

# Spiegelwaterzuivering

In dit artikel wordt de vlokvorming als onderdeel van de spiegelwaterzuivering behandeld. In een volgend artikel zal de bereiding van drinkwater uit het filterspoelwater aan de orde komen.

De Wet Verontreiniging Oppervlaktewater (WVO) heeft de afvalwaterproblematiek in vele gevallen geconcretiseerd. Dit stelsel van enerzijds geboden en verboden en anderzijds van heffingen en ontheffingen ten aanzien van de lozing van afvalwater — bij de waterbedrijven zal dit overwegend spiegelwater zijn — maken een analyse van de situatie mogelijk.



IR. W. A. J. ROEFS  
Gemeentebedrijven  
Eindhoven

In het onderhavige geval is gebleken, dat de zuivering van het spiegelwater tot drinkwater zinvol is.

Het zuiveringsproces bestaat uit de volgende onderdelen: vlokvorming, bezinking en filtratie.

## Vlokvorming

De verontreinigende stoffen in het water komen na de destabilisatie tot vlokvorming onder invloed van agitatie. Het is nu duidelijk, dat de intensiteit waarmee de vorming geschiedt toeneemt, naarmate de turbulentie toeneemt, d.i. naarmate het toegevoerde vermogen toeneemt. Vanwege de restabilisatie echter is het toegevoerde vermogen aan grenzen gebonden. De vlokvorming moet tot stand worden gebracht bij 'n toelaatbare energietoever onder minimale snelheidsgradiënten, oftewel onder optimale momentane energieverdeling over het totale in behandeling genomen volume vloeistof. De snelheidsgradiënt — bepaald door het vermogensverlies en de viscositeit — kan worden berekend met de door Camp [1] gegeven formules voor roerarmen (lab. schaal).

$$G = \sqrt{\frac{W}{\eta}} \text{ en } W = \frac{2 \pi N T}{V}$$

waarin:

$G$ = gradiënt	[s <sup>-1</sup> ]
$W$ = vermogensverlies per volume-eenheid	[W · m <sup>-3</sup> ]
$\eta$ = dynamische viscositeit	[Pa · s]
$N$ = r.p.s.	[s <sup>-1</sup> ]
$T$ = uitgeoefende torsiekracht	[J]
$V$ = volume	[m <sup>3</sup> ]

## Statische vlokvormer

Hoewel voor de vlokvorming in de praktijk verscheidene uitvoeringen zijn toegepast

— langzaam roeren, heen en weer gaande bewegingen enz. — is mede vanwege de constante samenstelling van het spiegelwater de toepassing van een statische vlokvormer zinvol. De energie wordt in deze geput uit het verhang.

Voor de schottenbak wordt het energieverlies per compartiment gegeven door de massa-stroom en het verschil in drukhoogte over een doorlaatopening.

$$G = \sqrt{\frac{W}{\eta}} \quad (1)$$

$$W = \frac{q \cdot \Delta p}{V} \quad (2)$$

waarin:

$q$ = vloeistofstroom	[m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$\Delta p$ = drukval per doorlaat	[Pa]
$V$ = volume water per compartiment	[m <sup>3</sup> ]

Bij constante stroom en constante inhoud van elk compartiment is de gemiddelde verblijfsduur per compartiment  $t$  constant en gegeven door  $V/q$ .

Ingevuld in formule (2) ontstaat:

$$W = \frac{\Delta p}{t} \quad (3)$$

en

$$G = \left( \frac{\Delta p}{\eta \cdot t} \right)^{1/2} \quad (4)$$

(zie afb. 1)

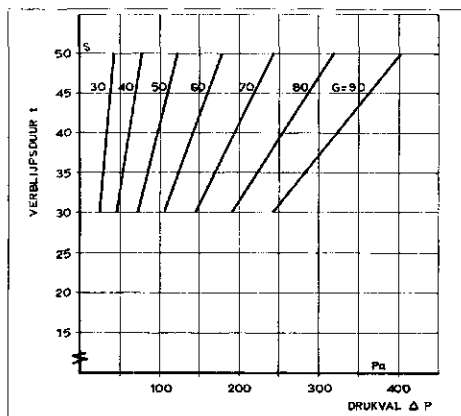
Invoering van de stuwdruk en de kinematische viscositeit  $\nu$  levert formule (5):

$$G = \frac{c \cdot \sqrt{\nu}}{\sqrt{\nu \cdot t}} \quad (5)$$

$c$  = constant en wordt bepaald door de doorlaatopening (zie afb. 2).

De relatie tussen de coagulatieproeven op

Afb. 1 - Verband tussen de drukval en de gemiddelde verblijfsduur per compartiment.



laboratoriumschaal met roerder en de schottenbak wordt gelegd via  $G$ .

Een ijkgrafiek voor  $G$  tegen r.p.s. voor de desbetreffende roeropstelling, waarmee de flocculatieproeven worden uitgevoerd, moet vooraf worden bepaald.

Uit het laboratoriumonderzoek zijn de grenzen waarbinnen  $G$  en  $t$  zich bewegen bekend en kan elk snelheidsinterval waarover energetisch gelijkwaardig als op kleine schaal is geflocculeerd worden berekend.

Wat betreft de energie-nivellering in het water is met deze niets te berde gebracht, noch wat betreft de roeropstelling, noch wat betreft de doorstroomcoagulator.

De afbeeldingen 1 en 2 zijn wat betreft de grenzen van  $G$ ,  $\nu$  en de gemiddelde verblijfsduur  $t$  tot stand gekomen op experimentele basis. De formules leveren de volgende richtlijnen op:

a. bij constante gemiddelde verblijfsduur varieert de inhoud van de flocculator evenredig met de capaciteit en varieert het vermogensverlies kwadratisch met de capaciteit;

b. constante inhoud van de vlokvormer met wisselende belasting heeft tot gevolg, dat de energietoever wisselt met de capaciteit tot de derde macht;

c. constante capaciteit en constante inhoud van de flocculator heeft tot gevolg, dat op een vast energie-niveau wordt gewerkt.

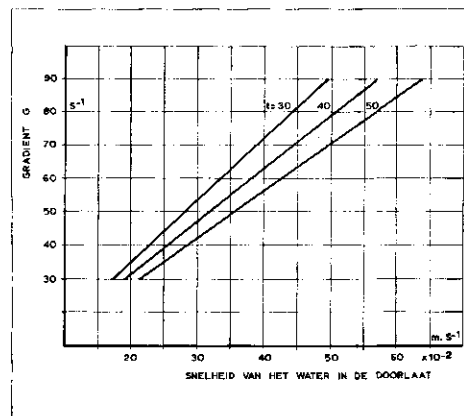
Voorbeeld:

Voor de betekenis van een en ander volgt een voorbeeld.

Een statische vlokvormer moet worden belast tussen 0,1 en 0,3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Met het oog op de geringere spreiding in de verblijfsduur is gekozen voor een flocculator met 12 compartimenten. De gemiddelde totale verblijfsduur bedraagt zes minuten of per compartiment 30 s; het water heeft een temperatuur van 20° C.

Uit het onderzoek is naar voren gekomen,

Afb. 2 - Verband tussen de gemiddelde snelheid en de snelheidsgradiënt  $G$  bij constant gemiddelde verblijfsduur  $t$ .



dat voor de vlokvorming de onderstaande condities gelden:

$$30 < G < 90 \text{ s}^{-1}$$

$$T = 6 \text{ min.}$$

$$t = 30 \text{ s.}$$

Hieruit volgt:

$$3 < V < 9 \text{ m}^3$$

$$27 < \Delta p < 243 \text{ Pa}$$

$$16,4 \cdot 10^{-2} < v < 49,3 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

De afb. 1 en 2 tonen het flocculatiegebied voor het desbetreffende water ( $t = 30 \text{ s}$ ). Uit de debieten en de doorstroomsnelheden volgt het maximale oppervlak van doorstroming, c.q.  $0,61 \text{ m}^3$ . Dit kan worden gerealiseerd met:  $1 \times \text{Ø } 880 \text{ mm}$ ,  $2 \times \text{Ø } 620 \text{ mm}$  of  $3 \times \text{Ø } 510 \text{ mm}$ . Bij een groot verschil tussen  $F_{\text{min}}$  en  $F_{\text{max}}$  zal aan de hand van het gewenste energieverloop de diameter en de plaats van de doorlaatopeningen moeten worden gekozen. Het inzetten van drie openingen is qua 'energiebeleid' nauwelijks zinvol indien  $G$  ligt tussen  $30$  en  $90 \text{ s}^{-1}$ , bovendien is de kans op het ontstaan van kortsluitstromen groter.

Een doorlaatopening van  $\text{Ø } 880 \text{ mm}$  volstaat om de vlokvorming geheel binnen de gestelde grenzen uit te voeren. De dimensionering van de flocculator is in dit geval echter ongunstiger. Om de nivellering van de kinetische energie over het gehele volume te bewerkstelligen zal a prima vista over het gehele te bestrijken debiet zoveel mogelijk de kubusvorm moeten worden benaderd. In het geval  $1 \times \text{Ø } 880 \text{ mm}$  wordt toegepast, zal de minimale vulhoogte  $0,9 \text{ m}$  bedragen en derhalve het bodemoppervlak  $3,33 \text{ m}^2$  ( $1,83 \times 1,83 \text{ m}^2$ ), de maximale vulhoogte is dan  $2,72 \text{ m}$ . Voor toepassing van  $2 \times \text{Ø } 620 \text{ mm}$  zijn deze waarden respectievelijk  $2,15 \times 2,15 \text{ m}^2$  en  $1,95 \text{ m}$ . De eerste doorlaatopening is geplaatst op ca.  $3 \text{ cm}$  en de tweede op  $97 \text{ cm}$  boven de bodem, d.w.z. de onderkant van de doorlaat. Bij een vulhoogte van  $0,97 \text{ m}$  is de grens in  $G$  bereikt en zal de tweede doorlaat in bedrijf moeten komen. Opgemerkt moet worden, dat, wil  $G$  in geen enkel compartiment de gegeven limiet overschrijden, het niveau in het laatste compartiment moet worden beschouwd. Bij de maximale capaciteit belooft het niveauverschil ca.  $0,27 \text{ m}$ . Een hogere  $G$  dan de gemaximaliseerde kan in korte tijd de sedimentatie nadelig beïnvloeden. De afvoer van de flocculator zal dus altijd zo ruim moeten worden gedimensioneerd, dat de snelheid in deze afvoer kleiner is dan de snelheid in de flocculator.

Er zijn in principe twee mogelijkheden:

- a. flocculatie met constante  $t$ ; het niveau varieert evenredig met de capaciteit;

- b. flocculatie bij een vast niveau; de verblijftijd  $t$  varieert evenredig met de capaciteit.

Regeltechnisch is variant b eenvoudiger te realiseren. In dit geval kan men de flocculator opgebouwd denken, in verticale zin, uit kubi met een eigen doorlaat en een eigen capaciteitsbereik bepaald door de grenzen in bijv.  $t$ .

Het vlokgebied is af te lezen in afb. 2. Voor de vlokvorming bij constante gemiddelde verblijftijd en variabele capaciteit is het verloop  $G$  gegeven in afb. 3. De metingen zijn verricht in een proefmodel,  $\Delta p$  is gemeten over negen doorlaatopeningen en  $G$  is berekend uit  $v(v \cdot t)^{-1/2}$ ; uit de metingen is gebleken dat  $c = 1$  (formule 5) met voor de doorlaat pijpstukken een lengte/diameter verhouding van  $1,5$ .

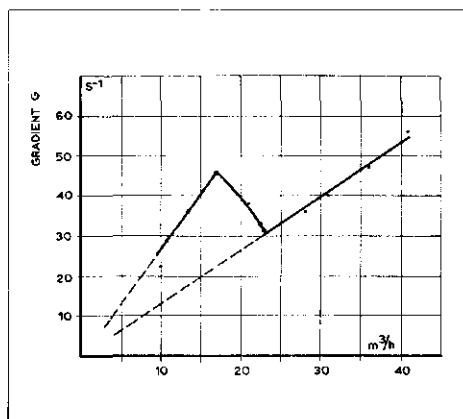
**Dichtheid van de vlok**

Lagvankar en Gimmell [2] hebben een onderzoek ingesteld naar het verband tussen de intensiteit van agitatie en de dichtheid van de ferri-vlok. Er is onderstaande relatie aangetoond tussen  $G$  en het waargenomen maximale geprojecteerde oppervlak  $A$ .

$G \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$A \text{ (mm}^2\text{)}$
11	7.26
22	1.63
30	0.50
40	0.23

Zij merken hierbij op, dat de agitatie geen directe invloed uitoefent op de dichtheid bij gegeven grootte van de vlok. Met toenemend  $G$  verschuift de frequentieverdeling van de vlok grootte naar lagere waarde en neemt de gemiddelde dichtheid toe tengevolge van de grotere dichtheid van de kleinere vlok. Helaas is het onderzoek beperkt tot  $G = 40 \text{ s}^{-1}$ , terwijl in de praktijk wordt gewerkt tot waarden van  $G = 100 \text{ s}^{-1}$ .

Afb. 3 - De metingen zijn verricht in een proefopstelling met twee doorlaatpijpstukken  $\text{Ø}i = 150 \text{ mm}$ . Tot  $17 \text{ m}^3/\text{h}$  is één doorlaat in bedrijf, vanaf  $23 \text{ m}^3/\text{h}$  is de 2e doorlaat volledig in bedrijf.  $t$  is konstant.



**Temperatuur en toerental**

Het vermogensverlies  $W$  is o.a. afhankelijk van de geometrie van de roerder, de stator en de tank, alsmede van het toerental van de roerder. Nauwkeurige bepalingen van  $W$  kunnen worden verkregen via metingen van  $T$  met een dynamometer bij verschillende toerentallen en temperaturen. In afb. 1 van het artikel van Camp is de ijkgrafiek van de gebruikte apparaten weergegeven. De indruk ontstaat, dat de lijnen voor de diverse temperaturen zijn berekend waarbij is uitgegaan van de onafhankelijkheid van  $W$  van de temperatuur. Voor  $G$  ontstaat dan:

$$\frac{G_1}{G_2} = \left( \frac{\eta_1}{\eta_2} \right)^{-1/2}$$

Het verband tussen de vermogenskengrootheid  $N_p$  (krachtverbruik van roeders) en  $Re$  en  $Fr$  kan o.a. als volgt worden geschreven [3]:

$$N_p = C (Re)^x \cdot (Fr)^y$$

De geometrie blijft bij interne vergelijking buiten beschouwing. In het geval er geen wervels optreden is  $y = 0$  en is het krachtverbruik in het laminaire gebied enkel afhankelijk van het gemodificeerde getal van Reynolds.

Van Krevelen en Huiskamp [4] hebben een aantal gegevens op deze wijze in grafiek gebracht. Voor alle roeders geldt in het laminaire gebied:

$$\frac{P}{\rho N^3 L^5} = 120 \left( \frac{\rho N L^2}{\eta} \right)^{-1}$$

$P$  = krachtverbruik van de roeders [W]  
 $L$  = diameter van de roerder [m]

Het krachtverbruik is dus omgekeerd evenredig met  $Re$ . De uitgeoefende torsiekracht  $T$  is evenredig met  $P/N$ . We mogen dus schrijven:

$$\frac{T}{\rho N^2 L^5} = \left( \frac{\rho N L^2}{\eta} \right)^{-1}$$

In het turbulente gebied geldt voor roeders met tangentiale stroming (paddle) dat het vermogenskengetal evenredig is met  $Re^{-1/3}$  overgaand in onafhankelijkheid van  $Re$  voor waarden van deze laatste  $> 10^5$ .

Op basis van bovenstaande zijn in tabel I de waarschijnlijk algemeen geldige betrekkingen van  $G$  en  $T$  gegeven voor de diverse gebieden van Reynolds.

In het geval met constante snelheid wordt

TABEL I

	$G$	$T$
$Re < 50$	$N$	$\eta \cdot N$
$50 < Re < 10^5$	$(\eta^{-1} \cdot N^4)^{1/3}$	$(\eta \cdot N^5)^{1/3}$
$Re > 10^5$	$(\eta^{-1} \cdot N^3)^{1/2}$	$N^2$

gepaddled is de afhankelijkheid van de viscositeit en dus van de temperatuur af te lezen en omgekeerd is bij de constante temperatuur de afhankelijkheid van het toerental af te lezen.

Volledigheidshalve moet hierbij worden opgemerkt dat  $\rho$  constant is beschouwd. Zo kunnen de curves uit afb. 1 van Camp bij benadering worden weergegeven met  $G = c \cdot \eta^{-1/2} \cdot N^{3/2}$ , dit is met  $T/N^2$  is constant oftewel het vermogenskengetal is onafhankelijk van Re. Er is echter geëxperimenteerd tussen Re 3.000 en 40.000.

Daarentegen geldt voor de curve uit afb. 6 van genoemd artikel  $G: N^{4/3}$  of algemeen  $G = 87 \eta^{-1/3} N^{4/3}$ , hetgeen wat betreft de exponent van N in overeenstemming is met tabel I.

Afb. 4 laat zien, dat bij lagere temperaturen met duidelijk hogere toerentallen moet worden gewerkt om de condities te handhaven. Anderzijds kunnen de grenzen onder invloed van de stijgende temperatuur, vooral aan de bovenzijde, gemakkelijk worden overschreden.

In het laminaire gebied is de gradiënt G onafhankelijk van de temperatuur. Het laminaire gebied is voor de vlokvorming zonder praktisch belang.

In het turbulente gebied, de overgang van het laminaire naar het turbulente gebied beslaat in de literatuur [3] het interval van Re 80 tot 300, is G afhankelijk van de temperatuur via  $\eta^{-1/3}$  respectievelijk  $\eta^{-1/2}$ . In het geval onder het roeren een wervel ontstaat zou de golfkengrootheid wel een rol gaan spelen in het energieverbruik.

De invloed van de temperatuur bij een statische flocculator is eenvoudig uit de formules (4) en (5) af te lezen.

De wrijvingskrachten spelen een te verwaarlozen rol in de drukval zodat de viscositeit wordt ingevoerd bij de berekening van gradiënt G.

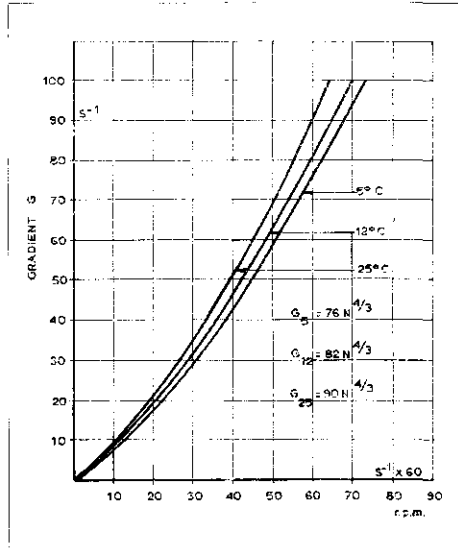
### Schaalvergroting

De dimensieloze mengtijd (toerental van de roerder vermenigvuldigd met de mengtijd) is, aldus Reitsma [5] enkel afhankelijk van de kengetallen Re en Fr. Ten aanzien van de geometrie bij de schaalvergroting blijft men echter in het ongewisse.

Constant houden van Re en Fr, in plaats van Fr moet soms het roerdervermogen per m<sup>3</sup> constant worden gehouden, levert informatie op over de nodige mengtijd.

Twee geometrisch gelijkvormige modellen van verschillende grootte zijn hiertoe noodzakelijk.

Zouden we nu bij een vergroting van bijv. 1 : 10 (index m = model) van de flocculatie-apparatuur G en het vermogenskengetal Np constant houden, dan ontstaat, indien de laatste in de beide gevallen onafhankelijk is van Re:



Afb. 4 - Op basis van afb. 6 uit het artikel van Camp. Alg. Verg.  $G = 87,2 \eta^{-1/3} N^{4/3}$ .

$$G \text{ constant} \rightarrow \frac{N_c T_e}{V_c} = \frac{N_m T_m}{V_m} \quad (V_c = 10 m^3 V_m)$$

$$N_p \text{ constant} \rightarrow \frac{T_c}{N_c^2 \cdot L_c^5} = \frac{T_m}{N_m^2 \cdot L_m^5} \quad (L_c = 10 L_m)$$

De combinatie van de formules levert

$$N_c = N_m \cdot 10^{-2/3} \text{ en } T_c = T_m \cdot 10^{11/3}$$

Re wordt dan vergroot met de factor  $10^{4/3}$ .

Constante Re levert op:  $N_c = N_m \cdot 10^{-2}$  en  $T_c = T_m \cdot 10^5$ .

Het is niet denkbeeldig dat de toeneming van Re, of eenzelfde energietoevoer bij hogere toerentallen, een ongunstige uitwerking heeft op de vlokvorming. Aanwijzingen in deze richting zijn opgedaan (lab. schaal). Constant houden van bijv. Re en G heeft tot gevolg, dat het toegevoerde vermogen moet toenemen met de factor  $10^5$ , hetgeen betekent, dat bij een lager toerental aanzienlijk meer energie moet worden overgebracht op het water. Een oplossing in deze richting kan slechts gedeeltelijk worden gevonden in het aanbrenge en/of uitbreiden van stators, uitbreiden van het aantal roerbladen en meer roeders aanbrenge. Dit laatste zou kunnen worden gezien als een minder grote stap in de schaal.

Bij schaalvergroting van de statische flocculator verkeren we in het voordeel dat de passage-snelheid van het water door de doorlaatopeningen constant blijft, immers  $G = v(v \cdot t)^{-1/2}$  blijft constant, evenals t. Re neemt dus toe evenredig met de grootte van de diameter van de openingen. Aan de zijde van de energienivellering veranderen de verhoudingen in

bepaalde mate bij een vergroting van het debiet met de factor 10:  $V_c = 10 V_m$  of  $R_c = R_m \sqrt[3]{10}$  en  $d_c = d_m \cdot \sqrt[3]{10}$  als R de ribbe van het kubusvormige volume V van een compartiment voorstelt en d de diameter van de doorlaatopening.

### Literatuur

1. Camp, Thomas R.: *Floc Volume Concentration*. JAWWA 60 (1968) 656.
2. Lagrankar, A. L. en Gemell, R. S.: *A size-Density Relationship for flocs*. JAWWA 60 (1968) 1040.
3. *Liquid Mixing and Processing in stirred tanks*. Reinhold Publ. Corp. London 1966.
4. Krevelen, O. W. v. en Huiskamp, J.: *De technologie van het mengen*. De Ingenieur 31 (1949) (Ch) 6-12.
5. Reitsma, H.: *Modellen en Schaalregels*. De Ingenieur 78.50 (1966) W 247.