

Verwijderen van trichlooretheen door beluchting

Inleiding

Op grond van theoretische overwegingen kan worden gesteld dat in principe twee beluchtingssystemen in aanmerking komen voor het verwijderen van vluchtige koolwaterstoffen met een zeer hoog verwijderingspercentage, te weten de plaatbeluchter en de torenbeluchter met een gepakte kolom en tegenstroombeluchting [lit. 1].

Reeds een aantal waterleidingbedrijven heeft onderzoek uitgevoerd met plaatbeluchters [lit. 2, 5].



IR. G. K. REIJNEN
(KIWA NV)



DRS. J. VAN DER LAAN
(Waterleidingbedrijf
Midden-Nederland)



J. A. M. VAN PAASSEN
(KIWA NV)



H. J. M. KORFAGE
(Waterleidingbedrijf
Midden-Nederland)

Daarom is besloten een experiment uit te voeren met een beluchtingstoren met een gepakte kolom en tegenstroombeluchting, om de werking van beide systemen te kunnen vergelijken. Omdat verontreiniging van grondwater met trichlooretheen in Nederland op een aantal locaties voorkomt [lit. 3] en bekend is dat trichlooretheen goed is te verwijderen door middel van beluchting [lit. 1, 2], is besloten eerst de verwijdering van deze component te onderzoeken.

De eerste experimenten met een door het KIWA ontworpen en gebouwde beluchtingstoren zijn uitgevoerd op het pompstation Soestduinen van het Waterleidingbedrijf Midden-Nederland (WMN). Het water van een aantal putten van dit pompstation bevat trichlooretheen. De meest verontreinigde put leverde in de eerste helft van 1982 water met een trichlooretheengehalte van 50-65 µg/l.

Het water van de met trichlooretheen verontreinigde putten wordt momenteel constant opgepompt om te voorkomen dat de niet verontreinigde putten ook verontreinigd water zullen gaan leveren. Door middel van

enkele of dubbele versproeiing met zogenaamde wondersproeiers wordt het trichlooretheen verwijderd met een verwijderingspercentage van 90% per sproeifase. Het versproeide water komt in een waterbekken en infiltreert in de bodem. Energetisch is dit proces echter minder aantrekkelijk omdat de wondersproeiers een weerstand van circa 150-200 kPa hebben (1,5-2 bar), en dit water weer wordt geïnfiltreerd.

Dit is dan ook de reden dat het WMN behoefte heeft aan informatie en ontwerpgegevens voor een beluchtingssysteem dat, tegen zo laag mogelijke kosten, trichlooretheen uit het water kan verwijderen. Bij voorkeur dient het beluchte water een zodanig laag restgehalte aan trichlooretheen te bevatten dat het kan worden gebruikt als grondstof voor de bereiding van drinkwater. Het doel van de eerste serie experimenten was:

- vaststellen of een zodanig laag restgehalte aan trichlooretheen kan worden bereikt, dat het water kan worden gebruikt als grondstof voor de bereiding van drinkwater;
- vaststellen of de theoretische afgeleide formule waarmee dit proces kan worden beschreven [lit. 1] in de praktijk bruikbaar is voor het interpreteren van de resultaten van de experimenten;
- een globale indruk krijgen van het energieverbruik van dit systeem.

Theoretische achtergrond

De theorie van het verwijderen van vluchtige koolwaterstoffen door beluchting is behandeld door Reijnen [lit. 1]. Daarom wordt hier volstaan met een samenvatting van deze theorie.

Theoretisch kan worden afgeleid dat de verwijdering van vluchtige koolwaterstoffen in een beluchtingstoren met tegenstroombeluchting (gepakte kolom) kan worden beschreven met de volgende formule:

$$K = \frac{1 - e^{-K_L a \cdot t \left(1 - \frac{m}{R}\right)}}{1 - \frac{m}{R} e^{-K_L a \cdot t \left(1 - \frac{m}{R}\right)}} \quad (1)$$

K = fractie van de concentratie van de component welke door de beluchting uit het water wordt verwijderd.

K_L = stofoverdrachtscoëfficiënt van de te verwijderen component in de waterfase (m/s).

a = specifiek oppervlak van de pakking (m²/m³).

t = schijnbare verblijftijd van het water in de pakking (s) (bedhoogte (m) gedeeld door oppervlaktebelasting (m/s)).

m = verdelingscoëfficiënt = concentratie van de component in het water gedeeld door de concentratie van de component in de lucht in een situatie van evenwicht.

R = lucht-waterverhouding (Nm³/m³).

e = grondtal natuurlijke logarithme.

De verdelingscoëfficiënt m van de component is bij een bepaalde temperatuur constant en kan worden bepaald.

De schijnbare contacttijd t en de lucht-waterverhouding R zijn procesvariabelen die kunnen worden ingesteld.

De factor $K_L a$ is voor een bepaalde component en een bepaalde pakking van de beluchtingstoren afhankelijk van de oppervlaktebelasting van het water.

De volgende formule geeft de relatie tussen de $K_L a$ -waarde en de oppervlaktebelasting:

$$K_L a = \delta L^n \quad (2)$$

L = oppervlaktebelasting van het water (m³/m² · h). Als L in m/s wordt uitgedrukt wordt formule 2: $K_L a = \delta (3.600 L)^n$.

δ = constante, afhankelijk van de component.

n = constante, afhankelijk van de soort pakking.

De waarden van δ en n voor een te verwijderen component met gebruik van een bepaalde pakking moeten worden verkregen door een beluchtingsexperiment uit te voeren onder verschillende procescondities. Hiertoe wordt de oppervlaktebelasting (L), de lucht-waterverhouding (R) en de hoogte van de pakking (H) gevarieerd.

Bij de verschillende procescondities wordt de fractie van de concentratie van de component welke uit het water wordt verwijderd (K) bepaald en berekent men de $K_L a$ -waarde met formule (1). Vervolgens kan de relatie tussen de oppervlaktebelasting (L) en de $K_L a$ -waarde worden berekend door met behulp van de beschikbare proefresultaten de waarden van δ en n te berekenen met formule (2).

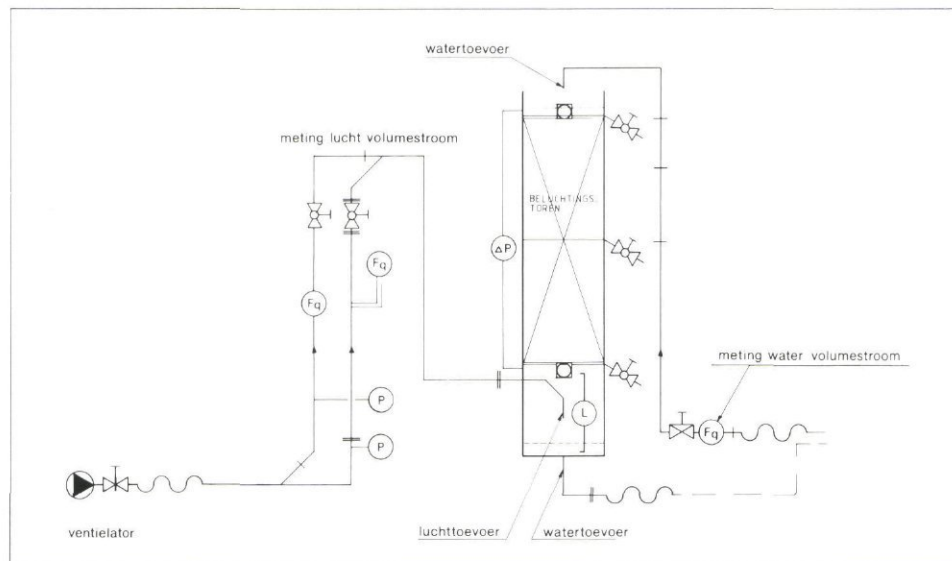
Heeft men de waarden van δ en n bepaald, dan kan de mate van verwijdering van de betreffende component bij alle mogelijke procescondities, ook die welke bij het experiment niet zijn toegepast, worden berekend.

Interpoleren naar tussenliggende procescondities is mogelijk. De door extrapoleren berekende resultaten van de verwijdering van trichlooretheen moeten door middel van een experiment worden geverifieerd indien men zekerheid hierover wenst.

Opzet van het experiment

Apparatuur

Op afb. 1 zijn de beluchtingstoren en de randapparatuur schematisch weergegeven. De diameter van de beluchtingstoren is 0,6 m; de hoogte van de pakking is 5 m. Het water wordt bovenin de beluchtingstoren ingevoerd met een waterverdeler. De pakking wordt gedragen door een steunrooster. Ongeveer op halve hoogte van de pakking is een waterhervredeler aangebracht



Afb. 1 - Stroomschema beluchtingstoren.

om stroming langs de wand van de beluchtingstoren te verminderen. Monsterpunten zijn aangebracht boven de pakking, na 3 meter pakking en onder de pakking. De lucht wordt geleverd door een centrifugaal-ventilator, welke een volumestroom van maximaal 1.100 m³/h (± 300 l/s) levert. De volumestroom van de lucht wordt gemeten met een rotameter voor lage volumestromen en een Annubar (een soort Pitotbuis) voor hoge volumestromen. De volumestroom van het water, welke maximaal 20 m³/h (5,5 l/s) bedraagt, wordt gemeten met een watermeter.

De afb. 2 en 3 geven een indruk van de beluchtingstoren en de randapparatuur.

De pakking

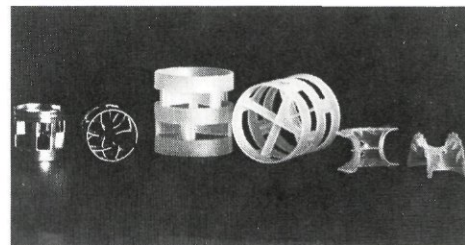
Uit het grote aantal soorten pakking, dat in

verschillende afmetingen en materialen op de markt wordt gebracht, is voor de eerste proef gekozen voor de roestvast stalen pakking Hy-pak nummer 1 (30 mm). Zie afb. 4.

Deze pakking combineert een groot specifiek oppervlak met een lage luchtweerstand. Gekozen is voor staal omdat uit adsorptieproeven is gebleken dat trichlooretheen adsorbeert aan of mogelijk oplost in polypropreen. Bij gebruik van een pakking van polypropreen is het derhalve in principe mogelijk dat de resultaten door adsorptie en desorptie worden beïnvloed.

Naderhand is geëxperimenteerd met twee soorten pakking van polypropreen, te weten de Pall-ring 2" (50 mm) en een zadel genaamd Hy-contact-intalox nummer 1 (25 x 50 mm). Zie afb. 4.

De keuze van de drie soorten pakking houdt



Afb. 4 - De drie onderzochte pakkingen, v.l.n.r. Hy-pak, Pall-ring en Hy-contact-intalox.

in dit stadium van het onderzoek geen aanbeveling van het KIWA in.

Uitvoering van de experimenten

Geëxperimenteerd is met vier oppervlaktebelastingen, te weten 18, 36, 54 en 72 m³/m² · h ($5 \cdot 10^{-3}$, 10^{-2} , $1,5 \cdot 10^{-2}$ en $2,0 \cdot 10^{-2}$ m/s).

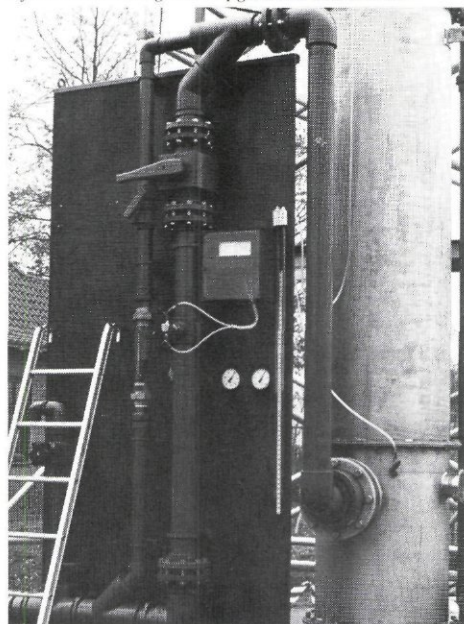
De oppervlaktebelasting van de lucht is gevarieerd tussen 200 en 4.000 N m³/m² · h ($5,5 \cdot 10^{-2}$ en 1,1 m/s).

Het gehalte aan trichlooretheen is bepaald met een gaschromatograaf na extractie met petroleumether. Bij de eerste serie proeven met de stalen pakking Hy-pak is de mate van verwijdering van trichlooretheen bepaald onder circa 100 verschillende procescondities. Bij de daaropvolgende proeven met de beide polypropreen pakkingen is de mate van verwijdering van trichlooretheen bepaald onder circa 70 verschillende procescondities. Om vast te stellen of eventuele adsorptie aan of oplossen in polypropreen pakking het proefresultaat beïnvloedt, is met de Pall-ringen een serie experimenten uitgevoerd waarbij gedurende een uur meerdere monsters na elkaar zijn genomen onder dezelfde procescondities.

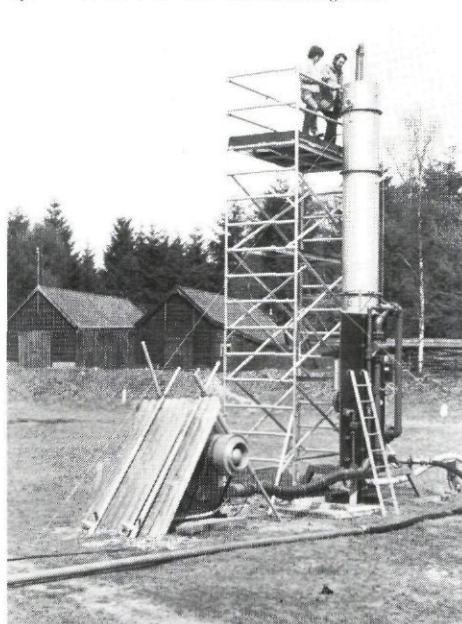
Verwerking van de resultaten

Zoals reeds is aangegeven is de K_L -waarde noodzakelijk voor het berekenen van de verwijdering van een component onder bepaalde procescondities. Tevens is vermeld dat de oppervlaktebelasting invloed heeft op de K_L -waarde, en dat daarom de waarden voor δ en n experimenteel dienen te worden bepaald. Voor alle ingestelde procescondities, en de verwijdering van trichlooretheen die daarmee werd bereikt, is de K_L -waarde berekend met formule (1). Vervolgens zijn de waarden van δ en n berekend. Met behulp van grafieken is getracht het inzicht in de invloed van de verschillende procesvariabelen te vergroten en vast te stellen of de formules (1 en 2) bruikbaar zijn voor het beschrijven van het beluchtingsproces. Dit is gedaan aan de hand van de resultaten van de beluchtingsexperimenten met de stalen pakking Hy-pak. Het resultaat van de experimenten met de polypropreen Pall-ringen en de zadels Hy-contact-intalox is gebruikt om inzicht te krijgen in het verschil in werking van deze pakkingen.

Afb. 2 - Beluchtingstoren opgesteld te Soestduinen.



Afb. 3 - Toevoer en volumestroommeting lucht.



Resultaten

Invloed van oppervlaktebelasting en lucht-waterverhouding op de verwijdering

Afb. 5 geeft een indruk van de invloed van de oppervlaktebelasting en de lucht-waterverhouding op de verwijdering van trichlooretheen. Als voorbeeld is genomen de verwijdering bij een hoogte van de pakking van 3 meter. De getekende curven zijn berekend met een formule voor niet-lineaire regressie.

Bij een lagere oppervlaktebelasting wordt er meer trichlooretheen verwijderd. Verhoging van de lucht-waterverhouding boven de 50 heeft nauwelijks een verbetering van de verwijdering tot gevolg.

Omdat de invoerconcentratie $65 \mu\text{g/l}$ is en de detectiegrens bij $0,1 \mu\text{g/l}$ ligt, bedraagt de maximaal te meten verwijdering van trichlooretheen 99,8%. Deze verwijdering is bereikt bij een oppervlaktebelasting van $18 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ($5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$), een lucht-waterverhouding van 50 en een hoogte van de pakking van 5 meter.

Invloed van de lucht-waterverhouding op de $K_L a$ -waarde

De lucht-waterverhouding heeft, zoals uit de vorige paragraaf is gebleken, tot een bepaalde waarde een belangrijke invloed op de mate van verwijdering. De snelheid waarmee de stofoverdracht van het water naar de lucht plaatsvindt wordt echter bepaald door de $K_L a$ -waarde. Volgens de theorie ligt de snelheidsbepalende stap bij deze stofoverdracht van trichlooretheen in de waterfase [lit. 1]. Als dit zo is, dan mag de snelheid van de lucht in principe geen invloed hebben op de $K_L a$ -waarde. Dit moet dan ook gelden voor de lucht-waterverhouding bij een constante oppervlaktebelasting van het water.

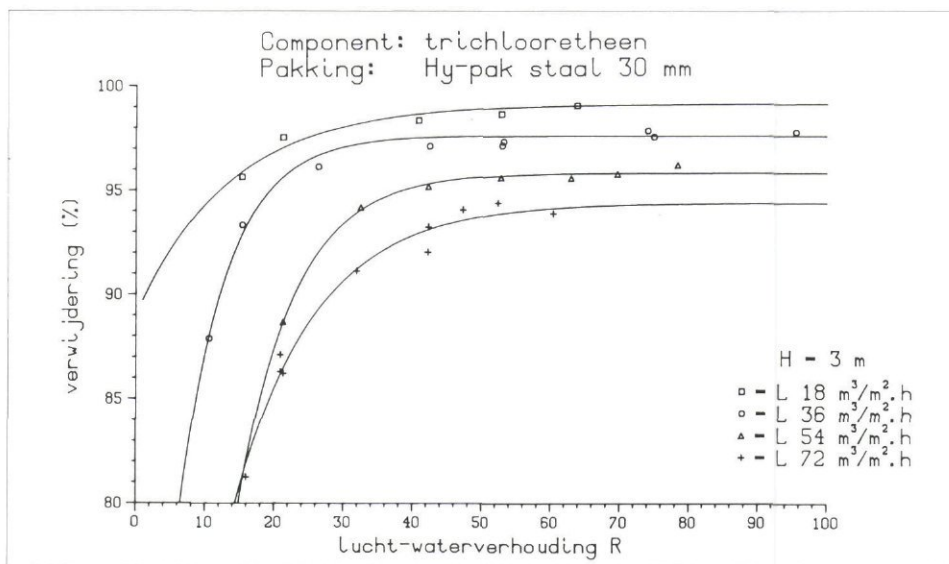
De lucht-waterverhouding blijkt echter toch invloed te hebben op de $K_L a$ -waarde. Ter illustratie is in afb. 6 deze invloed weergegeven voor een oppervlaktebelasting van het water van $36 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (10^{-2} m/s). Boven een lucht-waterverhouding van circa 50 heeft deze geen invloed meer op de $K_L a$ -waarde.

Naar verwachting wordt dit veroorzaakt door verblijftijdspreiding van de lucht in de pakking.

Bij het afleiden van formule (1) is namelijk aangenomen dat de lucht in een propstroom door de pakking gaat.

Boven een bepaalde lucht-waterverhouding, in dit geval dus circa 50, is de overmaat lucht echter zo groot dat de verblijftijdspreiding van de lucht geen invloed meer heeft op het resultaat van de beluchting.

De $K_L a$ -waarde neemt niet meer toe bij een verdere toename van de lucht-waterverhouding.



Afb. 5 - Invloed van lucht-waterverhouding en oppervlaktebelasting op de verwijdering van trichlooretheen bij een hoogte van de pakking van 3 meter.

Invloed van de oppervlaktebelasting op de $K_L a$ -waarde

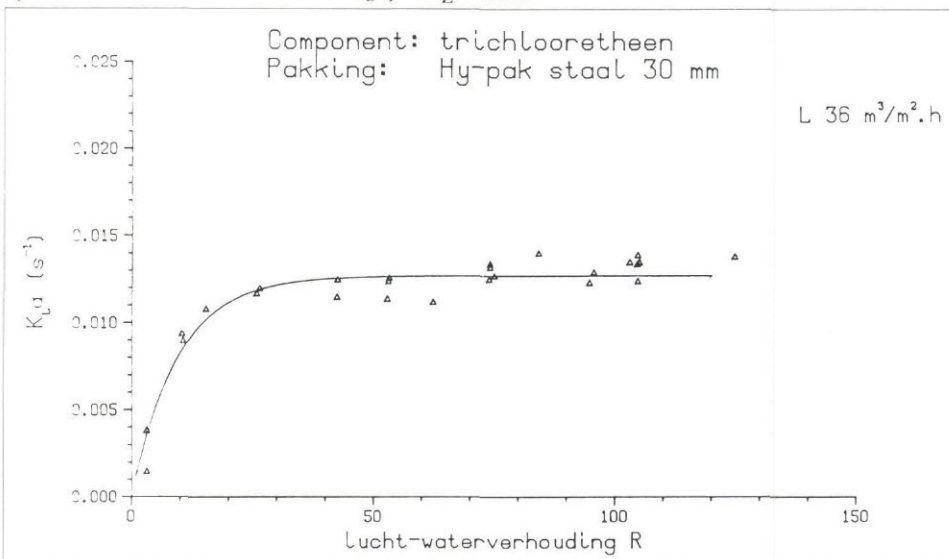
Berekend is dat onder de omstandigheden te Soestduinen de waarde van δ en n voor trichlooretheen 0,0011 respectievelijk 0,666 bedraagt voor de pakking Hy-pak. Deze waarden van δ en n gelden alleen bij een lucht-waterverhouding boven de 50, omdat beneden deze waarde de lucht-waterverhouding invloed heeft op de $K_L a$ -waarde, en dus ook op de waarde van δ en n . De oppervlaktebelasting blijkt een aanzienlijke invloed op de $K_L a$ -waarde te hebben. Een verdubbeling van de oppervlaktebelasting vergroot de $K_L a$ -waarde ongeveer met een factor 1,6. Het is dus gunstig om een zo hoog mogelijke oppervlaktebelasting toe te passen. Bij een zelfde schijnbare verblijftijd van het water in de pakking – dus een zelfde aantal bedvolumes – is het daarom beter met

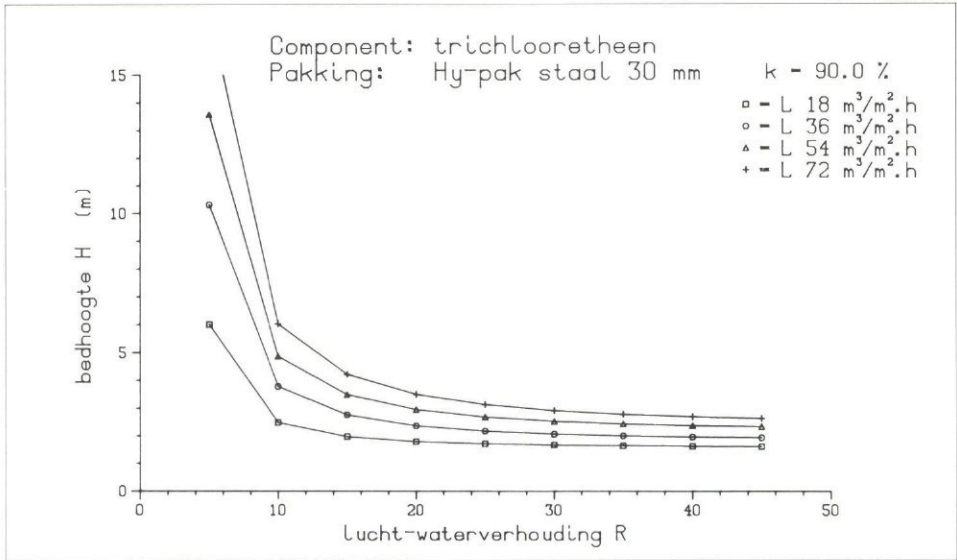
een smalle hoge beluchtingstoren te werken dan met een brede lage. Dit is een belangrijk gegeven voor het optimaliseren van dit beluchtingssysteem!

De optimale hoogte van de pakking

Bij een bepaalde oppervlaktebelasting wordt de schijnbare verblijftijd van het water in de pakking bepaald door de hoogte van de pakking. De benodigde hoogte van de pakking voor het realiseren van een gewenste verwijdering bij een gekozen oppervlaktebelasting kan met formule (1) worden berekend als men de $K_L a$ -waarde bij die oppervlaktebelasting kent of heeft berekend met formule (2). In afb. 7 is de invloed van de lucht-waterverhouding en de oppervlaktebelasting op de benodigde hoogte van de pakking weergegeven. Als voorbeeld is genomen de verwijdering van trichlooretheen

Afb. 6 - Invloed van de lucht-waterverhouding op de $K_L a$ -waarde.





Afb. 7 - Invloed van lucht-waterverhouding en oppervlaktebelasting op de benodigde hoogte van de pakking voor het verwijderen van trichlooretheen met 90%.

met 90% met de pakking Hy-pak. Duidelijk wordt hier geïllustreerd dat een verdubbeling van de oppervlaktebelasting niet betekent dat de benodigde hoogte van de pakking moet worden verdubbeld. De $K_L a$ -waarde is immers hoger. Tevens blijkt nogmaals uit deze afbeelding dat verhoging van de lucht-waterverhouding boven een bepaalde waarde nauwelijks meer invloed heeft op de hoogte van de pakking die nodig is voor een gewenste verwijdering van trichlooretheen.

Vergelijking van de drie pakkingen

De waarde van n uit formule (2) verschilt voor de drie onderzochte pakkingen. Voor de pakkingen Hy-pak 30 mm, Hy-contact-intalox 25 x 30 mm en Pall-ring 50 mm bedraagt de waarde van n respectievelijk 0,666, 0,588 en 0,660. De berekende waarde van δ is nagenoeg gelijk. Theoretisch is dit juist, omdat δ een constante is die afhankelijk is van de te verwijderen component en niet van de pakking. Om te illustreren welke invloed het ogenschijnlijk kleine verschil in de waarde van n heeft op de verwijdering is in de volgende tabel vermeld welke hoogte van de drie pakkingen nodig is om trichlooretheen te verwijderen met 99%.

Duidelijk blijkt dat de keuze van de pakking een belangrijke zaak is. Door een pakking met een hoge n -waarde te kiezen kan bespaard worden op de bouwhoogte, de hoeveelheid pakking en de opvoerhoogte van het water.

Energiekosten

De weerstand die de lucht in de bij dit onderzoek gebruikte pakkingen ondervindt, is betrekkelijk laag. De hoogste weerstand over 5 meter Hy-pak

TABEL I - Berekende hoogte van drie pakkingen, nodig voor het verwijderen van trichlooretheen met 99% bij vier oppervlaktebelastingen en een lucht-waterverhouding 50.

Oppervlaktebelasting		Hoogte van de pakking (m)		
(m³/m² · h)	(m/s)	Hy-pak	Pall-ring	Hy-contact-intalox
18	$5 \cdot 10^{-3}$	3,3	4,0	4,5
36	10^{-2}	3,9	5,0	5,8
54	$1,5 \cdot 10^{-2}$	4,7	5,7	7,0
72	$2 \cdot 10^{-2}$	5,2	6,4	7,8

is gemeten bij een oppervlaktebelasting van $72 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ($2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$) en een lucht-waterverhouding 50. De weerstand bedraagt in dat geval circa 160 mmwK (1.600 Pa).

Bij een oppervlaktebelasting van $18 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ($5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) en een lucht-waterverhouding 50 is de weerstand die de lucht in de pakking ondervindt nauwelijks te meten. De energiekosten worden in dit laatste geval voornamelijk bepaald door de energie benodigd voor het oppompen van het water. Berekend is dat onder deze procescondities, waarbij trichlooretheen verwijderd wordt met meer dan 99,8%, de energiekosten minder dan 1 cent per kubieke meter water kunnen bedragen.

Discussie

In publikaties uit de Verenigde Staten [lit. 4] wordt vermeld dat de verwijdering van gechlorideerde koolwaterstoffen door tegenstroombeluchting in een beluchtingstoren onder dezelfde procescondities per locatie en soms zelfs per bron kan verschillen. Ook is vastgesteld dat bij een plaatbeluchter en een beluchtingstoren met een dwarsstroombeluchting de concentratie van de te verwijderen component invloed heeft op het onder bepaalde procescondities te bereiken verwijderingspercentage (5). Onbekend is of dit ook geldt voor tegenstroombeluchting in

een gepakte kolom. De in deze publikatie gegeven waarden voor δ , n en $K_L a$ gelden dan ook voorlopig uitsluitend voor het experiment te Soestduinen. De gegevens mogen niet zonder meer worden gebruikt voor het berekenen van een beluchtingstoren op een andere locatie. Een experiment met een proefinstallatie ter plaatse is in dit stadium van het onderzoek daarom gewenst, zeker indien hoge eisen worden gesteld aan het restgehalte van de te verwijderen component.

Conclusie

- Tegenstroombeluchting in een gepakte kolom is geschikt voor het realiseren van een zeer laag restgehalte trichlooretheen onder de te Soestduinen optredende condities.
 - Een zeer hoog percentage verwijdering van trichlooretheen, en wel > 99,8%, is in principe met relatief lage energiekosten te realiseren. Berekend is dat de energiekosten minder dan één cent per kubieke meter water kunnen bedragen.
 - Het beluchtingsproces is goed te beschrijven met een theoretisch afgeleide formule, mits enige correcties worden toegepast.
- Door middel van uit het experiment verkregen constanten is het mogelijk het beluchtingsresultaat onder niet bepaalde tussenliggende procescondities te berekenen. Het berekenen van optimale procescondities onder bepaalde randvoorwaarden is daardoor mogelijk.
- De werking van verschillende typen pakking vertoont een aanzienlijk verschil.

Verantwoording

Het experiment is door het KIWA uitgevoerd in het kader van het door de VEWIN opgedragen speurwerk, in samenwerking met het Waterleidingbedrijf Midden-Nederland (WMN). De heer Groenou (KIWA) heeft het experiment statistisch begeleid en de heer Boerhout (KIWA) heeft de gegevens verwerkt met de computer. De auteurs danken deze, evenals alle niet met name genoemde overige medewerkers, voor hun bijdrage aan dit onderzoek.

Literatuur

1. Reijnen, G. K. *De verwijdering van vluchtige koolwaterstoffen door beluchting*. H₂O (14), 1981, nr. 12, p. 258-263.
2. Laan, J. van der. *Onderzoek naar de verwijdering van trichlooretheen uit water door intensieve beluchting en door filtratie over geactiveerde kool*. H₂O (12) 1979, nr. 7, p. 141-146.
3. Trouwborst, T. *Bronnen van verontreiniging van grondwater en hun betekenis*. H₂O (14) 1981, nr. 1, p. 4-10.
4. Hess, A. F., Dijkens, J. E. and Dunn, H. J. (1983). *Aeration treatment technique. Hoofdstuk 5 in: Occurrence and removal of volatile organic chemicals from drinking water*. Denver, AWWA Research Foundation, 67 blz.
5. Kruithof, J. C., Graveland, A., Laan, J. van der and Reijnen, G. K. (1982). *Removal of trichloroethene by combination of intensive aeration and activated carbon filtration*. Session 4.4. In First Atlantic Workshop on 'Organic Chemical Contamination of Ground Water' Nashville, 17 blz.