

Rgt-02-04

FUNDAMENTELE ASPEKTEN VAN SLIBONTWATERING

Deel 4: Filtratie-expressie experimenten



Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer
en Afvalwaterbehandeling

Postbus 17. 8200 AA Lelystad



Stichting Toegepast Onderzoek
Waterbeheer

Postbus 8090. 3503 RB Utrecht

generatie rioolwaterzuiveringsinrichtingen RWZI 2000

secretariaat: postbus 17, 8200 AA Lelystad 03200 - 70411



FUNDAMENTELE ASPEKTEN VAN SLIBONTWATERING

Deel 4: Filtratie-expressie experimenten

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

14 MAART 1995



RWZI 2000 94-02

ISBN 015800*

auteur(s):

TU-Eindhoven, Laboratorium
voor Scheidingstechnologie:

ir. A.J.M. Herwijn
drs. E.J. La Heij
ing. P.M.H. Janssen
dr.ir. W.J. Coumans
prof.dr.ir. P.J.A.M. Kerkhof

VOORWOORD

De problematiek rond de nuttige afzet van zuiveringsslib heeft binnen het RWZI 2000 onderzoekprogramma ruim aandacht gekregen. Naast kwaliteitsverbetering van zuiveringsslib kan de omvang van het probleem worden verkleind door het volume van de hoeveelheid slib, dat vrij komt te beperken. Enerzijds door een verminderde productie van slib bij het zuiveren van rioolwater, anderzijds door het drogestofgehalte van het gevormde zuiveringsslib te verhogen o.a door een verbeterde ontwatering. Aangezien destijds met de toenmalige, veelal op empirisch onderzoek gebaseerde inzichten en kennis geen substantiële verhoging van het drogestofgehalte was te verwachten, is in 1990 een fundamenteel onderzoek gestart naar slib/waterscheiding.

Het onderzoek is uitgevoerd in het Laboratorium voor Scheidingstechnologie van de TU-Eindhoven door een projectgroep, bestaande uit ir. A.J.M. Herwijn, drs. E.J. La Heij en ing. P.M.H. Janssen onder begeleiding van dr.ir. W.J. Coumans en prof.dr.ir. P.J.A.M. Kerkhof. Een belangrijke bijdrage aan het onderzoek is geleverd door tien afstudeerders van de faculteit Scheikundige Technologie.

Bij de uitvoering van het onderzoek werd het projectteam begeleid door een commissie bestaande uit ir. H.A. Meijer (Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden), prof.ir. J.H.J.M. van der Graaf (TU-Delft/Witteveen & Bos), ing. R. Kampf (Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen), ir. R.E.M. van Oers (Hoogheemraadschap West-Brabant), prof.dr.ir. W.H. Rulkens (LU-Wageningen), ing. G.B.J. Rijs (RIZA) en ir. P.C. Stamperius (STOWA).

Het voorliggende rapport geeft een overzicht van de verkregen onderzoeksresultaten en vormt een onderdeel van het uit acht deelrapportages bestaande eindrapport, t.w.:

- deel 1: Samenvattend verslag
- deel 2: Flocculatiemechanismen
- deel 3: Filtratie-expressie modellering
- deel 4: Filtratie-expressie experimenten
- deel 5: Slib-water binding
- deel 6: Karakterisering van slibben
- deel 7: Ontwikkeling nieuw CST-apparaat
- deel 8: Congresbijdragen

Lelystad, juli 1994

Voor de Stuurgroep RWZI 2000

prof. dr. J. de Jong
(voorzitter)

DANKWOORD

Onze dank gaat uit naar de studenten die in de projectgroep hun afstudeerwerk hebben verricht en een grote bijdrage hebben geleverd aan het onderzoek: Albert van Veldhuizen, Lotte Boon, Paul Dohmen, Frank Pijpers, Juul IJzermans, Diederik van Dijke, Oscar Meijer, Marga Verduin, Annemiek van der Zande en Moshe van Berlo.

Gerben Mooiweer wordt bedankt voor zijn bijdrage aan het ontwikkelen van rekenprogramma's.

Leo Pel van de faculteit Bouwkunde en Klaas Kopinga van de faculteit Technische Natuurkunde bedanken wij voor het deskundige advies en het beschikbaar stellen van de NMR-apparatuur.

Paul Buijs, Wies van Diemen en Prof. Stein van de vakgroep Thermodynamica en Colloïdchemie worden bedankt voor het beschikbaar stellen van de het ESA-meetinstrument.

Jan Denissen van TNO-keramiek wordt bedankt voor het fabriceren van keramiek voor het gemodificeerde CST-apparaat.

De technici, bedankt voor jullie ondersteuning bij het ontwerpen en bouwen van meetopstellingen.

Anniek van Bemmelen en May Rijvers bedanken wij voor het verzorgen van het eindrapport.

Namens de projectgroep.



Prof.dr.ir. P.J.A.M. Kerkhof

INHOUDSOPGAVE

| | |
|--|-----------|
| 1 INLEIDING | 1 |
| 2 DE CONSTITUTIEVE VERGELIJKINGEN | 2 |
| 2.1 Porositeit als functie van de opgelegde druk | 2 |
| 2.2 Permeabiliteit als functie van de porositeit | 4 |
| 3 EXPERIMENTELE METHODEN | 11 |
| 3.1 De opstelling | 11 |
| 4 RESULTATEN EN DISCUSSIE | 15 |
| 4.1 Koekdikte | 15 |
| 4.2 Porositeit | 16 |
| 4.3 Permeabiliteit | 25 |
| 5 CONCLUSIES | 33 |
| 6 EXPRESSIE-EXPERIMENTEN (0-700 kPa) | 36 |
| 6.1 Drainage- en expressie-experimenten | 36 |
| 6.2 Invloed van de druk op het expressiegedrag | 36 |
| 6.3 Invloed van de hoeveelheid flocculant op het expressiegedrag | 36 |
| 6.4 Invloed van de koekdikte op het expressiegedrag | 36 |
| 6.5 Invloed van het initiële drogestofgehalte op het expressiegedrag | 37 |
| 6.6 Drainage-experimenten | 37 |
| 6.7 Invloed van de druk op het expressiegedrag | 37 |
| 6.8 Invloed van de flocculant op het expressiegedrag | 40 |
| 6.9 Invloed van de hoeveelheid flocculant | 40 |
| 6.10 Invloed van de koekdikte op het expressiegedrag | 41 |
| 6.11 Invloed van het initiële drogestofgehalte op het expressiegedrag | 44 |
| 7 CONCLUSIES | 46 |
| 8 SYMBOLENLIJST | 47 |
| 9 LITERATUURLIJST | 49 |
| BIJLAGE I. BOL- EN KUBISCHE-STAPELINGEN | 51 |

1 INLEIDING.

Dit deel is verdeeld in 2 subdelen. Het eerste deel handelt over experimenten uitgevoerd met de compressie-permeabiliteitscel. Deze experimenten waren nodig om na te gaan welke constitutieve vergelijkingen geschikt zijn om het materiaalgedrag van slib te kunnen beschrijven. Het tweede deel gaat over het effect van verschillende procesomstandigheden en flocculatieomstandigheden op het expressiegedrag van zuiveringsslib.

Dit deel is een samenstelling van de afstudeerverslagen van Albert van Veldhuizen en Marga Verduin.

2 DE CONSTITUTIEVE VERGELIJKINGEN

2.1 Porositeit als functie van de opgelegde druk

De porositeit van een bed kan worden gemeten als functie van de opgelegde druk in een consolidometer [1] of in een 'compressie-permeabiliteitscel' [71]. In de literatuur worden verschillende modellen gebruikt om het verband tussen de porositeit en de mechanische opgelegde druk (P_s) te beschrijven.

Het meest voorkomende model is dat van Shirato-Tiller, waarin de porositeit en de opgelegde druk gerelateerd zijn volgens:

$$\epsilon = \epsilon_0 P_s^{-\lambda} \quad (1)$$

echter bij $P_s = 0$ moet gelden $\epsilon = \epsilon_0$, zodat vergelijking (1) moet worden:

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + P_s)^{-\lambda} \quad (2)$$

en om de juiste eenheden te verkrijgen wordt vergelijking (2):

$$\epsilon = \epsilon_0 \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^{-\lambda} \quad (3)$$

met

P_a = empirische constante [Pa]

De vergelijking (1) van het model van Shirato-Tiller is een onderdeel van een groter geheel waarin ook de specifieke weerstand α en de permeabiliteit K worden begrepen. Het model bevat een viertal vergelijkingen in de vorm van een 'Power-law':

$$\epsilon = \epsilon_0 P_s^{-\lambda} \quad (1)$$

$$(1 - \epsilon) = B(P_s)^{\beta} = (1 - \epsilon_0)(P_s)^{\beta} \quad (4)$$

$$\alpha = a(P_s)^n = \alpha_0(P_s)^n \quad (5)$$

en

$$K = J(P_s)^{-\delta} = K_0(P_s)^{-\delta} \quad (6)$$

met

| | | |
|----------------------|--|-------------------|
| $B = (1-\epsilon_0)$ | = 1 - porositeit bij druk is nul | [-] |
| $a = \alpha_0$ | = porositeit bij druk is nul | [m/kg] |
| $J = K_0$ | = permeabiliteit bij druk is nul | [m ²] |
| λ | = compressibiliteitscoëfficiënt bij vergelijking (1) | [-] |
| β | = compressibiliteitscoëfficiënt bij vergelijking (4) | [-] |
| δ | = compressibiliteitscoëfficiënt bij vergelijking (6) | [-] |

Er bestaat verband tussen deze vergelijkingen en wel:

$$a * B * J = 1 \quad (7)$$

en

$$\delta = n + \beta \quad (8)$$

Deze vier vergelijkingen gelden voor een $P_s \geq P_i$. P_i is de druk waarbij aangenomen wordt dat geldt dat er bij lagere drukken constante waarden bereikt worden voor ϵ , α en K , namelijk ϵ_i , α_i en K_i .

Om ook nu weer geen problemen te krijgen met de dimensies van de constanten is het correcter om, analoog aan de afleiding van de vergelijkingen (1), (2) en (3) de vergelijkingen (1), (4), (5) en (6) te schrijven in de vorm:

$$\epsilon = \epsilon_0 \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^{-\lambda} \quad (3)$$

$$(1 - \epsilon) = B \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^\beta = (1 - \epsilon_0) \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^\beta \quad (9)$$

$$\alpha = a \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^n = \alpha_0 \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^n \quad (10)$$

en

$$K = J \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^{-\delta} = K_0 \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^{-\delta} \quad (11)$$

Terzaghi en Peck [3], [4], [5] hebben een voidratio (e) gedefinieerd als:

$$e = \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \quad (12)$$

Als verband tussen de porositeit en de opgelegde druk geven zij:

$$e = C1 \ln(P_s) + C2 \quad (13)$$

Kerkhof neemt een verband tussen de voidratio en de opgelegde druk aan voor het uitpersen van een vlok, waarbij wordt aangenomen dat een vlok met een hogere begin-voidratio e_0 gemakkelijker is te deformeren volgens [6]:

$$e = e_0 (1 + a P_s)^{-\gamma_i / (1 + \epsilon_0)} \quad (14)$$

met

| | |
|---|---------------------|
| e_0 = voidratio bij druk is nul | [-] |
| a = drukconstante | [Pa ⁻¹] |
| γ_i = deeltjes compressiecoëfficiënt | [-] |

Ten derde is er een model beschreven door De Smedt [7]. De consolidatiefase wordt door hem beschreven door een vergelijking die veel overeenkomsten vertoont met de vorige:

$$e = e_{\infty} + (e_0 - e_{\infty}) \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^{-\sigma} \quad (15)$$

met

| | |
|---|-----|
| e_{∞} = voidratio bij oneindig hoge druk | [-] |
| σ = constante | [-] |

Tenslotte nog een model dat eveneens overeenkomsten vertoont met de andere modellen. Het betreft een model, genoemd door Kravtchenko [8], verkregen via de analogie uit de theorie van vloeistoffen:

$$e = e_0 \cdot C(1 - \exp(-bP)) \quad (16)$$

met

| |
|---|
| b = constante gerelateerd aan viscositeit |
| C = Arrhenius-afhankelijke constante |

2.2 Permeabiliteit als functie van de porositeit

Rond 1840 formuleerde Hagen en Poiseuille het verband tussen stromingssnelheid en de kracht die de stroming veroorzaakt in een verticale buis als volgt [9], [10], [11]:

$$Q = \frac{\pi(P_0 - P_L)R^4}{8\mu L} \quad (17)$$

met

| | | |
|----------------|-----------------------------------|-------|
| Q | = stromingssnelheid | [m/s] |
| P ₀ | = druk aan de ingang van de buis | [Pa] |
| P _L | = druk aan de uitgang van de buis | [Pa] |
| R | = straal van de buis | [m] |
| L | = buislengte | [m] |

Voor gepakte kolommen werd er gecorrigeerd voor de hydraulische straal en het specifieke oppervlak, waaruit volgde [9]:

$$q = \frac{(P_0 - P_L)}{L} \frac{d_p^2}{2(36\mu)} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \quad (18)$$

met

| | | |
|----------------|------------------------------------|-----|
| d _p | = diameter van de pakkingsdeeltjes | [m] |
|----------------|------------------------------------|-----|

Experimenten toonden aan dat de theoretische vergelijking (18) kan worden verbeterd door de factor 2(36)μ te vervangen door 150μ zodat verkregen wordt [9]:

$$q = \frac{(P_0 - P_L)}{L} \frac{d_p^2}{150\mu} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \quad (19)$$

Deze vergelijking staat bekend als de Blake-Kozeny-vergelijking.

Wordt nu de vergelijking (19) gecombineerd met de Darcy-vergelijking dan wordt er een verband gevonden voor de permeabiliteit K waarvoor voor niet-compressibel materiaal geldt [12]:

$$K = \frac{d_p^2}{150} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \quad (20)$$

Deze vergelijking wordt de Kozeny-Carman-vergelijking genoemd. De permeabiliteit hangt sterk af van de porositeit zoals weergegeven in figuur (1).

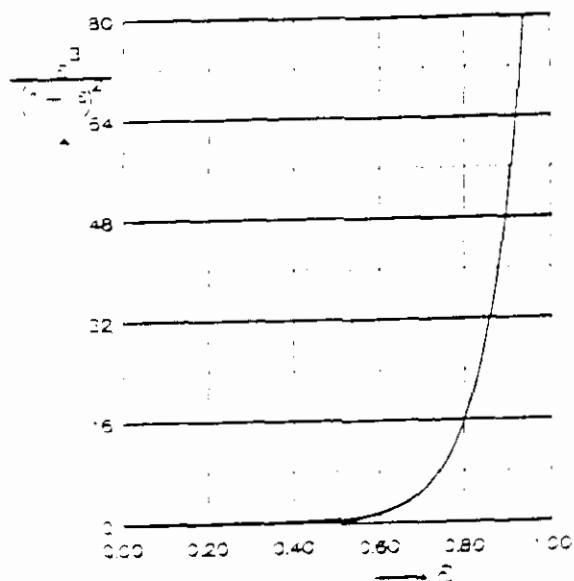
De permeabiliteit van de koek wordt ook wel geïntepreterd in de vorm [20]:

$$K = \frac{1}{150} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \frac{d_p^2}{\Phi} \quad (21)$$

met

| | | |
|---|--------------|-----|
| Φ | = vormfactor | [-] |
|---|--------------|-----|

De vormfactor kan worden bepaald uit microscopisch onderzoek [14].



Figuur 1. Kozeny-Carman-vergelijking [13]

In een meer verfijnd model van Happel en Brenner [15] wordt het poreuze medium gezien als een systeem van individuele bolletjes. De stroming om het enkele bolletje wordt daarbij zo exact mogelijk beschreven, rekening houdend met een gemiddelde interactie van omliggende bolletjes. Er wordt dan verkregen:

$$K = \frac{2}{9} * \frac{r_p^2}{\gamma^3} * \frac{3 - \frac{9}{2}\gamma + \frac{9}{2}\gamma^5 - 3\gamma^6}{3 + 2\gamma^5} \quad (22)$$

met

$$\gamma = (1-\epsilon)^{1/3} \quad [-]$$

$$r_p = \text{straal van een pakkingsdeeltje} \quad [\text{m}]$$

Voor waarden van $0,4 < \epsilon < 0,7$ verschillen de Carman-Kozeny-vergelijking en de Happel-Brenner-vergelijking niet zo veel van elkaar [16]. Ook uit experimenten van Scheideger [17] en Carman [18] blijkt dit.

Een veel besproken model is dat van Brinkman [19], [20], [21]. Dit model gaat uit van bolletjes in een gepakt bed. De stroming door het poreuze medium wordt beschreven door een gemodificeerde vorm van de wet van Darcy. De gevonden relatie luidt:

Een gemis aan dit model is dat, als $\epsilon = 1/3$ volgt $K = 0$, waardoor dit model bij lage porositeit onbruikbaar wordt [22].

$$K = \frac{2}{9} * \frac{r_p^2}{\gamma^3} * (1 + \frac{3}{4}(1-\epsilon)(1 - \sqrt{\frac{8}{(1-\epsilon)} - 3})) \quad (23)$$

Bovenstaande modellen zijn afgeleid voor niet-comprimeerbare gepakte bedden. Echter voor compressibele filterbedden (zoals bijvoorbeeld bij slib) zouden de onderstaande modellen mogelijk een benadering kunnen zijn.

Allereerst een model dat gebruik maakt van de vergelijkingen (9) en (11) van het model van Shirato-Tiller. Er kan een verband worden afgeleid tussen de permeabiliteit en de porositeit:

$$K = K_0 \left(\frac{1-\epsilon}{1-\epsilon_0} \right)^{-\beta} \quad (24)$$

Vervolgens een model gebaseerd op deformeerbare bollen. Dit model kan op verschillende manieren worden uitgewerkt, afhankelijk van de manier waarop de bollen gestapeld zijn. Genoemd worden hier onder andere de hexagonale dichtste bolstapeling (hcp), de kubische dichtste bolstapeling (ccp) en de lichaamsgecenterde kubische dichtste bolstapeling (bcc) (zie voor figuren van de stapelingen in bijlage I) [22], [23].

Uitgaande van, wederom, de wet van Darcy en een gemodificeerde vorm van de Hagen-Poiseuille-vergelijking, volgt het eenvoudige verband [9]:

$$K = \frac{1}{2} R_h^2 \epsilon \quad (25)$$

met

R_h = hydraulische straal [m]

Bij ccp bevat de eenheidscel in het totaal vier bollen met straal r en is de lengte van de ribbe $2r\sqrt{2}$. Hieruit volgt dat voor de porositeit van de ongedeformeerde stapeling geldt:

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{4 * \frac{4}{3} \pi r^3}{(2r\sqrt{2})^3} = 0.26 \quad (26)$$

Bij het belasten van de stapeling zullen de bollen op een dusdanige wijze op elkaar gedrukt worden dat tussen de bollen onderling cirkelvormige raakvlakken ontstaan, terwijl de niet-rakende delen de bolvorm aanhouden. Voor de afplattingsgraad van één bol geldt (zie bijlage I):

$$\beta = \frac{h}{r_0} \quad (27)$$

met

h = afplattingslengte pakkingsdeeltje [m]

r_0 = straal van pakkingsdeeltje zonder compressie [m]

Het verband tussen porositeit en afplattingsgraad is [26]:

$$\epsilon = 1 - \pi \left(\frac{1 - 3\beta^2(3 - \beta)}{3(1 - \beta)^3 \sqrt{2}} \right) \quad (28)$$

Voor de permeabiliteit wordt dan gevonden [24]:

$$K = K_0 * \frac{1}{\epsilon_0^3} * \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^3} * \frac{(1 - \beta)^4}{(1 - 6\beta)^2} * \left(\frac{\pi}{3\sqrt{2}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (29)$$

of met r_0 geeft dit de permeabiliteit voor de ongedeformeerde stapeling:

$$K_0 = \frac{r_0^2 \epsilon_0^3}{\pi^2} \quad (30)$$

zodat volgt:

$$K = r_0^2 * \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^3} * \frac{(1 - \beta)^4}{(1 - 6\beta)^2} * \left(\frac{\pi}{3\sqrt{2}} \right)^{\frac{2}{3}} * \frac{1}{\pi^2} \quad (31)$$

Bij een bcc bevat de eenheidscel in het totaal twee bollen en is de lengte van de ribbe $4/3r\sqrt{2}$. De porositeit van de ongedeformeerde stapeling wordt zodoende:

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{2 * \frac{4}{3} \pi r^3}{\left(\frac{4}{3} r \sqrt{2} \right)^3} = 0.32 \quad (32)$$

Voor de porositeit en de permeabiliteit volgen op eenzelfde manier als bij ccp:

$$\epsilon = 1 - 3\pi \left(\frac{1 - 2\beta^2(3 - \beta)}{8(1 - \beta)^3 \sqrt{3}} \right) \quad (33)$$

en:

$$K = K_0 * \frac{1}{\epsilon_0^3} * \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^3} * \frac{(1-\beta)^4}{(1-4\beta)^2} * \left(\frac{9\pi}{8\sqrt{3}}\right)^2 \quad (34)$$

$$K_0 = \frac{r_0^2 \epsilon_0^3}{\pi^2} * \left(\frac{8\sqrt{3}}{9}\right)^2 \quad (35)$$

$$K = r_0^2 * \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^3} * \frac{(1-\beta)^4}{(1-4\beta)^2} * \left(\frac{9\pi}{8\sqrt{3}}\right)^2 * \frac{1}{\pi^2} \quad (36)$$

De hcp bevat eveneens een eenheidscel met twee bollen, maar de cel heeft ribben met verschillende lengtes $2r$ en $r\sqrt{3}$. De porositeit van de ongedeformeerde stapeling wordt echter gelijk aan die van de ccp, namelijk:

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{2 * \frac{4}{3} \pi r^3}{8\sqrt{2} r^3} = 0.26 \quad (37)$$

Ook de permeabiliteit, r_0 en K_0 blijven hetzelfde als bij ccp.

Om een grotere beginporositeit te behalen kan een andere kubische bolstapeling worden bedacht. Deze staat eveneens getekend in bijlage I en wordt de kubische bolstapeling genoemd. Nu bevat de eenheidscel met ribbe $2r$ slechts één bol.

De te behalen beginporositeit wordt nu:

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{\frac{4}{3} \pi r^3}{(2r)^3} = 0.48 \quad (38)$$

en verder volgt daaruit:

$$\epsilon = 1 - \pi \left(\frac{1 - \frac{3}{2} \beta^2 (3 - \beta)}{6(1 - \beta)^3} \right) \quad (39)$$

$$K = K_0 * \frac{1}{\epsilon_0^3} * \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^3} * \frac{(1-\beta)^4}{(1-3\beta)^2} * \left(\frac{\pi}{6}\right)^2 \quad (40)$$

en:

$$K_0 = \frac{9r_0^2 \epsilon_0^3}{2\pi^2} \quad (41)$$

$$K = r_0^2 * \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^{\frac{2}{3}}} * \frac{(1-\beta)^4}{(1-3\beta)^2} * \frac{9}{2} * \left(\frac{\pi}{6}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (42)$$

De begrenzing van de kubische bolstapelingsbenadering wordt gegeven door het feit dat bij toenemende compressie diverse aanrakingcirkels met elkaar in contact komen. Wordt β groter dan ongeveer 0,13 dan is de benadering met de deformeerbare bollen niet meer toegestaan [24].

Tenslotte nog een model wat uitgaat van kubusvormige blokken met cilindrische poriën, zoals ook weergegeven in bijlage I. Is de ribbe van de kubus gelijk aan a en de poriëstraal r_c , dan zijn de porositeit en de permeabiliteit gelijk aan:

$$\epsilon = \pi \frac{r_c^2}{a^2} \quad (43)$$

$$K = \frac{1}{2} r_c^2 \epsilon = \frac{1}{2\pi} \epsilon^2 a^2 \quad (44)$$

Uitgaande van een bepaalde begintoestand met porositeit ϵ_0 volgt voor de permeabiliteit de volgende vergelijking, welke overeenkomst vertoont met vergelijking (24):

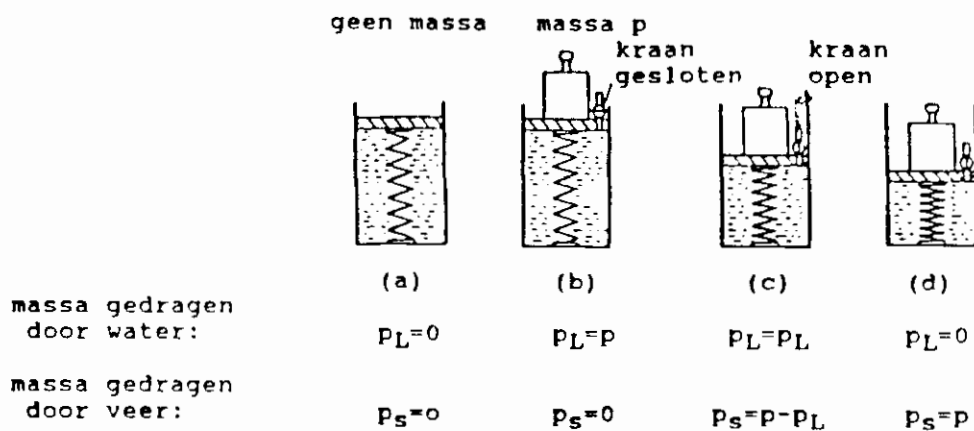
$$K = K_0 * \frac{\epsilon^2}{\epsilon_0^2} \left(\frac{1-\epsilon_0}{1-\epsilon} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (45)$$

3 EXPERIMENTELE METHODEN

3.1 De opstelling

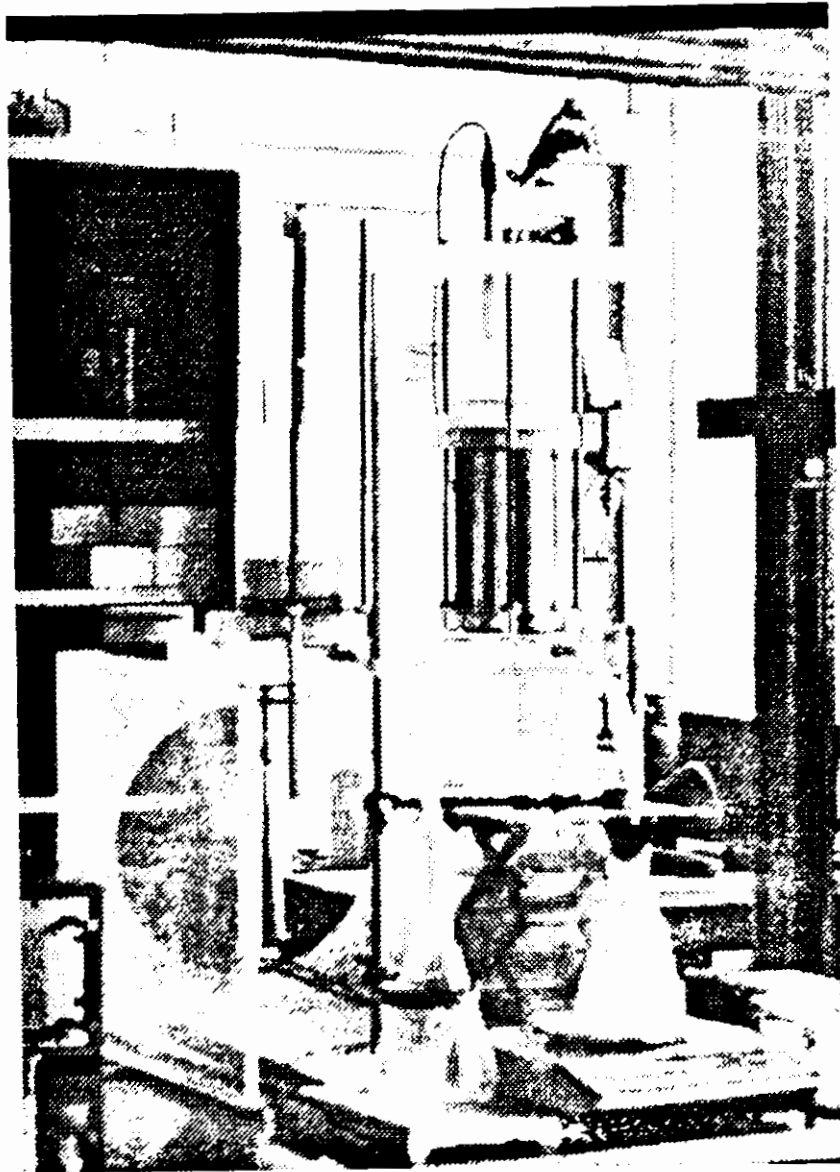
Bij mechanische compressie, consolidatie, is het de bedoeling dat de porositeit van de koek wordt verkleind, waardoor het water dat in de poriën zit wordt verdreven. Om het consolidatieproces beter te begrijpen wordt het volgende gedachtenexperiment van Terzaghi uitgevoerd [5].

In een cilinder die gevuld is met water zit een veer (a), zie figuur 2. Op het water wordt een wrijvingsloze zuiger aangebracht met daarop een massa, die een druk P veroorzaakt (b). De zuiger wordt geheel door de vloeistof gedragen. Indien de zuiger wordt voorzien van een kraantje zal bij opening van het kraantje de zuiger zakken (c). De vloeistofdruk is dan P_L en de druk op de veer P_s . Op een bepaald ogenblik is er weer een evenwicht bereikt (d). De vloeistofdruk is dan nul geworden en de gehele opgelegde druk wordt door de veer gedragen ($P_s = P$). De veer in het model van Terzaghi stelt de vaste stof voor en het water in de cilinder stelt het water in de poriën voor.



Figuur 2. Schematische weergave van het Terzaghi-model

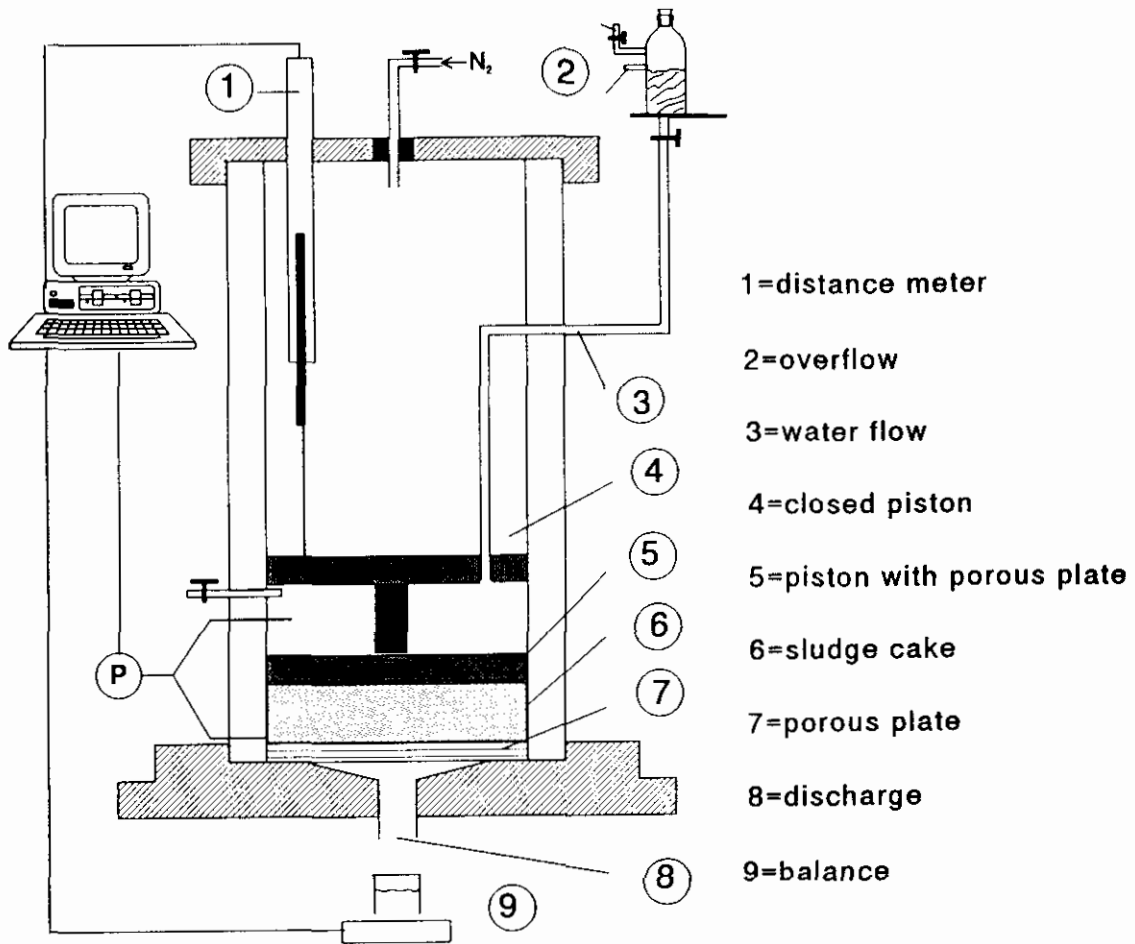
Een methode die op de hierboven beschreven wijze werkt is de 'compressie-permeabiliteitscel', afgekort cp-cel. De cp-cel is door de jaren heen veel gebruikt [25], [26], [27], [28], [29]. De cp-cel waarmee gemeten is staat weergegeven in figuur 3. Een schematische weergave van de opstelling staat gegeven in figuur 4.



Figuur 3. Cp-cel waarmee gemeten is

Met de cp-cel kunnen verschillende soorten experimenten uitgevoerd worden. Ten eerste kan de koekdikte als functie van de tijd gemeten worden. Daarbij wordt een bepaalde constante gasdruk aangelegd, die druk uitoefent op de zuiger. De zuiger is star verbonden met een andere zuiger die zich op een bepaalde afstand onder de eerste zuiger bevindt. De onderste zuiger bestaat uit een poreus plaatje, de bovenste uit een dichte plaat. Een verplaatsingsmeter is verbonden aan de bovenste zuiger. Op deze manier kan de verplaatsing van de onderste zuiger en dus de koekdikte als functie van de tijd worden gemeten. De wandfrictie tussen

wand en zuiger werd zo klein gemaakt, dat deze kon worden verwaarloosd, door gebruik te maken van geschikt materiaal en de juiste bewerkingsmethoden van dit materiaal. De metingen werden geregistreerd met behulp van de programmeertaal ASYST (programmaam: massa3.asy).



Figuur 4. Schematische voorstelling van de cp-cel

De eindporositeit van de ontstane koek kan worden gemeten door het drogestofgehalte van het slib vooraf te bepalen en na de consolidatie het gewicht van de natte, als well de, in een droogstoof (105°C) gedroogde, droge koek te meten.

De eindporositeit volgt dan, als wordt aangenomen dat er sprake is van maximale krimp bij het drogen van de koek, uit:

$$m = 1 + \frac{\rho}{\rho_s} * \frac{\epsilon}{(1-\epsilon)} \quad (46)$$

met

| | | |
|----------|--|----------------------|
| m | = de verhouding totale massa natte koek tegen droge koek | {-} |
| ρ | = dichtheid van filtraat (water: 1000) | [kg/m ³] |
| ρ_s | = dichtheid van de droge stof (slib: 1270) | [kg/m ³] |

Door te drogen in de droogstoof wordt ook het intracellair water in de cellen van de koek meegenomen. Hiervoor moet worden gecorrigeerd. De porositeit is bij een drogestofgehalte tussen 65-70 gew% gelijk aan 0.

Om de eindpermeabiliteit te kunnen bepalen wordt gebruik gemaakt van een drukverschilmeter. Gemeten werd de hydraulische druk net boven het filtermedium en de druk boven de zuiger. De permeabiliteit van het bed werd dan gemeten door water door de koek te laten lopen en zowel de stromingssnelheid van vloeistof als de drukval over de koek te meten. Met behulp van de wet van Darcy kan dan, als de stromingssnelheid en de drukval constant zijn, de permeabiliteit worden uitgerekend volgens:

$$K = \frac{q\mu L}{\Delta P_i} \quad (47)$$

De metingen werden wederom geregistreerd met behulp van de programmeertaal ASYST, maar met een vernieuwd programma (programmanaam: massa4.asy).

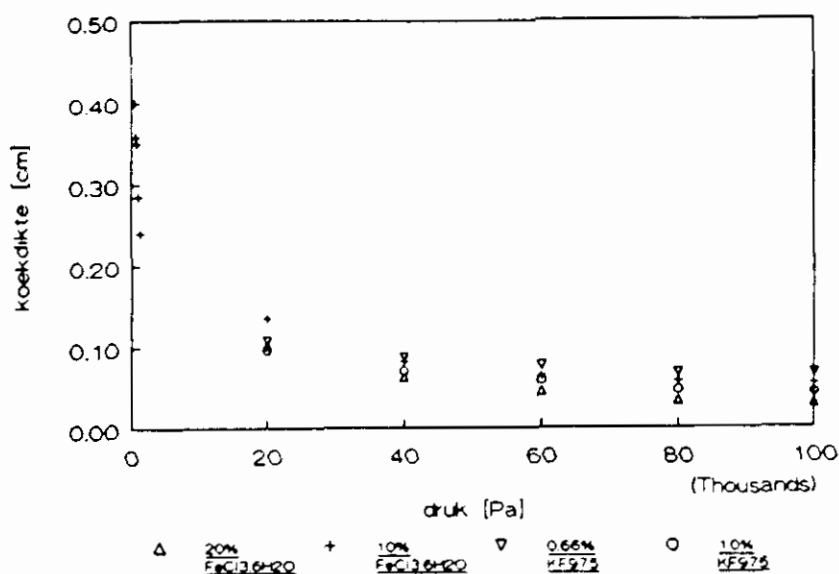
Om een constante drukval te bereiken moet het vloeistofniveau in het voorraadvat zich op een constante hoogte bevinden. Is dit niet het geval dan zal, door daling van dit vloeistofniveau, de hydraulische druk veranderen. Dit omdat door de aanwezigheid van weerstanden, zoals de zuigers en de filterkoek, de gemeten druk op de twee plaatsen niet in dezelfde mate zullen afnemen. Hiervoor werd het voorraadvat voorzien van een overloop.

Het voorraadvat wordt op een zekere hoogte geplaatst zodat geldt dat $P_1 < P_2$. Op deze wijze is de invloed van P_2 beter te zien.

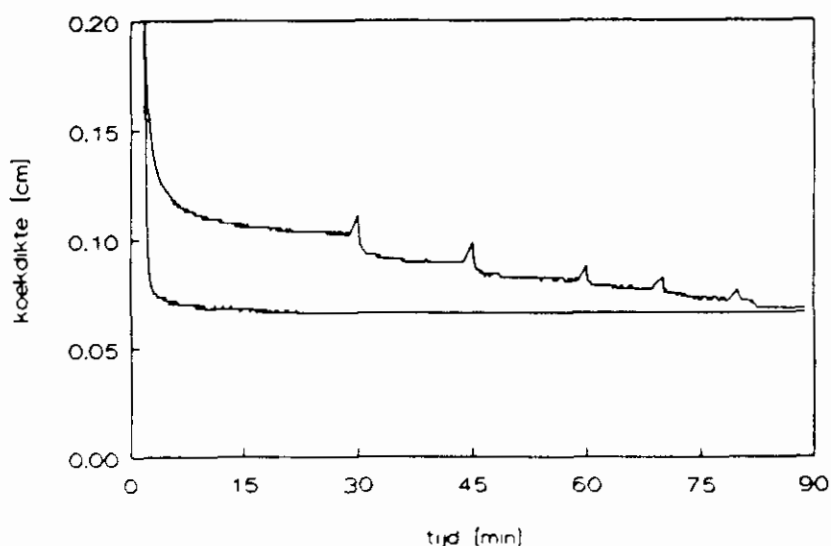
4 RESULTATEN EN DISCUSSIE

4.1 Koekdikte

In figuur 5 is de eindkoekdikte als functie van de druk uitgezet voor cp-cel-experimenten, maar nu voor verschillende concentraties van $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en KF975. Slib met 0.66% KF975 geeft een dikkere eindkoek dan met 1,0% KF975. Slib met enerzijds $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en anderzijds KF975 zijn niet rechtstreeks te vergelijken. De filterkoeken zijn geheel anders van structuur en opbouw.



Figuur 5. Koekdikte tegen de druk bij verschillende hoeveelheden en soort flocculanten (100 ml slib, 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (bij FeCl_3))

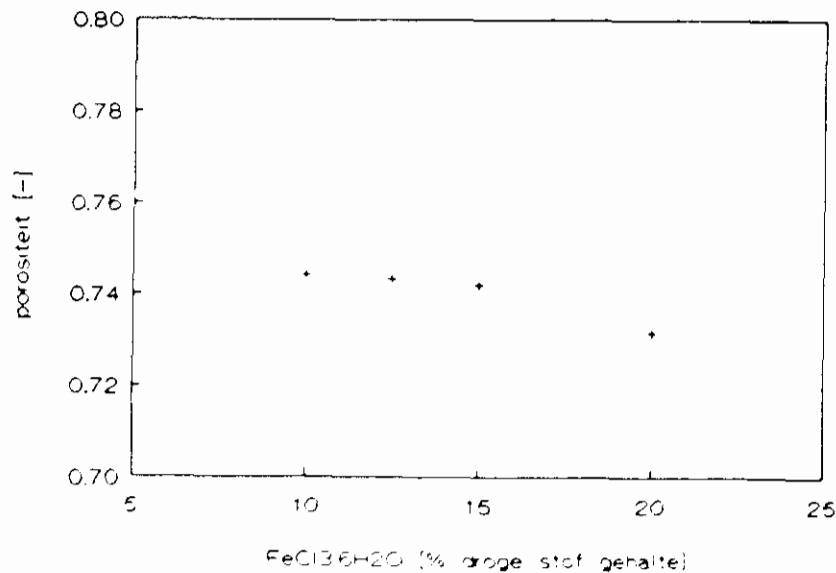


Figuur 6. Koekdikte tegen de tijd bij opleggen druk in één meerstapsfunctie

Wordt de compressiedruk in één keer op een bepaalde waarde gesteld of wordt deze druk in een bepaald aantal stappen bereikt, dan geeft dit geen verschil (zie figuur 6). Dit verschijnsel wordt ook geconstateerd door Murase [30], zijn koekfiltratie-karakteristieken verkregen door 'step-up' drukfiltratie komen zeer dicht overeen met die van een constante drukfiltratie bij dezelfde opgelegde druk.

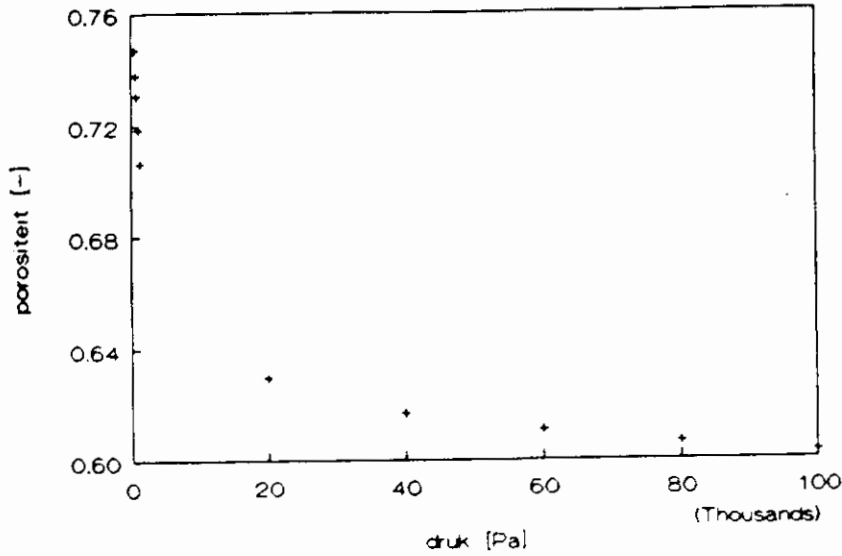
4.2 Porositeit

De eindporositeit is nu dus, evenals de eindkoekdikte, afhankelijk van de opgelegde druk en de concentratie $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Toename van de hoeveelheid $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, wat een afname van de eindkoekdikte tot gevolg heeft, geeft dus een lagere eindporositeit (zie figuur 7), waardoor een stevigere koek ontstaat. Ditzelfde geldt bij toename van de opgelegde druk (zie figuur 8). Worden druk en flocculant gecombineerd dan geeft dit figuur 9, die natuurlijk veel overeenkomsten vertoont met figuur 5).

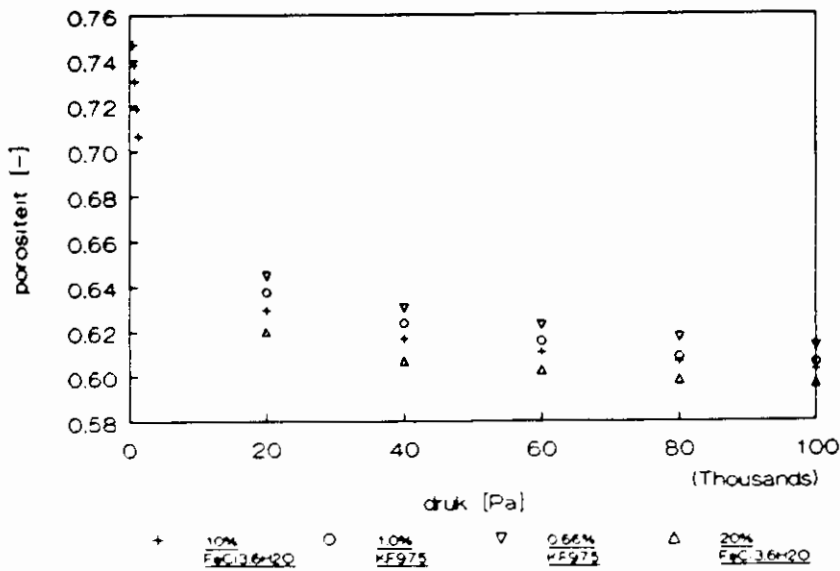


Figuur 7. Porositeit tegen de concentratie $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (200 ml slib, 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $P = 766,64 \text{ Pa}$)

De in hoofdstuk 2 genoemde relaties tussen de eindporositeit en de opgelegde mechanische druk werden toegepast op de gemeten waarden. Alle relaties kunnen tot lineaire vergelijkingen worden omgerekend, waaraan de data konden worden gefit. In tabel 1 staan voor alle fits de waarden voor de correlatie-coëfficiënten R_{cal} gegeven, die een maat zijn voor de juistheid van de fit. Fits met een waarde $R_{\text{cal}} \geq 0,999$ worden als goede fit beschouwd.



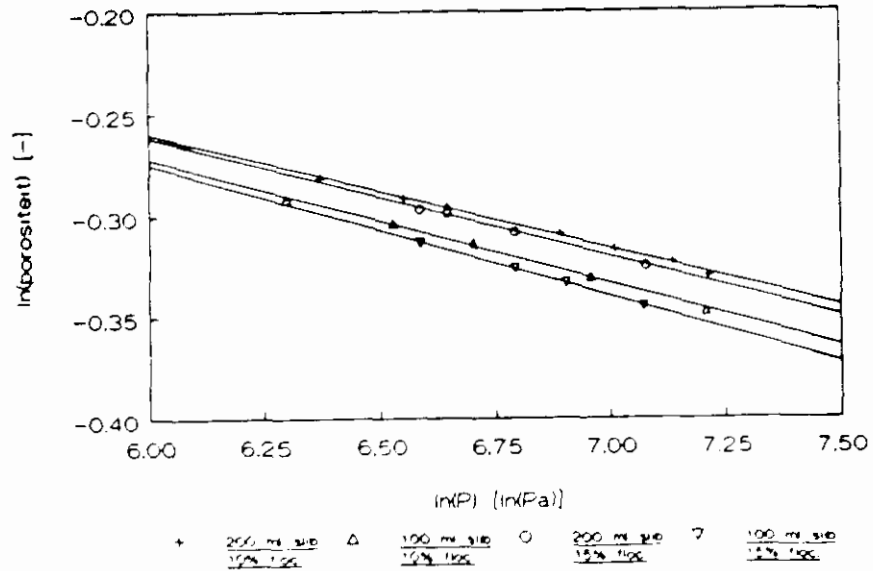
Figuur 8. Porositeit tegen de druk (100 ml slib, 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 10% $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)



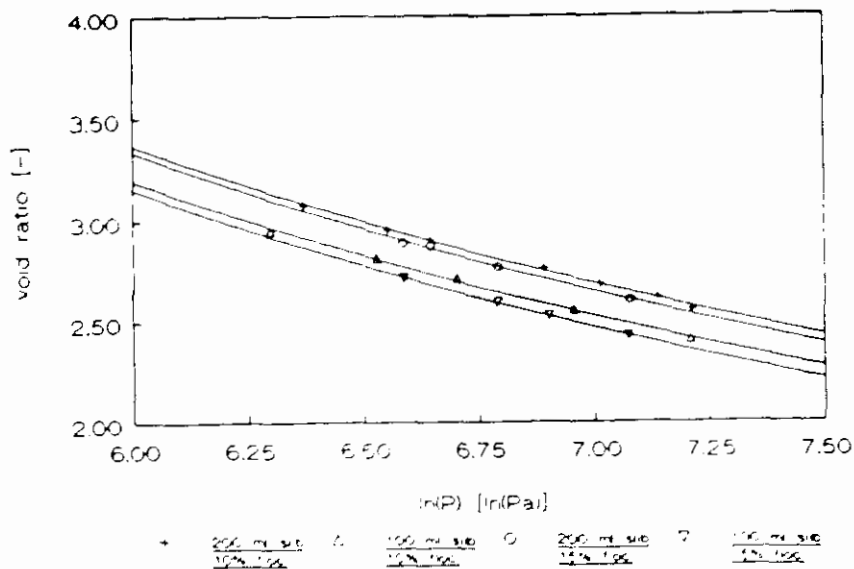
Figuur 9. Porositeit tegen de druk bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (bij $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$))

De bij lage druk (enige tientallen tot duizenden Pa) experimentele waarden konden alleen met de niet-gemodificeerde relatie van Shirato-Tiller (vergelijking (4)) worden gefit (zie figuur 10). De andere relaties, waaronder die van Terzaghi (vergelijking (13)) (zie figuur 11), konden niet worden gefit. Het bleek dat de waarden verkregen bij deze lage drukken niet te gebruiken waren voor het modelleren van drukfiltratie, omdat de hieruit bepaalde ϵ_0 -waarden ver boven de 1 uitkwamen en dit is fysisch onmogelijk.

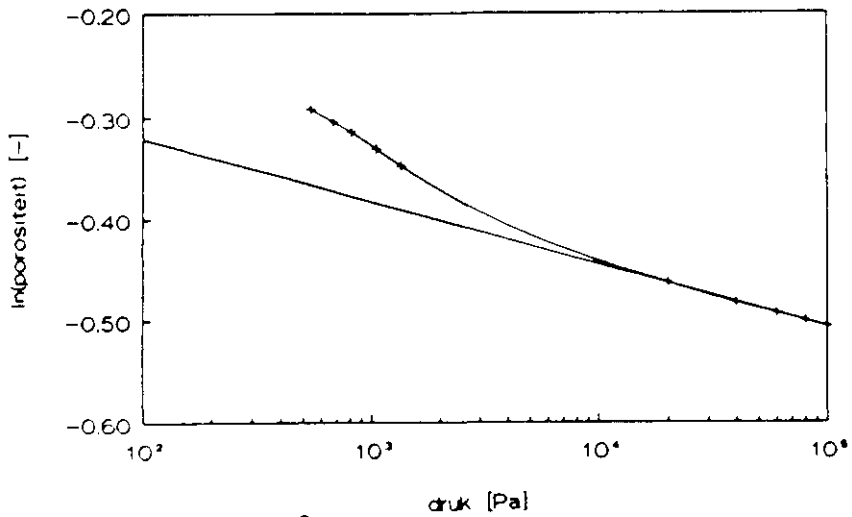
Er werden ook bij hoge drukken, tot 1 bar, metingen uitgevoerd. Werden de meetwaarden nu weer aan de, in de theorie genoemde modellen, gefit, dan bleek duidelijk dat er bij lage drukken (enige tientallen Pa) een afwijking plaatsvond. In één figuur geeft dat het beeld als weergegeven in figuur 12, waar de gemeten waarden gefit zijn aan de relatie van Shirato-Tiller. Ook Grace [31] en Tiller [32] verkregen deze afwijking bij lage drukken (zie figuur 13).



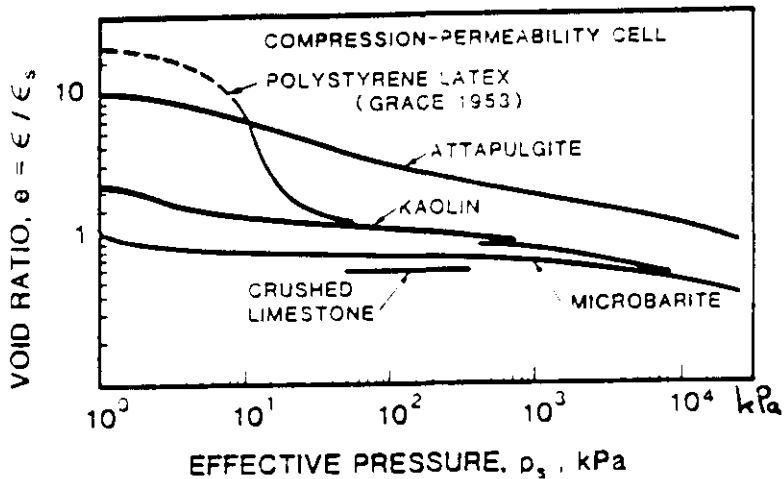
Figuur 10. Porositeit tegen de druk volgens Shirato-Tiller bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (bij $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$))



Figuur 11. Porositeit tegen de druk volgens Terzaghi bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (bij $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$))



Figuur 12. Porositeit tegen de druk volgens Shirato-Tiller (100 ml slib, 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 10% $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

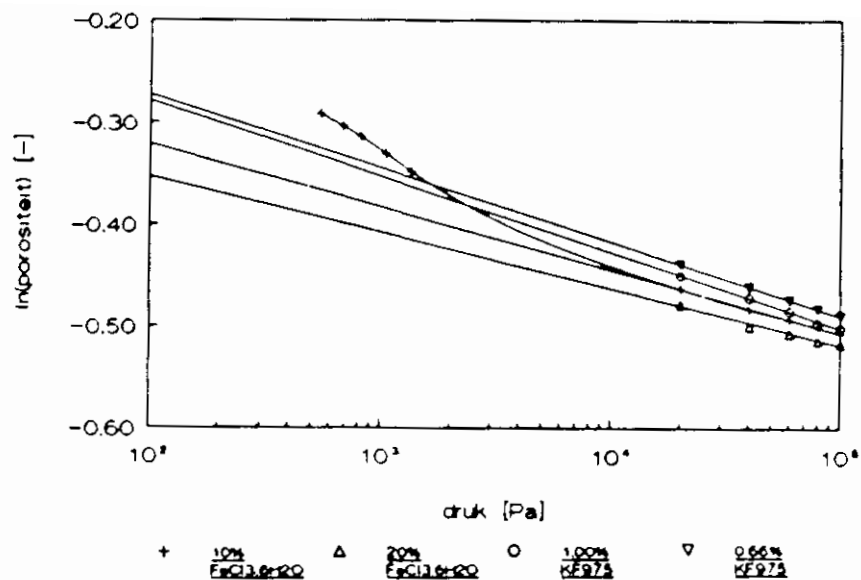


Figuur 13. Afwijkend gedrag van porositeit tegen de druk bij lage drukken volgens Tiller [31][32]

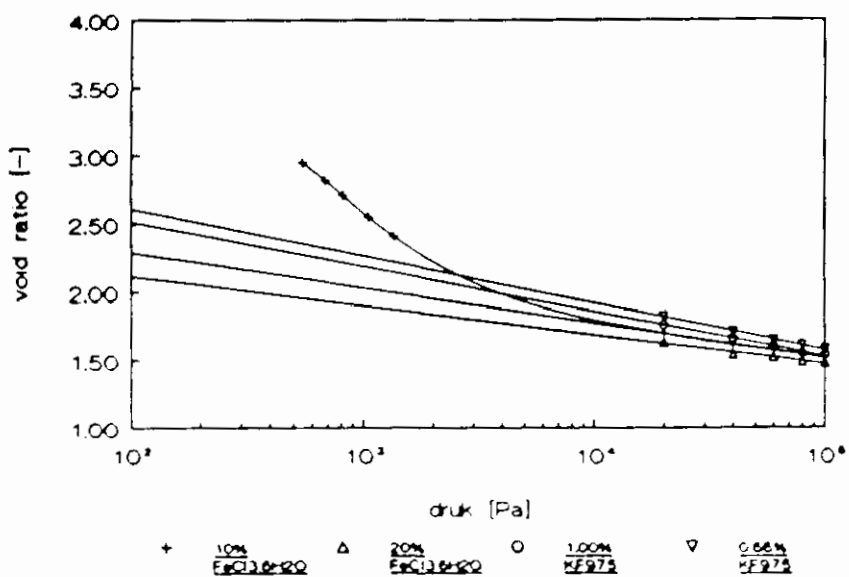
De relaties van Shirato-Tiller en Terzaghi bleken goed te fitten aan de data bij hoge drukken gemeten (zie figuren 14 en 15). De gemodificeerde relatie van Shirato-Tiller (3) blijkt minder goed te fitten (zie figuur 16). Wordt deze relatie als volgt uitgezet in een figuur:

$$\ln\left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right) = \frac{\ln \epsilon_0}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \ln \epsilon \quad (48)$$

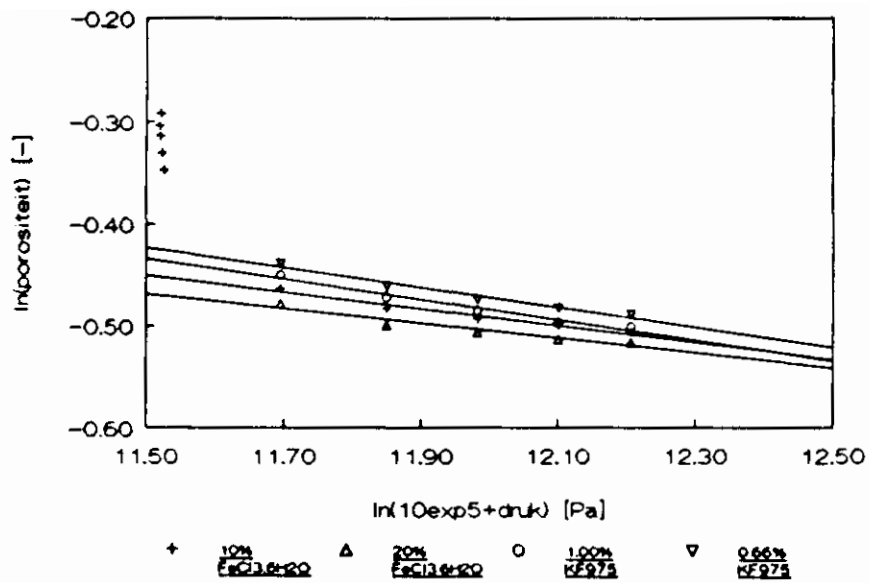
dan blijkt dat P_a alleen invloed heeft op de ϵ_0 -waarde (zie figuur 17). De waarde van λ (in de helling in figuur 16 blijft dezelfde). De relaties van De Smedt (15), Kerkhof (14) en Kravtchenko (16) blijken ook alle minder goed te fitten (zie figuren 18, 19 en 20).



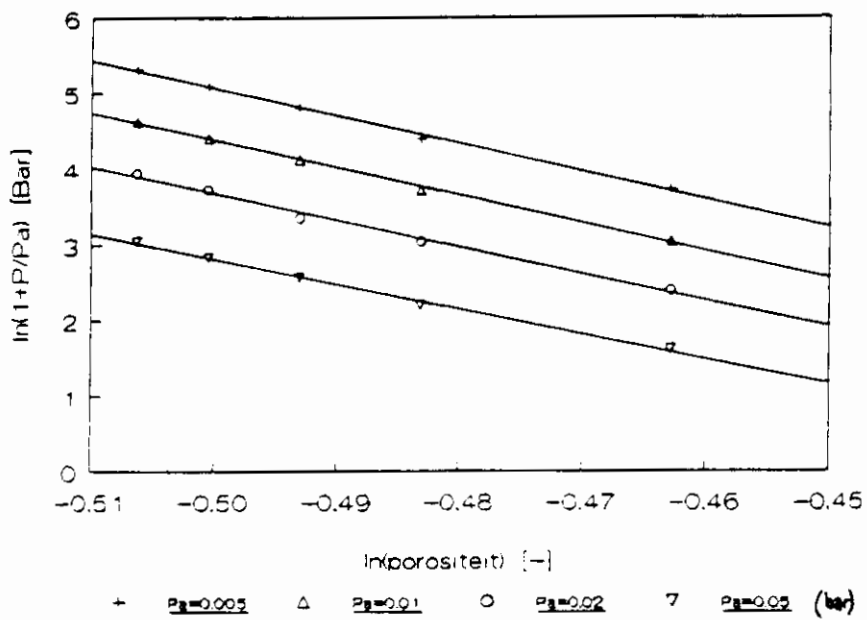
Figuur 14. Porositeit tegen de druk volgens Shirato-Tiller bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% Ca(OH)₂ (bij FeCl₃·6H₂O))



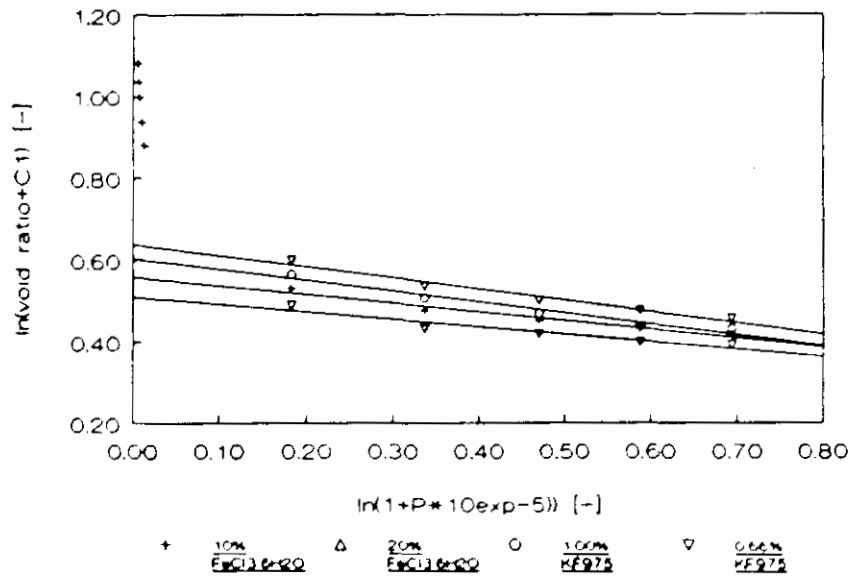
Figuur 15. Porositeit tegen de druk volgens Terzaghi bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% Ca(OH)₂ (bij FeCl₃·6H₂O))



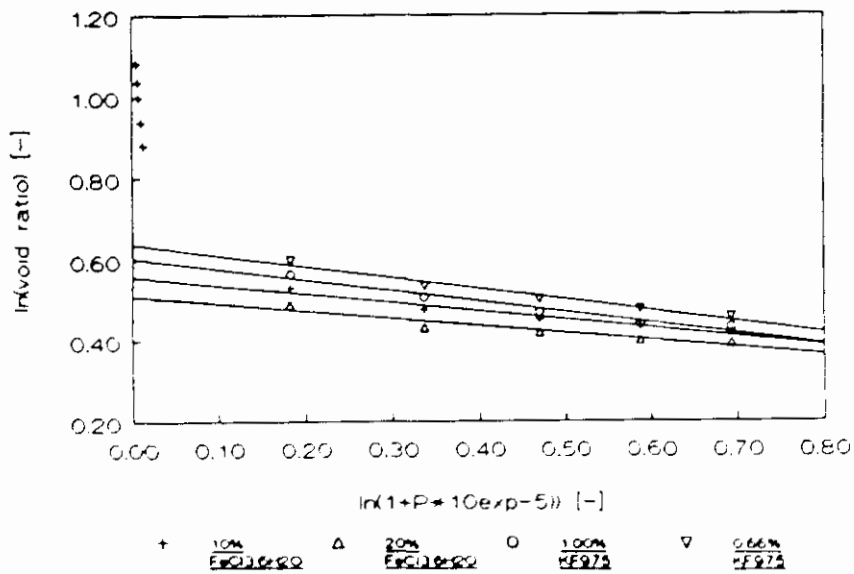
Figuur 16. Porositeit tegen de druk volgens gemodificeerde Shirato-Tiller bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% $Ca(OH)_2$ (bij $FeCl_3 \cdot 6H_2O$))



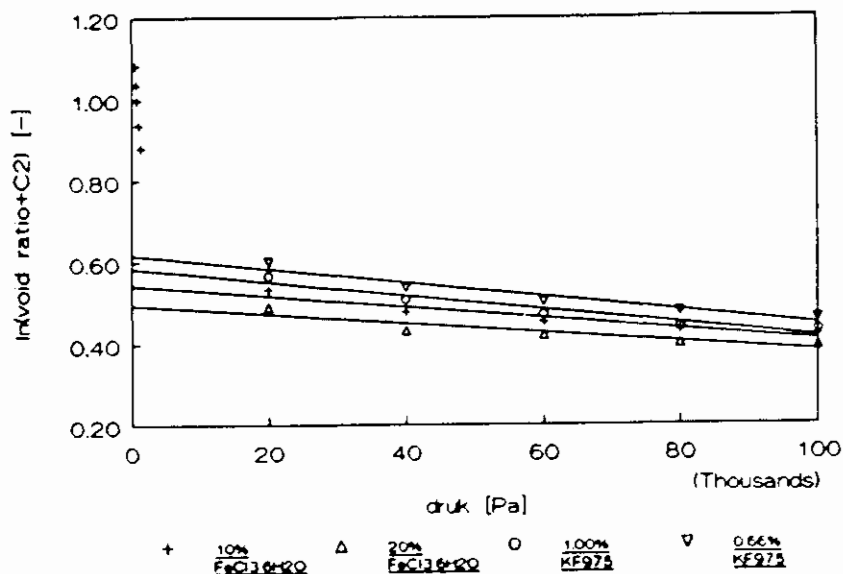
Figuur 17. Invloed van P_a op de constanten in de gemodificeerde vergelijking van Shirato-Tiller bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% $Ca(OH)_2$ (bij $FeCl_3 \cdot 6H_2O$))



Figuur 18. Porositeit tegen de druk volgens De Smedt bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% Ca(OH)₂ (bij FeCl₃·6H₂O))



Figuur 19. Porositeit tegen de druk volgens Kerkhof bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% Ca(OH)₂ (bij FeCl₃·6H₂O))



Figuur 20. Porositeit tegen de druk volgens Kravtchenko bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% Ca(OH)₂ (bij FeCl₃·6H₂O))

Naast de constanten uit de relaties van Shirato-Tiller en Terzaghi, werden ook de constanten uit de relatie van Kerkhof bepaald. De constanten J en δ van het model van Shirato-Tiller konden pas berekend worden nadat de relatie tussen de permeabiliteit en de opgelegde mechanische druk bepaald was (zie de volgende paragraaf).

De waarden voor de constanten, voor metingen met verschillende hoeveelheden en soorten flocculant, staan vermeld in tabel 1. In tabel 2 staan voor alle fits de waarden voor de correlatie-coëfficiënten R_{val} gegeven, die een maat zijn voor de juistheid van de fit. Het model van Kerkhof wordt, ondanks de minder goede fit, toch verder bekeken ter illustratie.

De ϵ_0 -waarde van monster (2) komt bij het model van Kerkhof uit op een waarde groter dan één. Dit heeft geen fysische betekenis. Bij verdergaande berekeningen werd daarom voor de waarde $E_0=1,1027$ de waarde $E_0=1$ aangenomen.

Het slibmonster (1) is meer comprimeerbaar en heeft hogere waarden voor de constanten en is dus een slapper materiaal. Slibmonster (2) geeft grotere en stevigere vlokken en is minder afhankelijk van de druk als blijkt uit de helling van de plot van de porositeit tegen de druk (λ). Bij vergelijking van de waarden van de slibmonsters (3) en (4) blijkt dat (4) een steviger materiaal moet zijn dan (3), omdat de waarden van de constanten kleiner zijn. Dit klopt inderdaad, want voor het polyelektrolyt KF975 geldt dat er zich rond 0,66% een optimum

flocculatieconcentratie bevindt. Bij hogere concentraties ontstaat er een verzadiging en worden de vlokken gerestabiliseerd.

| | 10% FeCl ₃ ·6H ₂ O (1) | 20% FeCl ₃ ·6H ₂ O (2) | 1% KF975 (3) | 0,66% KF975 (4) |
|-----------------------|---|---|-----------------|--------------------|
| Shirato-Tiller | | | | |
| ϵ_0 | 0,8209 | 0,7844 | 0,8788 | 0,8806 |
| B | 0,2420 | 0,2141 | 0,2094 | 0,2638 |
| $a \cdot 10^{-8}$ | 8,2731 | 13,095 | 2,1638 | 5,6248 |
| $J \cdot 10^9$ | 4,9948 | 3,5667 | 22,070 | 6,7393 |
| λ | 0,0619 | 0,0551 | 0,0746 | 0,0725 |
| β | 0,0994 | 0,1225 | 0,1231 | 0,0855 |
| n | 0,8324 | 0,7907 | 1,1400 | 1,0380 |
| δ | 0,9318 | 0,9132 | 1,2631 | 1,1235 |
| Terzaghi | | | | |
| C1 | -0,2573 | -0,2132 | -0,3273 | -0,3441 |
| C2 | 2,8016 | 2,5375 | 3,1657 | 3,2971 |
| Kerkhof | | | | |
| e_0 | 0,9603 | 1,1027 | 0,8154 | 0,8464 |
| γ_i | 0,1091 | 0,0898 | 0,1471 | 0,1482 |

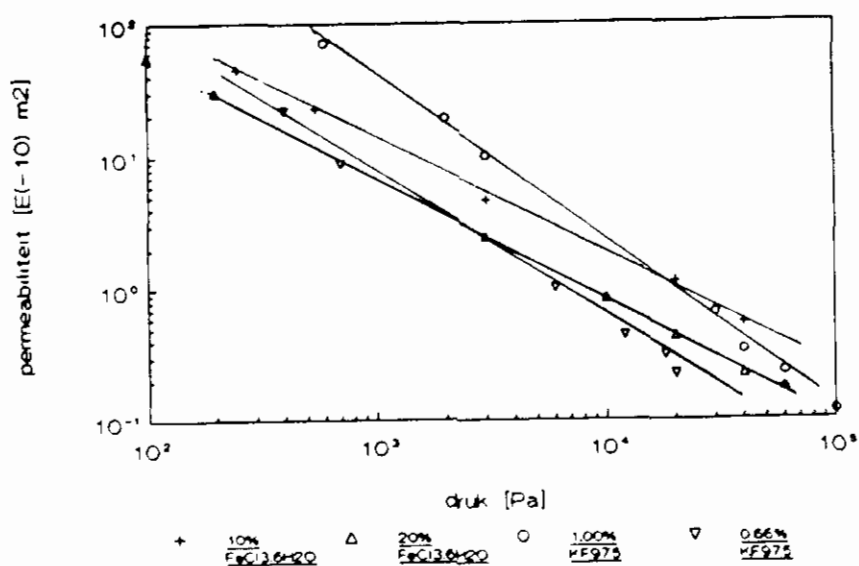
Tabel 1. Constanten uit de relaties van Shirato Tiller, Terzaghi en Kerkhof voor metingen met verschillende hoeveelheden en soorten flocculant

| Figuur | 10% FeCl ₃ ·6H ₂ O (1) | 20% FeCl ₃ ·6H ₂ O (2) | 1% KF975 (3) | 0,66% KF975 (4) |
|--------|---|---|-----------------|--------------------|
| 11 | 0,9994 | 0,9999 | 0,9993 | 0,9996 |
| 12 | 0,9883 | 0,9886 | 0,9883 | 0,9866 |
| 15 | 0,9992 | 0,9995 | 0,9999 | 0,9993 |
| 16 | 0,9997 | 0,9996 | 0,9994 | 0,9993 |
| 17 | 0,9814 | 0,9857 | 0,9853 | 0,9610 |
| 19 | 0,9762 | 0,9804 | 0,9854 | 0,9540 |
| 20 | 0,9762 | 0,9804 | 0,9854 | 0,9540 |
| 21 | 0,9580 | 0,9633 | 0,9702 | 0,9315 |

Tabel 2. R_{m} -waarden voor de fits

4.3 Permeabiliteit

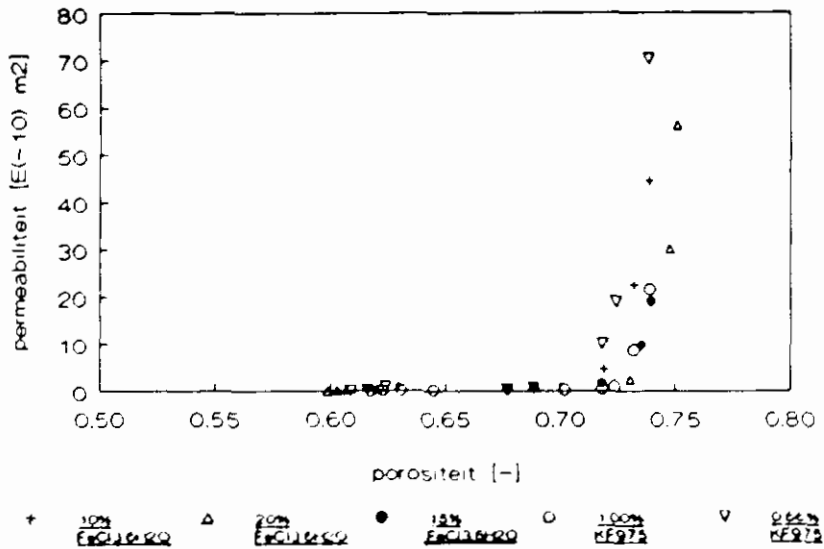
Ook de permeabiliteit van het slib werd, in stationaire toestand, bepaald bij slibmonsters met verschillende hoeveelheden en soorten slib. In figuur 21 zijn deze waarden voor de permeabiliteit uitgezet als functie van de opgelegde druk. Deze meetwaarden werden gefit aan het model van Shirato-Tiller (vergelijking (7)), zodat alle constanten van het model van Shirato-Tiller konden worden berekend.



Figuur 21. Permeabiliteit tegen de druk volgens Shirato-Tiller bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% Ca(OH)₂ (bij FeCl₃·6H₂O))

In figuur 22 is de permeabiliteit van verschillende slibmonsters uitgezet als functie van de porositeit. De permeabiliteitswaarden kleiner dan $1 \cdot 10^{10} \text{ m}^2$ werden berekend bij hoge opgelegde mechanische drukken (0,1 tot 1 bar), de hogere waarden van de permeabiliteit, groter dan $1 \cdot 10^{10} \text{ m}^2$, corresponderen met zeer lage opgelegde mechanische drukken (enkele tientallen Pa).

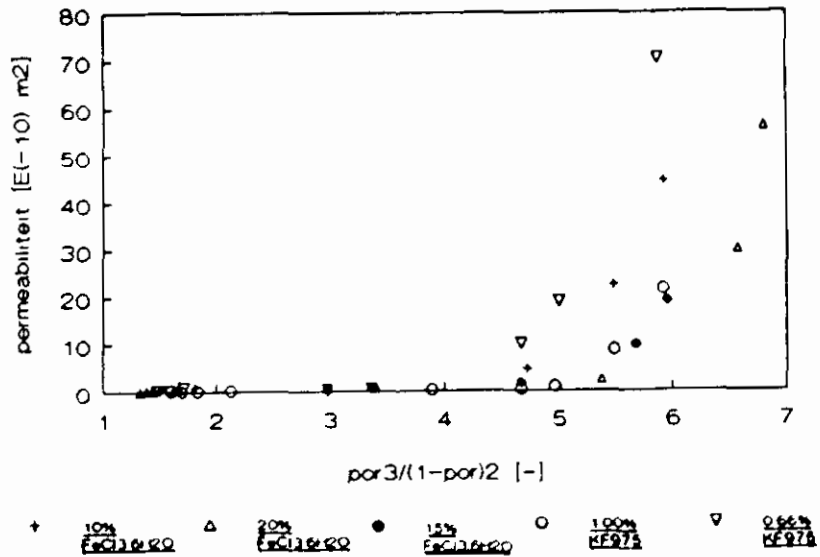
De gemeten relatie tussen de permeabiliteit en de porositeit werd nu onderworpen aan de modellen beschreven in de theorie.



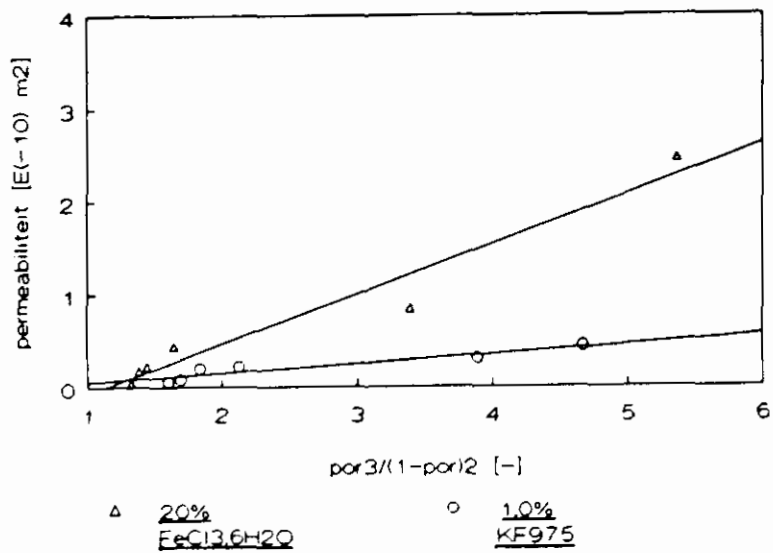
Figuur 22. Permeabiliteit tegen de porositeit bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (bij $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$))

Uit figuur 23 blijkt dat de Kozeny-Carman-vergelijking (20) de data niet fit. Wordt K uitgezet tegen $\epsilon^3/(1-\epsilon)^2$ dan zou dit namelijk een rechte moeten geven. Alleen bij zeer lage waarden van de porositeit zou de Kozeny-Carman-vergelijking mogelijkterwijs kunnen gelden (zie figuur 24), er zijn echter vooralsnog te weinig datapunten om deze stelling hard te kunnen maken.

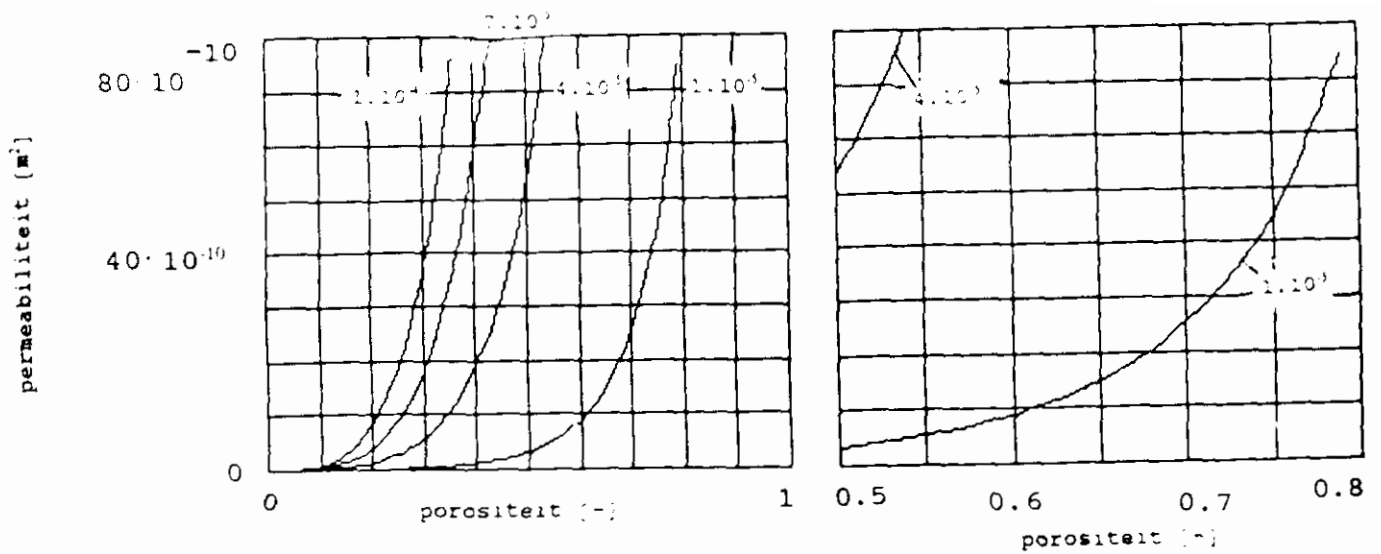
Wordt de Kozeny-Carman-vergelijking gemodelleerd en in een figuur uitgezet voor verschillende deeltjesdiameters, zoals gegeven in figuur 25 met dezelfde schalen van de assen als in figuur 22, dan blijkt dat de scherpe knik van de gemeten kromme niet wordt verkregen. Om een porositeit te bereiken van 0,75 moeten deeltjes genomen worden die te klein zijn om enigszins in het juiste meetgebied te komen, namelijk $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}$. De werkelijke gemiddelde vlokdiаметer is in de grootte-orde van 0,1 tot 0,5 mm ($1 \cdot 10^{-4}$ tot $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$).



Figuur 23. Permeabiliteit tegen de porositeit volgens Kozeny-Carman bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% $Ca(OH)_2$ (bij $FeCl_3 \cdot 6H_2O$))



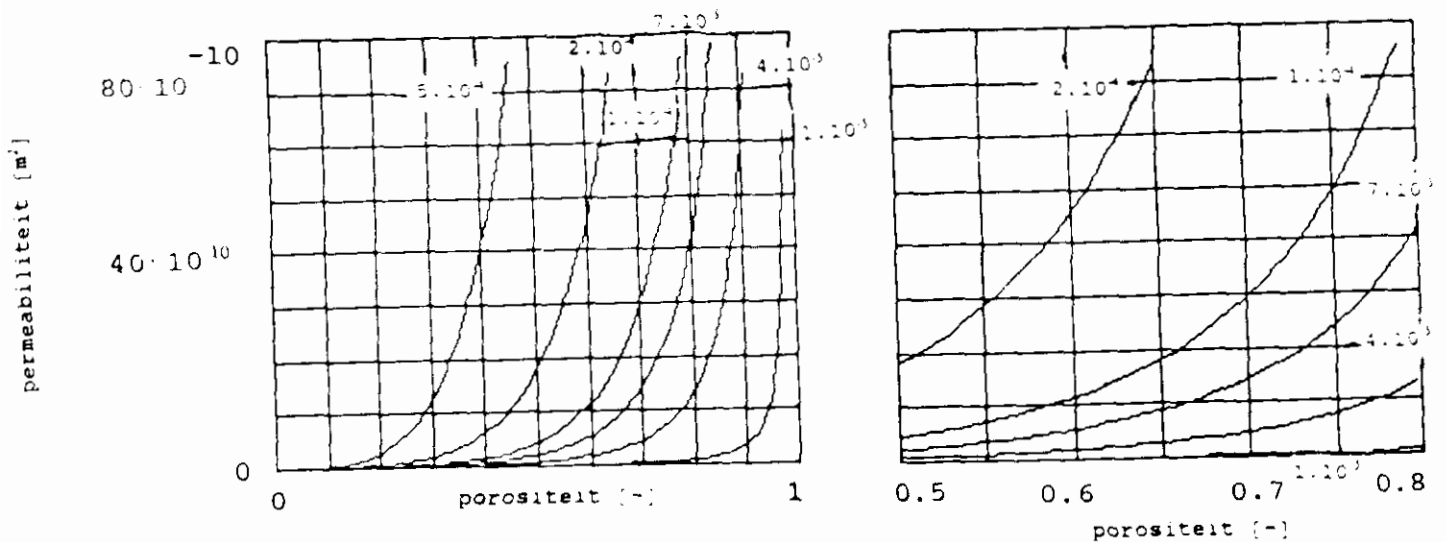
Figuur 24. Permeabiliteit tegen de porositeit bij hoge drukken volgens Kozeny-Carman bij verschillende hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% $Ca(OH)_2$ (bij $FeCl_3 \cdot 6H_2O$))



Figuur 25. Permeabiliteit tegen de porositeit volgens Kozeny-Carman gemodelleerd voor verschillende deeltjesdiameters

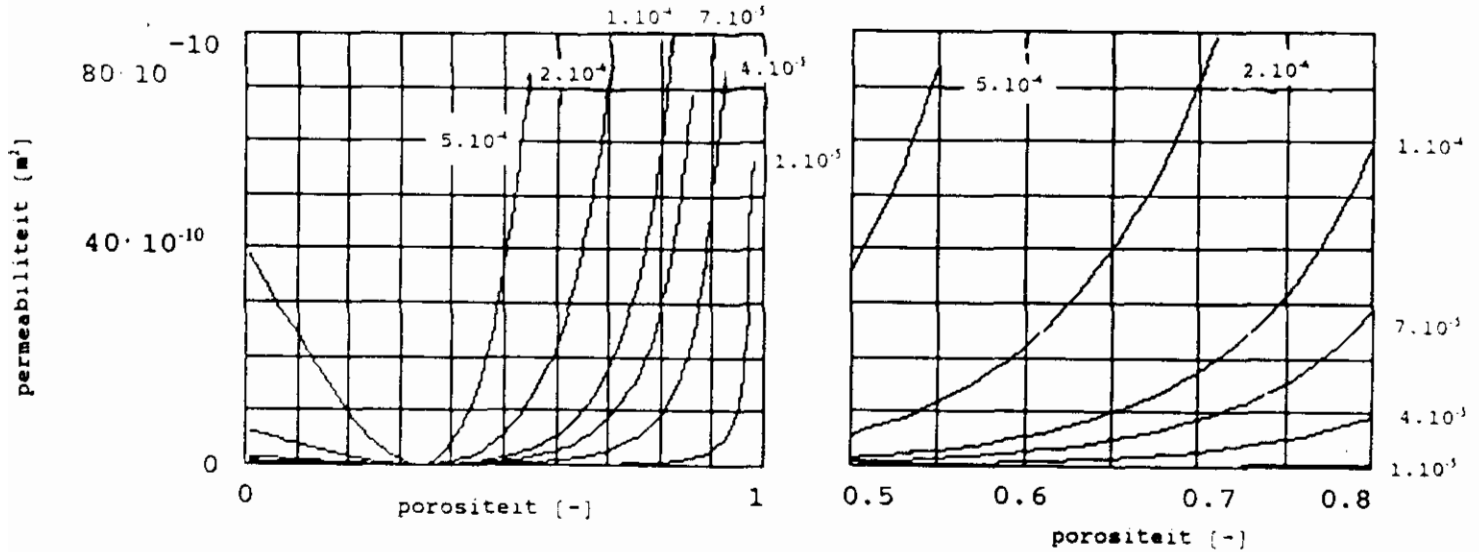
Ook het model van Happel (22), als gegeven in figuur 26, blijkt niet geheel te voldoen. De deeltjesstraal komt beter overeen, maar de scherpe knik in de kromme van figuur 22 is eveneens niet terug te vinden in het model van Happel. Over het hele porositeitsgebied gezien komt er wel een scherpere knik voor bij de kleinere deeltjes.

Ook als van de gemeten waarden van de permeabiliteit tegen de porositeit alleen de waarden worden genomen bij hoge drukken, dus bij lage porositeiten, dan komt het model niet overeen met het gemeten verband.



Figuur 26. Permeabiliteit tegen de porositeit volgens Happel gemodelleerd voor verschillende deeltjesstralen

Het model van Brinkman (23) levert een verband op dat grafisch veel lijkt op dat van Happel, met dus dezelfde gebreken (zie figuur 27). Wat fysisch onmogelijk is, is dat de permeabiliteit weer toeneemt voor waarden van de porositeit kleiner dan 1/3. Vooral voor grote deeltjes is dit duidelijk waar te nemen. Het model van Brinkman is dus alleen toepasbaar voor waarden van de porositeit groter dan 1/3.



Figuur 27. Permeabiliteit tegen de porositeit volgens Brinkman gemodelleerd voor verschillende deeltjesstralen

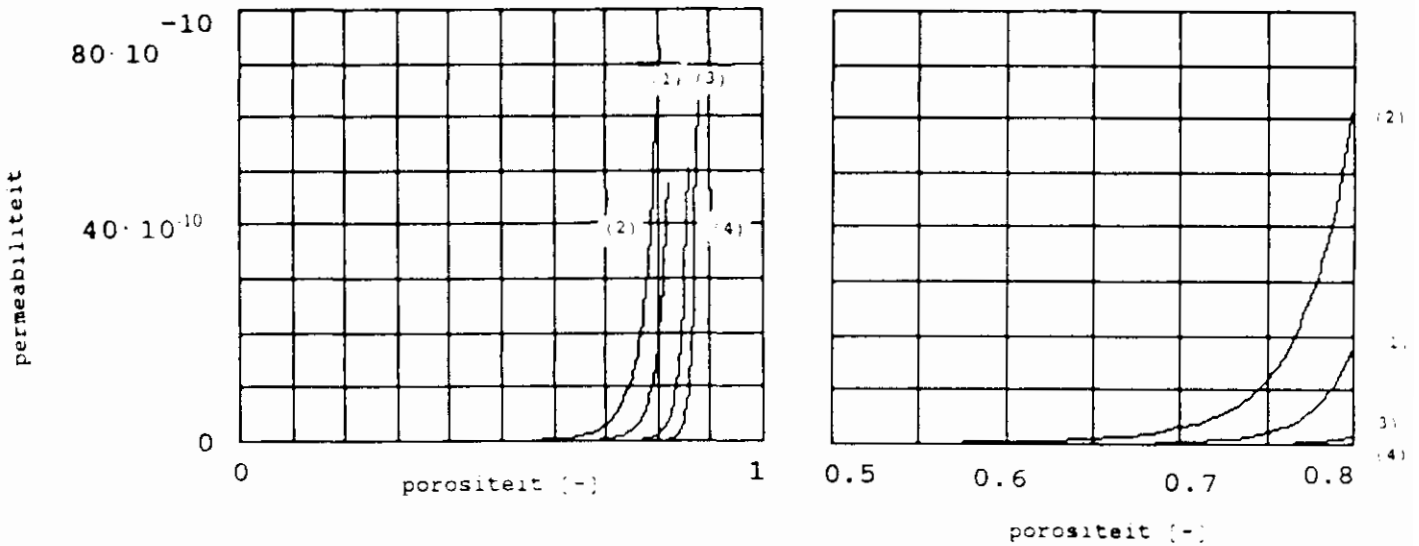
Vervolgens worden nu de modellen voor deformeerbare deeltjes bekeken.

Bij het verband tussen de permeabiliteit en de porositeit verkregen uit het model van Shirato-Tiller is de deeltjesstraal niet als variabele aanwezig. Worden in het gevonden verband (vergelijking (24)) de berekende waarden uit het model van Shirato-Tiller van K_0 , ϵ_0 , δ en β ingevuld, dan wordt een verband tussen de permeabiliteit en de porositeit verkregen als gegeven in figuur 28.

De waarde van de porositeit waar de knik zich bevindt komt, voor de met ijzerchloride geflocculeerde, monsters (1) en (2) redelijk goed overeen met figuur 22. Bij de, met KF975 geflocculeerde, monsters (3) en (4) ligt deze porositeit te hoog. Wordt voor de monster (1) en (2) het verband bekeken op dezelfde schaal als figuur 22, dan is toch weer te zien dat de scherpe knik niet teruggevonden wordt. Echter er werd uit figuur 12 geconcludeerd dat, overeenkomstig als gevonden door Tiller en anderen, de porositeit als functie van de compressiedruk bij lage drukken afwijkt van het gevonden lineaire profiel. Zodoende zijn de constanten, die bepaald zijn voor de lineaire fit, niet geldig bij lage drukken.

Er wordt nu bij lage drukken de meetwaarden gefit. Vervolgens worden de nu bepaalde constanten gebruikt om het permeabiliteitsprofiel bij lage drukken, dus hoge porositeiten, te

berekenen. Het bleek dat er nu wel een scherpe knik werd verkregen, doordat de constante β een factor 3 á 4 kleiner was geworden. Echter de uit de fit bij lage drukken bepaalde constante ϵ_0 heeft een veel te hoge waarde (zie paragraaf 4.2), zodat het permeabiliteitsprofiel in zijn geheel te veel naar rechts verschuift. Wordt wel de ϵ_0 bepaald bij hoge drukken gebruikt, dan ligt het profiel toch nog te ver naar rechts. Pas als een ϵ_0 -waarde van rond de 0,73 wordt gebruikt komen model en meetwaarden overeen. De discrepantie bij dit model ligt in het feit dat er twee verschillende methoden worden gebruikt om de porositeit te bepalen voor het porositeitsprofiel als functie van de compressiedruk, waaruit de constanten zijn bepaald, enerzijds en het permeabiliteitsprofiel als functie van de porositeit anderzijds.

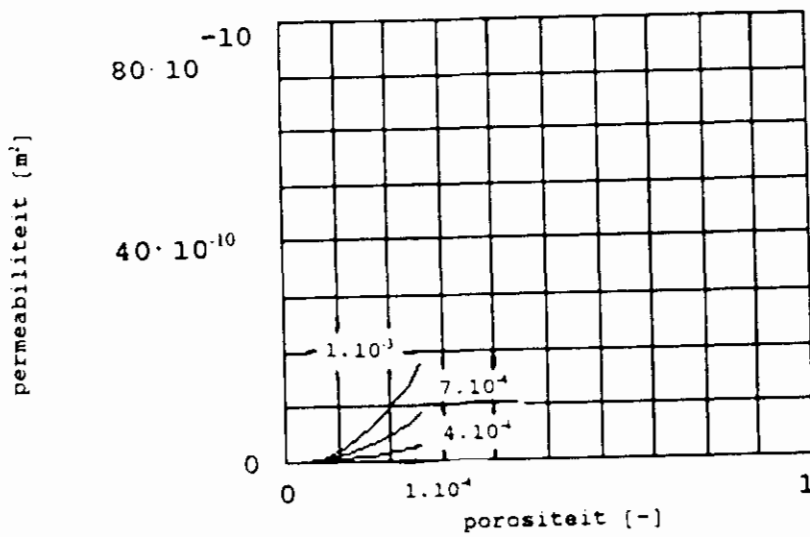


Figuur 28. Permeabiliteit tegen de porositeit volgens Shirato-Tiller gemodelleerd voor hoeveelheden en soorten flocculant (100 ml slib, 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (bij $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$))

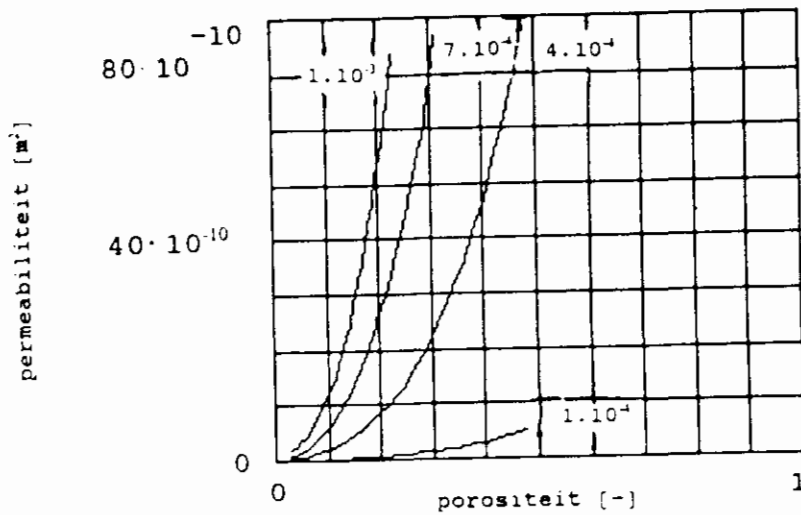
Voor ccp (vergelijking (31)) wordt voor verschillende deeltjesstralen een verband gevonden als is gegeven in figuur 29. Voor hcp blijft dit verband dezelfde. Voor hcc (vergelijking (36)) is dit verband nagenoeg gelijk en voor 'enkel kubisch' (vergelijking (42)) is dit verband gegeven in figuur 30. Voor alle bolstapelingen geldt dat de ϵ_0 -waarde veel te klein is. Wel kunnen de deeltjesstralen in vergelijking met de voorgaande modellen met een factor 10 worden vermenigvuldigd om in het juiste meetgebied voor de permeabiliteit te komen. Zodoende komt de deeltjesstraal redelijk overeen met de werkelijkheid. Echter de scherpe knik wordt wederom niet teruggevonden.

Tenslotte het model van kubusvormige blokken met cilindrische poriën (vergelijking (45)). Dit staat gegeven in figuur 31, waarin nu de variabele niet de straal van het deeltje is, maar de straal van de porie in de kubus. Ook hier geldt weer dat de scherpe knik niet wordt teruggevonden in het model. Echter nu is de variabele niet de deeltjesdiameter, maar de

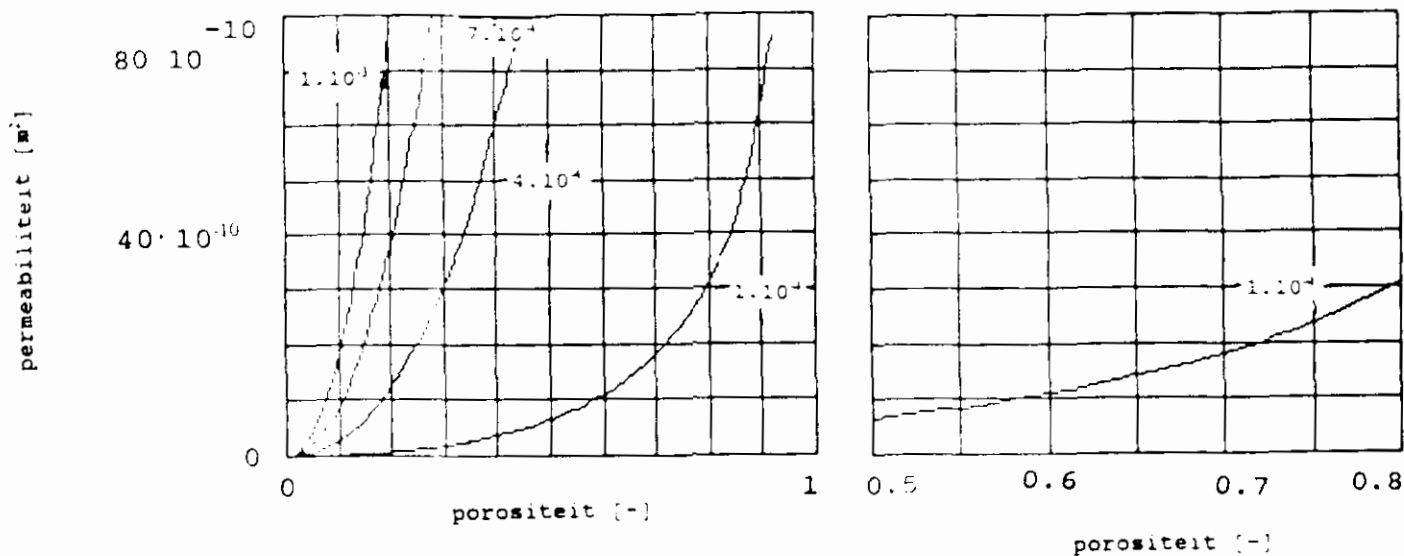
straal van de porie, zodat een waarde van de variabele, nu r_c , van $1 \cdot 10^{-4}$ m niet onaannemelijk is.



Figuur 29. Permeabiliteit tegen de porositeit volgens ccp gemodelleerd voor verschillende deeltjesstralen



Figuur 30. Permeabiliteit tegen de porositeit volgens 'echt kubisch' gemodelleerd voor verschillende deeltjesstralen



Figuur 31. Permeabiliteit tegen de porositeit volgens kubussen met cilindervormige poriën gemiddeld voor verschillende deeltjesstralen

Alle voorgaande modellen van bolstapelings van deformeerbare deeltjes bleken niet geheel te voldoen, maar bij filterkoekvorming is toch sprake van enige vorm van stapeling van deeltjes. Alle modellen geven een waarde voor de porositeit waar de knik begint die kleiner is dan de gemeten waarde van rond de 0,75.

5 CONCLUSIES

Bij lage drukken geeft het verband tussen de porositeit en de druk een afwijking te zien van lineair gedrag volgens de modellen van Shirato-Tiller en Terzaghi overeenkomstig het beeld gevonden door Tiller [32]. Bij hoge drukken zijn de data van de porositeit en druk goed te fitten aan de modellen van Shirato-Tiller en Terzaghi. De modellen van Kerkhof, De Smedt en Kravtchenko bleken alle minder goed te fitten.

Door toepassen van de modellen van Shirato-Tiller, Terzaghi en Kerkhof konden de in de modellen voorkomende constanten worden bepaald.

De permeabiliteit als functie van de eindporositeit voor de verschillende hoeveelheden en soorten flocculant bleek niet te fitten aan de verschillende modellen. De gevonden scherpe knik in het gemeten profiel wordt in geen van de modellen teruggevonden.

Data van de permeabiliteit gemeten bij hoge drukken voldoen mogelijkerwijze aan het model van Kozeny-Carman. Om een gemeten porositeit van 0,75 enigzins te bereiken moeten echter voor de stralen van de deeltjes in het model te kleine waarden worden ingevuld.

Bovenstaande nadelen treden ook op indien de modellen van Happel en Brinkman worden toegepast. Het model van Brinkman heeft tevens als nadeel dat voor waarden van de porositeit gelijk aan $1/3$ de permeabiliteit nul is en voor waarden kleiner dan $1/3$ de permeabiliteit weer groter wordt dan nul.

Door combinatie van de machtsrelaties van Shirato-Tiller wordt een verband gevonden tussen de permeabiliteit en de porositeit. Dit theoretische model bleek voor de met ijzerchloride geflocculeerde slibmonster porositeiten te berekenen die overeenkomen met de gemeten waarden. De met polyelektrolyt geflocculeerde slibmonsters leveren bij berekening een te hoge porositeit. De scherpe knik wordt eveneens niet teruggevonden. Ook als voor lage drukken, dus hoge porositeiten, het model wordt aangepast komen model en meetwaarden nog niet overeen. Wel wordt een scherpe knik verkregen, maar het profiel verschuift nu te ver naar rechts door een te hoge bepaalde ϵ_0 -waarde.

Voor alle modellen gebaseerd op bolstapelings geldt dat de beginporositeit veel te laag is. Wel kunnen de deeltjesstralen in de juiste orde van grootte gekozen worden om in het juiste meetgebied voor de permeabiliteit te komen.

Wat betreft de deeltjesstraal komt het model van kubusvormige blokken met cilindrische poriën nog beter overeen. De variabele is nu immers de straal van de porie. Echter de scherpe knik wordt wederom niet teruggevonden.

Bij filterkoekvorming is toch sprake van enige vorm van stapeling van deeltjes, hoewel de gemeten porositeit veel groter is dan de beginporositeiten bij de verschillende modellen van stapeling van deeltjes.

6 EXPRESSIE-EXPERIMENTEN (0 - 700 kPa)

Om de invloed van een aantal parameters op het expressiegedrag te bepalen, wordt bij het uitpersen van het slib gelet op de snelheid van het uitpersen en de bereikte voidratio na afloop van het experiment. Bij optimaal expressiegedrag is de snelheid van het uitpersen groot en is de bereikbare voidratio zo laag mogelijk. Na afloop van elk experiment werd de voidratio bepaald. Wanneer bij de experimenten een percentage flocculant wordt toegevoegd, wordt dit percentage berekend ten opzichte van de hoeveelheid droge stof in het slib.

6.1 Drainage- en expressie-experimenten

Ter vergelijking met de modelberekeningen zijn drainage- en expressie-experimenten uitgevoerd. Er zijn twee series experimenten gedaan met verschillende percentages FeCl_3 om te bepalen wat de invloed is van de flocculering op het materiaalgedrag. De verschillende percentages FeCl_3 waren in de series respectievelijk 5, 10, 15, 20, 25 gew% en 2.5, 5, 10, 15, 20 gew%. Het percentage $\text{Ca}(\text{OH})_2$ was in beide series 20 gew%. De experimenten zijn uitgevoerd met een aangelegde gasdruk van 2 bar.

6.2 Invloed van de druk op het expressiegedrag

Om de invloed van de druk op het expressiegedrag van slib te bepalen werden met twee flocculanten de volgende experimenten uitgevoerd. Er is bij beide flocculanten gebruik gemaakt van een redelijk optimale hoeveelheid flocculant. Voor FeCl_3 (10 gew%) in combinatie met 20 gew% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is deze hoeveelheid bepaald met de experimenten die zijn beschreven in paragraaf 3.2.4. Voor KF975 (1,5 gew%) is deze hoeveelheid bepaald door van Berlo; zie deel 6: Karakterisering van fysische eigenschappen. Vervolgens werd het slib met verschillende drukken uitgeperst tot de eindsituatie bereikt werd.

Verder zijn experimenten uitgevoerd waarbij 200 ml slib geflocculeerd met 15 gew% FeCl_3 en 25 gew% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gedurende 2 uur uitgeperst werd bij achtereenvolgens 1, 2, 3, 4 en 5 bar. Na 2 uur is de voidratio bepaald.

6.3 Invloed van de hoeveelheid flocculant op het expressiegedrag

Om de invloed van de hoeveelheid flocculant op de expressie te bepalen zijn experimenten gedaan met verschillende percentages FeCl_3 (25, 20, 15, 10 en 5 gew%) steeds in combinatie met 20 gew% $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Het uitpersen van de slibkoek vond plaats bij een aangelegde gasdruk van 5 bar. De experimenten zijn beëindigd toen er geen water meer uit de koek geperst kon worden. Na afloop van de persexperimenten is de voidratio bepaald.

6.4 Invloed van de koekdikte op het expressiegedrag

De invloed van de koekdikte op het expressiegedrag werd bepaald door respectievelijk 100, 150, 200, 250 en 300 ml slib uit te persen (300 ml is alleen gebruikt bij flocculering met

FeCl₃). De verschillende hoeveelheden slib werden steeds geflocculeerd met eenzelfde percentage FeCl₃ (15 gew%) en Ca(OH)₂ (20 gew%) of KF975 (1.5 gew%). Het uitpersen gebeurde tot er bij een aangelegde gasdruk van 5 bar geen water meer uit de koek geperst kon worden, dit duurde bij flocculering met FeCl₃ bij de dunne koeken (100 ml slib) en dikke koeken (300 ml) respectievelijk ongeveer 2 en 4 uur. Bij flocculering met KF975 duurde het respectievelijk ongeveer 4 en 16 uur. Na het experiment werd de voidratio bepaald.

6.5 Invloed van het initiële drogestofgehalte op het expressiegedrag

Om de invloed van het initiële drogestofgehalte op het expressiegedrag te bepalen is één slib gebruikt met verschillende beginconcentraties vaste stof. Hiertoe is het slib ingedikt en verdund, zodat de eigenschappen van het slib zoveel mogelijk gelijk bleven en alleen de beginconcentraties varieerden. De experimenten zijn uitgevoerd met 200 ml slib dat steeds geflocculeerd werd met 1,5 gew% KF975. Er zijn twee series experimenten gedaan met een oorspronkelijke droge stof concentratie van respectievelijk 2,85 en 2,70 gew%. In beide series experimenten zijn de slibkoeken uitgeperst met een gasdruk van 5 bar en de experimenten zijn beëindigd toen er geen water meer uit de koek geperst kon worden.

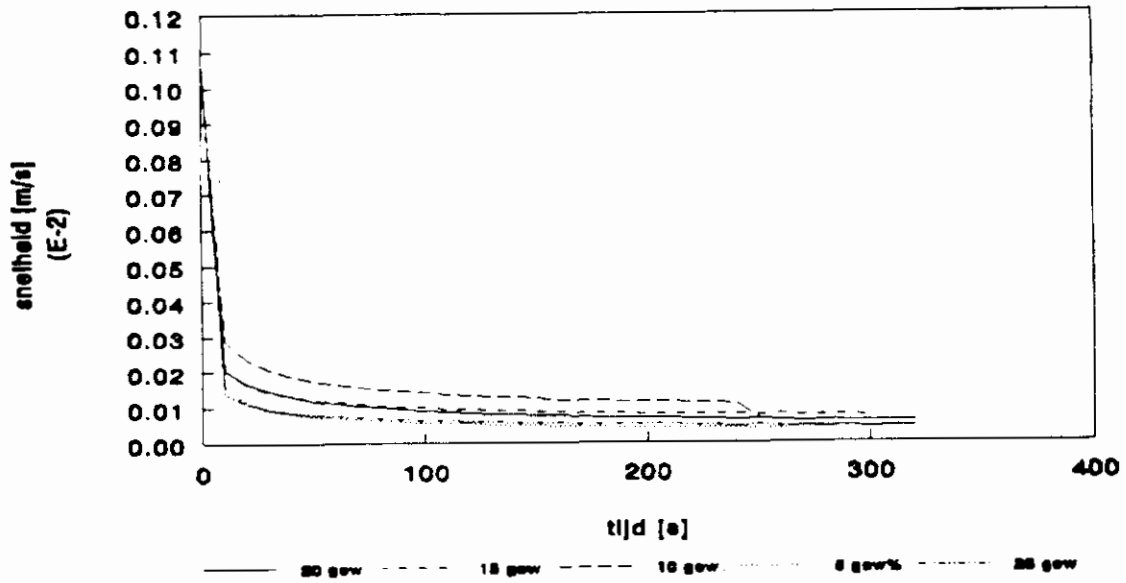
6.6 Drainage-experimenten

De resultaten van de eerste serie drainage-experimenten, die beschreven zijn in paragraaf 6.1, zijn weergegeven in figuur 32. In deze figuur zijn bij verschillende flocculanhoeveelheden de uitstroomsnelheden versus tijd uitgezet. Uit de grafiek blijkt dat de uitstroomsnelheid het hoogst is na flocculeren met 10 gew% FeCl₃. Toevoegen van meer of minder flocculant heeft tot gevolg dat de uitstroomsnelheid kleiner wordt.

6.7. Invloed van de druk op het expressiegedrag

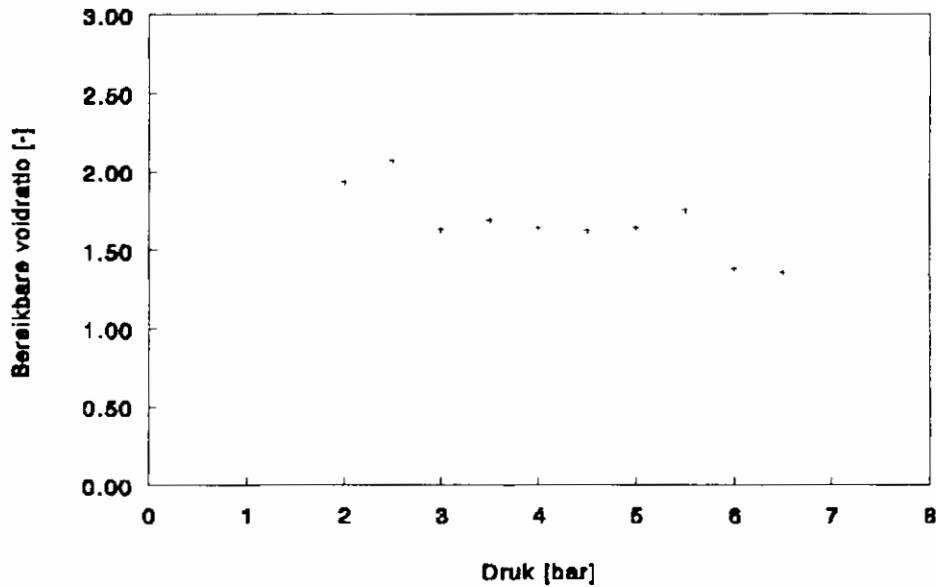
In figuur 34 en 35 zijn voor de twee verschillende flocculanten de resultaten van de experimenten uitgevoerd bij verschillende drukken weergegeven. In de figuren zijn de eindvoidratio's versus druk weergegeven. Uit de figuren blijkt dat een hogere druk een lagere voidratio levert. De winst bij drukken hoger dan 4 bar is echter relatief gering.

Drainage slib Mierlo Verschillende percentages $FeCl_3$



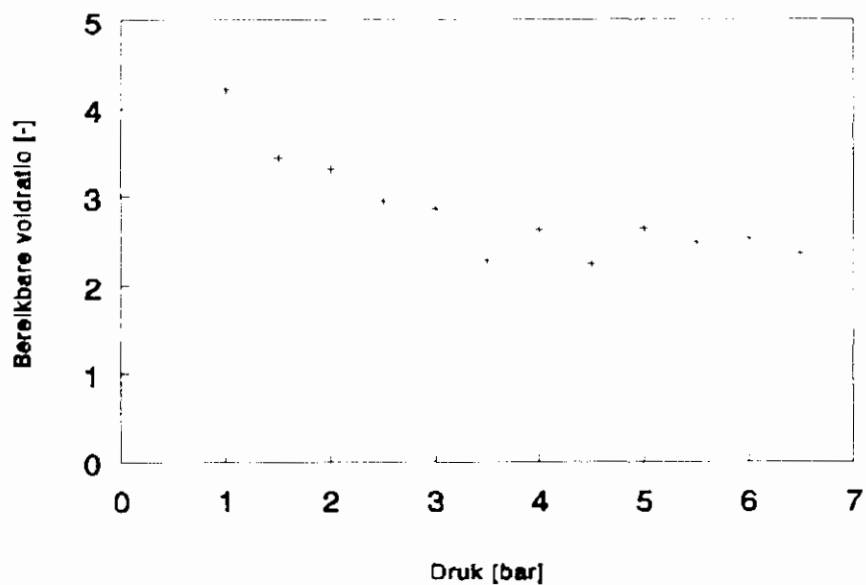
Figuur 32. Uitstroomsnelheden versus tijd bij verschillende hoeveelheden $FeCl_3$.

Expressie slib Mierlo Flocculant KF975



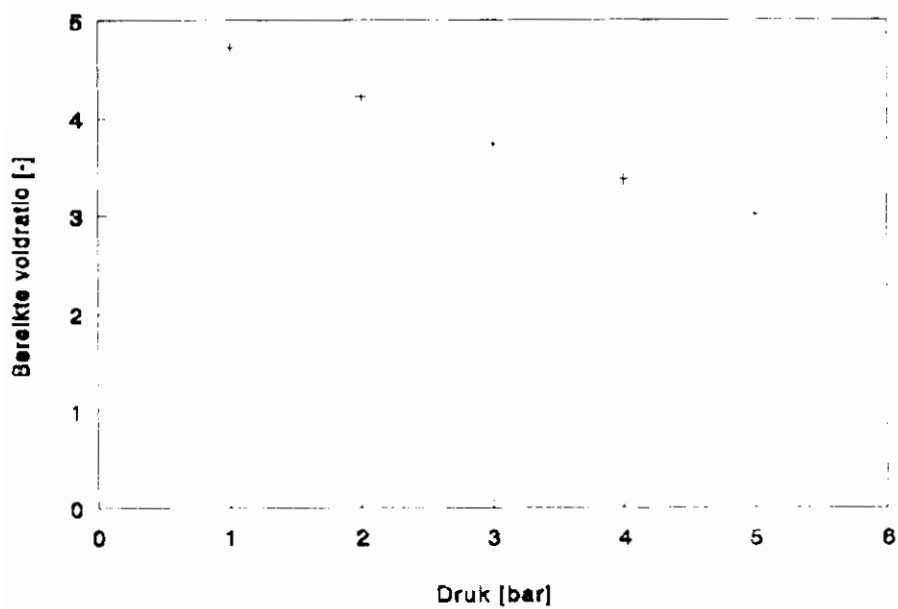
Figuur 33. Bereikte voidratio versus druk, slib geflocculeerd met KF975.

Expressie slib Mierlo Flocculant FeCl₃



Figuur 34. Bereikte voidratio versus druk, slib geflocculeerd met FeCl₃.

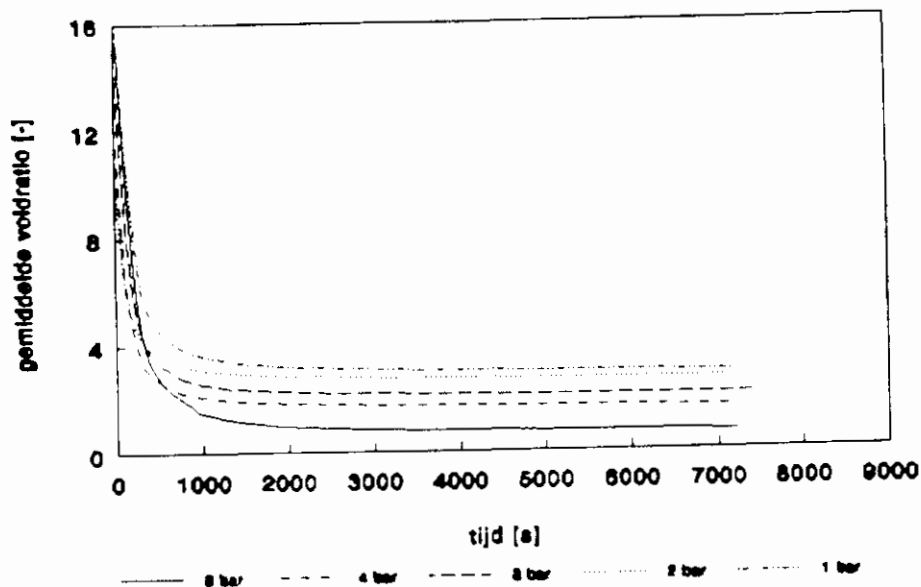
Expressie slib Mierlo Flocculant FeCl₃



Figuur 35. Bereikte voidratio na 2 uur versus druk.

Expressie slib Mierlo

Invloed druk 10 gew% FeCl₃



Figuur 36. Gemiddelde voidratio versus tijd bij verschillende drukken

6.8. Invloed van de flocculant op het expressiegedrag

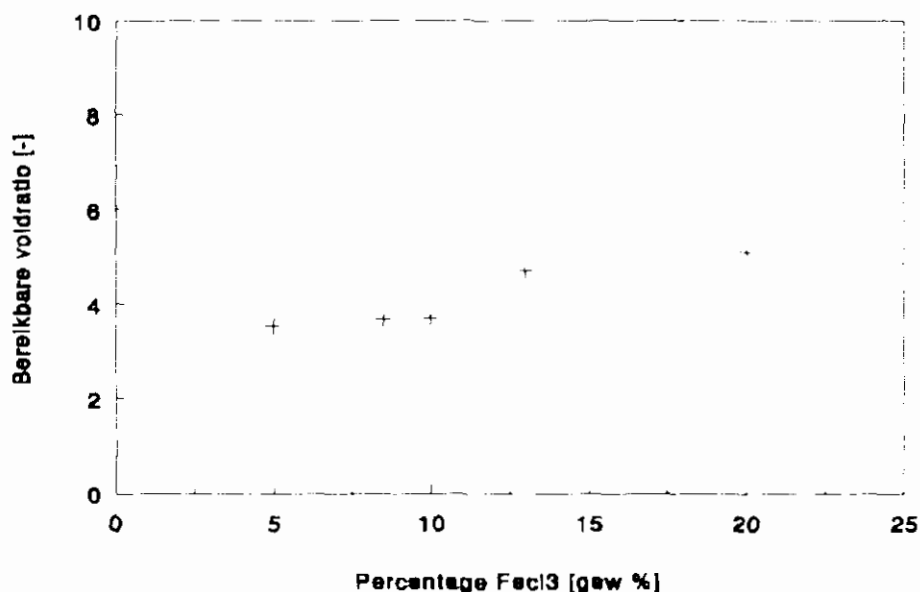
Elke RWZI gebruikt een 'eigen' flocculant, waarmee een bepaald resultaat geboekt wordt. Om nu de invloed te bepalen die zo'n flocculant heeft op het expressiegedrag is in dit onderzoek het slib van Mierlo steeds geflocculeerd met FeCl₃ en Ca(OH)₂ en met KF975. Om de invloed van de flocculant op het expressie gedrag te bepalen kunnen we de bereikbare voidratio vergelijken na flocculeren met FeCl₃ en Ca(OH)₂ of met KF975. In paragraaf 6.7 zijn in figuur 33 de resultaten weergegeven na flocculeren met KF975. Bij een drukverschil van 5 bar is de bereikte voidratio ongeveer 1,6 (ofwel een drogestofgehalte van ongeveer 45 gew%). In figuur 34 zijn de resultaten weergegeven van de expressie bij een drukverschil van 5 bar na flocculering met FeCl₃ en Ca(OH)₂. De bereikte voidratio bij optimale flocculering is daar ongeveer 2,0 (ofwel een drogestofgehalte van 35 gew%). Hieruit blijkt dus dat voor het slib uit Mierlo flocculeren met FeCl₃ een slechter resultaat geeft dan flocculeren met KF975, wanneer we kijken naar de bereikbare voidratio. Wanneer het slib geflocculeerd wordt met FeCl₃, wordt de eindsituatie wel eerder bereikt. De ontwateringstijden zijn dan 2 tot 4 maal zo klein.

6.9 Invloed van de hoeveelheid flocculant

De resultaten van de experimenten met verschillende hoeveelheden flocculant zijn weergegeven in figuur 37. In deze figuur zijn de bereikte voidratio's uitgezet tegen de hoeveelheid toegevoegde flocculant. Uit de figuur blijkt dat de optimale flocculering plaats vindt bij toevoegen van een hoeveelheid FeCl₃ die ligt tussen 5 en 10 gew%. Na toevoegen van meer

dan 10 gew% FeCl_3 neemt de voidratio iets toe.

Expressie slib Mierlo Drukverschil is 5 bar



Figuur 37. Bereikte voidratio versus hoeveelheid toegevoegde flocculant FeCl_3 .

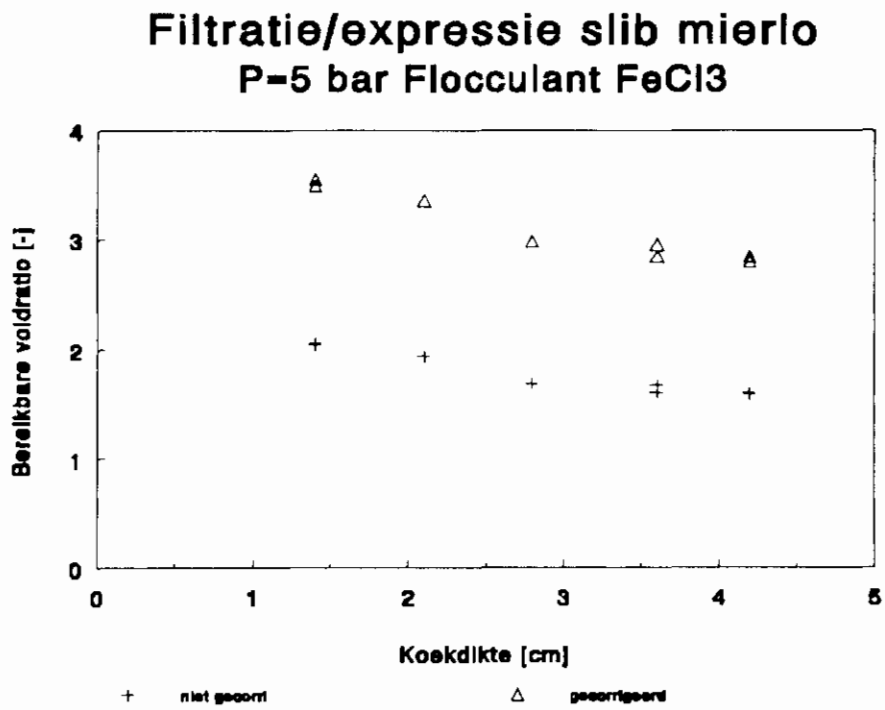
6.10 Invloed van de koekdikte op het expressiegedrag

De resultaten van de eerste series experimenten met verschillende koekdiktes zijn weergegeven in figuur 38 en 39. Daarin zijn steeds de bereikte voidratio's uitgezet tegen de koekdikte. In de eerste experimenten bleken de dunnere koeken, vooral wanneer ze geflocculeerd waren met KF975 minder goed uitpersbaar te zijn dan de dikkere koeken. Dit kwam niet overeen met de verwachting dat door de lagere wrijving aan de wand bij de dunnere koeken deze juist verder uitgeperst zouden kunnen worden.

De oorzaak van de hogere voidratio's bij dunnere koeken bleek te zijn dat de poreuze plaatjes aan de onderkant van de opstelling doorbuigen bij hogere drukken. Hierdoor kan de koek in het midden niet ver genoeg uitgeperst worden. Dit effect is groter naarmate de koek dunner is.

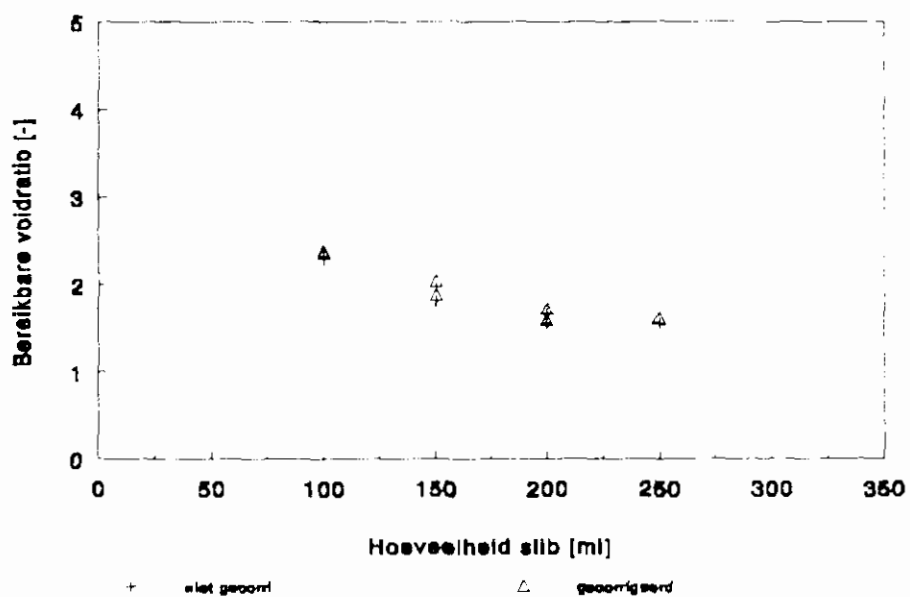
Als oplossing voor het doorbuigen van de plaatjes is een metalen ring aangebracht in het midden onder de plaatjes, waardoor ze niet meer konden doorbuigen. Bij de volgende experimenten (figuur 40) blijkt dat de dikte van de koek niet tot nauwelijks van invloed is op de bereikbare voidratio. Het was voor de bereikbare voidratio niet noodzakelijk om bij een kleinere koekdikte te gaan werken, daar de bereikbare voidratio daar gelijk is aan of hoger was dan bij de hogere koekdiktes. Een kleinere koekdikte heeft wel als voordeel dat de expressietijd korter is. De expressietijden nemen namelijk kwadratisch toe met toenemende

koekdikte (figuur 41). Dit wordt ook voorspeld door het filtratie-expressiemodel.



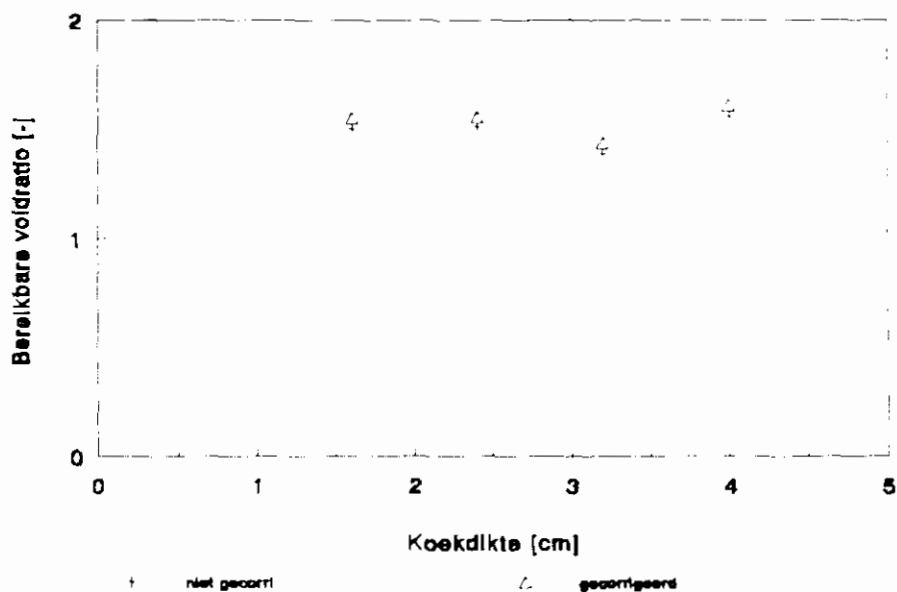
Figuur 38. Bereikte voidratio versus koekdikte, flocculant FeCl₃.

Filtratie/expressie slib mierlo P=5 bar Flocculant KF975 (1)



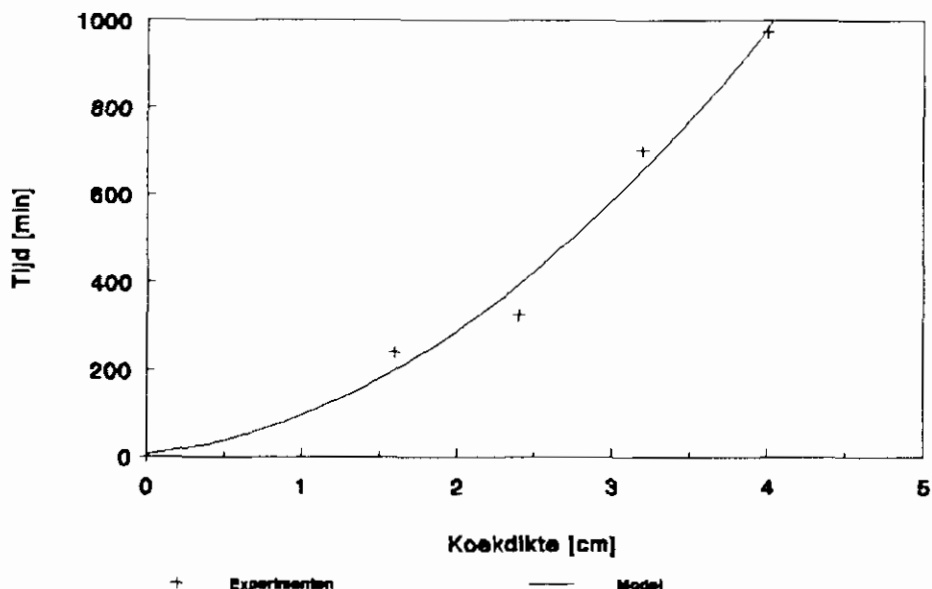
Figuur 39. Bereikte voidratio versus koekdikte, flocculant KF975

Filtratie/expressie slib mierlo P=5 bar Flocculant KF975



Figuur 40. Bereikte voidratio versus koekdikte.

Filtratie/expressie slib mierlo P=5 bar Flocculant KF975

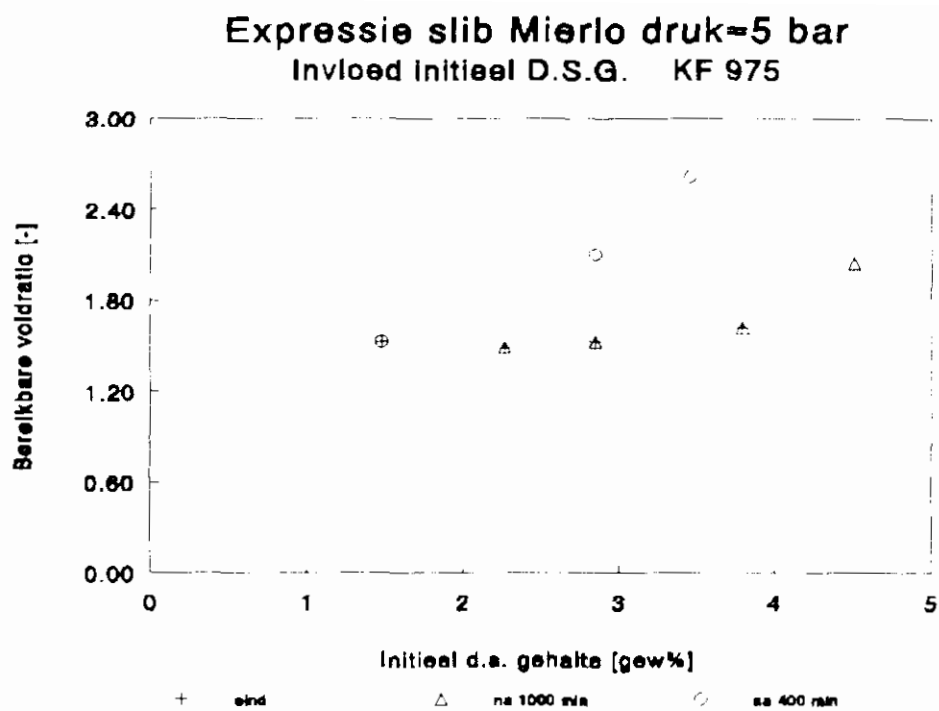


Figuur 41. *Expressietijd versus koekdikte.*

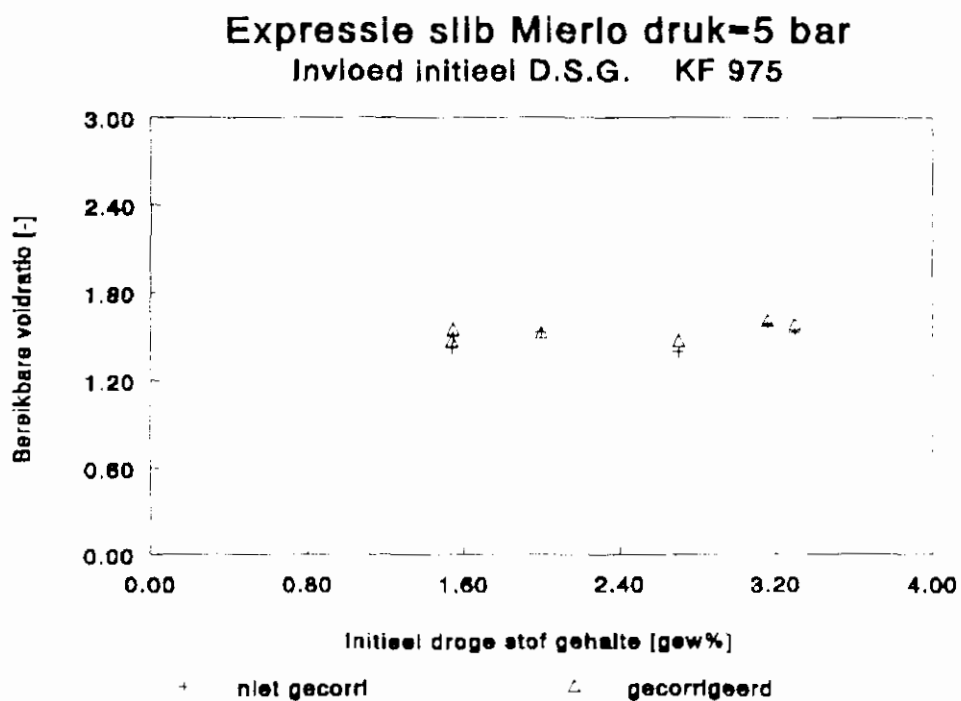
6.11 Invloed van het initiële drogestofgehalte op het expressiegedrag

In de figuren 42 en 43 zijn de resultaten weergegeven van twee series experimenten met een oorspronkelijke drogestofconcentratie van respectievelijk 2,85 en 2,70 gew%. In de beide figuren is de bereikbare voidratio uitgezet tegen het initiële drogestofgehalte van het slib. In figuur 42 zijn alleen de gecorrigeerde voidratio's weergegeven. In figuur 43 zijn naast de gecorrigeerde ook de niet gecorrigeerde waarden voor de voidratio weergegeven. Uit beide grafieken blijkt dat het initiële drogestofgehalte niet van invloed is op de bereikbare voidratio. Wel blijkt het van invloed te zijn op de expressietijden. Deze nemen erg toe naarmate het initiële drogestofgehalte toeneemt. Dit komt overeen met de resultaten van de experimenten met verschillende koekdiktes (figuur 41). Een hoger initieel drogestofgehalte levert een grotere koekdikte, dus ook een langere expressietijd.

Indien een expressie-experiment voortijdig wordt afgebroken (b.v. na 400 minuten, zie figuur 42), dan is de voidratio bij hogere initiële drogestofconcentraties hoger dan bij lagere drogestofconcentraties. Indien echter het experiment pas wordt beëindigd als er geen water meer uit de koek stroomt, dan zijn de bereikte voidratio's nagenoeg gelijk voor initiële drogestofconcentraties gelegen tussen 1 en 5 gew%.



Figuur 42. Bereikte voidratio versus initieel drogestofgehalte



Figuur 43. Bereikte voidratio versus initieel drogestofgehalte

7 CONCLUSIES

7.1 Conclusies

- De koekdikte en het initiële drogestofgehalte blijken niet van invloed te zijn op het uiteindelijke resultaat (het eind drogestofgehalte) dat met mechanisch ontwateren bereikt wordt. Ze zijn echter wel van invloed op de ontwateringstijden. Toename van de koekdikte of het initieel drogestofgehalte geeft tevens een toename van ontwateringstijden.
- Verhoging van de druk geeft een hoger eind drogestofgehalte, de winst boven drukken van 4 bar is echter relatief gering. De ontwateringstijden worden nauwelijks beïnvloed door verandering van de druk, wanneer wordt gewacht tot de koekstructuur niet meer verandert.
- Wanneer het polyelektrolyt Röhm Rohafloc KF975 flocculant gebruikt wordt voor het ontwateren zijn de verkregen resultaten (eind drogestofgehalte van 45 gew%) beter dan bij gebruik van FeCl_3 in combinatie met Ca(OH)_2 als flocculant (eind drogestofgehalte van 35 gew%). De ontwateringstijden zijn echter na flocculering met het polyelektrolyt ongeveer 2 tot 4 maal zo lang (afhankelijk van de koekdikte).
- Er blijkt bij beide flocculanten een optimaal toe te voegen hoeveelheid te bestaan, waarbij het bereikte eind drogestofgehalte hoog en de ontwateringstijd kort is. Voor slib van Mierlo ligt deze optimale hoeveelheid voor FeCl_3 tussen 5 en 15 gew% (varieert per dag) en voor KF975 ligt deze hoeveelheid bij ongeveer 1,5 gew%.

8 SYMBOLENLIJST

| | | |
|------------------------|--|---------------------|
| a | = drukconstante bij vergelijking (15) | [Pa ⁻¹] |
| $a = \alpha_0$ | = filtratieweerstand bij druk is nul | [m/kg] |
| A | = grootte van het filteroppervlak | [m ²] |
| A_c | = contactoppervlak tussen deeltjes | [m ²] |
| b | = dimensieloze specifieke volume van de filterkoek | [-] |
| $B = (1 - \epsilon_0)$ | = 1-porositeit bij druk is nul | [-] |
| B' | = demperconstante | [N s/m] |
| C | = volumetrische concentratie vaste stof in oorspronkelijke suspensie | [-] |
| $C1$ | = constante in vergelijking van Terzaghi (13) | [-] |
| $C2$ | = constante in vergelijking van Terzaghi (13) | [-] |
| d_p | = diameter van een pakkingsdeeltje | [m] |
| e | = voidratio | [-] |
| e_0 | = voidratio bij druk is nul | [-] |
| e_∞ | = voidratio bij oneindig hoge druk | [-] |
| F | = kracht | [N] |
| F_s | = cumulatieve kracht op deeltjes | [N] |
| g_c | = conversiefactor | [-] |
| h | = afplattingslengte van een pakkingsdeeltje | [m] |
| i | = stroom | [V] |
| J | = correctiefactor voor niet-uniforme stromingssnelheid | [m ²] |
| $J = K_0$ | = permeabiliteit bij druk is nul | [m ²] |
| K | = permeabiliteit van de filterkoek | [m ²] |
| K' | = elasticiteitscoëfficiënt van materie | [N/m] |
| K_0 | = permeabiliteit bij druk is nul | [m ²] |
| K_m | = permeabiliteit van het filtermedium | [m ²] |
| L | = koekdikte | [m] |
| L_0 | = koekdikte op tijdstip t is nul | [m] |
| L_t | = koekdikte op tijdstip t is t | [m] |
| L^* | = dikte van het filtermedium | [m] |
| m | = verhouding totale massa natte koek tegen droge koek | [-] |
| n | = compressibiliteitscoëfficiënt bij vergelijkingen (6) en (10) | [-] |
| N | = totaal aantal slibvlokken in de filterkoek | [-] |
| P | = opgelegde druk | [Pa] |
| P_0 | = druk aan ingang van een buis bij vergelijking (17) | [Pa] |
| P_a | = empirische constante bij vergelijking (3) | [Pa] |
| P_1 | = hydraulische druk | [Pa] |
| P_L | = druk aan uitgang van een buis bij vergelijking (17) | [Pa] |
| P_s | = compressiedruk | [Pa] |

| | | |
|----------------|---|----------------------|
| $(\Delta P)_k$ | = drukverschil ten gevolge van stroming door de filterkoek | [Pa] |
| $(\Delta P)_m$ | = drukverschil ten gevolge van stroming door het filtermedium | [Pa] |
| $(\Delta P)_t$ | = totale aangelegde drukverschil | [Pa] |
| q | = superficiële vloeistofsnelheid ten opzichte van de vaste stof | [m/s] |
| Q | = stromingssnelheid bij vergelijking (17) | [m/s] |
| r_0 | = straal van een pakkingsdeeltje zonder compressie | [m] |
| r_c | = poriëstraal bij vergelijking (40) | [m] |
| R | = straal van een buis bij vergelijking (17) | [m] |
| R_h | = hydraulische straal | [m] |
| R_k | = specifieke filtratieweerstand van de filterkoek | [m ³] |
| R_m | = specifieke filtratieweerstand van het filtermedium | [m ³] |
| R_t | = totale stromingsweerstand | [m ³] |
| t | = tijd | [s] |
| V | = volume filtraat | [m ³] |
| V' | = spanning | [A] |
| V^* | = suspensievolume | [m ³] |
| V_b | = volume van de filterkoek | [m ³] |
| V_{lt} | = volume van één slibvlok | [m ³] |
| w | = totale massa drogestof per oppervlakte-eenheid | [kg/m ²] |

Griekse symbolen

| | | |
|-----------------|--|----------------------|
| α | = lokale filtratieweerstand | [m/kg] |
| α_0 | = filtratieweerstand bij druk is nul | [m/kg] |
| β | = afplattingsgraad van een bol | [-] |
| β | = compressibiliteitscoëfficiënt bij vergelijkingen (5) en (10) | [-] |
| γ_t | = deeltjescompressiecoëfficiënt | [-] |
| δ | = compressibiliteitscoëfficiënt bij vergelijkingen (7) en (12) | [-] |
| ϵ | = porositeit | [-] |
| ϵ_0 | = porositeit bij druk is nul | [-] |
| ϵ_{av} | = gemiddelde porositeit | [-] |
| λ | = compressibiliteitscoëfficiënt bij vergelijkingen (1) en (2) | [-] |
| σ | = constante in vergelijking van De Smedt (15) | [-] |
| μ | = viscositeit | [Pa s] |
| ρ | = dichtheid van het filtraat | [kg/m ³] |
| ρ_s | = dichtheid van de vaste stof | [kg/m ³] |
| Φ | = vormfactor | [-] |

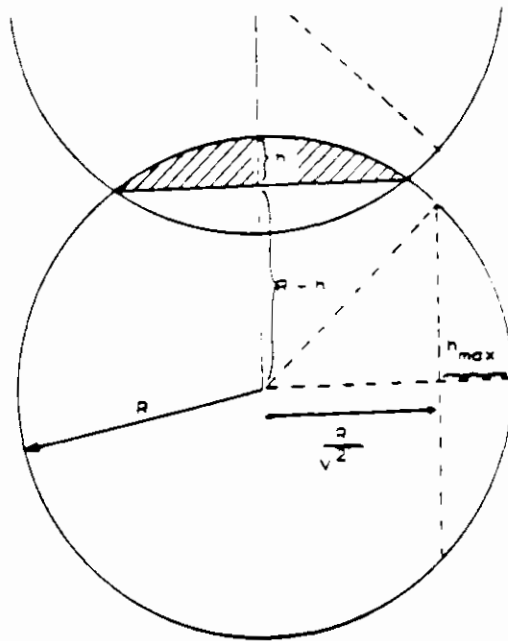
9 LITERATUURLIJST

- [1] Tiller F.M., 'The role of porosity in filtration', *Chem.Eng.Progr.*, 49(9) (1953) 467-79
- [2] Willis M.S. et al, 'Filtration mechanisms', *Chem.Eng. Res.Des.*, 63(5) (1985) 175-190
- [3] Murase T. et al, 'Determination of filtration characteristics due to sudden reduction in filtration area of filter cake surface', *J.Chem.Eng.Jpn.*, 20(3) (1987) 246-51
- [4] Murase T. et al, 'Expansion of consolidated material after release of load', *J.Chem.Eng.Jpn.*, 22(2) (1989) 195-9
- [5] Terzaghi K. en Peck B.P., 'Soil mechanics in engineering practice', John Wiley & Sons, New York, (1948) 56-78 233-242
- [6] Kerkhof P.J.A.M., 'Some fundamental aspects of sludge dewatering', T.U.E., Eindhoven (1991)
- [7] Smedt F.de, 'Consol: a computer simulation model for the consolidation of dredged material', *CATS congress* (1991) 2.19-2.24
- [8] Kravtchenko J. en Sirieys P.M., 'Rheology and soil mechanics', Springer Verlag, Berlin (1966) 174-8
- [9] Bird R.B. et al, 'Transport phenomena', John Wiley & Sons, New York (1960)
- [10] Kantzas A. en Chatzis I., 'Application of the preconditioned conjugate gradients method in the simulation of relative permeability properties of porous media', *Chem.Eng.Comm.*, 69 (1988) 169-89
- [11] Milne-Thomson L.M., 'Theoretical hydrodynamics', MacMillan & Co, London (1955) 182
- [12] Bear J., 'Dynamics of fluids in porous media', American Elsevier, New York (1972) 125-76
- [13] Herwijn A.J.M., 'Filtration', T.U.E., Eindhoven (1990)
- [14] Beddow J., 'Particle characterisation in technology', *Morfological Analysis*, 2 (1987) 213
- [15] Happel J. en Brenner H., 'Low reynolds number hydrodynamics', Noordhoff, Leiden (1973) 387-99
- [16] Rietema K., 'Fysiche transport- en overdrachtsverschijnselen', Uitgeverij Het Spectrum, Utrecht (1976) 130-5
- [17] Scheidegger A.E., 'The physics of flow through porous media', University of Toronto Press, London (1960)
- [18] Carman P.C., 'Flow of gases through porous media', Academic Press, New York (1956)
- [19] Brinkman H.C., 'A calculation of the force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles', *Appl.Sc.Res.*, A1 (1947) 27-34
- [20] Brinkman H.C., 'On the permeability of media consisting of closely packed porous particles', *Appl.Sc.Res.*, A1 (1947) 81-6

- [21] Dullien F.A.L., 'Porous media, fluid transport and pore structure', Academic Press, New York (1979) 198-201
- [22] Cotton F.A. en Wilkinson G., 'Basic inorganic chemistry', John Wiley & Sons, New York (1976) 92-106
- [23] Porterfield W.V., 'Inorganic chemistry', Addison-Wesley Publishing Company, Reading (1984) 93-102
- [24] Kerkhof P.J.A.M., 'Fysisch-technologische aspecten van de wrongeldrainage', Nederlands Instituut voor Zuivelonderzoek, Ede (1979)
- [25] Kottwitz F.A. en Boylan D.R., 'Prediction of resistance in constant-pressure cake filtration', A.I.Ch.E. Journal, 4(2) (1958) 175-80
- [26] Shitato M. et al, 'Internal flow mechanism in filter cakes', A.I.Ch.E. Journal, 15(3) (1969) 405-9
- [27] Shirato M. et al, 'Porosity variation in filter cake under constant-pressure filtration', J.Chem.Eng.Jpn., 4(2) (1971) 60-5
- [28] Tiller F.M. et al, 'The role of porosity in filtration, part 7: effect of side-wall friction in compression-permeability cells', A.I.Ch.E. Journal, 18(1) (1972) 13-20
- [29] Tiller F.M. en Lu W.M., 'The role of porosity in filtration, part 8: cake nonuniformity in compression-permeability cells', A.I.Ch.E. Journal, 18(3) (1972) 569-72
- [30] Murase T. et al, 'Determination of filtration characteristics based upon filtration tests under step-up pressure conditions', J.Chem.Eng.Jpn., 22(4) (1989) 373-8
- [31] Grace H.P., 'Resistance and compressibility of filter cakes', Chem.Eng.Progr., 49(6) (1953) 303-18
- [32] Tiller F.M. en Yeh C.S., 'Relative liquid removal in filtration and expression', Filtration & Separation, 2 (1990) 129-35

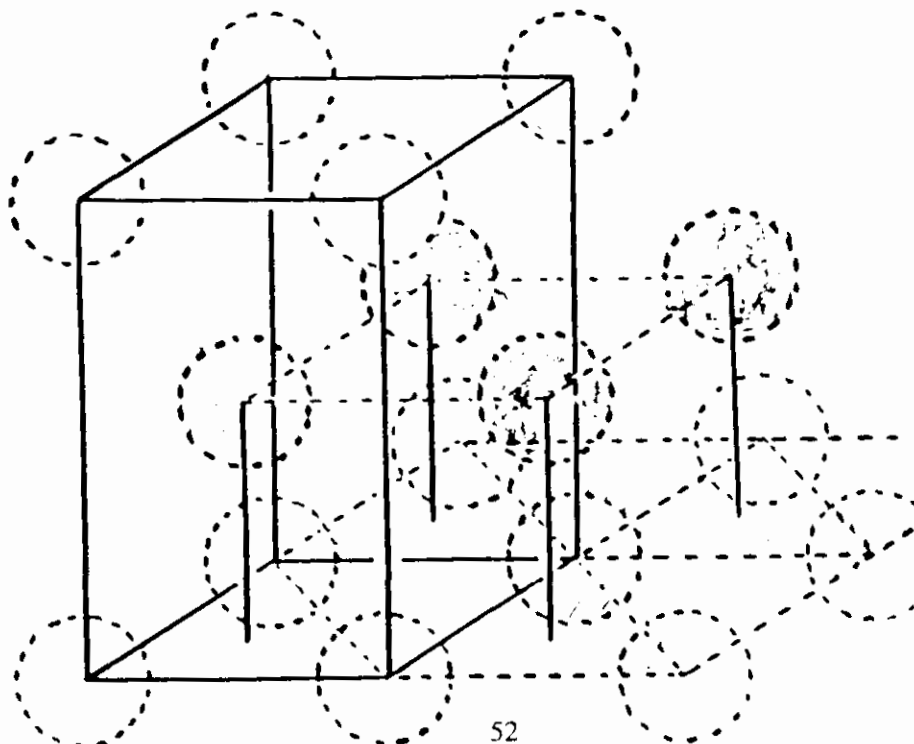
BIJLAGE I BOL- EN KUBISCHE-STAPELINGEN

* afplattingsgraad van een bol : $\beta = h/R$



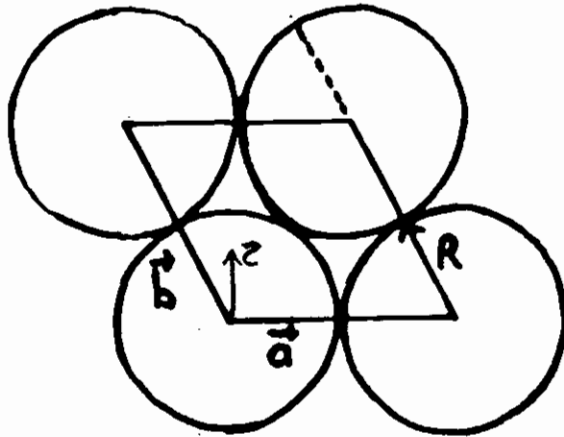
* hexagonale dichtste bolstapeling (hcp):

stapeling : A B A B A B
 eenheidscel bevat : 2 atomen
 omringingsgetal : 12
 R : straal van bol



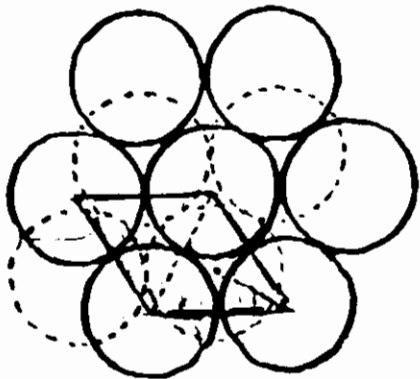
hexagonale eenheidscel

| | |
|----------|---|
| α | : hoek tussen vectoren b en c : 90° |
| β | : hoek tussen vectoren a en c : 90° |
| γ | : hoek tussen vectoren a en b : 120° |
| a_0 | : $2R$ |
| b_0 | : $2R$ |
| c_0 | : $4/3R\sqrt{6}$ |



grondvlak cel

| | |
|-------------|------------------|
| zijde | : $2R$ |
| hoogte | : $R\sqrt{3}$ |
| oppervlakte | : $2\sqrt{3}R^2$ |



$$h = \sqrt{(2R)^2 - \left(\frac{2}{3}R\sqrt{3}\right)^2} = \frac{2}{3}R\sqrt{6}$$

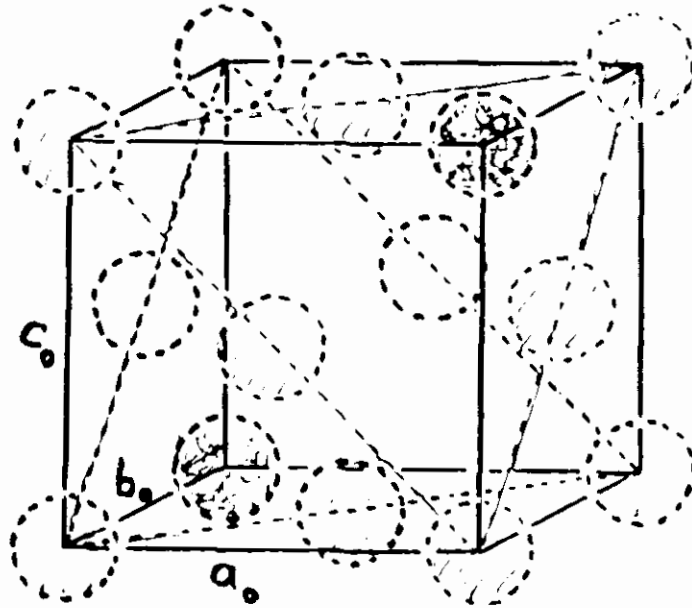
$$L = \frac{2}{3}R\sqrt{3}$$

| | |
|---------------------------|---|
| hoogte eenheidscel | : $2 \cdot \frac{2}{3}R\sqrt{6} = \frac{4}{3}R\sqrt{6}$ |
| volumen cel | : $8\sqrt{2}R^3$ |
| bezette volume fractie | : $2 \cdot \frac{4}{3}\pi R^3 / 8\sqrt{2}R^3$ |
| percentage 'vrije ruimte' | : 26% |

* kubische dichtste bolstapeling (ccp):

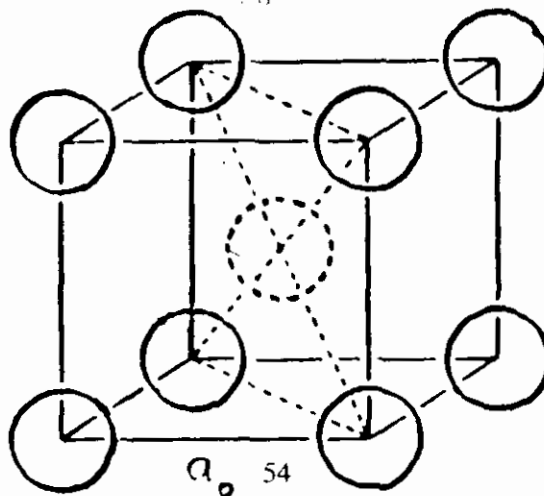
stapeling : A B C A B C
 eenheidscel bevat : 4 atomen
 omringingsgetal : 12
 percentage 'vrije ruimte' : 26%

$a_0 = b_0 = c_0$: $4/\sqrt{3} \cdot 6R$
 $\alpha = \beta = \gamma$: 90°



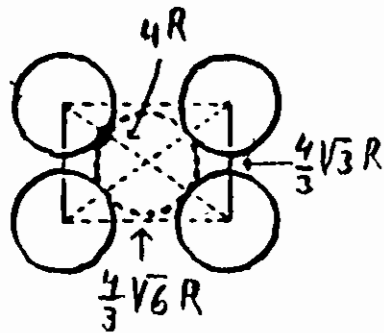
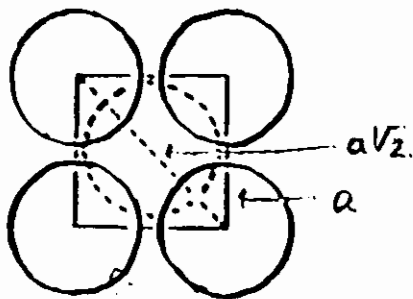
* lichaams-gecenterde kubische bolstapeling (bcc):

stapeling : bollen raken elkaar
 langs lichaamsdiagonalen
 eenheidscel bevat : 2 atomen
 omringingsgetal : 8



a_0 54

| | |
|---------------------------|---------------------|
| $a_0 = b_0 = c_0$ | : $4/3\sqrt{3}R$ |
| volume cel | : $64/9\sqrt{3}R^3$ |
| bezette volume fractie | : $\pi\sqrt{3}/8$ |
| percentage 'vrije ruimte' | : 32% |



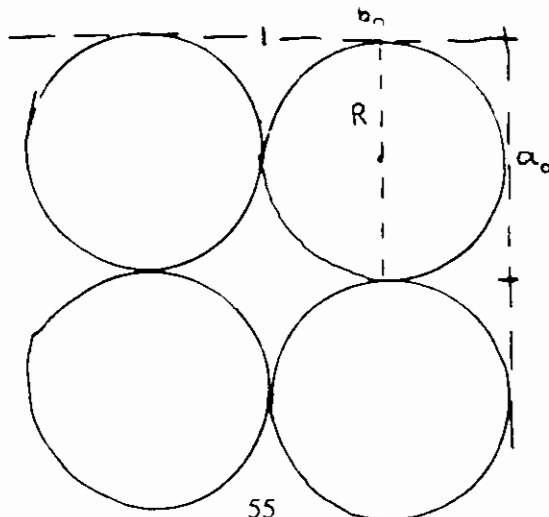
$$(4R)^2 = a^2 + (a\sqrt{2})^2 = 3a^2$$

$$a = \frac{4}{3}\sqrt{3}R$$

* kubische bolstapeling:

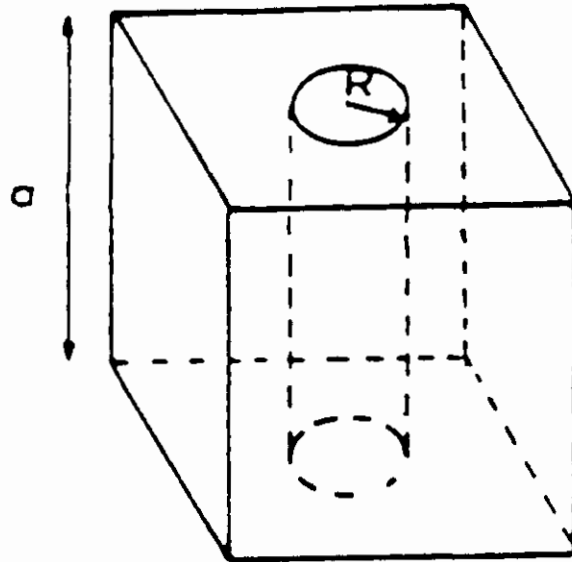
| | |
|---------------------------|-----------|
| eenheidscel bevat | : 1 atoom |
| omringingsgetal | : 6 |
| percentage 'vrije ruimte' | : 48% |

| | |
|---------------------------|--------------|
| $a_0 = b_0 = c_0$ | : $2R$ |
| $\alpha = \beta = \gamma$ | : 90° |



* kubusvormige blokken met cilindrische poriën:

straal cilinderporie : R
lengte kubus : a



**PUBLIKATIEREELS "TOEKOMSTIGE GENERATIE
RIOOLWATERZUIVERINGSINRICHTINGEN RWZI 2000" ¹**

- 1 "Behandeling van stedelijk afvalwater in de toekomst"
Een haalbaarheidsonderzoek. I. Eindrapport II. Werkrapport
RIZA, TNO-Maatschappelijke Technologie en Witteveen & Bos Raadgevende
ingenieurs
Juli 1986
- 2 "Toekomstige generatie rioolwaterzuiveringsinrichtingen; RWZI 2000"
Onderzoekplan
RIZA, STORA
Januari 1988
- 3 "Jaarverslag 1988"
RIZA, STORA
Maart 1989
- 4 "Slibontwatering; een voorstudie"
TU-Delft, TU-Eindhoven
RWZI 2000 89-01
Januari 1989
- 5 "Knelpunten bij de invoering van defosfatering"
Witteveen & Bos Raadgevende ingenieurs
RWZI 2000 89-02
April 1989
- 6 "Selectieve verwijdering van zware metalen uit ruw rioolwater met behulp van een
magneetsysteem"
Smit-Nymegen, TNO-Maatschappelijke Technologie
RWZI 2000 89-03
Oktober 1989
- 7 "Verwijdering van zware metalen uit zuiveringslib door elektrolyse"
TNO-Maatschappelijke Technologie
RWZI 2000 89-04
Oktober 1989

¹ Te bestellen bij:
STOWA, Postbus 8090, 3503 RB Utrecht
tel. 030-321199

- 8 "Hydrolyse van zuiveringslib in combinatie met anaërobe vergisting"
TNO-Maatschappelijke Technologie
RWZI 2000 89-05
Oktober 1989
- 9 "Het drogen van zuiveringslib met het Carver-Greenfieldproces"
TNO-Maatschappelijke Technologie, Witteveen & Bos Raadgevende
ingenieurs
RWZI 2000 89-06
December 1989
- 10 "Natte oxydatie van zuiveringslib met het Vertech-systeem"
TNO-Maatschappelijke Technologie, Witteveen & Bos Raadgevende
ingenieurs
RWZI 2000 89-07
December 1989
- 11 "Symposium "RWZI 2000" d.d. 5 oktober 1989"
RIZA, STORA
RWZI 2000 89-08
December 1989
- 12 "Jaarverslag 1989"
RIZA, STORA
RWZI 2000 90-01
Maart 1990
- 13 "AB-Systemen; een inventarisatie"
DHV Raadgevend Ingenieursbureau BV
RWZI 2000 90-02
September 1990
- 14 "Vergisting van aëroob gestabiliseerd slib"
DHV Raadgevend Ingenieursbureau BV
RWZI 2000 90-03
Augustus 1990
- 15 "Het afleiden van procestecnologische relaties uit bedrijfsgegevens van rwzi's"
DHV Raadgevend Ingenieursbureau BV
RWZI 2000 90-04
December 1990
- 16 "Automatische regeling van het slibgehalte in beluchtingstanks"
Adviebureau BKH
RWZI 2000 90-05
September 1990

- 17 "Verkenning Bio-Denitro/Bio-Denipho"
Witteveen & Bos Raadgevende ingenieurs
RWZI 2000 90-06
Juni 1990
- 18 "Linpor-sponsjes als dragermateriaal bij de aërobe zuivering van rioolwater"
TNO-Maatschappelijke Technologie
RWZI 2000 90-07
Oktober 1990
- 19 "Jaarverslag 1990"
RIZA, STORA
RWZI 2000 91-01
Maart 1991
- 20 "Deep Shaft-systemen; een inventarisatie"
DHV Raadgevend Ingenieursbureau BV
RWZI 2000 91-02
Maart 1991
- 21 "Perspectives for the utilization of membrane-assisted sludge retention in municipal waste water treatment plants"
A feasibility study
RU-Groningen
RWZI 2000 91-03
Juni 1991
- 22 "Jaarverslag 1991"
RIZA, STOWA
RWZI 2000 92-01
Maart 1992
- 23 "Vergisten van zuiveringsslib; een vergelijking tussen thermofiele en mesofiele slibgisting"
Haskoning B.V., RIZA, LU-Wageningen, DHV Water B.V.
RWZI 2000 92-02
Maart 1992
- 24 "First Dutch-Japanese workshop on the treatment of municipal waste water;
8-11 april 1991, Heelsum, The Netherlands. Part I and part II.
RIZA, STOWA, TU-Delft
RWZI 2000 92-03
Maart 1992

- 25 "Biologische fosfaatverwijdering in combinatie met een korrelreactor"
LU-Wageningen, DHV Water B.V.
RWZI 2000 92-04
Augustus 1992
- 26 "Anaërobe behandeling van stedelijk afvalwater in Nederland"
Covernota van het uitgevoerde onderzoek 1976 - 1991
LU-Wageningen, Haskoning B.V.
RWZI 2000 92-05
Mei 1992
- 27 "Vergaande nutriëntenverwijdering op een zeer laagbelaste aktiefslibinstallatie"
Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden, Grontmij N.V.
RWZI 2000 92-06
Oktober 1992
- 28 "Ontwikkeling van een slib-op-drager systeem voor de aërobe zuivering van stedelijk afvalwater"
Fase II: Onderzoek naar de processtabiliteit en optimalisatie van het zuiveringsrendement.
TNO-IMW
RWZI 2000 92-07
Oktober 1992
- 29 "Behandeling van stedelijk afvalwater met het schachtreactorsysteem"
V & P Waste Water Management B.V.
RWZI 2000 92-08
Juli 1994
- 30 "Stikstofverwijdering uit interne stromen op rwzi's"
DHV Water B.V.
RWZI 2000 92-09
December 1992
- 31 "Jaarverslag 1992"
RIZA, STOWA
RWZI 2000 93-01
April 1993
- 32 "Onderzoek demonstratie-installaties magnetische defosfatering"
Envimag B.V.
RWZI 2000 93-02
April 1993

- 33 "Modelvorming en optimalisatie van biologische defosfatering van afvalwater:
Microbiële aspecten"
LU-Wageningen, vakgroep Microbiologie
RWZI 2000 93-03
November 1993
- 34 "Jaarverslag 1993"
RIZA, STOWA
RWZI 2000 94-01
Juli 1994
- 35 "Fundamentele aspecten van slibontwatering"
Deel 1: Samenvattend verslag
Deel 2: Flocculatiemechanismen
Deel 3: Filtratie-expressie modellering
Deel 4: Filtratie expressie experimenten
Deel 5: Slib-water binding
Deel 6: Karakterisering van slibben
Deel 7: Ontwikkeling nieuw CST-apparaat
Deel 8: Congresbijdragen
TU-Eindhoven, Laboratorium voor Scheidingstechnologie
RWZI 2000 94-02
Juli 1994