# N31085.94-02

3								i	iç	3	е											
y	e	n	е	r	а	t	I	е		r	i	0	0	I	w	а	t	е	r	-		
z	u	i	v	e	r	i	n	g	S	i	n	r	i	С	h	t	i	n	g	е	n	rwzi 2000

A. Gu- 0x-05

# FUNDAMENTELE ASPEKTEN VAN SLIBONTWATERING

Deel 3: Filtratie-expressie modellering



Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling

Postbus 17. 8200 AA Lelystad



Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer

Postbus 8090. 3503 RB Utrecht

-----

NN 51-05,94.02/3

1.1.4

1

jeneratie rioolwaterzuiveringsinrichtingen RWZI 2000



# FUNDAMENTELE ASPEKTEN VAN SLIBONTWATERING

**Deel 3: Filtratie-expressie modellering** 

BIBLIOTHEEK STARINGGEBOUW

auteur(s):

**1** 4 MAARI 1995



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

RWZI 2000 94-02

15/11/19, 1 ... r

Het onderzoek "Toekomstige generatie rioolwaterzuiveringsinrichtingen RWZI 2000" is een samenwerkingsverband van de STOWA en Rijkswaterstaat (RIZA).

#### 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 produktie 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 projektgroep, 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, Diederic 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 NMRapparatuur.

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.

Pres -

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

### INHOUDSOPGAVE

1 INLEIDING	1
2 THEORIE	2
2.1 Algemeen	2
2.2 De compressiedruk	3
2.3 Microbalansen	4
2.3.1 Continuïteitsvergelijkingen'	4
2.3.2 Impulsbalansen	6
2.4 Sedimentatie-effecten	7
2.5 Empirische vergelijkingen	8
2.5.1 De Darcy-Shirato vergelijking	8
2.6 De parabolische differentiaalvergelijking	9
2.7 De verschuivende reandvoorwaarde	10
2.8 Omschrijven van de verschuivende randvoorwaarde	12
2.9 Constitutieve vergelijkingen	12
2.9.1 Elastisch materiaalgedrag	12
2.9.2 Visco-elastisch materiaalgedrag	13
2.10 Combinatie van het standaard vastestofmodel met de parabolische	
differentiaalvergelijking	19
3 EXPERIMENTEEL	21
4 RESULTATEN EN DISCUSSIE	25
4.1 Cp-cel	25
4.2 Filtratie- en expressiecurve	27
4.3 Vergelijking tussen experiment en model	28
4.3.1 Elastisch materiaalgedrag	28
4.3.2 Visco-elastisch materiaalgedrag	30
4.4 Conclusies	33
5 SYMBOLENLIJST	35
6 LITERATUURLIJST	37
APPENDIX A IMMOBILISATIE VAN DE VERSCHUIVENDE RANDVOORWAARDE	38
APPENDIX B TRANSFORMATIE NAAR VASTESTOFCOÖRDINAAT	40
APPENDIX C INITIALISATIE	42
APPENDIX D PROGRAMMALISTINGS	46

#### **1 INLEIDING**

In dit deel, dat dient ter ondersteuning van hoofdstuk 3 in deel I, worden de modellering van het ontwateringsgedrag van slib en de verificatie uitgebreid besproken. In het volgende hoofdstuk wordt de theorie besproken, in hoofdstuk 3 worden de opstellingen die nodig zijn voor modellering en verificatie, besproken en worden enkele typische metingen getoond. In hoofdstuk 4 wordt de verificatie van het model aan experimenten behandeld. Verder zijn een aantal appendices toegevoegd, met onder andere uitdraaien van computerprogramma's. Dit deel is een samenstelling van de afstudeerverslagen van Marga Verduin en Oscar Meijer.

#### **2 THEORIE**

#### 2.1 Algemeen

Om zuiveringsslib te ontwateren wordt vaak gebruik gemaakt van mechanische middelen. Een voorbeeld hiervan is het uitpersen door middel van kamerfilter- of zeefbandpersen. Hierbij wordt, door gebruik te maken van poreuze filtermedia, het water uit het slib geperst. Het uitpersen van slib vindt plaats in twee fasen, de filtratie- en de expressiefase. Een schematische voorstelling van de filtratie en expressie van slib is weergegeven in figuur 1. De drukmeters in deze figuur geven de compressieve druk op de deeltjes ( $P_0$ ) aan.



Figuur 1. Schematische weergave van de filtratie en de expressie van slib.

In de figuur is te zien dat tijdens de filtratiefase de slurry wordt samengeperst waardoor een koek ontstaat. Deze koek wordt gedurende de filtratie steeds dikker (dL/dt > 0, waarbij L de koekdikte voorstelt). Aan het begin van het experiment is de vloeistofdruk ( $P_1$ ) overaf in de slurry gelijk aan de druk die er mechanisch opgezet wordt (P), terwijl de compressieve druk op de deeltjes dan overal gelijk is aan nul. Gedurende de filtratiefase blijft aan de bovenzijde van de koek de vloeistofdruk gelijk aan P.

Bij het filtermedium wordt de vloeistofdruk steeds lager, terwijl de compressieve druk op de deeltjes steeds groter wordt. Overal in de koek geldt dat P<sub>1</sub> en P<sub>2</sub> samen gelijk zijn aan P. Wanneer de uitstroomsnelheid door het filtermedium een constante waarde bereikt, kan bij benadering gesteld worden dat de expressiefase begint. Hierbij wordt de koek uitgeperst (waarbij dL/dt<0). De vloeistofdruk aan de bovenzijde van de koek wordt steeds lager tot deze net als bij het filtermedium gelijk is aan nul. De compressieve druk is dan in de hele koek gelijk aan P.

In de hierna volgende paragrafen zal een model worden afgeleid waarmee de bovengenoemde processen worden beschreven. Allereerst worden een aantal onderwerpen besproken die worden gebruikt bij het opstellen van het filtratie- en expressiegedrag van compressibele materialen.

Deze parabolische differentiaalvergelijking wordt in §2.6 opgesteld tezamen met de daarbij behorende randvoorwaarden. Bij één van deze randvoorwaarden hebben we te maken met een verschuivende randvoorwaarde. In §2.7 leiden we een vergelijking af voor de groeisnelheid van de filterkoek zodat de bewegende randvoorwaarde kan worden gelokaliseerd.

#### 2.2 De compressiedruk.

Stel dat bij filtratie met constante filtratiesnelheid de hydraulische drukgradiënt overal in de koek gelijk is. We spreken in dat geval van een niet-samendrukbare of incompressibele filterkoek. Indien de filterkoek wel compressibel is, wordt de hydraulische drukgradiënt een functie van de plaats in de koek. Dit betekent dat de weerstand in de koek niet overal gelijk is.



Figuur 2. Meesleepkrachten t.g.v. het snelheidsverschil tussen vloeistof en deeltjes.

 $A = oppervlak (m^2)$ 

 $F_s$  = meesleepkracht (N)

- $u_1$  = snelheid van de vloeistoffase in de koek (m/s)
- $u_s$  = snelheid van de vaste stof in de koek (m/s)

Doordat de koek wordt samengedrukt hebben de deeltjes in de koek een snelheid  $u_s$ . De vloeistof stroomt met een hogere snelheid  $u_1$  door de koek. Ten gevolge van het snelheidsverschil oefent de vloeistof op de deeltjes een 'meesleep' kracht  $F_s$  uit. Indien wordt verondersteld dat de deeltjes in de koek puntcontact hebben, zal de meesleepkracht  $F_s$  worden doorgegeven op de volgende deeltjes. In figuur 2 is de situatie weergegeven. De

cumulatieve meesleepkracht  $F_s$  gedeeld door het doorsnee oppervlak A wordt de compressiedruk  $P_s$  genoemd.

#### 2.3 Microbalansen.

In 2.3.1 worden de continuïteitsvergelijkingen afgeleid voor de vloeistof- en vaste fase. De impulsbalans, die onder bepaalde voorwaarden overgaat in een krachtenbalans, is opgesteld in 2.3.2.

#### 2.3.1 Continuïteitsvergelijkingen.



Figuur 3. Opstellen continuïteitsvergelijkingen.

- L = koekdikte(m)
- $P_i = vloeistofdruk (Pa)$
- $P_s = compressiedruk (Pa)$
- $q_1$  = superficiële vloeistofsnelheid in de koek (m/s)
- $q_{l,0}$  = superficiële vloeistofsnelheid in de koek bij het koek/slurry-oppervlak (m/s)
- $q_{im}$  = superficiële vloeistofsnelheid in het filtermedium (m/s)
- $q_{l,sl}$  = superficiële vloeistofsnelheid in de slurry (m/s)
- $q_s$  = superficiële vastestofsnelheid in de koek (m/s)
- $q_{s,0}$  = superficiële vastestofsnelheid in de koek bij het koek/slurry-oppervlak (m/s)
- $q_{s,sl}$  = superficiële vastestofsnelheid in de slurry (m/s)
- t = tijd(s)
- x = reële hoogte in de filterkoek tussen 0 en L(t) (m)

In figuur 3 is de koek met de slurryaanvoer schematisch weergegeven. De continuïteitsvergelijkingen voor de vloeistof- en vaste fase worden opgesteld over een plakje  $\Delta x$ . Een massabalans over de vloeistoffase levert:

$$\Delta x \frac{\partial \left(\varepsilon_{i} \rho_{i} A\right)}{\partial t} = \left(A \rho_{i} q_{i}\right)_{x + \Delta x, t} - \left(A \rho_{i} q_{i}\right)_{x, t}$$
(1)

Indien we delen door  $\Delta x$ ,  $\rho_1$  en A en vervolgens  $\Delta x$  naar nul laten naderen gaat vergelijking (1) over in de uiteindelijke vorm van de continuïteitsvergelijking voor de vloeistoffase.

$$\left(\frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t}\right)_x = \left(\frac{\partial q_l}{\partial x}\right)_l$$
(2)

Op dezelfde manier is de continuïteitsvergelijking voor de vaste fase (3) af te leiden.

$$\left(\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t}\right)_x = \left(\frac{\partial q_s}{\partial x}\right)_t$$
(3)

Het verband tussen de porositeit van de vloeistof- en vaste fase is in formule (4) gegeven.

$$\varepsilon_l + \varepsilon_s = 1 \implies \frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} = 0$$
 (4)

De continuïteitsvergelijkingen (2) en (3) kunnen in vergelijking (4) worden ingevuld. Na integratie met de randvoorwaarde (5) krijg je een verband tussen  $q_i$  en  $q_s$  (vergelijking (6)). Dit verband is geldig is op een willekeurige plaats in de koek of slurry.

$$x = 0 \rightarrow q_s = 0 \Rightarrow q_l = q_{lm}$$
 (5)

$$q_i + q_s = q_{bm} \tag{6}$$

#### 2.3.2 Impulsbalansen.



Figuur 4. Opstellen impulsbalans.

I = impuls overdracht (N)  $A_1 = doorsnee oppervlak van de vloeistoffase (m<sup>2</sup>)$  $A_s = doorsnee oppervlak van de vaste fase (m<sup>2</sup>)$ 

Bij lage vloeistof- en vastestofsnelheden is de interne impuls (en de impulsophoping) te verwaarlozen ten opzichte van het extern aangelegde drukverschil en de zwaartekrachteffecten. De impulsbalans gaat over in een krachtenbalans. In figuur 4 is de situatie weergegeven. De krachtenbalans voor de vloeistof- en vaste fase zijn met elkaar gekoppeld via de impulsoverdracht I. Over het plakje  $\Delta x$  kan een krachtenbalans voor de vloeistoffase worden opgesteld.

$$\left(\varepsilon_{l}AP_{l}\right)_{x} = \left(\varepsilon_{l}AP_{l}\right)_{x+\Delta x} + \varepsilon_{l}A\rho_{l}g\Delta x + I$$
(7)

Indien we  $\Delta x$  naar nul laten naderen en delen door A krijgen we vergelijking (8).

$$P_{I}\partial\varepsilon_{I} + \varepsilon_{I}\partial P_{I} + \varepsilon_{I}\rho_{I}g\,\partial x = -\frac{I}{A}$$
(8)

Op dezelfde manier is een krachtenbalans over de vaste fase op te stellen.

$$\partial P_s + P_l \partial \varepsilon_s + \varepsilon_s \partial P_l + \varepsilon_s \rho_s g \, \partial x = \frac{I}{A} \tag{9}$$

Uit het gelijkstellen van de impulstermen volgt de algemene vorm van de krachtenbalans.

$$\frac{\partial P_s}{\partial x} + \frac{\partial P_l}{\partial x} + (\varepsilon_l \rho_l + \varepsilon_s \rho_s)g = 0 \tag{10}$$

#### 2.4 Sedimentatie-effecten.



Figuur 5. Sedimentatie-effecten bij filtratie.

$\mathbf{u}_{1,s1}$	= snelheid van de vloeistoffase in de slurry (m/s)
u,,,sì	= snelheid van de vaste stof in de slurry (m/s)
u,	= slipsnelheid tussen de vloeistof- en vaste fase (m/s)

In figuur 5 is de situatie weergegeven die optreedt als er tijdens filtratie sprake is van sedimentatie. Bij filtratie waarbij sedimentatie optreedt heeft de vaste fase in de slurry een hogere snelheid dan de vloeistoffase. Voor de modellering van sedimentatie-effecten wordt aangenomen dat alle deeltjes met dezelfde snelheid bezinken. De bezinksnelheid bij batchsedimentatie noemen we  $u_{s,sed}$ . Indien we in het geval van batchsedimentatie ( $q_{lm}=0$ ) een massabalans over de slurry opstellen leidt dat tot een uitdrukking voor  $u_{l,sed}$ .

$$u_{l,sed} = -u_{s,sed} \frac{\varepsilon_{s,sl}}{\varepsilon_{l,sl}}$$
(11)

 $u_{1,sed}$  = snelheid van de vloeistoffase in de slurry bij batchsedimentatie (m/s)  $u_{s,sed}$  = snelheid van de vaste fase in de slurry bij batchsedimentatie (m/s)

De slipsnelheid u, tussen de vloeistof- en vaste fase is gelijk aan:

$$u_{t} = u_{s,sed} - u_{l,sed} = \frac{u_{s,sed}}{\varepsilon_{l,sl}}$$
(12)

De slipsnelheid  $u_t$  is geldig bij zowel batchsedimentatie als bij filtratie waarbij sedimentatie optreedt. In het laatste geval wordt de vaste stof snelheid in de slurry  $u_{s,sl}$ .

$$u_{s,sl} = u_{l,sl} + u_{l} = u_{l,sl} + \frac{u_{s,sed}}{\varepsilon_{l,sl}}$$
(13)

Indien u<sub>s,sl</sub> als functie van het drogestofgehalte in de slurry gewenst is, dan kan met

batchsedimentatie het verband tussen  $u_{s,sed}$  en het drogestofgehalte gemeten worden en in vergelijking (13) worden ingevuld.

#### 2.5 Empirische vergelijkingen.

De Darcy-Shirato-vergelijking geeft een verband tussen de filtratiesnelheid en de hydraulische drukgradiënt in de koek. De Darcy-Shirato-vergelijking wordt behandeld in 2.5.1.

#### 2.5.1 De Darcy-Shirato-vergelijking.

De algemene vorm van de Darcy-Shirato-vergelijking, rekening houdend met de zwaartekrachteffecten [1], is gegeven in vergelijking (14).

$$q_{ls} = q_{l} - q_{s} \frac{\varepsilon_{l}}{\varepsilon_{s}} = \frac{\partial \phi}{\partial x}$$
(14)

- $q_{ls}$  = superficiële verschilsnelheid tussen vloeistof en vaste fase in de koek (m/s)
- $\phi$  = snelheidspotentiaal (m<sup>2</sup>/s)

De snelheidspotentiaal  $\phi$  wordt bepaald door:

$$\phi = \frac{K}{\eta} (P_l + \rho_l g x) \tag{15}$$

K = permeabiliteit (m<sup>2</sup>)

 $\eta$  = dynamische viscositeit van de vloeistoffase (Pa's)

Bij filtratie is de zwaartekracht van de vloeistoffase meestal te verwaarlozen ten opzichte van het aangelegde drukverschil. Voor de volledigheid zullen we de zwaartekrachteffecten hier toch meenemen. Combinatie van de vergelijkingen (6), (14) en (15) levert een vergelijking voor  $q_1$ , geldig op een willekeurige plaats in de koek.

$$q_{i} = \varepsilon_{i} q_{im} + \varepsilon_{s} \frac{K}{\eta} \left( \frac{\partial P_{i}}{\partial x} + \rho_{i} g \right)$$
(16)

Met behulp van de krachtenbalans (10) kan qi ook in termen van P, worden uitgedrukt.

$$q_{l} = \varepsilon_{l} q_{lm} - \varepsilon_{s} \frac{K}{\eta} \left( \frac{\partial P_{s}}{\partial x} + \langle \rho_{s} - \rho_{l} \rangle \varepsilon_{s} g \right)$$
(17)

#### 2.6 De parabolische differentiaalvergelijking.

De parabolische differentiaalvergelijking wordt verkregen door vergelijking (17) in te vullen in de continuïteitsvergelijking van de vloeistoffase.

$$\left(\frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t}\right)_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \varepsilon_l q_{lm} - \varepsilon_s \frac{K}{\eta} \left[ \frac{\partial P_s}{\partial x} + (\rho_s - \rho_l) \varepsilon_s g \right] \right]_t$$
(18)

De bijbehorende randvoorwaarden zijn:

$$x = 0 \quad \Rightarrow \quad q_i = q_{im} , P_s = P_s|_{x=0}$$
(19)

$$x = L \rightarrow \varepsilon_s = \varepsilon_{s,0}, P_s = 0$$
 (20)

Tijdens de expressiefase geldt bij het medium dat de compressieve druk op de deeltjes niet verandert. Dit betekent dat de porositeit gelijk blijft aan de porositeit die daar tijdens de filtratiefase is bereikt. Aan de bovenkant van de filterkoek bevindt zich een zuiger, waardoor hier geldt dat de afgeleide van de porositeit naar de plaatscoördinaat gelijk is aan nul.

De randvoorwaarden bij expressie zijn dus:

$$t > 0$$
  $x = 0$   $\varepsilon = \varepsilon_{f,m}$  (21)

$$t > 0$$
  $x = H(t)$   $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$  (22)

Waarbij geldt:

 $\varepsilon_{fm}$  = porositeit bij het medium aan het einde van de filtratiefase [-]

Voor de oplossing van de differentiaalvergelijking voor de filtratiefase maken we gebruik van dimensieloze coördinaten (zie appendix A). Na de invoering van dimensieloze coördinaten en omschrijven naar de voidratio wordt de parabolische differentiaalvergelijking:

$$\frac{L^{2}}{\left(1+e\right)^{2}} \left[\frac{\partial e}{\partial \tau}\right]_{\varphi} = \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{-K}{\left(1+e\right)\eta} \left[\frac{\partial P_{s}}{\partial e}\right]_{\tau} \left[\frac{\partial e}{\partial \varphi}\right]_{\tau}\right] + \frac{L}{\left(1+e\right)^{2}} \left[q_{l_{s}} + \varphi \frac{dL}{dt} + \left[2 - \frac{\delta}{\beta}\right] \frac{K}{\left(1+e\right)\eta} (\rho_{s} - \rho_{l})g\right] \left[\frac{\partial e}{\partial \varphi}\right]_{\tau},$$
(23)

Daar de totale koekhoogte niet en de hoogte van de vaste stof wel constant is tijdens de expressie schrijven we vergelijking (18) in vastestofcoördinaten. De afleiding naar vastestofcoördinaten is uiteengezet in appendix B. Voor de vastestofcoördinaat y geldt:

$$y = \int_{D}^{\infty} (1 - \varepsilon) dx \tag{24}$$

Met gebruik van de vastestofcoördinaat en de porositeit omgeschreven in voidratio wordt vergelijking (17) nu:

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ q_{l,m} - \frac{K}{\eta} \frac{1}{1+e} \left(\frac{\partial P_{s}}{\partial e}\right)_{t} \left(\frac{\partial e}{\partial y}\right)_{t} \right]$$
(25)

Waarbij de term  $(\partial q_{l,m}/\partial y)_l$  gelijk is aan 0, omdat  $q_{l,m}$  gelijk is aan de totale uitstroomsnelheid u<sub>t</sub>, die constant is over de gehele koek.

Nu kunnen vergelijking (23) en (25) worden opgelost mits het verband tussen de compressieve druk ( $P_s$ ) en de voidratio (e) c.q. de porositeit ( $\varepsilon$ ) en de tijd bekend is. Die verbanden worden beschreven door de zogenaamde constitutieve vergelijkingen.

#### 2.7 De verschuivende randvoorwaarde.

Op plaats x = L is randvoorwaarde (20) geldig. Door de groei van de koek verschuift deze de randvoorwaarde voortdurend in de x-richting. Om de randvoorwaarde te kunnen lokaliseren moet de groeisnelheid dL/dt van de koek bekend zijn.



Figuur 6. Bepalen verschuivende randvoorwaarde.

In figuur 6 is het koek/slurry-oppervlak weergegeven op de tijdstippen t en  $t+\Delta t$ . In deze tijdstap groeit de koek met  $\Delta L$ . Gedurende het tijdstapje  $\Delta t$  wordt een massabalans over het plakje  $\Delta L$  opgesteld. De ingaande min de uitgaande vloeistofstroom is gelijk aan de verandering van de hoeveelheid vloeistof in het plakje.

$$q_{l,sl}\rho_{l}\Delta t - q_{l,0}\rho_{l}\Delta t = \varepsilon_{l,0}\rho_{l}\Delta L - \varepsilon_{l,sl}\rho_{l}\Delta L$$
(26)

Indien we  $\Delta x$  en  $\Delta L$  naar nul laten naderen en vergelijking (26) omschrijven krijgen we een term voor dL/dt.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{q_{l,sl} - q_{l,0}}{\varepsilon_{l,0} - \varepsilon_{l,sl}}$$
(27)

Invullen van  $u_{s,sl}$  (13) in een massabalans over de slurry (28), levert een uitdrukking voor  $q_{l,sl}$  (29).

$$q_{i,sl} + q_{s,sl} = u_{l,sl} \varepsilon_{l,sl} + u_{s,sl} \varepsilon_{s,sl} = q_{lm}$$
(28)

$$q_{l,sl} = \varepsilon_{l,sl} q_{lm} - \varepsilon_{s,sl} u_{s,sed}$$
(29)

De term  $q_{1,0}$  is af te leiden uit de integratie van de continuïteitsvergelijking voor de vloeistoffase tussen de grenzen (30) en (31).

$$x = 0 \quad \rightarrow \quad q_i = q_{im} \tag{30}$$

$$x = L \rightarrow q_l = q_{l,0} \tag{31}$$

$$q_{l,0} = q_{lm} + \int_{0}^{L} \left(\frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t}\right)_{x} \partial x$$
(32)

De verschuivende randvoorwaarde volgt uit het invullen van de gevonden termen voor  $q_{l,sl}$  (29) en  $q_{l,0}$  (32) in vergelijking (27).

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\varepsilon_{s,sl}(q_{lm} + u_{s,sed}) + \int_{0}^{L} \left(\frac{\partial \varepsilon_{l}}{\partial t}\right)_{x} \partial x}{\varepsilon_{l,sl} - \varepsilon_{l,0}}$$
(33)

In plaats van  $q_{i,0}$  af te leiden uit de integratie van de continuïteitsvergelijking kan  $q_{i,0}$  ook berekend worden uit de Darcy-Shirato-vergelijking (vergelijking 17).

$$q_{i,0} = \varepsilon_{i,0} q_{im} - \varepsilon_{s,0} \left[ \frac{K}{\eta} \left[ \frac{\partial P_s}{\partial x} + (\rho_s - \rho_i) \varepsilon_s g \right] \right]_{x=l.}$$
(34)

Het invullen van vergelijking (29) en (34) in vergelijking (27) leidt tot een andere vorm van de verschuivende randvoorwaarde.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\varepsilon_{s,0}}{\left(\varepsilon_{l,0} - \varepsilon_{l,sl}\right)} \left\{ \frac{K}{\eta} \left( \frac{\partial P_s}{\partial x} + \left(\rho_s - \rho_l\right) \varepsilon_s g \right) \right\}_{x=L} - \frac{\varepsilon_{s,sl}}{\left(\varepsilon_{l,0} - \varepsilon_{l,sl}\right)} u_{s,sed} - q_{bn}$$
(35)

#### 2.8 Omschrijven van de verschuivende randvoorwaarde.

De verschuivende randvoorwaarde in reële coördinaten is afgeleid in 2.7, vergelijking (33). Het is voldoende om deze vergelijking alleen naar de dimensieloze coördinaat om te schrijven.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\varepsilon_{s,sl}(q_{lm} + u_{s,sed}) - L \int_{0}^{1} \left(\frac{\partial \varepsilon_{l}}{\partial \tau}\right)_{\varphi} \partial \varphi}{\varepsilon_{l,sl} - \varepsilon_{l,0} + \int_{0}^{1} \varphi \partial \varepsilon_{l}}$$
(36)

#### 2.9 Constitutieve vergelijkingen

#### 2.9.1. Elastisch materiaalgedrag

Vergelijking (25) kan bijvoorbeeld worden opgelost door de rechtse term als functie van de voidratio te schrijven. Daarvoor moet de relatie tussen de compressieve druk en de voidratio  $(\partial P_s/\partial e)$  bekend zijn. Wanneer het materiaalgedrag van de vaste stof als elastisch beschouwd kan worden, mogen onderstaande constitutieve vergelijkingen gebruikt worden. Constitutieve vergelijkingen beschrijven de relaties tussen de koekstructuur (porositeit en permeabiliteit) en de compressieve druk die op de slibkoekdeeltjes wordt uitgeoefend. Onderstaande vergelijkingen zijn afkomstig uit het model van Tiller<sup>2</sup>. In deze vergelijkingen is  $P_a$  een constante die wordt gebruikt om de compressieve druk dimensieloos te maken. De constanten  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  en n zijn de zogenaamde compressie-coëfficiënten, waarbij voor  $\delta$  geldt dat deze gelijk is aan de som van  $\beta$  en n.

$$\varepsilon_{\infty} = \varepsilon_{\alpha} \left[ 1 + \frac{P_{\alpha}}{P_{\alpha}} \right]^{-\lambda}$$
(37)

$$\varepsilon_{yx} = \varepsilon_{yy} \left[ \frac{1 + \frac{P_y}{P_a}}{\frac{1}{P_a}} \right]^{\beta}$$
(38)

$$K_{\infty} = K_0 \left( 1 + \frac{P_{\gamma}}{P_a} \right)^{-\delta}$$
(39)

$$\alpha_{\infty} = \alpha_0 \left[ 1 + \frac{P_s}{P_a} \right]^n \tag{40}$$

Waarbij geldt:

α	=	specifieke filtratieweerstand	[m <sup>-2</sup> ]
$\varepsilon_{s0}$	=	porositeit van de vaste stof	[-]

 $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_{s0}$ ,  $K_0$  en  $\alpha_0$  zijn dus respectievelijk de porositeit van de vloeistof, de porositeit van de vaste stof, de permeabiliteit en de specifieke filtratieweerstand in onbelaste toestand. De parameters zijn materiaalspecifiek. De index  $\infty$  geeft aan dat deze parameters zijn gemeten in een evenwichtssituatie.

Met deze relaties kan de afgeleide van de compressieve druk naar de voidratio uit de parabolische differentiaalvergelijking worden bepaald.

Voor de compressieve druk kan dan namelijk geschreven worden:

$$P_{s} = \left[ \left( \frac{1+e_{0}}{1+e} \right)^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right] P_{a}$$

$$\tag{41}$$

Voor de afgeleide van de compressieve druk naar de voidratio geldt dus:

$$\frac{\partial P_s}{\partial e} = -\frac{P_a}{\beta} \frac{1}{(1+e)} \left(\frac{1+e_0}{1+e}\right)^{\frac{1}{\beta}}$$
(42)

Door combinatie van vergelijking (37) en (38) hebben we een verband tussen de permeabiliteit en de porositeit.

#### 2.9.2. Visco-elastisch materiaalgedrag

In deze paragraaf is het materiaalgedrag van de vaste stof als visco-elastisch beschouwd. In de visco-elastische materiaalmodellen wordt zuiver elastisch gedrag voorgesteld door een veer en zuiver visceus gedrag door een demper. Door een combinatie van de veer en de demper kan visco-elastisch gedrag voorgesteld worden. Er zijn verschillende visco-elastische materiaalmodellen bekeken: Maxwell-model, Kelvin-Voigt-model en het vastestofmodel. De schematische weergave van deze modellen is te zien in figuur 7.

Om vergelijking (25) op te lossen kan, net als bij het elastische model, ook hier de partiële afgeleide van de compressieve spanning naar de voidratio worden bepaald. Een andere oplosmethode is om de linkse term van vergelijking (25)  $(\partial e/\partial t)_y$  te schrijven als functie van de compressieve druk. Hierdoor ontstaat een parabolische differentiaalvergelijking in termen van de compressieve druk. Beide oplosmethoden zijn bekeken.



Figuur 7. Schematische weergave van de verschillende visco-elastische materiaalmadellen.

Met de modellen is het mogelijk om bij constante x de partiële afgeleide van de rek (en hiermee die van de voidratio) naar de tijd te bepalen. Ook is het mogelijk om een relatie af te leiden tussen een opgelegde trekspanning ( $\sigma$ ) en de daardoor ontstane rek ( $\epsilon$ ).

Om de in de vorige paragraaf afgeleide parabolische differentiaalvergelijking op te lossen is het noodzakelijk dat we de relatie tussen de opgelegde compressieve druk ( $P_s$ ) en de voidratio (e) kennen. De afgeleide relatie tussen de trekspanning en de rek moet daartoe worden omgeschreven naar termen van voidratio en compressieve druk. In de onderstaande vergelijkingen geeft de index 1 aan dat het hierbij om de vloeistof gaat en de index 0 geeft aan dat het om de onbelaste situatie gaat. De rek van het materiaal kan als volgt worden gedefinieerd:

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{V - V_0}{V_0}$$
(43)

Waarbij:

$$V = volume [m3]$$
  
l = koekdikte [m]

Voor de porositeit ( $\varepsilon$ ) en de voidratio (e) kan geschreven worden:

Door de formules voor de voidratio en de porositeit in te vullen in vergelijking (43) kan de

rek worden geschreven als functie van de voidratio:

$$\epsilon = \frac{e(V_0 - V_{10}) - V_{10}}{V_0} = e - \varepsilon_0 (1 + e) = \frac{e - e_0}{1 + e_0}$$
(45)

Ook geldt:

$$\frac{d\epsilon}{de} = \frac{1}{1+e_0} \tag{46}$$

Bij constante x geldt dan voor de afgeleide van de rek naar de tijd:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{1+e_0} \frac{de}{dt}$$
(47)

De relatie tussen de trekspanning en de compressieve druk:

$$\sigma = -P_s \quad en \quad d\sigma = -dP_s \tag{48}$$

Voordat de verschillende visco-elastische modellen behandeld worden, worden eerst een aantal algemene formules besproken.

Voor de spanning over een veer geldt:

$$\sigma_{vere} = E\epsilon \tag{49}$$

Voor de spanning over een demper geldt:

$$\sigma_{demper} = \eta \frac{d\epsilon}{dt} = \tau \cdot E \frac{d\epsilon}{dt}$$
(50)

Waarbij:

E	=	elasticiteitsmodulus	[Pa]
η	=	viscositeit	[Pa s]
τ	=	relaxatietijd	[S]

#### Het Maxwell-model

Het Maxwell-model (figuur 7) bestaat uit een in serie geschakelde veer en demper. Voor een in serie geschakeld systeem geldt dat de spanning in de veer gelijk is aan die in de demper, dit is tevens de totale spanning:

$$\sigma = \sigma_{veer} = \sigma_{demper} = E\epsilon_{veer} = \eta \left[\frac{d\epsilon}{dt}\right]_{demper}$$
(51)

De rek in het systeem wordt gevormd door de rek in de veer en in de demper:

$$\epsilon = \epsilon_{veer} + \epsilon_{demper} \tag{52}$$

Voor de afgeleide van de rek naar de tijd geldt dan:

$$\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{totaul} = \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{teer} + \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{demper}$$
(53)

Invullen van vergelijking (49) en (50) levert:

$$\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{uxual} = \frac{1}{E}\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta}$$
(54)

Met behulp van vergelijking (45) en (47) kan worden geschreven:

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{y} = -(1+e_0)\left[\frac{1}{E}\frac{dP_s}{dt} + \frac{P_s}{\eta}\right]$$
(55)

#### Het Kelvin-Voigt-model

Het Kelvin-Voigt-model (figuur 7) bestaat uit een veer parallel geschakeld aan een demper. Bij een parallel geschakeld systeem geldt dat de rek in de veer en in de demper gelijk is.

$$\epsilon = \epsilon_{veer} = \epsilon_{demper} \tag{56}$$

De spanning over het gehele systeem is de spanning in de veer plus die in de demper.

$$\sigma = \sigma_{veer} + \sigma_{demper} \tag{57}$$

Door invullen van vergelijking (49) en (50) wordt dit:

$$\sigma = E\epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt}$$
(58)

Omschrijven met  $\tau$  levert:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} - \frac{E\epsilon}{\eta} = \frac{\sigma}{\eta} - \frac{\epsilon}{\tau}$$
(59)

Met behulp van vergelijking (45) en (47) kan hiervoor worden geschreven:

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{y} = -(1+e_{0})\left[\frac{P_{y}}{\eta} + \frac{e-e_{0}}{(1+e_{0})\tau}\right]$$
(60)

#### Het standaard vastestofmodel

Het standaard vastestofmodel (figuur 7) bestaat uit een veer  $(V_2)$  met parallel daaraan een in serie geschakelde demper en veer  $(V_1)$ . Voor  $V_1$  en  $V_2$  worden de elasiticiteitmoduli weergegeven door respectievelijk  $E_1$  en  $E_2$ . In onderstaande formules geven steeds de indexen 1 en 2 aan dat het over één van beide veren gaat, terwijl geen index aangeeft dat het om de totale spanning en/of rek gaat. We gaan ervan uit dat de parameters  $E_1$ ,  $E_2$  en  $\eta$  afhankelijk zijn van de voidratio, want wanneer de koek droger wordt zal het materiaal zich elastischer gedragen. Bij onderstaande vergelijkingen is er voor het gemak van uitgegaan dat alleen de elasticiteitsmodulus  $E_2$  afhankelijk is van de voidratio. Voor  $E_1$  en  $\eta$  zouden ook dergelijke relaties opgesteld kunnen worden. Voor  $E_2$  is de volgende relatie gebruikt (hierbij geeft  $E_{2,0}$ de waarde aan voor  $E_2$  op tijdstip t=0):

$$E_2 = E_{2,0} \left[ \frac{e}{e_0} \right]^{-\lambda_2} \tag{61}$$

Hieruit volgt dat:

$$\frac{\partial E_2}{\partial e} = -\frac{\lambda_2}{e} E_2 \tag{62}$$

Met vergelijking (46) geldt dan:

$$\frac{\partial E_2}{\partial t} = (1 + e_0) \frac{\partial E_2}{\partial e} \frac{\partial \epsilon}{\partial t}$$
(63)

Voor de totale spanning in het systeem geldt:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \tag{64}$$

Voor de rek in het hele systeem geldt:

$$\epsilon = \epsilon_2 = \epsilon_1 + \epsilon_d \tag{65}$$

Voor de rek in  $V_i$  geldt:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma - E_2 \epsilon}{E_1} \tag{66}$$

Voor de afgeleide van de rek naar de tijd geldt:

$$\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{1} = \frac{1}{E_{1}}\frac{d\sigma}{dt} - \frac{E_{2}}{E_{1}}\frac{d\epsilon}{dt} - \frac{\epsilon}{E_{1}}\frac{\partial E_{2}}{\partial t}$$
(67)

Voor de demper geldt:

$$\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{demper} = \frac{\sigma - E_2 \epsilon}{\eta}$$
(68)

Voor het totale systeem geldt:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{1} + \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{demper}$$
(69)

De relaxatietijd  $\tau$  wordt gedefinieerd als:

$$\tau = \frac{\eta}{E_1} \tag{70}$$

Invullen van (67) en (68) in (69) levert:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\tau} - \frac{E_2 \epsilon}{\tau}}{E_1 + E_2 + \epsilon (1 + e_0) \frac{dE_2}{de}}$$
(71)

Met behulp van vergelijking (45) en (47) kan worden afgeleid:

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{y} = -(1+e_{ij}) \left[ \frac{\frac{dP_{y}}{dt} + \frac{P_{y}}{\tau} + \frac{E_{2}(e-e_{ij})}{\tau(1+e_{ij})}}{E_{1} + E_{2} + (e-e_{ij})\frac{dE_{2}}{de}} \right]$$
(72)

Indien ook  $E_1$  en  $\eta$  onafhankelijk zijn van de rek wordt vergelijking (71) gelijk aan:

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

$$\Psi = \left(\eta + \frac{E_2}{\left(\frac{1}{\tau} + \frac{\epsilon}{\eta} \frac{\partial E_1}{\partial \epsilon}\right)} + \frac{\epsilon}{\left(\frac{1}{\tau} + \frac{\epsilon}{\eta} \frac{\partial E_2}{\partial \epsilon}\right)}\right)$$
(73)

Voor  $E_1$  en  $\eta$  worden de volgende machtsfuncties aangenomen:

$$E_1 = E_0 \left( \frac{e_o - e}{e_\infty} \right)^k$$
(73a)

$$\eta = \eta_0 \left[ \frac{e_0}{e \cdot e_\infty} \right]^{\ell}$$
(73b)

### 2.10 Combinatie van het standaard vastestofmodel met de parabolische differentiaalvergelijking

De parabolische differentiaalvergelijking en de differentiaalvergelijking van het standaard vastestofmodel moeten tegelijkertijd worden opgelost. Er is voor een oplosmethode gekozen waarbij de differentiaalvergelijking van het standaard vastestofmodel in de parabolische differentiaalvergelijking wordt gesubstitueerd. Vervolgens wordt deze gecombineerde vergelijking met de NAG-routine D03PGF opgelost.

Verwaarlozen we de sedimentatie-effecten dan gaat de parabolische differentiaalvergelijking in dimensieloze coördinaten over in vergelijking (74).

$$\frac{L^{2}}{\left(1+e\right)^{2}}\left[\frac{\partial e}{\partial t}\right]_{\varphi} = \frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\frac{-K}{\left(1+e\right)\eta}\left[\frac{\partial P_{s}}{\partial \varphi}\right]_{t}\right] + \frac{L}{\left(1+e\right)^{2}}\left[q_{lm}+\varphi\frac{dL}{dt}\right]\left[\frac{\partial e}{\partial \varphi}\right]_{t}$$
(74)

Beide differentiaalvergelijkingen worden gecombineerd door de term  $(\partial e/\partial t)_{\varphi}$  uit vergelijking (72) of (73) expliciet te schrijven en in vergelijking (74) in te vullen. Combinatie van beide vergelijkingen leidt tot de differentiaalvergelijking die met behulp van de NAG-routine D03PGF wordt opgelost.

$$\frac{L^{2}}{\left\{\left(E_{1}+E_{2}\right)\left(1+e_{0}\right)-\epsilon\left(1+e\right)^{2}\frac{\partial E_{2}}{\partial e}\right\}}\left[\frac{\partial P_{s}}{\partial t}\right]_{\varphi}=\frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\frac{-K}{\left(1+e\right)\eta}\left(\frac{\partial P_{s}}{\partial \varphi}\right)_{r}\right]$$

$$+\frac{L}{\left(1+e\right)^{2}}\left[q_{im}+\varphi\frac{dL}{dt}\right]\left[\frac{\partial e}{\partial \varphi}\right]_{r}-\frac{L^{2}\left(P_{s}+E_{2}\epsilon\right)}{\left\{\left(E_{1}+E_{2}\right)\tau_{r}\left(1+e_{0}\right)-\epsilon\tau_{r}\left(1+e\right)^{2}\frac{\partial E_{2}}{\partial e}\right\}}$$
(75)

In deze vergelijking zijn  $\epsilon$ ,  $E_2$ ,  $\partial E_2/\partial e$  en K functies van de voidratio:

$$\epsilon = \frac{e_0 - e}{1 + e} \tag{76}$$

$$E_2 = \left(\frac{e_0}{e}\right)^{\alpha} E_{2,0}$$
(77)

$$\frac{\partial E_2}{\partial e} = -\frac{\alpha}{e} \left(\frac{e_0}{e}\right)^{\alpha} E_{2,0}$$
(78)

$$K = K_0 \left( \frac{1+e_0}{1+e} \right)^{-\frac{\delta}{2}}$$
(79)

Bij iedere aanroep van de NAG-routine D03PGF wordt een compressiedrukprofiel over de koek uitgerekend. Uit dit profiel wordt, met behulp van de differentiaalvergelijking van het standaard vastestofmodel, de voidratio als functie van de plaats in de koek berekend. De voidratio rekenen we iteratief uit. Hierbij worden  $E_2$  en  $\partial E_2/\partial e$  in eerste instantie met de vorige waarden van de voidratio geschat. Na berekening van de nieuwe voidratio worden de waarden van  $E_2$  en  $\partial E_2/\partial e$  opnieuw bepaald en kan de voidratio opnieuw berekend worden. Deze procedure wordt herhaald totdat het verschil tussen vorige en nieuw berekende voidratio kleiner is dan 0,01%.

De differentiaal in vastestofcoördinaten is gelijk aan:

$$\left[\frac{1+e_{ij}}{E_1+E_2+(e-e_{ij})\frac{dE_2}{de}}\right]\frac{\partial P_i}{\partial t} \approx \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{K}{\eta}\frac{1}{1+e}\frac{\partial P_s}{\partial y}\right] - \frac{P_s(1+e_i)+E_2(e-e_{ij})}{\tau(E_1+E_2+(e-e_{ij})\frac{dE_2}{de})}$$
(80)

#### **3 EXPERIMENTEEL**

De experimenten zijn uitgevoerd met de filtercel die is weergegeven in figuur 8. De filtercel bestaat uit een perspex cilinder die zich op een poreuze bodemplaat bevindt. Op deze poreuze plaat wordt een filtreerpapiertje gelegd. Bij de experimenten wordt het slib eerst geflocculeerd en vervolgens in de cel gebracht. Hierna wordt een gasdruk aangebracht boven het slib en begint de filtratie. Het uitgeperste filtraat wordt opgevangen op een balans die is verbonden met een computer. Deze computer registreert het gewicht van het filtraat als functie van de tijd. Het gewicht van het filtraat kan middels de dichtheid van water omgezet worden in een volume als functie van de tijd. De afgeleide naar de tijd van het filtraatvolume geeft het volumedebiet.



Figuur 8. Schematische weergave van een filtercel

Als het volumedebiet een constante waarde heeft bereikt, kan bij benadering worden gesteld dat de filtratiefase geëindigd is. Daarna wordt een massieve zuiger op het slib geplaatst en wordt weer dezelfde gasdruk aangebracht. De fase van het uitpersen die nu volgt is de expressiefase. Wederom wordt met behulp van een computer een volume-versus-tijdgrafiek geregistreerd. Door de slibkoek aan het eind van het experiment te drogen in een droogstoof kan de eindporositeit of eindvoidratio bepaald worden met behulp van formule (81):

$$m=1+\frac{\rho}{\rho_s}\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}$$
 of  $m=1+\frac{\rho}{\rho_s}e$  (81)

Waarbij:

m = de verhouding van het gewicht van de natte koek tot het gewicht van de droge koek [-]

- $\rho$  = dichtheid van de vloeistof [kg m<sup>3</sup>]
- $\rho_s =$  dichtheid van de vaste stof [kg m<sup>3</sup>]

Wanneer we voor het gewicht van de droge koek het totale gewicht van de droge koek (drogestof slib en drogestof toegevoegde flocculant) nemen krijgen we de **ongecorrigeerde** voidratio of porositeit. Wanneer we voor het gewicht van de drogestof alleen het gewicht van de droge stofdeeltjes van het slib nemen, verkrijgen we de **gecorrigeerde** voidratio. In dit verslag is steeds (tenzij anders wordt vermeld) met de gecorrigeerde voidratio gewerkt. Verder moet nog worden gecorrigeerd voor intra-cellulair en gebonden water. Deze waterfractie is verantwoordelijk voor de waterstroming en mag daarom niet worden meegenomen in de porositeit tijdens dynamische modellering. De voidratio by 65-70 gew% drogestof is daarom ongeveer 0.

Bij drainage-experimenten wordt het slib in de filtratiecel gebracht, waarna er onder invloed van de zwaartekracht een hoeveelheid water uitstroomt. Hierdoor wordt een koek gevormd met een vaste hoeveelheid vaste stof. Op deze koek wordt een laag water gezet, die door de koek wordt geperst. De uitstroomsnelheid die nu gemeten wordt kan vergeleken worden met de modelberekeningen.

In de zogenaamde Compressie-Permeabiliteits-cel (CP-cel) zijn experimenten uitgevoerd om de compressieconstanten ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  en  $\lambda$ ) te bepalen. Een schematische weergave van deze CPcel is te zien in figuur 9. De cel bestaat net als de gewone filtercel uit een perspex cilinder die geplaatst wordt op een houder waarin de bodemplaat wordt gevormd door een poreuze plaat. In deze cel wordt een zuiger gebracht. Deze zuiger bestaat eigenlijk uit twee zuigers die middels een schroefdraad verbonden zijn. De zuiger die in contact komt met het slib is poreus, dit in tegenstelling tot de bovenste zuiger die massief is. De ruimte tussen de zuigers is tijdens de experimenten gevuld met water. Om een constante vloeistofdruk te krijgen wordt op dit water een lage gasdruk gebracht. Aan de zuiger is een verplaatsingsmeter verbonden waarmee de koekdikte kan worden bepaald. Bij de experimenten wordt het slib nadat het geflocculeerd is in de cel gebracht. Vervolgens wordt het experiment gestart door een gasdruk aan te brengen boven de massieve zuiger. Deze gasdruk is de compressieve druk (P<sub>3</sub>). Het slib wordt nu ineen geperst, waarbij het water zowel naar boven als naar beneden kan stromen. Het water dat naar beneden wegstroomt wordt wederom opgevangen



Figuur 9. Schematische weergave van een Compressie-Permeabiliteits-cel

op een balans, die met een computer verbonden is. Deze computer zet het signaal om in een volume-versus-tijdgrafiek. Wanneer de koekdikte constant blijft, blijft ook de permeabiliteit constant. Door nu met behulp van het computerprogramma de constante uitstroomsnelheid te bepalen kan de permeabiliteit worden berekend met de wet van Darcy (82). Uit onderzoek blijkt dat het erg belangrijk is dat zowel de poreuze bodemplaat als de poreuze zuiger worden bedekt met filtreerpapier, dit om verstopping van de poriën te voorkomen. Dit verstopt raken van de poriën is van invloed op de permeabiliteit die berekend wordt, deze wordt dan lager.

$$K = \frac{q_i \eta L}{\Delta P_i} \tag{82}$$

Waarbij:

- K = permeabiliteit [m<sup>2</sup>]
- $\eta$  = viscositeit [Pa s]
- $q_i = uitstroomsnelheid [m/s]$
- L = koekdikte [m]
- $\Delta P_1$  = hydraulisch drukverschil [Pa]

Voor de permeabiliteit kan volgens het model van Shirato-Tiller ook geschreven worden:

$$K = K_0 \left[ 1 + \frac{P_0}{P_a} \right]^{-\delta} \qquad of \qquad \ln K = \ln K_0 - \delta \ln \left[ 1 + \frac{P_0}{P_a} \right]$$
(83)

De permeabiliteit wordt bepaald bij verschillende drukken, waarna in K wordt uitgezet tegen ln  $(1 + P_s/P_a)$ . Hierbij wordt de compressie-constante  $\delta$  weergegeven door de helling van de grafiek, de permeabiliteit in onbelaste toestand (K<sub>0</sub>) kan bepaald worden uit de asafsnede.

De eindporositeit van de koek kan bepaald worden door de koek te drogen in een droogstoof. Door de koekdikte bij elke druk te bepalen kan vervolgens de porositeit ( $\varepsilon$ ) bij elke druk bepaald worden met behulp van een volumebalans. Voor de porositeit kan volgens Shirato-Tiller geschreven worden:

$$\ln (1-e) = \ln (1-e_0) + \beta \ln (1+\frac{P_s}{P_a})$$
(84)

Door ln (1- $\varepsilon$ ) uit te zetten als functie van ln (1+P<sub>s</sub>/P<sub>a</sub>) kunnen vervolgens de porositeit in onbelaste toestand ( $\varepsilon_0$ ) en de compressieconstante  $\beta$  bepaald worden. Hierbij is de helling van de grafiek gelijk aan  $\beta$  en is de asafsnede gelijk aan ln (1- $\varepsilon_0$ ).

#### **4 RESULTATEN EN DISCUSSIE**

#### 4.1. Cp-cel

In figuur 10 en 11 zijn de resultaten weergegeven van de metingen bij slib dat geflocculeerd was met 10 gew% FeCl<sub>3</sub> en 20 gew% Ca(OH)<sub>2</sub>. In figuur 10 is ln K uitgezet tegen ln  $(1+P_s/P_a)$ . Door de meetpunten kan een lineaire regressielijn getrokken worden. Zoals in hoofdstuk 2 besproken is, is de helling gelijk aan de compressieconstante  $\delta$  en is de asafsnede gelijk aan K<sub>0</sub>. In figuur 11 is hetzelfde gedaan maar nu voor ln  $(1-\varepsilon)$ .

In tabel 1 zijn de resultaten weergeven van de eerste serie metingen bij flocculering met verschillende percentages FeCl<sub>3</sub>. In de tabel zijn de compressiecoëfficiënten  $\delta$  en  $\beta$  en K<sub>0</sub>, e<sub>0</sub> en  $\varepsilon_0$  weergegeven. Bij de bepaling van deze constanten is P<sub>4</sub> gelijk gesteld aan 1000.

Percentage	δ	K <sub>0</sub> *10 <sup>-13</sup>	ε	e <sub>0</sub>	β *10 <sup>-1</sup>
[gew %]	[-]	[m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]
25	1,1221	0,12	0,86	6,3	0, <b>75</b> 1
20	1,6595	1,5	0,87	6,7	1,044
15	1,7120	3,6	0,89	8,5	1,102
10	1,5272	1,0	0,88	7,2	1,226
5	1,8156	1,6	0,94	16,3	2,814

Tabel 1. Berekende compressieconstanten

Uit de tabel blijkt dat  $\beta$  steeds kleiner wordt naarmate er meer FeCl<sub>3</sub> wordt toegevoegd. Dit betekent dat toevoeging van FeCl<sub>3</sub> leidt tot vermindering van de compressibiliteit van de koek. In de tweede serie experimenten treedt er een afwijking op als we kijken naar  $\beta$  als functie van de hoeveelheid toegevoegde flocculant. Hiervoor is geen verklaring gevonden. Bij de tweede serie metingen is geprobeerd om de permeabiliteit te koppelen aan een gemeten deeltjesgrootteverdeling. Dit blijkt niet mogelijk. Oorzaak hiervan is dat de deeltjesgrootteverdeling gemeten wordt aan deeltjes in onbelaste toestand, terwijl de permeabiliteit gemeten wordt aan deeltjes in samengeperste toestand.



Figuur 10. In K versus In  $(I + P_s/P_a)$ 



Figuur 11.  $ln (1-\epsilon)$  versus  $ln (1+P_s/P_a)$ 

#### 4.2. Filtratie- en expressiecurve

In figuur 12 en 13 is een voorbeeld gegeven van een filtratie- en een expressie-experiment.



Figuur 12. Filtratiecurve



Figuur 13. Expressiecurve

#### 4.3 Vergelijking tussen experiment en model

#### 4.3.1 Elastisch materiaalgedrag

In figuur 14 is een resultaat getoond van een modelberekening en een meting van een normaal filtratie-experiment van Mierlo-slib geflocculeerd met 10 gew.% ijzerchloride en 20 gew.% kalk op drogestofbasis. Voor de modelberekeningen is aangenomen dat het materiaal zich elastisch gedraagt. De constitutieve parameters zijn getoond in figuur 14. Aan de hand van figuur 14 is te zien dat er een goede overeenkomst is tussen experiment en model.



**Figuur 14** Filtraatvolume versus tijd volgens experiment (bolletjes, driehoekjes) en model (lijnen), elastisch materiaalgedrag. Mierlo-slib geflocculeerd met 10 gew.% ijzerchloride en 20 gew.% op drogestofbasis.

In figuur 15 is een resultaat getoond van een modelberekening en een drainage-experiment met hetzelfde slib, alleen geflocculeerd met 20 gew.% ijzerchloride en 20 gew.% kalk. Er is wederom een goede overeenkomst tussen experiment en model. De aanname dat het materiaal zich elastisch gedraagt tijdens filtratie en drainage is voldoende voor deze experimenten.

In figuur 16 is een resultaat weergegeven van een modelberekening en een meting van een normaal filtratie-experiment met secundair Eindhoven-slib geflocculeerd met 15 gew.% ijzerchloride en 20 gew.% kalk op drogestofbasis. Het materiaal is verondersteld zich elastisch te gedragen. Het secundaire slib komt direct van de beluchtingstank en heeft een andere vlokstructuur dan het Mierlo-slib. De permeabiliteit is iets lager dan van Mierlo-slib. De overeenkomst tussen experiment en model is goed zoals is te zien in figuur 16. Omdat het

slib meer compressibel is ( $\delta$ =1.8) dan het Mierlo-slib (voor deze voorbeelden), is het verschil in filtraatvolume voor een aangelegde druk van 100 kPa en 500 kPa gering.



**Figuur 15** Drainage flux versus tijd volgens experiment (bolletjes) en model (lijn), elastisch materiaalgedrag. Mierlo-slib geflocculeerd met 20 gew. % ijzerchloride en 20 gew. % kalk.



**Figuur 16** Filtraatvolume versus tijd volgens experiment (bolletjes, driehoeken) en model (lijnen), elastisch materiaalgedrag. Secundair slib van de rwzi Eindhoven geflocculeerd met 15 gew.% ijzerchloride en 20 gew.% kalk op drogestofbasis.

In figuur 17 is een resultaat weergegeven van een modelberekening en een meting van een expressie-experiment met Mierlo-slib geflocculeerd met 15 gew.% ijzerchloride en 20 gew.% kalk op droge-stofbasis. De afname van de gemiddelde voidratio is uitgezet tegen de tijd. De filtratiefase van dit experiment is weergegeven in figuur 14. Het materiaalgedrag is wederom verondersteld zich elastisch te gedragen. Zoals is te zien aan de hand van figuur 17 is er een acceptabele overeenkomst tussen experiment en model voor de initiële periode van de expressiefase. De latere periode van de expressiefase kan niet nauwkeurig genoeg worden beschreven op basis van elastisch materiaalgedrag, ondanks het feit dat de verandering van de permeabiliteit met de compressiedruk wordt meegenomen in de modellering. Dit moet daarom worden beschouwd als een tekortkoming van het model.



Figuur 17 Gemiddelde voidratio versus tijd volgens experiment (bolletjes, driehoeken, vierkanten) en model (lijnen), elastisch materiaalgedrag. Mierlo-slib geflocculeerd met 10 gew. % ijzerchloride en 20 gew. % kalk op drogestofbasis.

#### 4.3.2 Visco-elastisch materiaalgedrag

In figuur 18 zijn resultaten weergegeven van modelberekeningen gebaseerd op visco-elastisch materiaalgedrag en dezelfde experimenten als getoond in figuur 17. Er kan worden

geconcludeerd dat berekeningen gebaseerd op visco-elastisch materiaalgedrag een goede overeenkomst tonen tussen experiment en model. Het laatste gedeelte van de expressiefase kan nu beter worden beschreven. Het duurt vrij lang voordat een evenwichtssituatie wordt bereikt, het slib vertoont enige kruip. De evenwichtssituatie wordt na  $\pm$  6000 seconden bereikt maar is niet getoond in deze figuur. Het was niet mogelijk om deze experimenten nauwkeurig te beschrijven met constante waarden voor E<sub>1</sub> en η. Deinitiële afname van de gemiddelde voidratio wordt niet alleen bepaald door de permeabiliteit, maar ook door  $E_1$  en  $\eta$ , indien het materiaalgedrag wordt beschreven door het vastestofmodel. Als  $E_1$  en  $\eta$  niet afhankelijk zijn van de porositeit, dan verandert de porositeit evenredig met de compressiedruk volgens vergelijking (72). Indien vergelijking (73) wordt gebruikt, vertoont het model goede overeenkomst met experiment, ook voor verschillende drukken. Dit wordt aan de ene kant teweeggebracht door het feit dat E<sub>1</sub> en  $\eta$  een functie zijn van de porositeit en aan de andere kant door het feit dat de uiteindelijke evenwichtssituatie goed wordt voorspeld omdat deze evenwichtssituaties de gemeten waarden zijn met de CP-cel. Het Maxwell-element is onderdrukt en de compressiedruk rust alleen op veer E2, die verantwoordelijk is voor de CPceldata.

In figuur 19 is een resultaat weergegeven van een modelberekening en een expressieexperiment van Mierlo-slib geflocculeerd met 1,5 gew.% polyelektrolyt (Röhm KF975). Wederom is de afname van de gemiddelde voidratio versus tijd weergegeven. De gestippelde lijn is een resultaat van een berekening op basis van elastisch materiaalgedrag en de doorgetrokken lijn is een resultaat van visco-elastische berekeningen. De expressie van slib geflocculeerd met polyelektrolyt vertoont altijd kruip: het duurt behoorlijk lang voordat de evenwichtssituatie is bereikt. Niet alleen vloeistofstroming maar ook de deformatie van het materiaal speelt een belangrijke rol in de uiteindelijke expressietijd. De initiële permeabiliteit  $K_0 (8,0*10^{-12})$  is relatief hoog in vergelijking met die van slib geflocculeerd met ijzerchloride en kalk  $(3,0*10^{-13})$ . Dit wordt veroorzaakt door de relatief grote en zeer poreuze vlokken die worden gevormd indien slib wordt geflocculeerd met polyelektrolyt. In figuur 20 is de afname van de gemiddelde voidratio voor verschillende drukken volgens experiment en model getoond. Zoals is te zien aan de hand figuur 20 kan worden geconcludeerd dat de overeenkomst tussen model en experiment acceptabel is.



**Figuur 18** Gemiddelde voidratio versus tijd volgens experiment (bolletjes, vierkanten en driehoeken) en model, visco-elastisch materiaalgedrag (lijnen). Mierlo-slib geflocculeerd met 10 gew.% ijzerchloride en 20 gew.% kalk op drogestofbasis. Visco-elastische parameters:  $E_{10} = 8,0*10^4$  Pa,  $\eta_{so} = 8,0*10^7$  Pa.s (  $\tau_0 = 1000$  s),  $\kappa = 1.05$ ,  $\xi = 1.3$ 



**Figuur 19** Gemiddelde voidratio versus tijd volgens experiment (bolletjes) en model, elastisch materiaalgedrag (gestippelde lijn) en visco-elastisch materiaalgedrag (doorgetrokken lijn). Mierlo-slib geflocculeerd met 1.5 gew.% polvelektrolvt op drogestofbasis.



Figuur 20 Gemiddelde voidratio versus tijd volgens experiment (bolletjes) en model, elastisch materiaalgedrag (gestippelde lijn) en visco-elastisch materiaalgedrag (doorgetrokken lijn). Visco-elastische parameters:  $E_{10}=2.5*10^4$ ,  $\eta_{so}=3.5*10^8$ ,  $\kappa=1.05$ ,  $\xi=1.3$ .

#### 4.4 Conclusies

Het filtratie- en expressiegedrag van slib kan redelijk worden beschreven met de gepresenteerde modellen in paragraaf 1. De deformatie van de slibfilterkoek tijdens expressie is gecompliceerd en kan vaak niet op basis van simpel elastisch materiaalgedrag worden beschreven; berekeningen op basis van visco-elastisch materiaalgedrag vertonen betere resultaten. De slibben vertonen 'kruip" aan het einde van de expressiefase. Het kan een behoorlijk lange tijd duren voordat de evenwichtssituatie wordt bereikt vanwege deze kruip. Tijdens de filtratiefase is de compressiedruk vrijwel gelijk aan nul door het grootste gedeelte van de koek. Dit betekent dat de deeltjes in de koek nauwelijks spanning "voelen" en daarom zal de deformatie van de deeltjesmatrix nauwelijks de totale filtratietijd beïnvloeden. Echter tijdens expressie neemt de spanning op de deeltjes plaats. De vervormingssnelheid van de deeltjesmatrix wordt belangrijk en moet vaak worden beschouwd als visco-elastisch. De deformatie van de deeltjesmatrix is niet instantaan, maar het duurt enige tijd om te deformeren. Dit visco-elastische materiaalgedrag is vooral belangrijk wanneer slib geflocculeerd is met polyelektrolyt. Het beschrijven van de kruip is belangrijk, omdat kleine

veranderingen in de voidratio gelijk zijn aan aanzienlijke verschillen in drogestofgehalte. Elke procent winst in drogestof reduceert de verwerkingskosten aanzienlijk.

Ofschoon er veel kritiek is op de CP-cel, heeft eigenlijk alleen Stamatakis<sup>3</sup> een goed alternatief besproken om de constitutieve parameters voor de filtratiefase te bepalen. Een minimalisatieprocedure, zoals voorgesteld door Stamatakis, zal de fitparameters van de CP cel-experimenten bijstellen. Dit resulteert in een meer nauwkeurige overeenkomst tussen experiment en model, hoewel directe vergelijking tussen modelberekeningen op basis van CP-celwaarden en experimenten kan resulteren in goede resultaten zoals is getoond in dit hoofdstuk. Omdat de expressietijd belangrijker is in de ontwatering van slib (filtratietijd : expressietijd  $\cong$  300 : 5000 seconden), is het adviseerbaar om alleen een fitprocedure toe te passen om de visco-elastische parameters te vinden en de parameters verkregen met behulp van de CP-cel te handhaven. De visco-elastische parameters kunnen alleen worden bepaald door direct een experiment te fitten in tegenstelling tot de elastische parameters.

## **5 SYMBOLENLIJST**

А	=	oppervlak	[m <sup>2</sup> ]
A		doorsnee oppervlak van de vloeistoffase	[m <sup>2</sup> ]
A,	=	doorsnee oppervlak van de vaste fase	[m <sup>2</sup> ]
e	=	voidratio	[-]
e <sub>0</sub>	=	voidratio bij $P_s = 0$	[-]
E	=	elasticiteitsmodulus	[Pa]
$\mathbf{E}_{1}$	=	elasticiteitsmodulus uit het vastestofmodel	[Pa]
$E_2$	=	elasticiteitsmodulus uit het vastestofmodel	[Pa]
E <sub>2,0</sub>	=	elasticiteitsmodulus $E_2$ bij $P_s = 0$	[Pa]
F,	=	meesleepkracht	[N]
g	=	zwaartekrachtversnelling	[m/s <sup>2</sup> ]
h	=	vastestofhoogte	[m]
$\mathbf{h}_0$	_	vastestofhoogte bij $P_{r} = 0$	[m]
I	=	impulsoverdracht	[N]
К	=	permeabiliteit	[m <sup>2</sup> ]
Ko	=	permeabiliteit bij $P_s = 0$	[m <sup>2</sup> ]
L	=	koekdikte	[m]
m <sub>d</sub>	=	massa droge koek	[kg]
m <sub>n</sub>	=	massa natte koek	{kg}
$\mathbf{P}_1$		filtratiedruk	[Pa]
Pa	-	constante uit constitutieve vergelijkingen	[Pa]
P	=	vloeistofdruk	[Pa]
P,	=	compressiedruk	[Pa]
$\mathbf{q}_{\mathbf{l}}$	=	superficiële vloeistofsnelheid in de koek	[m/s]
$q_{1,0}$	=	superficiële vloeistofsnelheid in de koek bij het koek/slurry-	
		oppervlak	[m/s]
$\mathbf{q}_{1,m}$	=	superficiële vloeistofsnelheid in het filtermedium	[m/s]
$\mathbf{q}_{\mathbf{I},s\mathbf{I}}$	-	superficiële vloeistofsnelheid in de slurry	[m/s]
q <sub>ls</sub>		superficiële verschilsnelheid tussen vloeistof en vaste fase in koek	[m/s]
q,	=	superficiële vastestofsnelheid in de koek	[m/s]
$\mathbf{q}_{\mathbf{s},0}$	-	superficiële vastestofsnelheid in de koek bij het koek/slurry-	
		oppervlak	[m/s]
q <sub>s,sl</sub>	<u></u>	superficiële vastestofsnelheid in de slurry	[m/s]
t	=	tijd	[s]
u,	_	snelheid van de vloeistoffase in de koek	[m/s]
u <sub>l,sed</sub>	=	snelheid van de vloeistoffase in de slurry bij batchsedimentatie	[m/s]
u <sub>l,si</sub>	-	snelheid van de vloeistoffase in de slurry	[m/s]
u,	=	snelheid van de vaste stof in de koek	[m/s]

u <sub>s.sed</sub>		snelheid van de vaste stof in de slurry bij batchsedimentatie	[m/s]
$\mathbf{u}_{s,sl}$		snelheid van de vaste stof in de slurry	[m/s]
u,	=	slipsnelheid tussen de vloeistof- en vaste fase	[m/s]
V	=	volume	[m <sup>3</sup> ]
х	-	reële hoogte in de filterkoek tussen 0 en L(t)	[m]
$\Delta x_{m}$	=	dikte van het filtermedium	[m]
у		vastestofcoördinaat	[m]

# Griekse symbolen

$\alpha$	$=$ coëfficiënt van de elasticiteitsmodulus $E_2$ uit het vastestof	model [-]
β	= compressibiliteitscoëfficiënt	[-]
£	= porositeit van de vloeistoffase in de koek	[-]
$\varepsilon_{1,0}$	= porositeit van de vloeistoffase in de koek bij $P_s = 0$	[-]
$\boldsymbol{\epsilon}_{\text{Lst}}$	= porositeit van de vloeistoffase in de slurry	[-]
<b>E</b> 5	= porositeit van de vaste fase in de koek	[-]
8 <sub>s.0</sub>	= porositeit van de vaste fase in de koek bij $P_s = 0$	[-]
<b>8</b> 5.51	= porositeit van de vaste fase in de slurry	[-]
Ł	= rek	[-]
δ	= compressibiliteitscoëfficiënt	[-]
$\phi$	= snelheidspotentiaal	[m <sup>2</sup> /s]
$\varphi$	= dimensieloze hoogte = $x/L(t)$	[-]
$ ho_1$	= dichtheid van de vloeistof	$[kg/m^3]$
$ ho_s$	= dichtheid van de vaste stof	[kg/m <sup>3</sup> ]
σ	= spanning	[Pa]
$\sigma_1$	= spanning van het Maxwell-element in het vastestofmodel	[Pa]
$\sigma_2$	= spanning van de parallel geschakelde veer in het vastestor	fmodel [Pa]
$ au_{ m r}$	= relaxatietijd	[s]
η	= dynamische viscositeit van de vloeistoffase	[Pa s]
ή	= viscositeit demper	[Pas]

#### **6** LITERATUURLIJST

- Muskat, M., Flow of homogeneous fluids through porous media, Mc Graw Hill Inc, Ann Arbor, 1946, pp 129, 287.
- [2] Tiller, F.M., Yeh, C.S., The Role of Porosity in Filtration, Part XI: Filtration followed by expression, AIChE Journal, Vo.. 33, no. 8, 1987, pp. 1241-1256
- [3] Stamatakis, K., Analysis of cake formation and growth in liquid-solid separations, PhD thesis, University of Syracuse, USA, 1991.

#### APPENDIX A. IMMOBILISATIE VAN DE VERSCHUIVENDE RANDVOORWAARDE

Op plaats x = L in de koek is de randvoorwaarde  $P_s = 0$  geldig. Een probleem bij het oplossen van de parabolische differentiaalvergelijking is dat de koek groeit en L voortdurend verschuift. Door de introductie van de dimensieloze coördinaat  $\varphi$  wordt de bewegende randvoorwaarde geïmmobiliseerd. Als onafhankelijke variabelen kiezen we x en t,  $\varphi$  en  $\tau$  worden als afhankelijke variabelen gekozen.

$$\varphi = f(x,t) = \frac{x}{L(t)}$$
(A.1)

$$\tau = f(t) = t \tag{A.2}$$

Voor de afgeleiden van  $\varphi$  en  $\tau$  gelden:

$$d\varphi = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_{t} dx + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial t}\right)_{x} dt$$
(A.3)

$$d\tau = dt \tag{A.4}$$

De porositeit  $\varepsilon$  is een functie van  $\varphi$  en  $\tau$ .

$$d\varepsilon = \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\varphi}\right)_{\tau} d\varphi + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\tau}\right)_{\varphi} d\tau \qquad (A.5)$$

Invullen van (A.3) en (A.4) in (A.5) levert een uitdrukking voor d $\varepsilon$ .

$$d\varepsilon = \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\varphi}\right)_{\tau} \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_{t} dx + \left\{ \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\varphi}\right)_{\tau} \left(\frac{\partial\varphi}{\partial t}\right)_{x} + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\tau}\right)_{\varphi} \right\} dt$$
(A.6)

De porositeit  $\varepsilon$  is tevens een functie van x en t zodat

$$d\varepsilon = \left[\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\right]_{t} dx + \left[\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}\right]_{x} dt \qquad (A.7)$$

Uit (A.6) en (A.7) volgt de relatie tussen de partieel afgeleiden.

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)_{t} = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi}\right)_{t} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_{t}$$
(A.8)

Uit partieel differentiëren van (A.1) volgt:

$$\left[\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}\right]_{t} = \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\varphi}\right)_{t} \left(\frac{\partial\varphi}{\partial t}\right)_{t} + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\tau}\right)_{z}$$
(A.9)

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_{t} = \frac{1}{L} \tag{A.10}$$

$$\left[\frac{\partial x}{\partial t}\right]_{\varphi} = \varphi \, \frac{dL}{dt} \tag{A.11}$$

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial t}\right)_{t} = -\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_{\varphi} \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_{t} = -\frac{\varphi}{L}\frac{dL}{dt}$$
(A.12)

Invullen van (A.10) t/m (A.12) in (A.8) en (A.9) levert het uiteindelijke verband tussen de partiële afgeleiden van  $\varepsilon$  naar reële en dimensieloze coördinaten.

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)_{t} = \frac{1}{L} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi}\right)_{t}$$
(A.13)

$$\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}\right)_{\tau} = -\frac{\varphi}{L} \frac{dL}{dt} \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\varphi}\right)_{\tau} + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\tau}\right)_{\varphi}$$
(A.14)

#### Invoeren van de voidratio.

De voidratio e is gedefinieerd als:

$$e = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_s} \tag{A.15}$$

Men kan  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $d\varepsilon_1$  en  $d\varepsilon_2$  als functie van de voidratio schrijven:

$$\varepsilon_1 = \frac{e}{1+e}$$
;  $\varepsilon_1 = \frac{1}{1+e}$  (A.16)

$$d\varepsilon_{i} = \frac{1}{(1+e)^{2}} de$$
;  $d\varepsilon_{s} = -\frac{1}{(1+e)^{2}} de$  (A.17)

#### APPENDIX B. TRANSFORMATIE NAAR VASTESTOFCOÖRDINAAT

Daar de totale koekhoogte niet en de hoogte van de vaste stof wel constant is, schrijven we de x-coördinaat om naar de vastestofcoördinaat y met behulp van vergelijking (18). Voor de afgeleide van de vastestofcoördinaat y naar x geldt:

$$\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{t} = 1 - \varepsilon \tag{B.1}$$

De partiële afgeleide van de porositeit naar de plaats x kan als volgt geschreven worden:

$$\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\right)_{t} = \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}\right)_{y} \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{t} + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial y}\right)_{t} \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{t}$$
(B.2)

Bij constante t is dt gelijk aan nul zodat vergelijking (B.2) geschreven kan worden als:

$$\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\right)_{t} = \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial y}\right)_{t} (1-\varepsilon)$$
(B.3)

Voor de partiële afgeleide van de porositeit naar de tijd geldt:

$$\left[\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}\right]_{x} = \left[\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}\right]_{y} \left[\frac{\partial t}{\partial t}\right]_{x} + \left[\frac{\partial\varepsilon}{\partial y}\right]_{t} \left[\frac{\partial y}{\partial t}\right]_{x}$$
(B.4)

Voor de partiële afgeleide van de vaste stofcoördinaat naar de tijd kan met behulp van vergelijking (24) worden afgeleid:

$$\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)_{x} = -\int_{g}^{x} \frac{\partial}{\partial t} (1-\varepsilon) dx = -\int_{g}^{x} \partial \varepsilon \frac{dx}{\partial t}$$
(B.5)

Met de continuïteitsvergelijking (2) is deze op te lossen tot:

$$\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)_{x} = -q_{l} + q_{l,m}$$
(B.6)

Deze vergelijking invullen in vergelijking (B.4) levert:

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}\right)_{x} = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}\right)_{y} - \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)_{t} (q_{lq} - q_{l,m})$$
(B.7)

De voidratio wordt gedefinieerd als:

$$e = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \tag{B.8}$$

Voor de partiële afgeleide van de voidratio naar de tijd geldt:

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{y} = \frac{1}{(1-\varepsilon)^{2}} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)_{y}$$
(B.9)

Invullen van vergelijking (B.7) in (B.9) levert:

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{y} = \frac{1}{\left(1-\varepsilon\right)^{2}} \left[ \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}\right)_{y} - \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)_{t} (q_{t}-q_{t,m}) \right]$$
(B.10)

Voor de partiële afgeleide van de plaatscoördinaat x naar de vastestofcoördinaat y geldt (vergelijking (B.1)):

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_{T} = \frac{1}{1 - \epsilon} \tag{B.11}$$

Vergelijking (B.11) en de continuïteitsvergelijking (4) invullen in vergelijking (B.5) levert:

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{t} = \frac{1}{1-\varepsilon} \left[\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial y} + \frac{q_{t}-q_{t,m}}{1-\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right]_{t}$$
(B.12)

Deze vergelijking kan geschreven worden als:

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{q_{l} - q_{l,m}}{1 - \varepsilon}\right]$$
(B.13)

Voor de superficiële vloeistofsnelheid kan geschreven worden:

$$q_i = q_i \varepsilon \quad (1 - \varepsilon) \frac{K}{\eta} \frac{\partial P_s}{\partial x}$$
(B.14)

Nu geldt ook:

$$\frac{u_i \cdot u_{im}}{1 \cdot \varepsilon} \approx u_{im} - \frac{K}{\eta} \frac{\partial P_s}{\partial x}$$
(B.15)

Na invullen van deze vergelijking in vergelijking (B.12) volgt:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ q_{tm} - \frac{K}{\eta} \frac{1}{1+e} \frac{\partial P_y}{\partial e} \left( \frac{\partial e}{\partial y} \right)_t \right]$$
(B.16)

Waarbij de term  $(\partial q_{im}/\partial y)$  gelijk is aan 0, omdat de totale uitstroomsnelheid  $q_{im}$  constant is over de gehele koek.

#### APPENDIX C. INITIALISATIE

De initialisatie wordt uitgevoerd omdat voor het oplossen van de parabolische differentiaalvergelijking een initiële koekdikte en -groeisnelheid bekend moet zijn. Om deze initiële waarden te kunnen berekenen wordt aan het begin van de filtratie aangenomen dat het drukverschil bijna geheel over het filtermedium staat. De superficiële vloeistofsnelheid in het filtermedium kan in dat geval gelijk gesteld worden aan de superficiële vloeistofsnelheid in de koek [3], q<sub>s</sub> in de koek wordt nul verondersteld.

$$q_i = q_{im} \tag{C.1}$$

Voor  $q_i$  kan de Darcy-Shirato-vergelijking worden ingevuld ( $q_i=0$ ) zodat vergelijking (C.1) overgaat in:

$$\frac{K}{\eta} \frac{\partial P_l}{\partial x} = q_{lm} \tag{C.2}$$

Deze vergelijking kan met behulp van de krachtenbalans worden omgeschreven in termen van  $P_s$ . De zwaartekrachteffecten in de koek worden verwaarloosd. Ook K schrijven we als functie van  $P_s$  zodat vergelijking (C.2) over gaat in vergelijking (C.3).

$$-\frac{K_0}{\eta} \left[ 1 + \frac{P_s}{P_a} \right]^{-\delta} \partial P_s = q_{lm} \partial x \qquad (C.3)$$

De bijbehorende randvoorwaarden zijn:

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{0} \to \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{s}} = \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{s}}\big|_{\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}} \tag{C.4}$$

$$x = L \to P_{s} = 0 \tag{C.5}$$

Uit integratie van vergelijking (C.3) tezamen met de randvoorwaarden (C.4) en (C.5) volgt de initiële koekdikte.

$$L = \frac{K_0 P_a \Delta x_m}{K_m (1 - \delta)} \frac{1}{(P_1 - P_s|_{x=0})} \left\{ \left[ 1 + \frac{P_s|_{x=0}}{P_a} \right]^{(1 - \delta)} - 1 \right\}$$
(C.6)

De initiële groeisnelheid volgt uit differentiatie van (C.6) naar de tijd.

De initiële koekdikte en -groeisnelheid kan berekend worden indien  $P_s|_{x=0}$  bekend is.  $P_s|_{x=0}$  is als volgt te bepalen. In 2.7 is voor dL/dt de volgende vergelijking afgeleid.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{K_{t_1} P_a \Delta x_m}{K_m (1 - \delta)} \frac{1}{(P_1 - P_s|_{x \to 0})^2} *$$

$$\left\{ \left[ \left[ 1 + \frac{P_s|_{x \to 0}}{P_a} \right]^{(1 - \delta)} - 1 \right] + \frac{(1 - \delta)}{P_a} (P_1 - P_s|_{x \to 0}) \left[ 1 + \frac{P_s|_{x \to 0}}{P_a} \right]^{-\delta} \right] \frac{dP_s|_{x \to 0}}{dt}$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{q_{t,sl} - q_{t,0}}{\varepsilon_{t,0} - \varepsilon_{t,sl}}$$
(C.7)
$$(C.7)$$

De zwaartekrachteffecten worden tijdens de initialisatie verwaarloosd zodat voor  $q_{i,si}$  en  $q_{i,0}$  de volgende formules gelden.

$$q_{l,sl} = \varepsilon_{l,sl} u_{l,sl} = \varepsilon_{l,sl} q_{lm}$$
(C.9)

$$q_{l'r} = q_{lm} \tag{C.10}$$

 $q_{im}$  wordt bepaald door de Darcy-Shirato-vergelijking toe te passen op het filtermedium. De randvoorwaarden die hierbij horen zijn:

$$x = 0 \rightarrow P_1 = P_1 - P_s|_{x=0}$$
 (C.11)

$$x = -\Delta x_m \to P_t = 0 \tag{C.12}$$

Integratie van de Darcy-Shirato-vergelijking (vergelijking (C.2)) met bovenstaande randvoorwaarden levert een term voor  $q_{im}$ .

$$q_{lm} = \frac{K_m}{\eta} \frac{(P_1 - P_n)_{x, ln}}{\Delta x_m}$$
(C.13)

Combinatie van de vergelijkingen (C.8) t/m (C.13) leidt tot een uitdrukking voor dL/dt.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\varepsilon_{1,it}}{(\varepsilon_{1,it} + \varepsilon_{1,it})} \frac{K_m}{\eta} \frac{(P_1 - P_1|_{x=0})}{\Delta x_m}$$
(C.14)

Uit het gelijkstellen van vergelijking (C.7) en (C.14) volgt  $dP_s |_{x=6}/dt$ .

$$\frac{dP_{s}|_{x=0}}{dt} = \frac{\frac{\varepsilon_{s,sl}}{(\varepsilon_{l,sl} - \varepsilon_{l,0})} \frac{K_{m}^{2}(1-\delta)}{K_{0}\eta P_{a}} \frac{(P_{1} - P_{s}|_{x=0})^{3}}{\Delta x_{m}^{2}}}{\left[ \left[ 1 + \frac{P_{s}|_{x=0}}{P_{a}} \right]^{(1-\delta)} - 1 \right] + \frac{(1-\delta)}{P_{a}} (P_{1} - P_{s}|_{x=0}) \left[ 1 + \frac{P_{s}|_{x=0}}{P_{a}} \right]^{-\delta}}$$
(C.15)

Met de beginvoorwaarde:

$$t = 0 \rightarrow P_s|_{x=0} = 0 \tag{C.16}$$

Invullen van de beginvoorwaarde (C.16) in (C.15) levert voor kleine t een uitdrukking voor  $P_s|_{x=0}$ .

$$P_{s}|_{x=0} = \frac{\varepsilon_{s,sl}}{\left(\varepsilon_{l,sl} - \varepsilon_{l,0}\right)} \frac{K_{m}^{2}}{K_{0}\eta \Delta x_{m}^{2}} P_{\perp}^{2} t \qquad (C.17)$$

Met de formules (C.6), (C.7) en (C.17) kunnen respectievelijk de initiële koekdikte, -groeisnelheid en  $P_s |_{x=0}$  berekend worden. De profielen van P, en de voidratio volgen uit de integratie van de Darcy-Shirato-vergelijking tezamen met de randvoorwaarden (C.4) en (C.5). Integratie tussen 0 en x levert een uitdrukking op voor x.

$$x = \frac{K_0 P_a}{q_1 \eta (1-\delta)} \left\{ \left[ 1 + \frac{P_s|_{x=0}}{P_a} \right]^{(1-\delta)} - \left[ 1 + \frac{P_s}{P_a} \right]^{(1-\delta)} \right\}$$
(C.18)

De koekdikte L volgt uit integratie van de Darcy-Shirato-vergelijking tussen de grenzen 0 en L.

$$L = \frac{K_0 P_a}{q_t \eta (1-\delta)} \left[ 1 + \frac{P_s|_{x=0}}{P_a} \right]^{(1-\delta)}$$
(C.19)

Combinatie van (C.18) en (C.19) leidt tot het verband tussen x/L (= $\varphi$ ) en P<sub>s</sub>.

$$\frac{x}{L} = 1 - \frac{\left[1 + \frac{P_x}{P_a}\right]^{(1-\delta)} - 1}{\left[1 + \frac{P_s|_{x=0}}{P_a}\right]^{(1-\delta)} - 1}$$
(C.20)

 $P_s$  explicit schrijven als functie van de plaats  $\varphi$  in de koek levert:

$$P_{s} = \left\{ \left(1 \quad \varphi\right) \left[ \left(1 + \frac{P_{s}|_{x=0}}{P_{a}}\right)^{\left(1-\delta\right)} - 1 \right] + 1 \right\}^{\frac{1}{\left(1+\delta\right)}} \times P_{a} - P_{a}$$
(C.21)

De voidratio volgt via de constitutieve vergelijking (37) direct uit P<sub>s</sub>.

$$e = \left(1 + e_{i}\right) \left(1 + \frac{P_{i}}{P_{a}}\right)^{-\beta} - 1$$
 (C.22)

## APPENDIX D. PROGRAMMALISTINGS

#### Elas. for

Dit programme berekent porositeits- en compressiedruk profielen in een elastische en compressibele filtertoes tijdens filtratis. Hierbij wordt rekening gehouden met sedimentatis-effekten. Voor bet oploseen van de 200 wordt de NAG-routine DOJPCF gebruikt Ultwoer: - Beeldscharm, controls programma varloop - FORODI.CAT, tussenrewitatan: Tijd, koendikte en de profisiem van e. Pe en Pl. - FOROII.CAT, tussenrewitaten: tyd. dL/dt. L. Puilloj, 177. filtrastvolumme en een controls-parameter voor bet untegratieverloop. 0 OPTIONS/CHECK/EXTEND SOURCE INTEGER 2. HPDE. M. IU. INGN. INGN. IBAND. IND. IPAIL INTEGER IR. IWK. AANTAL\_ ITERATIES PARAMETER LIR . 191 PARAMETER (INK . 1000) PARAMET REAL® REAL® REAL® REAL® REAL® REAL® REAL® ( 1)NK = 1000) TTD.TTD\_TTER.TTD\_AANROEF.TTD\_FILE.TTD\_DIIT.TTD\_EIND RELEWS.AASERK.WORK(UNK) DLJT\_FOUT.CRID\_OPHOUN\_CRID\_CRENS US.WHITER.EII.IRI L.DLDT\_CRECHAT E\_OLDIEN TTA.PA.FI.KO.DELTA.BETA.E\_0.E\_SL.RHO\_L.RHO\_S.C.FM.COM FIRM.MONT 
 REAL\*8
 ETA, PA. Pl. E0. DELTA, BETA, E\_9, E\_SL, NHULL, RANLS, J.

 EXTERNAL
 PDEP\_BHOR NOMTR

 COMMON
 /GECEVENS
 /L, DLDT\_CESCHAT

 COMMON
 /VOIDRATIO
 /E\_SLD

 COMMON
 /CONSTANTED
 /E\_SLD

 COMMON
 /CONSTANTED
 /E\_SLD

 COMMON
 /CONSTANTED
 /E\_SLD

 COMMON
 /CONSTANTED
 /E\_SLD

 RHO\_L.RHO\_S.C.EM.DEN
 ZOID
 C---- Programma installingen. 
 TID\_INIT
 1.0D-4

 TID\_AANROEP
 2.3

 TYD\_EIND
 0.0D+2

 ANTAL\_ITERATIES
 2.3D+3

 DLDT\_FOUT
 1.0D-4

 CRID\_OPDOM
 1.5

 CRID\_CRENS
 0.8
 C----- (Fysluche) Constanten 
 ZTA
 1.2D-3

 PA
 1.2D-3

 P1
 1.2D-3

 P0
 4.4D-14

 DELTA
 1.77

 BETA
 9.42

 Z-2
 30.67

 Z-7L
 62.1

 2HO\_2
 1000

 9HO\_2
 1201

 CM
 9.3D-15

 ZM
 9.3D-15

 ZM
 1.2D-4
 Diverse Installingen variabelen voor de NAG-routine 203PDF 
 NPDE
 1

 N
 0

 IU
 1

 INORN
 3

 INOR
 0

 INO
 1

 INO
 -1

 IFAIL
 0

 RELERR
 1.0D-4
 C----- Beeldscherm-output. VRITE(\*,\*) VRITE(\*,\*) VRITE(\*,\*) VRITE(\*,\*) VRITE(\*,\*) VRITE(\*,\*) VRITE(\*,\*) VRITE(\*,\*) VRITE(\*,\*) Tijd (#) Voldratio op X+0 T----- Ambrowp subroutine #. TTD • TYD\_INIT TYD\_PILZ • 3 TYD\_INIT OLL ORIO(R.ORIO\_ORENS, ORID\_OPEON, 041; OLL INIT(R.TTO.L.OLT\_UZZOLAT.041, 2) OLL FIL2(R.TTO.L.041,2) MITZ(• 1220.522) TYD.E(1,1) fljden vorden bepaald vaarbij tussenresultaten vorden vergeschreved naar file en besidschers. Subroucine ITERATIZ vorde aangeroepen. D0 WHILE :TYD.LT.TYD\_EIND: TYD\_ITER + TYD\_AARACKEYTYD CALL ITERATIEINYDE.H.; DEF, BHDY.TYD\_ITER.E. UV.IR.PHI.PELERR. ABSERN.INCHA.WONTR.INCH.IRAND.HCFK.INC.IRA.IND.IFAIL. OLDT\_FOUT.AANTAL\_ITERATIES.JS) WRITE(\*, 'IEEO.KEJ): TYD.E(1.1) IF 'TYD.GE.TYD\_FILE: THEN CALL FILE(IR.TYD.L.PHI.E) TYD\_FILE + 1\*TYD\_FILE END UF END UF END OO CALL FILE(IR, TYD.L. PHI.E) END SUBROUTINE GRID(IR. GRID GRENS, GRID\_SPROUM, 241) c----Gridopbouw, in to stallan met parameters GRID\_OPBOUW wn GRID\_GRENS. 0000000 Gridoppouw, in te stalian met parameters Gridoppouw > 1. Fing grid naoly medium: Grid\_oppouw > 1. Fing grid naoly konk/slurry-opp: Grid\_oppouw > 1. Grid over sels roak steeds finger: Grid\_grams + 1. Grid over gedenite v/d konk finger: Grid\_grams + 1. INTEGER I. IR REAL'S CRID\_GRENS, CRID\_SPECIAL, SUN, PHI (IR) PHITL: - 0.0 PHITL: - 1.0 SUM - 1.0 OC (-3).2 IF (I.LE.(GRID\_GUENS\*IN)) THEN PHITL: - PHITL: YEALD\_OPHONE ELSE ELSE ->= 2HI(I) - 2HI(I-1) 900 1P 904 - 908-941(1) 200 30 20 2-2.23

10000000

```
PHI(I) + PHI(I-1)+PHI(I)/SUM
                   200 00
               END
               SUBROUTINE INIT (IR. TYD_INIT, L. DLDT_INIT, PHI, 2)
 Sec. .....
             Initializatio
                 BIELBAINTELL

CHTECER I.IR

REAL*9 TTD_INIT.U.OLDT_INIT

REAL*8 PHILIRI.ZIIRI.FSISD:

REAL*8 IT_0.PS_J.EPS_GL.TERH_VS.TERH_U

REAL*8 IT_0.PS_J.FL.SU

REAL*8 IT_0.PS_J.FL.SU

DELTA.BETA.E_J.E_SU.RHO_L.RHO_S.G.KM.COM

REAL*9 TTA.PA.PI.KO.DELTA.BETA.E_J.E_SU.RHO_S.G.KM.COM

COMMON /COMSTANTEN /ETA.PA.PI.KO.DELTA.BETA.E_J.E_SU.

RHO_U.RHO_S.G.KM.COM
  -----
                 DND DO
              DND
              SUBROUTINE FILE (IR. TYD. L. 2HI. E)
 :
:
              Wegechrijven L. e. PE en Pl als junktie van de
dimensieloge boogte Phi en tijd maar PORODI.DAT.
                INTEGER 1.12

INTEGER 1.13

REAL*8 TTD.L.PS.MACHT

REAL*8 UT_0.28_0.201501

REAL*8 UT_0.28_0.201501

REAL*8 ETA.PA.P1.E0.DELTA.BETA.E_0.E_51.RH0_5.G.EM.DOM

COMMON /MONITOR UT_0.PS_0.20

COMMON /CONSTANTEN /ETA.PA.P1.K0.DELTA.BETA.E_0.E_51.

RH0_1.2H0_5.G.FM.DOM

1 41 TYD
         .
                 21.
             ND DO
WRITE(1...
DND
              JUBROUTINE ITZRATIZ(NPPELH, 2002 BACK, TYD, TYD, ITER, 2.10, IR, 241, 251204,
ABSERR, INORN HOMTR, IMON, JBAND, MORE, IME, IMO, JFALL,
OLDT_POUT, AAMTAL_ITZRATIZS, US)
             Seretend an vergelijst na ledere aanroep van NAG-routine DOIPCF
de oude an nieuwe dL/dt. Indien modio wordt ees itaratieve
berekening uitgewoerd.
 ć
-----
               .
                0 WHILE(TTD.LT. TD_ITER)

TTD_CLD - TYD

TTD_STOP - TYD+TYDSTAP

D0 1+1.1R

2_CLD(11 + 2(1,1)

END 00

QUIT + 0

D0 2011 - 10
                    DO WHILE (OUIT.NE.1)
c-----
c
                       Ouit + 1 als dL/dt geconvergeerd is.
                       Annroep van NAG-routine 003PGF Verwolgens wordt uit bet
oude en nieuwe porceiteitsprofiel een nieuwe schatting
van dL/dt gemaaxt met de volgende formule:
                      c....
                      CALL DO3 POP'NPDE, N. 2027. BNDY, TTD, TTD, TTD, STOP, R.
TU, IR, PHI, RELEAR, ABSTRR, INDRA, NORTR,
INON, IBARD, NORE, DWE, IND, IFAIL:
                    :
```

```
COUNT2 - COUNT2+PHIGEN*DEPS
                                      END DO
DEDT_NEM * ((1-EPS_SL)*(UT+US)*L*COUNT1)/(EPS_SL-EPS_0+COUNT2)
  c.....
c
c
c
c....
                                      Controle of geschatte en berekende dL/dt met elkear overeenkomme.
zo niet dan worden de 11d, je de waarden van e taruggezet en
wordt de integratie opnieuw uitgevoard met de nieuwe dL/dt.
                                      FOUT = ABS(ELDT_NEW/OLDT_CESCHAT)

FOUTHAX = 1+OLDT_FOUT

FOUTHAX = 1+OLDT_FOUT

FOUTHAX = 1+OLDT_FOUT

TTD = TTD_CLD

TTD = TTD_CLD

TTD_STOP = TTD_CLD

TTD_STOP = TTD_CLD

CLDT_CESCHAT = DLDT_NEW

DD T=1.TR

E(1,1) = E_OLD(1)

FUN DO
                                             END DO
                                      5.5
 с-----
с
с
с
                                             Controls integratieverloop s.b.v. een massabalans:
                                            L*int((1-eps)*dPhi)
eps_sl = 1 -
  č.....
                                                                          inc((uc+us)*dz) + L

    OUIT
    + 1

    CDUMT1
    = 0

    FILTRAAT
    + FILTRAAT
    + UT+TYDSTAP

    AANVOER_S
    + UT+VS1+TYDSTAP

    DD 1+.(IR+1)
    - PHI(I)

    DPHI
    - PHI(I+1)-PHI(I)

    EPS1
    = E(1,I)/(1+E(1,f))

    EPS2
    = E(1,I)/(1+E(1,f))

    COUNT1
    + COUNT1+(1-(EPS1+EPS2)/2)*EPHI

                                            210 00
                                            EPSSL_CONTROLE = 1-L*COUNT1/(AANVOER_3
CONTROLE = EPSSL_CONTROLE/EPS_SL
                                                                                                                                      S+L
 c----
                                           Tijd, dL/dt, koekdikte. Ps. Ut en controle-parameter voor
bet integratieverloop worden maar file POROIL.DAT geschreven.
 с
с----
                                           IP (TELLER.LT. (AANTAL_ITERATIES/5)) THEN
TELLER = TELLER+1
                                           ELSE

VRITE(11.'(E11.4E2.2E11.4E2,F10.1,E12.5E2,E10.)E2.F7.4)')

TTD.OLDT_NEW.L.F5_9.UT.FILTRAAT.CONTROLE

TELLER = 1

END (F
 ç....
c
                                           Voor de volgende tijdstap wordt een nieuwe dL/dt geschat.
                                           (1-eps_0)*(k/eca*(-dPs/dx+(rho_1-rho_s)(1-eps_0)*g))x+1
dL/dt =
                                                                                                        (eps_a1-eps_0)
                                                             (1-404_41)*0#
                                                            (eps_s1-eps_0)
 ç
.....
                                         DPS_DPHI + (((1+E_D)/(1+E(1.1R-1)))***NACHT*PA-PA)/
(PHI(1R-1)-1)
DLDT_GINCHAT+ (1-EPS_0)/(EPS_SL-EPS_0)**(0/ETA*
(-DPS_DPHI/L+(NHO_L-RHO_S)*(1-EPS_0)*C) +
(1-EPS_SL*US$/(EPS_SL-EPS_0) - UT
L + L+OLDT_JOH**TYDHTAP
                 ະ
ອາຍີ ເກື
ອາຍີ ເວ
ອາຍີ
ອາຍີ
                   SUBROUTINE POET (NPDE, PHI, TYD, E. DEDPHI, P.C.C)
с-----
с а с с с с с с с с с с
                   Definitie PDV in de vorm:
                   C * de/dt = d/dPhi*[G*de/dPhi] + F
                   G + (1PDL.C.L.

INTEGER NPDE

REAL+9 PHI(NPDE).TTD

REAL+9 E(NPDE).DEDPHI(NPDE)

REAL+9 E(NPDE).DEDPHI(NPDE)

REAL+9 E(NPDE).G(NPDE).C(NPDE)

REAL+9 ANOTI.NACHT2.GL.G2.G3.P1.F2.F3

REAL+9 L.DLDT

REAL+9 L.DLDT

REAL+9 ETA.PA.P1.KO.DELTA.BETA.E_0.E_SL.RHO_L.RHO_S.G2.KN.DKN

COMMON /WONITOR /UT.P3_0.PL

COMMON /CONSTANTEM /ETA.PA.P1.KO.DELTA.BETA.E_0.E_SL.

RHO_L.RHO_S.G2.KN.DKN
                        NACHT1 = (1-OELTA)/BETA
HACHT1 = (1-OELTA)/BETA
G1 = PA*K0/ETA/BETA
G2 = 1/(1-E[1))**2
G3 = ((1+E_0)/(1+E[1))**NACHT1
F1 = NACHT2*(RHO_L-RHO_S)*G2*K0/ETA/(1+E_0)**2
F2 = :1:4E(1)*((1+E_0)/(1+E(1))**NACHT2
73 = L/(1+E(1))**2*OEDPHI(1)
C(1) = (L/(1+E(1))**2
G(1) = C1*G2*G3
F(1) = (UT+PHI(1)*OEDT-F1*F2)*F3
ND
                    END
                    SUBROUTINE BNDY (NPDE, TYD. E. IBND. P. Q. R)
c.....
c
                    Randvoorwaarden in de vormi
.
.
.
.
.
.
                     Piti * + Q(t) * de/dPhi + R(t.e)
                    Tussan de granzen Phi = 0 (IEND=0)
en Phi = 1 (IEND=1)
                       INTECER NPDE, IBHD
REAL'S TTD.E(NPDE), P(NPDE), Q(NPDE), R(NPDE)
REAL'S AACHT, 01.02
REAL'S UT, PS_0, PL(50)
REAL'S UTA, PA, PI, KO. DELTA, BETA, E_O.E_SL, RHO_L, RHO_S.G, KN. DEM
COMMON VORNITOR /UT, PS_0, 7L
COMMON /CECHYTAM /UT, PS_0, 7L
COMMON /CECHYTAM /UT, PS_0, 7L
COMMON /CECHYTAM /UT, PS_0, F1, KO.DELTA, BETA, K_0, K_SL.
NHO_L, RHO_S, G. ER, DEM
                         NACHT = (1-OELTA)/SETA

21 = PA*KO/ETA/BETA/L

22 = (11+K_0)/(1+K(1))**MACHT

17 (ISHO.EQ.0) THEN

111 = 77
```

C

```
Q(1) • -(Q1*Q2)
R(1) • KO/ETA*((1•K_0)/(1•S(1)))**(-DELTA/BETA)*(XHO_L-MHO_3)*G-UT
                            R(1) = X0/)

<u>Y7.5</u>

P(1) = 1

Q(1) = 0

R(1) = Z_0

END 1P
                        710
                      SUBROUTINE HONTR(NPDE, PHI, IR, TYD, TYD_DAARVOOR, É, IU,
TYD_STOP, TYDSTAP)
c----
                        LDFOUTILE VOOT TURNER
DYTECER I.IR.NPDE.IU
REAL'S PHI(IR).2(1,IR)
REAL'S THD.TYD_DAARVOOR.TYD_STOP.TYDSTAP.MACHT
REAL'S COUNT.95.DPHI.EPS1.EPS2.EPS_CEM
REAL'S UT.PS_0.PL(SO)
REAL'S L.DLDT
REAL'S TTA.PA.PI.KO.DELTA.BETA.E_0.E_SL.RHO_L.RHO_S.G.KM.DOM
COMMON /CONSTANTEN /UT.PS_0.PL
COMMON /CONSTANTEN /ETA.PA.PI.KO.DELTA.BETA.E_0.E_SL.
RHO_L.RHO_S.G.KM.DOM
                      Subroutine voor tussentijdse berekeningen van Ps_0 en Ut.
c .....
              .
                            HACHT + 1/BETA

COUNT + 0

PL(IR) + P1

OD 1+(IR-1):1,-1

DPHI = PHI(I+1)-PHI(I)

EPS1 = E(1.(I+1))/(1+E(1.(I+1)))

EPS2 = E(1.I)/(1+E(1,I))

EPS2 = E(1.I)/(1+E(1,I))
                          EP52 = E(1,1)/(1+E(1,1))

ZP5_GDM = (EP51+EP52)/2

P5 = ((1+E_0)/(1+E(1,1)))**MACHT*PA-PA

COUNT = COUNT*(RHO_S*(1-EP5_GEN)+RHO_L*EP5_GEN)*G*L*DPHI

P((1) = P1-P5+COUNT

END D0

P5_0 = ((1+E_0)/(1+E(1,1)))**MACHT*PA-PA

UT = KH/ETA/CXH*PL(1)
                   DC<sup>1</sup>
```

```
filtrs for
        C LITTE DU
C dit programma barakant poromitaita: an compressiednus profisian
C in ean compranasibale filterkees tijdans filterie
C voor incegratie van de POV wordt de Neineurouine 56.263 gebruist
         u
C vasca stof wordt als elastiach Deschwed
       C constitutieve vergelijkingen
C fonstitutieve vergelijkingen
C f/(l+e)=1/()+e0(*)1+p#/p#/fbsta
C K+K0*'(1+e0//1+e)|*(-delta/bete
C
                                  OPTIONS/CHECK/EXTEND SOCACE
        с

    NEAL'S
    TEL.TYD_INTERVAL.TYD_DTOF

    REAL'S
    VOIDRATO:: 20. VOIDRATIC 5.20.

    REAL'S
    RELEN.ASSED.WOFF 80.

    REAL'S
    RELEN.ASSED.WOFF 80.

    REAL'S
    RELEN.ASSED.WOFF 80.

    REAL'S
    RECONTRACTOR 1.20.

    REAL'S
    RECONTRACTOR 1.20.

    REAL'S
    RECONTRACTOR 1.20.

    REAL'S
    RECONTRACTOR 1.20.

    REAL'S
    DELTA.CRACK

    REAL'S
    DELTA.CRACK

    REAL'S
    TINAL PL(1.25.

    REAL'S
    TINAL PL(1.25.

    REAL'S
    SOLVOL, PSEAR(1.25.)

    REAL'S
    SOLVOL, PSEAR(1.25.)

       с
                                  DITEXT NPDE.N. 10, DIGR. 146H (BAND 197, IND 1941)
DITEXT 1, 10, 100205, AMTAL, CRIC. PLATEN 105
       Ċ
                                 EXTERNAL POET . BNDY . HONTE
       ~
                               CONNON /GENVOID/EAVINT
CONNOV /GENSPANHING/GENPC
CONNON /CONVECT/UT
CONNON /CRID/ANTAL_CRID_P/RTEH
CONNON /CRID/ANTAL_CRID_P/RTEH
CONNON /CONTANTE/ETA.PA.KG DELTA.RETA.LANBLA PI.
NOCTE_TO VOIDRATIO_C.RH
CONNON /RANDYCORMAREE
                       .
       c
                       CALL CONSTANTER (ETA. PA.FO DELTA, BETA LANBLA PL.
* HOODTE TO VOIDEATIO, D.R.
     C
C
C bereken ymsk vaarde
C
                                 MAX. 1 000/11 000-VGIDBATIC C HOOGTE TI
       C roostarpunten grid berezenen -wurdt geschreven naar POPOLO DAT
C groot wurdt steeds fijner nacit filtermedium
C
                                  AANTAL_TRID PENTENDIA (1.105
18-AANTAL SPID_PENTEN
GANKANING 4
IGRENS-0 5+18
                              108205-0.5128
H(1+1-0)
2014-1.5
10 1+2.19 1
IF 1122 (1915)
H 1.-411 . 19970
BLOS
H(1+411 . 19970
BUN (5.44 1)
BUN (5.44 1)
BUN (5.44 1)
DNC (5.44 1)
DNC (5.44 1)
                                                                                                TYD-
                    .
           C
C beginvoorwaarden wegentrijker naer '...v
                             10 1+1 10

METE 1 4+1:5+. TEC X 1 V0004AT01 1 pm ...

EMD D0
   C start integratie PDN
C start integratie PDN
C zalf een bepaalde feiddirregratietijdf ithniiker
C
                          CONTRACTOR OF THE STATE OF THE SAME AND THE STATE OF A SAME AND THE SA
13
     .
C tussenremulaten naar erbert et flik (PSP11, DAT en PSP11, DAT
C
                                      DC 1+1.19

WRITE-1 = 4+1:14. - TYC / 1 -/0104470.1.1 - 5+1.

BYD DC

TYPE 101 TYD.V01044701 1 0
  C TYPE (61 TYD.VOIDPATID 1 )
C C TYPE (61 TYD.VOIDPATID 1 )
C commence coordinated on tijd wordan weggeertreven naar POPDIE DAT
                               DG 142 18
201 40 DG
201 4211 14401 1 * 1 0DG& VOIDPATIO 1 1 4 VOIDPATIO 1 1 4 * 0DG
END 06
      C tussenzesuitates near ecterm en file. PORSSI LAT en PORSIS DAT
                                       DO 1+1.1P
WPITE11 14013 Sec. TYL X J. VOIDPATIO 1 1.00 1 -
                                          TYPE 101, TYS. VS1DRATIC : .
    n
O hydrail.achd an tombreasiedrus profieler wurden neresand an gewinzeven naar
C MORDOB DAT
                                         DC 1+1.1F

MACHTEL COC/BETA

PABARILLIVE -1 CDC++VILWATIN 1 I CDC++VILWATIN 1 I -++ MACHT

PS-1.1 -+PABAR -1.1 -, 1 -FA

PUL 1 I.+PI-PS-1 1

EVD 1A

VY.TH JL -2015 SH4 - 175 J1
     / Baretenen van de gemuddelde voldratio EAVINT en compressiednik (EKV).
                             DC I+1 CF
DATESPANS (.I.+YSIDRATIV C.I.
ENL CC
```

17 TY: 77 . 02-1. THEN

ź

```
DO 1+1::IF-1

H/1:+H 1: YHAX SUM

T(1+1:+X 1:+H-1

END DO
C Berskenen H/20.
                              H1201-H 19 *CANDA
C pedin Accident
C
                                DO I=1.1P
VOIDMATIC-1.1++VOIDMATIC_S
DME DO
DO I=1.1R
PL:1.7 =P1
PS:1.1:=P1.9L 1.1
EMD DO
                               IU=1
UT=0 D0
D0 I=1.1R
I(I=X|I=11 C=VCIDRATIC_0
BMD D0
                              DO 1+1.18
DETEGRANS 1.1.4VOIGRATIS 1 1
                              FPDE-1
                                H-0
RELEDUR-G DGGDGI
ABSERR-G 000501
THCRN=C
INON-S
                                1808+5
1808-5
1808-1
1808-1
1807-857
1841140
.
O start tijd en rijdsinnerkel Haschisser remuraten Hurden opgegeven
                                 TYL-S S
TYL DYTERVAL - SYS
d
C bezichten op het schert
                                TYPE W
                         TYPE 91
TYPE 91
POPMAT 117 - THEREDOIBLE LARE FILTRATION
        95
       9: .
                               TYPE 9"
Pormat 10% Extr La Hell
        9-
                             Process
P
                               800-00.
800
                               SUBROUTINE FORE HPDE X TYD VLIDRATIC DVCIDRATIC X F C 1
                                DATEGER NARCELL AAATAL DECCURPTED DE
REALME RANNETSCHOLORATIC N. DATEGRATIC, FIN
REALME FIN DIS ADJORATIC N. DATEGRATIC, FIN
REALME VE VOIDERTIC D. RADAT TO CO
REALME FI POLETALIC N. RADAT TO CO
REALME FI POLETALICE RES DE FLOR PRODAMALHOOGTE, TO
REALME FINGED DE TA COLOR
REALME LANDER BETA
                              ARADIG III.
COMMON /CONVERTING
COMMON /CRICIAANTAL_CRIC PARTER
COMMON /CONSTANTENCEIA DA FO DELLA BETA DAGESA PI
HONOTE_TO VOIDRATIO (JEM
                               MACHT+1 COC/BETA
PABA+ 1 COC/BETA
PABA+ 1 COC/BCIDATIO_S 1 COC/BCIDATIO_______ MACHT
BTER-FRAMETIO_____
COL=1 C/____ SAVECEATIO_1 MACHT
CL=_____ SAVECEATIO_1 MACHT
CL=_____ SAVECEATIO_1 MACHT
CL=____ SDO-POIDPATIO_S MICLORATIO_1 MACHTA/BETA/
                               C 1 -. 1
G 1.-OTTOINGLE I 100-POTER 74
F 1.-S
                               RET ORM
                                SUBMONTINE BADY APPE TYC VOIDPATIO ISAG P 1 5
                                INTEGER I AANTAL TRID PLATEN HEDE LENG
REALTS TEL VILLENTIG - P - GIV L -
REALTS VILLENTIG - P - EN F
REALTS - VILLENTIG - PLATENER - F
REALTS - DX FM GARMA SCALE - T - T
```

c

c

~

jc

```
REAL*8 DVOIDRATIC_X.QO.Q1.NACHT
REAL*8 PABAR PSTER.P2.P3.V.ETA1
REAL*8 BETA.DELTA.N.Q2.LAKBDA
                                                                                                                                                                                                                      PSTER+(PABAR-1 0) PA
                                                                                                                                                                                                                      PL1 = P1 - PSTER
                   CONMON /CONVECT/UT
CONMON /CRID/ANTAL_GRID_PUNTEN
CONMON /CONSTANTEN/ETA.PA.KO.DELTA.BETA.LANBDA.PI.
HOOGTE_TO.VOIDMATIC_O.RM
 Ċ
                                                                                                                                                                                                  c
                                                                                                                                                                                                                     UT-BH PL1
                                                                                                                                                                                                  c
c
c
                                                                                                                                                                                                       tijd.tijdetap en út wegechrijven maar FOROG3 DAT
                                                                                                                                                                                                                      WRLITE(3, 12015 50211 - TYD.UT
                                                                                                                                                                                                  с
с
с
C
C randvoorwaarda op x=Hit;
C
                                                                                                                                                                                                                     RETURN
                   IF (IBND.20.1) THEN

P(1)=1.0

Q(1)=0 0

S(1)=V010RA710_0
                                                                                                                                                                                                  c
c
                                                                                                                                                                                                              SUBROUTINE CONSTANTEN (ETA, PA. KC. DELTA, BETA, LANBDA, P1, HOOGTE_TO, VOIDRATIO
* RM) . .
                   ELST.
C
C randvoorwaarde op x+0 ut+ulm+AH*(P1-ps,x+0)
C
                                                                                                                                                                                                  c
                                                                                                                                                                                                                      REAL*8 F1.ETA. PA. RH. DELTA. LANBLA. BETA
REAL*8 HOOGTE_TO, VOIDRATIG_D, RO
                  WACHT+1.0D0/BETA

PABAR+([.0D0+VOIDRATI0_0)/(1.0D0+VOIDRATI0([]))**(WACHT)

PSTDS+(PABAR+1.0)*PA

00+1.0/HTA/BETA**PA*K0

01+(1.0/(1.0+VOIDRATI0(1))**2.0

02+((1.0D0+VOIDRATI0(1))**2.0
                                                                                                                                                                                                 c
                                                                                                                                                                                                                     ETA-1 0D-3
PA-3 74D3
ED-4 5D-14
DELTA-2 05891D0
                                                                                                                                                                                                                      ATTA-0.315000
                                                                                                                                                                                                                      LANSDA-1D-2
                                                                                                                                                                                                                     LAURIN + 10-2

91+205

HOCGTE_T0+4 5D-2

VOIDBATIO_0+11 4000

B04+5.890-9
                  >/1)-0
Q(1)-Q0*Q1*G2*(1 0D0-PSTER/PA:
S(1)-ut
                                                                                                                                                                                                Detserver
C
C
C STA-usessistic filtrest
C STA-usessistic filtrest
C STA-usessistic filtrest
C Standa delte-compressisconstante
C Hourre TH-dikte filterkoek op te0
C VOIDA-TD-Gabegurvoidreit op tijdetip te0
C VOIDA-TD-Gabegurvoidreit op tijdetip te0
C NH-Verstand filtermedium/visconstait
C RH-KH/idr*ETAI
с
                   D4D 17
с
                  RETURN
DID
c
                 BURBOUTINE HONTR(HPDE,X,IR,TYD, TYD_DAARVOOR,VOIDRATIC,IU,
TYD_STOP.TYDSTAP+
c
                  DITTEGER 10.NPDE.IR. 1 AANTAL_CRIS_RINTEN
REAL'8 X(*).TTD.TTD.DAARVOOP.VOIDAATIG\1 *\.Z:40
REAL'8 UT.TTD.STOP.TTDSTAP
REAL'6 DI.TTD.STOP.TTDSTAP
REAL'6 GANKA.HOOTE.TL.VOIDATIG.G.NACHT
REAL'6 DETTA.PARAK.PSTEN.PARAR1.PL
REAL'6 DETTA.FARAK.PSTEN.PARAR1.PL
REAL'6 DETTA.FARAK.PSTEN.PARAR1.PL
REAL'6 DETTA.FO.A.VETAI.
REAL'6 DETTA.FO.A.VETAI.
REAL'6 DETTA.FO.A.VETAI.LANBLA BETA
REAL'6 CENFS.PS'1.21.INTEGRAAL.PSTEAFILI.
                                                                                                                                                                                                                     RETURN
END
c
                  COMMON /CERVID/EAVINT
COMMON /CERSPANDING/CDF/S
COMMON /CERSPANDING/CDF/S
COMMON /CONVECT/T
COMMON /CONVECT/T
COMMON /CONSTANTEN/ETA SA FT CALTA BETA LAMELA S.
MOVOTE_T: /CIGATIO_S.PP
```

i.

```
SUN+SUN+H:1)
END DC
DC 1=0 CC
DC 1=1 12R-1
H:1+H 1 YEAA SCH
R:1+1+X 1-+H 1
END DO
       C expressie for
               VATALA 1
            versiell 0
dit programme bernkant porositeits- en compressiedruk profielen
in een compressibele filtersoek tijdens avpressie
berekkningen tijn gebeseerd op algemeen eenvaardbare
differentieslvergelijkingen toels veerogeeven in de filtet.e.jteratuur
voor integratie van de POV wordt de NAC-suproutine DOJPOF gebruikt
       000
                                                                                                                                                                                                                                     C Degisvoorvearden worden ingeleten van for901.dat, eindeltuatie van filtra
C feee
C f
             vaste stof wordt als elastisch baschouwi
            Constitutiove vergelijkingen
1/(1+ei=1/(1+e0)*(1+p#/ps/^beta
K=K0*((1+e0)/(1+e))*(-delta/beta-
                                                                                                                                                                                                                                                               OPEN (UNIT+1) FILE+ (ord)) DAT', STATUS+ DLD , IOSTAT+IOS;
IP (IOS ME 0) THEN
PRIMT *, "OPEN-POLT IOS
ELSE
                             OPTIONS (CHECK/EXTEND_SOURCE
                           OPTIONS/CHEED/LETTEND_SOURCE

REAL'8 TYD.TYD_DITERVAL TYD_STOP.W

REAL'8 VOIDHATIC:1.10, VOIDHATIC:0 LANDDA SUM

REAL'8 RELEAR ABSEN WORK:800°

REAL'8 X1201,21201,M120,A120,PS:1.251

REAL'8 Y1.P0_ETA.BETA, YMAX Y.251

REAL'8 FILPO.ETA.BETA, YMAX Y.251

REAL'8 OI(12.25),02.03,0411,251 OS:1.251,06(1.25)

REAL'8 OI(12.25),02.03,0411,251 OS:1.251,06(1.25)

REAL'8 OI(12.25),02.03,0411,251 OS:1.251,06(1.25)

REAL'8 OI(12.25),02.03,0411,251 OS:1.251,06(1.25)

REAL'8 OI(12.25),02.03,0411,251,05(1.25),000011,201

REAL'8 DITER.CHVOIDHATIC.PAAR.1.GBMPS

REAL'8 DITEGRAND(1.25),DTTERM.LIQVOLINT
       с
                                                                                                                                                                                                                                                                ELSE
DO INI IR
ARAI
END DO
DHD IF
TYD-0 0
                                                                                                                                                                                                                                                                                             -
-11 ---4#13 5#2+ -- ±+10 Υ+1) VOIDRATIO(1,10.0#(1.1/
                                                                                                                                                                                                                                         C Ditrakemen wan da gemiddelde voldratio bij het begin wan de expressie
                                                                                                                                                                                                                                                               DO 3+2.1W

I(1)+0

I(1)+1+1+H(1+1++(1 ODO+(VCIORATIO(1,1-1)+VOIDRATIO(1,1:/2 ODO)

EMD DO
      с
                                                                                                                                                                                                                                                              LIQVOLDT+0 DC
DFTEGRAL+0 D0
D0 1+2.IN
DFTEGRAL+DFTEGRAL+:(V0IDRATIC(1,I-1)+V0IDRATIC(1,I):*
((x(1)-+(x(1+1)))/(ymax*2.0))
LIQVOLDT+DFTEGRAAL
NUT D0
                            INTEGER NPDE.N. 10, INOR. INON. ISAND. IWR. IND. IFAIL
INTEGER I, IR. IGRENS, ANNTAL_CRIT_PUNTEN. IOS
      c
                            EXTERNAL POET BADY . HONTE
      c
                                                   CONVECT/UT.PS
/GBWV/GBWV/GBWTID
/GRID/AANTAL_GRID_PUNTEN
/CONSTANTER/ETA.PA.KO DELTA.BETA.LANBIA.N.PI.
HOOTT2.TD.HOOGTE_TOP.VDIDNATIO_C RM
/RANDV/RANDVOOBMARDE
/RASSABALANS/EPSAVINT.EPSAVPU
                           CONNON
CONNON
CONNON
CONNON
                                                                                                                                                                                                                                                              CENTRATIDAL LOVOL DAT
                                                                                                                                                                                                                                                              RANDVOORWAARDE. VOIDRATIC 1.1:
                                                                                                                                                                                                                                                               IU+1
UT-0 D0
                            CONNION
     c
                                                                                                                                                                                                                                         с
                   CALL CONSTANTENHETA PA RO DELTA BETA LARBOA N P1.
* HOOSTE_T0.HOOSTE_T0F.V01DRATIO_0.RH:
     c
c
c
                                                                                                                                                                                                                                                               YINAX+.1 ODG. 1.0DG+GENVCIDRATIC :*HONGTE_TO
           bersken yver vearde
                                                                                                                                                                                                                                                             HOINE 7
SUMEL 7
SUMEL 7
ON INITIPH
IF I LE TORENS THEM
H'T H LOITGAREM
     è
                           THAX+.1 0D0+11 0D0+V0IDRATI0_0 - *HOOGTE_TOF
     c
          roosterpunten grid beretenen, wordt geentieven maar POPDD2 IAT
grid wordt steeds flyner nabij filtermedium
                                                                                                                                                                                                                                                             ELST.

M () and (-) () gamma

ELST.

M () and (-)

ENT ()

SUN-SUN-H ()

ENT (C)

ENT (C)

K () and (-)

ENT (C)

K () and (-)

ENT (C)

E
                           AANTAL_GRID_PUNTEN+(* 1000
IF+AANTAL_GRID_PUNTEN
GANGA+2 2 B
IGRENE+1 51TR
                        CAno.

IGRD0421091

SUH101

SUH101

DE 14100541

IF 1122105451 THEM

H 1+00011108455

Them

Them
                                  HILLERICA
BNC 1F
                                                                                                                                                                                                                                                              DD 1+1 19
2:1 +X 1 * 1 0DC+DEMVEIDRATIC
                          ENC X
                                                                                                                                                                                                                                                                                write 9 liel Sec - tyd eavint
                                                                                                                                                                                                                                                                           ENC DC
VRITE II
                          NPDE : :
                                                                                                                                                                                                                                                                      WRITE 11 *
Sype 101.tyd veldratin 1 10
wrw. 0 1.v
end if
                          H-0
RELEASIG 000001
ABSERAID 000011
INGRA-1
                          THONAL
TBANGED
                                                                                                                                                                                                                                       0
7 bydrauliacha- an compressiednis profiel worden geachreven naar PORCI6 DAT
                          IND- 1
IWF-81'
IFAIL-'
                                                                                                                                                                                                                                                                     .
E start tijd en tijdsinterva, waarcussen resultaten worder opgegeven
                          TYD-1 )
TYT: INTERVAL-11
W+0 1
                                                                                                                                                                                                                                                                     DO DALLOP
INTEGRAND : DAFIDERATORI I
END DO
LIVYDENTA, DF
INTERNA (F
DO DALLOS
  .C
C berichten op het ecterm
C
                                                                                                                                                                                                                                                                    TYPE 91
PORMAT
TYPE 95
PORMAT (DX COMPRESSIBLE CAFE FULTRATION
   90
         95
                       TYPE 9"
PORMAT:10X. "EXPRESSION OF FILTER DATE
                                                                                                                                                                                                                                 · :
        97
                                                                                                                                                                                                                                                                    INTECRAAL+0.00
D0-1+2-19
20:1+* D0
INTECRAAL+INTECRAAL+*PS-1-1+1+*PS(1,1+***/y1mmx+x:0+1+
y1mmy+x-1,***y1mmx*1-0*
CEMPS+INTECRAAL*1-0
END-D0
END-D0
       TYPE 100

FORMAT 110X STAFT BENEFLEMINGEN

10X TIJDIS VOLDERTI X+F

TYPE 101 TYC VCLEMATIS 1.2C

101 FORMAT 15X F* 1.10X F7 4:
                                                                                                                                                                                                                                  ı.
   C
C beginvoorvaarden wegschrijvan naar file
                                                                                                                                                                                                                                 gemiddelde vojdratic volgens profie, en volgens flux worden
geschreven mear PCR009 DAT inner van missanejane
                        DO 1-1.18
                        porollinewoidration1 in/levoidratio line
wwittE(21.** tyd.a(x) woidratio 1 1
pot bo
wwittE(21.**
                                                                                                                                                                                                                                                            END DO
END
                                                                                                                                                                                                                                     c
  C start integratie FDN
C start integratie FDN
C zelf een bepaalde "eindintegratietijd" itwuller
C
                                                                                                                                                                                                                                                             SUBROUTINE PDEY: NPDE & TYD. VOIDRATIC DVOIDRATIC_X F.C.C.
                                                                                                                                                                                                                                   İç
                                                                                                                                                                                                                                                            DYTEGER NPDE LLAANTAL_CRILPHYTES IS
REALSS X*** TTO VOIDRATIC * DVOIDRATIC_X**
REALSS 7*** CI** FLAAN PETER
REALSS 7***CIPATIC, MACHT DO GI
REALSS 7***CIPATIC, MACHT DO GI
REALSS 7***
REALSS REAL PARTS XX RA CANNA HOOTE_TT HOOTE_TOF
REALSS REAL PARTS XX REAL SANNA HOOTE_TT HOOTE_TOF
REALSS REAL PARTS XX REAL SANNA HOOTE_TT HOOTE_TOF
REALSS REAL PARTS XX REAL SANNA HOOTE_TT
                      D0 WHILE .TTLLT 100000
TTL_STOPATTL.TTL_INTERVAL.
CALL 001PGFINPDE B.PTEF BHEY TTL TYL STOF ACIDBATIC
IU.IN X.RELEY ASSERF INORS MONTR INCH
IBANE WORF IWX INC IFAIL
                       D0 1+1 18

110+0

2(1+2)(+1)+H+1+1+11 CD0+/VCIDRATIO(1))10+VCIDRATIO(1)1 1 1000

ENG D0
   c
                                                                                                                                                                                                                                   . c
                                                                                                                                                                                                                                                                               CONVECTIUT PS
/GENVICENVOIDEATI:
/GENVICENVOIDEATI:
/GENJ/AANTAL_GALI_PENTEN
/GONSTANTEN/ETAIRA.LC CELTA BETA LANEDA.N.P:
MOODTE_TC.HOODTE_TCF.VOIDEATIC_D.RM
                                                                                                                                                                                                                                                            CORLEON
CORLEON
CORLEON
                                                                                                                                                                                                                                                            COMMON
 C
C
C tussenresultaten mear scherm en file -FOROC1 CAT.
C
                                                                                                                                                                                                                                 ÷
                                                                                                                                                                                                                                 jε
                                                                                                                                                                                                                                                            if (tyd.ge w) then
D0 1+1.TR
pprovid (**voidratio(1 1), '1*voidratio(1 1
#RTTE(1), ** TTE(x)) voidratio(1 1
                                                                                                                                                                                                                                 i
```

Т

SAT LO ADRANCO/ NORMOD MEAL+8 PS. GENVOLFMATICE LANBLAL MEAL+8 PS. GENVOLFMATICE LANBLA MEAL+8 PS. GENVOLFMATICE POLTAL BOLTAL MEAL+8 PALAH PERMATICE POLTAL BOLTAL BOLTAL MEAL+8 PALAH PERMATICE POLTAL MEAL+8 PALAH MEAL+8 PALAH PERMATICE POLTAL MEAL+8 PALAH PERMATICE POLTAL MEAL+8 PALAH MEAL+8 ٦ì SUBROUTINE MONTA IN DELIXIE TYL TYL CAANVOOR, VITEMETUO. IU. TYL CITERE MONTAN IN DELIXIE CAANVOOR, VITEMETUO. IU. 2 2 O MO Internation р DAD RELINK **a:** 0**10** ۵ e(1)=0 0 0(11=1 0 ⊾(7)=0 0 2 C Plessopeiede druk: C Plessopeiede druk: C Prostreistingeocostente C Prostreistintogeocostente C Prostreistinte compressionente C Poostreistinte C Poostreistin C razdvoorwaarde op x+0 voldratio vordt bespaald aan het einde van filtratiese. C 2512 5 EXT 21 60-3 ADIDARTIC 0+11 400 ADIDARTIC 0+11 400 57 500 57 500 57 500 58 500 58 500 58 500 50 500 5 5 C sandvoorvaartde op s-H(t) C COMMON VITABLY VITABLY STATE COMMON COMMON COMPONITE COMMON CONTINIAL STATE STATE STATE STATE COMMON CONTINIAL STATE STATE STATE STATE COMMON CONTINIAL STATE COMMON CONTINUES STATE CO . INTEGER I. AMPTAL\_GRID\_RUPTER HPDE.I BND INTEGER I. AMPTAL\_GRID\_RUPTER HPDE.I BND IREAL \* VOIDBAFTIQ\_D.F. ETA, FA, FA, FA, EAGENO IREAL \* RUPALING, FSTER, EMPTYOORVEAUEDE IREAL \* RUPALING, FSTER, FSTER, FSTER IREAL \* RUPALING, FSTER IREAL \* RUPALI э Þ NEXT-9 P1. FTA. PA. (M. JETA. DELTA.)\* NEXT-9 HOCTE\_TO. HOCETE\_TOF. VOIDIATIO\_0. FG. LANGEDA Э BURNOTTINE CONSTANTEN (ETA, PA, KO, DELTA, BETA, DAUROA, N. P.). HOLOGITAREN (ETA, PA, KO, DELTA, PAURATO, OLUMI) IS TO THE MADE OF THE ADDITION TO ADDITION TO ADDITION OF THE 2 2 END Nellon NULCINA Intelation 3 111-0 011-00-01-03-11 000-12150 (197) 011-11 0 COMMON \CENA,\CENA,\CENA,\CENA,LIL,SERVLT COMMON \CENA,\CENA,LIL,SERVLT,SERVLT HOOCLE\_TO,HOOCLE\_TO,HOOCLE\_TO,HOOCLE\_TO,TMEPY COMMON \CENA,\CENTLA,LIL,SERVLT,SERVLT HOOCLE\_TO,HOOCLE\_TO,HOOCLE\_TO,HOOCLE COMMON \CENA,\CENA,CIDHYICON HOOCLE\_TO,HOOCLE COMMON \CENA,\CENA,CIDHYICON HOOCLE\_TO,HOOCLE HOOCLE COMMON \CENA,\CENA,CIDHYICON HOOCLE TO,HOOCLE COMMON \CENA,\CENA,CIDHYICON HOOCLE TO,HOOCLE HOOCLE COMMON \CENA,\CENA,CIDHYICON HOOCLE COMMON \CENA,\CENA,CIDHYICON HOOCLE COMMON \CENA,CIDHYICON HOOCLE COMMON \CENA COMMON \C С C3++11 0+A010MV110 0+11 0+A010MV11011+++15 02 C3++11 04A010MV110 0+11++15 02

1

```
C expres_via for
C versia 1.0
C dis programma berekent poromitaita- en compressiednik profielen
C in een compresibale filterkoek tijdens expressie
C berekeningen zijn gebeseerd op algemeen aanveardiere
C differenties-vergelijkingen zoals weergegever in de filtratieliterstuur
C moor untegravie van de PDV wordt de NAS-mulroutide DOIPOF gebruikt
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               HIII-H II
ENG 17
SON-SON-H I
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   SUN+SUN+F 1
EMC 20
X-1 +0 20
DG J+1 19 1
H/1 +H 1 17MAX 2 H
X-1+1 +X 1 +H 1
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     D(1)
              C vaste stud wordt als visco elestisch beerhouwd.
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              C beginvoorwaarden wirder ingeveren ven for001 det eindeltuetie van filtrati
C faae
           c
C constitutieve vergelijkingen
C 1//likeix1//like(1*11-pe/pe/pe/cbete
C KEPO*/(likeCi//like/conf-delta/bere
C
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  OPEN (UNIT-11) PIL2+ forG11 DAT , STATUS-(GL2 : IOSTAT-IOS

IF (IOS NE 0 THEN

PRENT : COPEN POIT : IOS

ELSE

D0 1-1 IN

REAL (1) - (e); Sec. (1 E(1),Y(1),VOIDRATIO 1 (),pe(1)),

END 00

END 10

TTEND 0
                                              OPTIONS/CHECK/EXTEND SOURCE
                                            do jel ir
peb/l.. =pel .
mnd do
          c
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               C'Ultrekenen van de gewiddelde voldratic bij het begin van de empressie
                                              INTEGEP NECE.H. 16, INORAL INON IBANE. INF INI IFAIL
INTEGEP I. I.R. ICRINS, AANTAL, CRIC. PARTEN, 105
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   DO 1+2.19
           c
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      2/1.+C
1(1.+2 1-1.+H 1 1 *11 000+ VOIDMATIC(1.1-1)+V01DMATIC(1.1. /2 0DC+
                                              EXTERNAL PORT BROY . WONTH
           r
                                                                           /CONVECT/Vold
/CONVECT/Vold
/GENV/GENVOLDRATIO
/GREDVANTAL_CRIL PIATEN IF
/CONSTANTALCRIL PAIFO.DELTA BETA.LAKBLAL N.PI
/CONSTANTEN/CONASAFO.
/RAND/RANTAVCOMASAFO.
/RANSARALANS'EPSAVINT ZPSAVFI.
/pla/bla
/vold/voldratio.psb
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   COMMON
COMMON
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 LIQVOLINT+0 00
DETECTATION 00
DETECTATION DETECTATION FOR TION FOR TION FOR
LIQVOLINT DETECTATION FOR TO SUC
LIQVOLINT DETECTATION
DEC. DO
                                              0040408
                                              CONDICIN
                                             CONDHON
CONDHON
CONDHON
CONDECE
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 DATE DE
CONVOIDRATIO-LIGPOLINT
        С
                              CALL CONSTANTES ETA PALKOLDELTA BETA LANGUAL N FI
NOOTTE_TO NOOTTE_TOF VOLLAATSO_1 PH 141.41 4-
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   RANDVOORMAARDER; #2 1 1
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  10+1
07+5 5/
        С
        C bereren ywax veerde.
C
                                            YHAX+11 DIX 1 DIG+VOIDPATID_1 *HONGTE_TOP
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  TIMAXA I COLVER INCOMPATION MONOTE TO
   MAX+11 DX. 1 DG+VDIDRATID_L MMAKTE_TOP
E
E Downerpunter grid deresenen wordt gestiever naar MORTL Dat
E grid wordt steeds tijner nabl, flitereetlike
E D
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                H(1 + . .)

SDH+, .)

DG 1+1 (P-)

IF - 1 LL (DPD-) THD-

H 1 + . . . . ...

SDH-1 + . . .

SDH-1 + . . .

SDH-1 + . . .

DH D (F

J 1 + . . .)

J 1 + . . .
                                          AANTAL GPID PONTEN-10 100

19 AANTAL PPID PONTEN-10 100

GANNAL 0 8

10 PDL 0 10

K 1 + 1

DO 1 + 0

10 + 0

K 1 + 0

10 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1 + 0

K 1
                                          H DILH DIMINAN SCH
V DIL VV DIMP D
BND CC
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 2 (1.4)

5 (1.4) (1.4) (1.4) (1.4) (1.5) (200 - VOIDRATI (1.5) (1.4) MOIDRATI (1.5) (1.4)

MMC 201
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         n n
National States and the states 
                                          r. . . .
                                          15. . . . . .
and 30
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                if tyd pe worden
if tyd pe worden
if the test of end to according to the end to according
both test of the end to according
end of
end of
                                          00 14, 18
2 1 44 1 1 , 110 400001104AT
800 00
                                           NPCAL
                                          H-0
PELEDD- 100000
IN-084
IM-084
IM-084
IM-084
IM-084
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    Sydrauliante en composatione político en teo participante de participante en trado Pretor dat
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         #FIGE == COMPTENSELECTURE (CONFIDENCE DESCRIPTION == CARACT
CONFERENCE CONFIDENCE (CONFIDENCE)
FILE (CONFIDENCE CONFIDENCE)
CONFERENCE (CONFIDENCE)
CONFIDENCE CONFID
                                           1804
19746
19746
     C
C start tijd en tijdinterka, ⊎aartiasen pesijoter ⊎irden opgegeken
                                          .
        C Derichten nu het esherr
              TTPE 01
50 POBMAT
TTPE 05
95 POBMAT 10X COMPRESSIBLE (ARE FILTRATION
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            c
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            DATESTRALLAS SA

201 - 19

201 - 10

DATESTRALAS PS 1 (1.1.99) 1 (1.1.9)

DATESTRALAS PS 1 (1.1.9)

(20195-0472(2000) 1 (1.1.9)

(20195-0472(2000) 1 (1.1.9)
              TYPE 97
97 PORMAT LOX EXPRESSION OF FOLTER LARS
               TYPE 101
100 FORMAT 10X STAFT BERETENINGED
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             100 PORASI 1/4 SUPER MERIDIAN

100 TIJUS VOIDATIS 2++

TTRE 15 TELVOIDATIS 2++

101 PORASI 15K F7 1 15K F7 4-
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            C gemiddelde voldretic volgene profiel en volgene fils worden
C gemotreven naar PCROG DAT inets van messavelene
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             ТҮРЕ 101 ТҮТ 2011 I 11
ВМС СЛ.
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            c
      C beginvervaarden wegennnitven maar tile
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     c
                                        SUBROUTINE FORTHROP / TTO De. top. F G C.
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      ; c
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              DATESED NECE ( AANTAL SELS, PINTEN 19

REALING X - TYS VILSPATIS ( 10 dpa.'

REALING S - TYS VILSPATIS ( 10 dpa.'

REALING S - TYS SEARCH STORE Wold 1.15

REALING S - PS TEAF IS AN SAMAA HOOSTE TO PAGE

REALING ETT AFAIRS ( 20 EETA A USEVILSEATA STORE

REALING ETT AFAIRS ( 20 EETA A USEVILSEATA STORE)

REALING ELARMAA AL 10 AL 4 TAS DANSWOLD AFAIRS
      .
C starr integratie PDV
C zelf een Lepaside (sindintegratie())dt invilen
                             EO WHILE TYS LT 16000:
TYD_DTOPHTYSH-TYS_INTERVAL.
GALL SGIPTFINPER H PDET BROY TYS TYS GTOP DB
V
INTERVENTION AND MORE INFORMATE INCH
BANG WORF INF ING IPAIL
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            LANRIES

TOTANTET FROID

TOTANTET FOID

TOTANTET FOID POTEN ::

TANTANTET FTA FAITO DELTA BETA LANGLAI N.P.

HONOTE,TT HONOTE,TOF HOLDBATIO, P.M. AU BI H

HONOTE,TT HONOTE,TOF HOLDBATIO, P.M. AU BI H
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              CONNON
SOLINGA
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 CONNON
CONNON
: 1
                                       50 141 13
```

common /phi/phi common /woid/voidratio DID ¢ c SUBROUTINE HONTS INFOR,  $x, \pm x, \pm x, \pm y$  , and evolve,  $p_{\rm H}, 10, \pm y D_{\rm STOP}, \pm y D_{\rm STOP}$ c dio 1=1,1r c DITECTR 10, NPDE. IR, INB. 1, AANTAL\_CRID\_PURTER REAL'S X('1, TTO, TTO, DAARYOOR. VOIDBATIO(1, 20).2(40) REAL'S UT, TTO\_STOP. TYDETAP. s. s. t. tsu, void(1, 20) REAL'S UT, TTO\_STOP. TYDETAP. s. s. tsu, void(1, 20) REAL'S DITA.DM. MUM, K, DZ. RH. psb(1, 20) REAL'S PSTER. PABAR, PSTER1, PABAR, PL19, PL20 REAL'S PSTER. PABAR, PSTER1, PABAR, PL19, PL20 REAL'S PATARS, PABAR, PSTER2, PSTER3, daits\_t.s2(20). de2dvoid(20), four REAL'S LIGVOL, LIGVOLIDH, SOLVOL, EPSAVEL, SAVEL, s. b. c. rek1, rek2, rek\_old(2) REAL'S PSTER. PENNEP, FLUT, RAVIDIT, REAVENT, OLZPUIN, void\_Dev REAL'S PS(1, '), GENVOIDBATIO. LANDEDA2, ps\_old(1, 20), void\_Old(1, 20) if (x(1).eq phi(1): then if (void(1,1) eq 0: then void(1,1):voidratio(1,1) end if voidx=void(1,1) end if end do G0+(1.0d0/ETA:\*K0 G1+(1.0d0/1).0d0+V0IDx)) G2+(1.0+V0IDMx)100()/(1.0+V0IDx))\*\*(-DELTA/SETA) e2x+=(voidx/voidratic\_0)\*\*(-lambda]) de2dvoidx+-([s:lambda2)/voidx;'voidx/voidratic\_0)\*\*(-lambda2) r8x+Vvoidratic\_0)/(l+voidratic\_0) c CONNON /CONVECT/vold CONNON /CERVOIDATIO CONNON /CERVOIDATIO CONNON /CEID/AANTAL\_CRID\_FUNTEN CONNON /CONSTATEN/ETA.PA.KO.DELTA.BETA.LANGKDA2.N.Pl. NOOCTE\_TO.HOOCTE\_TOF.VOIDRATIO\_0.RM.tau.el.e CONNON /AUSSANLAWS/RFSATVDT.EPSAVFL CONNON /Voldratio.peb c C(1)+1 0/((e1+e2x)/(1+voidratio\_0)+rek\*de2dvoidx) G(1)+c0\*G1\*C2 F(1)+-(ps(1)+e2x\*rek)/((e1+e2x)\*teu/(1+voidratio\_0)+rek\*teu\* de2dvoidx) r delta t-tyd-tyd dearvoor NETURN END do 1=1.ir
if (void(1,1).eq.0) then
void(1,1).evoidratio(1,1)
ps\_old(1,1)=psb(1,1)
end if c c BUBROUTINE BRDY (NYDE. TYD, pe. IBHD, P.Q. S) с DFTELER I.AANTAL\_GRID\_PUNTEN.HPDE.IBHD.ir REAL\*8 THD.WOIDBATIO(1.20).P(\*).O(\*).S(\*) BEAL\*8 VOIDBATIO\_0.P(\*T.PA.RO.LANGDA2.tou.e.e1 REAL\*8 VOIDBATIO\_0.P(\*T.PA.RO.LANGDA2.tou.e.e1 REAL\*8 DWOIDBATIO\_1.OO.0().BACHT REAL\*8 DWOIDBATIO\_1.OO.0().BACHT REAL\*8 DRARA.PSTEE.NANDWOORMAADE.Woid(1.20) REAL\*8 BETA.DELTA.W.PS(\*).GENVOIDBATIO void\_old(1,1)=void(1,1)
rai\_old(1)=(void\_old(1,1)-voidratio\_0)/(1+voidratio\_0)
sed do Ultrakenen voldratio c c CONNECT / Void CONNECH / COENVICET / Void CONNECH / COENVICENTIO CONNECH / COENVICENTIO, CALD FRONTEN, 1r CONNECH / CONSTANTEN/ETA.PA.KO.DELTA, BETA, LAKBEA2.H.PI, MOOCTE, T2.HOOCTE\_TOF, VOIDRATIO\_O.RH.tau.el.e CONNECH / RAND/RANDVORMAALE if (delta\_t eq G) then do i+1.ir void(1.i)=voidratio(1.i) end do .... C C randvoorwaarde op x=H(t) do 1=1.1r fout=1 fout=1 if (fout.gt ld-5) then e2(i)=e\*(void(1.i)/void(ratio\_2)\*\*\*\*-lambda2) de2dvoid(i)==lambda2/void(1.i)\*\*E2(i) 911110 911110 911150 911150 IF (IBHD ED O) THEN a+ l+voidratis\_0!\*de2dvoidii) b+(e[+e2+1])-re#\_old(1)\*(1+voidratio\_0-\*de2dvoid\*i.+E2+1)\*deita\_t/tau c+p#(1,1)\*delta\_t/tau+(p#(1,1)\*p#\_old 1):)\*re#\_old(1)\*(E1+E2+1); 1. . HANDVOORAARDE **ย**.ร C randvoorwaarde op x+0 voidratis wordt begeald aan het einde van filtratiefese. C if (a eq 0) then rak1+-c/b reklet-be/(b\*\*2-4\*a\*c):\*\*0 51/72\*a
reklet-be/(b\*\*2-4\*a\*c):\*\*0 57/72\*a
exd at P(1)+C 0 0(1) 1 S(1) C C с END IF c void\_new=rek1\*':=voidratic\_0!+voidratio\_0
fout=ape=i-void\_new/void(1.1): RETURN void(l.: +void\_new void(l.: +void\_new end if end do end do do i=l ir ps\_old^l,:,-ps i i end do RETURN ENE 0 SUBROUTINE CONSTANTEN ETA PA FOLDEUTA BETALLANBUALLN PI HOVITE\_TOLHOOGTE\_TOF VOLDEATIC\_D.RH.LBU.B1.B: REAL'S P1.ETA.PA.RN.BETA DELTA N REAL'S HOOGTE\_TO.HOOGTE.TUF VSIDRATIO\_S.FS.LANBGAZ.sau.e.e1 ETA+: CC-3 PA+3 75(2) EC+11 EC 14 DELTA-6 1989100 META+6 1989100 MH-1 7400 P1+205 HOOOTE\_TOF=1 17D-2 HOOOTE\_TOF=1 4D-2 VOIDPATC,0=11 4D1 BM+5 84D-9 CAU+100 =1+166 ++104 ç 4020 Pleasngelagde druk: ETA-viscomitest filtrast. PA-omrekaningsconstante EGoparmesbiliteitecomstante beta.n.delta-compressia-constante HOOCTE\_TOF-dikte filterkoek op t=0 "Expressia: HOOCTE\_TOF-dikte filterkoek op t=0 "Filtratiar VOIDRATIG-0-beginvoidratio op tijdstip t=0 Neweerstand filtermedium 00000 00000000 RETURN END

#### PUBLIKATIEREEKS "TOEKOMSTIGE GENERATIE RIOOLWATERZUIVERINGSINRICHTINGEN RWZI 2000"

- "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 zuiveringsslib door elektrolyse" TNO-Maatschappelijke Technologie RWZI 2000 89-04 Oktober 1989

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Te bestellen bij: STOWA, Postbus 8090, 3503 RB Utrecht tel. 030-321199

- 8 "Hydrolyse van zuiveringsslib in combinatie met anaërobe vergisting" TNO-Maatschappelijke Technologie RWZI 2000 89-05 Oktober 1989
- 9 "Het drogen van zuiveringsslib met het Carver-Greenfieldproces" TNO-Maatschappelijke Technologie, Witteveen & Bos Raadgevende ingenieurs RWZI 2000 89-06 December 1989
- "Natte oxydatie van zuiveringsslib met het Vertech-systeem" TNO-Maatschappelijke Technologie, Witteveen & Bos Raadgevende ingenieurs RWZI 2000 89-07 December 1989
- "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 procestechnologische 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
- "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
- "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
- "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

- "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
- "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
- 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 aspekten"
   LU-Wageningen, vakgroep Microbiologie
   RWZI 2000 93-03
   November 1993
- 34 "Jaarverslag 1993" RIZA, STOWA RWZI 2000 94-01 Juli 1994
- 35 "Fundamentele aspekten 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