

Filtratie en persing van zuiveringslib : modelvorming

Citation for published version (APA):

Heij, la, E. J. (1994). Filtratie en persing van zuiveringslib : modelvorming. In *Symposium Persfiltratie : de theorie en de praktijk, Utrecht, Februari 1994*

Document status and date:

Published: 01/01/1994

Document Version:

Accepted manuscript including changes made at the peer-review stage

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

FILTRATIE EN PERSING VAN ZUIVERINGSSLIB; MODELVORMING

E.J. La Heij

Laboratorium voor Scheidingstechnologie, vakgroep Chemische Proceskunde, faculteit Scheikundige Technologie, Technische Universiteit Eindhoven, 5600 MB, Eindhoven

Samenvatting

Het filtratie en persingsgedrag van zuiveringsslib zal worden besproken. Vanwege de toename in kosten voor gecontroleerde dumping en transport en strengere milieu wetgevingen, wordt de vraag naar de reductie van het slibvolume steeds groter. Filtratie en persing zijn de goedkoopste ontwateringstechnieken en het is daarom van belang zoveel mogelijk water met mechanische ontwatering te verwijderen. Relatief hoge eind droge stof gehalten 35-40 gew% zijn reeds bij drukken van 300-400 kPa en optimale flocculatiecondities te bereiken; echter bij hoge mechanische drukken (6-10 MPa) kunnen droge stof gehalten van ± 60 gew% worden bereikt. Verder wordt de modellering van de ontwatering besproken; model en experiment vertonen acceptabele overeenkomst.

Inleiding

De productie van slib van waterzuiveringsinstallaties neemt ieder jaar nog toe; de productie was in 1990 310.000 ton per jaar op droge stof basis en de verwachting voor 2000 is 400.000 ton per jaar. Het meeste slib wordt nog altijd afgezet in de landbouw of voor de productie van compost. De hoeveelheden nemen echter af en er wordt steeds meer slib gedumpt. Slechts enkele procenten van de totale hoeveelheid slib wordt verbrand. De afzet van slib in de landbouw zal de komende jaren alleen maar minder worden vanwege de strengere eisen wat betreft de toegestane hoeveelheden zware metalen. Kosten voor transport en dumping nemen steeds meer toe en het aantal dumpplaatsen neemt ook af vanwege strengere milieumaatregelen. Afname van de hoeveelheid van water in slib is daarom van groot belang. Voor transport om kosten te verlagen; voor dumping om het volume te verkleinen en voor verbranding om onder autotherme condities het slib te kunnen verbranden. Het droge stof gehalte van slib voor ontwatering is gemiddeld 2-4 gew%, terwijl mechanische ontwatering in de praktijk met zeefbandpersen 17-25 gew% en voor filterpersen 25-30 gew% oplevert. Indien een eind droge stof gehalte van 40 gew% in de toekomst wordt bereikt is het mogelijk om per jaar ongeveer Fl 80.000.000 te besparen op de verwerkingskosten (hierbij is de toename van de slibproductie meegerekend).

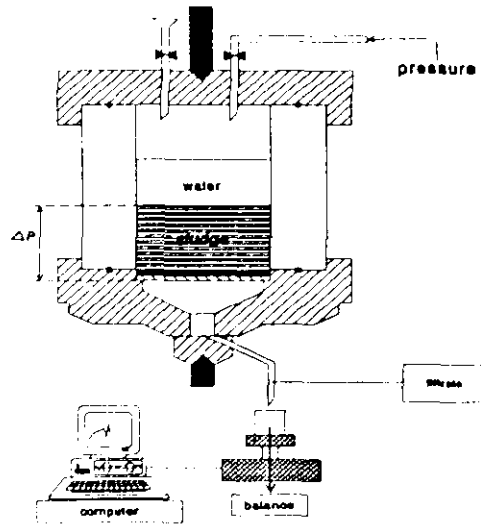
Laboratorium experimenten

Om het filtratie en persgedrag te bestuderen zijn een aantal laboratorium opstellingen zeer nuttig, die hieronder in het kort worden besproken.

De filtratie-persings cel

De cel, zoals getoond in figuur 1, bestaat uit een perspex cilinder met een poreuze bodemplaat met daarop een filterpapier. Het geflocculeerde slib wordt nu in de cel gegoten en vervolgens wordt er een zuiger op geplaatst. Op deze zuiger wordt een gasdruk aangelegd, zodat die gasdruk de

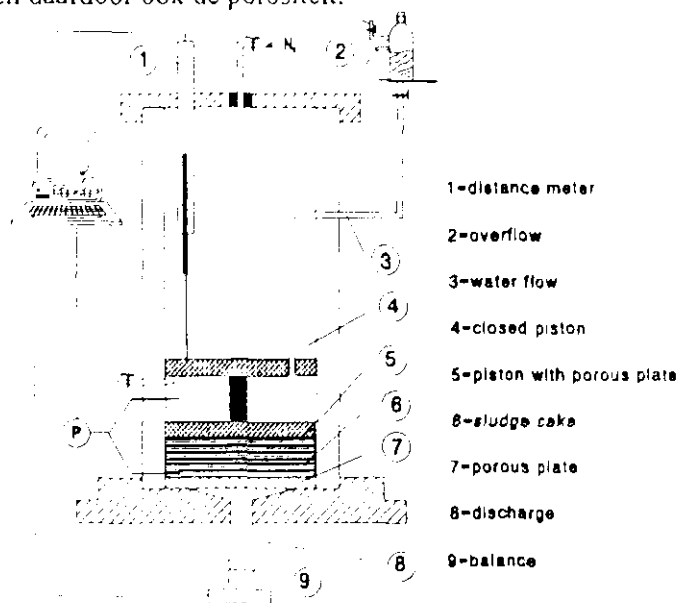
mechanische druk bepaalt. Er zal bij dit experiment eerst een koek worden gevormd tijdens de filtratie fase en de koek wordt uitgerst tijdens de pers fase.



Figuur 1. Schematische weergave van filtratie-persings cel.

De compressie-permeabiliteits (CP) cel

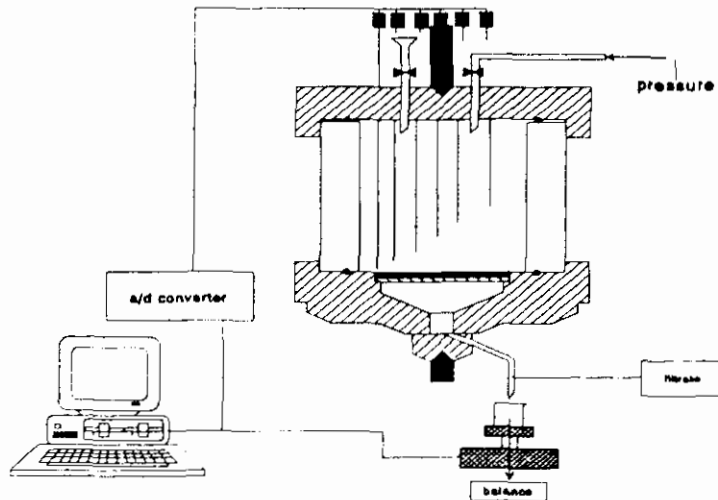
Voor de modellering van het filtratie en persgedrag zijn de relaties tussen permeabiliteit, porositeit en compressiedruk van groot belang. De CP-cel is schematisch weergegeven in figuur 2. Het bestaat wederom uit een perspex cilinder met een poreuze bodemplaat, waarop een filtreerpapier is geplaatst. Nadat geflocculeerd slib in de cel is gegoten, wordt een dubbele zuiger in de cilinder geplaatst. De onderste zuiger is poreus, de bovenste gesloten. Door een gasdruk aan te leggen op de bovenste zuiger, wordt de koek uitperst. De druk van de zuiger bepaalt de compressiedruk. Door nu een water laag tussen de twee zuigers aan te brengen waarop een klein beetje gasdruk wordt gezet, kan de vloeistofstroom door de koek worden gemeten. Door de vloeistofstroom en de vloeistofdruk te meten kan de permeabiliteit worden uitgerekend. Met een verplaatsingsopnemer verbonden met de zuiger is de koekdikte bekend en daardoor ook de porositeit.



Figuur 2. Schematische weergave van compressie-permeabiliteits (CP) cel.

De drukverdelingscel (figuur 3)

Deze cel is hetzelfde als de normale filtratie cel, maar heeft een aantal capillairtjes met verschillende lengtes, die zijn verbonden met drukopnemers. Met behulp van deze capillairtjes is het mogelijk om op verschillende hoogtes in de filterkoek de vloeistofdruk te meten. Door een mengsel van glycerol en klei (dat als zuiger dient) op de koek te plaatsen kan de koek worden uitgeperst.



Figuur 3. Schematische weergave van drukverdelings cel.

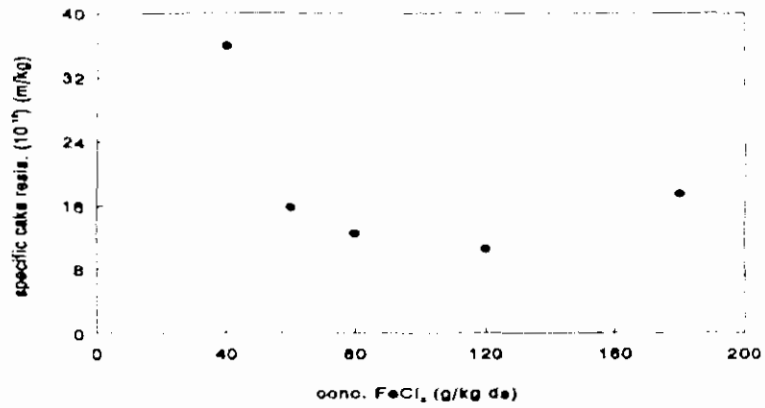
Filtratie en persexperimenten

Een eerste interpretatie van dit filtratie curven is door middel van een gemiddelde specifieke filtratieweerstand α :

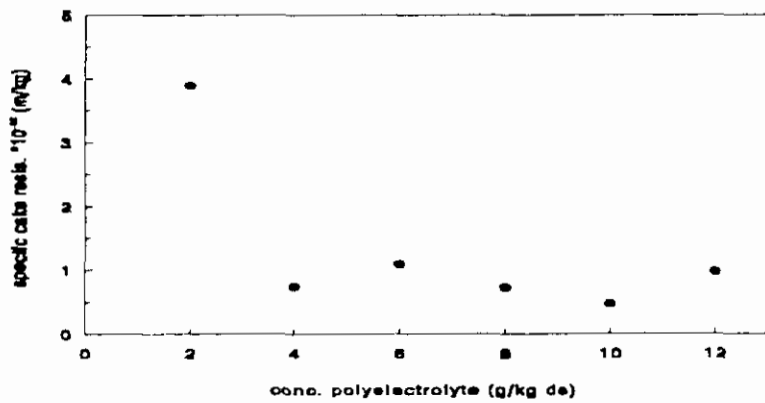
$$\alpha = \frac{R_c}{w} \tag{1}$$

$$R_c = \frac{\Delta p_l}{\eta q_l} = \frac{L_c}{K}$$

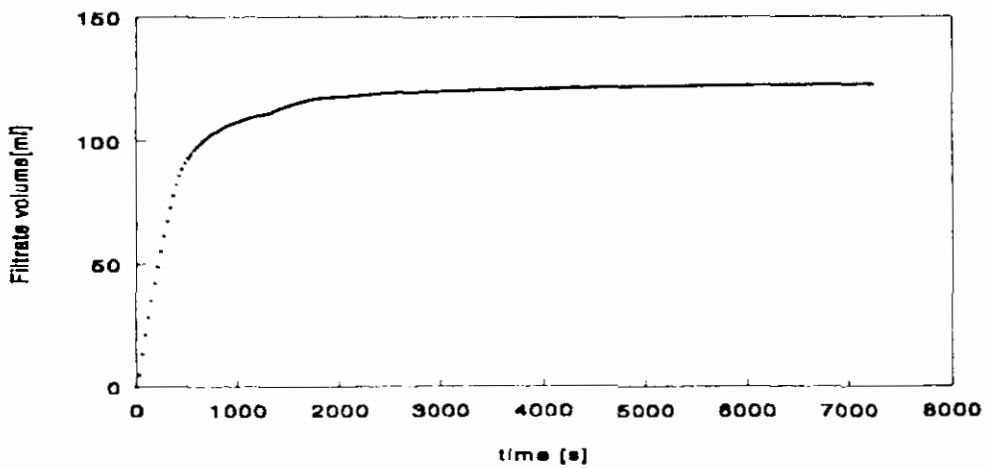
waarbij R_c de koekweerstand is, w de hoeveelheid vaste stof per oppervlakte eenheid, Δp_l de filtratiedruk, η de vloeistof viscositeit, q_l de superficiële vloeistofsnelheid, L_c de koekdikte en K de permeabiliteit. De gemiddelde specifieke filtratieweerstand is een goede maat voor slib karakteristieken en hangt af van het type slib, type en hoeveelheid flocculant en filtratiedruk. In figuur 4 en 5 zijn typische voorbeelden gegeven van filtratieweerstanden versus dosering flocculant. Vrijwel altijd wordt een minimale filtratieweerstand gevonden. In figuur 6 is een voorbeeld gegeven van een persexperiment. Karakteristiek is de snelle initiële persing gevolgd door een langzame consolidatie. In figuur 7 zijn resultaten van hoge druk persexperimenten te zien. Aan de hand van dit figuur is te zien dat eind droge stof gehalten van ± 60 gew% mogelijk zijn. Bij deze vochtgehalten neemt de bindingsenthalpie (maat voor de strekte van de slib-water binding) sterk toe (Herwijn, 1993). Dit betekent dat extreem hoge mechanische krachten nodig zijn om dit gedeelte van het water ter verwijderen. Bij deze vochtgehalten kan slib beter worden gedroogd.



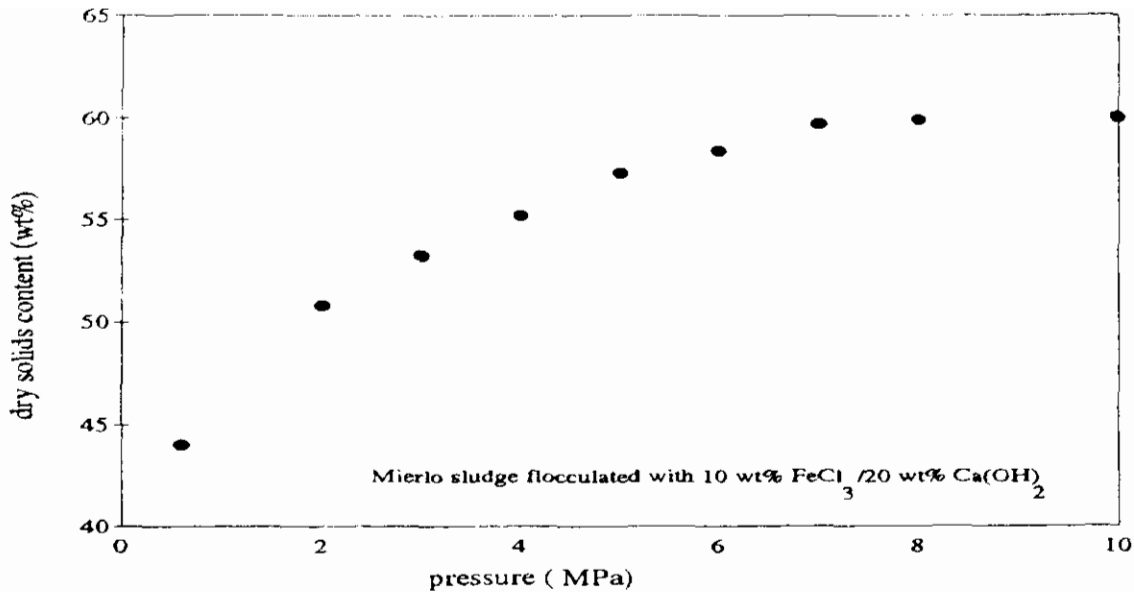
Figuur 4. Gemiddelde specifieke filtratieweerstand versus concentratie ijzerchloride (concentratie Ca(OH)₂ constant op 20 gew%). Doseringen op basis van droge stof gehalte.



Figuur 5. Gemiddelde specifieke filtratieweerstand versus concentratie polyelectrolyt. Doseringen op basis van droge stof gehalte.



Figuur 6. Voorbeeld van een persexperiment.



Figuur 7. Eind droge stof gehalte versus mechanische druk. Mierlo slib geflocculeerd met 10 gew% $FeCl_3$ en 20 gew% $Ca(OH)_2$ op droge stof basis.

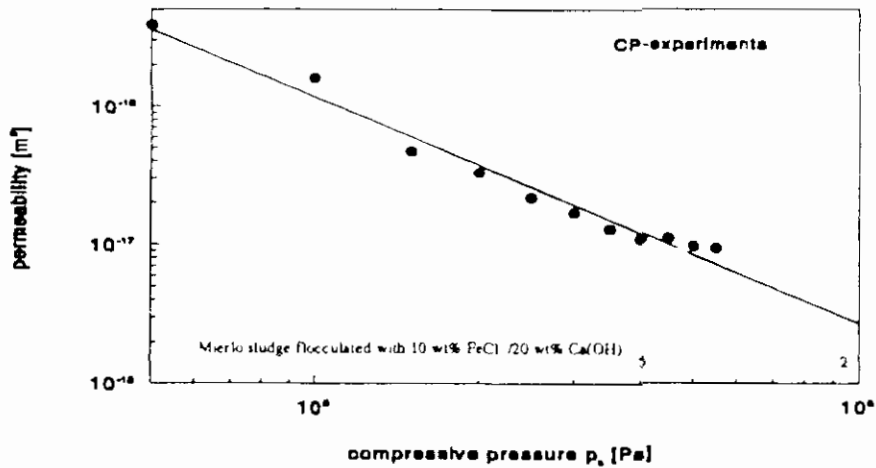
Permeabiliteit en porositeit in relatie tot de compressie druk

In figuur 8 en 9 zijn resultaten van typische compressie-permeabiliteits experimenten weergegeven. De relaties tussen permeabiliteit, porositeit en compressiedruk kunnen in de meeste gevallen worden gefit aan machtsfuncties (van Veldhuizen, 1991). Relaties, die kunnen worden gebruikt zijn (Tiller et al., 1987):

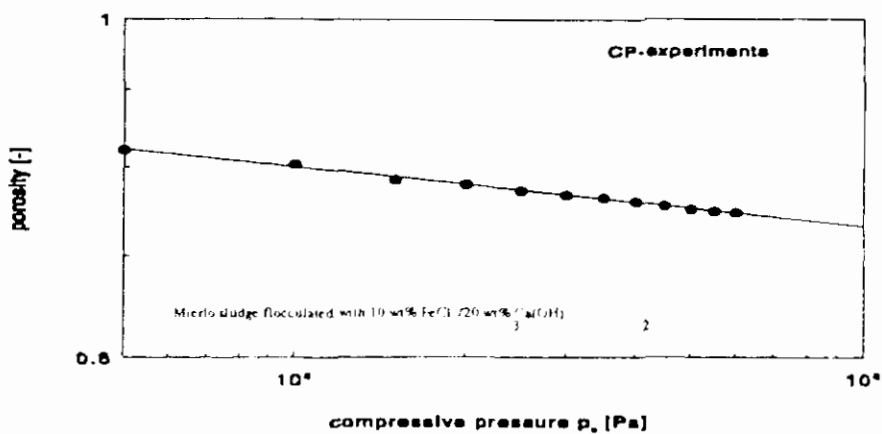
$$\phi_{\infty} = \phi_0 \left(1 + \frac{p_s}{p_a} \right)^{-\lambda} \quad (2)$$

$$K_{\infty} = K_0 \left(1 + \frac{p_s}{p_a} \right)^{-\delta} \quad (3)$$

waarbij ϕ_0 en K_0 de porositeit en permeabiliteit zijn bij compressie druk $p_s=0$; λ en δ zijn compressiecoëfficiënten en p_a is een arbitraire constante. De index oneindig geeft aan dat deze waarden zijn gemeten zijn in evenwichtssituaties. Compressie-permeabiliteits experimenten zijn ook erg bruikbaar voor de karakterisering van slib. Het geeft snel een idee van het eind droge stof gehalte bij verschillende aangelegde mechanische drukken.



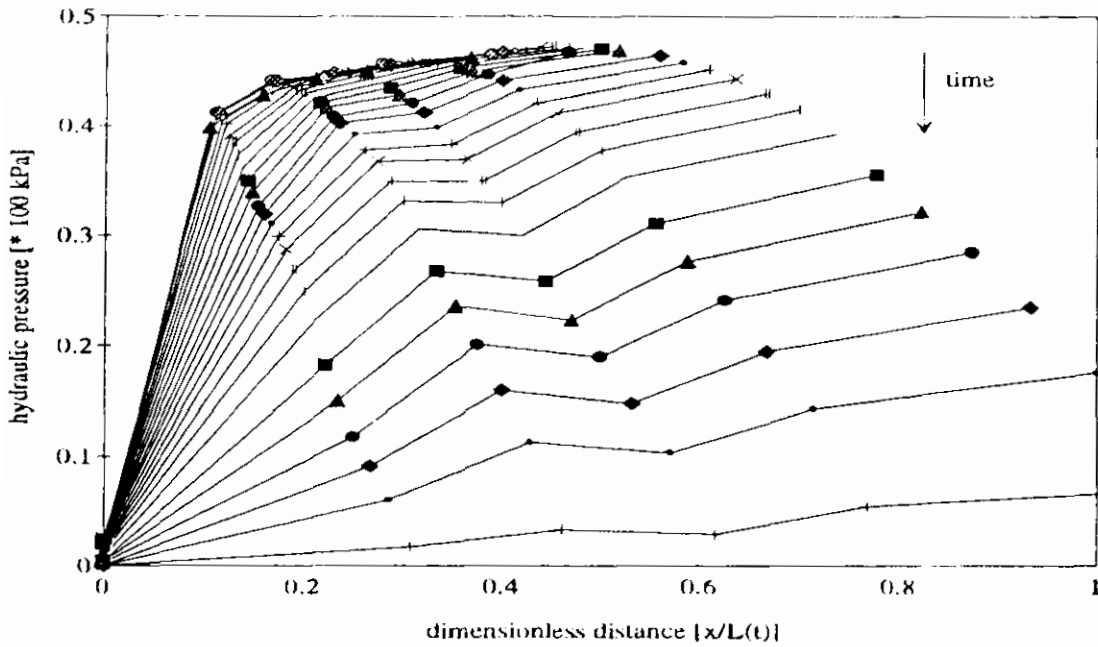
Figuur 8. Voorbeeld van een CP-cel experiment. Permeabiliteit versus compressiedruk.



Figuur 9. Voorbeeld van een CP-cel experiment. Porositeit versus compressiedruk.

Drukverdelingen in slib filterkoeken

In figuur 10 is de vloeistofdrukverdeling tijdens de persfase van slib filterkoek weergegeven. Het eerste profiel is min of meer het einde van de filtratie fase (exacte overgang is moeilijk te bepalen) en het is duidelijk dat er nauwelijks een druk gradiënt aanwezig is in de koek. Dit is typisch voor zeer compressibele filterkoeken zoals die van slib. Aan het einde van de persfase is de vloeistofdruk overal in de koek ongeveer gelijk aan nul, hetgeen een uniforme koekstructuur betekent.



Figuur 10. Vloeistofdruk profielen als functie van de tijd in een slibfilterkoek tijdens de persfase.

Modellering van het filtratie en persgedrag

Om de filtratie en persfase van slib te modelleren zijn een aantal basis vergelijkingen noodzakelijk. Dit is een stromingsvergelijking, een krachtenbalans, constitutieve vergelijkingen en continuïteitsvergelijkingen. Voor de stromingsvergelijking wordt de Darcy-Shirato vergelijking gebruikt:

$$v_l - v_s = \frac{1}{\phi} \frac{K}{\eta} \frac{\partial p_l}{\partial x} \quad (4)$$

waarbij v_l en v_s respectievelijk de lineaire vloeistofsnelheid en vaste stof snelheid zijn. Een eenvoudige krachtenbalans leidt tot:

$$\frac{\partial p_l}{\partial x} + \frac{\partial p_s}{\partial x} + (\rho_s (1 - \phi) + \rho_l \phi) g = 0 \quad (5)$$

De continuïteitsvergelijking is gelijk aan:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_x = \left(\frac{\partial q_l}{\partial x} \right)_t \quad (6)$$

Combinatie van bovenstaande vergelijkingen levert een differentiaalvergelijking op, die de verandering van de porositeit in plaats en tijd beschrijft:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_x = q_{lm} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_t + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{K}{\eta} (1 - \phi) \left[(\rho_s - \rho_l) (1 - \phi) g + \left(\frac{\partial p_s}{\partial x} \right)_t \right] \right] \quad (7)$$

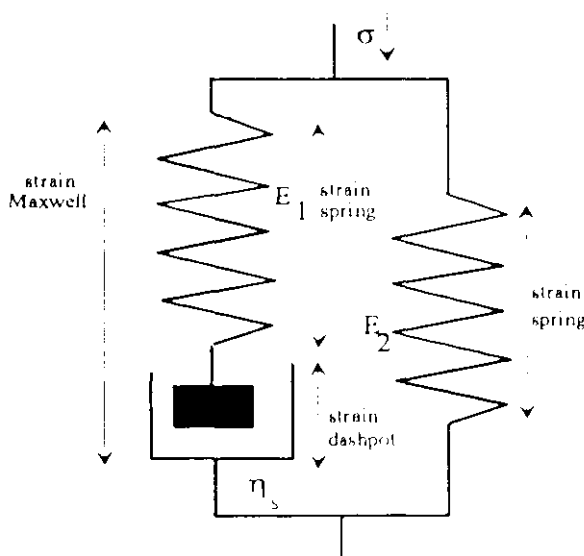
waarbij q_{lm} de superficiële vloeistof snelheid is door het filter medium. Afhankelijk van de juiste randvoorwaarden kan de filtratie fase of de pers fase worden gemodelleerd (La Heij et al., 1992), mits een constitutieve vergelijking bekend is.

Constitutieve vergelijkingen beschrijven de deformatie van de vaste stof matrix in een filter koek en kunnen alleen experimenteel worden bepaald. De CP-cel is b.v. een apparaat waarmee constitutieve vergelijkingen kunnen worden bepaald. Indien de relaties bepaald m.b.v. de CP-cel worden gebruikt voor de modellering wordt aangenomen dat de koek zich elastisch gedraagt. Dit betekent instantane verandering van de vaste stof matrix bij verandering van de compressie druk. Bovendien verandert de elasticiteitsmodulus van het materiaal met veranderende porositeit; dit betekent niet-lineair elastisch materiaalgedrag. Indien het enige tijd duurt voordat het materiaal deformeert, gedraagt het materiaal zich visco-elastisch. In figuur 11 is een schematische weergave getoond van een standaard vaste stof model. In evenwichtssituatie rust alle druk op de veer E_1 en daarom kan dezelfde waarde van E_1 voor puur elastisch materiaal worden gebruikt. De differentiaalvergelijking, die de rek ϵ als functie van de tijd beschrijft, is als volgt:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = -\frac{E_1 \epsilon}{\Psi} - \frac{\eta_s \frac{\partial p_s}{\partial t}}{\left(\Psi \left(E_2 + \epsilon \frac{\partial E_2}{\partial \epsilon} \right) \right)} - \frac{p_s}{\Psi}$$

$$\Psi = \left(\eta_s + \frac{E_1}{\left(\frac{1}{\tau} + \frac{\epsilon}{\eta_s} \frac{\partial E_2}{\partial \epsilon} \right)} + \frac{\epsilon \frac{\partial E_1}{\partial \epsilon}}{\left(\frac{1}{\tau} + \frac{\epsilon}{\eta_s} \frac{\partial E_2}{\partial \epsilon} \right)} \right)$$

(8)



standaard lineaire vaste stof model

Figuur 11. Schematische weergave van het standaard vaste stof model.

waarbij $\tau (=E_2/\eta_s)$ de relaxatietijd is. De relaxatietijd bepaalt de vervormingssnelheid van de vaste stof matrix. De rek is als volgt gerelateerd aan de porositeit:

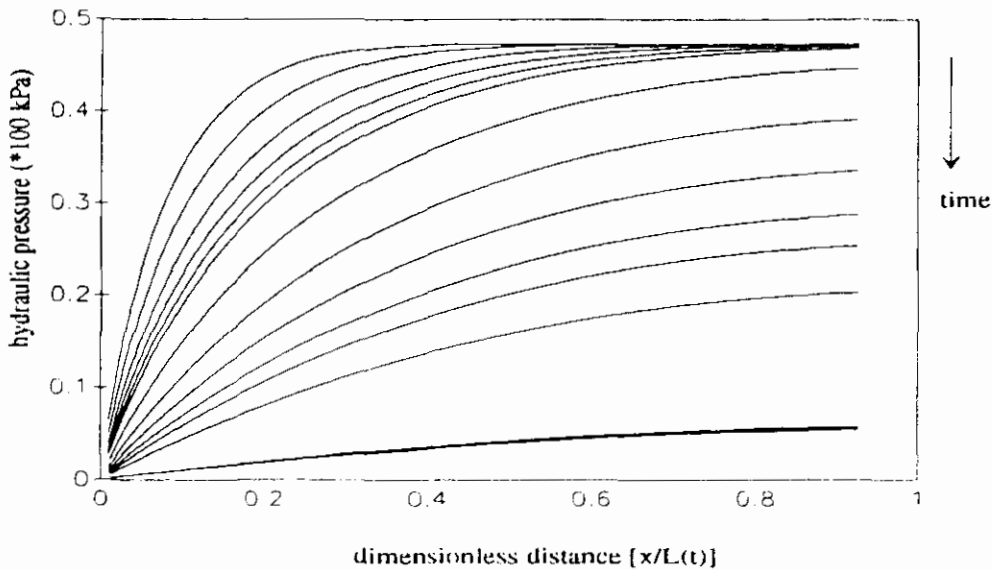
$$\epsilon = \frac{(1-\phi_0)}{(1-\phi)} - 1 \quad (9)$$

Vergelijkingen (7) en (8) moeten gekoppeld worden opgelost om lokaal en op elke tijdstap de verandering van de porositeit in de filterkoek te berekenen.

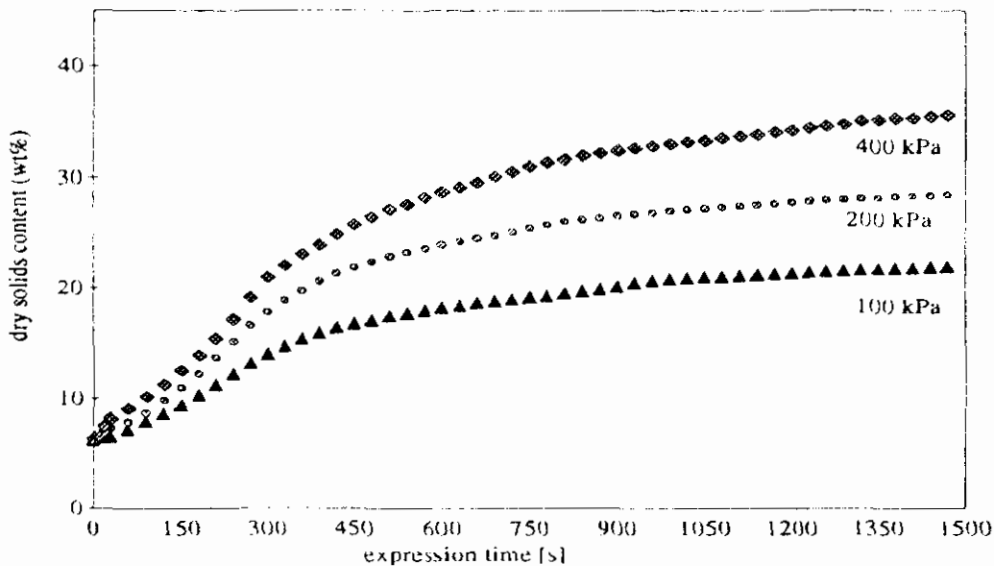
Modellerings resultaten

Omdat de porositeit als functie van plaats en tijd kan worden berekend, kan ook de compressie en de vloeistofdruk als functie van plaats en tijd worden berekend. In figuur 12 zijn berekende vloeistofdruk profielen versus

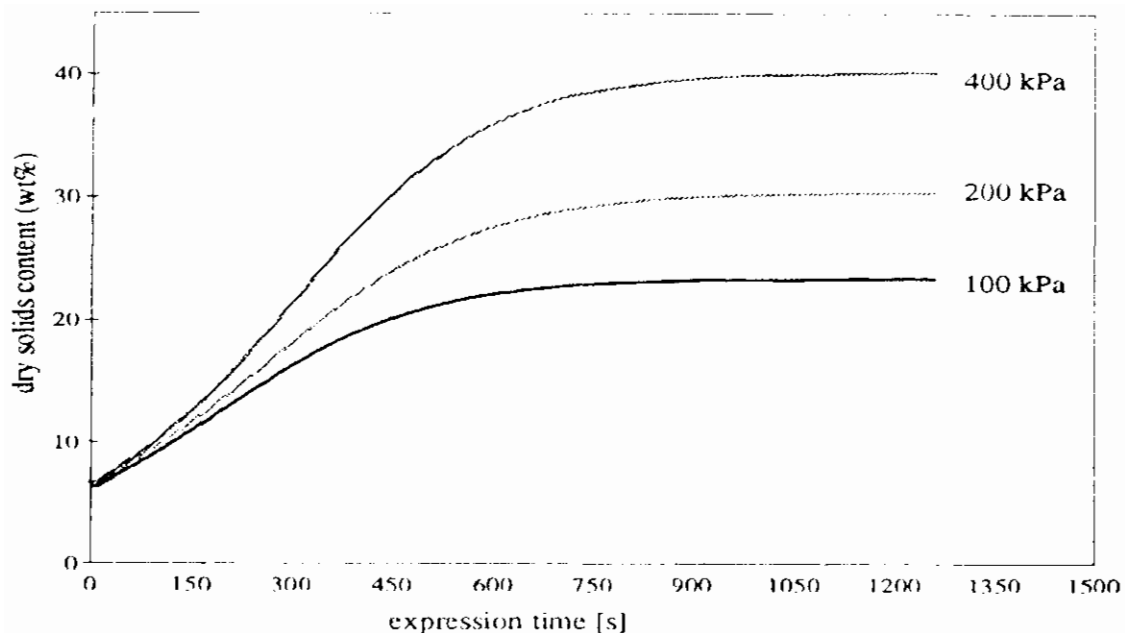
dimensieloze afstand als functie van de tijd uitgezet. De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van niet-lineair elastisch materiaalgedrag. De overeenkomst tussen model en experiment is acceptabel. In figuur 13a is de hoeveelheid droge stof versus perstijd voor slib geflocculeerd met $\text{FeCl}_3/\text{Ca}(\text{OH})_2$ volgens experiment uitgezet. In figuur 13b zijn de modelberekeningen op basis van niet-lineair elastisch materiaalgedrag uitgezet. Wederom is een acceptabele overeenkomst te zien tussen model en experiment. Volgens de modelberekeningen wordt de evenwichtssituatie iets eerder bereikt dan volgens de experimenten. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat er enige kruip (visco-elastisch materiaalgedrag) aan het einde van de persfase optreedt. Bovendien is te zien aan de hand van figuur 13a dat de evenwichtssituatie ongeacht de aangelegde druk altijd op hetzelfde tijdstip wordt bereikt. In figuur 14 is een experimenten en model berekening getoond voor slib geflocculeerd met polyelectrolyt. Omdat het materiaal langzaam deformeert, moet worden aangenomen dat het materiaal zich visco-elastisch gedraagt. Er is een goede overeenkomst tussen model en experiment.



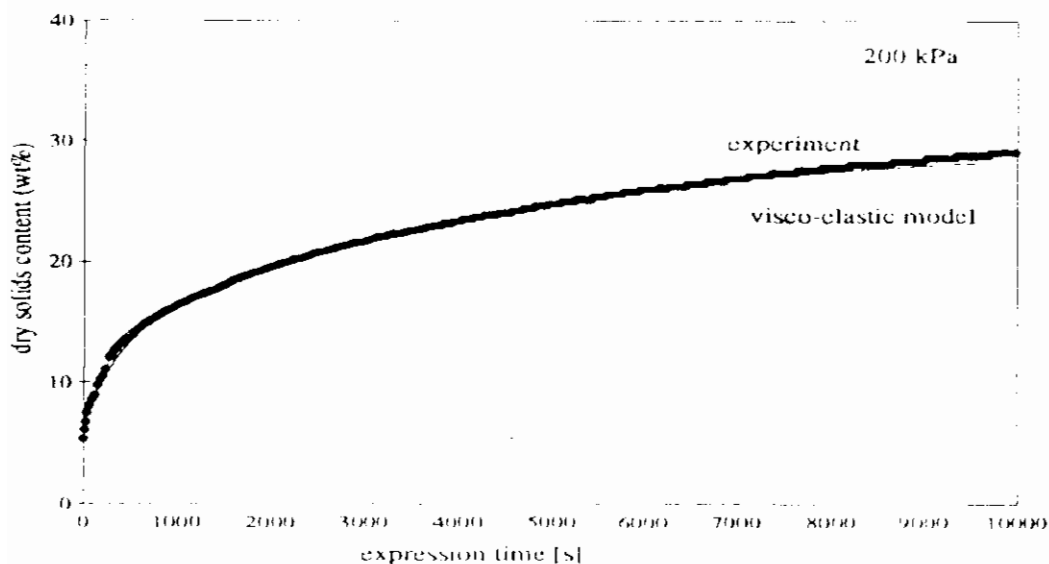
Figuur 12. Berekende vloeistofdruk profielen als functie van de tijd.



Figuur 13a. Gemiddelde hoeveelheid vaste stof versus tijd voor de persfase volgens experiment. Mierlo slib geflocculeerd met 10 gew% FeCl_3 en 20 gew% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ op d.s. basis.



Figuur 13b. Gemiddelde hoeveelheid vaste stof versus tijd voor de persfase volgens model. Mierlo slib geflocculeerd met 10 gew% $FeCl_3$ en 20 gew% $Ca(OH)_2$ op d.s. basis.



Figuur 14. Gemiddelde hoeveelheid vaste stof versus tijd voor de persfase volgens experiment en model. Mierlo slib geflocculeerd met 1.5 gew% p.e..

Conclusies

Met behulp van de hierboven besproken modellen kan het ontwateringsgedrag van slib acceptabel worden beschreven. Het materiaalgedrag kan elastisch of visco-elastisch zijn. Deze fundamentele modellen kunnen worden beschouwd als een goede basis voor apparaatmodellen, waarmee optimalisatie van ontwerp en operatie kunnen worden uitgevoerd.

De snelste ontwatering vindt altijd plaats bij optimale flocculatiecondities. Karakteristiek voor de persing van zuiveringsslibben is de snelle initiële persing, gevolgd door een langzame consolidatie. De tijd waarop de evenwichtssituatie wordt bereikt is onafhankelijk van de aangelegde mechanische druk. Bij lage drukken (300-400 kPa) kunnen reeds hoge droge stof gehalten (35-40 gew%) worden

bereikt. Echter bij hoge drukken (6-10 MPa) kunnen droge stof gehalten van ± 60 gew% worden bereikt.

Symbolenlijst

E_1	elasticiteitsmodulus	Pa
E_2	elasticiteitsmodulus	Pa
g	zwaartekrachtversnelling	$m\ s^{-2}$
K	permeabiliteit	m^2
K_0	permeabiliteit bij $p_s=0$	m^2
L_c	koekdikte	m
p	aangelegde filtratie-pers druk	Pa
p_a	constante in vergelijkingen 2 en 3	Pa
p_s	compressie druk	Pa
R_c	koekweerstand	m^{-1}
t	tijd	s
v_l	lineaire vloeistof snelheid	$m\ s^{-1}$
v_s	lineaire vaste stof snelheid	$m\ s^{-1}$
w	hoeveelheid vaste stof per opp. eenheid	$kg\ m^{-2}$
q_l	superficiële vloeistofsnelheid	$m\ s^{-1}$
q_{lm}	superficiële vloeistofsnelheid door filtermedium	$m\ s^{-1}$
x	afstand in filterkoek	m

Griekse symbolen

α	specifieke filtratieweerstand	$m\ kg^{-1}$
ϵ	rek	-
ϕ	porositeit	-
ϕ_0	porositeit bij $p_s=0$	-
η	vloeistof viscositeit	Pa s
η_s	viscositeit standaard vaste stof model	Pa s
ρ_l	dichtheid vloeistof	$kg\ m^{-3}$
ρ_s	dichtheid vaste stof	$kg\ m^{-3}$
σ	spanning	Pa
τ	relaxatietijd	s

Literatuur

Herwijn, A.J.M., Coumans, W.J.

Characterization of sewage sludges, fundamentals and results

Workshop sewage sludge the Netherlands-Japan, 17-23 oktober 1993, Miyazaki, Japan.

La Heij, E.J., Herwijn, A.J.M., Coumans, W.J., Kerkhof, P.J.A.M.

Filtration and expression behaviour of sewage sludge

gepresenteerd op het jaarlijkse AIChE congres, november 1992, Miami Beach.

Shirato, M., Sambuichi, M., Kato, H., Aragaki, T.

Internal flow mechanism in filter cakes

A.I.Ch.E. J., vol. 15, no.3, p.p. 405-409, 1969.

Tiller, F.M., Yeh, C.S.

The role of porosity in filtration. Part XI: filtration followed by expression

A.I.Ch.E. J., vol. 33, no.8, p.p. 1241-1257, 1987.

Veldhuizen, A.J.W. van
Compressiegedrag van zuiveringslib
Afstudeerverslag, oktober 1991.