1997).

4.6.3. Versnellers en vertragers

Versnellers (Kutzner, 1997) worden gebruikt om het uitharden van het additief sneller te laten plaatsvinden. Door een versneller te gebruiken, kan een sterkte die normaal na 3 dagen wordt bereikt, al na 24 uur worden bereikt. Een voorbeeld van een versneller is sodium-silicaat. Een hoeveelheid tot 7% kan worden toegevoegd in verhouding tot het cementgewicht. Voor meer informatie over de werking van versnellers en andere versnellers wordt verwezen naar Pratt (1997).

Vertragers worden gebruikt als het nodig is de opstijving van het additief te vertragen. Dit kan gebeuren met hulpstoffen die de oplosbaarheid van de cementdeeltjes verminderen of die de cementdeeltjes omhullen. Typische vertragers bevatten organische moleculen zoals glucose. Eventueel kan ook gebruik gemaakt worden van stoffen die een verdunnend effect hebben op de suspensie en een vertragend effect op de cementhydratatie. Voor meer informatie wordt verwezen naar Pratt (1997).

Het verdient de aanbeveling om voor de beïnvloeding van het reologisch gedrag en de opstijving verschillende hulpstoffen te gebruiken, zodat beide parameters apart gestuurd kunnen worden. Overdosering moet hierbij voorkomen worden, omdat het mengsel hierdoor mogelijk onvoldoende verhardt.

4.6.4. Recente ontwikkelingen

Gause & Bruce (1997) beschrijven de recente ontwikkelingen wat betreft hulpstoffen voor groutmaterialen op basis van cement. Er wordt vooral ingegaan op het controleren van het reologische gedrag en hydratatiegedrag van de suspensies. Daarnaast wordt aandacht besteed aan mogelijkheden om de weerstand tegen uitspoelen te vergroten.

Door gebruik te maken van een hydratatie-controle systeem, dat bestaat uit twee componenten, kan de verwerkingstijd van suspensies op basis van cement worden verlengd. De componenten zijn een 'stabiliseerder' en een 'activeerder'.

De stabiliseerder (in het Engels een 'hydroxylated, carbosilic acid based stabilizer') zorgt ervoor dat het hydratatieproces wordt uitgesteld. Dit gebeurt door de vorming van een beschermende laag om de cementdeeltjes. De hydratatie van de cementdeeltjes kan hierdoor tot maximaal 72 uur worden uitgesteld.

Door de activeerder (in het Engels een 'inorganic alkaline activator') toe te voegen kan het hydratatieproces op elk gewenst moment worden hervat. Deze activeerder lost de beschermende laag om de cementdeeltjes op. Door de hoeveelheid activeerder aan te passen, kan de afzettijd worden gevarieerd van enkele minuten tot enkele uren. Dit systeem kan worden toegepast in elk soort grout op basis van cement.

Het systeem heeft een minimaal effect op de vloeibare eigenschappen van het grout. Door het verspreidende karakter van de stabiliseerder (deeltjes worden meer verspreid) wordt het grout iets vloeibaarder. Het systeem heeft een verwaarloosbaar effect op de eigenschappen van het eindproduct op de lange termijn. Het systeem is vooral bruikbaar als de tijd tussen het aanmaken van de suspensie en het moment waarop de suspensie de juiste positie bereikt, aanzienlijk is.

4.6.5. Hulpstoffen tegen uitspoeling

Het plaatsen van een additief in een omgeving met veel water is in het algemeen moeilijk. Het additief moet geplaatst worden zonder dat het verdunt in of meegevoerd wordt door het aanwezige stromende water. Daarnaast moet er, nadat het additief geplaatst is, voldoende cement in het mengsel aanwezig blijven om de gewenste eigenschappen van het eindproduct te bereiken. Er zijn verschillende mogelijkheden om de eigenschappen van het additief in een omgeving met water te verbeteren. Deze mogelijkheden zullen hier worden besproken (Gause & Bruce, 1997).

Vaak wordt meer cement of pozzolane stoffen (bv. vlieg-as) toegevoegd om de cohesie van het mengsel te vergroten en om het verlies ten gevolge van verdunning te compenseren.

Een andere mogelijkheid is om gebruik te maken van versnellers. Hoe sneller het mengsel uithardt, hoe kleiner de kans dat er uitspoeling plaatsvindt.

Organische materialen die zorgen voor coagulatie, flocculatie en verdikking, vergroten de viscositeit en de cohesie van het additief. Hierdoor worden zowel het stromingsgedrag van het additief als het gedrag op de grens van water en grout beïnvloed (Bruce e.a., 1997). Toevoeging van bentoniet geeft ook dit effect.

Polymeren die oplosbaar zijn in water, zoals cellulose, worden vaak gebruikt om uitspoeling tegen te gaan. Deze polymeren laten de viscositeit van het mengwater toenemen. Lange polymeren gaan een verbinding aan met een gedeelte van het mengwater. Dit water wordt vervolgens geabsorbeerd tijdens de hydratatie van het cement. Polymeren beperken het verlies van cementdeeltjes en vergroten de stabiliteit van de suspensie.

Het gebruik van polymeren is in het algemeen erg kostbaar.

Dergelijke polymeren worden ook bij colloïdaal beton of onderwaterbeton gebruikt. Colloïdaal beton onderscheidt zich van normaal beton door de in specievorm bijzondere samenhang (Hendriksma, 1987). De cohesie van de specie is zelfs zodanig groot, dat bij een vrije val door water nauwelijks uitspoeling optreedt van cement en andere fijne materiaaldelen. Bovendien ontmengt de specie niet. Colloïden zijn stoffen met een lijmachtig karakter. Dergelijke stoffen bestaan uit deeltjes met afmetingen die liggen tussen de 10^{-4} en 10^{-6} mm. De uiterst kleine deeltjes zullen in de suspensie niet uitzakken, maar vrijwel onbeperkt blijven zweven. Colloïdale deeltjes vertonen een sterke samenhang door onderlinge aantrekkingskrachten. Bevat een betonspecie voldoende colloïdale deeltjes, dan zal deze door de eigenschappen van de colloïdale deeltjes sterk samenhangend zijn. Een betonspecie kan onder meer een colloïdaal karakter krijgen door het toevoegen van een natuurlijk polymeer. Toepassingsmogelijkheden bepalen hoeveel colloïdale deeltjes in een mengsel aanwezig moeten zijn, dus de hoeveelheid toe te voegen natuurlijk polymeer. Zo dient in stromend water het materiaal meer cohesief te zijn, dan in stilstaand water; in de specie moeten dan ook meer colloïdale deeltjes aanwezig zijn. De mechanische eigenschappen van colloïdaal beton verschillen niet veel van die van normaal beton. Voor meer informatie over colloïdaal beton wordt verwezen naar Hendriksma (1987).

4.7. Samenvatting van belangrijkste eigenschappen

4.7.1. Algemeen

Voor van het verbeteren de erosiebestendigheid en de stabiliteit van een deklaag op een pijpleiding wordt een suspensie van cement, bentoniet en water als additief aan de bodem toegevoegd, nadat deze met behulp van fluïdisatietechnieken in suspensie is gebracht. Het is goed mogelijk dat het mengen met behulp van deze methode niet effectief verloopt, waardoor de verspreiding van het materiaal door de bodem niet homogeen en gelijkmatig zal zijn. Ondanks deze ongelijkmatige verspreiding zou toch een voldoende verstevigd gebied kunnen ontstaan. Deze verspreiding zal tijdens de experimenten bekeken moeten worden. In deze samenvatting worden de belangrijkste eigenschappen cement-bentonietsuspensies besproken.

4.7.2. Cement

- De functie van cement in het additief, is het bereiken van de gewenste mechanische eigenschappen, zoals druksterkte, permeabiliteit en elasticiteitsmodulus. Daarnaast moet het cement de weerstand tegen erosie vergroten.
- Tijdens de hydratatie van cement wordt een stijve matrix gevormd door water- en cementmineralen. Deze matrix wordt calciumsilicaathydraat (CSH)-gel genoemd. De hydratatie van cement kan worden verdeeld in de afzettijd en de uithardtijd. Gedurende de afzettijd is de viscositeit van het cement ongeveer constant en is het cement verwerkbaar (injecteerbaar/verpompbaar). Aan het eind van de afzettijd neemt de viscositeit snel toe, het cement kan niet meer verwerkt worden. Hierna begint het uitharden van het cement. Tijdens dit uitharden is de viscositeit oneindig groot en neemt de sterkte van het cement toe. Na het verstrijken van de uithardtijd heeft het cement zijn eindsterkte bereikt.
- De maalfijnheid van het cement dat gebruikt wordt, is een randvoorwaarde. Deze zal in het onderzoek verder niet meer gevarieerd worden. Er zal in dit onderzoek gebruik gemaakt worden van conventioneel cement. Conventionele cementsoorten hebben een maalfijnheid die varieert van 250 tot 500 m²/kg.
- Voor de hydratatie van cement is minimaal 40% water nodig ten opzichte van het gewicht van het gebruikte cement. Dit komt overeen met een W/C-factor van 0,4.

- Voor de invloed van de gebruikte W/C-factor op de eigenschappen van de suspensie en het eindproduct wordt verwezen naar tabel 4.6, verderop in deze samenvatting.

4.7.3. Bentoniet

- Een functie van bentoniet in het additief is het stabiliseren van het cementgrout. Als gevolg van de gevlokte bentonietstructuur ontstaat een stabiele, homogene suspensie met een vermogen om cement- en gronddeeltjes te dragen. Deze deeltjes worden en blijven gelijkmatig over het volume verdeeld.
- Een andere functie van bentoniet in dit onderzoek is het voorkomen van ontmenging wanneer, het additief tussen het gesuspenderde bodemmateriaal wordt geïnjecteerd. De toevoeging van bentoniet vergroot namelijk de cohesie en de viscositeit van het additief.
- Grouts die alleen bestaan uit cement en water zijn stabiel (sedimentatie < 10%), als wordt gewerkt met een W/C-factor, die kleiner is dan 0,8. Een lage W/C-factor betekent, dat de gebruikte cementconcentratie groot is. Een grotere cementconcentratie brengt hogere kosten met zich mee. Cementen die in het algemeen worden gebruikt bij grouten hebben om deze reden een hogere W/C-factor en zijn onstabiel. Deze cementen moeten gestabiliseerd worden.
- Voor de invloed van het gebruikte bentonietpercentage op de eigenschappen van de suspensie en het eindproduct wordt verwezen naar tabel 4.6, verderop in deze samenvatting.

4.7.4. Suspensie aanmaken met zeewater

- Voor het aanmaken van een cement-bentonietsuspensie is water nodig. In zeewater zijn opgeloste zouten als ionen aanwezig. Het mengen van cement met zeewater geeft geen specifieke problemen. Het aanmaken van een bentonietsuspensie met zeewater blijkt echter onmogelijk.

4.7.5. Cement-Bentoniet

- In Nederland bestaan een cement-bentonietsuspensie uit geactiveerde natriumbentoniet en hoogovencement.
- Het aanmaken van de cement-bentonietsuspensie geschiedt door allereerst bentoniet in water enige uren te laten rijpen tot een stabiele suspensie. Vervolgens wordt het cement in korrelvorm toegevoegd. Bentoniet moet met zoet water worden aangemaakt. Het zal bij de kust moeten worden aangemaakt en vervolgens per schip naar de locatie van de trencher moeten worden vervoerd of het moet aan boord worden aangemaakt met zoet water uit geïnstalleerde tanks op het werkschip. Beide methoden brengen extra kosten met zich mee.
- Zowel het mengen van de bentoniet met water als van het cement met de bentonietsuspensie geschiedt met hoge toeren mengers. De viscositeit van de suspensie wordt door de mengenergie beïnvloed. Meer mengenergie leidt tot een lagere viscositeit.
- Met behulp van experimenten kan bepaald worden hoeveel m^3 additief per m^3 bodemmateriaal nodig is. Vervolgens kan dan berekend worden hoeveel m^3 bentonietsuspensie zal moeten worden aangemaakt voor een bepaald project.
- De permeabiliteit van het bodemmateriaal moet groter zijn dan 10^{-4} m/s, anders kan een cement-bentonietsuspensie zich niet goed verspreiden. Onder water zal het additief tijdens de injectie echter het gefluïdiseerde bodemmateriaal verdringen, ongeacht de aanwezige permeabiliteit. De gesuspenderde zandkorrels kunnen namelijk geen weerstand bieden tegen de injectiedruk. Nadat het injecteren is gestopt, zullen de zandkorrels en het additief gezamenlijk bezinken. Uit de experimenten zal moeten

blijken hoe dit bezinken verloopt en in hoeverre het additief en de zandkorrels tijdens het bezinken mengen.

4.7.6. Hulpstoffen

Om bepaalde eigenschappen van de suspensie of het eindproduct te verbeteren, worden hulpstoffen toegepast. De hulpstoffen hebben in hoofdzaak tot doel het reologische karakter en het opstijvingsgedrag te beïnvloeden.

- Plastificeerders hebben de functie de suspensie vloeibaarder te maken, waardoor de verwerkbaarheid verbeterd wordt.
- Versnellers worden gebruikt om het uitharden van de suspensie sneller te laten plaatsvinden.
- Vertragers worden gebruikt om de opstijving van de suspensie te vertragen.

4.7.7. Additief aanbrengen in een omgeving met water

Het aanbrengen van een additief in een omgeving met veel water is in het algemeen moeilijk. Het grout moet aangebracht worden zonder dat het verdunt in of meegevoerd wordt door het aanwezige stromende water.

- Meer cement of pozzolane stoffen (bv. vliegashuis) vergroten de cohesie van het mengsel en compenseren het verlies ten gevolge van verdunning.
- Versnellers zorgen dat het mengsel sneller uithardt, waardoor het minder gevoelig voor uitspoeling wordt.
- Organische materialen die zorgen voor coagulatie, flocculatie en verdikking, vergroten de viscositeit en de cohesie. Hierdoor wordt zowel het stromingsgedrag van het grout als het gedrag op de grens van water en grout beïnvloed. Toevoeging van bentoniet aan een cementsuspensie geeft ook dit effect.
- Polymeren die oplosbaar zijn in water, zoals cellulose, worden vaak gebruikt om uitspoeling tegen te gaan. Deze zorgen voor een toename van de cohesie en viscositeit van het additief

4.7.8. Cement-bentonietsuspensies injecteren tussen het gesuspendeerde bodemmateriaal

- In dit onderzoek wordt het additief op zee, onder water geïnjecteerd. Hierbij is het ook ongewenst dat het grout met het zeewater mengt en daardoor verdunt. Het additief moet dus enige cohesie hebben om dit te voorkomen.
- Naar aanleiding van een gesprek met de heer Groen van de CEBO en enkele experimenten aldaar, is geconcludeerd dat cement-bentonietsuspensies voldoende samenhang hebben om niet vanzelf met het zeewater te mengen. Door de toevoeging van de bentoniet zijn de cohesie en viscositeit van het additief zo groot, dat er geen ontmenging optreedt. Hierbij is het van belang dat er niet actief gemengd wordt, wanneer de suspensie tussen het bodemmateriaal wordt geïnjecteerd. Bij actief te mengen zal de suspensie wel verdunnen (de W/C-factor neem toe). Dit heeft gevolgen voor de eigenschappen van het verstevigde gebied (afname van de sterkte). Cementsuspensies, zonder bentoniet, hebben nauwelijks samenhang en zullen, als ze onder water geïnjecteerd worden, direct mengen met het zeewater.
- In verband met de menging van het additief met het geïnduseerde korrelmateriaal zijn een lage cohesie en viscositeit gewenst. Een te hoge cohesie en viscositeit kunnen niet alleen het zeewater, maar eventueel ook de korrels verdringen. Het additief zal niet mengen met het zeewater, maar ook niet met het korrelmateriaal. Als het mogelijk is, moet hier een optimum gevonden worden.
- Er wordt echter verwacht, dat het additief tijdens de injectie onder water, het geïnduseerde bodemmateriaal zal verdringen. Dit gebeurt ongeacht de aanwezige permeabiliteit en cohesie en viscositeit van het additief. De geïnduseerde zandkorrels kunnen namelijk geen weerstand bieden tegen de injectiedruk. Nadat het injecteren is gestopt, zullen de zandkorrels en het additief gezamenlijk bezinken. De viscositeit en cohesie van het additief zijn op dat moment bepalend voor draagvermogen van het additief. Dit draagvermogen zorgt ervoor dat de zandkorrels na het bezinken door het additief

gedragen zullen worden of dat de zandkorrels in (tussen) het additief kunnen bezinken en er een mengsel ontstaat. Ook in dit verband zijn een lage cohesie en viscositeit gewenst.

- Uit de experimenten zal moeten blijken:
 - hoe het gezamenlijke bezinken verloopt;
 - in hoeverre het additief en de zandkorrels mengen;
 - wat de invloed van het draagvermogen van het additief op dit gezamenlijk bezinken en mengen is;
 - wat de invloed van de dichtheid van het geïnduseerde materiaal, op het moment dat het additief wordt geïnjecteerd, op dit gezamenlijk bezinken en mengen is;
 - welke invloed dit bezinken en dit mengen op de eigenschappen van het eindproduct heeft.

Het zou mooi zijn als er een cohesie en viscositeit gevonden kunnen worden, waarbij de ontmenging en verdunning van het additief minimaal zijn, maar de menging met het korrelmateriaal maximaal.

4.7.9. Invloed W/C-factor en bentonietgehalte van cement-bentoniet suspensies

De invloed van de W/C-factor en het bentonietgehalte op de eigenschappen van cement-bentoniet suspensies en het eindproduct staan tabel 4.6:

	Verhoging W/C-factor (kg/kg)	Hoger Bentonietgehalte* ¹
Eigenschappen suspensie		
Viscositeit	-	+
Stabiliteit	-	+
Verwerkingstijd (afzettijd)	+* ⁴	-
Eigenschappen eindproduct *²		
Duurzaamheid * ³	-	+
Permeabiliteit	+	-
Vervormingscapaciteit	+	+
Groutsterkte	-	0* ⁵
Gebruikte range	0,8-8	1-6%

+: neemt toe -: neemt af

Tabel 4.6: Invloed van W/C-factor en bentonietgehalte op de eigenschappen van de suspensie en het eindproduct

*1: Het bentonietgehalte wordt uitgedrukt als een gewichtspercentage ten opzichte van het gewicht van het gebruikte water.

*2: De eigenschappen van het eindproduct zijn sterk afhankelijk van de mate waarin de suspensie zich zal mengen met het gesuspendeerde bodemmateriaal.

*3: De duurzaamheid is voornamelijk gebaseerd op de structuur in uitgeharde vorm. Een grotere dichtheid vergroot de duurzaamheid doordat chemicaliën dan minder goed kunnen binnendringen

*4: Verhoging van de W/C-factor leidt tot afname van de afzettijd en dus tot toename van de verwerkingstijd. De uithardtijd zal afnemen bij een hogere W/C-factor.

*5: Vooral de W/C-factor heeft invloed op de groutsterkte. De invloed van het bentonietgehalte is beperkt.

4.7.10. Gewenste materiaaleigenschappen

Aan de hand van de geraadpleegde literatuur zijn uitgangspunten geformuleerd voor de gewenste materiaaleigenschappen van de cement-bentonietsuspensie.

- Viscositeit:
 - Een suspensie is verwerkbaar (verpompbaar/injecteerbaar) als de beginviscositeit kleiner dan 100 s.MPa is.
 - Vloeistoffen met een viscositeit tot 800 à 1000 s.MPa kunnen met standaard materieel verwerkt worden.
 - Een suspensie is verwerkbaar als de Marsh-viscositeit kleiner dan 60 s/l is.
 - De grensschuifspanning van de suspensie mag niet hoger dan 50 Pa zijn.
 - De gewenste beginviscositeit zal tijdens de experimenten bepaald moeten worden.
- Verwerkbaarheid:
 - Het is niet gewenst reeds hydraterende suspensies te verwerken, ookal zijn deze nog wel verpompbaar.
 - Tijdens het verpompen mogen de stroomomstandigheden van het additief geen essentiële veranderingen ondergaan (geen sedimentatie).
 - In het algemeen varieert de verwerkingstijd van cement-bentonietsuspensies van 2 tot 4 uur. Door gebruik te maken van hulpstoffen kan de verwerkingstijd gevarieerd worden.
 - Op zee is een minimale afzettijd van twee uur gewenst. Hierdoor is het mogelijk dat de pompoperatie tijdelijk stil kan liggen zonder dat de injectieleidingen worden geblokkeerd.
 - Het aantal bestanddelen van het grout moet zo veel mogelijk beperkt worden, om de problemen die kunnen optreden bij het (droog)mixen, transporteren en opslaan te beperken. Deze stappen zijn bijzonder kritiek in de offshore-logistiek.
- Stabiliteit:
 - Een stabiel mengsel is een homogeen mengsel, met constante eigenschappen.
 - Een suspensie is stabiel als geldt $dH/H < 10\%$.
 - Elke gestabiliseerde suspensie moet in een laboratorium getest worden om de stromings- en stabilisatie-eigenschappen te bepalen. Hier kan bepaald worden in hoeverre de eis van $dH/H < 10\%$ noodzakelijk is in verband met de verwerkbaarheid en de eigenschappen van het eindproduct.
 - Aangezien het onbekend is in welke mate het additief zal mengen met het bodemmateriaal, is het mogelijk dat enige sedimentatie van het additief terwijl het zich tussen het korrelmateriaal bevindt nauwelijks nadelig effect heeft op de sterkte-ontwikkeling. Een minder strenge eis is dus eventueel mogelijk.
- Duurzaamheid:
 - De invloed van het zeewater op de stabiliteit van cement-bentonietsuspensies is gering tot matig.
 - Door toevoeging van bentoniet neemt de weerstand tegen uitspoeling toe. De onoplosbare kleideeltjes vormen een beschermende laag om de cementdeeltjes.
 - De toevoeging van bentoniet vergroot de viscositeit en cohesie van het additief, waardoor het minder snel zal mengen met het omgevingswater.
 - Bentoniet stabiliseert de suspensie, waardoor de deeltjes homogeen over de suspensie verdeeld zullen zijn. Dit is ook positief met betrekking tot de duurzaamheid.
 - Nadat het additief is uitgehard zal er geen heroplossing of dehydratatie plaatsvinden in het aanwezige water.

- Permeabiliteit, vervormingscapaciteit en groutsterkte

Echte eisen kunnen voor deze eigenschappen niet worden gesteld, daar deze sterk afhankelijk zijn van de manier waarop het additief zich zal mengen met het gesuspendeerde bodemmateriaal.

Het is goed mogelijk dat het mengen niet effectief verloopt, waardoor de verspreiding van het materiaal door de bodem niet gelijkmatig is. Ondanks deze ongelijkmatige verspreiding zou toch een voldoende verstevigd gebied kunnen ontstaan, dat een redelijk grote permeabiliteit heeft. Dit zal tijdens de experimenten moeten worden onderzocht.

Door het toevoegen van een cement-bentonietsuspensie aan de zandbodem zal een zacht of hard, rotsachtig materiaal ontstaan. Door de aanwezigheid van langsstroming zal dit materiaal desintegreren. Er zullen geen schuifvervormingen optreden, maar eerder brosse breuk. Hoe de verstevigde bodem reageert op langsstroming zal tijdens de experimenten getest moeten worden.

Tijdens de experimenten zal ook bekeken moeten worden welke hoeveelheid mengsel aan de bodem moet worden toegevoegd om de deklaag voldoende te verstevigen.

4.7.11. Kort samengevat

- Bentoniet is nodig om de cementsuspensie stabiliteit en samenhang te geven en de weerstand tegen uitspoeling en ontmenging te vergroten.
- Het aanmaken van een bentonietsuspensie met zeewater is onmogelijk, dus zal de bentonietsuspensie moeten worden aangemaakt met zoet water. Dit brengt extra kosten met zich mee.
- De permeabiliteit van het bodemmateriaal moet groter zijn dan 10^{-4} m/s voor een goede verspreiding van de cement-bentonietsuspensie. Tijdens het injecteren van een additief tussen gesuspendeerd zand wordt echter verdringing verwacht, ongeacht de permeabiliteit en de viscositeit en cohesie van het additief. De cohesie en viscositeit van het additief (het draagvermogen) bepalen vervolgens of de zandkorrels na het bezinken door het additief gedragen zullen worden of dat de zandkorrels in (tussen) het additief kunnen bezinken en er een mengsel ontstaat.
- Voor cement-bentonietsuspensies moet hoogovencement gebruikt worden. In Nederland wordt dit gecombineerd met geactiveerde natriumbentoniet.
- Meer mengenergie leidt tot een lagere viscositeit.
- Een hoge viscositeit en cohesie van het additief zijn gewenst om ontmenging te voorkomen. Een te hoge viscositeit kan naast het zeewater eventueel ook de korrels verdringen. De dichtheid van het gesuspendeerde bodemmateriaal heeft hier ook invloed op. Er zal combinatie van viscositeit van het additief en dichtheid van het gesuspendeerde bodemmateriaal gevonden moeten worden, waarbij de ontmenging minimaal is en de verspreiding tussen het korrelmateriaal maximaal.
- De W/C-factor en het gebruikte bentonietpercentage hebben invloed op de eigenschappen van de cement-bentonietsuspensie en het eindproduct.
- Om bepaalde eigenschappen van de suspensie of het eindproduct te verbeteren worden hulpstoffen toegepast. De hulpstoffen hebben hierbij in hoofdzaak tot doel het reologische karakter en het opstijvingsgedrag te beïnvloeden.

- De gewenste materiaaleigenschappen van de cement-bentonietsuspensie worden in de vorige paragraaf besproken
- De eigenschappen van het eindproduct zijn sterk afhankelijk van de manier waarop het additief zich tussen het gesuspendeerde korrelmateriaal verspreidt. Dit zal tijdens de experimenten bekeken moeten worden.

Bijlagen

Bijlage 1: gebruikte literatuur

Bijlage 2: terminologielijst

Bijlage 1: gebruikte Literatuur

Gebruikte Literatuur

- A/C/Z Aannemers combinatie zinkwerken b.v., *Zandcementstabilisatie in zeewater*. Gorinchem, 1981
- Bruce, D.A., G. Stuart Littlejohn en A.M.C. Naudts, 'Grouting Materials for ground treatment: A Practitioner's Guide'. In: *Grouting: Compaction, Remediation and Testing*. New York: American Society of Civil Engineers, 1997, p 306-334.
- CUR, *Rapport 89-7, Zandcementsteen in de waterbouw, demonstratieproject*. 2^e druk, herziene versie. Gouda: Stichting CUR, 1990.
- CUR, *Rapport 189, Cement-bentonietschermen*. Gouda: Stichting CUR, 1997.
- CUR, *Rapport 94-1, Granulaire af dichtingslagen op basis van zandbentoniet, achtergrondrapport bij CUR-aanbeveling 33*. Gouda: Stichting CUR, 1994.
- Daalen, F. van, en J. van Steveninck, 'Shell develops new pipe method'. In: *Offshore*, augustus 1970, p.44-48
- Duxbury, A.B., en A.C. Duxbury, *Fundamentals of Oceanography*. 2^e druk, Boston: Wm.C. Brown Publishers, 1996
- Friedman, Y., *Some aspects of the design of buried hot pipelines*. Europa: European Seminar, Offshore Oil and Gas Pipeline Technology, 1986.
- Gallavresi, F., 'Grouting Improvement of Foundation Soils'. In: *Grouting, soil improvement, and geosynthetics, Vol 1*. United States of America: American Society of Civil Engineers, 1992, p.1-38.
- Gause, C., en D.A. Bruce, 'Control of Fluid Properties of Particulate Grouts: Part 1- General Concepts'. In: C. Vipulanandan (ed), *Grouting: Compaction, Remediation and Testing*. New York: American Society of Civil Engineers, 1997, p. 212-229.
- Håkansson, U., L. Hässler, en H. Stille, 'Rheological Properties of Microfine Cement Grouts with Additives'. In: *Grouting, soil improvement, and geosynthetics, Vol 1*. United States of America: American Society of Civil Engineers, 1992, p.551-563.
- Hendriksma. A.M., 'Betonnen Dijk- en Oeverbekledingen (VIII), Colloïdaalbeton'. In: *Cement*, nummer 3, 1987.
- Herndon, J., en T. Lenahan, *Grouting in soils, Vol. 2 design and operations manual*. Virginia: the national technical information service, 1976.
- Kaldenbach, W.P., en H. Vastenholt, 'Inleiding in de aanleg van pijpleidingen'. In: *Cursus pijpleidingen in zee*. Delft: Stichting postdoctoraal onderwijs in de civiele techniek, 1976.
- Karol, R.H., *Chemical Grouting*. New York: Marcel Dekker, inc., 1983
- Kennedy, J.G., 'Foundation grouting of concrete gravity structures'. In: European Offshore Petroleum Conference & Exhibition. London: The society of petroleum engineers, 1978, p131-135.
- Klomp, W.G.H., en P. Lomonaco Tonda, 'Pipeline Cover Stability'. In: Jin S. Chung e.a. (eds), *The proceedings of the fifth (1995) international offshore and polar engineering conference, Vol. 2*. The Hague: The Netherlands, 1995, p. 15-22.
- Kruse, G.A.M., *Beschouwingen over de reststerkte van een kleilaag onder steenzetting*. Delft: Grondmechanica Delft, 1991.
- Kutzner, C., *Grouting of rock and soil*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1996

Littlejohn, G.S. 'Chemical grouting'. In: M.P. Moseley (ed), *Ground Improvement*. Glasgow: Blackie Academic & Professional, 1993, p. 100-130.

Lombardi, G., 'The Role of Cohesion in Cement Grouting of rock'. In: *Proceedings of the 15th ICOLD-Congres, Vol 3*. Lausanne, 1985, p. 235-261

Mastbergen, D.R., en A. Bezuijen, *Het storten van zand onder water, verslag experimentele vervolgstudie middelgrof zand*. Delft: Waterloopkundig laboratorium/Grondmechanica Delft, 1988.

Mastbergen, D.R., en A. Bezuijen, 'On the construction of sand fill dams, part I and II'. In: P.A. Kolkman e.a. (eds), *Modelling Soil-Water-Structure Interactions SOWAS 88*. Rotterdam: Balkema, 1988

Moxon, S., 'Grouted Connections for offshore structures'. In: P.L.J. Domone e.a (eds), *Structural Grouts*. Glasgow: Blackie Academic & Professional, 1994, p. 111-130.

Pratt, P.L., 'Chemical and physical structure of cement grouts'. In: P.L.J. Domone e.a (eds), *Structural Grouts*. Glasgow: Blackie Academic & Professional, 1994, p. 3-28.

Richardson, J.F., en W.N. Zaki, 'Sedimentation and fluidisation, part 1'. In: *Trans. Inst. Chemical Engineers, vol 32*. 1954.

Samol, H., en H. Priebe, 'Soil-Fracturing, an Injection Method for Ground Improvement'. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco*. Rotterdam: Balkema, 1985, p. 1753-1756

Schaefer, R., *Ground improvement, ground reinforcement, ground treatment, developments 1987-1997*. Geoinstitute, ASCE, 1997

Scheidegger, A.E., en E.F. Johnson, 'Displacement Processes in Porous Media'. Symposium on the Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media. Haifa:1969

Schiereck, G.J., *Introduction to bed, bank and shore protection*. Delft: Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, 1998.

Schwarz, L.G., en R.J. Krizek. 'Effects of Mixing on Rheologica' properties of Microfine Cement Grout'. In: *Grouting, soil improvement, and geosynthetics, Vol 1*. United States of America: American Society of Civil Engineers, 1992, p.512-525.

Skipp, B.O., 'Clay grouting and alluvial grouting'. In: F.G. Bell (ed), *Methods of Treatment of Unstable Ground*. London: Newnes-Butterworths, 1975, p.29-35.

Spierenburg, S.E.J., 'Geotechnical aspects of submarine pipelines'. In: *Behaviour of Offshore Structures*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1985, p. 797-805.

Stephenson, D., *Pipeline design for water engineers, developments in water science 15*. 2^e druk. Amsterdam: Elsevier, 1981.

Stowe, K., *Essentials of ocean science*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1987.

Verruijt, A., *Grondmechanica*. 4^e druk. Delft: Delftse Uitgevers Maatschappij, 1993.

Vries, J. de, *Afdichtingswanden van cementbentoniet, B.S.W. rapportnummer 91-13*, Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1992.

Warner, J., 'Compaction grouting Mechanism - What do we know?'. In: *Grouting: Compaction, Remediation and Testing*. New York: American Society of Civil Engineers, 1997, p 1-17.

Weele, A.F. van, *Moderne funderingstechnieken*. 2^e druk. Leiden: Spruyt, van Mantgem & De Does BV, 1993.

Bijlage 2: terminologielijst

Terminologielijst

Additief:	Stof (of combinatie van stoffen) die aan de bodem wordt toegevoegd om de eigenschappen van deze bodem te verbeteren.
Afzettijd:	Tijdsduur, vanaf het moment dat het cement aan de bentonietsuspensie wordt toegevoegd, dat de cement-bentonietsuspensie verwerkbaar (verpompbaar/injecteerbaar) is en dus verplaatst kan worden. Na het verstijven van de afzettijd heeft de viscositeit zijn eindwaarde bereikt en is zo toegenomen, dat de cement-bentonietsuspensie niet meer verplaatsbaar is.
Bentonietpercentage:	Hoeveelheid bentoniet in de cement-bentonietsuspensie, uitgedrukt als gewichtspercentage ten opzichte van de totaal gebruikte hoeveelheid water bij het aanmaken van de cement-bentonietsuspensie.
Bezinktijd:	Tijdsduur vanaf het moment dat gestopt wordt met fluïdiseren tot het moment dat het gefluïdiseerde korrelmateriaal weer "gewoon" op de bodem ligt.
Binghamse vloeistof:	Vloeistof die wordt gekenmerkt door een grensschuifspanning (= cohesie).
Cement-bentonietsuspensie:	Vloeibaar mengsel van cement, bentoniet, water en eventuele toevoegingen.
Cohesie:	Beginweerstand die moet worden overwonnen, voordat een vloeistof in beweging komt ten gevolge van een (schuif)snelheidsgradiënt (= grensschuifspanning).
Deklaag:	Beschermende laag zand op een ingegraven pijpleiding om de pijpleiding te beschermen tegen krachten van buitenaf.
Doorlatendheid:	Mate waarin een materiaal gas of vloeistof doorlaat (= permeabiliteit).
Draagvermogen:	Mate waarin de cement-bentonietsuspensie bezinkende zandkorrels draagt. Afhankelijk van de cohesie en viscositeit (schuifspanning) van de cement-bentonietsuspensie. Kan worden gemeten met behulp van het Kugelharfengerät (= zwichtspanning).
Eindproduct:	Het uitgeharde monster, als model van de verstevigde deklaag.
Fluïdisatietechnieken:	Door het injecteren van water wordt een zandbodem gefluïdiseerd tot een zand-watermengsel met een bepaalde dichtheid. Een pijpleiding zakt vervolgens onder invloed van zijn eigen gewicht in de ontstane geul. Na dit proces bezinkt het gefluïdiseerde zand en wordt de pijpleiding bedekt door een beschermende zandlaag.
Grensschuifspanning:	Zie cohesie.
Grouten:	Het onder druk persen van vloeistoffen (grouts) in de open ruimtes van de ondergrond, met het doel de permeabiliteit te reduceren en/of de sterkte van de ondergrond te vergroten.

Kritische massa-snelheid:	Manier waarop de kracht die nodig is om zand te fluïdiseren wordt uitgedrukt [kg/s.m^2].
Kugelharrfengerät:	Apparaat om de schuifspanning (en dus het draagvermogen) in een cement-bentonietuspensie te meten.
Marsh-trechter:	Gestandaardiseerde trechter van kunststof volgens API, om de viscositeit van een vloeistof te relateren aan die van water. De uitstroomtijd (s) van een liter (l) vloeistof is een maat, waarmee de viscositeit van deze vloeistof gerelateerd kan worden aan die van water. De uitstroomtijd van water is ongeveer 28 s/l.
Marsh-viscositeit:	Viscositeit (s/l) bepaald met de Marsh-trechter.
Mengenergie:	Hoeveelheid energie, die wordt gebruikt bij het aanmaken van de cement-bentonietuspensies.
Pinhole proef:	Proef waarmee inzicht kan worden verkregen in de gevoeligheid van het eindproduct voor mechanische (en chemische) erosie.
Permeabiliteit:	Zie doorlatendheid.
Porositeit:	Volume van de poriën gedeeld door het totale volume van de grond ($n = V_p/V_g$).
Sedimentatie:	Het bezinken van de in de suspensie aanwezige korrels.
Stabiliteit:	Een suspensie is stabiel, als geldt dat $dH/H < 10\%$. Een stabiele suspensie is een homogene suspensie, met constante eigenschappen. Als een suspensie stil staat, treedt er sedimentatie op. De vaste deeltjes (de korrels) van de suspensie zullen bezinken. Boven op deze bezonken deeltjes blijft een laagje vrij water staan. De stabiliteit van een suspensie kan worden gemeten in een cilinder. De verhouding tussen de dikte van de laag vrij water (dH) en de dikte van de laag bezonken korrels (H) is een maat voor de stabiliteit.
Suspensie:	Vloeibaar mengsel van cement, bentoniet, water en eventuele toevoegingen.
Thixotropisch gedrag:	Samenhang die ontstaat als een vloeistof met deze eigenschap stil staat. De vloeistof wordt minder vloeibaar en gaat zich gedragen als een soort "pudding".
Trencher:	Fluïdisatie-apparaat.
Verstevigde gebied:	Deel van de beschermende zandlaag op de pijpleiding, dat ten gevolge van de injectie van het additief, betere eigenschappen heeft verkregen.
Verwerkbaarheid:	Een suspensie is verwerkbaar, dat wil zeggen verpompbaar, injecteerbaar en verplaatsbaar, zolang de viscositeit voldoende laag is.
Viscositeit:	De inwendige wrijving die een vloeistof ondervindt bij stroming.
Vortex:	Verlaging van het waterniveau rondom de roerder, ontstaat door het draaien van de roerder.

Water/cement-factor:	De massaverhouding (kg/kg) tussen de totale hoeveelheid water en de hoeveelheid cement (= W/C-factor).
Zand-watermengsel:	Het zand dat door middel van roeren in suspensie is gebracht.