

Regeling van filters met een constant gehouden bovenwater-spiegel

1. Inleiding

Schematisch is in afb. 1 de regeling van een filter, waarvan het niveau van het bovenwater constant gehouden wordt, weergegeven. Via een vlotter wordt een regelklep in de filtraatleiding gestuurd. Neemt de weerstand van het filterbed tijdens het filtratieproces toe dan stijgt het niveau in het filter. Hierdoor wordt de regelklep verder open-gestuurd. Dit heeft weer tot gevolg dat de stijging van het niveau in het filter zeer gering zal zijn en praktisch constant blijft.



IR. R. H. M. BOS
NV Waterleiding Maatschappij
'Noord-West-Brabant'

In veel zuiveringsbedrijven is de productie van het te zuiveren water afhankelijk van het niveau van het water in de reinwaterreservoirs. Een grotere productie (meer putten) wordt ingeschakeld naarmate het niveau in het reinwaterreservoir daalt. Daar het van belang is dat alle filters in goede conditie blijven, zijn deze filters zowel bij maximum productie als bij minimum productie in bedrijf. Dit betekent dat de filters plotselinge debietveranderingen te verwerken krijgen die hogere eisen stellen aan de filterregeling.

Doorgaans wordt dit bereikt door het signaal van een niveau-opnemer (vlotter, niveau-elektrode, borrelbuis, drukopnemer) via een regelaar naar de aandrijving van de regelklep te leiden.

In afb. 2 is een voorbeeld te zien, waarbij een drukopnemer en regelaar gecombineerd zijn in één apparaat.

Om na te gaan hoe parameters tijdens de regeling verlopen zijn aan de hand van een aantal formules voorbeelden nader uitgewerkt.

Achtereenvolgens is onderscheid gemaakt tussen een open systeem, gesloten systeem of regelkring, filterbedrijf met 'schoon' water en filterbedrijf met 'verontreinigd' water. Als ingang van de regeling wordt de in het filter stromende waterhoeveelheid Q_i beschouwd.

De uitgang is de verhoging van de bovenwaterstand H . De uit het filter stromende waterhoeveelheid Q_u is direct uit H af te leiden.

Drukverliezen in filterbodem en leidingen ten gevolge van wrijving worden een-voudigheidshalve verwaarloosd.

2. Open systeem

Bij een open systeem vindt geen regeling plaats.

2.1. 'Schoon' water

Zie afb. 3. De overstorthoogte in de filtraatleiding is voor het gemak hoger dan de bovenkant van het filterbed gekozen. Deze overstort wordt als oneindig lang veronder-

steld. Bij een doorstroming van het filterbed is de hierdoor ontstane verhoging van de bovenwaterstand gelijk aan het weerstands-verlies in het filterbed (zie het drukdiagram). In evenwichtssituatie is $Q_i = Q_u$.

Daar de Q recht evenredig is met H is dit systeem proportioneel (P-systeem). Ten tijde $t = 0$ is $Q_i = Q_o$. Op dit tijdstip neemt Q_i plotseling toe met een constante waarde Q_i . Met andere woorden: voor $t > 0$ geldt $Q_i = Q_o + Q_1 = \text{constant}$. Q_u zal na verloop van tijd weer gelijk worden aan Q_i . Formules die dit proces beschrijven:

a. Bewegingsvergelijking (volgens Carment-Kozeny)

$$H = \frac{180v}{g} \cdot \frac{(1-p_o)^2}{p_o^3} \cdot \frac{Q_u}{A \cdot d_o^2} \cdot L \quad (1)$$

v = kinematische viscositeit in m^2/s

g = versnelling van de zwaartekracht in m/s^2

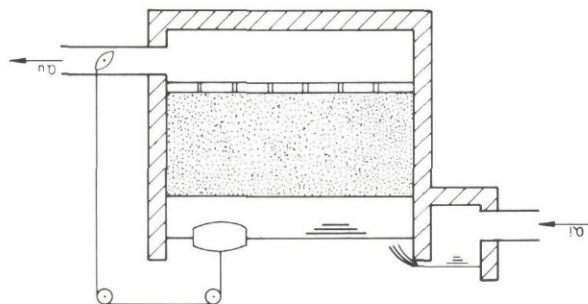
p_o = porositeit

d_o = korreldiameter filtermateriaal in m

A = oppervlak filter in m^2

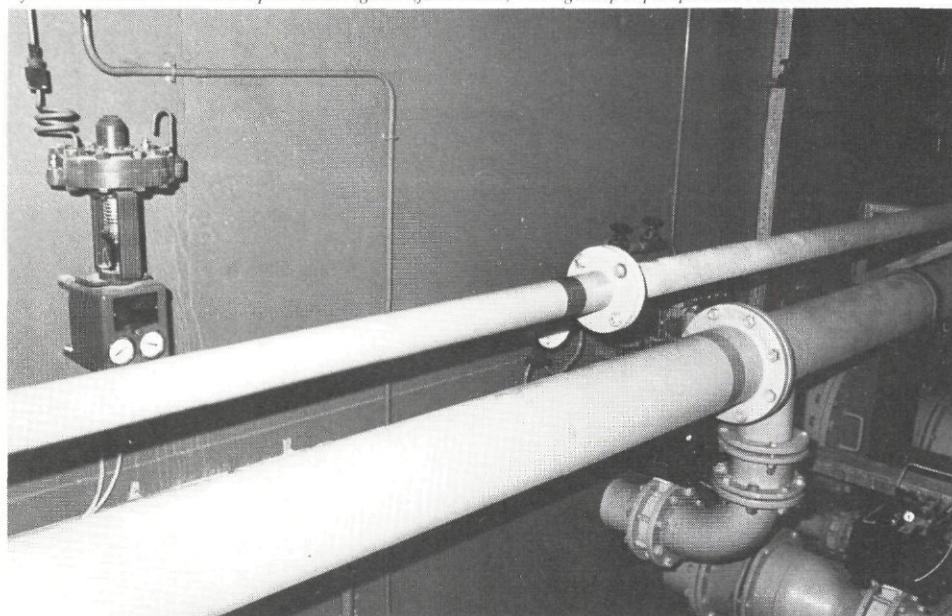
Q_u = hoeveelheid water die door het filterbed stroomt in m^3

L = lengte filterbed in m



Afb. 1 - Filterregeling met constant waterniveau.

Afb. 2 - Combinatie van drukopnemer en regelaar (fabr. Leslie) met regelklep in pompstation Prinsenbosch.



b. Continuïteitsvergelijking.

In een tijdsperiode dt geldt:

Verschil van massa die in en uit het filter stroomt = Toename massa in het filter.

$$\rho Q_i dt - (\rho Q_u + \frac{\partial \rho Q_u}{\partial H} dH) dt$$

ρ = dichtheid water in kg/m^3

Q_i = hoeveelheid water die in het filter stroomt in m^3/s

Daar ρ constant is, wordt deze vergelijking

$$(Q_i - Q_u) dt + \frac{\partial Q_u}{\partial H} dH dt = A dH$$

Bij een stapsgewijze berekening wordt de laatste term voor het '=' teken kleiner naarmate de stap dh kleiner genomen wordt. In het hierna volgende is deze term verwaarloosd.

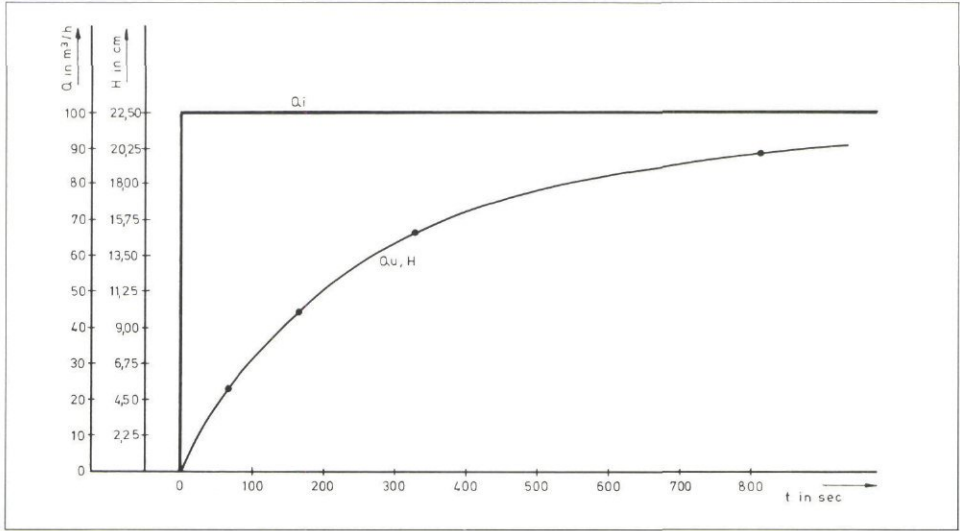
$$Q_i - Q_u = \frac{dH}{dt} \cdot A \quad (2)$$

Uitwerking voorbeeld:

$v = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
 $p_o = 0,4$
 $d_o = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
 $A = 30 \text{ m}^2$
 $L = 1,8 \text{ m}$
 Q_i gaat plotseling van 0 (= Q_o) naar $100 \text{ m}^3/\text{h}$ (= $0,0278 \text{ m}^3/\text{s} = Q_1$).

H	Q_u (form. 1)	$Q_i - Q_u$	dH	AdH (form. 2)	dt	t
0,050	0,0062	0,0216	0,050	1,5	69,0	69,0
0,100	0,0123	0,0155	0,050	1,5	96,8	165,8
0,150	0,0185	0,0093	0,050	1,5	161,3	327,1
0,200	0,0247	0,0031	0,050	1,5	483,9	811,0
0,225	0,0278	0	0,025	0,75	~	~

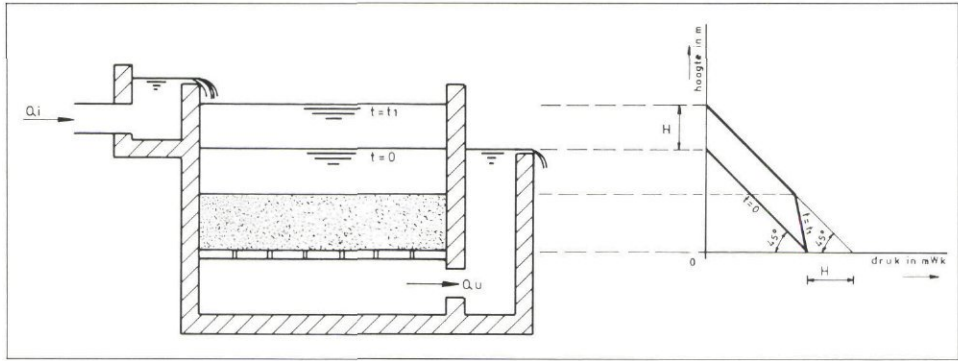
De resultaten zijn grafisch weergegeven in afb. 4. Q_u gaat met een vertraging van ca. 1.000 sec. naar $100 \text{ m}^3/\text{h}$. Daar H na ca. 1.000 sec. zijn eindwaarde bereikt is het systeem stabiel. Hetzelfde verloop vindt plaats als Q_i van 100 naar $200 \text{ m}^3/\text{h}$ gaat. De eindwaarde van H wordt dan $2 \times 0,225 = 0,450 \text{ m}$. Wiskundige uitwerking van eerder genoemde formules:



Afb. 4 - Verloop van Q_i , Q_u en H met de tijd bij filtratie met 'schoon' water en zonder filterregeling.

Na het bereiken van de eindwaarde ($t \rightarrow \infty$) geldt dat:
 $H = \frac{1}{A \cdot \tau} \cdot Q_i$ en $Q_i = Q_u$
Met het voorbeeld wordt de vergelijking (Q_i 0 $\rightarrow$ $100 \text{ m}^3/\text{h}$)

$$H = \frac{H_o}{L \cdot \lambda_o} \cdot \left\{ \frac{\lambda_o \cdot L}{(1-n)^2} - \frac{n^2 \cdot (e^{\lambda_o \cdot L} - 1) \cdot (e^{\beta \cdot t} - 1)}{(1-n) \cdot \{ e^{\lambda_o \cdot L} + (1-n) \cdot (e^{\beta \cdot t} - 1) \}} \cdot \{ (1-n) \cdot e^{\beta \cdot t} + n \} \right\} - \frac{n(2-n)}{(1-n)^2} \cdot \ln \frac{e^{\lambda_o \cdot L} + (1-n) \cdot (e^{\beta \cdot t} - 1)}{(1-n) \cdot e^{\beta \cdot t} + n} \quad (3)$$



Afb. 3 - Filterbedrijf zonder regeling met 'schoon' water.

Eliminatie van Q_u door substitutie van (1) in (2) geeft:

$$H = \frac{1}{0,1233} \cdot (1 - e^{-\frac{0,1233}{30} t}) \cdot \frac{100}{3600} = 0,225 \cdot (1 - e^{-0,0041 t})$$

$t = 69,0 \text{ s} \rightarrow H = 0,055 \text{ m}$
 $t = 165,8 \text{ s} \rightarrow H = 0,111 \text{ m}$
 $t = 327,1 \text{ s} \rightarrow H = 0,166 \text{ m}$
 $t = 811,0 \text{ s} \rightarrow H = 0,217 \text{ m}$

Uiteraard klopt dit met de eerder gevonden cijfers.

2.2. 'Verontreinigd' water

Zie afb. 5. Door verstopping van het filter zal bij constant debiet de weerstand toenemen. Het systeem is dus niet stabiel.

2.2.1. Debiet is constant ($Q_i = Q_u$).
Diverse filtratie-theorieën zijn ontwikkeld. Gebruiken we het model van Lerk dan ontstaat volgende formule:

H_o = filterbedweerstand als $t = 0$ (wel $Q_i = Q_u$) in m
 L = lengte filterbed in m
 λ_o = filtratie-coëfficiënt in m^{-1}
 n = experimenteel te bepalen constante ($0 < n \leq 1$)
 t = tijd in s

$$\beta = \frac{Q_u \cdot C_o \cdot \lambda_o}{A \cdot n \cdot \rho_d \cdot p_o}$$

Q_u = hoeveelheid water die door het filterbed stroomt m^3/s
 C_o = concentratie 'verontreiniging' van het te filtreren water kg/m^3
 ρ_d = dichtheid van 'verontreiniging' die in het filterbed op de korrel is afgezet in kg/m^3
 p_o = porositeit
 A = filteroppervlak in m^2

Kies volgende gegevens:

$H_o = 0,225 \text{ m}$ (zie onder 2.1. bij $Q_u = 100 \text{ m}^3/\text{h}$)
 $H_o = 0,450 \text{ m}$ (zie onder 2.1. bij $Q_u = 200 \text{ m}^3/\text{h}$)
 $L = 1,8 \text{ m}$
 $\lambda_o = 6 \text{ m}^{-1}$
 $C_o = 2 \text{ mg/l}$ (ijzerconcentratie ruwwater) = $2 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3$
 $\rho_d = 6 \text{ kg}/\text{m}^3$
 $p_o = 0,4$
 $n = 0,75$
 $A = 30 \text{ m}^2$
 $Q_i = Q_u = 100 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow \beta = 6 \cdot 10^{-6}$
 $Q_i = Q_u = 200 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow \beta = 12 \cdot 10^{-6}$

Uit deze differentiaalvergelijking blijkt dus dat bij debietverandering het systeem proportioneel vertragend is (Pt-systeem). Oplossing differentiaal vergelijking:

$$H = \frac{1}{A \cdot \tau} \cdot (1 - C \cdot e^{-\tau \cdot t}) \cdot Q_i$$

Randvoorwaarde Q_i 0 $\rightarrow$ $100 \text{ m}^3/\text{h}$ $H = 0$
 $t = 0$

Hieruit volgt $C = 1$
Andere C indien Q_i $100 \rightarrow 200 \text{ m}^3/\text{h}$ $H = 0,225$
 $t = 0$

$$H = \frac{1}{A \cdot \tau} \cdot (1 - e^{-\tau \cdot t}) \cdot Q_i$$
$$\tau = \frac{g}{180v} \cdot \frac{p_o^3}{(1-p_o)^2} \cdot \frac{d_o^2}{L}$$

Met deze gegevens wordt volgens formule (3) de filterbedweerstand als functie van de tijd:

$t = 0 \ 10 \ 20 \ 40 \ 60 \ 80 \ 100 \ 120 \ 160 \ 200$ uur
 $t = 0 \ 36 \ 72 \ 144 \ 216 \ 288 \ 360 \ 432 \ 576 \ 720 \times 10^3$ s
 $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow H =$
 $0,225 \quad 0,24 \ 0,27 \quad 0,37 \quad 0,54 \ 0,76 \ 1,01 \text{ m}$
 $Q = 200 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow H =$
 $0,450 \ 0,49 \ 0,54 \ 0,74 \ 1,08 \ 1,52 \ 2,02 \quad \text{m}$

De resultaten zijn grafisch weergegeven in afb. 6.

$Q_i = Q_u$ is niet recht evenredig met H (e-macht verband).

2.2.2. Debietverandering

Met de cijfers gevonden uit 2.1. en 2.2.1. mag de conclusie getrokken worden dat bij debietverandering tijdens filtratiebedrijf met 'verontreinigd' water, gedurende de tijd waarin deze verandering optreedt, de filterbedweerstand als gevolg van toenemende verstopping van het filterbed constant is. Nemen we het rekenvoorbeeld van 2.2.1. waarin na 40 uur looptijd met $Q_i = 100 \text{ m}^3/\text{h}$, Q_i plotseling naar $Q_i = 200 \text{ m}^3/\text{h}$ gaat. In de formules wordt het tijdstip van debietverandering $t = 0$.

$H_0 = 0,27 \text{ m}$ (zie 2.2.1.).

Daar de toename van de filterbedweerstand als gevolg van verstopping van het filterbed verwaarloosd wordt gedurende de debietverandering zal de toename van de filterbedweerstand als gevolg van wrijving zich gedragen volgens de formule met 'schoon' water. In verband met een nieuwe 'nul'-situatie dient er echter een correctie opge maakt te worden. Formule (1) wordt dus:

$$H = \frac{180v}{g} \cdot \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3} \cdot \frac{Q_u}{A \cdot d_0^2} \cdot L \cdot \frac{H_{no}}{H_0} \quad (4)$$

H_{no} = weerstand filterbed in m in nieuwe nul-situatie. Hier dus na 40 uren bij $Q_i = Q_u = 0,27 \text{ m}$

H_0 = weerstand filterbed in m in oorspronkelijke nul-situatie.

Hier dus bij $Q_i = Q_u = 100 \text{ m}^3/\text{h}$
 $H_0 = 0,225 \text{ m}$

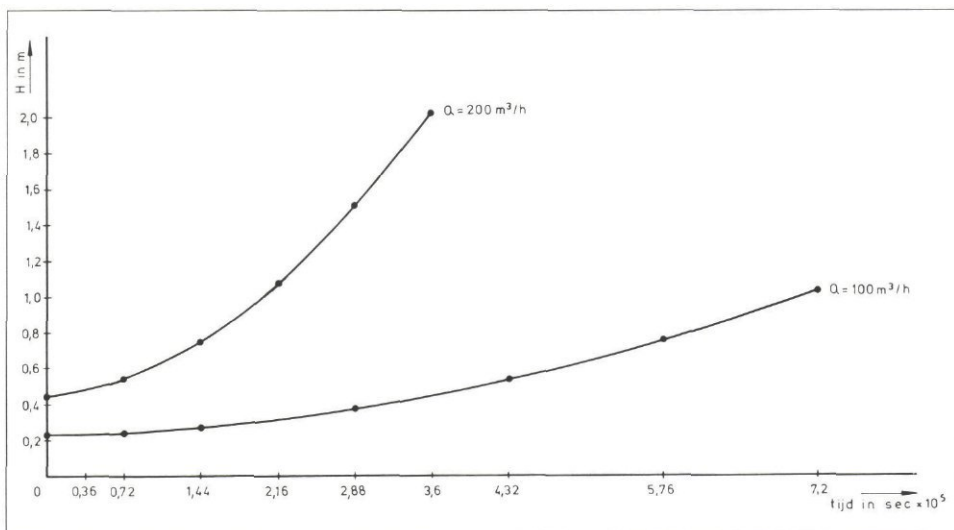
Verwerking van de gegevens in formule (4) en (2) geeft:

H	Q_u (form. 4)	$Q_i - Q_u$	dH	AdH (form. 2)	$\frac{dt}{dt}$ (form. 2)	t
0,27	0,0278	0,0278	0	0	0	0
0,32	0,0329	0,0227	0,05	1,5	66,1	66,1
0,37	0,0380	0,0175	0,05	1,5	85,7	151,8
0,42	0,0431	0,0124	0,05	1,5	121,0	272,8
0,47	0,0483	0,0073	0,05	1,5	205,5	478,3
0,52	0,0534	0,0022	0,05	1,5	697,2	1175,5

Afb. 7 laat de weerstand als functie van de tijd zien.

Afb. 8 is de schaal sterk uitvergroot op $t = 40$ uur van afb. 7.

Na 40 uur indien $Q_u = Q_i$ is $H = 0,54 \text{ m}$. Indien vanaf het begin het filter met $200 \text{ m}^3/\text{h}$



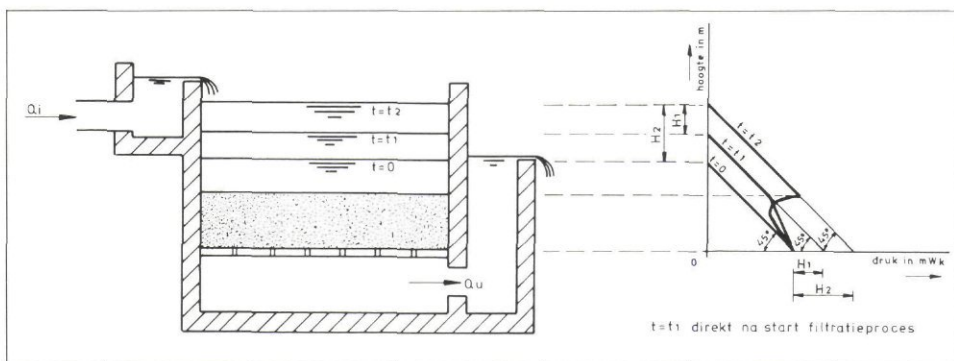
Afb. 6 - Toename weerstand van het filterbed bij $100 \text{ m}^3/\text{h}$ en $200 \text{ m}^3/\text{h}$.

belast zou zijn, zou H na 40 uur $0,74 \text{ m}$ zijn. Dit komt omdat het filter bij $100 \text{ m}^3/\text{h}$ na 40 uur minder 'verstopt' is dan bij $200 \text{ m}^3/\text{h}$ na 40 uur.

Doordat een groter weerstandsverschil bij $Q_i \ 100 \rightarrow 200 \text{ m}^3/\text{h}$ overbrugd moet worden

stand van bijv. $0,5$ tot $2,0 \text{ m}$ toenemen aan het einde van de looptijd. Dit betekent dat $1,5 \text{ m}$ aan het begin van de looptijd minimaal door een regelklep moet worden 'weg-gesmoord'.

Bij filterbedrijf met 'verontreinigd' water zal



Afb. 5 - Filterbedrijf zonder regeling met 'verontreinigd' water.

in vergelijking met het open systeem met schoonwater filterbedrijf loopt H (en dus Q_u) trager naar zijn eindwaarde.

Op grond van deze resultaten kan gezegd worden dat evenals bij 2.1. hier sprake is van een proportioneel vertragend(-er!) systeem. Daar formule (3) wat complex is, zal, mede daar het bovenstaande redelijk duidelijk is, een mathematische uitwerking achterwege gelaten worden.

3. Gesloten systeem

In de filtraatleiding bevindt zich een regelklep die meer of minder opengestuurd wordt afhankelijk van het niveau van het bovenwater (zie afb. 1). Wordt, als gevolg van a) toenemende filtratieweerstand ten gevolge van verstopping van het filter of b) debietverandering, het niveau hoger dan wordt de regelklep verder opengestuurd. Bij maximale belasting van het filter met 'verontreinigd' water zal de filterbedweer-

naast niveauverhoging van de bovenwaterstand onmiddellijk een herverdeling tussen de weerstand van het filterbed en de weerstand van de regelklep optreden.

3.1. Regelklep

De weerstand van de regelklep (vlinderklep) is als volgt in formule uit te drukken

$$H_{klep} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} = \zeta \cdot \frac{Q_u^2}{A^{*2} \cdot 2g} \quad (5)$$

v = snelheid in klep (open stand) in m/s

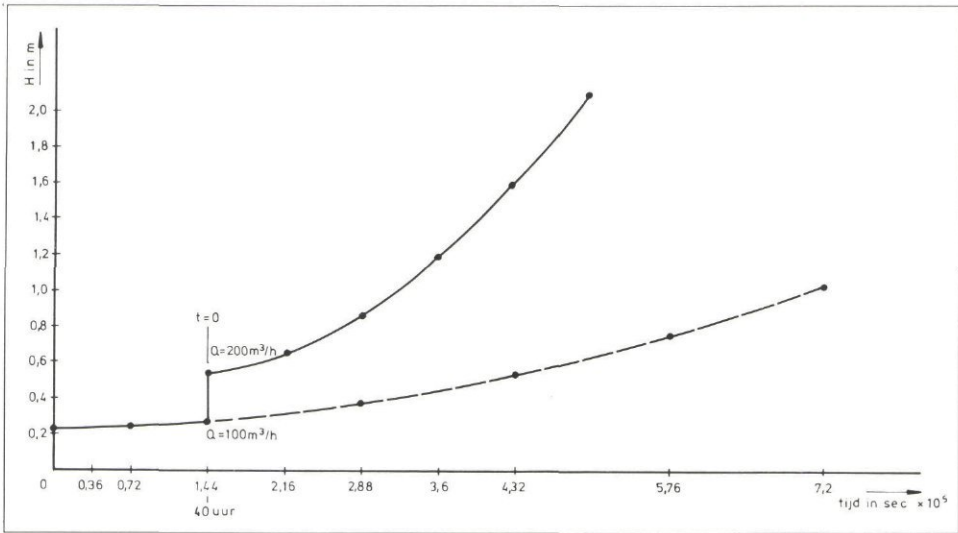
g = versnelling van de zwaartekracht in m/s^2

Q_u = hoeveelheid water die door het filter stroomt in m^3/s

A^* = doorstromend oppervlak klep (open stand) in m^2

ζ is afhankelijk van de mate waarin de klep geopend c.q. gesloten staat. Zie afb. 9.

Voor een bepaalde klep (onder andere



Afb. 7 - Toename weerstand van het filterbed bij plotselinge debietsverandering.

afhankelijk van de dikte van de vlinder) geldt voor $\alpha < 60^\circ$:

$$\zeta = 10^{-0,2 \cdot 10^{-4} \alpha^2 + 448 \cdot 10^{-4} \alpha - 0,7} \tag{6}$$

α = hoek vlinder in $^\circ$.

Om het signaal van niveauverandering te vertalen naar een hoekverdraaiing van de klep wordt een proportionele regelaar gebruikt.

Dat wil zeggen dat de niveauverandering rechtevenredig is met een stuurlicht-sig-naal, dat naar de cilinder van de aandrijving van de klep gevoerd wordt.

Indien we aannemen dat dit luchtsig-naal de zuiger proportioneel 'bedient', hetgeen door samendrukbaarheid van de lucht niet geheel correct is, dan is een niveauverandering van het bovenwater van het filter proportioneel met de hoekverdraaiing van de regelklep.

H_{tot}	dH	$\Delta \alpha$	α	ζ (form. 6)	Q_u (form. 7)	H_{klep} (form. 5)	H filt.bed	$Q_i - Q_u$	AdH	$\frac{dt}{dt}$ (form. 2)	t
1,461	0	0	50	30,90	0,0278	1,236	0,225	0,0278	0,3	0	0
1,471	0,01	4,5	45,5	19,82	0,0342	1,194	0,277	0,0214	0,3	14,0	14,0
1,481	0,01	4,5	41	12,68	0,0417	1,142	0,339	0,0139	0,3	21,6	35,6
1,491	0,01	4,5	36,5	8,10	0,0508	1,079	0,412	0,0047	0,3	63,5	99,1
1,496	0,005	2,25	34,25	6,83	0,0547	1,052	0,444	0,009	0,15	168 8	267,9

Tevens is aangenomen dat de hoekverdraaiing volledig en direct, met andere woorden zonder tijdvertraging, plaatsvindt bij niveauverandering van het bovenwater. Uit de formules (5) en (6) blijkt dus dat de proportionele regelaar geen proportioneel verband tussen variatie bovenwaterstand en Q_u legt.

In de volgende rekenvoorbeelden is de regelaar als volgt ingesteld: niveauvariatie bovenwaterstand van 1 cm komt overeen

met een hoekverdraaiing van $4,5^\circ$ van de regelklep.

3.2. 'Schoon' water

Bij filterbedrijf met 'schoon' water heeft de regeling alleen een functie bij debietverandering.

De totale weerstand wordt dus (formule (1) en (5) gesommeerd):

$$H_{tot} = H_{filterbed} + H_{klep}$$
$$H_{tot} = \frac{180v}{g} \cdot \frac{(1-p_o)^2}{p_o^3} \cdot \frac{Q_u}{A \cdot d_o^2} \cdot L + \zeta \cdot \frac{Q_u^2}{A^{*2} \cdot 2g} \tag{7}$$

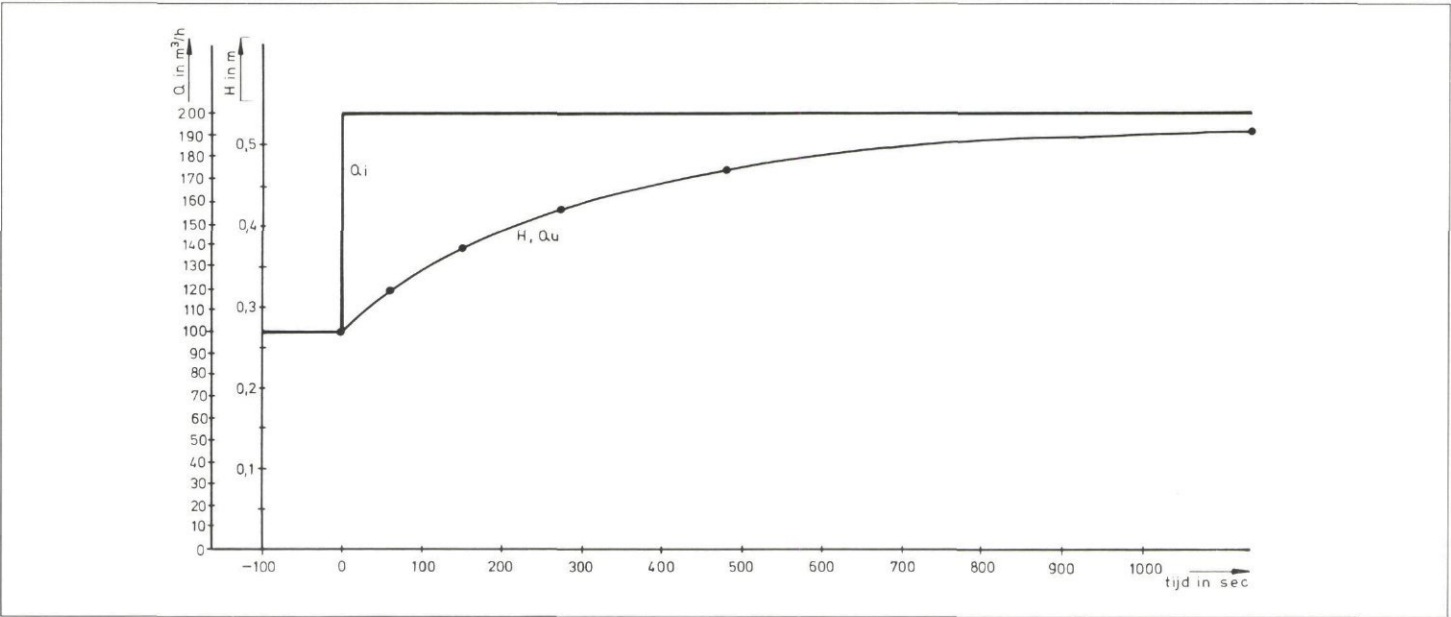
Debietwijziging Q_i gaat van $100 \text{ m}^3/\text{h}$ naar $200 \text{ m}^3/\text{h}$.

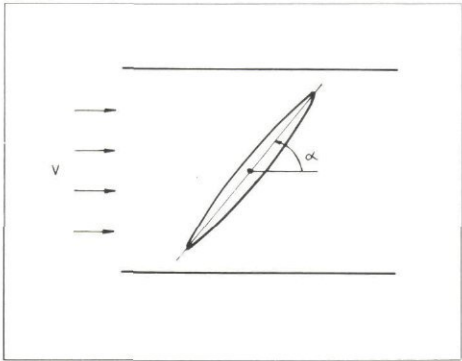
Kies als instelling dat op het moment dat $Q_i = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ de regelklep in de stand

$\alpha = 50^\circ$ staat.
Regelklep NW 200 $\rightarrow A^* = 0,0314 \text{ m}^2$.
Verder dezelfde gegevens als bij 2.1.

In afb. 10 zijn de resultaten grafisch weergegeven.
Voor een goede vergelijking met het open systeem zijn de gegevens van 2.1. hier tevens afgebeeld.
 Q_u in het gesloten systeem (= regelkring) gaat veel sneller naar Q_i dan bij het open systeem.

Afb. 8 - Verloop van Q_i , Q_u en H met de tijd bij plotselinge debietsverandering zonder filterregeling.





Afb. 9 - Regelklep.

Door de regeling is het niveau van het bovenwater bij het gesloten systeem aanmerkelijk minder hoog gestegen dan bij het open systeem.

De herverdeling tussen H_{klep} en $H_{filt,bed}$ is nog eens vergroot weergegeven in afb. 11.

3.3. 'Verontreinigd' water

Bij filterbedrijf met 'verontreinigd' water heeft de regeling een functie bij constant debiet en bij debietverandering

3.3.1. Debiet is constant ($Q_i = Q_u$)

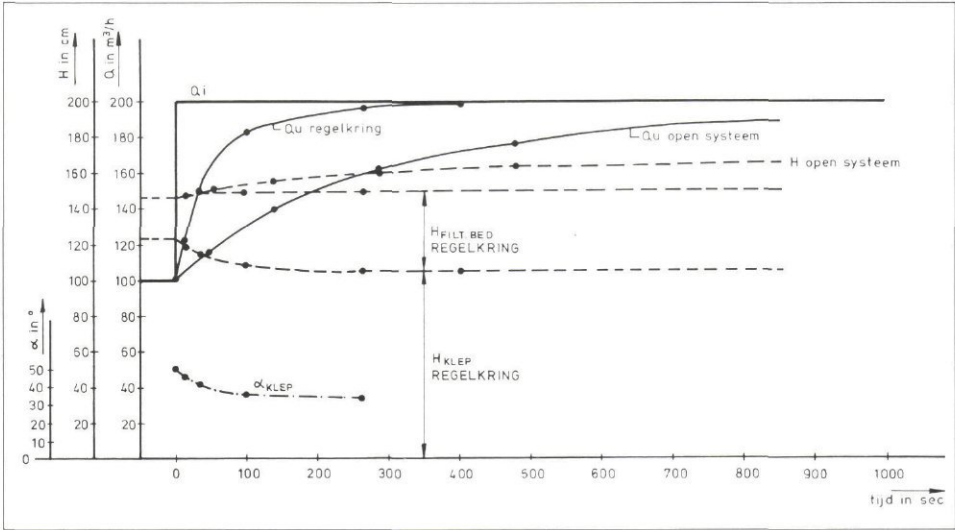
Bij 'verontreinigd' water neemt de weerstand van het filter toe ten gevolge van verstopping bij constant debiet. Door regeling met regelklep wordt de toename van de filterbedweerstand voor bijna 100% gecompenseerd door afname van de klepweerstand.

De totale weerstand wordt (formule 3 en 5):

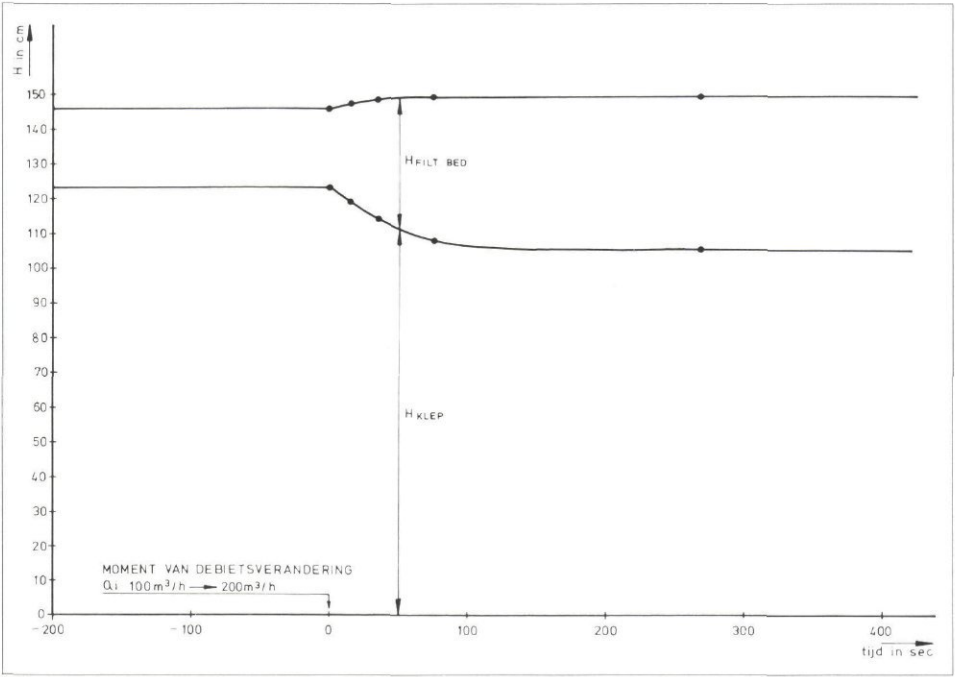
$$H_{tot} = H_{filterbed} + H_{klep}$$
$$H_{tot} = \frac{H_o}{L \cdot \lambda_o} \cdot \left\{ \frac{\lambda_o \cdot L}{(1-n)^2} - \frac{n^2 \cdot (e^{\lambda_o \cdot L} - 1) \cdot (e^{\beta \cdot t} - 1)}{(1-n) \cdot \left\{ e^{\lambda_o \cdot L} + (1-n) \cdot (e^{\beta \cdot t} - 1) \right\} \cdot \left\{ (1-n) \cdot e^{\beta \cdot t} + n \right\}} - \frac{n(2-n)}{(1-n)^2} \cdot \ln \frac{e^{\lambda_o \cdot L} + (1-n) \cdot (e^{\beta \cdot t} - 1)}{(1-n) \cdot e^{\beta \cdot t} + n} \right\} + \zeta \cdot \frac{Q_u^2}{A^{*2} \cdot 2g}$$

Met de gegevens van 2.2.1., een $Q_i = Q_u = 200 \text{ m}^3/\text{h}$ en een gekozen startpositie van de klep in de stand $\alpha = 40^\circ$ worden de volgende resultaten verkregen:

dH	H_{tot}	$\Delta\alpha$	α	ζ	H_{klep} (form. 5)	H_{bed}	t (uit afb. 6) s	uren
0	2,287	0	40	11,48	1,840	0,450	0	0
0,001	2,288	0,45	39,55	10,98	1,757	0,531	$20/3 \cdot 10^4$	18,5
0,002	2,290	0,90	38,65	10,04	1,606	0,684	$39/3 \cdot 10^4$	36,1
0,002	2,292	0,90	37,75	9,18	1,468	0,824	$50/3 \cdot 10^4$	46,3
0,002	2,294	0,90	36,85	8,38	1,342	0,952	$58/3 \cdot 10^4$	53,7
0,002	2,296	0,90	35,95	7,67	1,227	1,069	$65/3 \cdot 10^4$	60,2
0,005	2,301	2,25	33,70	6,12	0,980	1,321	$77,5/3 \cdot 10^4$	71,8
0,005	2,306	2,25	31,45	4,89	0,782	1,524	$86/3 \cdot 10^4$	79,6
0,005	2,311	2,25	29,20	3,90	0,624	1,687	$93,5/3 \cdot 10^4$	86,6
0,005	2,316	2,25	20,95	3,11	0,498	1,818	$99/3 \cdot 10^4$	91,7



Afb. 10 - Verloop van Q_i , Q_u , H en α met de tijd bij plotselinge debietsverandering bij filtratie van 'schoon' water.



Afb. 11 - Herverdeling $H_{filt,bed}$ en H_{klep} bij filtratie met 'schoon' water.

De resultaten zijn grafisch weergegeven in afb. 12.

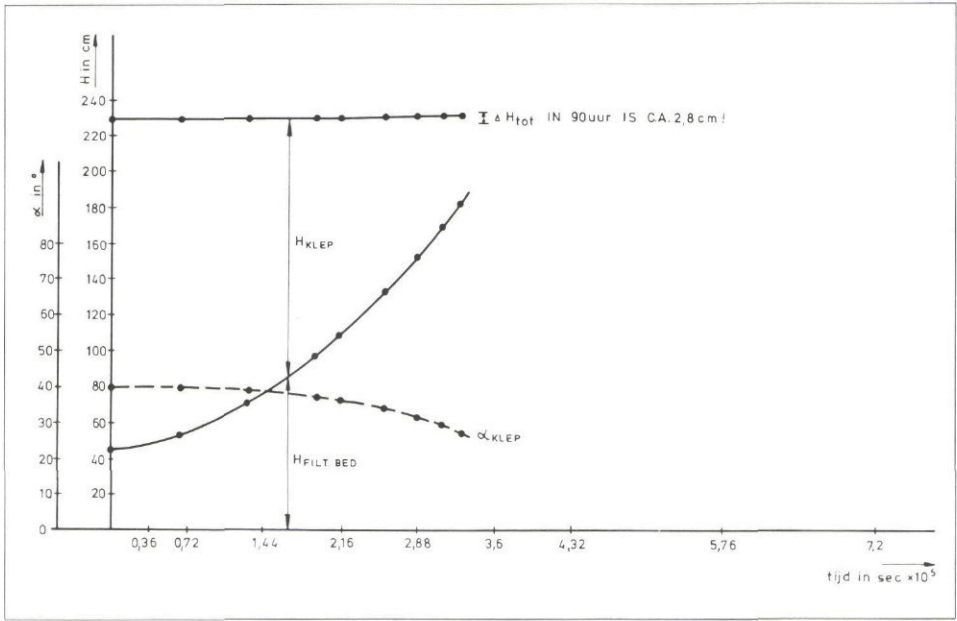
De totale verhoging van de bovenwaterstand, deze is enkel nodig om de klep te laten regelen, bedraagt slechts 2,8 cm in 90 uur!

3.3.2. Debietverandering
Met dezelfde aannamen als in 2.2.2. wordt de weerstandformule (vergelijk met formule 4 en 7):

$$H_{tot} = H_{filterbed} + H_{klep}$$
$$H_{tot} = \frac{180v}{g} \cdot \frac{(1-p_o)^2}{p_o^3} \cdot \frac{Q_u}{A \cdot d_o^2} \cdot L \cdot \frac{H_{no}}{H_o} + \zeta \cdot \frac{Q_u^2}{A^{*2} \cdot 2g}$$

Ook nu laten we de debietwijziging optreden van $Q_i = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ naar $200 \text{ m}^3/\text{h}$ nadat het filter 40 uur met $100 \text{ m}^3/\text{h}$ belast is geweest.

Indien de filtratie met $100 \text{ m}^3/\text{h}$ aangevangen wordt in de stand klep $\alpha = 50^\circ$ dan staat de



Afb. 12 - Verloop van H en α met de tijd bij filtratie met 'verontreinigd' water.

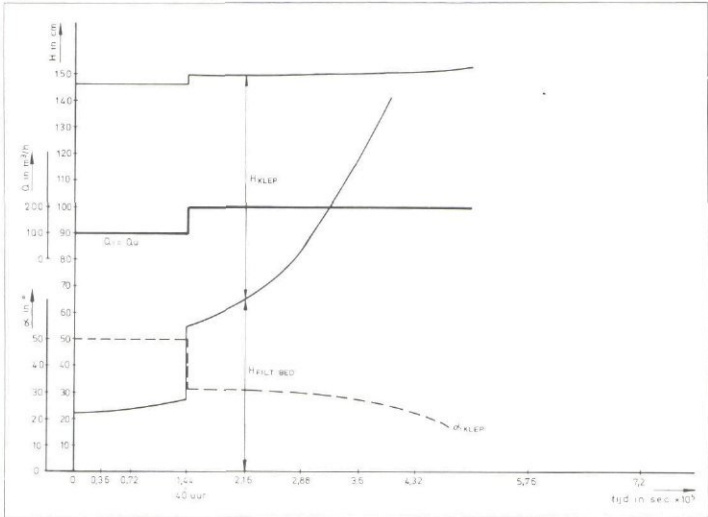
H_{tot}	dH	$\Delta\alpha$	α	ζ (form. 6)	Q_u (form. 7)	H_{klep} (form. 5)	H filt.bed	$Q_i - Q_u$	AdH	dt (form. 2)	t
1,462	0	0	49,55	29,65	0,0278	1,183	0,279	0	0	0	0
1,472	0,01	4,5	45,05	18,95	0,0340	1,130	0,342	0,0215	0,3	13,9	13,9
1,482	0,01	4,5	40,55	12,13	0,0413	1,067	0,415	0,0143	0,3	21,1	35,0
1,492	0,01	4,5	36,05	7,75	0,0498	0,991	0,501	0,0057	0,3	52,4	87,4
1,497	0,005	2,25	33,80	6,19	0,0546	0,949	0,548	0,0010	0,15	150	237,4

klep na 40 uur (methode zie 3.2.) $\alpha = 49,55^\circ$.
 $H_{no} = 0,279$ m
 $H_o = 0,225$ m.

De resultaten zijn weergegeven in afb. 13 en 14.
In afb. 14 is het verloop van Q en H weergegeven wat in afb. 13 slechts als sprong te zien is.

Voor het 'opvangen' van de debietwijziging stijgt het niveau van het bovenwater 3,5 cm.

Afb. 13 - Verloop van H en α met de tijd bij plotselinge debietsverandering bij filtratie met 'verontreinigd' water.

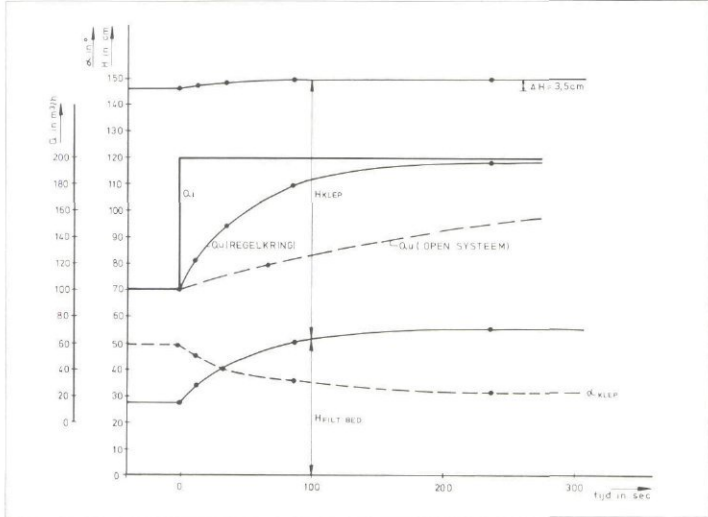


Ter vergelijking met het open systeem is Q_u uit 2.2.2. ook opgenomen in afb. 14.
In vergelijking met het voorbeeld uit 3.3.1. (afb. 12) is de klep eerder uitgeregeld.
Dit komt omdat de startpositie een andere is: bij 3.3.1. start $\alpha = 40^\circ$ bij 200 m³/h, hier start $\alpha = 50^\circ$ bij 100 m³/h.
De resultaten spreken verder voor zich.

4. Eindconclusies

1. Bij debietverandering gedraagt het filtratieproces zich als een Pt-systeem.

Afb. 14 - Verloop van Q_i , Q_u , H en α met de tijd bij plotselinge debietsverandering bij filtratie van 'verontreinigd' water.



2. Bij een plotselinge debietverandering zal de uitgaande volumestroom
 - a. indien geen regeling wordt toegepast (open systeem),
 - vertraagd naar zijn eindwaarde (= ingaande volumestroom) lopen;
 - b. indien een regelklep, welke door middel van een proportionele regelaar gestuurd wordt op het niveau van het bovenwater (gesloten systeem; regelkring),
 - vertraagd, doch aanzienlijk sneller dan onder a., naar zijn eindwaarde (= ingaande volumestroom) lopen.
3. Bij de onder 2. genoemde systemen treden geen slingeren (doorschieten door eindwaarde) op.
4. In het voorgaande is steeds aangenomen dat Q_i plotseling 100 m³/h of 200 m³/h toeneemt. In werkelijkheid zal Q_i echter vertraagd veranderen (de volumestroom moet door de onderwaterpomp in beweging gezet worden, cascadebakken enz.). Dit betekent dat de regeling nog gunstiger zal verlopen.
5. Op zich is een filterregeling niet stabiel, immers er moet van tijd tot tijd gespoeld worden (klep is op gegeven moment 'uitgeregeld').

• • •