

Onthardingsverloop in een korrelreactor; kwantificering van de invloed van procesvariabelen

Inleiding

Ontharding van water in een korrelreactor is in al zijn elegantie toch zeer complex. Over de hoogte van de reactor is niet alleen de samenstelling van de waterfase van punt tot punt verschillend, ook de korrels zijn gekenmerkt door een continue variatie in afmetingen en dichtheid, zodat de karakteristieken van het wervelbed (bedporositeit, specifiek dynamisch oppervlak, gemiddelde snelheidsgradiënt) zich eveneens voortdurend wijzigen.



DR. IR. DIRK WILMS
Departement Chemische
Ingenieurstechniek
Katholieke Universiteit
Leuven

Bovendien is er een uitgebreide reeks van ontwerp- en procesvariabelen (diameter en hoogte van de reactor, opwaartse watersnelheid, aard en korrelgrootte van het entmateriaal, diameter van de afgetapte korrels, onthardingsdiepte, ontharden met NaOH of met kalkmelk), die elk op hun manier van invloed zijn op investerings- en werkingskosten en op de kwaliteit van het effluent (calcium-carbonaatafzettend vermogen, carry-over). De wisselwerking tussen een aantal procesvariabelen werd door een aantal auteurs experimenteel onderzocht (J. Dijkhoorn e.a. [1983], A. Graveland [1987], M. Rutte en P. Buijnck [1988], C. van der Veen en A. Graveland [1988]). In deze studie wordt aan de hand van de kinetische vergelijking van de kristallisatie van calciumcarbonaat en van materiaalbalansen een model ontwikkeld waarmee voor gegeven randvoorwaarden het onthardingsverloop in een volledig cilindrische reactor wordt berekend. Met dit model wordt het mogelijk de specifieke invloed van elke procesvariabele te kwantificeren.

Kinetisch model

We beschouwen een cilindrische reactor met doorsnee-oppervlak $A = 1 \text{ m}^2$, werkend met een opwaartse snelheid van $v \text{ m/s}$.

De volgende aannamen worden gemaakt:

- er heerst propstroming – zelfs onderin de reactor, waar de toegevoegde base volledig met het water gemengd wordt verondersteld;
- in de reactor worden geen nieuwe kristalkiemen gevormd, noch door homogene nucleatie, noch door erosie van korrels;
- de entkorrels hebben een uniforme dichtheid en korrelgrootte en worden

bovenaan continu toegevoerd;

d. aftap van korrels gebeurt continu onderaan de reactor;

e. het geffluidiseerde bed is volkomen gestratificeerd;

f. alle korrels zijn zuiver bolvormig.

De karakteristieken van het te ontharden water zijn:

Temperatuur T ($^{\circ}\text{C}$)

Calciumconcentratie Ca_1 (mol/l)

Totaal koolzuur C_T (mol/l)

Alkaliteit m (mol/l)

Ionensterkte van 'conservatieve ionen' (Na^+ , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{--} , ...) μ_f (mol/l)

Dit water dient te worden onthard tot een concentratie Ca_2 (mol/l). Daar het met een reactor met eindige afmetingen niet mogelijk is een volledig kalk-koolzuur-evenwicht te bereiken, tolereert men een kalkafzettend vermogen van het effluent ten bedrage van ΔCa (mol/l).

Uit de karakteristieken van het influent kan worden berekend welke dosis base vereist is om een 'evenwichts'-effluent met een calciumconcentratie van $\text{Ca}_2 - \Delta\text{Ca}$ mol/l te verkrijgen; noemen we c (mol/l) deze dosis.

De korreldiameter van de afgetapte korrels is d_1 (m); die van de entkorrels d_2 (m). Het entmateriaal heeft een dichtheid ρ_c (kg/m^3).

Bij ontharding met NaOH bedraagt de korrelaangroei W ($\text{kg CaCO}_3/\text{s}$):

$$W = A v (\text{Ca}_1 - \text{Ca}_2) M \quad (1)$$

waarin $M = 100 \text{ g/mol}$ het molgewicht van CaCO_3 voorstelt. Bij ontharding met $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is de korrelaangroei:

$$W = A v (\text{Ca}_1 + c - \text{Ca}_2) M \quad (1')$$

Deze aangroei wordt continu verwijderd door het aftappen van N_k korrels/s:

$$W = N_k \frac{\pi}{6} (d_1^3 - d_2^3) \rho_c \quad (2)$$

waarin $\rho_c = 2.840 \text{ kg/m}^3$ de dichtheid van calciumcarbonaat voorstelt.

N_k , wier waarde uitsluitend door de randvoorwaarden wordt bepaald, geeft tevens aan hoeveel korrels per tijdseenheid door elke horizontale doorsnede van de reactor stromen (aannamen b).

Per seconde dienen W_2 kg entkorrels te worden toegevoegd en W_1 kg korrels te worden afgetapt:

$$W_2 = N_k \frac{\pi}{6} d_2^3 \rho_c \quad (3)$$

$$W_1 = W + W_2 \quad (4)$$

Beschouwen we een willekeurig niveau van de korrelreactor H_t (m) boven de bodem, door het opstroomende water bereikt na een tijd t (s).

Op dit niveau is de calciumconcentratie Ca_t (mol/l), de korrelgrootte d_t (m) en de bedporositeit p_t (-).

Een zeer korte tijd Δt (s) later wordt het niveau $H_{t+\Delta t}$ bereikt, waarvoor geldt:

$$\text{Ca}_{t+\Delta t} < \text{Ca}_t, \quad d_{t+\Delta t} < d_t \quad \text{en} \quad p_{t+\Delta t} < p_t$$

De karakteristieken van een hoger niveau kunnen uit deze van een lager niveau worden berekend, als bekend is hoeveel CaCO_3 in de tijdspannen Δt is uitgekristalliseerd. Hiervoor is de kinetika van de calciumcarbonaat-kristallisatie bepalend.

Wiechers, Sturrock en Marais [1975] hebben experimenteel volgende kinetische vergelijking gevonden:

$$-\frac{d(\text{Ca}^{++})}{dt} = k_T S \{(\text{Ca}^{++})(\text{CO}_3^{--}) - K_s\}$$

met:

$$k_T = k_{20} \cdot 1,053^{(T-20)} \quad (5)$$

$$k_{20} = 0,0255 \text{ (lit m s}^{-1} \text{ mol}^{-1}\text{)}$$

S is het beschikbaar calcië kristaloppervlak (m^2/m^3)

(Ca^{++}) , (CO_3^{--}) zijn de actieve concentraties (mol/l) van calcium- en carbonaationen

K_s is het oplosbaarheidsproduct (mol/l^2) (bij temperatuur T) van calcië.

Voor voldoende kleine Δt kan men $-d(\text{Ca}^{++})/dt$ vervangen door $(\text{Ca}_t - \text{Ca}_{t+\Delta t})/\Delta t$.

Aan elke calciumconcentratie van het water tijdens de uitkristallisatie beantwoordt een bepaalde pH, totale ionensterkte μ , C_t en CO_3^{--} -concentratie: deze kunnen uit de karakteristieken van het influent en uit de loogdosering worden berekend door toepassing van de alkaliteitsvergelijking. Met behulp van deze gegevens kan de overeenkomstige oververzadiging worden afgeleid. S stemt overeen met het dynamisch specifiek korreloppervlak. Dit volgt uit de korrelreactor en de bedporositeit:

$$S = \frac{6(1-p)}{d} \quad (6)$$

De porositeit van het geëxpandeerde bed op een gegeven niveau is afhankelijk van de korrelgrootte en -dichtheid op dit niveau, alsmede van de doorstroomsnelheid en de viscositeit van het water [J. C. van Dijk, 1984]:

$$\frac{p^3}{(1-p)^{0,8}} = 130 \frac{v^{0,8} v^{1,2}}{g d^{1,8}} \frac{\rho_w}{\rho_k - \rho_w} \quad (7)$$

v = de kinematische viscositeit (m^2/s)

van water bij temp. T

ρ_w = de dichtheid van water (kg/m^3)

ρ_k = de globale dichtheid van de korrel op het beschouwde niveau (kg/m^3). Deze

volgt uit:

$$\varrho_k = \frac{\{d_2^3 \varrho_c + (d^3 - d_2^3) \varrho_c\}}{d^3} \tag{8}$$

Met behulp van vergelijkingen (5) tot (8) kan dus Ca_{t+Δt} worden afgeleid. De waarde van d_{t+Δt} volgt uit de massabalans:

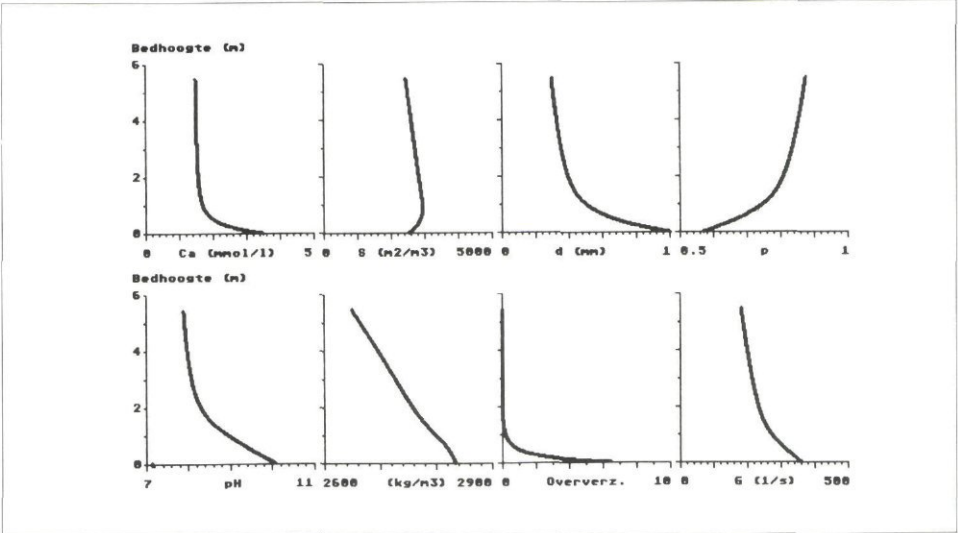
$$A \cdot v \cdot (Ca_t - Ca_{t+\Delta t}) \cdot M = N_k \cdot \frac{\pi}{6} \cdot (d_t^3 + d_{\Delta t}^3) \cdot \varrho_c \tag{9}$$

De verticale verplaatsing van het water in de tijdspanne Δt tenslotte kan berekend worden uit de gemiddelde reële opwaartse snelheid v_r:

$$v_r = \frac{v}{p} \tag{10}$$

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \frac{v}{p_t} \cdot \Delta t \tag{11}$$

Voor de berekening van het onthardingsverloop vertrekt men van de bodem van de reactor (influent + dosis loog, korreldiameter d₁), en rekent men met kleine incrementen Δt (bijv. 0,05 s) naar boven, tot de gewenste eindconcentratie Ca₂ (en dus ook de korreldiameter d₂) bereikt is. Daarmede is dan ook de hoogte H_e van het geëxpandeerde bed bepaald. Met dit model (waarvoor een computerprogramma werd ontwikkeld) is het mogelijk, voor een gegeven watersamenstelling, de invloed van procesvariabelen (opwaartse watersnelheid, aard en korrelgrootte van het entmateriaal, korrelgrootte van de afgetapte korrels, onthardingsdiepte, getolereerde oververzadiging van het effluent, temperatuur) te evalueren uit het oogpunt van benodigd reactorvolume,



Afb. 1 - Onthardingsverloop onder de referentie-randvoorwaarden.

economie van de toe te voeren base en entmateriaal, maximale waarde van de oververzadiging en van de snelheidsgradiënt, enz.

Als samenstelling van een te ontharden water worden, voor de latere voorbeelden, volgende karakteristieken genomen:

- calcium Ca₁ 3,50 mmol/l
- totaal koolzuur C_T 5,00 mmol/l
- m-alkaliteit m 4,25 mmol/l
- 'vaste' ionensterkte μ_f 3,00 mmol/l

Dit water heeft bij 10 °C een pH = 7,15, een totale ionensterkte van 12,1 mmol/l en een calciumcarbonaat afzettend vermogen van 0,010 mmol/l.

Bij de bespreking van de invloed van procesvariabelen zullen we de karakteristieken van de onthardingsreactor vergelijken met deze werkend onder volgende referentierandvoorwaarden:

- temperatuur: T 10,0 °C
- effluent calcium Ca₂ 1,50 mmol/l
- kalkafzettend vermogen ΔCa 0,060 mmol/l
- opwaartse watersnelheid v 80 m/h
- entmateriaal: zand ρ_c 2.650 kg/m³
- korrelgrootte entzand d₂ 0,30 mm
- korrelgrootte aftap d₁ 1,00 mm

Het verloop van een aantal karakteristieken in de onthardingsreactor werkend onder deze referentievoorwaarden is weergegeven in afb. 1. De vereiste calciumconcentratie van 1,50 mmol wordt bereikt op een hoogte van 5,43 m boven de bodem. De belangrijkste calciumverwijdering gebeurt in de onderste meter van het bed, gezien daar ook de oververzadiging het grootst is; deze laatste wordt snel zeer klein, zodat nog slechts weinig CaCO₃ uitkristalliseert in hogere

TABEL I - Karakteristieken van de onthardingsreactor werkend onder de referentie-randvoorwaarden (Ref), of onder deze voorwaarden, behoudens één parameter. Wanneer geen getalwaarde is ingevuld, geldt de overeenkomstige waarde in de kolom Ref.

Ontharden met NaOH										Met kalkwater	Met kalkmelk		
		T °C	T °C	v m/h	d ₁ mm	d ₂ mm	ρ _c kg/m ³	ΔCa mM	Ca ₂ mM				
		5	20	120	0,75	0,20	4.100	0,10	1,00		2 μm	5 μm	5 μm
Ref		10	10	80	1,00	0,30	2.650	0,06	1,50	0,15%	1,0%	0,5%	2,0%
Theoretische dosis loog	(mmol/l)	2,59	2,60	2,57					3,18	2,76	2,76	2,76	2,76
Theoretische eind-pH		7,66	7,74	7,51					7,90	8,71	8,71	8,71	8,71
Toegepaste dosis loog	(mmol/l)	2,66	2,68	2,64				2,71	3,25	2,82	2,82	2,82	2,82
Theoretische eind-pH bij die dosis		7,69	7,77	7,54				7,70	7,93	9,03	9,03	9,03	9,03
Effluent-pH		7,90	8,00	7,72				8,14	8,36	9,89	9,89	9,89	9,89
Korrelflux N _k	aantal/s.m ²	3.072			4.608	7.569	3.013		3.840	7.401	7.401	7.401	7.401
Hoogte geëxpandeerd bed H _e	(m)	5,43	6,73	3,86	10,9	5,39	5,58	4,55	2,78	1,89	1,89	1,89	1,89
Hoogte vast bed H _v	(m)	1,76	2,03	1,41	2,45	1,46	1,51	1,85	1,02	0,70	1,04	1,48	1,74
Bedexpansiebed H _e /H _v		3,09	3,32	2,74	4,46	3,69	3,70	2,46	2,72	2,68	2,31	2,18	2,07
Korrelmassa in bed	(kg/m ²)	2.909	3.358	2.328	4.061	2.382	2.535	3.770	1.701	1.174	1.748	2.493	2.929
Drukval over bed	(m H ₂ O)	1,85	2,14	1,48	2,53	1,51	1,63	2,66	1,09	0,75	1,12	1,60	1,89
Korrelverblijftijd	(d)	123	139	102	116	58	186	131	54	15	16	19	19
Hydraulische verblijftijd	(s)	197	248	135	284	203	211	155	97	66	80	105	115
Toe te voeren entmateriaal	(g/h.m ²)	414			623	1.022	119	641	518	997	997	997	997
Af te voeren korrels	(kg/h.m ²)	16,4			24,6	17,0	16,1	16,6	20,5	39,5	39,5	39,5	39,5
Maximale oververzadiging	(mmol)/l ²	6,55	6,62	6,36				6,71	8,50	27,8	5,15	4,77	2,65
Maximale snelheidsgradiënt	(s ⁻¹)	361	328	429	404	327	366			361	361	361	361

zones van het bed: daar is er dan ook een trage toename van de korrelgrootte. Het specifiek korreloppervlak vertoont een maximum (onderaan overweegt de afname van de korreldiameter, bovenaan de toename van de bedporositeit).

De specifieke invloed op het onthardingsverloop van één randvoorwaarde kan nu worden onderzocht door die parameter te laten variëren, terwijl de waarden van alle overige randvoorwaarden gelijk gehouden worden aan de referentierandvoorwaarden. Een aantal voorbeelden hiervan zijn weergegeven in tabel I.

Invloed van de temperatuur

De temperatuur heeft een uitgesproken invloed op de snelheid van de uitkristallisatie evenals op de viscositeit van het water:

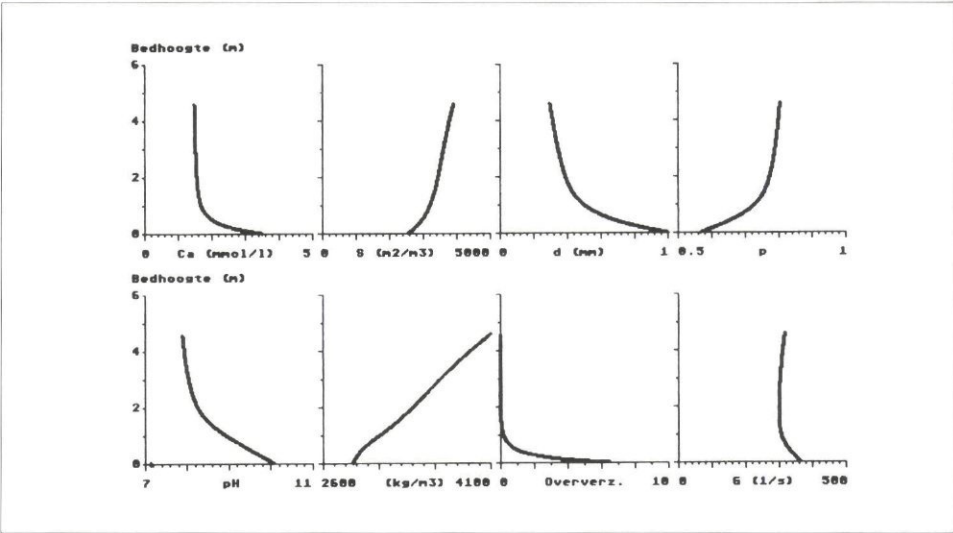
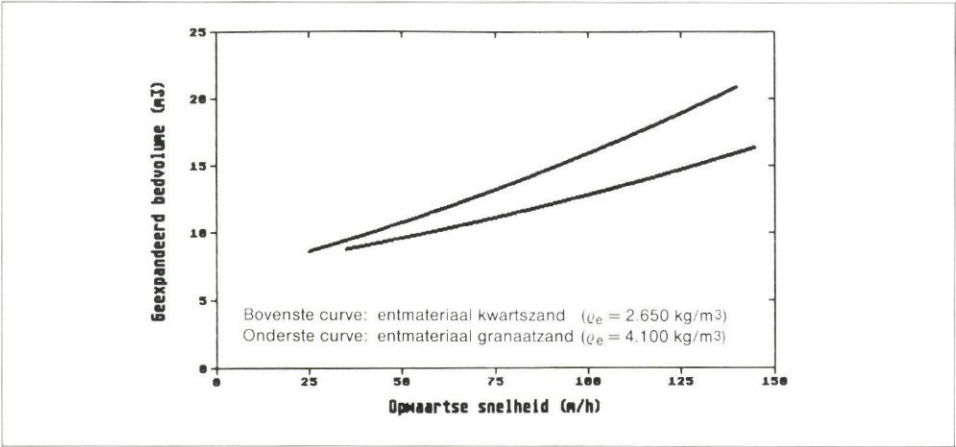
Temperatuur (°C)	$1,035^{(T-20)}$	v
5	0,461 (77%)	1,52 (116%)
10	0,597 (100%)	1,31 (100%)
20	1,053 (176%)	1,01 (77%)

Beide effecten versterken elkaar: een snellere kristallisatie bij hogere temperatuur voltrekt zich in een midden met hoger specifiek kristaloppervlak (wegens de lagere viscositeit is de bedexpansie geringer). Ten opzichte van een ontharding bij 10 °C is bij 20 °C (overigens referentierandvoorwaarden):

- de geëxpandeerde bedhoogte 71%
- de toe te passen dosis NaOH 99%
- de maximale oververzadiging 97%
- de maximale snelheidsgradiënt 119%

In de onthardingsinstallaties van Weesperkarspel en Leiduin wordt met deze temperatuurinvloed rekening gehouden: de diameter van de afgetapte korrels wordt in de winter ingesteld op 0,85 mm, in de zomer op 1,1 mm [A. Kostense, 1988].

Afb. 2 - Vereist bedvolume voor een capaciteit van 200 m³/h als functie van de opwaartse snelheid (overigens referentie-randvoorwaarden).



Afb. 3 - Onthardingsverloop bij enten met granaatzand van 0,30 mm (overigens referentie-randvoorwaarden).

Invloed op de opwaartse watersnelheid

Een lage doorstroomsnelheid verzekert een hoge waarde van het dynamisch specifiek korreloppervlak, maar betekent tevens een lagere capaciteit van een reactor met gegeven doorsnee-oppervlak. Daar de geëxpandeerde bedhoogte, nodig om de gewenste eindhardheid te bereiken, meer dan evenredig toeneemt met de doorstroomsnelheid, zal, om een opgegeven debiet te kunnen verwerken, het benodigde reactorvolume kleiner zijn naarmate de doorstroomsnelheid lager gekozen wordt. Voor de referentie-randvoorwaarden is dit weergegeven in afb. 2. Het aanwenden van granaatzand als entmateriaal (onderste curve) blijkt een belangrijk kleiner reactorvolume te vereisen, vooral bij de grotere doorstroomsnelheden.

Bij de keuze van diameter en hoogte van de onthardingsreactor dient men evenwel niet alleen oog te hebben voor het overeenkomstig reactorvolume, maar

evenzeer voor factoren als de gelijkmatige menging van de loogoplossing over de gehele dwarsdoorsnede, de hydraulische stabiliteit van het wervelbed, de gemiddelde snelheidsgradiënt nabij de bodem, de pompkosten enz.

Bedbeheer

Aan een grotere diameter van de afgetapte korrels beantwoordt een licht grotere bedhoogte; ook de diameter van het entmateriaal heeft hierop een geringe invloed, maar veel belangrijker is diens dichtheid: een hoge ρ_e verlaagt de porositeit van het bed en zorgt bijgevolg voor een groter specifiek korreloppervlak, vooral in het bovengedeelte van het bed (afb. 3).

Men zal bij de keuze van ρ_e , d_1 en d_2 veeleer rekening houden met de kosten van het toe te voeren entmateriaal. De hoeveelheid hiervan is, blijkens (3), evenredig met d_2^3 , met ρ_e en met N_k , dat zelf des te groter is naarmate het verschil tussen d_1 en d_2 kleiner gekozen wordt. Eén en ander kan voor de gegeven randvoorwaarden verder worden geoptimaliseerd.

Invloed van een overmaat NaOH

Doseert men enkel de 'theoretische' hoeveelheid NaOH, nodig om de gewenste eindconcentratie Ca_2 te verkrijgen, dan is een oneindig hoog wervelbed nodig omdat de drijvende kracht voor kristallisatie, namelijk de dan nog heersende oververzadiging, naar nul tendeert wanneer het evenwicht wordt benaderd. Neemt men evenwel vrede met een bepaald calciumcarbonaat afzettend vermogen ΔCa van het effluent van de korrelreactor, dan kan de vereiste bedhoogte aanzienlijk worden gereduceerd

(afb. 4). Dit gebeurt wel ten koste van een meerverbruik aan NaOH, hoewel een deel van de oververzadiging zal uitkristalliseren in het nageschakelde filter.

Aan de hand van het verloop van de curve van afb. 4 kunnen de investeringskosten van de onthardingsreactor (die afhankelijk zijn van de reactorhoogte) mede afgewogen worden tegenover de werkingskosten (het loogverbruik). Vergelijkt men bijvoorbeeld ontharden tot een ΔCa van respectievelijk 0,06 en 0,10 mmol/l, dan staat tegenover een 2% hoger NaOH-verbruik een 50% lagere reactorhoogte.

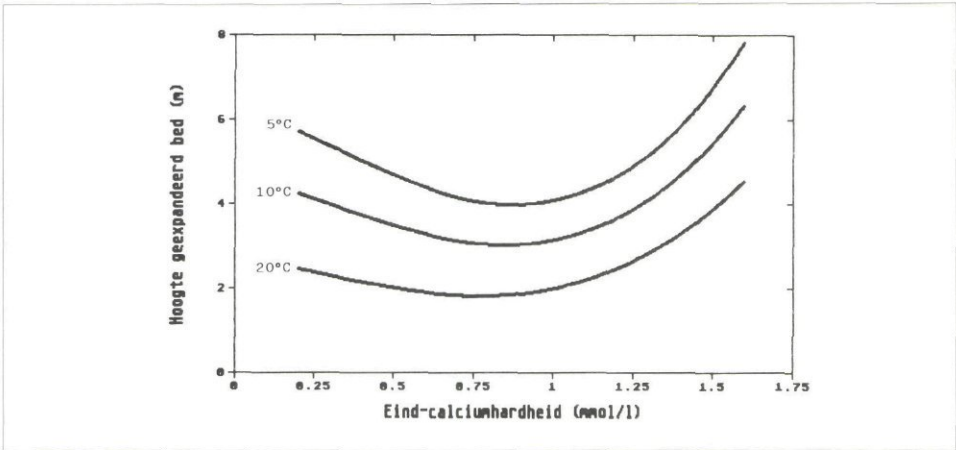
Invloed van de onthardingsdiepte

Hoe groter de diepte van ontharding, des te groter de initiële oververzadiging, zodat de vereiste geëxpandeerde bedhoogte afneemt (afb. 5). Wordt evenwel zeer diep onthard, dan blijkt de bedhoogte weer toe te nemen. Bij de gegeven randvoorwaarden is er dus een bepaalde onthardingsdiepte waarvoor de vereiste bedhoogte, bij gegeven ΔCa , minimaal is, of waarvoor, bij gegeven bedhoogte, ΔCa minimaal is. Bij hogere temperatuur ligt het optimum bij een lagere eindhardheid; het optimum is dan ook vlakker. Deze verschijnselen werden reeds door A. Graveland [1987] experimenteel waargenomen.

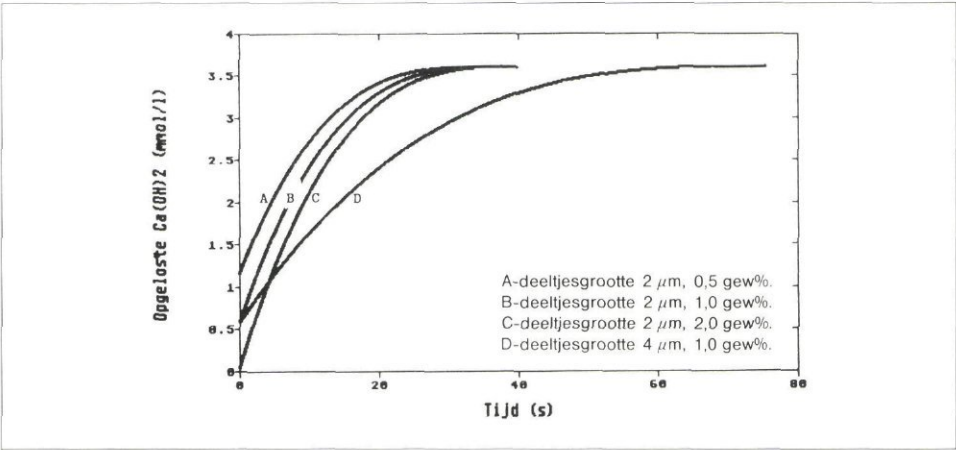
Wanneer de effluent-calciumconcentratie bij optimale onthardingsdiepte kleiner is dan de gevraagde Ca_2 , kan men split-treatment overwegen.

Ontharden met kalkmelk

Wordt in de plaats van een NaOH-oplossing kalkwater gedoseerd, dan kan door een analoge berekening het verloop van de ontharding in een korrelreactor worden nagegaan. Hierbij is de oververzadiging onderaan aanzienlijk hoger



Afb. 5 - Invloed van de onthardingsdiepte op de vereiste bedhoogte (diverse Ca_2 , temperatuur 5, 10 en 20°C, overigens referentie-randvoorwaarden).

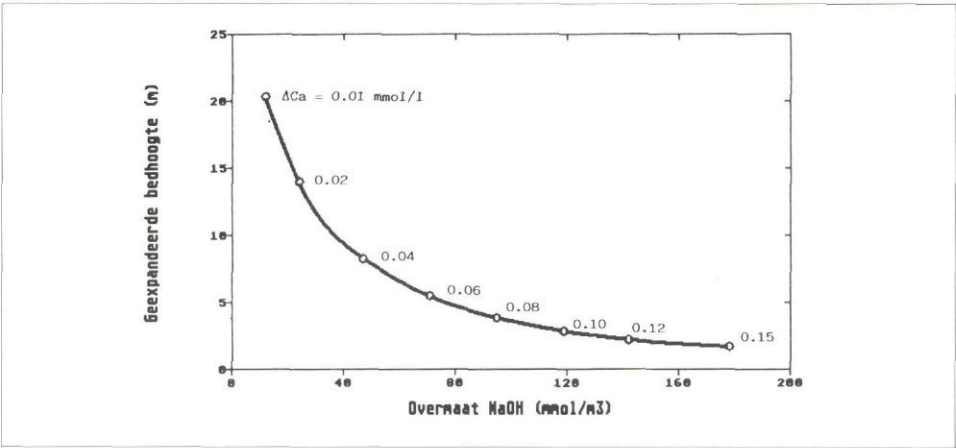


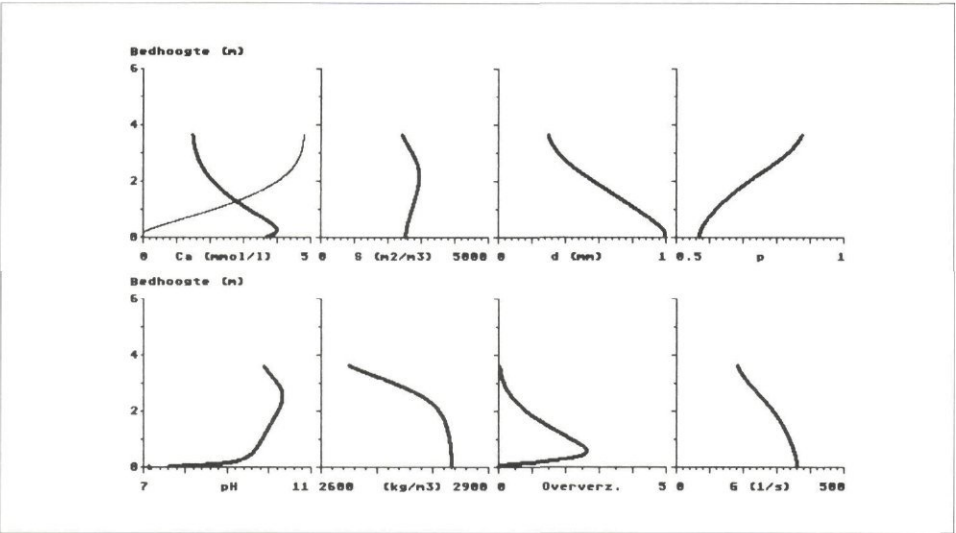
Afb. 6 - Snelheid van het oplossen van kalkdeeltjes als functie van de deeltjesgrootte en de kalkmelkconcentratie.

dan bij doseren van natriumhydroxyde. In de praktijk verkiest men te werken met kalkmelk, omdat kalkwater slechts ca. 22 mmol/l calciumhydroxyde bevat en bijgevolg het volumetrisch debiet aan kalkwater 10% of meer van de volumestroom te ontharden water zou bedragen. Wordt met kalkmelk onthard, dan heeft de snelheid van oplossen een grote

invloed op het onthardingsverloop. De oplossnelheid is evenredig met het oppervlak van de kalkdeeltjes en met de onderverzadiging van de vloeistof tegenover $Ca(OH)_2$. Deze laatste factor $\{K_{Ca(OH)_2} - (Ca^{++})(OH^-)^2\}$ verandert nauwelijks daar tijdens de ontharding de door oplossen van kalkdeeltjes toegevoerde calciumionen snel worden weggenomen door uitkristallisatie van calciumcarbonaat; uit berekeningen blijkt dat de maximale waarde van $(Ca^{++})(OH^-)^2$ in de loop van de ontharding nog steeds kleiner is dan $10^{-5} \cdot K_{Ca(OH)_2}$. Dat de oplossnelheid evenredig is met het oppervlak der kalkdeeltjes betekent dat hun diameter lineair in de tijd afneemt. Uit gegevens van D. Stetter e.a. [1987] en uit eigen metingen blijkt deze afname ca. 0,05 μm/s te bedragen. Het verloop van het $Ca(OH)_2$ -aanbod in de tijd zal dus functie zijn van de gemiddelde deeltjesgrootte van de suspensie en van de concentratie van die suspensie (de vloeistoffase immers is verzadigd aan calciumhydroxyde). Afb. 6 schetst het berekend verloop voor een gemiddelde deeltjes-

Afb. 4 - Vereiste bedhoogte en overmaat NaOH als functie van het calciumcarbonaat afzettend vermogen van het effluent (diverse ΔCa , overigens referentie-randvoorwaarden).





Afb. 7 - Onthardingsverloop bij ontharden met kalkmelk (2,0 gew. %, deeltjesgrootte 5 µm) – overigens referentie-randvoorwaarden.

grootte van 2 respectievelijk 4 µm, en voor een kalkgehalte van de suspensie van 0,5, 1 en 20 gew.%, wanneer 3,6 mmol/l calciumhydroxyde wordt gedoseerd.

In afb. 7 is het onthardingsverloop weer-gegeven bij deelontharding met kalkmelk (2,0 gew.%, gemiddelde deeltjesgrootte 5 µm. De maximale oververzadiging is hier minder dan de helft van die bij ontharding met NaOH.

Microkristalvorming

De uitkristallisatie van calciumcarbonaat verloopt des te sneller naarmate de oververzadiging groter is (bijvoorbeeld diep ontharden – ontharden met kalk-water). Met toenemende oververzadiging verhoogt evenwel de kans op homogene nucleatie. Voor een gegeven over-verzadiging kan men verwachten dat het aandeel calciumcarbonaatvorming door homogene nucleatie kleiner wordt naarmate een groter calcietskristal-opppervlak voorhanden is. Bij ontharding met NaOH wordt de gehele dosis ineens onderaan aan het water toegevoegd: daar heeft men dus de grootste oververzadiging en is het beschikbaar kristaloppervlak niet

maximaal (onderaan zijn de korrels het grootst). Bij ontharding met kalkmelk wordt, afhankelijk van diens concentratie, onderaan slechts een klein (namelijk het opgeloste) deel van de dosis in het water opgenomen, en gebeurt de verdere opname gespreid in de tijd (afhankelijk van de grootte van de kalkdeeltjes). Door een oordeelkundige keuze van de aard en concentratie van de kalkmelk kan men bijgevolg, zelfs bij diepe ontharding, de maximale oververzadiging beperkt houden en eventueel laten optreden daar waar een groter dynamisch korrel-opppervlak voorhanden is. In tegenstelling met de ontharding met natriumhydroxyde, introduceert men bij het doseren van kalkmelk (met ca. 4% verontreinigingen) een hoeveelheid zwevende stoffen die als kiemen kunnen fungeren voor de uitkristallisatie van calciumcarbonaat: de kans op dit ongewenst verschijnsel (carry-over) is des te kleiner naarmate de oververzadiging geringer en het beschikbaar calcietskristal-opppervlak groter is.

Besluit

Bij het ontwerpen of het bedrijven van een onthardingsreactor dient rekening te

worden gehouden met een relatief groot aantal procesvariabelen die elk in meer-dere of mindere mate invloed hebben op de investeringskosten (diameter en hoogte van de reactor), op de werkingskosten (dosis NaOH en verbruik van ent-materiaal) en op de belasting van het nageschakelde filter (carry-over door nucleatie bij te grote oververzadiging en door erosie bij te grote G-waarden).

Onderstaand schema geeft een overzicht op de voornaamste invloeden van diverse procesvariabelen: Met behulp van het hier ontwikkelde model is het mogelijk, voor een gegeven te ontharden water, de invloed van diverse procesvariabelen te kwantificeren waardoor de uiteindelijke optimalisatie van de onthardingsstap wordt ver-gemakkelijkt.

Verantwoording

Het model kwam tot stand, mede dankzij kritische opmerkingen en suggesties van ir. J. C. van Dijk (DHV-Raadgevend Ingenieursbureau BV, Amersfoort).

Literatuur

Dijkhoorn, J. C., Kramer, B., Dijk, J. C. van en Moel, P. J. de (1983). *Onderzoek naar pellet-ontharding op pompstation Castricum*. H₂O (16) 1983, nr. 14, p. 324-327.
Graveland, A. (1987). *Amsterdam: van hard naar zacht water*. H₂O (20) 1987, nr. 13, p. 290-294.
Kostense, A. (1988). *Ontharden in korrelreactoren*. KIWA Mededeling nr. 102.
Rutte, M. en Buijnc, P. L. (1988). *Een heldere kijk op troebel water*. H₂O (21) 1988, nr. 14, p. 390-395.
Stetter, D. e.a. (1987). *Sedimentationsstabile Kalkmilch – ein neuer Weg zur Trinkwasser-Entsäuerung*. Brunnenbau, Bau von Wasserwerken, Rohrleitungsbau, 38 nr. 11, 409-414.
Veen, C. van der and Graveland, A. (1988). *Central Softening by crystallization in a fluidized-bed process*. Journal AWWA, 80 nr. 60, 51-58.
Dijk, J. C. van (1985). *Hydraulica van onthardings-reactoren*. PATO-Intersectie Gezondheidstechniek-VGII.
Wiechers, H. N., Sturrock, P. and Marais, G. v. R. (1975). *Calciumcarbonate crystallization Kinetics*. Water Research, 9, 835-845.



SCHEMA.

Bij toename van:	Invloed op:					Maximale oververzadiging
	H _c	Dosis NaOH	Dosis entkorrels	S	G	
Temperatuur	<<	<	-	>	>>	<
Opwaartse snelheid	>>	-	-	<<	>>	-
Aftapdiameter	<>	-	<<	<<	>>	-
Entdiameter	<<>	-	>>	<	-	-
Dichtheid ent	<	-	>>	>	<>	-
Oververzadiging	<<	>	-	-	-	>
Diepte ontharding	<>	>>	>>	-	-	>>

< afname > toename