

SUMMARY

Formulae for calculating the purification efficiency of trickling filters

The paper describes four methods in American literature of determining the purification efficiency of trickling filters. Stress is laid on the warning that these calculation methods are to be used very carefully, since the many variables influencing the complicated purification processes in a trickling filter are not always mathematically defined. Finally two examples are given. In the first example no recirculation is applied, whereas in the second example the amount of recirculated water equals the feeding flow of sewage. At both examples it appears, that the N.R.C. formula gives a lower efficiency than the other three described calculation methods.

Formules voor het berekenen van het nuttig effect van oxydatiebedden

Aangezien de afvalwaterzuivering geen exacte wetenschap is en de optimale werking van oxydatiebedden van vele factoren afhankelijk is, kunnen de verschillende in de literatuur beschreven formules niet zonder meer bij het ontwerpen van installaties gebruikt worden. Zij zijn meestal gebaseerd op enkele van de vele variabelen, die het proces van de biologische zuivering beïnvloeden; de formules, die hier behandeld zullen worden, werden daarenboven ontwikkeld voor Amerikaanse omstandigheden. Het afvalwater in Amerika is in het algemeen minder geconcentreerd en men gebruikt er andere vulmaterialen voor de filters.

In de volgende beschouwing zal ruime aandacht besteed worden aan de belangrijkste ontwikkelde formules, omdat deze kunnen leiden tot een betere begripsvorming van de filters.

De N.(ational) R.(esearch) C.(ouncil) - formule [1]

Deze formule werd in 1946 door „the Committee on Sanitary Engineering of the National Research Council” af-

geleid uit gegevens, die tijdens de tweede wereldoorlog van een groot aantal *militaire* installaties werden verkregen (figuur 1). De formule luidt:

$$E_2 = \frac{100}{1 + K \sqrt{\frac{W_1}{V_1 F_1}}}$$
, waarin

E_2 = de procentuele afname van de B.O.D. van het bezonken ruwe rioolwater in het (eerste) oxydatiebed en de nabezinktank.

K = een coëfficiënt, die afhankelijk is van de aard van het vulmateriaal, de temperatuur enz.; voor de onderzochte installaties geldt gemiddeld $K = 0,014$.

W_1 = de B.O.D.-belasting door het bezonken ruwe rioolwater in grammen per dag.

V_1 = de inhoud van het filter in m^3 .

F_1 = de recirculatiefactor = $\frac{1 + R_1}{(1 + (1 - p) R_1)^2}$

Hierin is:

R_1 de verhouding van de hoeveelheid gerecirculeerd bezonken filtereffluent en de aanvoer van het bezonken

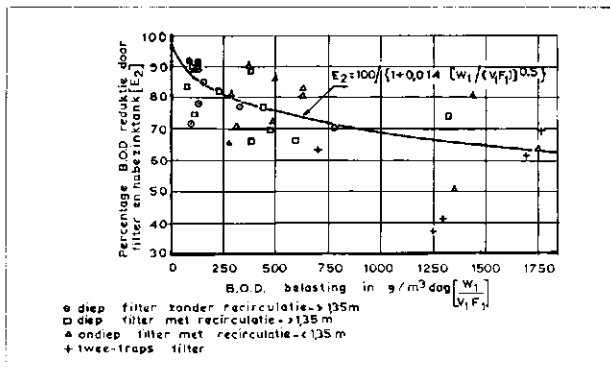
ruwe rioolwater = $\frac{Q_R}{Q}$

p een reductiefactor, die varieert van 0,81 - 0,95 en waarvoor gewoonlijk 0,9 wordt aangehouden.

Als geen recirculatie plaatsvindt, is $Q_R = 0$, $R_1 = 0$, dus $F_1 = 1$.

De recirculatiefactor F_1 geeft het gemiddeld aantal passages van het organisch materiaal door het oxydatiebed. Zij werd afgeleid uit het gemiddeld aantal passages van het aangevoerd rioolwater door het filter, welke is te stellen op:

Figuur 1



$$\frac{Q}{Q + Q_R} \times 1 + \frac{Q}{Q + Q_R} \times \frac{Q_R}{Q + Q_R} \times 2 + \frac{Q}{Q + Q_R} \times \left(\frac{Q_R}{Q + Q_R}\right)^2 \times 3 + \dots = 1 + \frac{Q_R}{Q} = 1 + R_1$$

De formule beschrijft het algemene geval van een gerecirculeerde hoeveelheid $Q_R = Q.n$. Ter verduidelijking wordt het geval $Q_R = Q$ nader beschouwd. Voor dit geval is bij de afleiding van de reeks uitgegaan van de veronderstelling, dat:

- de helft van de op de installatie aangevoerde waterhoeveelheid met het effluent wordt afgevoerd; de resterende helft wordt gerecirculeerd en passeert het filter twee keer;
- één helft van dit resterende gedeelte (= één vierde van de oorspronkelijke hoeveelheid) wordt teruggevoerd door het filter en passeert het filter drie keer;
- etc. etc.

Het gemiddeld aantal passages van de waterdeeltjes uit het oorspronkelijke volume bedraagt nu:

$$\frac{1}{2} \cdot 1 + \frac{1}{4} \cdot 2 + \frac{1}{8} \cdot 3 + \frac{1}{16} \cdot 4 + \dots = 2.$$

Dit getal is echter niet gelijk aan het gemiddelde aantal passages van het organisch materiaal, omdat het filter bij iedere passage organische stof verwijdert, maar het water niet beïnvloedt.

Verondersteld wordt nu, dat bij elke passage door het filter een constant gedeelte van de organische stof wordt verwijderd. Het organisch materiaal wordt bij elke passage minder door de biochemische activiteit van het filter en de afsplitsing van effluent als gevolg van de recirculatie.

Omdat het filter de eenvoudiger afbreekbare stof het eerst zal wegnemen, is daardoor mede de na elke passage resterende organische substantie moeilijker te verwijderen dan het oorspronkelijke materiaal. De vermindering wordt weergegeven door de al eerder genoemde reductiefactor, p , die de hoeveelheid en „de bruikbaarheid” van het organisch materiaal na elke passage in verhouding tot de oorspronkelijke hoeveelheid geeft.

$$F_1 = \frac{Q}{Q_R + Q} \times 1 \times p^0 + \frac{Q}{Q_R + Q} \times \frac{Q_R}{Q_R + Q} \times 2 \times p^1 + \frac{Q}{Q_R + Q} \left(\frac{Q_R}{Q_R + Q} \right)^2 \times 3 \times (p)^2 + \dots$$

$$F_1 = \frac{1 + \frac{Q_R}{Q}}{\left\{ 1 + (1-p) \frac{Q_R}{Q} \right\}^2} = \frac{1 + R_1}{\left\{ 1 + (1-p) R_1 \right\}^2}$$

De N.R.C.-formule is grafisch uitgebeeld in de figuren 2 en 3 voor het geval dat geen recirculatie plaatsvindt ($F_1 = 1$). In de grafieken wordt eveneens het nuttig effect van de gehele installatie aangegeven, ervan uitgaande, dat de afname van de B.O.D. van het ruwe rioolwater in het voorbezinkbassin (E_1) 35 % bedraagt.

De formule kan ook als volgt worden geschreven:

$$V = \frac{W}{5040 F_1} \times \left\{ \frac{E_2}{100 - E_2} \right\}^2$$

Wanneer een tweede filter in serie geplaatst met het eerste aanwezig is, kan men het nuttig effect E_2^1 van de tweede trap als volgt berekenen.

$$E_2^1 = \frac{100}{1 + 0,014 \sqrt{\frac{fW_2}{V_2 F_2}}}, \text{ waarin}$$

E_2^1 = de procentuele afname van de B.O.D. van het bezonken effluent van het eerste bed door het tweede filter en de nabezinktank;

W_2 = de B.O.D.-belasting door het bezonken effluent van het eerste bed in grammen per dag;

V_2 = de inhoud van het tweede oxydatiebed in m³;

F_2 = de recirculatiefactor = $\frac{1 + R_2}{(1 + 0,1R_2)^2}$;

f = een factor, waarmee de belasting W_2 vermenigvuldigd moet worden, omdat de B.O.D. van het effluent van het eerste bed moeilijker te verwijderen is dan de B.O.D. van het bezonken ruwe rioolwater;

deze factor hangt af van de afbreekbaarheid van de belasting W_2 en dus eveneens van E_2 . Uit een onderzoek van resultaten van tweetraps oxydatiebedden is vastgesteld, dat de waarde van f bij benadering als volgt kan worden uitgedrukt:

$$f = \frac{1}{(1 - E_2)^2}$$

Substitutie in de formule voor E_2^1 geeft:

$$E_2^1 = \frac{100}{1 + \frac{0,014}{1 - E_2} \sqrt{\frac{W_2}{V_2 F_2}}}$$

Vanzelfsprekend kan men een geringer nuttig effect van de tweetraps installatie verwachten, als de bezinktank tussen de beide oxydatiebedden ontbreekt.

De N.R.C.-formule werd ontwikkeld uit de resultaten van installaties, waarbij de B.O.D.-belasting niet hoger was dan 2940 gram B.O.D.₅ per m³ per dag [2].

De theorie van Velz [3]

De theorie, die Velz in 1948 ontwikkelde, is voor hoog- en laagbelaste oxydatiebedden te gebruiken.

Velz wees erop dat elke eenheid van filterdiepte een constante fractie van de te verwijderen B.O.D., die aan die eenheid van diepte wordt toegevoegd, zal wegnemen. In formule:

$$\frac{dL}{dD} = -kL \text{ of na integratie } \frac{L_D}{L} = 10^{-kD}, \text{ waarin}$$

L = de totale te verwijderen fractie van de toegevoerde B.O.D.;

D = de diepte in meters;

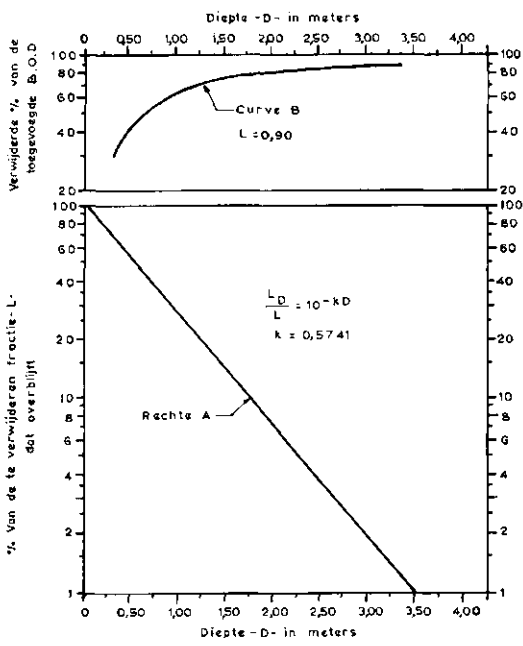
L_D = de hoeveelheid van de te verwijderen B.O.D., die op de diepte D in de vloeistof achterblijft;

k = een constante, afhankelijk van de snelheid van de biologische oxydatie;

$\frac{L_D}{L}$ = het gedeelte van de totale te verwijderen fractie B.O.D., dat in de vloeistof, die de diepte D passeert, achterblijft;

$1 - \frac{L_D}{L}$ = het gedeelte, dat wordt weggenomen.

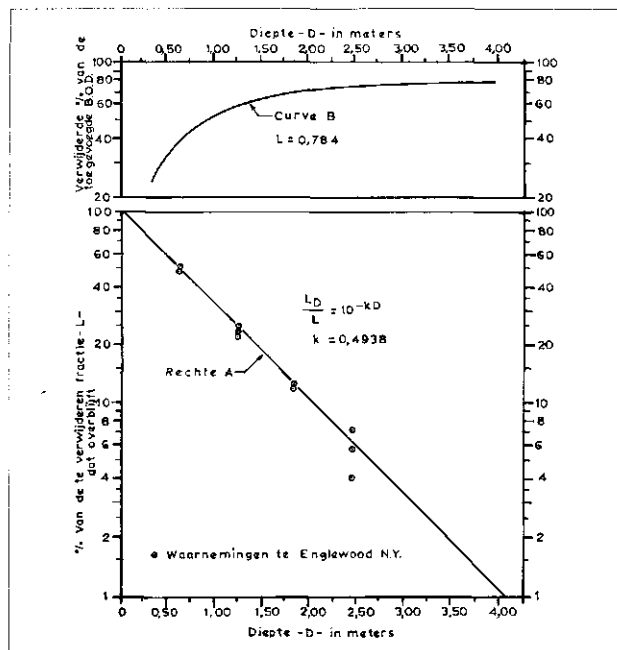
De grootte van de in totaal te verwijderen fractie hangt af van een combinatie van vele factoren. Het is aan-



Figuur 4

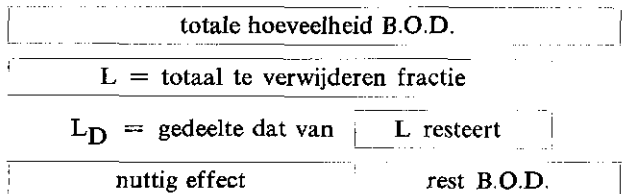
nemelijk, dat de te verwijderen fractie L afneemt als de hydraulische belasting toeneemt. Men beschikte over te weinig gegevens om een kwantitatief verband tussen de te verwijderen fractie L en de hydraulische belasting te leggen. Een limiet moet er bestaan voor de hoeveelheid B.O.D., die door het biologisch leven van het bed kan worden geassimileerd. Deze B.O.D.-belasting zal een functie zijn van de snelheid van de biologische oxydatie en de capaciteit om B.O.D. in het filter te accumuleren. In de winter zal de toelaatbare B.O.D.-belasting geringer zijn dan in de zomer, omdat de snelheid van de biologische oxydatie afhankelijk is van de temperatuur. Velz verstaat onder „te verwijderen B.O.D.” het maximale

Figuur 5



gedeelte van de toegevoegde B.O.D., dat bij bepaalde waarden voor de hydraulische belasting verwijderd kan worden.

De constanten k en L moeten voor elk type biologisch filter empirisch worden vastgesteld. Voor laagbelaste bedden vond Velz bij een hydraulische belasting van $1,85 - 5,60 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dag}$ voor $k = 0,5741$ (D in meters) en voor $L = 0,90$; de hydraulische belasting wordt intermitterend toegevoegd. De toegevoegde B.O.D. is van voorbezonden ruw rioolwater en de te verwijderen fractie is gebaseerd op de werking van het filter in combinatie met de nabezinktank. Figuur 4 geeft een grafische weergave van de formule voor laagbelaste bedden. Rechte A toont het percentage van de totaal te verwijderen fractie (L), die na het passeren van diepte D in de vloeistof achterblijft $= \frac{L_D}{L} \times 100$. Kromme B toont de verwijdering tengevolge van het passeren van diepte D , in procenten van de B.O.D.-belasting van het filter $= (L - L_D) \times 100$.



Voor hoogbelaste bedden werd door Velz bij een hydraulische belasting van ongeveer $18,7 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dag}$ voor $k = 0,4938$ (D in meters) en voor $L = 0,784$ gevonden. De toegevoegde B.O.D. is van voorbezonden ruw rioolwater, dus geen B.O.D. van recirculatiewater. De formule geldt voor het filter in combinatie met de nabezinktank. Figuur 5 geeft de formule voor hoogbelaste bedden grafisch weer. Veel bedrijfsgegevens bevestigden dat voor een oxydatiebed de totaal te verwijderen fractie van de toegevoerde B.O.D. bij gelijkblijvende hoogte van het filter tot aan een limietbelasting constant blijft.

Voor hoogbelaste bedden ligt deze limiet bij een belasting van $4890 \text{ gram B.O.D.}_5 \text{ per m}^2 \text{ per dag}$ bij een temperatuur van het afvalwater van ongeveer 30°C . Er waren te weinig gegevens beschikbaar om te kunnen zeggen hoe groot de afname van het nuttig effect tengevolge van overbelasting zou bedragen. Velz brengt de belastinglimiet in verband met de accumulatiecapaciteit van het filter. Hij berekent voor een belasting van $4,890 \text{ kg per m}^2 \text{ per dag}$ bij 29°C , dat wil zeggen bij een maximale verwijdering L van $0,784$. $4,890 = 3,830 \text{ kg per m}^2 \text{ per dag}$ de optimale B.O.D.-accumulatie in het hoogbelaste bed met behulp van de formule:

$$L_e = \frac{L_p}{0,701 \cdot k} \rightarrow L_e = \frac{3,830}{0,701 \cdot 0,4938} = 11,06 \text{ kg/m}^2$$

Deze waarde geldt alleen voor een hoogbelast bed met onbeperkte hoogte bij een hydraulische belasting van $18,7 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dag}$.

Bij 29°C is dus onder bovengenoemde omstandigheden $11,06 \text{ kg/m}^2$ de maximaal toelaatbare B.O.D.-accumulatie zonder dat het nuttig effect van het filter minder wordt. Omdat er een bepaalde tijd nodig is om deze accumulatie op te bouwen kunnen kleine variaties in belasting, waardoor de belastinglimiet wordt overschreden zonder toneming van de accumulatie met een daarmee gepaard gaand geringer nuttig effect worden toegelaten.

Wanneer de temperatuur daalt en k met de snelheid van de biologische oxydatie afneemt, moet volgens Velz de dagelijkse verwijdering van B.O.D. en dus de dagelijkse toegevoegde belasting gereduceerd worden volgens:

$$L_p = 11,06 \times 0,701 \times k_T (k_T = k_{20} \times 1,047^{T-20}).$$

Figuur 6 toont het te verwachten effect van het hoogbelaste bed bij verschillende hoogten; in deze figuur zijn eveneens de limietbelastingen volgens bovenstaande formule bij water temperaturen van $0^\circ - 30^\circ \text{ C}$ aangegeven. Velz beschikte over te weinig gegevens om de limiet B.O.D.-belasting met bijbehorende maximale accumulatie L_e voor laagbelaste bedden te kunnen vaststellen.

Het nuttig effect bij recirculatie en toepassing van tweetraps bedden kan worden beschouwd als een B.O.D.-verwijdering door opeenvolgende diepten. Het nuttig effect van een filter met recirculatie $Q_R = Q$ en een hoogte van 1,00 m is volgens deze opvatting gelijk aan het nuttig effect van een bed zonder recirculatie met een hoogte van 2,00 m. Er wordt gerecirculeerd met bezonken filter effluent.

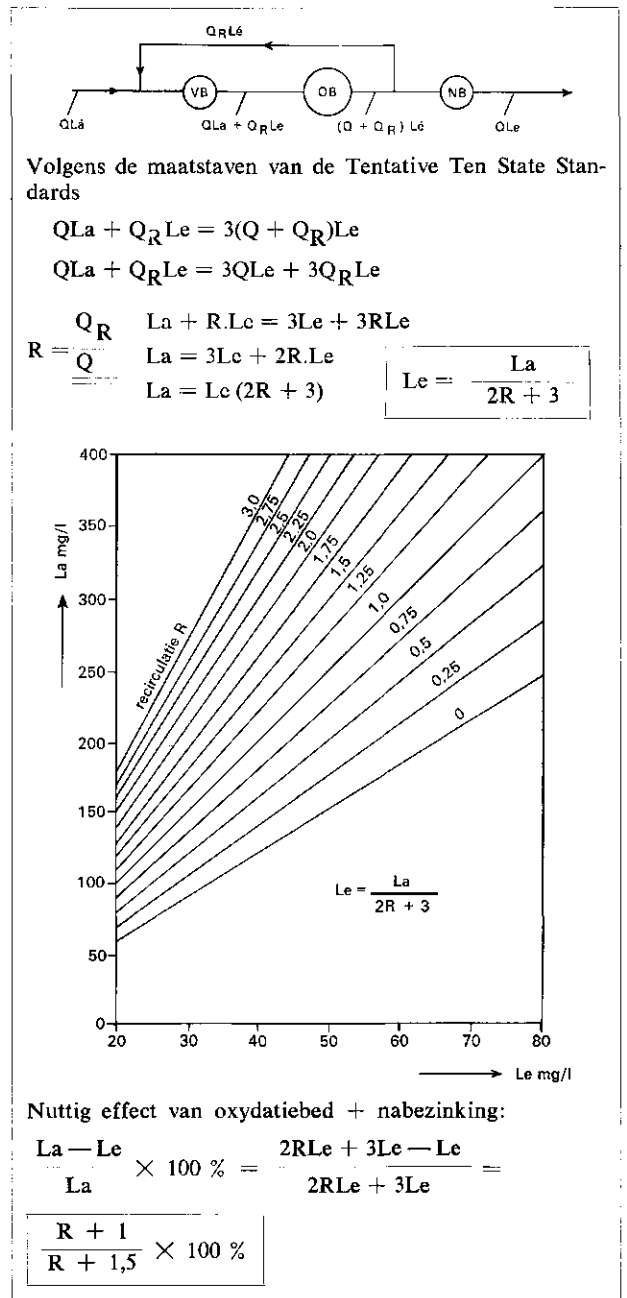
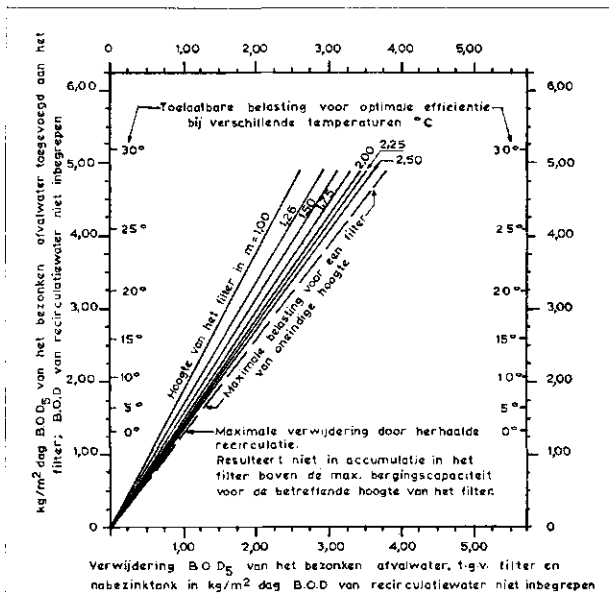
De maximale verwijdering van B.O.D. is de totale te verwijderen fractie L , als ten minste de maximale accumulatie-capaciteit in het filter niet wordt overschreden. Uit figuur 6 blijkt dan, dat voor hoge filters maar weinig resultaat van recirculatie of extra filters verwacht kan worden; voor lage filters is echter een aanzienlijke verbetering te verkrijgen.

In 1957 werd door Stach een modificatie van de theorie van Velz ontwikkeld [4].

De formules van Rankin voor hoogbelaste oxydatiebedden [5]

Rankin ontwikkelde zijn formules in 1953 aan de hand van de maatstaven van de Tentative Ten State Standards. Deze luiden voor het enkelvoudig oxydatiebed: „De toegevoerde belasting inclusief recirculatie water mag maximaal 1765 gram B.O.D.₅ per m³ filtermateriaal per 24 uur bedragen” en „Door de recirculatie moet het voorbezonden rioolwater zodanig verdund

Figuur 6



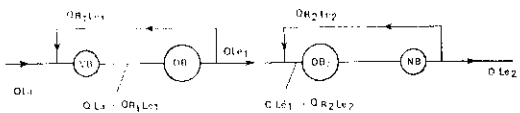
Figuur 7 - Enkelvoudig oxydatiebed.

worden, dat de B.O.D. van het influent naar het filter inclusief die van recirculatie water niet meer dan $3 \times$ de gewenste B.O.D. van het bezonken filter-effluent bedraagt”. Voor tweetrappige bedden wordt gesteld: „De B.O.D.-belasting, die inclusief recirculatie water aan het tweede filter wordt toegevoegd, mag niet groter zijn dan $2 \times$ de B.O.D., die men in het bezonken effluent verwacht. Wanneer het effluent van het eerste bed rechtstreeks zonder bezinking aan het tweede bed wordt toegevoegd, zal de B.O.D. verwijdering tengevolge van het eerste bed maximaal 50 procent bedragen”.

De hydraulische belasting van de hoogbelaste bedden mag 9,40 - 28,00 m³ per m² per dag bedragen.

In de figuren 7 tot en met 11 wordt de nadere uitwerking van deze eisen weergegeven:

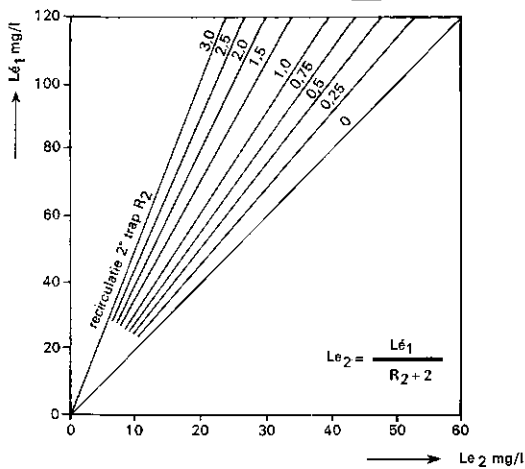
Q = de hoeveelheid afvalwater, Q_R = is de hoeveelheid te recirculeren water, L_a = de B.O.D.₅ van het



eerste trap: $Le_1 = 0,5 La$
 tweede trap: $QLe'_1 + QR_2 Le_2 = 2(Q + QR_2) Le_2$
 $QLe'_1 + QR_2 Le_2 = 2 QLe_2 + 2 QR_2 Le_2$
 $QLe'_1 = QR_2 Le_2 + 2 QL_2$

$$R_2 = \frac{QR_2}{Q} \quad Le'_1 = R_2 Le_2 + 2 Le_2$$

$$Le'_1 = Le_2 (R_2 + 2) \quad Le_2 = \frac{Le'_1}{R_2 + 2}$$



Nuttig effect eerste trap: 50 %

Nuttig effect tweede trap: $\frac{Le'_1 - Le_2}{Le'_1} \times 100 =$
 $\frac{Le'_1 - \frac{Le'_1}{R_2 + 2}}{Le'_1} \times 100 = \frac{R_2 + 1}{R_2 + 2} \times 100 \%$

Totaal nuttig effect: $\frac{La - Le_2}{La} \times 100 =$
 $\frac{2Le_1 - \frac{Le_1}{R_2 + 2}}{2Le_1} \times 100 = \frac{R_2 + 1,5}{R_2 + 2} \times 100 \%$

Figuur 8 - Tweetraps installatie zonder tussenbezinking.

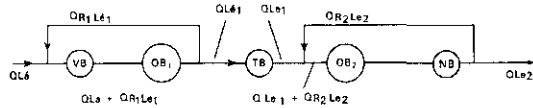
afvalwater na bezinking en Le = de B.O.D.₅ van het biologisch gezuiverd water na bezinking.

De afgeleide formule van Eckenfelder en O'Connor [6]
 Deze formule werd met behulp van bestaande formules en gegevens afgeleid uit de theorie van Howland en Schulze.

Howland en Schulze vonden dat het gedeelte dat van de lage B.O.D. concentraties, die aan het filter worden toegevoegd, overblijft recht evenredig is met de contact-tijd:

$$\frac{Le}{Lo} = e^{-Kt} \text{ waarin,}$$

- Le = de B.O.D., die overblijft in het filtereffluent;
- Lo = de B.O.D., die na menging met het gerecirculeerde water wordt toegevoerd aan het filter;
- K = een functie van de actieve film per volume-eenheid filtermateriaal.



eerste trap: $Le_1 = \frac{La}{2R_1 + 3}$ (bekend geval)
 tweede trap: $Le_2 = \frac{Le_1}{R_2 + 2}$ (bekend geval)

$$Le_2 = \frac{La}{2R_1 + 3} = \frac{La}{(2R_1 + 3)(R_2 + 2)}$$

Nuttig effect eerste trap: $\frac{R_1 + 1}{R_1 + 1,5} \times 100 \%$

Nuttig effect tweede trap: $\frac{R_2 + 1}{R_2 + 2} \times 100 \%$

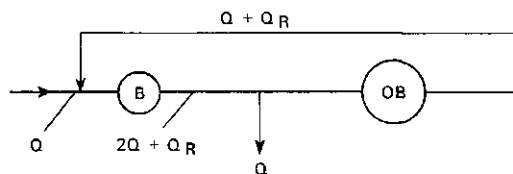
Totaal nuttig effect $\frac{La - Le_2}{La} \times 100 \%$

$$La - \frac{La}{(2R_1 + 3)(R_2 + 2)} \times 100 \%$$

$$= \left\{ 1 - \frac{1}{(2R_1 + 3)(R_2 + 2)} \right\} \times 100 \%$$

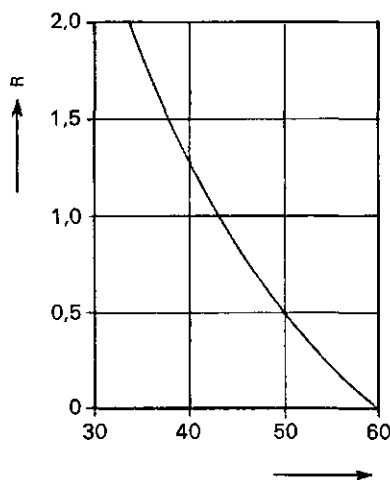
Figuur 9 - Tweetraps installatie met tussenbezinking.

Figuur 10 - Enkelvoudig oxydatiebed met gedeeltelijke biologische zuivering.



Het percentage van de B.O.D.₅ van het ruw rioolwater na bezinking dat overblijft in het effluent wordt door Rankin berekend als:

$$\frac{1,5}{R + 2,5} \times 100 \%, \text{ waarin } R = \frac{QR}{Q}$$



% van de B.O.D.₅ van het bezonken ruw rioolwater, dat achterblijft in het effluent.

De contacttijd t is afhankelijk van de diepte en de hydraulische belasting, alsmede van de fysieke karakteristieken van het filtermateriaal.

Howland en Schulze toonden aan, dat de gemiddelde contacttijd in het filter-medium door de volgende vergelijking kan worden uitgedrukt:

$$t = C \cdot \frac{D}{Q_o^n} \text{ waarin,}$$

t = de contacttijd;

D = de hoogte van het filter;

Q_o = de hydraulische belasting.

De constante C en de exponent n hangen af van het type filter-medium.

Uit bovenstaande formules kan een algemene vergelijking met een wijziging voor de verdeling van de actieve film in het filter worden afgeleid:

$$\frac{L_e}{L_o} = e^{-KD^m/Q_o^n}$$

Howland en Schulze hebben aangetoond, dat als wordt aangenomen, dat de film bij benadering gelijkmatig over de filterhoogte verdeeld is $m = 1,0$ (hoogbelaste filters). Meestal varieert evenwel de verdeling, de activiteit en de samenstelling van de film met de hoogte; zij is het grootst in de oppervlaktelagen (laagbelaste filters).

De vergelijking laat zien dat een toename van de hydraulische belasting bij elke organische belasting resulteert in een afname van het nuttig effect. Hetzelfde werd eveneens door Velz opgemerkt.

Per volume-eenheid zal het filter een beperkte capaciteit hebben om B.O.D. te assimileren tot celmateriaal.

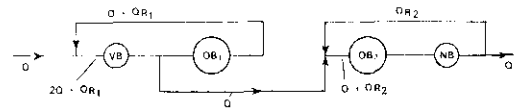
De beperkte capaciteit is afhankelijk van de temperatuur, de hoeveelheid actieve film en de zuurstofoverdracht in het filter. Volgens de vergelijking worden alle componenten van het afvalwater met gelijke snelheid weggenomen. Het ligt echter voor de hand dat de snelheid van verwijdering afneemt met de concentratie en de tijd aangezien de beter voor assimilatie geschikte componenten sneller zullen worden weggenomen. Om het proces exact te beschrijven zal een vertragende factor in de vergelijking moeten worden opgenomen. Er ontstaat dan een formule van de form:

$$\frac{L_e}{L_o} = \frac{1}{1 + CID^m/Q_o^n}$$

Eckenfelder en O'Connor stelden voor bezonken huishoudelijk afvalwater — zonder recirculatie — aan de hand van gepubliceerde gegevens een ontwerpmethodiek op, waarbij van het bovenstaande gebruik werd gemaakt (figuur 12). De exponent 0,67 van de filterhoogte werd van de gepubliceerde gegevens afgeleid. De exponent 0,5 van de hydraulische belasting werd bepaald met behulp van gegevens van Keefer en Meisel [7] en van het N.R.C.-rapport. Het vertragend effect blijkt uit de afnemende helling van de kromme bij toenemende diepte of hydraulische belasting van het filter.

De verhouding $\frac{D^{0,67}}{Q_o^{0,5}}$ wordt bij verschillende constante hoogten van het filter:

D =	1,80 m	2,00 m	2,25 m	2,50 m	2,75 m
$\frac{D^{0,67}}{Q_o^{0,5}}$	1,4826 $Q_o^{-0,5}$	1,5911 $Q_o^{-0,5}$	1,7217 $Q_o^{-0,5}$	1,8476 $Q_o^{-0,5}$	1,9695 $Q_o^{-0,5}$



Het percentage van de B.O.D.₅ van het ruw rioolwater na bezinking dat overblijft na de eerste trap is groot:

$$\frac{1,5}{R_1 + 2,5} \times 100 \%$$

Nuttig effect van de tweede trap is: $\frac{R_2 + 1}{R_2 + 1,5} \times 100 \%$

Van de B.O.D.-belasting van de eerste trap blijft over:

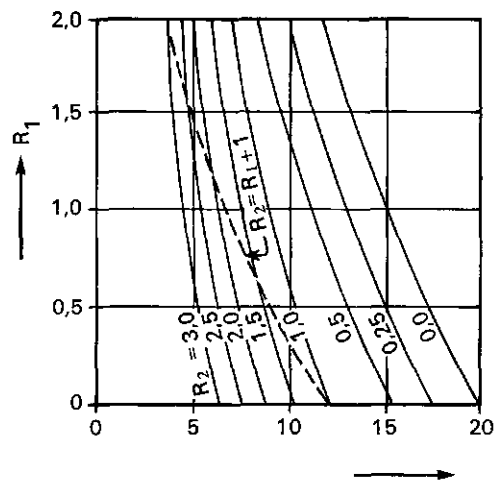
$$\left(1 - \frac{R_2 + 1}{R_2 + 1,5}\right) \times 100 \% = \frac{0,5}{R_2 + 1,5} \times 100 \%$$

Aldus bedraagt het percentage van de B.O.D.₅ van het ruw rioolwater na bezinking dat uiteindelijk overblijft:

$$\frac{0,5}{R_2 + 1,5} \left(\frac{1,5}{R_1 + 2,5}\right) \times 100 \% =$$

$$\frac{0,75}{(R_2 + 1,5)(R_1 + 2,5)} \times 100 \%, \text{ waarin } R_1 =$$

$$\frac{Q_{R1}}{Q} \text{ en } R_2 = \frac{Q_{R2}}{Q}$$



% van de B.O.D.₅ van het bezonken ruw rioolwater dat achterblijft in het effluent.

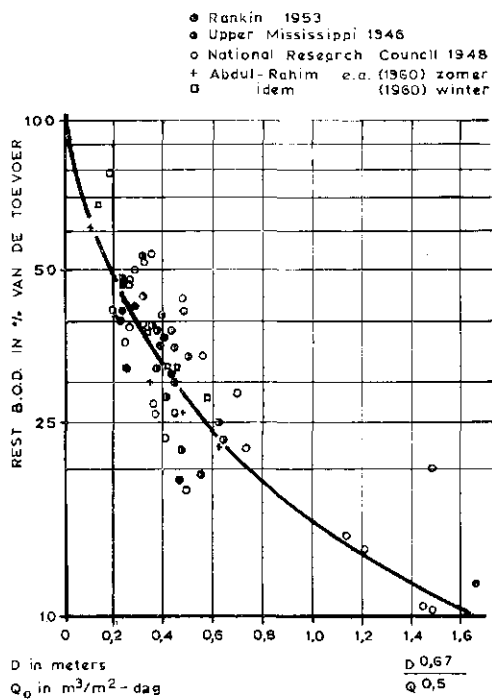
Figuur 11 - Tweetraps installatie serie-parallel.

Eventuele recirculatie wordt in rekening gebracht door de B.O.D. na verdunning met de gerecirculeerde hoeveelheid als toegevoegd aan het filter te beschouwen. De verwijdering van de B.O.D. wordt dan op deze B.O.D. in plaats van op de B.O.D. van het bezonken water gebaseerd.

De toegevoegde B.O.D. wordt berekend met behulp van de formule

$$l_o = \frac{1a + R1e}{1 + R}, \text{ waarin}$$

l_o = de toegevoegde B.O.D. na verdunning met de gerecirculeerde hoeveelheid water.



Figuur 12

1a = de B.O.D. van het effluent van de voorbezink-tank.

1e = de B.O.D. van het effluent van de nabezink-tank.

$$R = \frac{Q_R}{Q}$$

Hierbij dient te worden aangetekend, dat het nuttig effect van het filter ten aanzien van de gerecirculeerde hoeveelheid water geringer is dan ten opzichte van het voorbezonden afvalwater als zodanig; een en ander tengevolge van het vertragingseffect bij het proces van de B.O.D.-verwijdering. Hiermee is in de ontwerpformule geen rekening gehouden. De fout, die hiervan het gevolg is, zal in de meeste gevallen van geringe betekenis zijn.

Behalve de hier behandelde formules bestaan vele andere methoden van berekening voor het verband tussen de aan een filter toegevoegde B.O.D.-belasting en de verwijdering ervan door de werking van oxydatiebedden en nabezinking. De formules kunnen mijns inziens in het gunstigste geval worden gezien als een benadering welke is te hanteren bij de vergelijking van het nuttig effect van verschillende typen van installaties met oxydatiebedden.

Het nuttig effect van een oxydatiebed zal van zeer vele factoren afhankelijk zijn, zoals de samenstelling van het rioolwater, de schommeling in de aanvoer, de organische belasting, de hydraulische belasting, de recirculatie, de constructie en de afmetingen van het filter, het vulmateriaal, de constructie en de snelheid van de draaisproeiers, de ventilatie in het filter, de temperatuur van het afvalwater en van de buitenlucht en — hetgeen vaak vergeten wordt — de bedrijfsvoering op de zuiveringsinstallatie.

In de formules zijn slechts enkele van deze veranderlijken opgenomen; de overige variabelen zijn als constant beschouwd of ondergebracht in een coëfficiënt die empirisch werd bepaald.

De militaire installaties, waarvan de resultaten dienden voor de opbouw van de N.R.C.-formule zijn voornamelijk in het Zuiden van de Verenigde Staten van Amerika gelegen.

Er is vanuit gegaan, dat de organische belasting maatgevend is voor het nuttig effect van oxydatiebedden. Dit heeft tot gevolg dat het nuttig effect van een filter met een oppervlakte van 2000 m² en een hoogte van 1,00 m volgens de N.R.C.-formule gelijk is aan het nuttig effect van een filter met een oppervlakte van 1000 m² en een hoogte van 2,00 m. De temperatuur van het afvalwater bedroeg bij de onderzochte installaties 1 - 38 °C.

Uit theoretisch oogpunt is de werkwijze zoals Velz die voorstelt de meest logische. Velz betreft in zijn methode behalve de organische belasting ook de hydraulische belasting. Hij geeft daarnaast voor hoogbelaste bedden met een hydraulische belasting van ca. 18,7 m³/m².dag het verband aan tussen de temperatuur van het afvalwater en de maximaal te verwijderen organische belasting van het filter. Als een bezwaar tegen de werkwijze volgens Velz wordt wel aangevoerd dat men in principe voor elke hydraulische belasting de waarden L en k moet bepalen. Een verbetering zou verkregen kunnen worden door de hydraulische belasting in de formule op te nemen; dit zou resulteren in de reeds eerder vermelde

$$\text{vergelijking } \frac{L_e}{L_0} = e^{-KD^m/Q_0^n}$$

De formules van Rankin, die op de Ten State Standards zijn gebaseerd geven resultaten, die overeenkomen met de uitkomsten volgens de formule van Velz. Ze hebben als voordeel dat ze gemakkelijker toe te passen zijn.

Bij de toegepaste formules wordt recirculatie alleen geacht plaats te vinden als de hoeveelheid die door het filter stroomt groter is dan de hoeveelheid ruw afvalwater. In de praktijk zal de recirculatie op de volgende manieren worden uitgevoerd:

- alleen bij geringe aanvoer van afvalwater,
- altijd met een constante hoeveelheid water,
- evenredig met de hoeveelheid afvalwater.

Deze werkwijzen worden voornamelijk toegepast om een minimum hoeveelheid water voor de verdeling van het afvalwater over de filters te hebben en om belastingstoten en schommelingen in de belasting van het filter te nivelleren.

In Amerika worden oxydatiebedden hoofdzakelijk ontworpen voor kleine installaties. Na de tweede wereldoorlog werden meer dan 900 installaties met oxydatiebedden gebouwd. Ongeveer de helft van deze installaties is laag belast (1,0 - 4,0 m³/m².dag) en de overigen hoogbelast (8,0 - 40,0 m³/m².dag). De organische belasting bedraagt 80 - 400 g. B.O.D.₅ per m³ per dag voor laagbelaste filters en 400 - 4800 g. B.O.D.₅ per m³ per dag voor hoogbelaste filters. Voor laagbelaste bedden kiest men de filterhoogte meestal 1,50 - 2,40 m, waarbij de hoogte evenwel zelden groter dan 1,80 m wordt gekozen. Bij hoogbelaste filters varieert de hoogte van 0,90 - 2,40 m, waarbij de voorkeur uitgaat naar een hoogte van 0,90 - 1,80 m. In gebieden met een warm klimaat bouwt men als regel lagere filters (1,20 m) dan in koudere streken (1,80 m). Het vulmateriaal van de oxydatiebedden bestaat meestal uit slakken, grind, steenslag of ander duurzaam en stofvrij materiaal. De korrelgrootte varieert veelal van 7 tot 10 cm; over de meest geëigende korrelgrootte van het vulmateriaal bestaat echter nog verschil van mening.

Als toepassing van de behandelde formules zullen ten slotte twee voorbeelden worden uitgewerkt.

Voorbeeld 1

20.000 inwoners, geen industrie.
concentratie afvalwater als zodanig: 540 mg B.O.D.₅/l,
concentratie afvalwater na bezinking: 350 mg B.O.D.₅/l,
totale afvoer 2000 m³ per dag; geen afvoer van regenwater.

Er wordt uitgegaan van de veronderstelling dat bij een belasting van 10 inwoners per m³ vulmateriaal een effluent met een B.O.D.₅ van 25 mg/l gehaald kan worden.

Het nuttig effect van het filter + de nabezinktank bedraagt dan 92,9 % (= E₂); het nuttig effect van de gehele installatie is 95,4 % (= E₃); voor het nuttig effect van de voorbezinktank is n.l. 35 % aangehouden.

Afmetingen van het filter bij 10 inwoners per m³:
volume = 2000 m³; h = 2,50 m → oppervlakte = 800 m²; diameter = 31,95 m. Er vindt geen recirculatie plaats.

hydraulische belasting = oppervlaktebelasting = Q_o = 2,5 m³ per m² per dag.

organische belasting = B.O.D.₅-belasting is voor het afvalwater na bezinking 700 kg B.O.D.₅ per dag.

De N.R.C.-formule

Uit figuur 2 blijkt dat bij een filtervolume van 2000 m³ en een B.O.D.₅-belasting van 700 kg/dag E₂ = 79 à 80 %; E₃ = 86 à 87 %.

Met behulp van de formule vindt men (F₁ = 1):

$$E_2 = \frac{100}{1 + 0,014 \sqrt{\frac{700.000}{2000}}} = 79,2 \%$$

$$E_3 = 100 - \frac{65(100 - E_2)}{100} = 86,5 \%$$

De formule van Velz

De hydraulische belasting valt binnen 1,85 - 5,60 m³/m² per dag, zodat voor k = 0,5741 en voor L = 0,90 kan worden aangehouden.

$$\frac{L_D}{L} = 10^{-kD} = 10^{-0,5741 \cdot 2,50} = 0,3671 \text{ (figuur 4, Rechte A).}$$

$$L_D = 0,3671 \cdot L = 0,3671 \cdot 0,90 = 0,033$$

$$E_2 = (0,90 - 0,033) \times 100 = 86,7 \% \text{ (figuur 4, Curve B).}$$

$$E_3 = 100 - \frac{65(100 - E_2)}{100} = 91,4 \%$$

De formule van Rankin voor hoogbelaste filters kan niet toegepast worden.

De formule van Eckenfelder en O'Connor:

$$\frac{D_{0,67}}{Q_o^{0,5}} = 1,8476 \cdot 2,50^{0,5} = 1,17$$

Uit grafiek 12 volgt dat 14,1 % van de toegevoegde B.O.D.₅ belasting zal overblijven.

$$E_2 = 85,9 \%$$

$$E_3 = 90,8 \%$$

Samenvatting:

R = 0	veronderstelling	N.R.C.	Velz	Rankin	Eckenfelder O'Connor
E ₂	92,9	79,2	86,7	—	85,9
E ₃	95,4	86,5	91,4	—	90,8
effluent: mg/l					
B.O.D. ₅	25	73	46	—	50

Voorbeeld 2

20.000 inwoners; afvoer inwoners 2000 m³/dag, geen afvoer van regenwater.

industrie: 10.000 i.e. à 54 g B.O.D.₅/dag; afvoer industrie 2000 m³/dag.

Concentratie afvalwater van de inwoners:
als zodanig: 540 mg B.O.D.₅/l, na bezinking: 350 mg B.O.D.₅/l.

Concentratie afvalwater van de industrie:
als zodanig: 270 mg B.O.D.₅/l, na bezinking: 175 mg B.O.D.₅/l.

Concentratie van het afvalwater na menging:
als zodanig: $\frac{2000(540 + 270)}{4000} = 405 \text{ mg B.O.D.}_5/\text{l}$,

na bezinking: $\frac{2000(350 + 175)}{4000} = 262,5 \text{ mg B.O.D.}_5/\text{l}$.

Totale afvoer 4000 m³/dag, geen afvoer van regenwater.
Gerecirculeerde hoeveelheid bezonken filtereffluent is: Q_R = Q (R = 1,0).

Er wordt uitgegaan van de veronderstelling dat bij een belasting van 30 inwonerekivalenten per m³ vulmateriaal een nuttig effect van het filter en de nabezinktank (= E₂) van 80 % gehaald kan worden; het nuttig effect van de gehele installatie is dan E₃ = 87 %. Voor E₁ = 35 % aangehouden.

Afmetingen van het oxydatiebed bij 30 i.e. per m³:
volume = 1000 m³; h = 2,35 m → oppervlakte = 425 m²; diameter = 23,20 m.

hydraulische belasting = oppervlakte belasting = $\frac{4000 + 4000}{425} = 18,8 \text{ m}^3 \text{ per m}^2 \text{ per dag}$.

organische belasting = B.O.D.₅-belasting is voor het afvalwater na bezinking 1050 kg B.O.D.₅/dag, gerecirculeerd water niet inbegrepen.

De N.R.C.-formule:

$$F_1 = \frac{1 + R_1}{(1 + 0,1R_1)^2} = 1,65$$

$$E_2 = \frac{100}{1 + 0,014 \sqrt{\frac{1050.000}{1000 \cdot 1,65}}} = 73,9 \%$$

$$E_3 = 100 - \frac{65(100 - E_2)}{100} = 83,0 \%$$

De formule van Velz:

De hydraulische belasting bedraagt 18,8 m³/m².dag, zodat voor k = 0,4938 en voor L = 0,784 kan worden aangehouden.

Nuttig effect van het filter en de nabezinktank tengevolge van het passeren van een filter-hoogte van 2,35 m:

$$\frac{L_{D_1}}{L} = 10^{-kD} = 10^{-0,4938 \cdot 2,35} = 0,06911 \text{ (figuur 5, Rechte A).}$$

$$L_{D_1} = 0,06911 \cdot 0,784 = 0,054$$

$$(L - L_{D_1}) \times 100 \% = 73 \% \text{ (figuur 5, Curve B)}$$

Nuttig effect van het filter en de nabezinktank na de tweede keer passeren van de filterhoogte van 2,35 m:

$$L_{D_2} = 0,06911 \cdot 0,054 = 0,004 \text{ (figuur 5, Rechte A)}$$

totale hoeveelheid B.O.D. = 1,000		
totaal te verwijderen fractie = 0,784		
gedeelte dat van L na de eerste passage resteert =	0,730	0,054
	0,730	0,054 0,216
gedeelte dat van L na de tweede passage resteert =	0,780	0,004
	0,780	0,220
$E_2 = 0,78 \times 100 (\%)$		

$$E_2 = 73,0 + 5,0 = 78,0 \%$$

$$E_3 = 85,7 \%$$

Het nuttig effect van het filter met recirculatie $R = 1,0$ en een hoogte van 2,35 m kan ook berekend worden als het nuttig effect van een filter zonder recirculatie en een hoogte van 4,70 m.

$$\frac{L_D}{L} = 10^{-kD} = 10^{-0,4938 \cdot 4,70} = 0,0047 \text{ (figuur 5, Rechte A)}$$

$$L_D = 0,0047 \cdot 0,784 = 0,0036$$

$$E_2 = (0,784 - 0,0036) \times 100 = 78,0 \% \text{ (figuur 5, Curve B)}$$

$$E_3 = 85,7 \%$$

De organische belasting van het filter is: $\frac{1050}{425} = 2,47$ kg B.O.D.₅/m².dag, recirculatie water niet inbegrepen.

Uit figuur 6 kunnen we nu aflezen dat het berekende nuttig effect van filter en de nabezinktank alleen gehaald kan worden als de temperatuur van het afvalwater gelijk is aan of hoger is dan 14° C.

De formule van Rankin:

Uit figuur 7 blijkt:

$$E_2 = \frac{R + 1}{R + 1,5} \times 100 = 80,0 \%$$

$$E_3 = 100 - \frac{65 (100 - E_2)}{100} = 87,0 \%$$

De formule van Eckenfelder en O'Connor:

Het nuttig effect van het filter en de nabezinktank wordt berekend met betrekking tot de B.O.D.₅ van het bezonken rioolwater na verdunning met het gerecirculeerde water.

Hiervoor kan worden aangehouden:

$$l_0 = \frac{l_a + R \cdot l_e}{1 + R}$$

$$\frac{D^{0,67}}{Q_0^{0,5}} = 0,41 \text{ (D = 2,35 m; } Q_0 = 18,8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dag)}$$

Uit figuur 12 blijkt dan:

$$\frac{l_e}{l_0} = 0,322 \rightarrow l_e = 0,322 l_0$$

$$l_0 = \frac{l_a + R \cdot l_e}{1 + R}; R = 1,0, l_e = 0,322 l_0$$

$$l_0 = 156,5 \text{ mg/l}$$

$$l_e = 0,322 l_0 = 50,4 \text{ mg/l}$$

$$\frac{l_e}{l_a} = \frac{50,4}{262,5} = 0,192 \rightarrow E_2 = 80,8 \%$$

$$E_3 = 100 - \frac{65 (100 - E_2)}{100} = 87,5 \%$$

Samenvatting:

R = 1,0	veronderstelling	N.R.C.	Velz	Rankin	Eckenfelder O'Connor
E_2	80,0	73,9	78,0	80,0	80,8
E_3	87,0	83,0	85,7	87,0	87,5
effluent: mg/l	52	69	58	52	51

Bij het laatste voorbeeld kan nog opgemerkt worden dat het nuttig effect van de gerecirculeerde hoeveelheid water niet steeds op dezelfde wijze in rekening is gebracht.

Opvallend is dat de berekeningen voor laagbelaste filters in alle gevallen een B.O.D.₅ van het effluent te zien geven die aanzienlijk hoger is dan de B.O.D.₅ van het effluent volgens de gemaakte veronderstelling. Dit is zeer waarschijnlijk te wijten aan het feit dat bij de vaststelling van de B.O.D.₅ van 25 mg/l van geremde nitrificatie is uitgegaan terwijl in de B.O.D.₅ volgens de verschillende formules een gedeelte van de bepaalde waarde is toe te schrijven aan nitrificatie. Bij hoogbelaste filters treedt dit nitrificatieverschijnsel in veel geringere mate op. Hier komen de berekende B.O.D.₅'s van het effluent goed overeen met de gemaakte veronderstelling.

De uitkomsten bij toepassing van de formules van Velz, Rankin en Eckenfelder en O'Connor vertonen een grote overeenstemming. De N.R.C.-formule geeft in beide voorbeelden lagere resultaten.

Schrijver dezes had graag de behandelde formules aan de praktijk met oxydatiebedden in Nederland getoetst. De gegevens waarover hij kan beschikken zijn voornamelijk afkomstig van steekmonsters. Deze waarden geven echter nog geen volledig inzicht in de werking van een filter in het algemeen en zijn daarom minder geschikt om te worden gebruikt voor de toetsing van de beschreven formules.

Literatuur

1. *Sewage Treatment at Military Installations*, Chapter V: Trickling Filters. *Sewage Works Journal*, September 1946, vol. 18, no. 5, p. 897, e.v.
2. *Sewage Treatment Plant Design; Manual of Practice No. 8*. Federation of Sewage and Industrial Wastes Associations, Washington D.C. 1959.
3. Velz, C. J.: *A basic law for the performance of biological filters*. *Sewage Works Journal*, July 1948, vol. 20, no. 4, p. 607, e.v.
4. Stack, V. T.: *Theoretical performance of the trickling filtration process*. *Sewage and Industrial Wastes*, 1957, vol. 29, no. 9, p. 987, e.v.
5. Mc. Cabe, J. and Eckenfelder W. W.: *Biological treatment of sewage and industrial wastes*, Volume I: Aerobic Oxidation. Reinhold Publishing Corporation, New York, 1956, Chapman and Hall, Lim. London, R. S. Rankin: High-rate filters of biofiltration type and their application to biological treatment of sewage (p. 304).
6. Eckenfelder, W. W. and O'Connor, D. J.: *Biological Waste Treatment*. Pergamon Press, Oxford, London, New York, Paris, 1961.
7. Kefer, C. E. and Meisel, J.: *Remodeled Trickling Filter, Exceed expectations at Baltimore*. *Water and Sewage Works*, July 1952, vol. 99, no. 7, p. 277, e.v.