

Afstudeerscriptie Jan Mulder

Stroming van beton in diepwanden

**Witteveen+Bos
Hoogoorddreef 56 F
postbus 12205
1100 AE Amsterdam
telefoon 020 312 55 55
telefax 020 697 47 95**

Stroming van beton in diepwanden

student:	studentnummer	status
Jan Mulder Sumatrakade 1409 1019 RP Amsterdam	1161695	Definitief datum 11 maart 2011

afstudeercommissie:	
prof.ir. A.F. van Tol	TU Delft/Deltares
ir. S. Delfgaauw	Witteveen+Bos
ir. J. van Dalen	TU Delft
ir. A. Smale	Witteveen+Bos/Deltares
ir. C. van der Veen	TU Delft

SUMMARY

During the construction of a station of the north south line in Amsterdam a leak in the diaphragm wall lead to severe damage to adjacent buildings. The leak consisted of a clay deposit caught near the joint. Until the excavation reached the level of the deposit, the deposit acted as a seal. After the excavation it started to leak and eventually failed.

The following investigation led to no clear explanation of the presence of the deposit. Yet it revealed a lack of a clear understanding of the mechanisms. This prompted an investigation in to these mechanisms.

This report deals with the aspect of the flow patterns of the concrete.

To investigate the flow pattern of concrete a numerical model has been used. A two dimensional model was created. In the model a constant stream of concrete was introduced in a layer of concrete submerged in a bentonite suspension. With this model a series of simulations are made. The first series is made with a varying yield stress of the bentonite suspension and the concrete. A second series is made with varying yield stress and the density of the bentonite suspension. Finally two simulations were made with varying spacing of the reinforcement bars.

From the simulation it becomes clear that the reinforcement plays an important role in the formation of deposits. The research revealed that whether or not a deposit will form depends on how the concrete flows through the reinforcement structure. Two flows compete to fill the space between the reinforcement and the wall. The filling of the panel will be mostly vertical. The concrete has to flow through the space between the reinforcement bars to fill the area between the wall and the reinforcement. This adds resistance to the flow. The level in the centre of the panel will therefore rise faster than at the edges. To keep up a horizontal flow will occur from the top layer of concrete to the edges. If the vertical flow stays behind to strongly the horizontal flow can enclose the bentonite suspension from the top. This results in a deposit.

From the simulation we can conclude that the density of the bentonite suspension has no significant part in the formation of deposits. It has to be noted that the density is assumed as an independent property of the bentonite suspension. It has not eluded me that in reality the density may have a correlation with the yield stress of the suspension.

The yield stress of both the bentonite suspension and concrete have a great impact in the formation of deposits. Below a yield stress of concrete of 400 Pa no significant deposits will form.

When the spacing of the reinforcement is cut in half something remarkable occurs. In the simulation with the full spacing a deposit is formed, while when the spacing is cut in half the deposit does not form. This occurs because the horizontal flow instead of covering the bentonite suspension it will squeeze the bentonite suspension upwards.

With the spacing back to the full distance but irregular. This is done with an alternating 10% increase and then a 10% decrease in the distance between the reinforcement bars. From this simulation we see an alternating pattern of the horizontal flow covering and squeezing. Resulting in some deposits. We see deposits forming not at the decreased distance but at the increased distance. This is because the decreased space hinders the vertical flow while the increased distance helps the horizontal flow.

VOORWOORD

Dit is het eindrapport van de mijn studie aan de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen aan de Technische Universiteit te Delft.

Ik wil graag mij afstudeercommissie en Witteveen+Bos bedanken voor hun bijdrage en ondersteuning.

Jan Mulder
Amsterdam, februari 2011

INHOUDSOPGAVE	blz.
1. AANLEIDING	1
2. PROBLEEM ANALYSE	2
2.1. Procesbeschrijving	2
2.2. Probleem Amsterdam	3
2.3. Probleem omschrijving	4
2.3.1. Een obstakel dat de doorstroming verhindert	4
2.3.2. Het bentonietmengsel heeft niet de juiste eigenschappen	6
2.3.3. Het beton heeft niet de juiste eigenschappen	6
2.3.4. Het ideale stortpatroon wordt verstoord	6
2.4. Doelstelling	6
3. THEORETISCH KADER	8
3.1. Rheologie	8
3.1.1. Algemeen	8
3.1.2. Rheologie van beton	10
3.1.3. Rheologie van bentoniet	12
3.2. Normen	12
3.2.1. Wapening	12
3.2.2. Beton	13
3.2.3. Bentoniet	14
3.3. Stromingsverwachtingen diepwanden	15
3.4. Numerieke modellen	16
4. UITGANGSPUNTEN	17
4.1. Beton	17
4.1.1. Zwichtspanning	17
4.1.2. Viscositeit	17
4.2. Bentoniet	17
4.2.1. Zwichtspanning	17
4.2.2. Viscositeit	18
4.2.3. Dichtheid	18
4.3. Geometrie	18
4.3.1. Afmetingen	18
4.3.2. Bodem	19
4.3.3. Kokerdiepte	19
4.3.4. Wapening	19
4.3.5. Instroomsnelheid	20
5. NUMERIEKE SOFTWARE	21
5.1. Voorwaarden	21
5.1.1. Literatuur	21
5.1.2. Keuze	21
5.2. OpenFOAM	22
5.2.1. Derde dimensie	24
5.2.2. Validatie	24
5.2.3. Bodem	26
5.2.4. Kokerdiepte	27
6. RESULTATEN	30
6.1. Zonder wapening	30

6.2. Wapening	31
6.2.1. Zwichtspanning	32
6.2.2. Dichtheid	40
6.3. Wapening Fijn	42
6.4. Onregelmatige wapening	44
6.5. Conclusie	46
7. CONCLUSIE	47
8. AANBEVELINGEN	48

laatste bladzijde	48
-------------------	-----------

bijlagen	aantal bladzijden
I Literatuurlijst	1
II Uitwerking prop aan de wand	3
III Bewijs Couette-stroming	2

1. AANLEIDING

In Amsterdam is in de jaren 70 een metrolijn aangelegd. Hiervoor diende een groot aantal gebouwen te worden gesloopt. De bouw viel samen met een tekort aan woonruimte. Deze combinatie heeft tot hevige protesten geleid. De gemeente heeft toen besloten om een deel van de geplande metrolijn niet te bouwen uit angst voor nog meer protesten en verdere plannen te staken.

In de jaren 90 is begonnen met het plannen van een nieuwe metrolijn, de Noord/Zuidlijn. Deze metrolijn zou worden gebouwd met de nieuwe bouwmethode en volgt het straten patroon. Deze werkwijze om de lijn aan te leggen zorgt ervoor dat er geen gebouwen behoeven te worden gesloopt. Omdat er geen sloop hoefde plaats te vinden rekende het stadsbestuur op minder weerstand tegen een nieuwe metrolijn.

De stations voor de metrolijnen liggen ondergronds en worden aangelegd met behulp van de wandendak methode. Als eerste worden de wanden gebouwd. Hierna wordt op de wanden een dak gebouwd. Vervolgens wordt onder het dak de benodigde ruimte ontgraven. Als wand wordt gebruik gemaakt van diepwanden.

Diepwanden zijn een veel gebruikte methode voor de bouw van wanden in een (tijdelijke) bouwput. Diepwanden worden over het algemeen gezien als betrouwbare constructie-elementen. Er zijn altijd een klein aantal vochtige plekken maar deze zorgen meestal niet voor problemen. Als er een lekkage optreedt zijn er methoden om de lekkages op te sporen, maar deze zijn niet nauwkeurig.

Bij station Vijzelgracht is er een kleiachtige substantie in een voeg achter gebleven. De substantie is tot minimaal een halve dikte van de wand ingedrongen. Er wordt aangenomen dat de substantie bentoniet is. Tijdens het ontgraven wordt de druk aan de binnenkant van bouwput wordt druk lager, terwijl de druk aan de buitenzijde gelijk blijft. De resulterende druk op de prop wordt tijdens het ontgraven steeds hoger. Bij station Vijzelgracht heeft de prop voor een deel van ontgraving voor een waterdichte afsluiting gezorgd. Om prop af te dekken wordt er een stalen plaat opgeschroefd. Tijdens booractiviteiten voor de stalen plaat is de prop gaan lekken en is vervolgens uit de voeg gedrukt. Het is onduidelijk of de booractiviteiten de klei hebben verzwakt of dat een langzame lekkage de insluiting heeft verzwakt.

De stroming die door het lek is ontstaan nam een deel van de grond buiten de bouwkuip mee. Dit heeft tot ernstige verzakkingen van de naburige monumentale panden geleid.

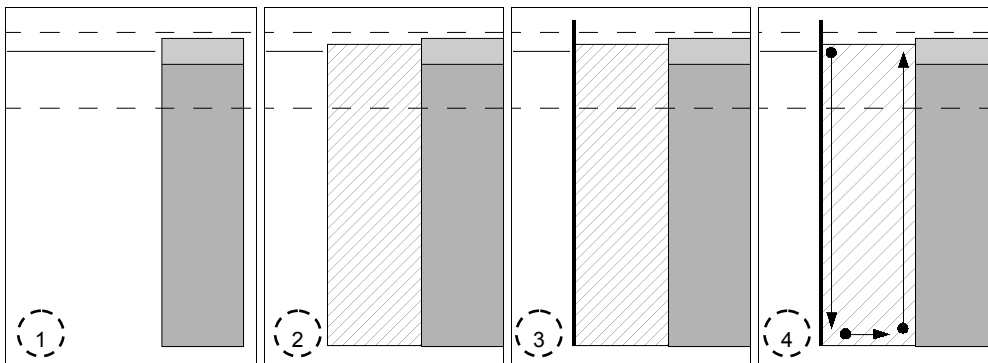
Door de onverwachte lekkage is er een licht wantrouwen ontstaan ten opzichte van diepwanden. Dit onderzoek tracht te achterhalen wat de oorzaken kunnen zijn van lekkageproblemen bij diepwanden.

2. PROBLEEM ANALYSE

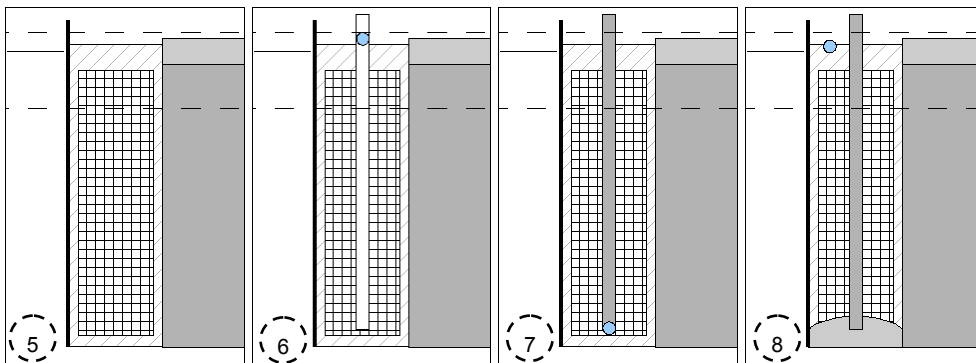
2.1. Procesbeschrijving

Om een helder beeld te krijgen van bouw van een diepwand wordt in deze paragraaf het bouwproces van diepwanden beschreven zoals is toegepast bij de Amsterdamse stations.

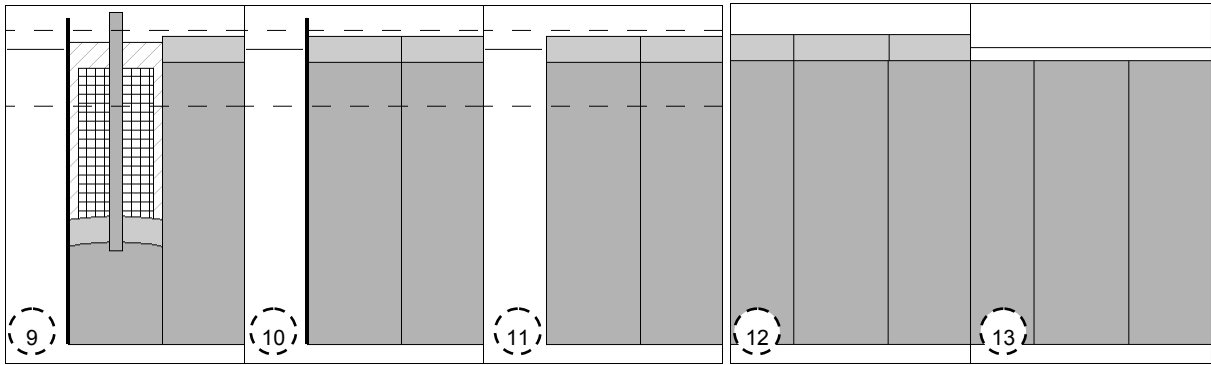
Het fabriceren van diepwanden begint met het plaatsen van geleidebalken (1). Dit wordt gevolgd door het ontgraven van de sleuf en gelijktijdig vullen van de sleuf met het bentonietmengsel (2). Als de sleuf op diepte is worden de voegplanken geplaatst (3). In de voegplank zit een rubberprofiel om de mogelijke lekweg via de voeg te verlengen. Dit rubber profiel blijft achter in de wand. Na het plaatsen van de voegplanken wordt het bentonietmengsel ontzand. Dit gebeurt door met een pomp bij de bodem het zanderige bentonietmengsel op te zuigen en aan de bovenzijde met verschoond bentonietmengsel aan te vullen (4). Om een eventuele samenklontering van grond en bentoniet op een wand te verwijderen kan langs het naburige paneel een borstel naar beneden worden gelaten.



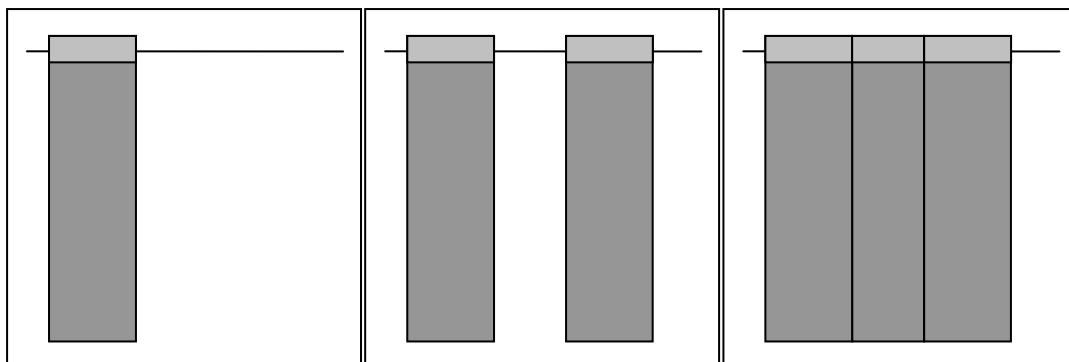
De verversing wordt gevolgd door het plaatsen van de wapening (5). In veel gevallen wordt in de wapeningskorf alvast een stortkoker gehangen. Dit wordt gedaan om de stortkoker op de juiste plek in de sleuf te krijgen. In de stortkoker wordt een barrière geplaatst tussen de bentoniet en het beton. De barrière bestaat vaak uit een zaagselachtige materiaal (6). De barrière wordt gebruikt om het beton en het bentoniet zo min mogelijk te laten mengen. Bij het storten wordt deze barrière naar beneden gedrukt (7 en 8).



Na het moment dat voldoende beton is gestort wordt de stortkoker met dezelfde stijgsnelheid, vaak stapsgewijs, van het beton omhoog getrokken (9). Deze manier van storten zou er voor moeten zorgen dat de eerste laag een beschermlaag vormt tussen het nieuwe beton en de bentoniet. De eerste laag is vermengd met het bentoniet en heeft een slechtere kwaliteit. Dit proces van storten gaat door tot op een niveau boven het gewenste eindniveau (10). Als het beton is verhard wordt de voegplank getrokken (11). Als laatste wordt de bovenste laag verwijderd. De bovenste laag is van slechtere kwaliteit omdat deze laag is verontreinigd met bentoniet. De laatste stap is niet strikt noodzakelijk zolang men maar realiseert dat dit deel van de wand van slechte kwaliteit is.



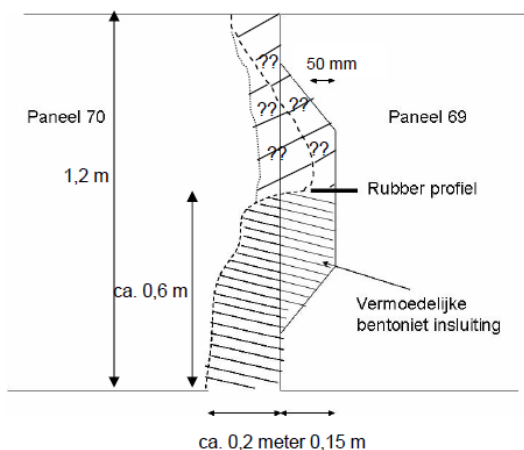
De panelen worden ook om en om gemaakt. Er worden eerst twee panelen gemaakt en vervolgens wordt het paneel hier tussenin gemaakt.



2.2. Probleem Amsterdam

Volgens het rapport 'Lekkage diepwanden station Vijzelgracht Noord Zuidlijn' [Deltares 2008] ontdekte de aannemer bij het ontgraven van een tussenpaneel van station Vijzelgracht dat een voeg was gevuld met een grijs kleiachtig materiaal. De voeg vertoont geen tekenen van lekkage. De aannemer kan een duimstok ongeveer 60 cm in de voeg drukken. Op ongeveer 60 cm zit een rubberen voegprofiel. Het is niet duidelijk of de duimstok tegen beton of tegen het rubberen voegprofiel drukt.

afbeelding 1. Doorsnede voeg paneel 69/70



Om het mogelijke gat te dichten zijn er in de wand gaten geboord om een stalen afdichtplaat te verankeren. Tijdens het boren begint de voeg te lekken. Het voegprofiel kan de grote waterdruk niet weer-

staan en bezwijkt waarna de klei naar binnen stroomt. Om dit te stoppen wordt er gestart met het boren van een gat om van binnen uit een chemisch mengsel door de wand aan de buitenzijde van de wand te spuiten en zodoende het gat te dicht. Tijdens het boren van het gat neemt de stroming toe. Het gat wordt uiteindelijk gedicht door aan de buitenzijde een mengsel van water en cement met de grond te vermengen. Er is geen eenduidige verklaring hoe de klei-insluiting is ontstaan.

2.3. Probleem omschrijving

In de vorige paragraaf wordt omschreven hoe het proces ideaal zou verlopen. De werkelijkheid is dat het proces regelmatig niet helemaal ideaal verloopt.

Er zijn op het gebied van diepwanden internationale normen. Deze normen geven informatie over het proces ten einde bentonietinsluitingen te voorkomen. De onderliggende mechanismen die dit veroorzaken zijn niet omschreven. Uit literatuur [Borchert, Linder], [Deltares; 2008] en [Soroush, Soroush; 2005] is gebleken dat er voor bentonietinsluitingen een aantal oorzaken kunnen zijn.

De oorzaken zitten in de volgende categorieën:

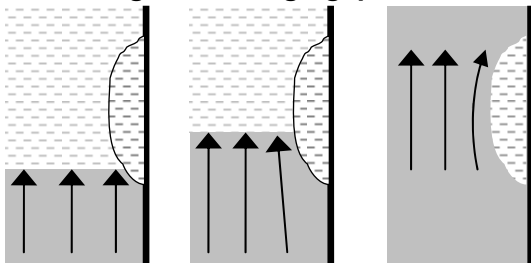
- er is een obstakel dat de doorstroming van beton verhindert;
- het bentonietmengsel heeft niet de juiste eigenschappen;
- Het beton is te stijf;
- het ideale stortpatroon wordt verstoord.

2.3.1. Een obstakel dat de doorstroming verhindert

Er zijn verschillende mogelijkheden waardoor de stroming kan worden verhindert.

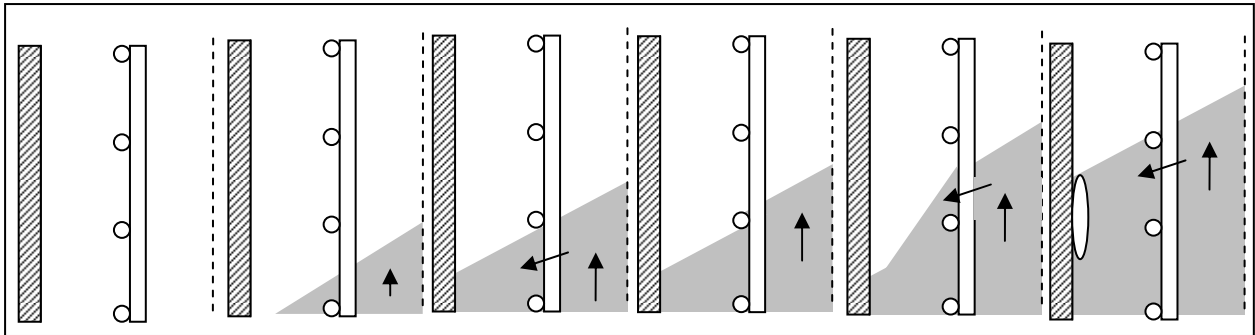
Als eerste kan er aan de wand een bentonietlaag zijn afgezet die zondanig stijf is dat de stroming van het beton dit niet kan wegspoelen. Zie afbeelding 2.

afbeelding 2. Verdringingsproces



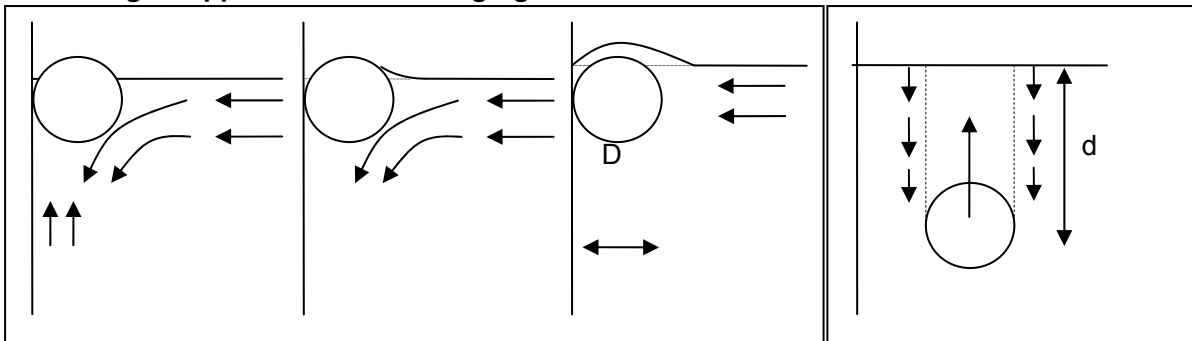
Een obstakel kan ook betekenen dat de wapening een te grote weerstand oplevert. Op het moment dat het beton door de wapening stroomt, gaat er energie verloren. De snelheid wordt minder. Als de stijgsnelheid hoger is dan het tempo waarin de ruimte achter de wapening gevuld kan worden dan zal vanuit een hoger gelegen opening in de wapening beton van bovenaf bentoniet kunnen insluiten. Zie afbeelding 3.

afbeelding 3. Stroming door de wapening



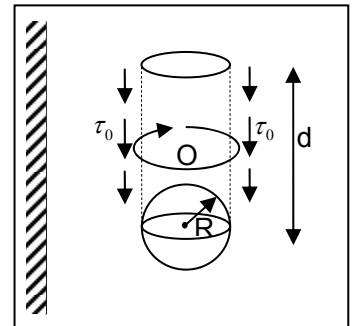
Er is ook de mogelijkheid dat er samenhangende grond tussen de wapening en de grondwand terecht is gekomen en door de stroming wordt ingesloten.

afbeelding 4. Oppervlak verontreiniging



Zolang de prop nog niet is overspoeld zijn de enige twee elementen die op de prop een neerwaartse kracht uitoefenen de sleepkracht en de wrijving met de wand. De prop zal op zijn plaats worden gehouden als de wandwrijving en de neerwaartse stroming de opdrijvende compenseert.

Als de prop eenmaal voldoende overstroomd is zal de opwaartse kracht van de prop voldoende moeten zijn om de zwichtspanning van het beton te overwinnen. Als men uitgaat van een losse bol met een straal R en een dichtheid ρ_{prop} . De bol is ondergedompeld in een binghamse vloeistof met een dichtheid ρ_{vloei} en een zwichtspanning van τ_0 . Om te voorkomen dat de bol opdrijft moet de schuifkracht in het beton groter zijn dan de opwaartse kracht.



$$\tau_0 \cdot d \cdot O > V \cdot (\rho_{vloei} - \rho_{prop})$$

$$\tau_0 \cdot d \cdot 2 \cdot \pi \cdot R > \frac{4 \cdot \pi \cdot R^3}{3} \cdot (\rho_{vloei} - \rho_{prop})$$

De minimale diepte vereist om de bol niet meer te laten opdrijven wordt gegeven door:

$$d > \frac{2 \cdot R^2}{3 \cdot \tau_0} \cdot (\rho_{vloei} - \rho_{prop})$$

Deze analyse is een erg versimpeld model. Het model vereist dat de prop intact blijft en dat de prop zijn vorm behoud. Bij de vervorming van de prop verandert de omtrek. Bij een gelijkblijvend volume en de prop wordt samengedrukt tot een horizontale flens wordt de omtrek groter. De minimaal vereiste diepte

neemt daardoor af. In deze simpele beschouwing wordt uitgegaan dat de twee vloeistoffen niet vermengen. Het is goed mogelijk dat het bentoniet in het beton wordt gedrukt en wordt vermengd.

2.3.2. Het bentonietmengsel heeft niet de juiste eigenschappen

Het beton verdrijft het bentoniet als gevolg van het dichtheidsverschil. Bij een hogere dichtheid van het bentoniet wordt de drukgradiënt minder. Er is een zekere minimale schuifspanning nodig om het bentoniet in beweging te zetten. Als de minimaal vereiste schuifspanning wordt verhoogd dan zal het moeilijker te verplaatsen zijn. De minimale schuifspanning neemt toe als het bentoniet een tijd stil heeft gestaan of als het initiële mengsel een hogere zwichspanning heeft dan werd aangenomen.

Het bentoniet wordt verontreinigd tijdens het graven van de sleuf. Het ontgraven verhoogt de dichtheid van het bentoniet. Dit zogenaamde graafbentoniet moet worden vervangen of worden opgeschoond. Wordt er niet in voldoende mate ververst dan blijft er een hogere dichtheid in de sleuf. Wordt het dichtheidsverschil lager en daarmee de verdringende kracht. Met als gevolg dat de bentoniet niet goed wordt verdrongen.

2.3.3. Het beton heeft niet de juiste eigenschappen

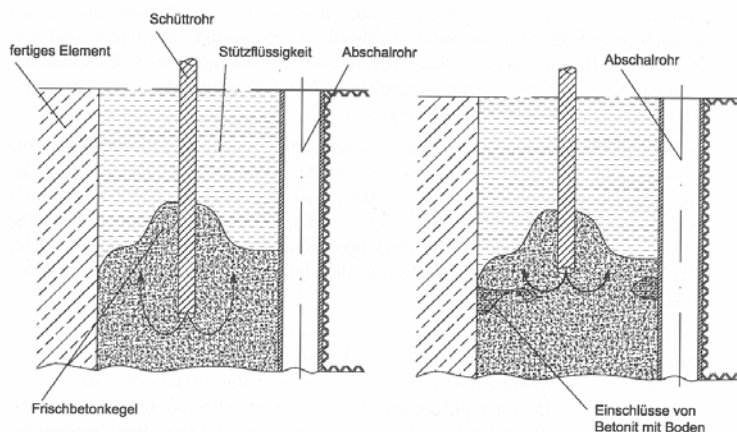
Net als bentoniet heeft beton een bepaalde schuifspanning die dient te worden overschreden voordat het beton begint te stromen. Een te hoge schuifspanning zorgt dat het beton moeilijker naar de randen stroomt. Tevens is er door de grotere stijfheid minder energie beschikbaar om door de wapening te stromen.

2.3.4. Het ideale stortpatroon wordt verstoord

Als er ongelijkmatig wordt gestort vanuit 2 stortkokers kan er een te grote opbouw ontstaan aan één zijde waarbij er bentoniet wordt ingesloten.

Tijdens het storten wordt de stortkoker omhoog getrokken. Als de stortkoker te hoog wordt opgetrokken kan de stroming uitbreken. Zie afbeelding 5.

afbeelding 5. Insluitingen [Triantafyllidis; 2004]



De algemene processen zijn bekend maar de exacte uitwerkingen niet.

2.4. Doelstelling

In dit onderzoek wordt onderzocht hoe de stromingseigenschappen van het beton en het bentoniet een rol speelt in de vorming van bentoniet insluitingen.

Er wordt eerst een literatuurstudie gedaan om te achterhalen welke factoren een rol spelen en welke waarde deze kunnen hebben. Dit wordt gevolgd door een analyse van de eisen aan de software en de keuze voor de software.

Met de software worden een aantal verschillende gevallen gesimuleerd.

3. THEORETISCH KADER

3.1. Rheologie

3.1.1. Algemeen

De wetenschap die de fysische stromingeigenschappen bestudeert is de rheologie. Deze wetenschap bestudeert de relatie tussen de vervorming en de opgelegde spanning.

Bij een onsamendrukbare vloeistof is de enige vormverandering die plaats kan vinden de hoekverdraaiing. Een vaste stof heeft bij een specifieke hoekverdraaiing een specifieke schuifspanning.

$$\tau = G \cdot \gamma$$

Met:

γ Hoekverdraaiing

G Glijmodulus

Een vloeistof zal bij een schuifspanning gaan vloeien. Dit houdt in een doorgaande vervorming. De schuifspanning is gerelateerd aan de hoekverdraaiingverandering in de tijd, de vervormingsnelheid.

Als de relatie tussen de schuifspanning en de vervormingsnelheid lineair is en door de oorsprong gaat dan is er sprake van een Newtonse vloeistof. Een voorbeeld van dit type vloeistof is water.

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt}$$

Met:

η Viscositeit [Pa·s]

$\frac{d\gamma}{dt}$ Vervormingsnelheid [1/s]

Een vaste stof heeft een tijdsafhankelijke relatie tussen vervorming en spanning. In afbeelding 6 wordt dit weergegeven door een verticale lijn door de oorsprong. Is de relatie tussen de schuifspanning en de vervormingsnelheid lineair, maar gaat niet door de oorsprong dan is er sprake van een Binghamse vloeistof. Dit houdt in dat de vloeistof zich tot een bepaalde schuifspanning als een vaste stof gedraagt en daarna als een vloeistof. De spanning waarbij de overgang plaats vindt tussen vast en vloeibaar heet zwichtspanning.

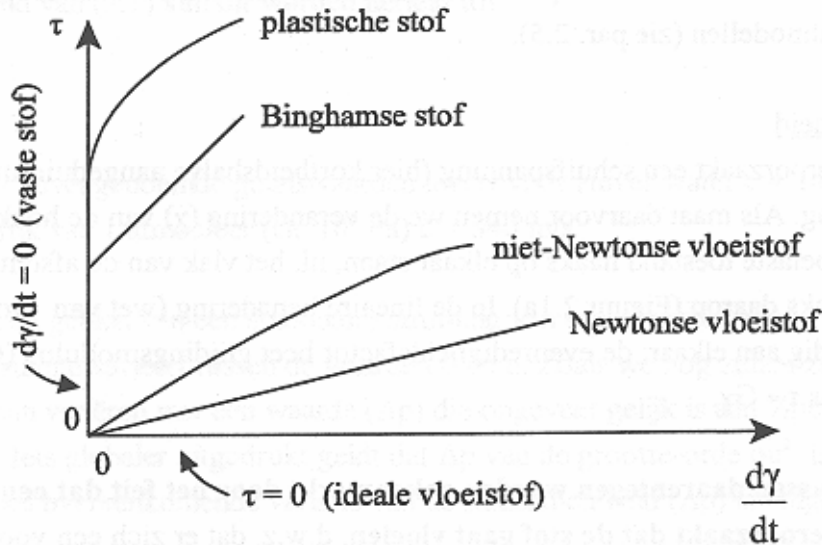
$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{d\gamma}{dt}$$

Met

τ_0 Zwichtspanning [Pa]

μ Plastische viscositeit [Pa·s]

afbeelding 6. Stromingseigenschappen [Battjes 2002]



Is de relatie tussen de vervormingsnelheid en schuifspanning niet lineair maar gaat wel door de oorsprong dan is er sprake van een niet-Newtonse vloeistof.

$$\tau = K \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)^n$$

Met:

- K consistentie [$\text{Pa} \cdot \text{s}^n$]
- N Stromingsindex [-]

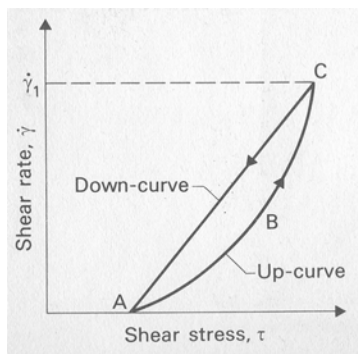
Is de relatie tussen de vervormingsnelheid en schuifspanning niet lineair en gaat ook niet door de oorsprong dan is er sprake van een plastische stof. Plastische stof kan onder andere worden beschreven door het model van Herschel-Bulkley.

$$\tau = \tau_{HB} + K_{HB} \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)^n$$

naam	lineair	door de oorsprong
Newtonse	ja	ja
Niet Newtonse	nee	ja
Bingham	ja	nee
Plastische stof	nee	nee

Een andere eigenschap dat wordt beschreven is thixotropie. Als het materiaal een 'geheugen' van de schuifspanning heeft wordt het materiaal thixotroop genoemd. Dit proces bestaat uit formatie en vernietiging van de pakking van de korrels. Als het materiaal stil staat neemt de schuifspanning toe over tijd. Bij belasten zal het materiaal zich stijver gedragen terwijl tijdens het ontlasten het materiaal zich slapper gedraagt. Als het materiaal zich bij belasten slapper gedraagt en bij ontlasten stijver dan heet dit gedrag rheospectie. In de vervormingsnelheid-spanning diagram ontstaat door thixotropie of rheospectie een hysteresecurve. Een hysteresecurve is weergegeven in afbeelding 7.

afbeelding 7. Hysterese curve [Tattersalland, Banfill; 1983]



3.1.2. Rheologie van beton

Volgens 'The Rheology of Fresh Concrete' [Tattersalland, Banfill; 1983] wordt het stroomgedrag van beton het beste omschreven door het stromingsmodel van Bingham.

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{d\gamma}{dt}$$

Om tot de juiste parameters te komen moet het beton worden getest in een laboratorium met een rheometer. Dit apparaat test bij een constante vervormingsnelheid de schuifspanning. Op een bouwplaats is een dergelijke test een moeilijk uitvoerbaar.

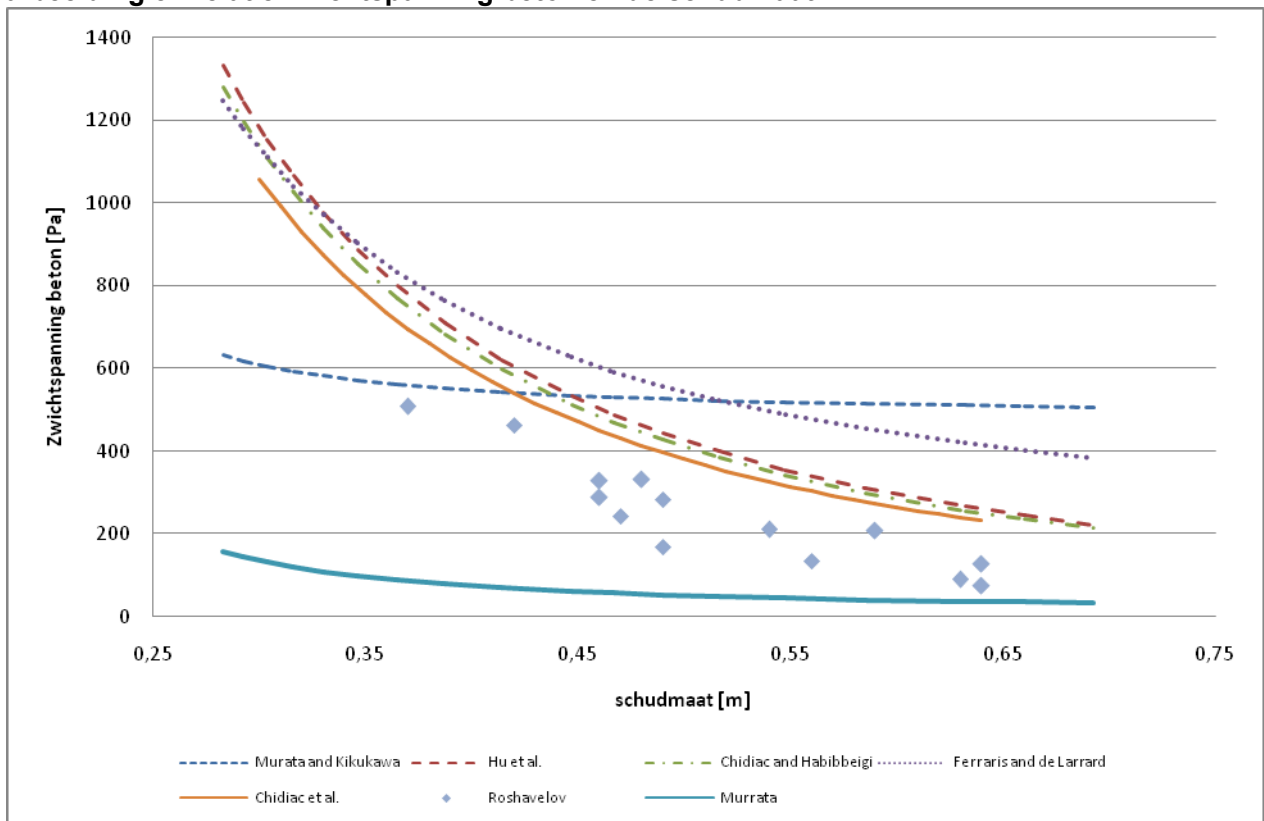
De NEN 8005 classificeert beton in een aantal consistentie klassen. De klassen zijn ingedeeld naar verschillende meetmethodes. De meest gebruikelijke zijn de zetmaat en de schudmaat.

Consistentie	Verdichtingsmaat		Zetmaat		Schudmaat	
	Klasse	c [-]	Klasse	h [mm]	Klasse	$\frac{d_1 + d_2}{2}$ [mm]
Droog	C0	$\geq 1,46$				
Aardvochtig	C1	1,45 – 1,26	S1	(10 – 40)	F1	(≤ 340)
Half plastisch	C2	(1,25 – 1,11)	S2	50 – 90	F2	(350 – 410)
Plastisch	C3	(1,10 – 1,04)	S3	100 – 150	F3	(420 – 480)
Zeer plastisch			S4	(160 – 210)	F4	490 – 550
Vloeibaar			S5	(≥ 220)	F5	560 – 620
Zeer vloeibaar					F6	(≥ 630)

Er is een relatie tussen aan de enerzijds de zwichspanning en anderzijds de schudmaat en de zetmaat. De plastische viscositeit is een stuk moeilijker te bepalen.

In 'Slump and Slump Flow for Characterizing Yield Stress of Fresh Concrete' [Chidiac et al; 2006] vergelijken de auteurs verschillende voorstellen van verschillende bronnen voor de relatie tussen de zwichspanning en de schudmaat van beton. Deze relaties zijn weergegeven in afbeelding 8.

afbeelding 8. Relatie zwichtspanning beton en de schudmaat



De auteurs van 'Slump and Slump Flow for Characterizing Yield Stress of Fresh Concrete' concluderen dat het beste resultaat wordt behaald met de vergelijking van Chidiac et. al. [2000]:

$$\tau = 39.7 \times 10^{-3} \frac{\rho}{S_f^2}$$

Met

ρ Dichtheid [kg/m^3]
 S_f Schudmaat [meter]

Als men deze formule bekijkt met de gegevens van 'Prediction of fresh concrete flow behavior based on analytical model for mixture proportioning' [Roshavelov; 2005] is er een groot verschil tussen de beide voorstellen voor zwichtspanningen. De gevonden waarde van Roshavelov hebben een aanzienlijk lagere zwichtspanning. Er is geen sluitende verklaring voor het verschil.

Een ander aspect om te modelleren is het thixotrope gedrag van het beton. Door dit gedrag zal het beton in een vroeg stadium stijver worden. De verstijving gebeurt voordat het beton verhardt en heeft gevolgen voor de vloeistofdruk van het beton. De korrels in het beton pakken samen en zorgen voor een samenhangend korrelskelet. De horizontale component van de druk wordt door het korrelskelet kleiner. Het drukverloop in de diepte is dan niet meer hydrostatisch. In een thixotroop mengsel wordt dit fenomeen versterkt. Door de lagere horizontale druk wordt aan de randen de verdringing minder sterk.

Plastische viscositeit

De plastische viscositeit is niet sterk gecorreleerd met de zwichtspanning. Uit de rheologische literatuur worden verschillende methoden gebruikt om de plastische viscositeit te voorspellen. Uit de literatuur blijkt dat het model van Mahmoodzadeh and Chidiac [2009] de beste voorspelling geeft.

3.1.3. Rheologie van bentoniet

Volgens 'The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions' [Luckham and Rossi; 1999] wordt een bentoniet en watermengsel het beste omschreven door het model van Herschell-Bulkley. Het bentoniet en water mengsel is gevoelig voor geladen deeltjes (o.a. zouten en pH-graad). Met het model van Herschel-Bulkley kan bentoniet voor een groot deel van de gevallen worden beschreven. Een geconcentreerd mengsel wordt het beste omschreven door het model van Bingham. Opgemerkt moet worden dat de gelineariseerde van het Herschel-Bulkley model het model van Bingham is.

3.2. Normen

De gangbare normen voor diepwanden zijn de DIN (Deutsches Institut für Normung) 4126 Ortbeton-Schlitzwände en de Europese norm in Nederland NEN-EN 1538.

3.2.1. Wapening

De normen NEN-EN1538 en DIN4129 geven een mate waaraan de afstand tussen de wapening moet voldoen. De NEN-EN 1538 stelt dat voor de wapening de norm van ENV1992 geldt.

De specifieke wapeningseisen voor diepwanden uit de NEN-EN 1538 stelt zijn dat er voor verticale wapening een minimum diameter van 12 mm moet worden gebruikt en minimaal 3 staven per meter aan weerszijde van de wapeningskorf. De afstand tussen de wapeningstaven mag niet minder zijn dan 100 mm. Als de korreldiameter kleiner is dan 20 mm is 80 mm het minimum.

De horizontale wapening moet voldoende stijf zijn zodat de verticale wapening niet vervormd. Er moet voldoende ruimte zijn voor de stortkoker. De minimale verticale afstand tussen de wapening is 200 mm. Als de korreldiameter kleiner is dan 20 mm dan is een minimale afstand van 150 mm. De minimale horizontale afstand is 150 mm. Er wordt geadviseerd een afstand van 200 mm.

De DIN4126 is een stuk uitgebreider. Deze geeft afstanden voor een enkele wapeningslaag en voor een dubbele. Afbeelding 9 en 10 geven een overzicht van de afstanden en tabel 1 de minimale waarden. Zoals te zien in de tabel 1 is de afstand tussen de wapeningstaven afhankelijk van de zwichspanning van het bentoniet.

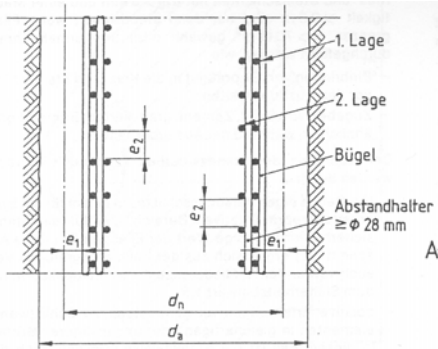
tabel 1. Minimale afstanden wapening

Tabelle 1. Lichte Durchflußweite e_1 und Stababstände e_2 in cm

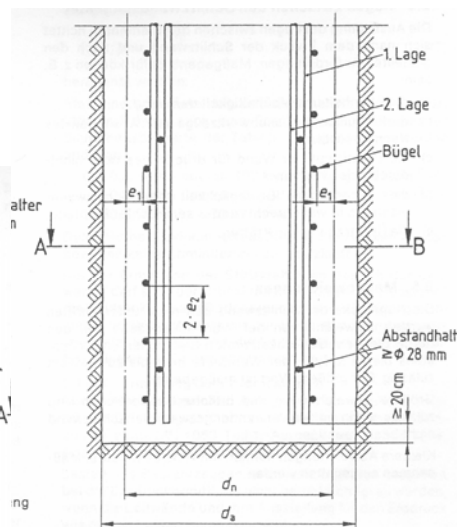
Zeile	max. Fließgrenze τ_F in N/m^2 während des Betonierens	Schlitzwand als:			
		Dauerbauwerk		Bauhilfskonstruktion	
		e_1	e_2	e_1	e_2
in cm					
1	10	5	7	3	5
2	30	7	9	4	6
3	50	10	12	6	8
4	70*)	—	—	8	10

*) $\tau_F > 50 N/m^2$ unzulässig für Dauerbauwerke
 Die Maße e_1 und e_2 gelten bei Betonzuschlaggrößtkorn ≤ 32 mm; bei größeren Betonzuschlagkörnern bis 63 mm sind die Maße mit dem Faktor 1,5 zu vergrößern.

afbeelding 9. Bovenaanzicht



afbeelding 10. Langsdoorsnede



3.2.2. Beton

Voor het fabriceren van een diepwand is een bepaald type beton nodig. Het beton wordt geacht een vloeibare consistentie te hebben. De Duitse norm DIN4126 geeft een schudmaat tussen de 55 en 60 cm met als absolute bovengrens 63 cm, De Europese norm NEN-EN 1538 stelt als voorwaarde een zetmaat tussen 160 en 210 mm. Aanbevolen wordt een zetmaat tussen 180 mm en 210 mm. Tevens accepteert de NEN-1538 een schudmaat tussen de 520 mm en 630 mm. De schudmaat van de NEN komt overeen met DIN 4126.

De NEN-EN-1538 veronderstelt dat een schudmaat tussen 520 mm en 630 mm overeen komt met een zetmaat tussen 160 mm en 210 mm. De gegevens van '*Prediction of fresh concrete flow behavior based on analytical model for mixture proportioning*' [Roshavelov; 2005] corresponderen niet met de relatie die de NEN-EN-1538 veronderstelt. Tevens corresponderen de gegeven formules in '*Slump and Slump Flow for Characterizing Yield Stress of Fresh Concrete*' [Chidiac et al.; 2006] niet met de veronderstelde relatie.

$$S = 0.3 - \frac{0.012}{S_f^2} \quad (\text{veronderstelde relatie door S. E. Chidiac, F. Habibbeigi, and D. Chan})$$

Met:

S zetmaat in meters

Sf schudmaat in meters

Maar ook de NEN 8005 stelt, dat de schudmaat en de zetmaat bij verschillende consistentieklasse horen. De gegeven bandbreedte voor de schudmaat geeft een consistentie van vloeibaar (F5), terwijl de gegeven bandbreedte voor de zetmaat een consistentie van zeer plastisch (S4).

Consistentie	Verdichtingsmaat		Zetmaat		Schudmaat	
	Klasse	c [-]	Klasse	h [mm]	Klasse	$\frac{d_1 + d_2}{2}$ [mm]
Droog	C0	$\geq 1,46$				
Aardvochtig	C1	1,45 – 1,26	S1	(10 – 40)	F1	(≤ 340)
Half plastisch	C2	(1,25 – 1,11)	S2	50 – 90	F2	(350 – 410)
Plastisch	C3	(1,10 – 1,04)	S3	100 – 150	F3	(420 – 480)
Zeer plastisch			S4	(160 – 210)	F4	490 – 550
Vloeibaar			S5	(≥ 220)	F5	560 – 620
Zeer vloeibaar					F6	(≥ 630)

Onder consistentie van het betonmengsel verstaan we een combinatie van samenhangendheid en vloeibaarheid. Het beton moet vloeibaar genoeg zijn om door de openingen in de wapening te stromen, maar samenhangend genoeg om niet uit elkaar te vallen bij de stroming door de stortkoker.

De verhouding van de verschillende bestanddelen van het beton speelt een belangrijke rol in de consistentie van het beton. Hier speelt de gradatie van het zand en grind, het cementgehalte en de toevoegingen een rol. Als de gradatie van het zand en grind niet goed op elkaar aansluit wordt het risico op *segregatie* vergroot. Ook het percentage van de kleine fractie is belang. Het kleine deeltjes houden het water goed vast. Dit reduceert het risico op *segregatie*. Onder de kleine fractie worden ook cement en eventuele fijne toevoeging verstaan. Dit wordt bereikt door een plastificeerder toe te voegen. De toevoeging van de plastificeerder heeft gevolgen voor het watergehalte van het beton.

Tevens is het noodzakelijk dat vooral de eerste storting een lange tijd vloeibaar blijft. De eerste betonstort wordt gebruikt om gedurende de stort een beschermlaag te vormen tussen het nieuwe beton en bentoniet. Er wordt aangenomen dat de eerste stort meestijgt met de betonspiegel en altijd de bovenste laag vormt. De langere tijd waarbij het beton vloeibaar blijft wordt bereikt door verhardingvertragers toe te voegen. De toevoeging van de vertragers kan echter ook gevolgen hebben voor de kwaliteit van het beton

3.2.3. Bentoniet

Bentoniet is een kleiachtig materiaal dat in grote mate op zwelt als het in aanraking komt met water. Het bestandsdeel dat voor de zwelling zorgt is Na^+ -montmorillonite. Na^+ -montmorillonite kan het beste worden gezien als een plat deeltje met een negatief geladen oppervlak en met een positief geladen omtrek. De geladenheid van de Na^+ -montmorillonite zorgt dat het bentoniet in basische oplossingen vlokt. De vlokken worden in water in suspensie gehouden. Dit verhoogt de dichtheid van het mengsel. Dit maakt het materiaal geschikt voor gebruik in een steunvloeistof. Als er in dit document wordt gesproken over bentoniet dan wordt de bentoniet suspensie bedoeld.

filtercake

Tijdens het ontgraven van de diepwand staat er een hoger hydrostatische druk in de sleuf dan daarbuiten. Hierdoor ontstaat er een stroming vanuit de sleuf naar de omliggende bodem. Met deze stroming worden deeltjes bentoniet (Na^+ -montmorillonite) meegenomen. Deze deeltjes worden door de grond gefiltreerd. Door de filtratie ontstaat een laag van grond en bentoniet. Dit proces blijft doorgaan tot de zwichspanning van het bentoniet dit stopt. Deze laag wordt de filtercake genoemd. De precieze formatie van deze cake wordt op dit moment onderzocht.

Uit het onderzoek van Soroush en Soroush [2005] blijkt dat de dikte van de bentonietcake afhangt van een aantal factoren. De cake wordt dikker bij goed doorlatende gronden en bij een hogere concentratie

van bentoniet of cement. De cake wordt minder dik bij een slecht doorlatende grond, een lage concentratie bentoniet of cement en bij een goede circulatie.

Een opvallende relatie werd gevonden met de leeftijd van het beton van het naburige paneel. Een paneel waarbij de voegplank wordt getrokken kort nadat het beton stijf genoeg is om zichzelf te ondersteunen heeft een dikkere bentoniet laag dan een paneel waarbij de voegplank later wordt getrokken. Dit wordt toegewezen aan de waterbehoefte van het beton. Als het beton uithard neemt het water uit de omgeving op. Bij een diepwand vormt de voegplank een barrière tussen het paneel en de met bentoniet en water gevulde sleuf. Als de voegplank te vroeg wordt getrokken neemt het beton het water op en laat een laag bentoniet achter.

vereisten

De NEN-EN-1538 geeft waardes voor verschillende fases. Deze worden weergegeven in tabel 2 Verder stelt de norm dat het bentoniet voldoende gelsterkte heeft om de zanddeeltjes in suspensie te houden en om de filtercake te verminderen.

tabel 2. Vereiste aan het bentoniet

Eigenschappen	Fases		
	Vers	Gereed voor hergebruik	Betonneren
Dichtheid (g/ml)	< 1,10	< 1,25	<1,15
Marsh-waarde (sec)	32 - 50	32 – 60	32 - 50
Vrij water (ml)	< 30	< 50	-
pH	7 - 11	7 – 12	-
Zandgehalte (volume %)	-	-	< 4
Filtercake (mm)	< 3	< 6	-
Temperatuur °C	> 5	> 5	> 5

modellering

De stromingseigenschappen van het bentoniet wordt het best weergegeven door het model van Herschel-Bulkley.

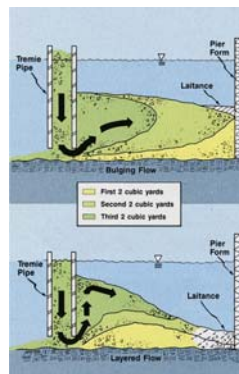
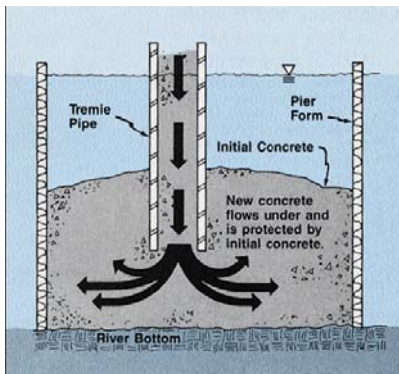
$$\tau = \tau_{HB} + K_{HB} \frac{d\gamma^n}{dt}$$

Dit model heeft 3 parameters die moeten worden bepaald voor elk mengsel. Vaak wordt voor gevallen van hoge waarde van vervormingsnelheid wordt het model van Bingham gebruikt. Dit model vereist maar 2 parameters en is dan makkelijker te bepalen. In dit onderzoek wordt deze lijn gevolgd.

3.3. Stromingsverwachtingen diepwanden

Bij het storten van het beton zal het bovenste beton worden verontreinigd met bentoniet. Om te voorkomen dat er onnodig beton met bentoniet in aanraking komt wordt getracht de eerste storten als bufferlaag te laten functioneren. De breedte van het paneel is hierbij van belang. Bij een smal paneel stroomt het beton als in afbeelding 11. Bij een smal paneel vindt men verontreinigd beton aan de bovenzijde van de wand. Deze toplaag komt overeen met de menglaag tussen beton en bentoniet. Bij een breed paneel stroomt het beton zoals in afbeelding 12. Deze afbeelding geeft weer hoe er stroming verloopt bij het storten van onderwater beton. Dit is wellicht niet correct als er bentoniet in het spel is maar is wel illustratief voor de stroming. Afhankelijk van methode van storten komen beide (bulging en 'layered') voor. Bulging komt voor bij een te brede sleuf. 'Layered' komt voor bij te hoog optrekken van de stortkoker of een onderbreking van de stort.

afbeelding 11. Ideale stroming [1] afbeelding 12. Vormen van vermengende stroming [1]



3.4. Numerieke modellen

Beton kan numeriek worden gemodelleerd als een vloeistof of als deeltjes in suspensie. Het vloeistof model heeft als voordeel dat elk rheologisch model kan worden gebruikt voor het vloeibare beton. Een ander voordeel is dat het vloeistofmodel gebruikt kan worden om het stroomgedrag van beton tijdens het storten te simuleren. Door de aanname van een homogene vloeistof is het niet mogelijk om de interne korrelstructuur te modelleren. Door het gebrek aan korrelstructuur is het niet mogelijk om boogwerking van korrelstructuren te modelleren. Boogwerking wordt verantwoordelijk gehouden voor de opstopping in de wapening.

Een model waarmee wel korrelstructuren gemodelleerd kan worden, is als het beton wordt gemodelleerd als deeltjes in suspensie. Dit model kan ook alle rheologisch modellen berekenen. Een nadeel is dat om het stortproces te modelleren er met te veel deeltjes moet worden gerekend. Dit type simulatie kan alleen voor zeer beperkte gebieden.

4. UITGANGSPUNTEN

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd waarom welke uitgangspunten worden gekozen. Er is in dit onderzoek gekozen om te variëren met de zwichtspanning van beton, de zwichtspanning en dichtheid van het bentoniet. Daarnaast wordt uiteengezet hoe het model wordt opgebouwd.

4.1. Beton

4.1.1. Zwichtspanning

De NEN-1538 vereist dat het beton een zetmaat heeft tussen de 160 mm en 220 mm of een schudmaat tussen 520 en 630 mm. Als men uitgaat van een zetmaat dan blijkt de minimum zwichtspanning ca. 500 Pa te zijn. Gaat men uit van het criterium voor schudmaat dan blijkt de zwichtspanning te variëren tussen 90 en 211 Pa. Het merendeel van de relaties geven een hogere waarde dan 211 Pa voor de zwichtspanning.

In dit onderzoek wordt het beton gemodelleerd als een Binghamse vloeistof. De zwichtspanning wordt gesteld tussen 90 Pa en 500 Pa. Er wordt ook gekeken naar de tussen liggende waarden van 200, 300 en 400 Pa. De tijdsafhankelijke effecten, zoals verharding, van het beton worden niet in het onderzoek opgenomen.

4.1.2. Viscositeit

De plastische viscositeit is in dit onderzoek niet betrokken als een te variëren parameter. Het hoofd argument voor deze keuze is de volgende. Om vast te stellen of beton in vloeibare staat voldoet aan de norm zijn er twee meetmethoden. Beide meetmethoden geven vooral een indicatie van de grootte van de zwichtspanning terwijl voor de plastische viscositeit geen conclusies getrokken kunnen worden. In het werkveld is de plastische viscositeit geen gangbare maat om te meten. De ervaringen vanuit het werkveld geven dus geen aanleiding om te vermoeden dat de plastische viscositeit een rol speelt in de vorming van insluiting. Tegelijkertijd moeten we constateren dat in het werkveld geen systematisch onderzoek naar de betekenis van plastische viscositeit voor vorming van insluiting is gedaan. Hiermee is het niet mogelijk om definitief vast te stellen dat plastische viscositeit geen rol speelt. Een tweede argument om plastische viscositeit niet al een te variëren parameter toe te passen is dat de literatuur bij het bepalen van de viscositeit voornamelijk de zwichtspanning bespreekt.

De viscositeit van beton is zeer sterk afhankelijk van de korrelsamenstelling van het betonmengsel en laat zich daardoor uitzonderlijk slecht vangen in de zet- of schudmaat. Uit '*Plastic viscosity of fresh concrete - A critical review of predictions methods*' [Mahmoodzadeh; 2009] blijkt dat bij een gelijke cementpasta maar riviergrind of gebroken puin de viscositeit een factor 2 te verschilt. In dit onderzoek wordt de plastische viscositeit gesteld op 20 pa·s. Dit is een bovengrens die wordt gevonden in het onderzoek van Roshavelov [2005]. 'Viscosity equation for concrete'[Murata en Kikikawa; 1999] geeft waarden in hetzelfde gebied.

4.2. Bentoniet

4.2.1. Zwichtspanning

De DIN 4126 geeft verschillen tussen de minimale tussenafstanden voor de wapening bij verschillende zwichtspanningen van bentoniet. In West-Nederlandse grondopbouw is 5 Pa de gebruikelijke zwichtspanning. Voor microstabiliteit in grof korreling gronden worden hogere waarden gebruikt. De maximaal toegestane zwichtspanning van bentoniet is 70 Pa. Boven de 50 Pa mag volgens de DIN 4126 de wand niet als permanente constructie dienen. Er is voor gekozen om de waarden van 5, 20, 35,50 en 70 Pa te bekijken. Alle tijdsafhankelijke effecten van het bentoniet worden buiten de beschouwing gelaten.

4.2.2. Viscositeit

Voor het bentoniet wordt een viscositeit aangehouden van 0.02 Pa·s. De gekozen waarde komt uit de BTL-Rapport 46 deel I [Mastbergen, Huisman, Kuyper; 1999]. In dit rapport zijn verschillende bentonietmengsels getest op zwichtspanning en viscositeit.

4.2.3. Dichtheid

De dichtheid van het vereiste bentoniet ligt gewoonlijk rond de 1050 kg/m³. Het komt ook voor dat het bentonietmengsel niet wordt ververst. Door het ontgraven komt er grond in de steunvloeistof. Hierdoor wordt de dichtheid verhoogd. In dit onderzoek wordt de dichtheid opgevoerd van 1050 kg/m³ met stappen van 50 kg/m³ tot 1200 kg/m³. Door het toevoegen van de Na⁺-montmorilloniet verandert het water van newtoniaanse naar een binghamse vloeistof. Wat de grond doet met de viscositeit en de zwichtspanning is niet bekend. In dit onderzoek wordt niet bekeken hoe de dichtheid, de zwichtspanning en plastische viscositeit aan elkaar gerelateerd zijn.

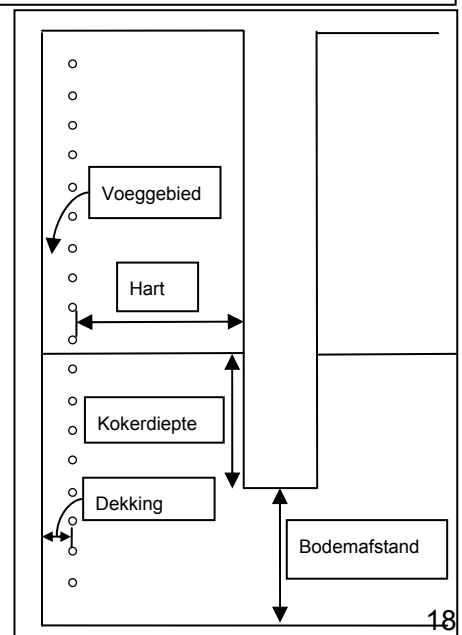
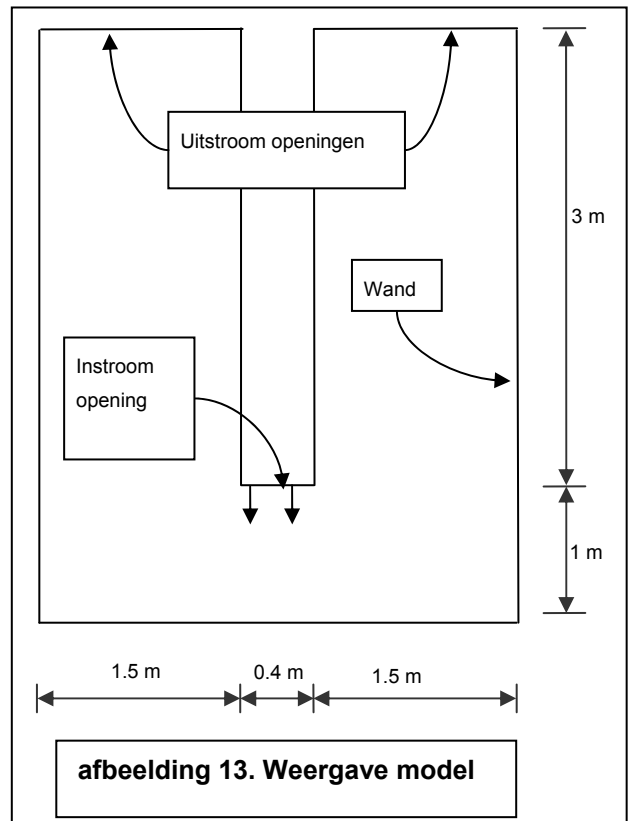
4.3. Geometrie

4.3.1. Afmetingen

Een diepwandpaneel kan variëren in breedte. Bij een grote paneelbreedte worden er meerdere stortkoker gebruikt. Een gangbare vuistregel is dat een paneel tot ca. 3,5 meter breedte met een enkele stortkoker kan worden gestort. In dit onderzoek worden de afmetingen gesteld op 3,4 meter breed. Daarin wordt een stortkoker van 0,4 meter aangebracht.

Het model wordt gesimplificeerd tot een 2D model. Er wordt dan ook een doorsnede gemaakt over de breedte van het paneel. Door de verwaarlozing van de achter en voorwand verdwijnt het effect van de wrijving van de voor- en achterwand. In werkelijkheid zal de stroming naar de voegen moeizamer verlopen dan in het model. Het is te verwachten dat er een groter verschil zal zijn tussen de betonspiegel in het midden en bij de voeg. Het is bekend dat de betonspiegel een mate van kromming vertoont. Door de afwezigheid van de wrijving van de achter- en voorwand zal deze kromming in het model kleiner zijn. Er is te verwachten dat in werkelijkheid het betonoppervlak dubbel gekromd zal zijn in het horizontale vlak. Dit heeft een groot effect op de stroming naar de hoeken. Het is te verwachten dat de stroming tussen de wapening en de voor of achterwand beperkt zal zijn ten opzicht van de stroming binnen de wapeningskorf. In een hoek zal er van beide richtingen beperkte stroming plaats vinden.

Ter verduidelijking worden een aantal termen gedefinieerd. De afstand tussen de onderzijde van stortkoker tot de onderzijde van het model wordt omschreven door de bodemafstand. De afstand tussen de wapening en voeg van het naburige paneel of de grond wordt omschreven als dekking. De ruimte tussen de wapening en voeg van het naburige paneel of de grond wordt beschreven als



voeggebied. De ruimte tussen de stortkoker en de wapening wordt omschreven als het hart van het paneel.

Door de 2D modellering is het alleen mogelijk om als horizontale wapening, vaak beugels, te modelleren. Een paneel heeft verticale wapening nodig voor de sterkte. Verticale wapening zorgt voor een kleinere opening in de wapening. In praktijk wordt in de buurt van de voeg getracht geen verticale wapening toe te voegen, maar kan niet altijd worden vermeden.

De stortkoker bestaat uit een uitsparing in het model. De onderzijde van de stortkoker wordt als instroomopening gemodelleerd. Zie afbeelding 13.

In het model is de druk bij de uitstroomopeningen gesteld op 0 Pa. Dit wordt aangenomen als atmosferisch. De snelheid aan de wanden wordt gesteld op 0 m/s.

4.3.2. Bodem

Er is aangenomen dat de bodemafstand op 1 meter afstand ligt. De klassieke aanname is dat de snelheid daar 0 m/s is. Als we de situatie beschouwen waarbij de bodemafstand groter is, zal er op 1 meter afstand geen bodem zijn maar vloeistof. Om een uitspraak te kunnen doen voor de gehele diep wand wordt een aantal simulaties gedaan waarin het effect van de aanname van de snelheid is nul wordt beschouwd.

4.3.3. Kokerdiepte

Voor de diepte van de stortkoker wordt gekozen voor 1 meter. Of de diepte van de stortkoker van 1 meter correct is wordt later gevalideerd.

4.3.4. Wapening

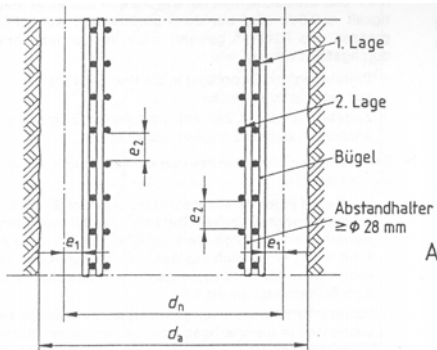
Voor de wapening wordt gekozen voor een diameter van 40 mm en een tussen afstand van 240 mm voor horizontale wapening. Bij een permanente wand gefabriceerd met een bentoniet met een zwichtspanning van maximaal 50 Pa vereist de DIN4126 een minimum tussenafstand van 240 mm. De minimale dekking is in dat geval 100 mm. Zoals weergegeven in tabel 3.

Tabel 3 Tabel uit de DIN 4126

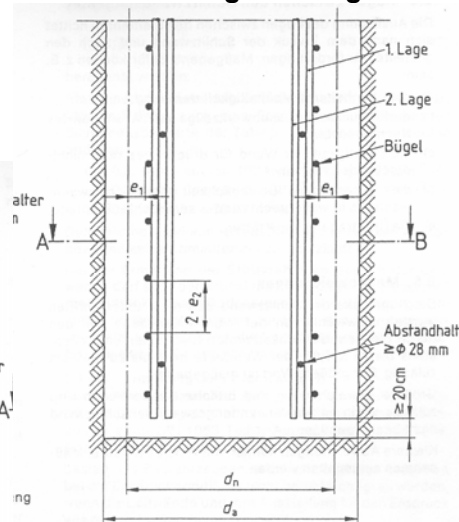
Zeile	max. Fließgrenze τ_F in N/m ² während des Betonierens	Schlitzwand als:			
		Dauerbauwerk		Bauhilfskonstruktion	
		e_1	e_2	e_1	e_2
in cm					
1	10	5	7	3	5
2	30	7	9	4	6
3	50	10	12	6	8
4	70 *)	—	—	8	10

*) $\tau_F > 50 \text{ N/m}^2$ unzulässig für Dauerbauwerk
Die Maße e_1 und e_2 gelten bei Betonzuschlaggrößtkorn $\leq 32 \text{ mm}$; bei größeren Betonzuschlagkörnern bis 63 mm sind die Maße mit dem Faktor 1,5 zu vergrößern.

afbeelding 14. Bovenaanzicht



afbeelding 15. Langsdoorsnede



4.3.5. Instroomsnelheid

Het beton wordt in een discontinue stroom in de stortkoker gestort. Er bouwt zich dan een betonkolom op in de stortkoker en geeft dan een niet stationaire stroming uit de stortkoker. Om deze instroomsnelheid goed weer te geven vereist een veel grotere inzicht in de processen in de stortkoker. Dit valt buiten het onderzoek. In dit onderzoek wordt de instroomsnelheid constant gehouden.

Er wordt uitgegaan van een instroomsnelheid van 0.03 m/s. Dit houdt een stijgsnelheid van 3 m/uur in. In werkelijkheid is de snelheid hoger. Een paneel van 40 meter diepte wordt in ongeveer 4 uur gestort.

De modellering is in feite stroming tussen twee platen.

Het Reynoldsgetal is:

$$Re = \frac{L \cdot U}{\nu}$$

Met L karakteristieke lengte
 U Gemiddelde snelheid
 ν Kinematische viscositeit

Voor een stroming tussen twee platen is de karakteristieke lengte twee maal de afstand tussen de platen. Met een breedte van 3.4 m wordt het Reynoldsgetal:

$$Re = \frac{D \cdot U}{\nu} = \frac{2 \cdot 3.4 \cdot 0.03}{8.3 \cdot 10^{-3}} = 24.58$$

Voor stroming in leidingen en tussen platen begint turbulentie rond een Reynoldsgetal van 2300. Er is dus sprake van laminaire stroming.

Voor een stroming rond een cilinder wordt de karakteristieke lengte de diameter aan gehouden. De snelheid wordt aangenomen als 0.03 m/s.

$$Re = \frac{D \cdot U}{\nu} = \frac{0.04 \cdot 0.03}{8.3 \cdot 10^{-3}} = 0.1445$$

Turbulentie begint voor stroming rond objecten bij een Reynoldsgetal van 1. Zelfs met een overschatting van de snelheid is de stroming rond de wapening laminair.

5. NUMERIEKE SOFTWARE

5.1. Voorwaarden

Er bestaan een grote reeks aan modellen voor het berekenen van stroming. De eisen die worden gesteld zijn:

- beschikbaarheid;
- Binghamse vloeistof;
- beperkt toepassingsgebied.

De software moet beschikbaar zijn. Een obstakel is de licentie die moet worden verkregen. Commerciële pakketten hebben vaak een dure licentie. Een oplossing hiervoor is een 'open source' software.

Het model moet in staat zijn om een Binghamse vloeistof te kunnen berekenen. De Binghamse vloeistof wordt meestal niet als rheologische model toegevoegd, maar het model van Herschel-Bulkley wel.

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \dot{\gamma} \text{ Bingham}$$

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \text{ Herschel-Bulkley}$$

Als bij de Herschel-Bulkley formulering de macht n op 1 wordt gesteld, dan is er sprake van een Binghamse vloeistof.

Het is bekend dat 'vloeistof mechanica' een zeer breed toepassingsgebied heeft. Een breed toepassing gebied heeft als gevolg dat er veel instelmogelijkheden zijn. Elke instelmogelijkheid geeft ruimte om fouten te maken. Een programma dat is geschreven voor een beperkte mogelijkheden geeft minder ruimte om fouten te maken.

5.1.1. Literatuur

In de literatuur wordt als het gaat over numerieke methodes vaak gesproken over de specifieke numerieke methodes maar wordt geen melding gemaakt van welke software gebruikt is.

De afstudeerdatabase van de TU Delft bevatten twee afstudeerwerken die relevant zijn voor dit onderzoek. Er is een student die de bekistingdrukken heeft bestudeerd [F. van Waarde, 2007] en een student die heeft onderzocht hoe nucleair materiaal kan worden ingestort in beton en hoe de stroming daarbij verloopt.

Beide hebben gebruik gemaakt van het software pakket van Fluent. Een Computational Fluid Dynamics. Het model gaat uit van de Navier-Stokes vergelijking. Dit is de basis vergelijking in de vloeistof mechanica. De Navier-Stokes vergelijking stelt het model in staat een zeer grote variatie van situaties te berekenen, van een laminaire onsamendrukbare stroming tot een turbulente en samendrukbare stroming. Het model wordt gewoonlijk gebruikt in de werktuigbouw om de luchtweerstand van bijvoorbeeld auto's of vliegtuigen te berekenen. Het model kan ook worden gebruikt voor de stroming van een mengsel bestaande uit verschillende fases, zoals een vaste stof in een vloeistof.

De doctoraalscriptie van Annika Gram [2008] onderzoekt de modellering van zelfverdichtend beton. Bij de analyse wordt gebruik gemaakt van OpenFOAM. OpenFOAM staat voor 'Open Source Field Operation and Manipulation.' OpenFOAM is 'open source' software dat wordt gebruikt voor een aantal verscheidene toepassingen. Het merendeel van de toepassingen op het gebied van multi-phaseflow

5.1.2. Keuze

Er zijn geen pakketten die aan de eisen aan voldoen. De pakketten zijn gemakkelijk te gebruiken maar kunnen dan niet een Binghamse vloeistof berekenen of de pakketten zijn erg uitgebreid en is goede kennis van vloeistofmechanica en modeleren vereist.

Het gebruik van Binghamse vloeistoffen is erg belangrijk voor de stroming van het beton. Het is dus noodzakelijk om gebruik te maken van een uitgebreid softwarepakket.

Voor dit onderzoek wordt gekozen voor OpenFOAM.

5.2. OpenFOAM

Om beton te modelleren wordt gebruik gemaakt van de Herschel-Bulkley vergelijking. Beton gedraagt zich echter als een binghamse vloeistof. Dit kan worden bereikt door de macht n op 1 te stellen.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad \text{Herschel-Bulkley}$$

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma} \quad \text{Bingham}$$

In de software wordt de kinematische¹ viscositeit van de Herschel-Bulkley vergelijking geschreven als:

$$\nu = \min\left(\nu_0; \frac{T_0 + K\dot{\gamma}^n + K(T_0/\nu_0)^n}{\max(\dot{\gamma}; \text{Very_Small})}\right)$$

Met:

ν	Kinematische viscositeit	[m ² /s]
ν_0	Kinematische viscositeit maximum	[m ² /s]
$\dot{\gamma}$	Snelheidsverandering	[1/s]
T_0	Kinematische zwichtspanning τ_0/ρ	[m ² /s ²]
K	plastische viscositeit	[m ² /s ^{n}]
n	stromingsindex	[-]

In de vergelijking zijn twee numerieke beschermingen ingebouwd. De eerste is om te voorkomen dat er door nul wordt gedeeld. Er wordt een maximum genomen van enerzijds de snelheidsverandering en anderzijds een erg klein getal. OpenFOAM gebruikt afhankelijk van de nauwkeurigheid van de versie 10^{-15} of 10^{-30} als dat kleine getal.

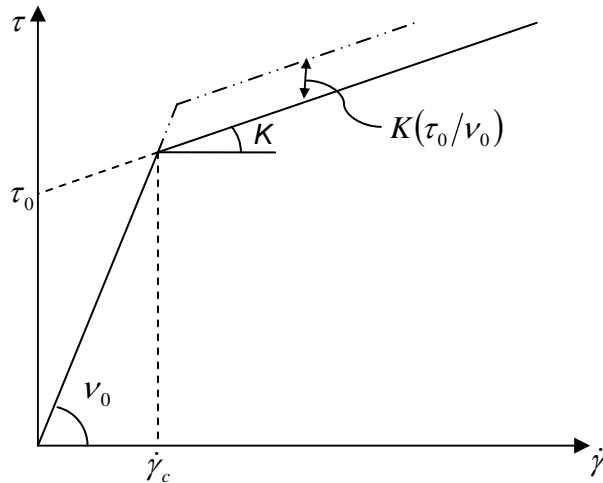
$$\nu = \frac{T_0 + K\dot{\gamma}^n + K(T_0/\nu_0)^n}{\dot{\gamma}} \quad \text{wordt } \nu = \frac{T_0 + K\dot{\gamma}^n + K(T_0/\nu_0)^n}{\max(\dot{\gamma}; \text{Very_Small})}$$

De tweede bescherming is om te voorkomen dat afrondfouten tot een onzinnig antwoord leidt. We weten dat $X + Y - X = Y$. Als X een erg groot getal is ten opzichte van Y en het gebruikte significante getal door afronding Y kan laten vervallen² dan lijdt $X + Y - X = Y$ tot $X + Y - X = 0$. Deze fout ontstaat als op enig moment gedeeld wordt door een erg klein getal (bv. 10^{-15} of 10^{-30}). Dit wordt opgelost door een minimum in te voeren van een vast getal en het resultaat van de berekening.

$$\nu = \min\left(\nu_0; \frac{T_0 + K\dot{\gamma}^n + K(T_0/\nu_0)^n}{\max(\dot{\gamma}; \text{Very_Small})}\right)$$

¹ Dynamische viscositeit η [pa·s], Kinematische viscositeit $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ [m²/s]

² $100 + 1$ is met 2 significant cijfers $1.0 \cdot 10^2$, met 3 significant cijfers $1.01 \cdot 10^2$.



De vergelijking beschrijft een gebied vanaf 0 waarbij de viscositeit newtoniaans is. Door in dit eerste gebied een hele hoge viscositeit te nemen wordt dit gebied verkleind. Uit de ervaringen van eerdere gebruikers wordt de waarde van $\nu_0 = 10^5$ á 10^6 m²/s voorgesteld.

In het geval van beton is de dynamische viscositeit ca. 2×10^8 . Dit is te vergelijken met bitumen op kamertemperatuur. De snelheidsverandering waaronder het beton zich als bitumen gedraagt is dan:

$$\dot{\gamma} \leq \frac{T_0 + K(T_0/\nu_0)}{\nu_0 - K}$$

Met $\nu_0 = 10^5$ m²/s, $T = 0.208$ m²/s² en $K = 0.01$ m²/s

$$\dot{\gamma}_c \leq \frac{0.208 + 0.01 \cdot (0.208/10^5)}{10^5 - 0.01} \approx 2 \cdot 10^{-6}$$

Wat verder opvalt, is dat er naast de zwichspanning en de plastische viscositeit een extra term in vergelijking zit.

$$\nu = \underbrace{T_0}_{Zw.Sp} + \underbrace{K\dot{\gamma}^n}_{pl.visc.} + \underbrace{K(T_0/\nu_0)^n}_{extra}$$

Hierdoor ontstaat een fout. De relatieve fout wordt beschreven door:

$$\epsilon_{rel} = \frac{K\left(\frac{T_0}{\nu_0}\right)^n}{T_0 + K\dot{\gamma}^n} \quad \epsilon = K\left(\frac{\tau_0}{\nu_0}\right)^n$$

Als we uitgaan van een Binghamse vloeistof wordt de relatieve fout:

$$\epsilon_{rel} = \frac{K}{T_0 + K\dot{\gamma}} \frac{T_0}{\nu_0}$$

Met als maximum:

$$\epsilon_{rel,max} = \frac{K}{\nu_0}$$

Ook hier geldt dat door de maximale viscositeit als hoog aan te nemen de fout wordt verkleind. In het geval van een Binghamse vloeistof kan door middel een aanpassing van de zwichspanning de fout worden geëlimineerd.

$$T_0 + K\dot{\gamma}^n + K\left(\frac{T_0}{\nu_0}\right)^n = T_y + K\dot{\gamma}^n \text{ Herschel-Bulkley}$$

$$T_0 + K\dot{\gamma} + K\left(\frac{T_0}{\nu_0}\right) = T_y + K\dot{\gamma} \text{ Bingham}$$

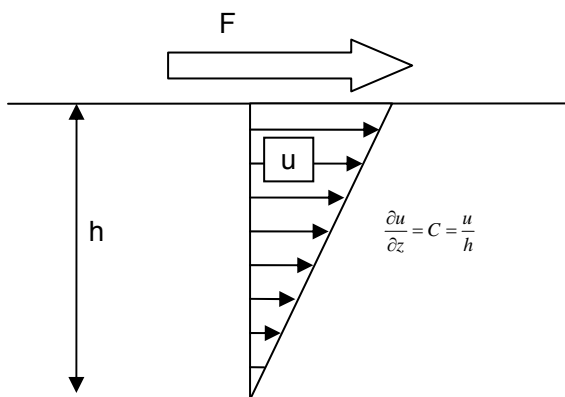
$$T_0 = \frac{T_y}{1 + K/\nu_0}$$

5.2.1. Derde dimensie

Voor de berekening van de stroming wordt een 2D model opgezet. OpenFOAM is niet in staat om 2D te rekenen. Om toch tot een 2D model te komen wordt er een 3D model opgezet met een kleine dikte waar de randvoorwaarden op de 3^e dimensie worden omschreven als 'empty'. Empty is speciaal in het leven geroepen om van een 3D model te veranderen naar een 2D model. Empty houdt in dat er wand is waar geen wrijving is en geen drukopbouw.

5.2.2. Validatie

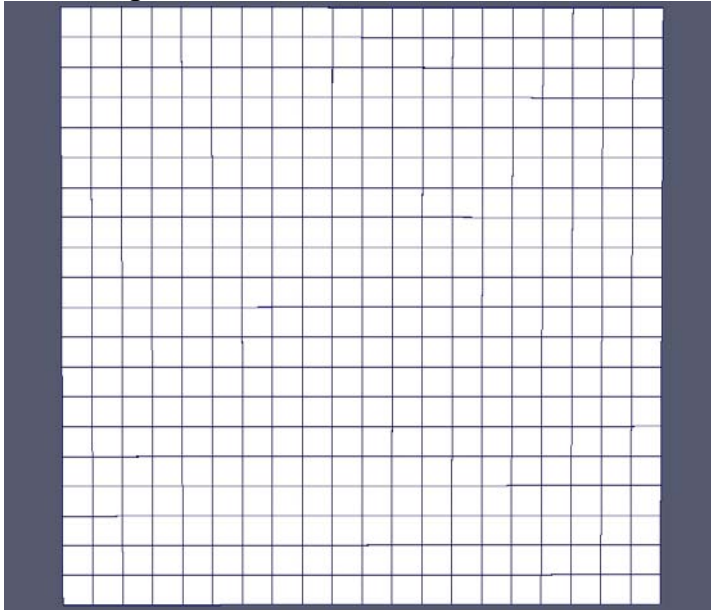
Om aan te tonen dat de software een Herschel-Bulkley vloeistof wel kan modelleren wordt een simpele berekening uitgevoerd. Dit simpele model bestaat uit twee platen. Een van de platen wordt met een constante snelheid bewogen terwijl de ander stil staat. Dit model wordt dan gevalideerd door een analytische berekening. Deze vorm van stroming wordt de Couette-stroming genoemd. Veel viscositeitmeters meten hoeveel kracht nodig is om de plaat een bepaalde snelheid te laten bewegen. De kracht kan worden gerelateerd aan de benodigde schuifspanning. De afstand tussen de platen en de snelheid van de plaat kunnen worden gerelateerd aan de snelheidsvervorming.



Het model zal een gelijkmatig snelheidsprofiel moeten laten zien.

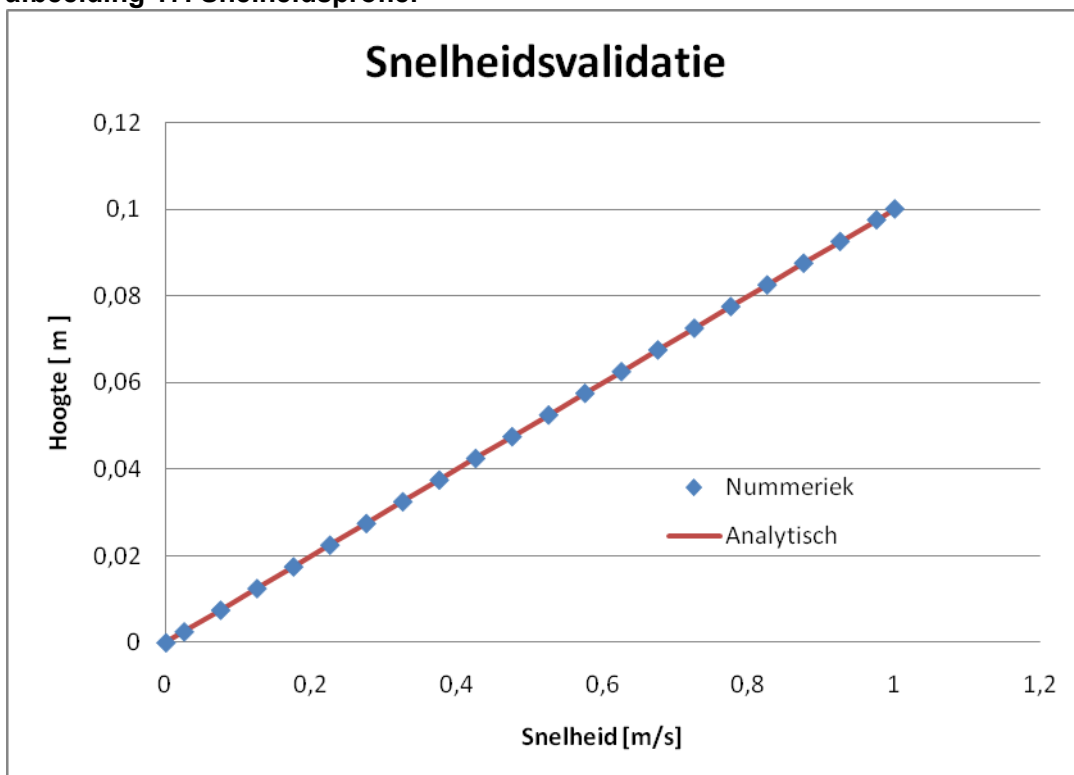
Het model is 0.1 meter bij 0.1 meter. In afbeelding 16 wordt het grid weergegeven. De bovenste plaat heeft een snelheid van 1 m/s terwijl de onderste plaat een snelheid van 0 m/s heeft. Aan de zijdes wordt een voor zowel de druk als de snelheid een cyclische randvoorwaarde opgelegd. Dit zorgt dat de randvoorwaarde linkerzijde wordt opgelegd aan de rechter zijde. Het model begint uit rust en wordt een tijd laten lopen. De tijdstap wordt bepaald door de software. Er wordt een maximum gesteld aan de tijdstap. Het maximum wordt bepaald door het Courantgetal. Het Courantgetal is gesteld op een maximum van 0,2.

afbeelding 16. Griddefinitie



Na een aantal tijdstappen begint het model te convergeren tot een snelheidsprofiel. Afbeelding 17 geeft de weergave van het resultaat.

afbeelding 17. Snelheidsprofiel



De uitkomsten van de numerieke en de analytische berekening komen overeen.

Er is nu aangetoond dat de berekening met de Herschel-Bulkley viscositeitmodel met een zwichtspanning mogelijk is.

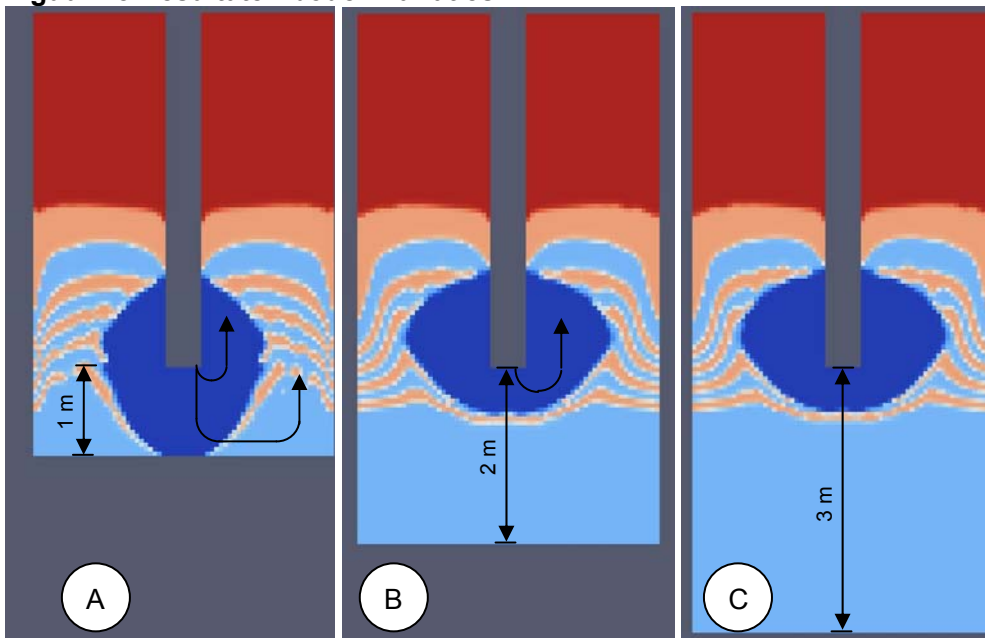
5.2.3. Bodem

De bodem afstand is gesteld op 1 meter. Het model beschrijft wat er gebeurt als slechts de eerste twee meter aan hoogte is gestort. Het is niet de bedoeling om de eerste twee meter uit de praktijk te simuleren. In de praktijk zijn deze meters, voor zover bekend, geen probleem gebied. Het gaat er in dit onderzoek om gevallen te bekijken op een grotere hoogte. Desondanks is het mogelijk om in het model te volstaan met een simulering van de eerste twee meters. Om deze geldigheid aan te tonen worden er simulaties gedaan waarbij de bodemafstand op 1, 2 en 3 meter wordt gezet. De bodem is hierbij volledig glad gemaakt, de zogenaamde slipconditie. Via deze slipconditie simuleert het onderzoek de situatie waarbij de weerstand uitsluitend wordt geleverd door het onderliggende beton.

In de onderstaande simulaties met bodem afstand op 1, 2, en 3 meter wordt bekeken hoe het beton zich verdeelt.

Als laatste worden de resultaten van deze simulaties vergeleken met het geval dat de bodem op 1 meter afstand ligt en de snelheid op de bodem op 0 m/s is gesteld, zoals in het definitieve model. Ook hier gaat om te vast te stellen hoe het beton zich verdeelt. Bij een overeenkomst tussen bewegingen van het beton in het definitieve model en de bewegingen van het beton in de simulaties waar de bodem op grotere afstand ligt, dan kunnen we stellen dat de resultaten verkregen met het definitieve model ook geldig zijn voor grotere hoogtes.

Figuur 18 Resultaten bodemvarianties

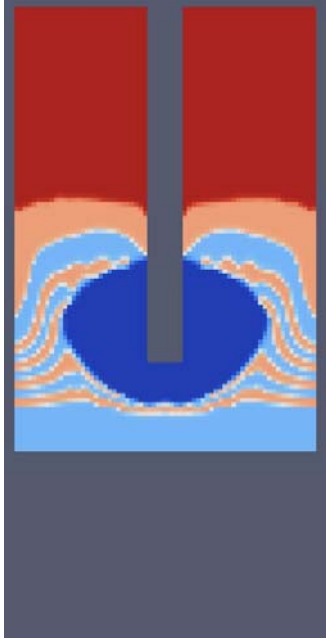


De bovenstaande afbeeldingen geven aan waar welke beton eindigt voor verschillende afstanden tot de bodem. In de afbeeldingen is de kleur rood bentoniet en de overige kleuren beton van gelijke samenstelling. Er is gekozen voor verschillende kleuren zodat duidelijk wordt waar het beton heen stroomt. De zwichspanningen in de afbeeldingen zijn 90 Pa

In de afbeelding 18 A zien we dat als de bodem op een afstand van 1 meter ligt het instromende beton gemakkelijk naar beneden stroomt. Het is ook duidelijk dat het instromende beton het aanwezige beton op de bodem naar de zijkant duwt en vervolgens tegen de zijwand weer omhoog duwt. In afbeelding 18 B is de bodemafstand vergroot tot 2 meter. De stroming verloop hier anders. Terwijl in figuur A het beton op 1 meter afstand wrijvingsloos kon worden weggedrukt is er in figuur B de interne wrijving van het beton. Het gevolg is dat het beton niet meer tot aan de bodem loopt maar alleen naar boven zal stromen. Voor figuur C is de afstand verhoogd naar 3 meter. We zien hetzelfde beeld als bij figuur B.

In de afbeeldingen zien we dat als de bodem op een afstand van 1 meter ligt het instromende beton gemakkelijk naar beneden stroomt. Zodra de bodem op een grotere afstand wordt gelegd dan geeft de weerstand van het beton een geheel ander beeld. Het nieuwe beton zakt niet meer naar de bodem maar gaat meer omhoog.

afbeelding 19.



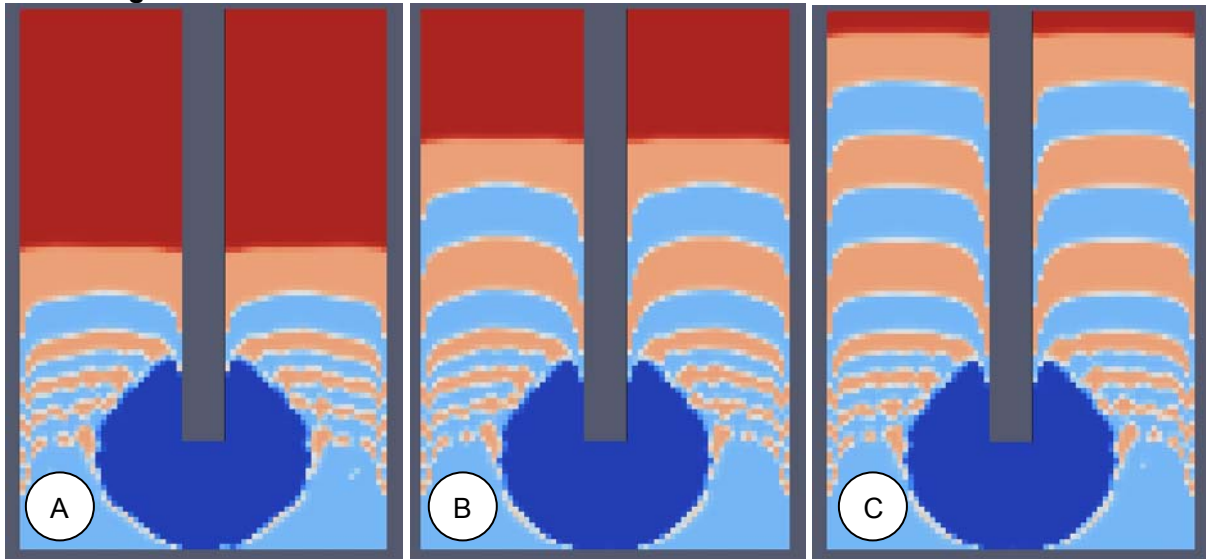
In afbeelding 19 wordt de situatie weergegeven als de snelheid op de bodem gelijk is gesteld aan nul. Deze situatie geeft een grote gelijkenis met de situatie waarbij de bodem op een grotere afstand is geplaatst.

De stijfheid van het beton heeft als gevolg dat de snelheid op 1 meter afstand verwaarloosbaar is. Uit de simulaties kan worden geconcludeerd dat de resultaten ook geldig zijn voor gevallen halverwege de hoogte van het paneel.

5.2.4. Kokerdiepte

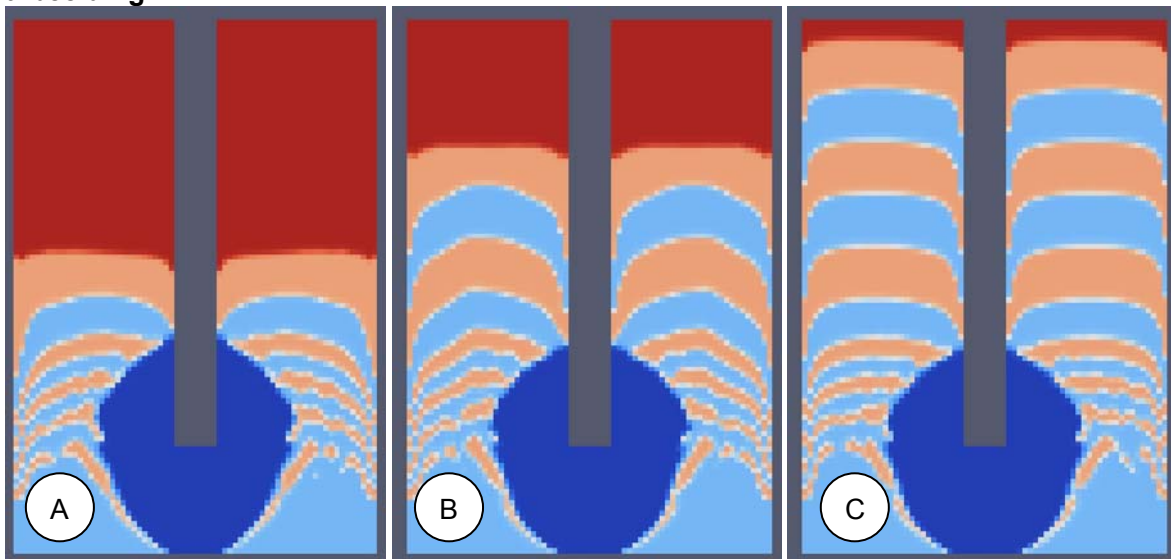
Er is gekozen om de stortkoker 1 meter diep in het beton te plaatsen. Om dit te valideren zijn een aantal simulaties gemaakt. Er is gekeken naar een kokerdiepte van 1, 2 en 3 meter. Vervolgens zijn de resultaten vergeleken.

afbeelding 20.



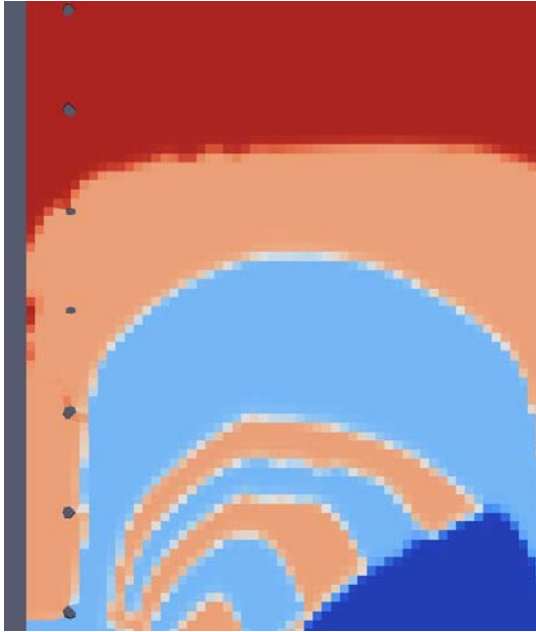
Opnieuw is rood bentoniet en de overige kleuren beton. Donker blauw is vers beton en de licht blauw en oranje is aanwezig beton. In afbeelding 20 A t/m C heeft al het beton dezelfde eigenschappen, terwijl in afbeelding 21 A t/m C het instromende beton een lagere zwichtspanning heeft dan het aanwezige beton. In afbeeldingen 20 of 21 A t/m C toont aan dat de kokerdiepte geen invloed heeft op de stroming van het bentoniet.

afbeelding 21.

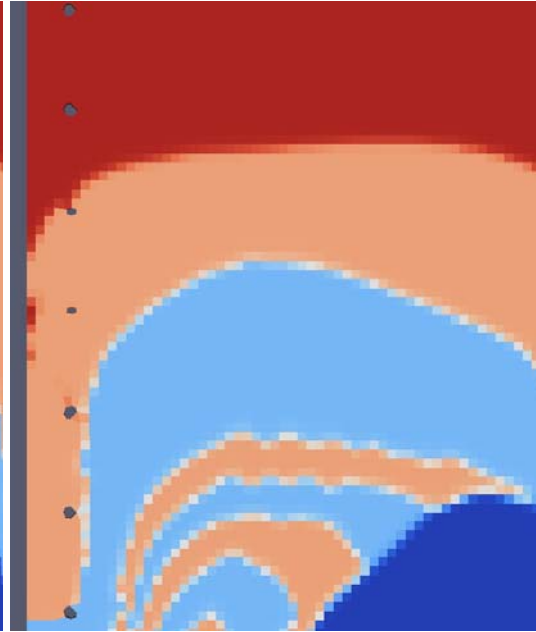


Bij de verhoging van de kokerdiepte verandert de stroming niet. Het is wel duidelijk te zien dat de zwichtspanning van het beton wel een effect heeft op de stroming. In afbeelding 20 B ontstaat een ronde bel bij de instroomopening, terwijl in afbeelding 21 B verdeelt het beton zich meer over de hoogte in een smaller gebied.

De resultaten veranderen niet de als de tijdstap wordt verkleind of de initiële kinematische viscositeit v_0 wordt verhoogd of verlaagd.



$\Delta T = 0,1$



$\Delta T = 0,025$

6. RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten weergegeven van de simulaties. Er is eerst bekeken hoe de stroming van het beton zonder wapening verloopt. Er wordt eerst een simulatie gedaan waarbij het instromende beton en het aanwezige beton dezelfde eigenschappen hebben. Dit wordt gevolgd door een berekening waarin de viscositeit het aanwezige beton is verhoogd.

Na de resultaten van de simulaties worden er een reeks simulaties gedaan waarin wapening aan het model is toegevoegd. Met het model waarin de wapening is verwerkt worden twee series van simulaties gedaan. In de eerste serie worden zwichtspanningen van beton en bentoniet gevarieerd. In de tweede serie wordt de zwichtspanning van beton constant gehouden en de dichtheid en de zwichtspanning van het bentoniet gevarieerd.

6.1. Zonder wapening

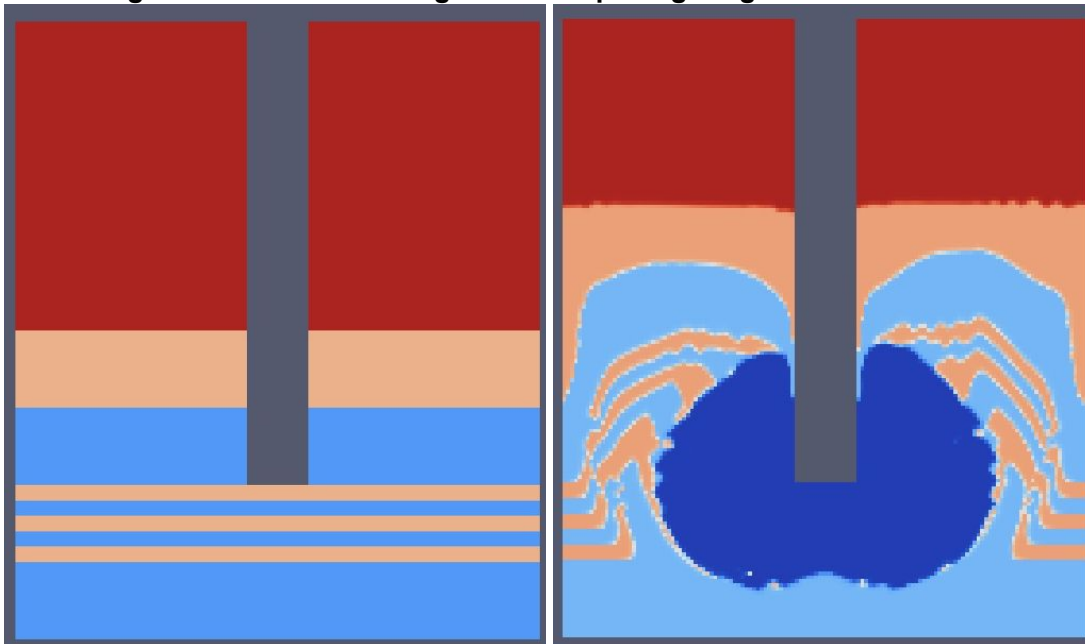
In de eerste simulatie wordt onderzocht hoe de stroming loopt als er nog geen wapening is toegevoegd.

Er wordt onderzocht hoe de normale condities het beton stroomt.

De eigenschappen in deze simulatie:

naam	τ_0 [Pa]	η_{pl} [Pa·s]	ρ [kg/m ³]	v_0 [m ² /s] ³
bentoniet	5	0.021	1050	10 ⁶
beton instromend	90	7	2400	10 ⁶
beton aanwezig	90	7	2400	10 ⁶

afbeelding 22. Simulatie stroming zonder wapening. Begin- en eindsituatie



Het instromende beton vormt zich als een bol rond de instroomopening. Hierbij wordt het aanwezige beton naar de zijkant geduwd. Naarmate de bol groeit, ondervindt de stroming de invloed van de wanden en de bodem. De wanden zorgen voor weerstand. De weg van de minste weerstand wordt daarvoor omhoog. Wat opvalt, is dat de bovenste laag naarmate de tijd vordert aan de rand blijft kleven.

³ Het model vereist een maximale kinematische viscositeit. zie paragraaf 5.2

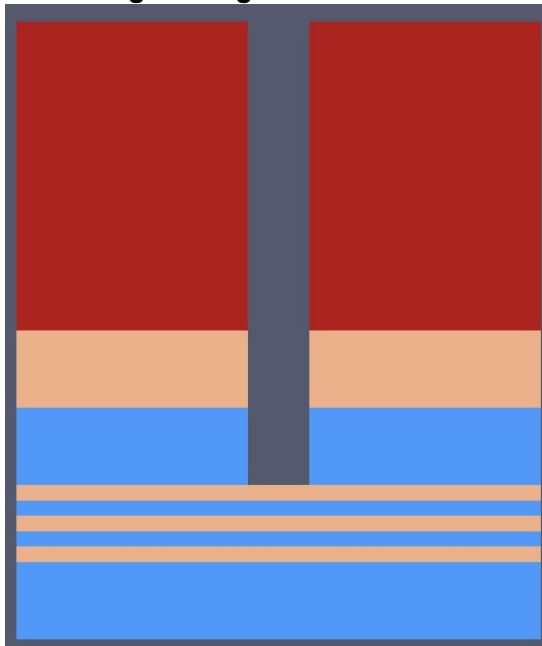
Als de aanname dat de bovenste laag vermengd is met bentoniet correct is, zou dit betekenen dat er een laag van verontreinigd beton aan de rand afzet.

De volgende stap is om te onderzoeken wat er gebeurt als de viscositeit en de zwichtspanning van het beton worden verhoogd. Naar aanleiding van het resultaat dat het instromende beton langs de stortko-ker omhoog komt is er ook een berekening gemaakt waarin het beton dat aanwezig is stijver is dan het instromende beton. Dit doet zich voor als er een nieuwe lading beton vloeibaarder is dan de ladingen die al eerder is geleverd. Een fout bij de betoncentrale kan dit veroorzaken. Het aanwezige beton kan zich ook voordoen als het beton een tijd stil heeft gestaan. Er is gekozen om van een zo extreem moge-lijk verschil uit te gaan maar nog wel volgens de norm is toegestaan. De meest waarschijnlijke situa-tie is dat het aanwezige beton al stijver is geworden en dat er een nieuwe lading beton een verwachte stijfheid heeft.

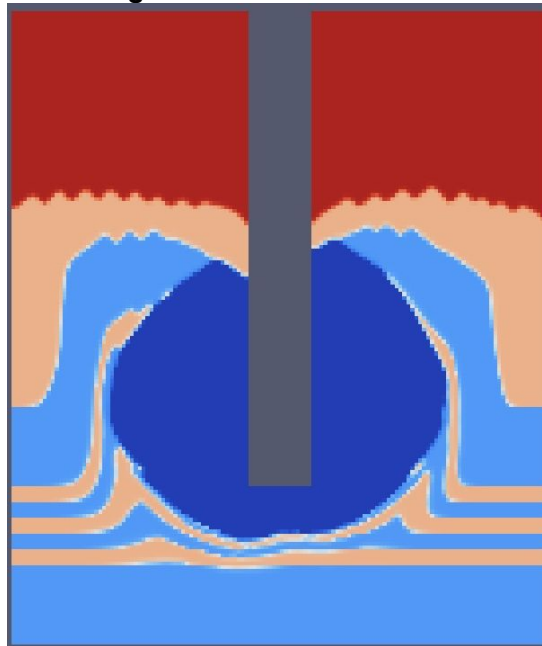
De eigenschappen in deze berekening:

naam	τ_0 [Pa]	η_{pl} [Pa·s]	ρ [kg/m ³]	v_0 [m ² /s]
bentoniet	5	0.021	1050	10 ⁶
beton instromend	90	7	2400	10 ⁶
beton aanwezig	500	20	2400	10 ⁶

afbeelding 23. Beginsituatie



afbeelding 24. Eindsituatie



In afbeeldingen 23 en 24 is te zien dat het beton aan de wand nagenoeg niet stroomt. Het beton aan de wand wordt eerder horizontaal aangevuld dan verticaal. De bovenste laag wordt steeds dunner. Het is te verwachten dat op het moment dat er wapening aan het model wordt toegevoegd de aanvulling nog meer horizontaal zal zijn. Dit kan een belangrijke aanwijzing zijn dat dit proces een insluiting zou kun-nen veroorzaken.

Aan het betonoppervlak ontstaan ribbels. Deze ribbels verplaatsen zich niet horizontaal. Daarbij neemt de hoogte van de ribbels toe in de tijd. Dit zijn twee belangrijke indicatoren dat de ribbels een numeriek verschijnsel zijn.

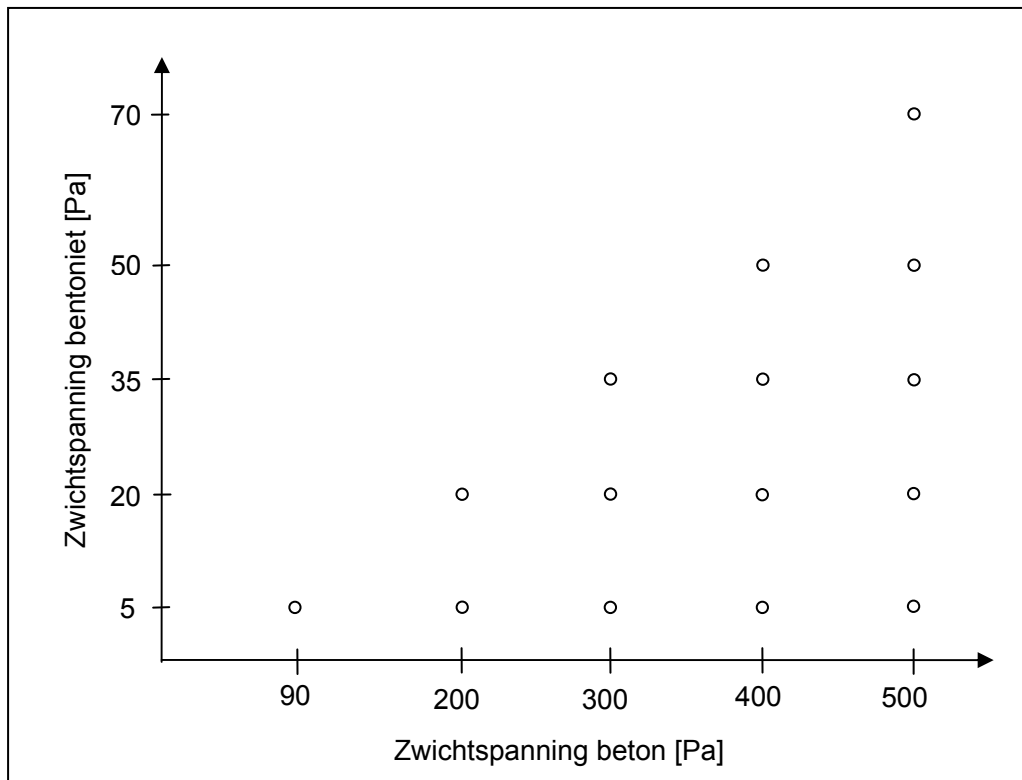
6.2. Wapening

De volgende stap in de berekeningen is dat er wapening aan het model wordt toegevoegd. Voor de wapening is gekozen voor een diameter van 40 mm. De afstand tussen de staven is volgens de

DIN4126 gesteld op 2 maal $e_2 = 2 \times 120$ mm. De tussenafstand komt overeen met een met 'ziele 3' van de DIN 4126 en een zwichtspanning van bentoniet van 50 Pa. De afstand tussen de wapening en de modelrand is 100 mm.

6.2.1. Zwichtspanning

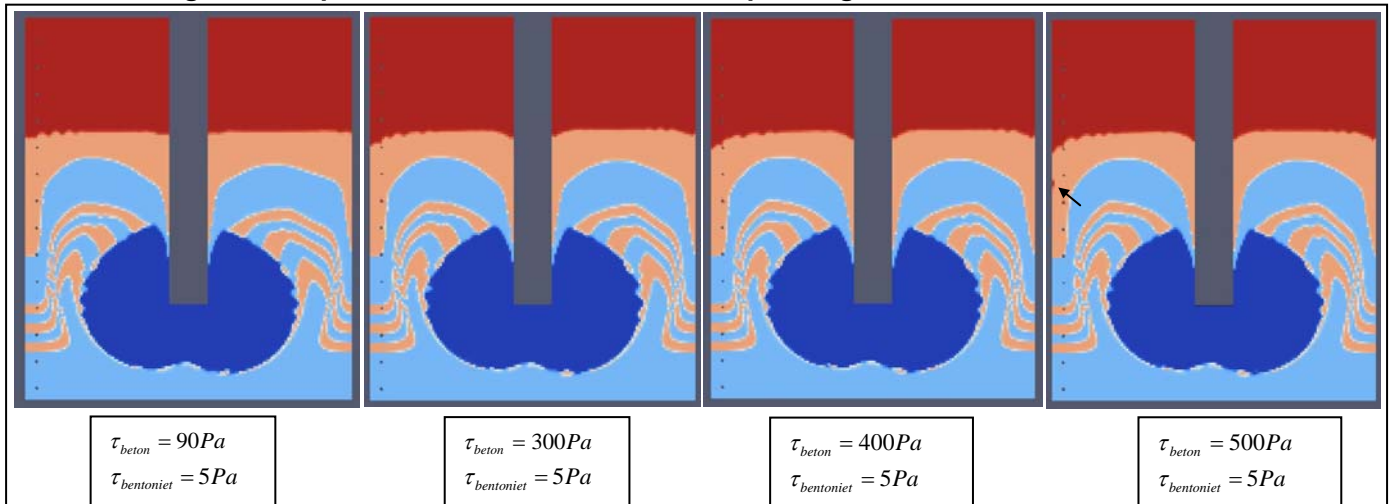
Om te bepalen wat het effect van zwichtspanningen van zowel beton als bentoniet is, zijn er een aantal combinaties gemaakt:



De onderstaande afbeeldingen geven een beeld van de stroming van het beton. Het is duidelijk te zien dat naarmate de zwichtspanning groter wordt de kromming van het betonoppervlak groter wordt. In het geval van een zwichtspanning van beton van 500 Pa is te zien dat er achter de wapening bentoniet achter blijft.

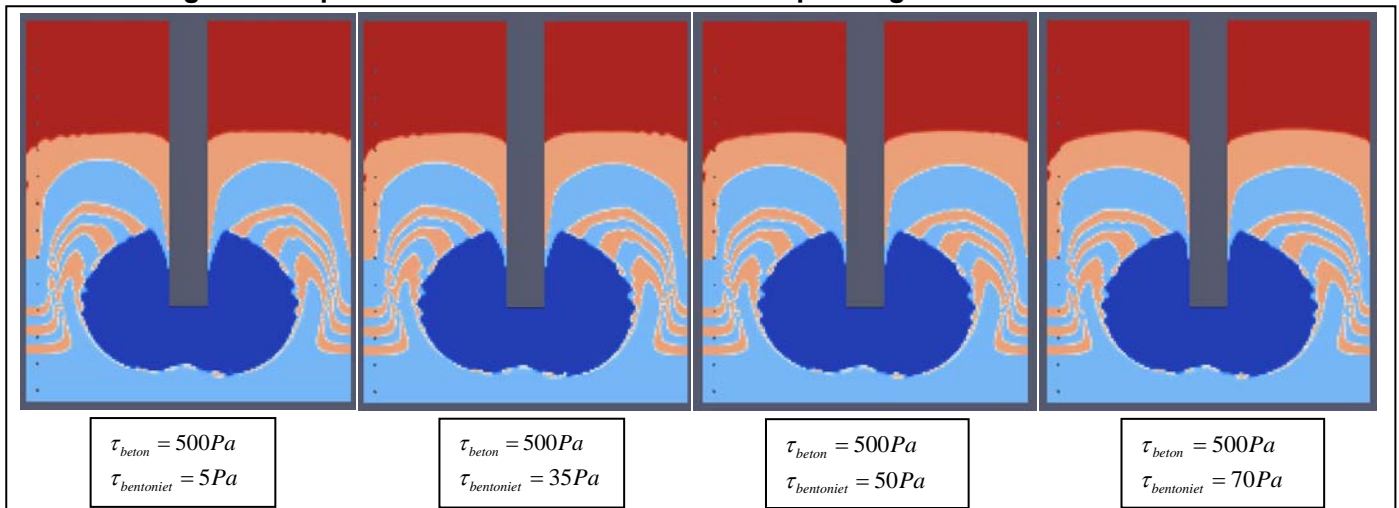
Doordat de wapening slechts aan een zijde is gemodelleerd ontstaat er een asymmetrie. Dit heeft als gevolg dat de ene zijde een grotere weerstand heeft dan de andere. Dit zorgt dat het beton makkelijker naar de ongewapende zijde loopt. In de figuren is hier iets van te zien. Het instromende beton aan de rechterzijde van het paneel is iets groter. Het instromende beton aan de ongewapende zijde komt dieper en verdeelt zich breder.

afbeelding 25. Stortpatronen met een beton zwichtspanningvariatie

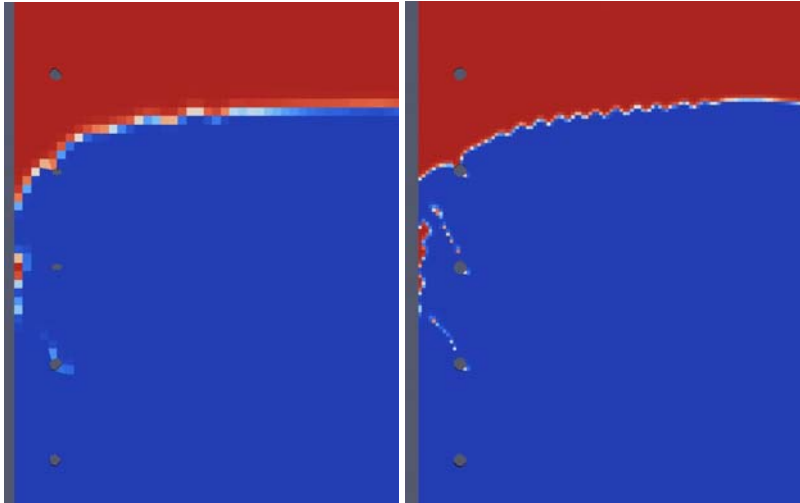


De onderstaande afbeeldingen geven weer welk effect de zwichtspanning van het bentoniet heeft. De insluiting vindt plaats op dezelfde hoogte. Op grotere hoogtes komt de insluiting ook niet meer terug.

afbeelding 26. Stortpatronen met een bentoniet zwichtspanningvariatie



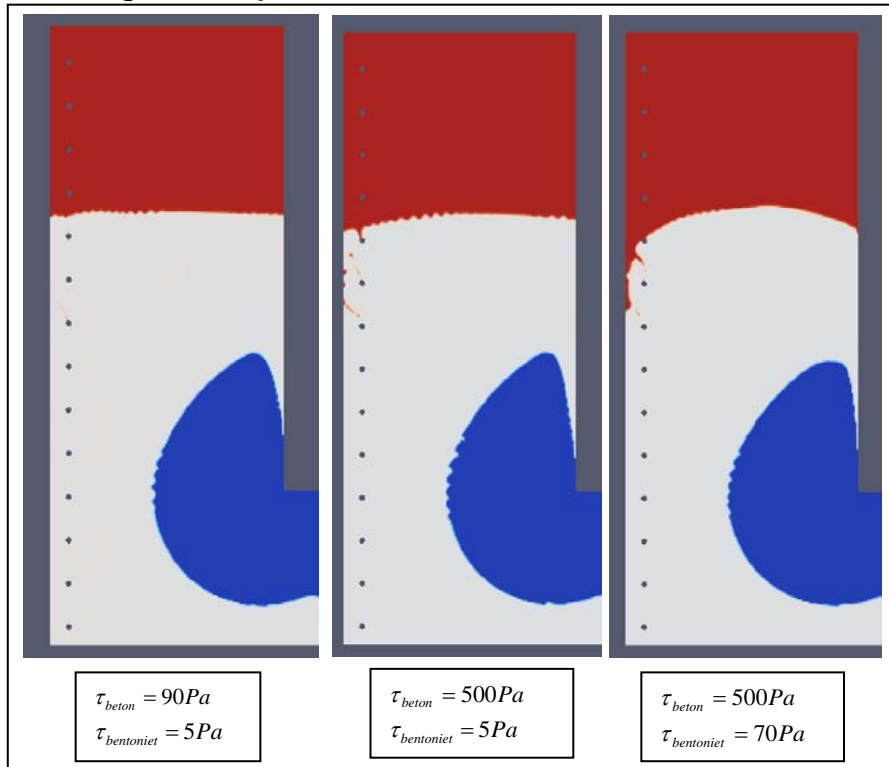
De bovenstaande afbeeldingen geven vooral goed aan hoe de stroming verloopt. Om tot een goede conclusie over de insluitingen te komen is de celgrootte in het model gehalveerd. Hierbij is het onderscheid tussen verschillende lagen beton in het model achterwege gelaten.



De bovenstaande afbeeldingen geven de mate van aanwezigheid van bentoniet voor de verfijnde berekening. Volledig aanwezig is rood en volledig afwezig is blauw. We gaan van een insluiting van 8 cellen naar een insluiting van 30 cellen. Bij een halvering van de celgrootte neemt het cel oppervlak met een factor 4 af. De insluiting beslaat ongeveer vier keer zoveel cellen. De beide simulaties geven ongeveer hetzelfde resultaat. Door de verfijning ontstaat er een streep achter de wapening. Deze ontstaat doordat er beton van twee kanten bij elkaar komen. De streep ontstaat waar deze twee bij elkaar komen.

De halvering van de celgrootte heeft geen gevolg voor het volume van de insluiting. De vorm van de insluiting wordt door de verfijning wel anders. De kleinere celgrootte geeft een kleinere overgangszone tussen het beton en het bentoniet. Door de kleinere overgangszone wordt definiëring van de vorm duidelijker. De onderstaande afbeeldingen geven de extremen weer. De stap van 90 Pa naar 500 Pa zorgt dat de er fragmenten van bentoniet achter blijven in het beton. Deze fragmenten worden een bentoniet prop als de zwichtspanning van bentoniet toeneemt.

afbeelding 27. Stortpatroon van extremen

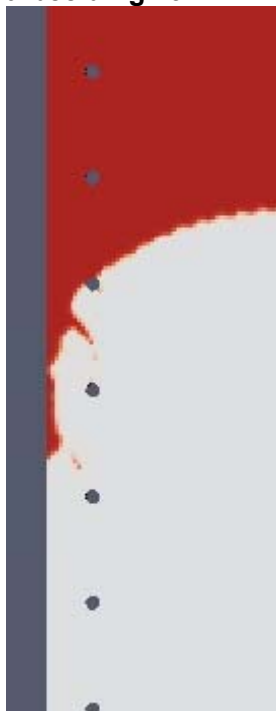


De afbeeldingen 28 en 29 het verschil tussen de twee meest extreme berekeningen. Links zien we de resultaten voor de berekening met een zwichspanning van 90 Pa en 5 Pa. Rechts zien we het resultaat bij een zwichspanning van 500 Pa en 70 Pa. Bij het meest vloeibare beton is er een nagenoeg horizontaal betonoppervlak zien. Bij het stijve beton is er sprake van sterk afkrommend beton oppervlak.

afbeelding 28.



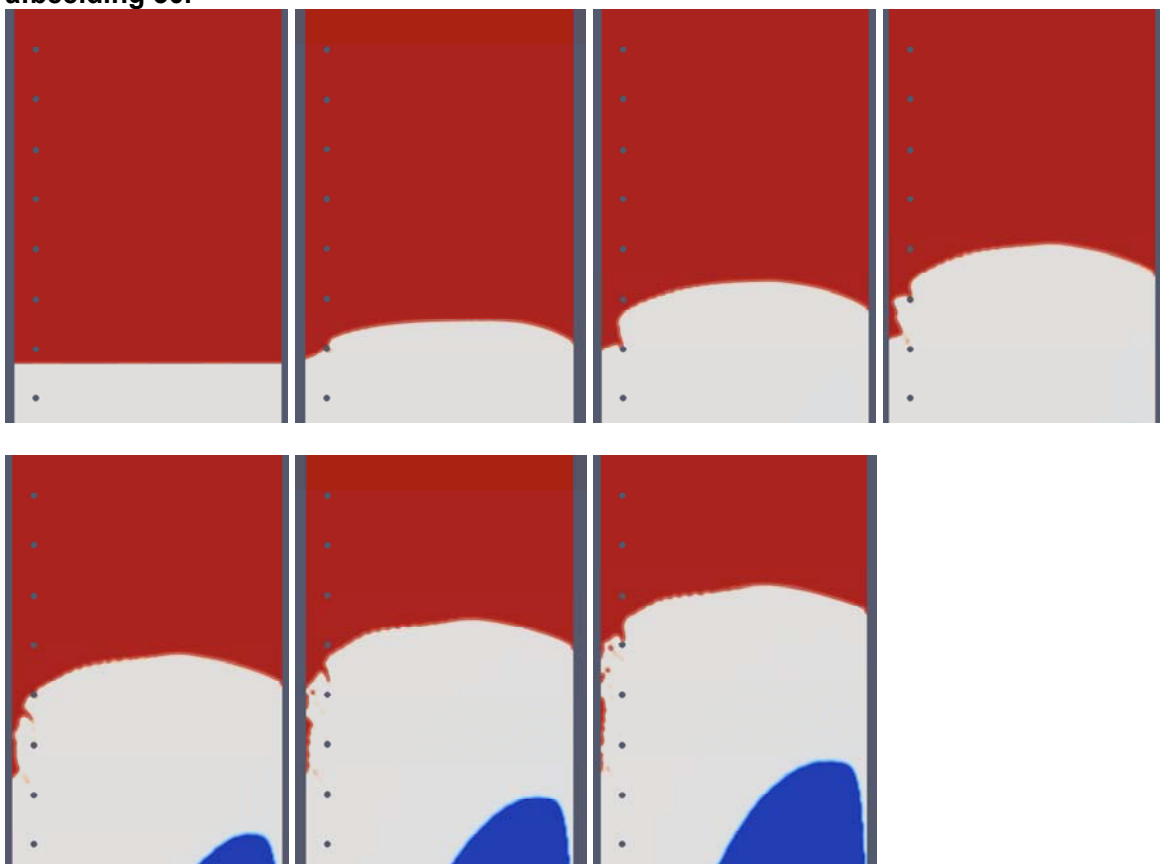
afbeelding 29.



Wat opvalt, is dat er altijd problemen ontstaan vanaf een bepaalde punt ten opzichte van de onderkant van de stortkoker. Dit punt bevindt zich in het voeggebied net boven het betonoppervlak bij het begin van de simulatie. Het beton begint hier later te stromen dan in hart van het paneel. Dit heeft als gevolg dat de aanvulling in het voeggebied achter blijft en vervolgens het bentoniet wordt overstroomd. Hieruit ontstaat een insluiting.

De grootte van de op deze manier ontstane insluiting neemt toe naarmate de stijfheid van het bentoniet of het beton toeneemt. Vanaf het moment dat de insluiting is ontstaan wordt het bentoniet over de wand uitgesmeerd. Dit is te zien in de reeks van afbeelding 30. Hierin is duidelijk te zien dat er in het voeggebied in eerste instantie weinig stroming is. Het beton in het hart van het paneel stijgt sneller. Het beton stroomt bij een hoger opening tussen de wapeningsstaven naar het voeggebied. Door deze stroming wordt een deel van het bentoniet overstroomd. Het beton drukt de bentoniet insluiting plat. De zwichtspanning van het bentoniet zorgt ervoor dat het bentoniet niet naar het betonoppervlak wordt geperst. In plaats daarvan wordt de bentoniet plat gedrukt. De insluiting stroomt dan voor een deel mee met de stroming. Naarmate de betonspiegel stijgt, neemt de snelheid af ten plaatsen van de insluiting.

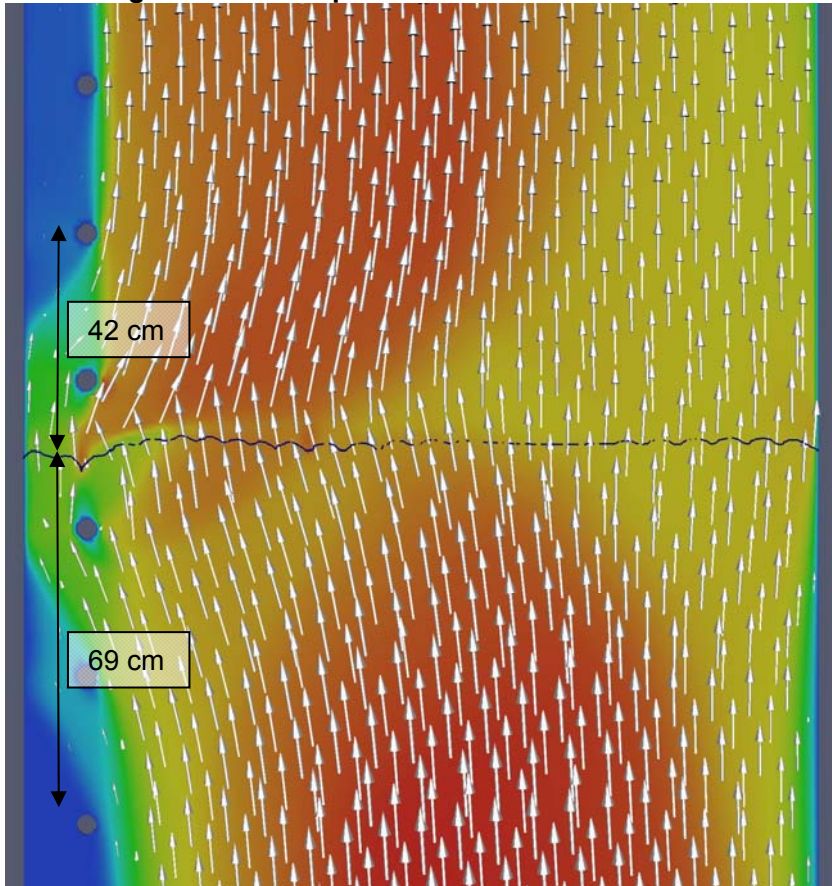
afbeelding 30.



Als het beton om de wapening heen stroomt, komen er achter de wapening twee stromingen bij elkaar. Hierbij ontstaat een lint van bentoniet.

Dit lint ontstaat bij elke wapeningsstaaf en lijkt alleen door de stroming te worden verplaatst. Dit verschijnsel treedt niet op bij een grotere celgrootte. Er is geen model gemaakt met een nog kleinere celgrootte. Een dergelijk lint kan in een dergelijk geval wellicht veranderen. In dit onderzoek is niet bekeken in welke mate het beton en het bentoniet worden vermengd. Het is mogelijk dat een dergelijk lint wordt opgenomen in de korrelstructuur van het beton.

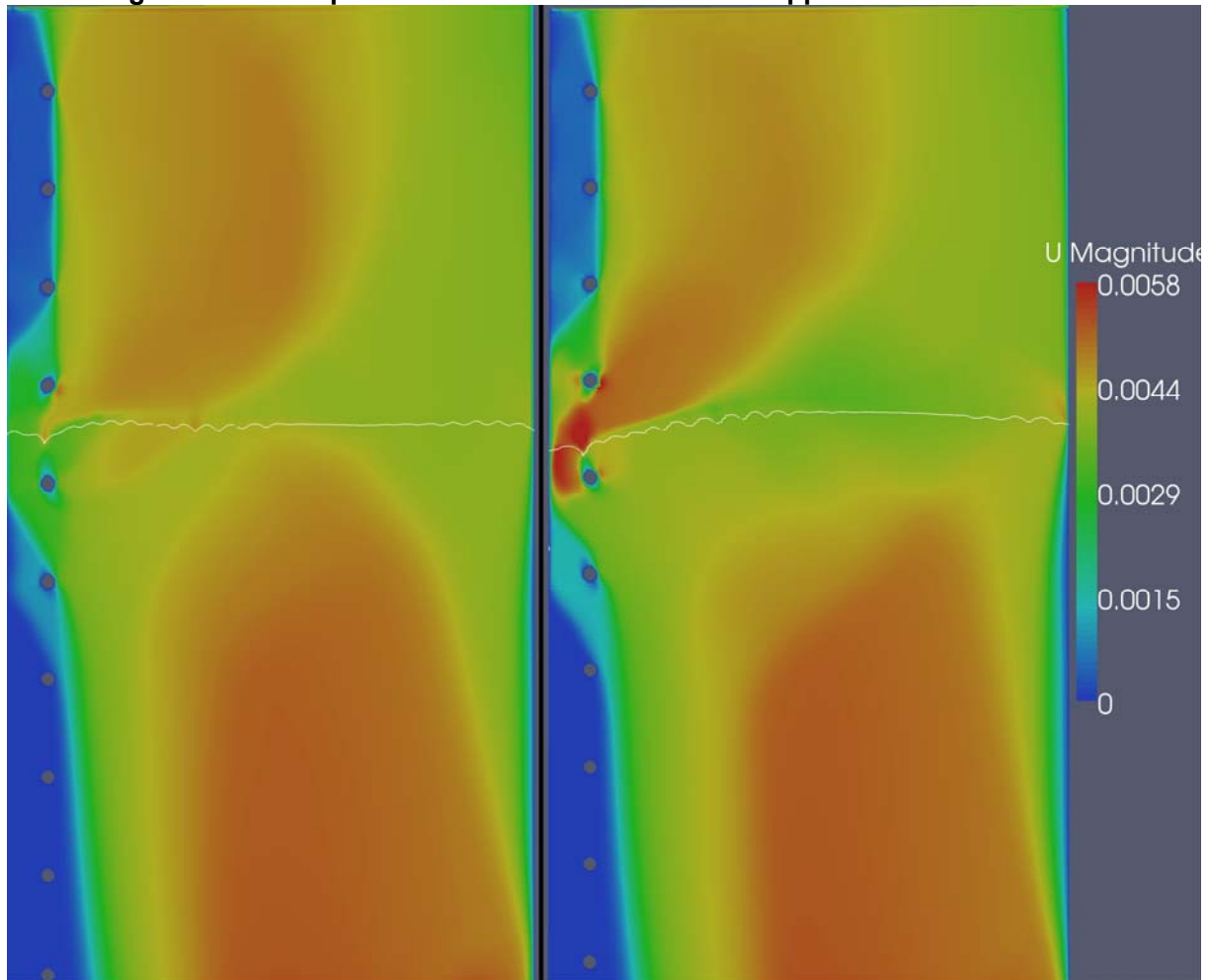
afbeelding 31. Snelheidsprofiel met een contour van het beton oppervlak



Het voeggebied wordt aangevuld door het beton dat net onder het betonoppervlak bevindt. Dit is te zien in afbeelding 31. Hierin is de snelheid weergegeven met vectoren die de richting aangegeven van de stroming. De stroming tussen de wapening en de grond is beperkt tot een gebied van ca. 42 cm boven en ca. 69 cm onder het beton oppervlak. Dit resultaat is wel te verwachten. De weerstand die stroming ondervindt in het voeggebied als gevolg van de grond en de wapening is hoger dan de weerstand die het beton ondervindt in het hart van het paneel. Hierdoor is de weg van de minste weerstand door het hart van het paneel.

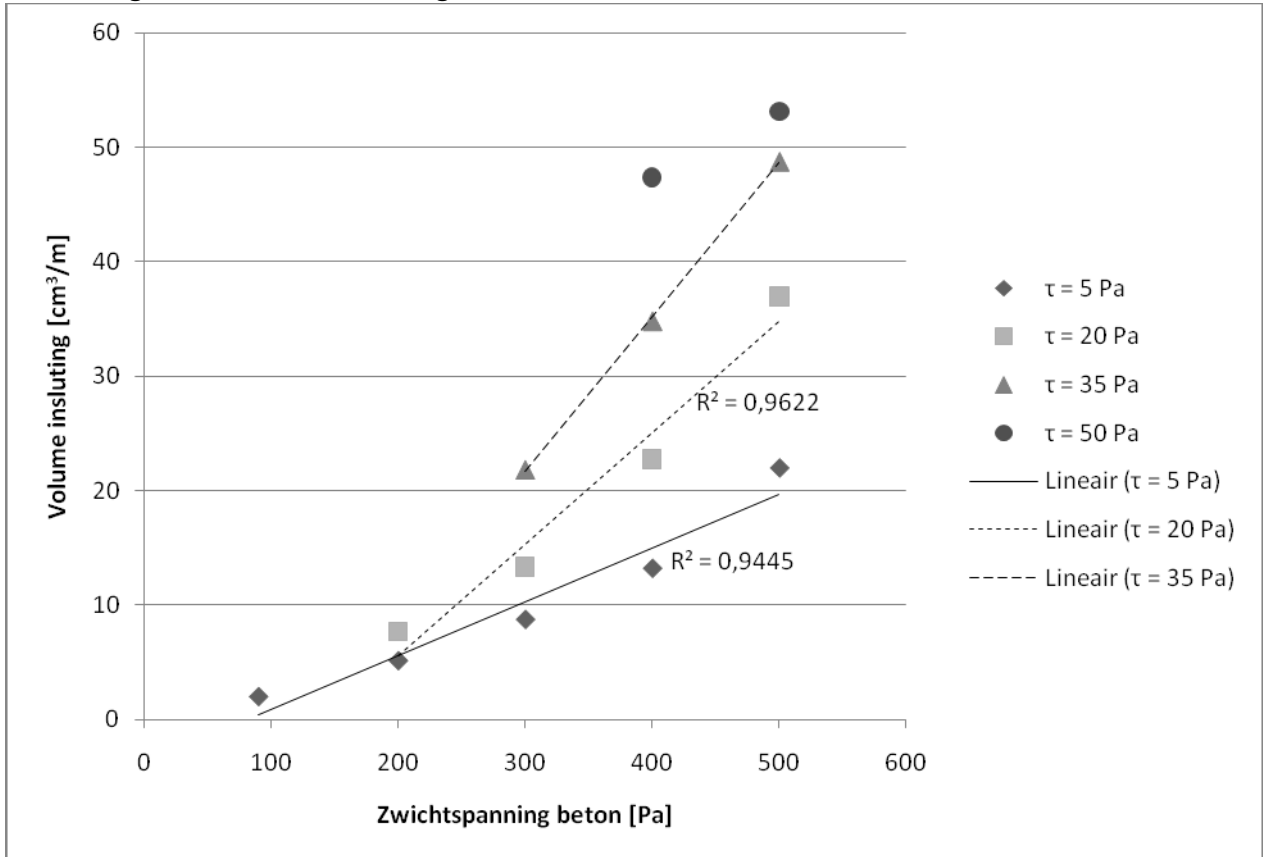
De grootte van het snelheidsgebied tussen de wapening en de grond varieert niet met de zwichspanning van het beton. Afbeelding 32 geeft een vergelijking tussen de snelheid met een zwichspanning van 200 Pa (links) en een van 500 Pa (Rechts). Het is lastig om een goed verschil weer te geven in een afbeelding. In afbeelding 32 is snelheid bij het stijve beton hoger. Dit geeft de situatie niet goed weer. Er is geen uniforme snelheid. Het beton drukt het bentoniet tegen de wand weg. Dit geeft een tijdelijke hogere snelheid. In zowel de simulatie met 200 Pa en 500 Pa gebeurt dit, alleen niet op dezelfde tijdstap.

afbeelding 32. Snelheidsprofiel met contour van het betonoppervlak



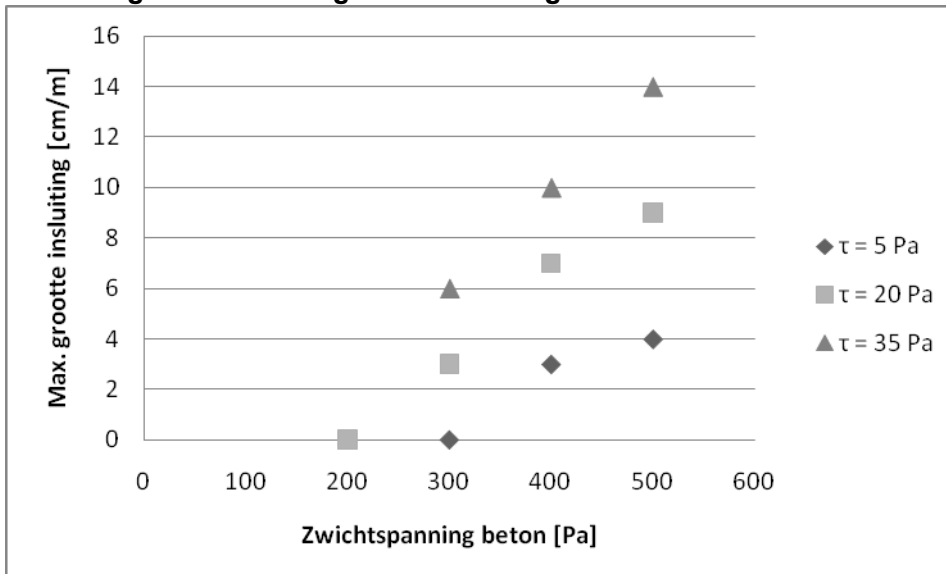
Om de maat van insluiting te kunnen kwantificeren wordt er van het gebied rond de insluiting het volume van het bentoniet opgeteld. Het model geeft voor elke cel een waarde tussen 0 en 1 voor elk materiaal. Deze waarde geeft aan in welke mate de cel gevuld is met het materiaal. In dit geval wordt gekeken naar bentoniet.

afbeelding 33. Mate van Insluiting



Afbeelding 33 geeft voor verschillende zwichtspanningen van bentoniet de mate van de insluiting als functie van zwichtspanning van beton. In afbeelding 33 is te zien dat bij een toename van de zwichtspanning van zowel bentoniet als beton de insluiting toe neemt. De combinatie van de beide zwichtspanningen lijkt een cumulatief effect te hebben. Des te hoger de zwichtspanning van beton des te groter het verschil is tussen de stappen van bentoniet zwichtspanning.

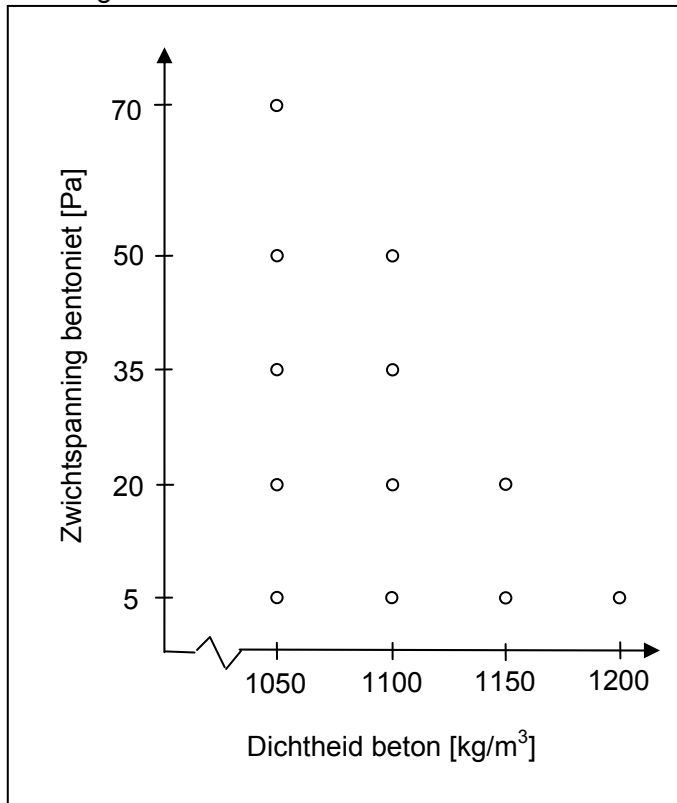
afbeelding 34. Maximale grootte insluiting



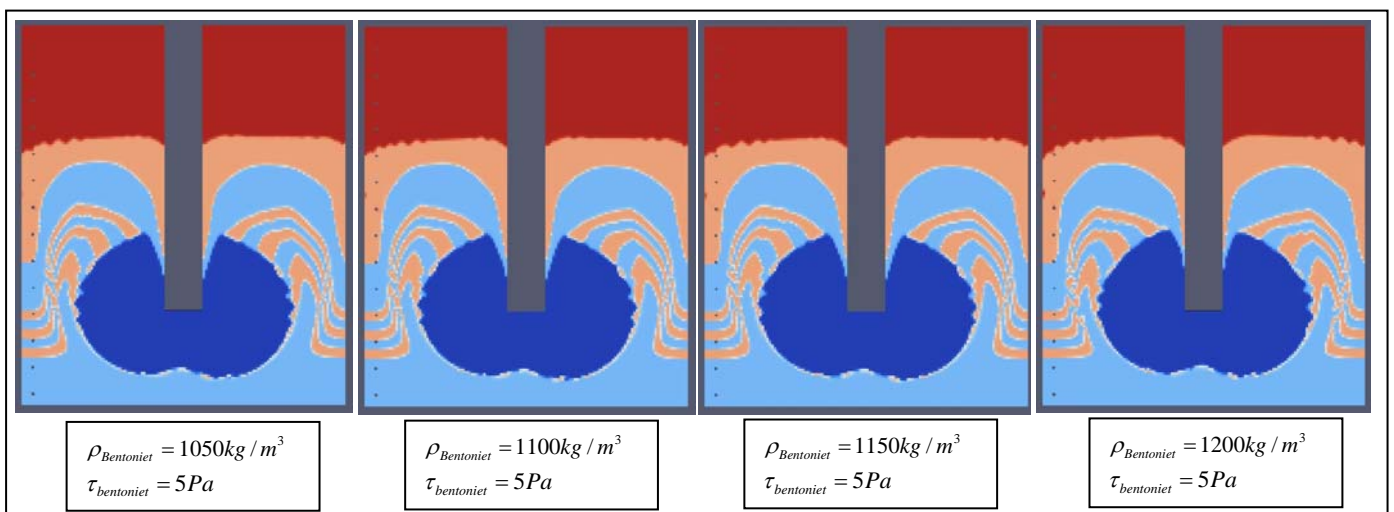
In afbeelding 34 is te zien dat bij een zwichspanning van de bentoniet van 5 Pascal er maar zeer beperkte grootte van de insluitingen ontstaan. Voor een zwichspanning van 20 pa zijn de insluitingen van duidelijke groter formaat.

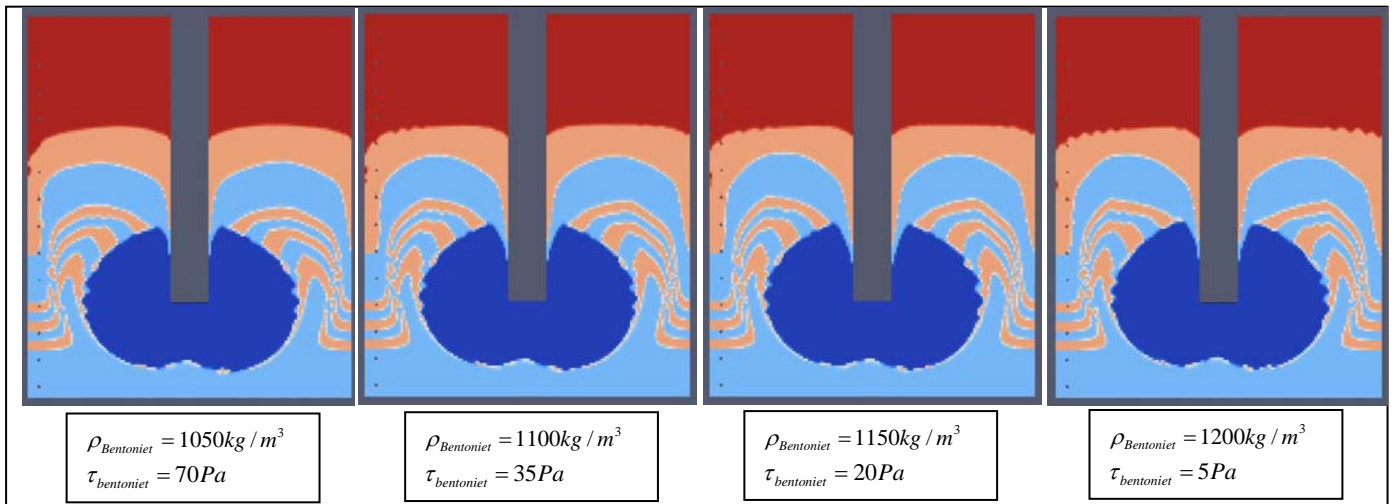
6.2.2. Dichtheid

In deze paragraaf worden de resultaten gepresenteerd van de berekeningen waarin de zwichspanning van beton constant wordt gehouden op 500 Pa en de dichtheid en de zwichspanning van bentoniet worden gevarieerd.

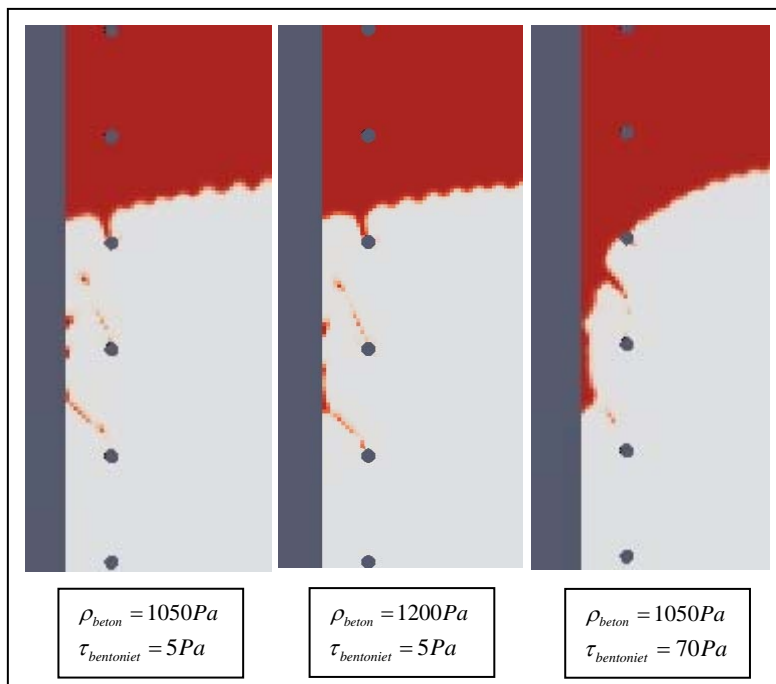


In de onderstaande afbeeldingen worden de resultaten van berekeningen voor de verfijning van de celgrootte weergegeven. Het geeft een goed beeld van hoe de stroming algemeen verloopt. Uit de vergelijking tussen de twee celgroottes is gebleken dat de resultaten overeenkomen. De afbeeldingen geven dus een goed beeld van de stroming in het paneel.





Afbeelding 35 geeft het detail van de berekening van bentoniet met een dichtheid van 1050 kg/m^3 en een zichtspanning van 5 Pa .

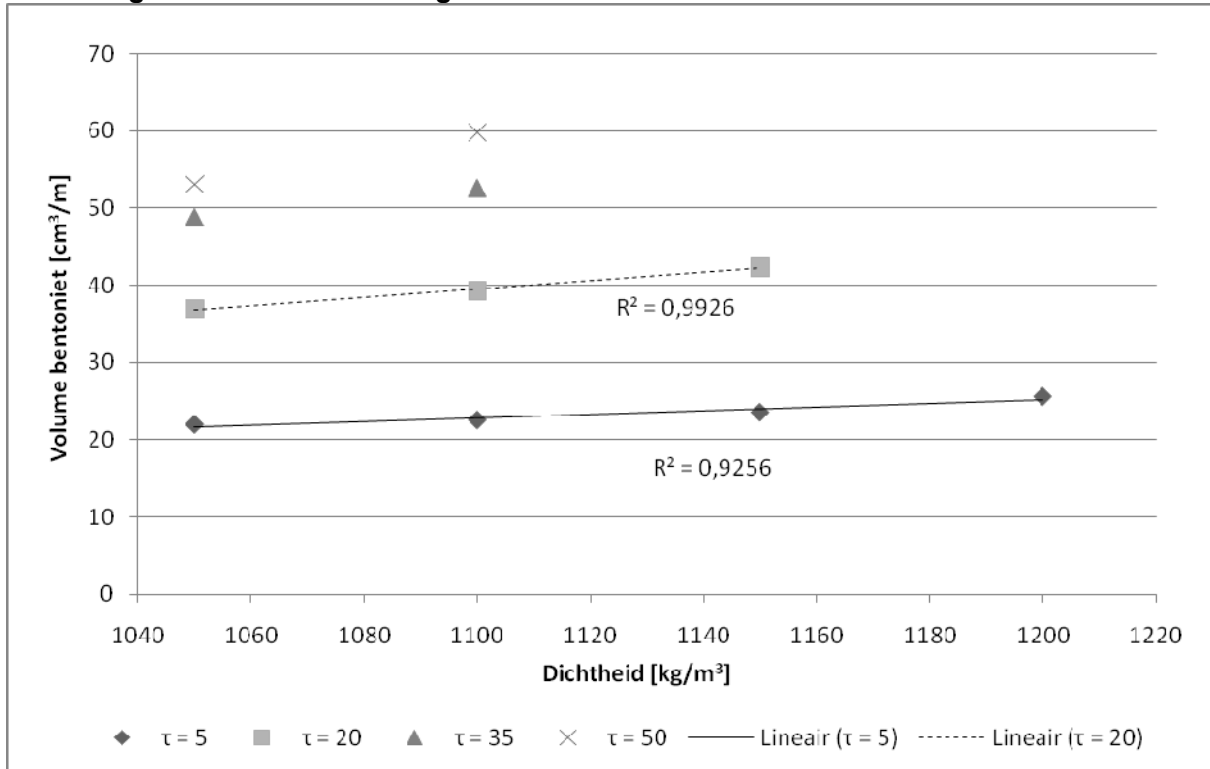


afbeelding 35. Detail van een insluiting

De dichtheid van het bentoniet lijkt in deze afbeeldingen weinig effect te hebben. De stijging van de zichtspanning van bentoniet heeft een veel groter effect.

Afbeelding 36 geeft een mate voor de insluiting aan de hand van het bentoniet volume in het beton in het voeggebied. Hieruit blijkt dat de dichtheid van het bentoniet weinig invloed heeft op de insluitingen. De dichtheid en de zichtspanning lijken een licht cumulatief effect te hebben. Bij een hogere zichtspanning neemt de insluiting meer toe naarmate de dichtheid wordt verhoogd.

afbeelding 36. Mate van Insluiting dichtheid



6.3. Wapening Fijn

In deze paragraaf worden de resultaten weergegeven als de tussenafstand wordt verkleind van 2x12 cm naar 1x12 cm. Horizontale staven vereisen 2 maal de voorgeschreven tussenafstand, tabel 4, tussen de wapeningsstaven. Bij verticale staven is deze vereiste 1 maal. De tussenafstand van 12 cm is kleiner dan de minimaal vereisten tussenafstand van 14 cm (2 X 7) voor bentoniet met een maximale zwichspanning van 10 Pa. De afstand tussen de wapening en de modelrand wordt niet veranderd.

tabel 4. Tabel uit de DIN 4126

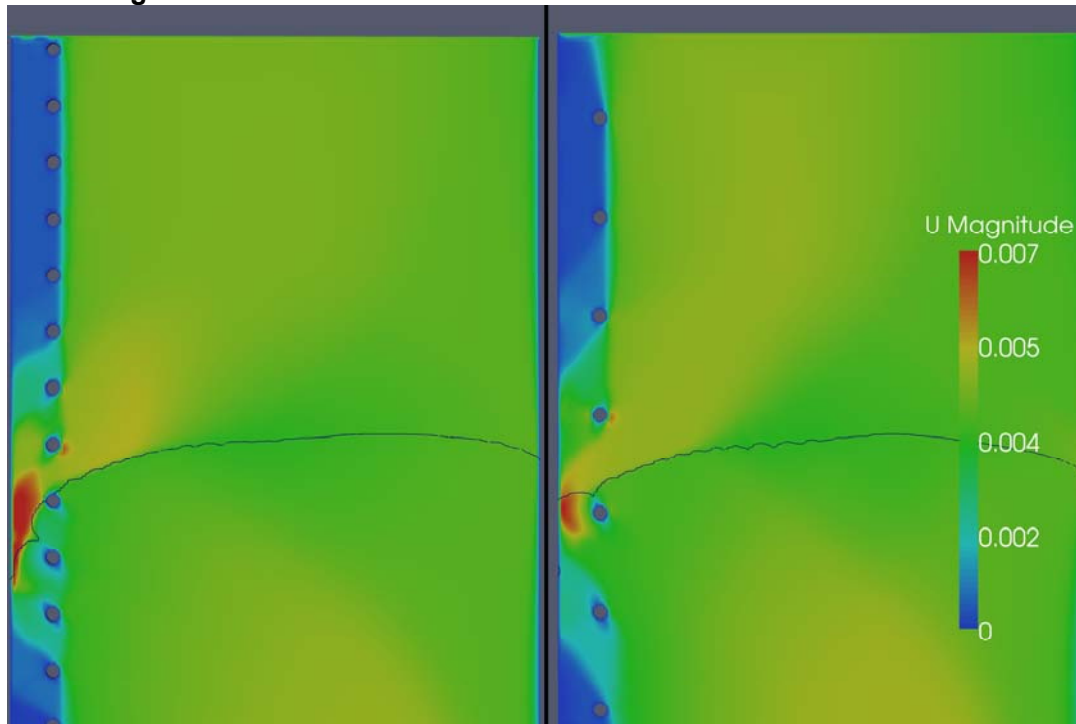
Zeile	max. Fließgrenze τ_F in N/m ² während des Betonierens	Schlitzwand als:			
		Dauerbauwerk		Bauhilfskonstruktion	
		e_1	e_2	e_1	e_2
in cm					
1	10	5	7	3	5
2	30	7	9	4	6
3	50	10	12	6	8
4	70 *)	—	—	8	10

*) $\tau_F > 50$ N/m² unzulässig für Dauerbauwerk

Die Maße e_1 und e_2 gelten bei Betonzuschlaggrößtkorn ≤ 32 mm; bei größeren Betonzuschlagkörnern bis 63 mm sind die Maße mit dem Faktor 1,5 zu vergrößern.

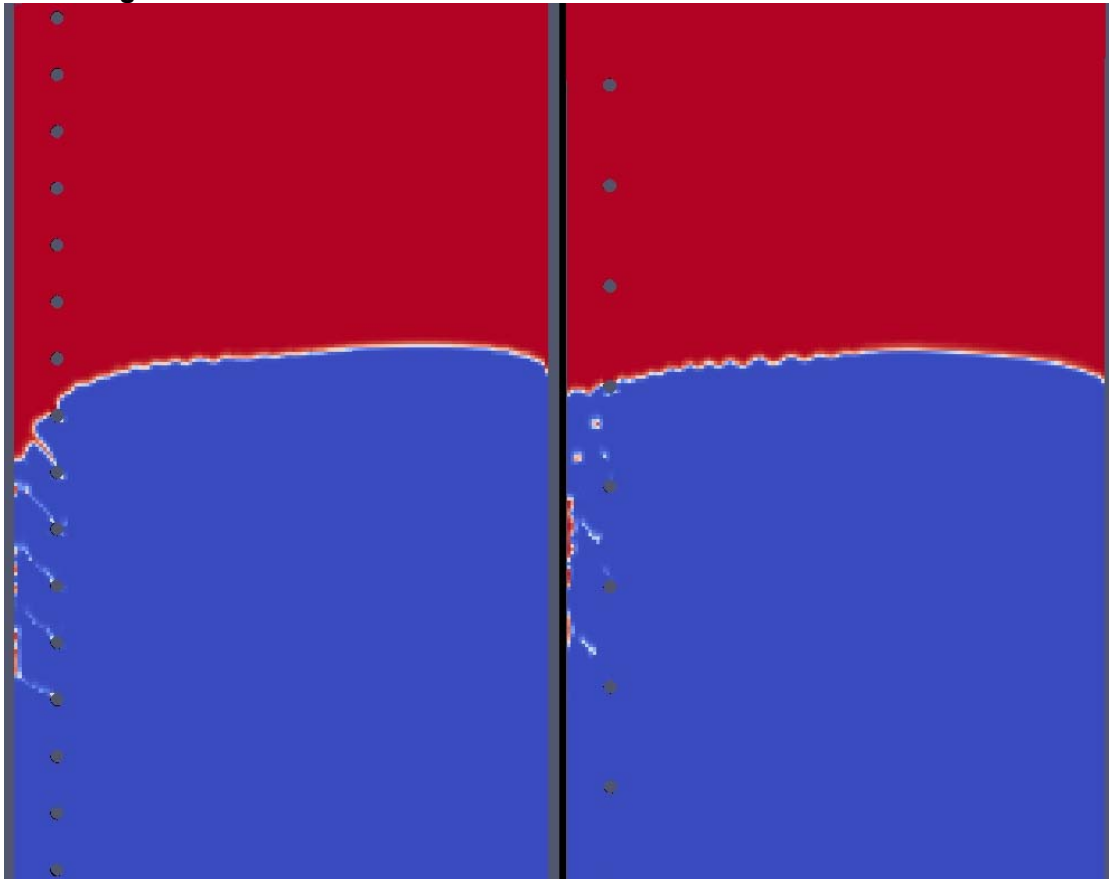
Bij het halveren van de afstand tussen de wapening veranderd mate van insluitingen. De stroming door de wapening wordt aanzienlijk verminderd. Dit is te zien aan de hand van het snelheidsprofiel. Ook is hier te zien dat in het voeggebied alleen rond het beton oppervlak stroming optreedt. Bij de halvering van de wapening wordt het gebied tussen de grond en de wapening waar stroming is verkleind.

afbeelding 37.



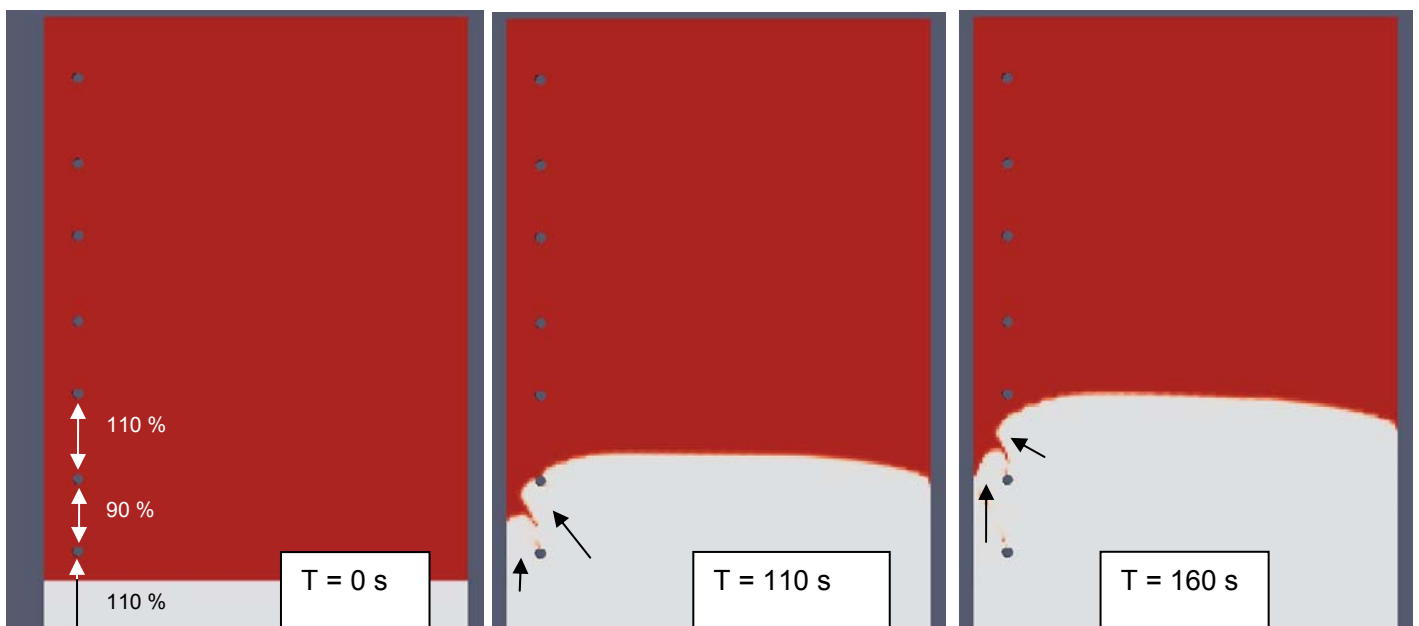
Opnieuw ontstaat een insluiting in het voeggebied direct boven het betonniveau waar de simulatie mee wordt begonnen. Door de kleinere openingen vult de ruimte tussen de wapening en de grond langzamer. Het gevolg is dat het bentoniet niet wordt overspoeld door beton, maar geleidelijk wordt weggeduwd. In afbeelding 37 de snelheid weergegeven tussen de verschillende tussenafstanden. In afbeelding 37 geeft de dunne blauwe lijn het beton oppervlak weer. Het is lastig om een goed beeld te geven van de snelheid. In afbeelding 37 lijkt er alsof er links een veel hogere snelheid is. Dit komt omdat het beton het bentoniet plat drukt tegen de wand en de bentoniet weg spuit. Tabel 4 geeft een relatie tussen de zwichtspanning van bentoniet en de dekking e_1 en de tussenafstand e_2 . Uit de berekening blijkt dat de halvering van de tussenafstand een positief effect heeft, terwijl tabel 4 aangeeft dat is omgekeerd zou moeten zijn. Dat wordt weergegeven in afbeelding 38. Er is sprake van een balans tussen de tussenafstand en de dekking. In dit onderzoek is geen onderzoek gedaan naar deze verhouding.

afbeelding 38.



6.4. Onregelmatige wapening

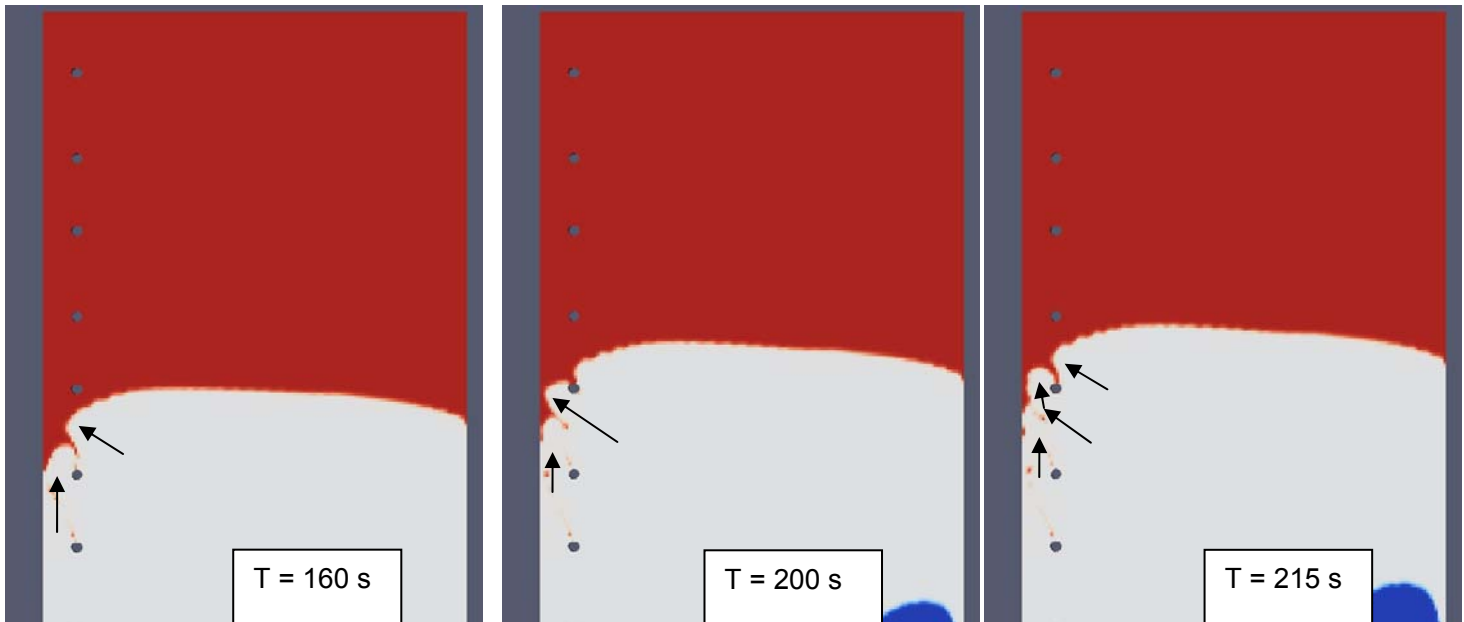
In deze berekening wordt bekeken wat het effect is van een onregelmatige verdeling van de wapening. In dit geval wordt de tussen afstand met 10% verkleind en vervolgens met 10 % vergroot.



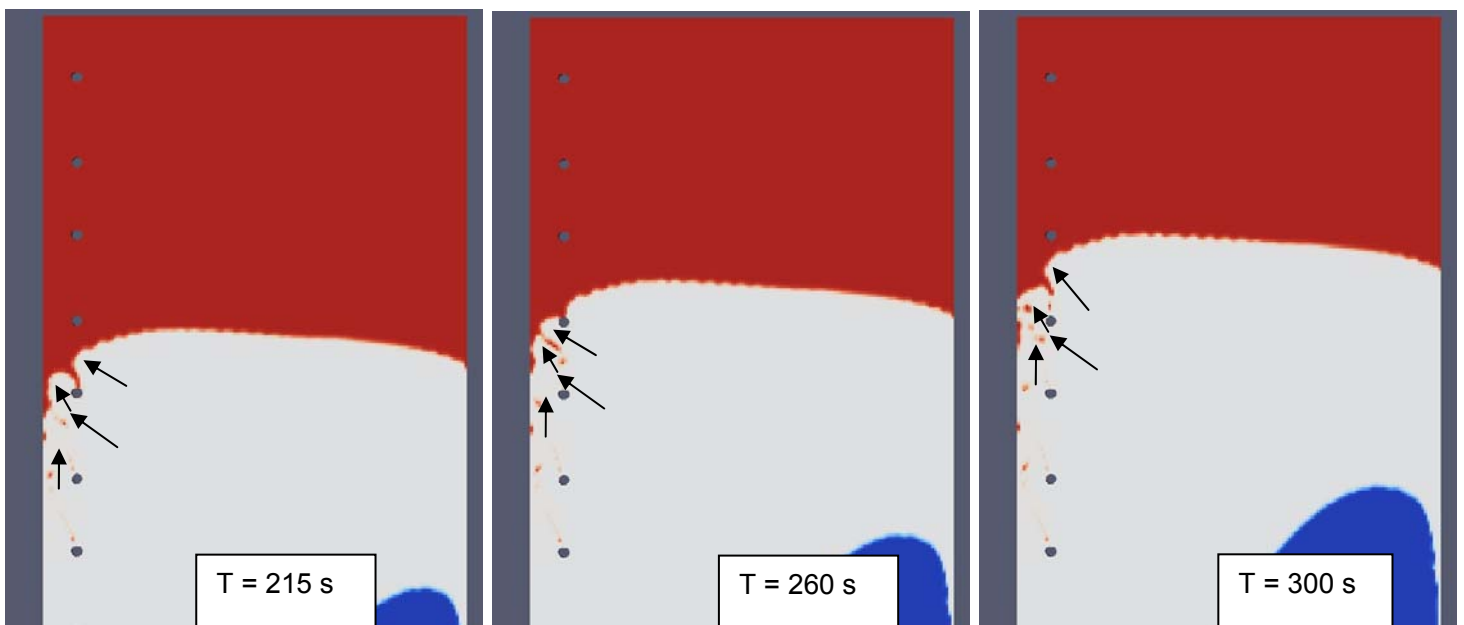
In eerste instantie lijkt er geen verschil te zijn. De insluiting begint zich te vormen zoals eerder is beschouwd. De horizontale stroming lijkt het beton niet te gaan overstromen. Door een toename van de

verticale stroming wordt dit voorkomen De insluiting ontstaat niet door een toename in de stroming vertikaal. We hebben hier te maken met dat de horizontale stroming door een verkleinde opening moet terwijl de verticale door een vergrootte opening gaat.

Als we de berekening laten doorlopen dan ontstaat het geval waar de verticale stroming door een verkleinde opening stroomt en de horizontale door een vergrootte. Hierbij ontstaat weer een beginsel van een insluiting. Dit leidt tot een heel erg beperkte insluiting.



Laten we het model verder lopen dan ontstaat een insluiting zoals we eerder hebben gezien, maar dan vlak na de start van de berekening in de buurt van het betonoppervlak.



Opvallend maar niet verbazend is dat zodra de wapening voor een deel is opgenomen in het betonoppervlak er een toename is in de horizontale stroming. Dit ontstaat omdat de stroming langs de wape-

ning een lichte horizontale component heeft rond het betonoppervlak. Zodra deze de wapening raakt wordt de stroming omgebogen rond de wapening en vervolgens drukt dit het beton naar de wand.

6.5. Conclusie

Uit het onderzoek blijkt dat het verhogen van de dichtheid een beperkte rol speelt in de formatie van insluitingen. De zwichtspanning van het beton en het bentoniet hebben een groot effect op de formatie van bentonietinsluitingen. De gevonden insluitingen zijn relatief klein van aard. Bij een zwichtspanning van 5 Pa is er vanaf een zwichtspanning van het beton van 400 Pa zichtbaar sprake van een bentonietinsluiting. Een zwichtspanning van 400 Pa komt overeen met 520 mm.

De insluitingen ontstaan bij de variatie van de zwichtspanning van beton en bentoniet op een vaste plek bekeken vanuit de stortkoker. Zodra de tussenafstand van de wapening werd verkleind verdween een insluiting. Dit komt omdat het bentoniet tijd heeft gehad weg te stromen.

Er zijn twee aanvullingsmechanismes van het voeggebied. De eerste loopt langs het betonoppervlak. Er loopt langs door de eerste opening in de wapening onder of rond het betonoppervlak. Het beton stroomt met een relatieve groter horizontaal component. Het tweede mechanisme loopt via de 2 á 3 lager gelegen openingen. Het beton stroomt dan alleen verticaal. Deze mechanismes dienen in balans te zijn. Uit de berekeningen blijkt dat als de 'horizontale' stroming te snel gaat het bentoniet wordt overstroomd en wordt ingesloten.

- insluitingen worden veroorzaakt door een verschil in de aanvuulsnelheid van de opening net onder het betonoppervlak in de wapening en de lager gelegen wapeningsopeningen.
- Bij een kleinere tussenafstand kan de 'horizontale' stroming door de wapening vertragen en een insluiting voorkomen.

De berekeningen tonen aan dat de aanvulling door de onderste openingen door de wapening in een gebied van ca. 1 meter onder het betonoppervlak plaats vindt.

- de tussenafstand van de wapening speelt een grote rol in de formatie van insluitingen.
- het voeggebied wordt gevuld met beton vanuit de bovenste meter.

Een grote gelijkmatige tussenafstand heeft als effect hebben dat de aanvulling van beton volgens beide mechanismes gelijke trend houden. Dit geldt zolang de verticale stroming op gang is. In het merendeel van de berekeningen was dit niet het geval, waardoor insluitingen ontstonden.

Bij een onregelmatige verdeling van de wapening wordt er om en om een van de mechanismen verstoord. Hierbij ontstonden insluitingen.

- bij een gelijkblijvende zwichtspanning heeft de dichtheid van het bentoniet een marginaal effect op het ontstaan van de insluitingen;
- de stijfheid van bentoniet heeft een grote invloed op de formatie van insluitingen.

De berekeningen tonen aan dat de dichtheid⁴ van bentoniet een zeer beperkte rol speelt in de vorming van de insluitingen. Het effect van de dichtheid neemt wel toe bij een hogere zwichtspanning van het bentoniet. De zwichtspanning van het bentoniet heeft een aanzienlijk groter effect op de formatie van de insluitingen.

In dit onderzoek is de aanname gedaan dat beton een homogene vloeistof is. Met deze aanname zijn de effecten van de korrelstructuur niet mee genomen. De korrels kunnen op een zodanige manier samen worden gepakt dat zij een blokkade vormen voor de stroming door de wapening. Afhankelijk van de diameter van de grootste korrel in het betonmengsel is het mogelijk dat de gevonden resultaten een verkeerd beeld geven.

⁴ De dichtheid van bentoniet is in dit onderzoek als onafhankelijk van de zwichtspanning gezien. Als een verhoging van de dichtheid ook tot een hogere zwichtspanning leidt, dan heeft de dichtheid wel degelijk effect op vorming van insluitingen.

7. CONCLUSIE

De oorzaak van de insluiting bij station Vijzelgracht van de Noord/Zuidlijn is niet ontdekt. Het is wel duidelijk zodra de insluiting ca 1 meter onder het beton oppervlak zit alleen de opwaartse kracht bijdraagt aan het verwijderen van de insluiting.

Een insluiting kan ontstaan doordat het beton een aanwezige kleirop heeft uitgesmeerd. Dit proces vertoont zich herhaaldelijk in het onderzoek. Het beton sluit een stuk van het bentonietmengsel in en drukt het mengsel vervolgens plat langs de randen.

Een insluiting kan ontstaan doordat de stortkoker onvoldoende in het beton zit, maar zonder dat er een uitbraak plaats vindt. Het bentoniet wordt dan overspoeld door het beton. Doordat het effect dat van het instromende beton nog niet de ruimte tussen de wapening en de grond heeft bereikt is de aanvulling door de lager gelegen openingen trager. Het beton in het hart van het paneel stijgt dan sneller dan het beton tussen in het voeggebied. Na verloop van tijd stroomt het beton van uit het hart door de wapening naar het voeggebied. Als de wapening open genoeg is wordt het bentoniet overstroomd. Is de wapening onvoldoende doorlatend dan wordt het bentoniet niet overspoeld maar weggeduwd door het horizontaal instromende beton. Voor het invloedsgebied van de stort lijkt mij dat de verhouding tussen de breedte van het paneel en de diepte van de stortkoker gerelateerd is. Zo zou ik verwachten dat een smaller paneel wellicht een minder diepe stortkoker vereist.

De wapening werkt als obstakel niet alleen negatief bij het ontstaan van een insluiting. De aanname was dat een kleinere tussenafstand een negatief effect heeft. Uit het onderzoek is gebleken dat de wapening ook een positief effect kan hebben op het ontstaan van een insluiting.

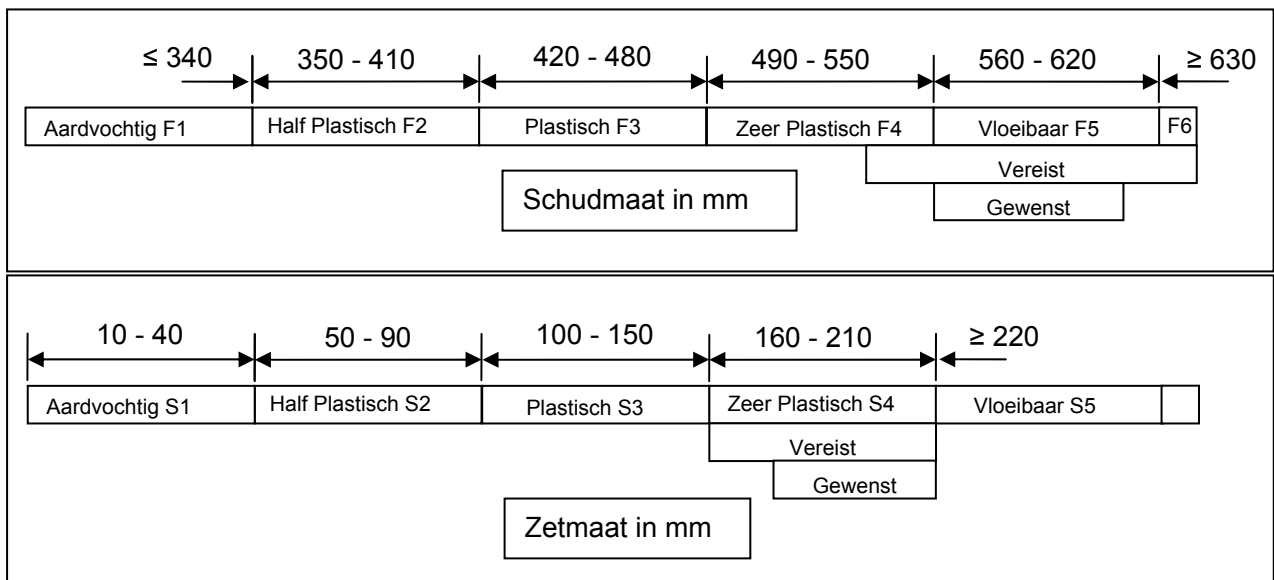
Uit het onderzoek is gebleken dat de zwichtspanning van het bentoniet veel belangrijker is dan de dichtheid.

Als het bentoniet een zwichtspanning heeft van 5 Pa, dan zal bij een zwichtspanning van beton lager dan 400 Pa geen insluitingen ontstaan. Een zwichtspanning van beton van 400 Pa komt overeen met een schudmaat van ongeveer 520 Pa. De normen voor de vloeibaarheid van het beton vereisen een schudmaat die een zwichtspanning geeft die lager is dan 400 Pa.

8. AANBEVELINGEN

1. de stroming in het voeggebied vereist een nadere bestudering. Het is van groot belang dat vooral het gebied rond scheiding tussen het beton en het bentoniet wordt bestudeerd. Uit het onderzoek blijkt dat vooral bij de voegen de bovenste laag van beton wordt afgezet. Als deze laag verontreinigd is dan zal er dus ook naar de voegen toe een beton worden afgezet dat van lagere kwaliteit is;
2. in dit onderzoek is plastische viscositeit niet meegenomen in de berekening. Er kan nog worden onderzocht of de plastische viscositeit een rol speelt in de formatie van de insluitingen;
3. het onderzoek geeft indicaties dat niet zozeer de grootte van de tussenruimte in de wapening maar de regelmaat van de tussenruimte een belangrijke rol speelt. Er zijn maar een beperkt aantal gevallen berekend. Een nadere studie zou wellicht verstandig zijn;
4. zoals al eerder aangegeven is er een inconsistentie tussen de NEN 8005 en de NEN-EN 1538:2000. De NEN-EN 1538:2000 verplicht dat de schudmaat 520 en 630 mm is of de zetmaat tussen 160 mm en 220 mm is.

NEN 8005 classificeert deze maten als S4 tot S5 of F4 tot F5



Het is aan te bevelen om de zetmaat als maat te verwijderen uit de NEN-EN 1538. NEN 8005 geeft, tenzij anders overeengekomen, de schudmaat maatgevend voor de consistenties zeer plastisch en vloeibaar.

De toekomstige norm NEN-EN 1538:2009 maakt een verschil tussen storten in een droge omgeving en in een omgeving onderwater met een stortkoker. Dit is een verheldering voor de grote spreiding in toegestane consistenties, maar geeft nog steeds het verschil in consistentie gebieden. Het is algemeen aangenomen dat de schudmaat een nauwkeurigere maat is voor vloeibaar beton dan de zetmaat.

5. De korrelsamenstelling van het beton heeft een groot effect op de doorstroming door de wapening. De korrels kunnen op een bepaald manier samenpakken en de opening tussen de wapeningssta-ven blokkeren. Nader onderzoek is wenselijk.
6. Uit de berekeningen waarbij een onregelmatige tussenafstand is gebruikt blijkt dat er een insluiting niet ontstaat in een gebied met verdichte beugelwapening maar in het gebied daarboven. Het is aan te bevelen om te onderzoeken of een geleidelijke wapeningsovergang verstandiger is.
7. Bij het onderzoek is aangenomen dat het beton een homogene vloeistof is. Dit heeft als gevolg dat de deeltjes niet worden gemodelleerd. Het is aan te bevelen om het gevolg hiervan te onderzoeken.

BIJLAGE I Literatuurlijst

boeken

- [1] *Concrete placed under: water How does it flow and where does it go?*, **Ben Gerwick, JR. and Terence Holland**
- [2] **Theodoros Triantafyllidis**, *Planung und Bauausführung im Spezialtiefbau Teil 1: Schlitz-wand und Dichtwandtechnik*, 2004, Ernst & Sohn, ISBN 3-433-02859-1
- [3] **G.H. Tattersalland, P.F.G. Banfill**; *The Rheology of Fresh Concrete*; 1983; Pittman, ISBN 0-273-08558-1

Collegedictaat CT2100 Vloeistof mechanica; **prof. Dr. Ir. J.A Battjes** ; Technische Universiteit Delft; April 2002

Collegedictaat Funderingstechniek Uitvoeringsaspecten; **Prof. ir. A.F. van Tol**; Technische Universiteit Delft ; Noodversie VSSD 2004

Collegedictaat Funderingstechniek; **prof. Ir. A.F. van Tol**; Technische Universiteit Delft; 2003

artikelen

- [4] *Computational modeling of concrete flow: General overview*, **Nicolas Roussel, Mette R. Geiker, Frédéric Dufour, Lars N. Thrane, Peter Szabo**, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 1298- 1307
- [5] *Controlling the Quality of Fresh Concrete: A New Approach*, **Chidiac, S. E.; Maadani, O.; Razaqpur, A. G.; Mailvaganam, N. P.**, *Magazine of Concrete Research*, V. 52, No. 5, 2000, pp. 353-363.
- [6] *Erfahrung mit Leckagen an schlitzwänden und Unterwasserbetonsohlen bei Trogbaugruben*, **K.-M. Borchert, W.-R Linder**.
- [7] *Lekkage diepwanden station Vijzelgracht Noord Zuidlijn*, Samenvatting rapportage Deltares voor Station Vijzelgracht. (8 december 2008, kenmerk 435691-0030)
- [8] *Numerical Modelling of Self-Compacting concrete Flow*, **Annika Gram** , Royal Institute of Technology, 2008 , ISSN 1103-4270
- [9] *Parameters affecting the thickness of bentonite cake in cut-off wall construction: case study and physical modelling*, **A. Soroush, M. Soroush**; *Can. Geotech. J.* 42: 646- 654 (2005)
- [10] *Plastic viscosity of fresh concrete - A critical review of predictions methods*; **S.E. Chidiac, F. Mahmoodzadeh**; *Cement & Concrete Composites* 31 (2009) 535- 544
- [11] *Prediction of fresh concrete flow behavior based on analytical model for mixture proportioning*, **Theodore Roshavelov**, *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 831- 835
- [12] *Slump and Slump Flow for Characterizing Yield Stress of Fresh Concrete*; **S. E. Chidiac, F. Habibbeigi, and D. Chan**; *ACI Materials Journal/November-December* 2006
- [17] *Formwork pressures when casting Self Compacting Concrete*; **Frederick van Waarde**; TU Delft; 2007
- [18] *BTL-Rapport 46 deel I*; **D.R. Mastbergen, M. Huisman, H. Kuyper**; CUR/COB, 1999

normen

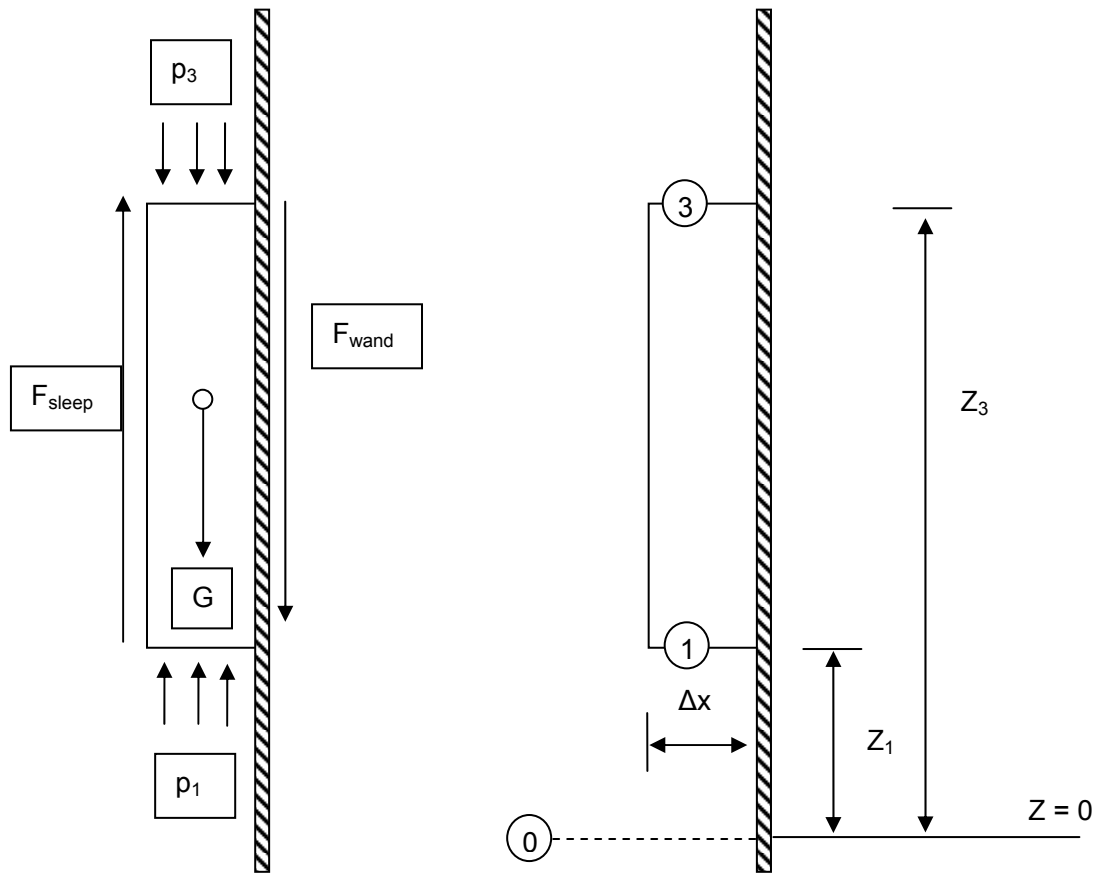
- [13] DIN 4126, Ortbeton-Schlitzwände
- [14] NEN 1538: 2000 Execution of special geotechnical work - Diaphragm wall
- [15] NEN 6740, Tabel 1 Representatieve waarden van grondeigenschappen.
- [16] NEN 8005:2008 Nationale aanvulling op de NEN-EN 206

websites

<http://nl.wikipedia.org/wiki/Reologie> Versie 4 april 2010 om 17:50.

BIJLAGE II Uitwerking prop aan de wand

De kracht die nodig is om een prop aan de wand te laten kleven bestaat uit drie componenten.



Het relatieve gewicht zal de prop omhoog willen drukken.

$$G = \rho_{ben} g (z_3 - z_1) \Delta x$$

de druk als gevolg van meevoering

De druk als gevolg van meevoering wordt berekend via de Bernoulli vergelijking.

De energiehogte op enige afstand voor de prop gelijk aan de energiehogte aan de onderzijde van de prop

$$H_0 = H_1$$

$$z_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{u_0^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g}$$

We stellen dat $z_0 = 0$. De snelheid op de rand van de prop is 0 dus $u_1 = 0$.

$$z_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{u_0^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\rho g}$$

De druk aan de onderzijde van de prop wordt gegeven door:

$$p_1 = \rho g \left(\frac{p_0}{\rho g} - z_1 \right) + \rho \frac{u_0^2}{2}$$

De druk bestaat uit de hydrostatische druk en de stuwdruk.

$$p_1 = \rho g \left(\frac{p_0}{\rho g} - z_1 \right) + \rho \frac{u_0^2}{2} = p_{\text{hydrostatisch}} + \rho \frac{u_0^2}{2}$$

Als er geen energie verlies is dan is de energiehoogte op enige afstand voor de prop gelijk aan de energiehoogte aan de bovenzijde van de prop.

$$z_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{u_0^2}{2g} = z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{u_3^2}{2g}$$

De druk aan de bovenzijde wordt dan:

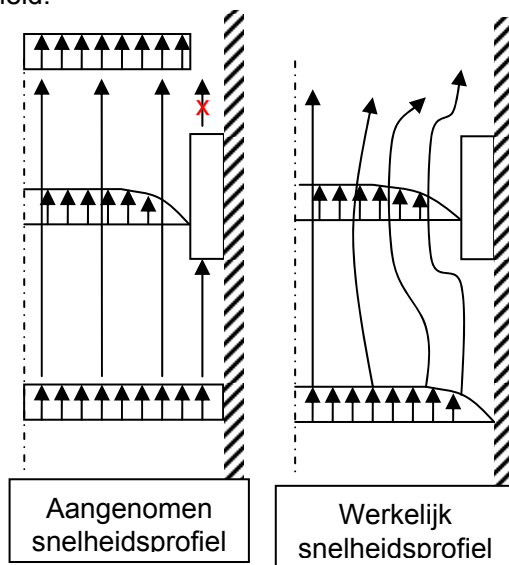
$$p_3 = \rho g \left(\frac{p_0}{\rho g} - z_3 \right) + \rho \frac{u_0^2}{2} = p_{\text{hydrostatisch}} + \rho \frac{u_0^2}{2}$$

De kracht op de prop wordt bij het geval van drukverlies:

$$\Delta p = \rho g \left(\frac{p_0}{\rho g} - z_1 \right) + \rho \frac{u_0^2}{2} - \left(\rho g \left(\frac{p_0}{\rho g} - z_3 \right) + \rho \frac{u_0^2}{2} \right) = \rho g (z_3 - z_1)$$

Alleen de hydrostatische component blijft over. Als gevolg van energieverlies zal de druk p_3 lager zijn.

We gaan uit van uitsluitend hydrostatische druk in punt 3. Tevens nemen we aan dat de druk gelijkmatig over de onderzijde van de prop is verdeeld en verwaarlozen we het effect van de wand op de snelheid.



$$\Delta p = \rho g \left(\frac{p_0}{\rho g} - z_1 \right) + \rho \frac{u_0^2}{2} - \rho g \left(\frac{p_0}{\rho g} - z_3 \right)$$

De totale kracht als gevolg van meevoering wordt:

$$F_{\text{druk}} = \left(\rho \frac{u_0^2}{2} + \rho g (z_3 - z_1) \right) \cdot \Delta x$$

sleepkracht

De sleepkracht bestaat uit de wrijving tussen de stroming en de prop. De schuifspanning in een Binghamse vloeistof wordt beschreven door:

$$\tau = \tau_{0_{beton}} + \mu \frac{\partial u}{\partial x}$$

De sleepkracht wordt dan:

$$F_{sleep} = \left(\tau_{0_{beton}} + \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \cdot (z_3 - z_1)$$

De kracht op de wand:

$$F_{wand} = F_{sleep} + F_{druk} - G$$

We vullen de gevonden waarden in:

$$F_{wand} = \left(\tau_{0_{beton}} + \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \cdot (z_3 - z_1) + \rho \frac{u_0^2}{2} \cdot \Delta x + \rho g (z_3 - z_1) \cdot \Delta x - \rho_b g (z_3 - z_1) \Delta x$$

$$F_{wand} = \left(\tau_{0_{beton}} + \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \cdot (z_3 - z_1) + \rho \frac{u_0^2}{2} \cdot \Delta x + (\rho - \rho_{ben}) g (z_3 - z_1) \cdot \Delta x$$

De minimale schuifspanning die de prop moet weerstaan om

$$\tau_{wand} = \left(\tau_{0_{beton}} + \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \rho \frac{u_0^2}{2(z_3 - z_1)} \cdot \Delta x + (\rho - \rho_{ben}) g \cdot \Delta x$$

Met een stijgsnelheid van 6 meter per uur ($=1.667 \cdot 10^{-3}$) m/s, een insluiting van 20 cm, dichtheden van 2400 en 1100 kg/m³.

$$\tau_{beton} = 74 \text{ Pa [5]}$$

$$\mu = 7.5 \text{ Pa s [5]}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0.01 \text{ s}^{-1} \text{ pure gok}$$

Component wrijving:

$$\tau_{0_{beton}} + \mu \frac{\partial u}{\partial x} = 74 + 7.5 \cdot 0.01 = 74.075 \text{ Pa}$$

Opwaartse druk:

$$(\rho - \rho_{ben}) g \Delta x = (2400 - 1100) \cdot 9.81 \cdot 0.2 = 2550.6 \text{ Pa}$$

Snelheidscomponent:

$$\rho \frac{u_0^2}{2(z_3 - z_1)} \Delta x = 2400 \frac{(1.667 \cdot 10^{-3})^2}{2(z_3 - z_1)} \cdot 0.2 = \frac{6.67 \cdot 10^{-4}}{(z_3 - z_1)} \text{ Pa}$$

Bij een overschatting van de snelheidscomponent is de snelheidscomponent te verwaarlozen. De opwaartse druk is de grootste bijdrage aan de opdrijving.

BIJLAGE III Bewijs Couette-stroming

De basis vergelijking is de Navier-Stokes van een onsamendrukbare newtoniaanse vloeistof

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) + \rho g_x$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right) + \rho g_y$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho g_z$$

De couette stroming is stationair waardoor alle tijdsafhankelijke termen weg vallen.

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) + \rho g_x$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right) + \rho g_y$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho g_z$$

Tot nu toe hebben we alleen het assenstelsel gedefinieerd, maar niet de zwaartekracht richting. We stellen dat z-as samenvalt met de zwaartekracht richting.

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho g_z$$

De snelheden v en w zijn 0.

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial y}$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \rho g_z$$

De snelheid u is constant in de x en y richting.

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial y}$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z$$

QED Couette

Bij verwaarlozing van de drukgradiënt wordt in de x richting:

$$0 = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Bij de randvoorwaarden:

$$u(x=0) = 0$$

$$u(x=l) = U$$

$$u = C_1 x + C_2$$

$$u(x=0) = C_1 \cdot 0 + C_2 = 0$$

$$u(x=l) = C_1 \cdot l + C_2 = U$$

$$u = \frac{U}{l} x$$