



BTO 2004.065
December 2004

Ionenwisseling als alternatief voor korrelreactoren en nanofiltratie

Afweging van ionenwisseling ten opzichte van
pelletontharding en nanofiltratie



BTO 2004.065
December 2004

Ionenwisseling als alternatief voor korrelreactoren en nanofiltratie

Afweging van ionenwisseling ten opzichte van
pelletontharding en nanofiltratie

© 2004 Kiwa N.V.
Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag
worden verveelvoudigd,
opgeslagen in een
geautomatiseerd
gegevensbestand, of
openbaar gemaakt, in enige
vorm of op enige wijze,
hetzij elektronisch,
mechanisch, door
fotokopieën, opnamen, of
enig andere manier, zonder
voorafgaande schriftelijke
toestemming van de
uitgever.

Opdrachtgever

College van Opdrachtgevers BTO

Projectnummer

111527.080

ISBN

Kiwa N.V.

Water Research
Groningenhaven 7
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein

Telefoon 030 60 69 511
Fax 030 60 61 165
Internet www.kiwa.nl

Colofon

Titel

Ionenwisseling als alternatief voor korrelreactoren

Projectnummer

11.1527.080

Projectmanager

Gerard van Houwelingen (DHV)

Erwin Beerendonk (Kiwa)

Kwaliteitsborgers

Joost Kappelhof, Bas Heijman (Kiwa)

Auteurs

Jan Post (DHV)

Wolter Siegers (Kiwa)

Bijdragen

André Hoeijmakers (DHV)

Arie van Lit (DHV)

Ron Jong (Vitens)

Gert Reijnen (WML)

Michel Riemersma (DHV)

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar

Samenvatting

Achtergrond

Voor ontharding van drinkwater in Nederland wordt veelal gebruik gemaakt van korrelreactoren. De keuze voor pelletontharding wordt o.a. ingegeven doordat bij grootschalige toepassingen pelletontharding financieel aantrekkelijker is. De komende jaren moet in Nederland op een aantal lokaties nog ontharding van drinkwater worden gerealiseerd. Het gaat daarbij vooral om kleinschalige toepassingen (kleiner dan 3 miljoen m³/j). In dergelijke situaties kan ionenwisseling (kationwisseling) interessanter zijn dan pelletontharding. Met deze achtergrond is in deze studie het economische omslagpunt bepaald van de alternatieve systemen die voor ontharding kunnen worden aangewend, namelijk pelletontharding, ionenwisseling en nanofiltratie. Daarnaast zijn de systemen vergeleken op kwaliteit, bedrijfsvoering en duurzaamheid.

Kosten

Indien de verwerking van reststoffen (concentraat en regeneraat) buiten beschouwing wordt gelaten, dan hebben de drie beschouwde technologieën ieder een duidelijk afgebakend toepassingsgebied:

- ❑ Voor zeer kleine capaciteiten (< 0,5 Mm³/j) in combinatie met relatief hard water (TH > 3 mmol/l) is nanofiltratie de aantrekkelijkste techniek.
- ❑ Voor relatief grote capaciteiten (> 1,5 Mm³/j) in combinatie met hard water (TH > 4 mmol/l) is pelletontharding de aantrekkelijkste optie.
- ❑ Voor water met relatief lage hardheid is kationwisseling een aantrekkelijk alternatief.

Uiteraard dient de verwerking van met name concentraat en regeneraat wel meegenomen te worden in de economische afweging. Vanwege het belang van deze problematiek is hiervoor een aparte (vervolg)deelstudie uitgevoerd¹. Het kostprijsniveau van regeneraat- en concentraatverwerking ligt maximaal in de range 5-10 €/m³. Wordt dit kostprijsniveau gehanteerd, dan blijkt er nog steeds een duidelijk toepassingspotentieel voor ionenwisseling te bestaan. Bij zeer kleine capaciteiten is ionenwisseling een aantrekkelijk alternatief voor pelletontharding, ongeacht de hardheid. Bij de grotere capaciteiten (3-4 Mm³/j) geldt dit alleen als de hardheid relatief laag is (TH < 2,5 mmol/l).

Lokale omstandigheden kunnen aanleiding zijn tot een andere economische afweging. Indien voor inpassing van pelletontharding ook nieuwbouw van carry-over-filters noodzakelijk is, valt de economische afweging gunstig uit in de richting van kationwisseling. Ook in situaties van onzekere afzet (of hoge piekfactoren), dreigende sluiting etc. is ionenwisseling relatief aantrekkelijk,

¹ Siegers, 2004

omdat deze techniek kapitaalextensief is ten opzichte van pelletontharding en nanofiltratie.

Kwaliteit

De economische afweging kan niet los worden gezien van de kwaliteitsaspecten. De kwaliteit is vaak richtinggevend en randvoorwaarde-scheppend. Een voorbeeld hiervan is de gewenste verlaging van bicarbonaat. De toepassingsmogelijkheden van kationwisseling zijn in de praktijk beperkt, omdat bij sterkzure kationwisseling in Na-vorm geen bicarbonaat verwijderd wordt of omdat bij zwakzure kationwisseling te veel bicarbonaat verwijderd wordt. In feite bestaat er geen passend alternatief voor pelletontharding met natronloog, tenzij relatief dure combinaties worden toegepast (parallel sterkzuur-zwakzuur, of sterkzuur-zuurdosering). Ook de toevoeging van natrium (pelletontharding met natronloog, sterkzure kationwisseling in Na-vorm) en verwijdering van magnesium (ionenwisseling, nanofiltratie) kunnen een beperking vormen voor de toepassingsmogelijkheden van de verschillende systemen.

Een kwaliteitsvoordeel van ionenwisseling en nanofiltratie ten opzichte van pelletontharding is dat niet op basis van oververzadiging wordt onthard. Hierdoor zal er geen probleem ontstaan van precipitatie in het leidingnet door microkristallen en/of na-ontharding.

Bedrijfsvoering

Voor wat betreft bedrijfsvoering - in termen van personele inzet, storingsgevoeligheid en flexibiliteit - komt in een eerste kwalitatieve analyse ionenwisseling gunstig uit ten opzichte van pelletontharding, en in mindere mate ook ten opzichte van nanofiltratie. Op dit punt zou een nadere inventarisatie van praktijkervaringen met industriële toepassingen van ionenwisseling uitgevoerd moeten worden om dit verder te onderbouwen.

Duurzaamheid

Op duurzaamheidsaspecten - zoals water- en energieverbruik, chemicaliën, reststoffen en transportbewegingen - geeft de vergelijking een negatiever beeld van kationwisseling. Deze techniek combineert van de andere systemen de slechte punten: een hoog chemicaliënverbruik (zoals bij pelletontharding) en een zoute reststroom (zoals bij nanofiltratie).

Inhoud

	Samenvatting	1
	Inhoud	3
1	Inleiding	5
2	Methode en uitgangspunten	7
2.1	Vergelijking op procesniveau	7
2.2	Vergelijking bij verschillende watersamenstellingen	8
2.3	Vergelijking op eindkwaliteit deelstroomontharding	9
2.4	Aparte vergelijking op reststoffenproblematiek	11
3	Kostenevaluatie	13
3.1	Opzet van kostenramingen	13
3.2	Economische systeemvergelijking	13
3.2.1	Stap 1: watersamenstellingsafhankelijkheid	13
3.2.2	Stap 2: capaciteitsafhankelijkheid	17
3.2.3	Stap 3: hardheidsafhankelijkheid	20
3.2.4	Stap 4: capaciteits- en hardheidsafhankelijk	22
3.2.5	Stap 5: reststoffenproblematiek	24
3.3	Conclusies economische vergelijking systemen	25
3.3.1	Economische systeemvergelijking	25
3.3.2	Economische afweging	25
4	Systeemvergelijking overige criteria	29
4.1	Kwaliteitsaspecten	29
4.2	Bedrijfsvoeringsaspecten	31
4.3	Duurzaamheidsaspecten	32
5	Enkele cases uit de praktijk	35
6	Conclusies	37
6.1	Economische haalbaarheid	37
6.2	Afweging overige criteria	38
7	Literatuur	39
I	Methode kostenramingen	41
II	Kostenfuncties	47

III	Inventarisatie bedrijfsvoering pelletontharding	55
IV	Cases uit de praktijk	61
<input type="checkbox"/>	Ontharding PS Hunsel (WML)	61
<input type="checkbox"/>	Ontharding PS Herten (WML)	64
<input type="checkbox"/>	Ontharding PS Varsseveld (Vitens)	67
<input type="checkbox"/>	Ontharding PS Macharen (Brabant Water)	70

1 Inleiding

Ionenwisseling als alternatief voor pelletontharding

Ontharding van drinkwater is bij een aantal bedrijven in Nederland nog steeds een hot issue. Aan de ene kant is er veel aandacht voor verbetering van waterkwaliteit, aan de andere kant willen waterleidingbedrijven ook in economisch opzicht hun maatschappelijke verantwoordelijkheid nemen. In het kader van het Bedrijfstakonderzoek (BTO) voor de Nederlandse waterleidingbedrijven is een project gestart waarin voornamelijk wordt gekeken naar de mogelijkheden voor ontharding van drinkwater met ionenwisseling.

Voor de ontharding van drinkwater is ontharding in korrelreactoren in Nederland de gangbare praktijk. Recent vindt ook ontharding plaats met nanofiltratie, zij het dat bij de toepassing van nanofiltratie in het algemeen ook andere zuiveringsdoelen worden gediend (verwijdering van kleur, bestrijdingsmiddelen, zouten etc.).

Voor industriële toepassingen is ontharding met behulp van ionenwisseling echter de standaard. De achterliggende oorzaken zijn van diverse aard. In de eerste plaats wordt bij industriële toepassingen vaak een volledige hardheidsverwijdering nagestreefd. Dit is met een korrelreactor onmogelijk. Er zou dan alsnog ionenwisseling moeten worden toegepast na de korrelreactor, wat leidt tot hogere investeringskosten.

In de tweede plaats zijn de te behandelen debieten in de meeste industriële toepassingen kleiner dan bij de drinkwaterproductie. In eerdere verkenningen is naar voren gekomen dat het chemicaliënverbruik in een korrelreactor efficiënter is dan in een ionenwisselaar². In het algemeen zijn de chemicaliënkosten van een korrelreactor lager, maar de investeringskosten hoger. Door het schaafeffect is de concurrentiepositie van ionenwisseling bij lagere capaciteiten dus naar verwachting beter dan bij hogere.

En niet op de laatste plaats speelt de reststoffenproblematiek. Bij drinkwaterproductie is het niet mogelijk om de brijnstroom van ionenwisseling op te mengen met andere substantiële afvalstromen, zodat niet alleen de zoutvracht (ook een probleem voor veel industrieën), maar ook de zoutconcentraties dermate hoog zijn dat de afvalstroom moeilijk te lozen is.

Dit deelrapport: haalbaarheid van ionenwisseling

De komende jaren moet in Nederland op een aantal lokaties nog ontharding van drinkwater worden gerealiseerd. Het gaat daarbij om kleinschalige toepassingen (kleiner dan 3 miljoen m³/j) in een situatie van onzekere benuttingsgraad (onzekere drinkwaterafzet). Wellicht wordt in dergelijke

² zie bijvoorbeeld Houwelingen et al. (1993)

situaties ionenwisseling interessanter als techniek voor centrale ontharding. In dit project willen de waterleidingbedrijven het *financiële omslagpunt*, gebaseerd op de huidige stand der techniek, bepalen. Daarnaast vindt evaluatie plaats op andere aspecten, zoals waterkwaliteit, bedrijfsvoering, vergunning- en arbo-aspecten, afvalstromen en energie- en chemicaliënverbruik.

Het voorliggende rapport vormt het tweede deelrapport van dit BTO-onderzoeksproject. In het eerste deelrapport is de huidige stand der techniek beschreven. Dit deelrapport geeft antwoord op de volgende vragen ten aanzien van relevantie en haalbaarheid van ionenwisseling voor drinkwatertoepassingen:

1. Wanneer is ionenwisseling goedkoper dan pelletontharding en nanofiltratie?
 - a. Waar ligt het omslagpunt met betrekking tot schaalgrootte, onthardingsdiepte, nazuivering, etc.?
 - b. Welke factoren bepalen de bedrijfseconomische haalbaarheid, c.q. welke factoren vormen een risico in financiële zin?
2. Hoe verhoudt ionenwisseling zich tot andere technieken op kwaliteitsaspecten, bedrijfsvoeringsaspecten en duurzaamheidsaspecten?

Leeswijzer

Dit deelrapport is als volgt opgebouwd. In de hoofdstukken 2 tot en met 4 vindt de vergelijking plaats van de verschillende systemen voor centrale ontharding. In hoofdstuk 2 worden de methoden en uitgangspunten beschreven. In hoofdstuk 3 vindt de economische afweging plaats en in hoofdstuk 4 een afweging op andere facetten, zoals kwaliteit, bedrijfsvoering en duurzaamheid.

Het deelrapport besluit in hoofdstuk 5 met enkele voorbeelden uit de praktijk. In hoofdstuk 6 volgen de conclusies en aanbevelingen.

2 Methode en uitgangspunten

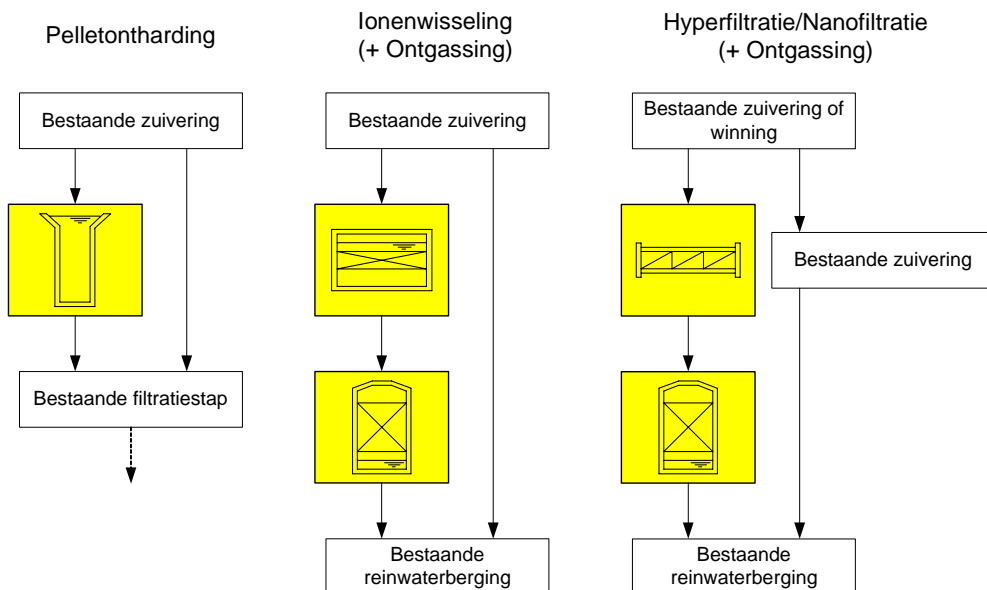
Voorafgaand aan een vergelijking van ionenwisseling met alternatieve zuiveringstechnieken worden in dit hoofdstuk de methode en uitgangspunten vastgelegd.

2.1 Vergelijking op procesniveau

Het eerste uitgangspunt is dat de onthardingsstap wordt toegepast op een bestaande productielokatie. Dit zal in de praktijk ook de meest voorkomende situatie zijn, omdat het in de meeste gevallen gaat om additionele zuivering. Bovendien maakt dit systeemvergelijking mogelijk op procesniveau.

Per lokatie zullen de inpassingsmogelijkheden verschillen. Dit kan van invloed zijn op de systeemkeuze. In dit haalbaarheidsonderzoek worden de volgende uitgangspunten voor inpassing gehanteerd, gebaseerd op typische zuiveringsschema's in Figuur 2-1:

- De benodigde voorzuivering voor alle alternatieve systemen is op de productielokatie aanwezig;
- De benodigde nazuivering is in de huidige zuivering aanwezig, in zoverre dat:
 - voor pelletontharding *niet* gerekend hoeft te worden met een nieuw te bouwen carry-over-filtratie;
 - voor ionenwisseling *wel* gerekend moet worden met een ontgassingsstap bij toepassing van kationwisseling in H-vorm;
 - voor hyperfiltratie of nanofiltratie gerekend moet worden met een beluchtingsstap of pH-correctie.



Figuur 2-1: Inpassing van de additionele processtap(pen) op een bestaande lokatie

2.2 Vergelijking bij verschillende watersamenstellingen

De waterkwaliteit is van belang voor de systeemkeuze en capaciteitsbepaling van de additionele zuiveringsstap(pen). De herkomst van het te ontharden water is van invloed op de watersamenstelling met betrekking tot de totale hardheid en de verhouding tussen tijdelijke hardheid en permanente hardheid, en de verhouding tussen calciumhardheid en magnesiumhardheid. Deze verhoudingen zijn van belang voor de technologiekeuze.

Dit wordt verduidelijkt met een voorbeeld in Figuur 2-2. In dit voorbeeld heeft het water een totale hardheid van 3,0 mmol/l. Deze hardheid bestaat voor 70% uit tijdelijke hardheid ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$) en 30% uit permanente hardheid (CaCl_2 , CaSO_4 , MgCl_2 en MgSO_4). Daarnaast kan de hardheid in dit voorbeeld worden verdeeld in 80% calciumhardheid en 20% magnesiumhardheid. De gekleurde kaders geven aan welk gedeelte van de hardheid (deels) kan worden verwijderd met de verschillende technieken.

		tijdelijk: permanent	tijdelijke hardheid	permanente hardheid	Totaal
			70%	30%	
Ca:Mg					
calcium- hardheid	80%	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 2,1	CaCl_2 CaSO_4 0,3	2,4	mmol/l
magnesium- hardheid	20%	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 0,0	MgCl_2 MgSO_4 0,6	0,6	mmol/l
Totaal		2,1	0,9	3,0	mmol/l

pelletontharding
 Zwakzure kationwisseling
 Sterkzure kationwisseling of Nanofiltratie

Figuur 2-2: Watersamenstelling en hardheid (voorbeeld watertype 1: gemiddeld grondwater)

In Nederland varieert de totale hardheid van grondwater tussen 0,5-5 mmol/l. In zoet grondwater is het aandeel van de tijdelijke hardheid 60-100%. Voor oppervlaktewater varieert de totale hardheid tussen 1-3,5 mmol/l. Voor oppervlaktewater is de tijdelijke hardheid gemiddeld 50% van de totale hardheid (variatie van 40-70%)³.

Hoewel ook andere metalen dan calcium en magnesium de totale hardheid kunnen vormen, wordt in deze haalbaarheidsstudie uitgegaan van

³ Graveland et al. (1973)

uitsluitend calcium en magnesium. In Nederland wordt gemiddeld 75-85% van de totale hardheid in mmol/l bepaald door calcium⁴.

Voor de systeemvergelijking worden vier typen water beschouwd:

1. Grondwater, met een totale hardheid van 1,5 – 3,5 mmol/l, waarvan 70% tijdelijke hardheid en 80% als calcium-hardheid;
2. Oppervlaktewater, met een totale hardheid van 1,5 – 3,5 mmol/l, waarvan 50% tijdelijke hardheid en 80% als calciumhardheid;
3. Carbonaatrijk water, met een totale hardheid van 1,5 – 3,5 mmol/l, waarvan 100% tijdelijke hardheid en 80% als calcium-hardheid;
4. Carbonaatarm water, met een totale hardheid van 1,5 – 3,5 mmol/l, waarvan ten hoogste 2 mmol/l tijdelijke hardheid en 80% als calcium-hardheid.

2.3 Vergelijking op eindkwaliteit deelstroomontharding

De additionele processtap wordt vaak in deelstroom toegepast om te komen tot de optimale samenstelling van drinkwater. De grootte van de deelstroom is specifiek voor de combinatie van toegepaste techniek en ruwwatersamenstelling, afhankelijk van de gewenste eindhardheid. Bij onderlinge vergelijking van de systemen moet de deelstroomgrootte daarom verdisconteerd worden. Met andere woorden: naarmate het systeem dieper onthardt, zal de behandelde volumestroom door het systeem kleiner zijn (kleinere hydraulische capaciteit).

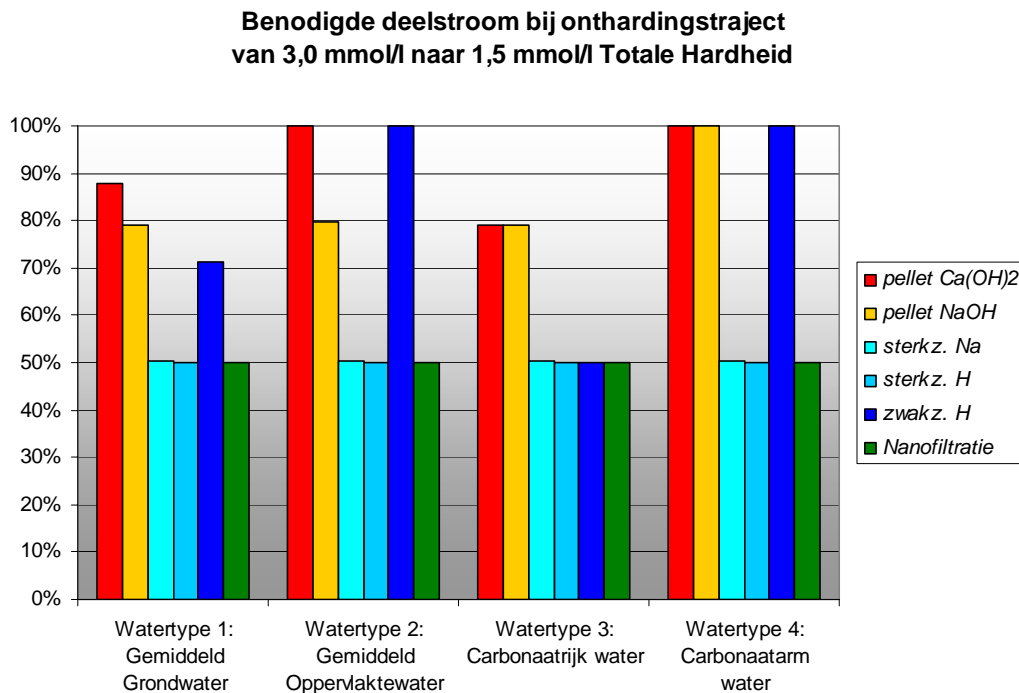
In Figuur 2-2 zijn de verschillende werkingsgebieden van de systemen weergegeven met kleurenkadertjes. Met pelletontharding kan alleen de tijdelijke calciumhardheid worden verwijderd tot ca. 0,5 mmol/l⁵. De permanente hardheid en de magnesiumhardheid worden met pelletontharding in het geheel niet verwijderd. De mogelijkheid van deelstroomontharding met pelletreactoren bestaat in de praktijk alleen bij magnesiumconcentraties die kleiner zijn dan 1 mmol/l (immers bij 1 mmol/l magnesium-hardheid is voor ontharding tot 1,5 mmol/l totale hardheid reeds een 100% deelstroom nodig). Daarnaast is de aanwezigheid van permanente calcium-hardheid van invloed op de deelstroom en de behaalde eindhardheid.

Met zwakzure kationwisseling wordt de tijdelijke hardheid verwijderd tot ca. 0,02 mmol/l (zowel calcium als magnesium). De permanente hardheid wordt in het geheel niet verwijderd. Met sterkzure kationwisseling en nanofiltratie wordt de gehele hardheid verwijderd tot ca. 0,02 mmol/l.

⁴ Graveland et al. (1973)

⁵ Eindkwaliteit pelletontharding: Ca > 0,5 mmol/l, TAC > 0,5 mmol én Ca*TAC > 0,7

Het werkingsgebied en de behaalde eindhardheid zijn van invloed op de deelstroomgrootte. In Figuur 2-3 is de deelstroomontharding gegeven van de verschillende systemen voor een ontharding van 3,0 mmol/l naar 1,5 mmol/l totale hardheid. Met sterkzure kationwisseling en nanofiltratie is de deelstroomontharding ongeacht de watersamenstelling 50%.



Figuur 2-3: Berekende deelstroom bij diverse watertypen en onthardingstechnieken, voor een onthardingstraject van 3,0 mmol/l naar 1,5 mmol/l Totale Hardheid (kanttekening: 100% deelstroom kan betekenen dat eindhardheid 1,5 mmol/l niet gehaald wordt)

De deelstroom met pelletontharding varieert tussen 80-100%, afhankelijk van het watertype en onthardingschemicalie (kalkmelk of natronloog). Bij watertype 4 moet de volledige stroom worden behandeld (deelstroom is 100%), waarbij opgemerkt wordt dat de eindhardheid van 1,5 mmol/l niet gehaald kan worden met kalkmelk, vanwege een tekort aan bicarbonaat. Dit geldt eveneens voor watertype 2. Opvallend hierin is het verschil tussen pelletontharding met kalkmelk en pelletontharding met natronloog. De onthardingsdiepte met kalkmelk wordt bij alle watertypen, met uitzondering van watertype 3, beperkt door het beschikbare bicarbonaat. Deze beperking geldt niet voor pelletontharding met natronloog, met uitzondering van de toepassing op watertype 4.

De deelstroom van zwakzure kationwisseling varieert sterk met de watersamenstelling, namelijk van 60% tot 100%. Dat de deelstroom kleiner

dan of gelijk is aan die van pelletontharding met kalkmelk is eenvoudig te verklaren, omdat de uitgaande resthardheid kleiner is. Wel geldt hetzelfde als voor pelletontharding met kalkmelk, dat de hoeveelheid bicarbonaat een beperking kan vormen voor de onthardingsdiepte. Bij watertype 2 en 4 moet evenals bij pelletontharding de volledige stroom behandeld worden, omdat de hoeveelheid bicarbonaat dan beperkend is. Bij watertype 4 kan de gewenste eindhardheid van 1,5 mmol/l niet gehaald worden.

In vergelijking tot pelletontharding speelt bij zwakzure kationwisseling ook nog een ander aspect. Bij pelletontharding vindt met de dosering van de base omzetting plaats van het aanwezige koolzuur (CO_2) in bicarbonaat (HCO_3). Hierdoor is 5-10% meer bicarbonaat beschikbaar voor de kristallisatie. Bij zwakzure kationwisseling vindt deze omzetting niet plaats, waardoor er minder bicarbonaat beschikbaar is voor de ontharding.

Met andere woorden: enerzijds wordt met zwakzure kationwisseling dieper onthardt dan met pelletontharding (geen oververzadiging in het behandelde water), anderzijds is er voor de ontharding iets minder bicarbonaat beschikbaar. Uit Figuur 2-3 blijkt dat het eerste dominant is ten opzichte van het tweede. De benodigde deelstroom van zwakzure kationwisseling voor de watertypen 1 en 3 is immers kleiner dan die van pelletontharding.

Sterkzure kationwisseling en nanofiltratie zijn relatief ongevoelig voor de watersamenstelling.

2.4 Aparte vergelijking op reststoffenproblematiek

Voor een zuivere systeemvergelijking moet de reststoffenproblematiek (regeneraatverwerking) meegenomen worden in de afweging. Vanwege het belang van deze problematiek is hiervoor een aparte (vervolg)deelstudie gedefinieerd.

In dit rapport is voor een eerste systeemvergelijking de reststoffenproblematiek buiten beschouwing gelaten ('best case'). In tweede instantie wordt berekend wat de regeneraatverwerking mag kosten, zodanig dat ionenwisseling nog een kostenconcurrerende techniek is voor pelletontharding.

3 Kostenevaluatie

In dit hoofdstuk vindt de economische vergelijking plaats van ionenwisseling met alternatieve zuiveringstechnieken. In paragraaf 3.1 worden kostenkentallen afgeleid die als basis fungeren van de economische vergelijking. In paragraaf 3.2 is de kostenvergelijking gegeven, waarbij een gevoeligheidsanalyse wordt uitgevoerd voor verschillende variabelen. In paragraaf 3.3 wordt als besluit het totaalbeeld geschetst, waarin tevens een handreiking plaatsvindt voor de economische afweging.

3.1 Opzet van kostenramingen

Ten behoeve van een economische vergelijking van de verschillende systemen is de ramingsmethode gehanteerd, zoals deze beschreven is in Bijlage I. Deze ramingsmethode maakt gebruik van bouwkostenfuncties en kostenkentallen. De bouwkostenfuncties en kentallen zijn specifiek voor de toegepaste onthardingstechniek, zie Bijlage II. Ze zijn zoveel mogelijk gebaseerd op referentieprojecten en literatuurstudie.

3.2 Economische systeemvergelijking

De economische vergelijking van de systemen is uitgevoerd in verschillende stappen, zoals weergegeven in Tabel 3-1. Deze stappen zijn ingegeven door het relatief grote aantal variabelen, namelijk de capaciteit, de hardheid, het watertype en de regeneraatverwerking.

Tabel 3-1: Stappen economische vergelijking

<i>variabele</i> \ <i>stap</i>	<i>stap 1:</i> <i>paragraaf</i> 3.2.1	<i>stap 2:</i> <i>paragraaf</i> 3.2.2	<i>stap 3:</i> <i>paragraaf</i> 3.2.3	<i>stap 4:</i> <i>paragraaf</i> 3.2.4	<i>stap 5:</i> <i>paragraaf</i> 3.2.4
<i>capaciteit</i>	vast	<i>variabel</i>	vast	<i>variabel</i>	<i>variabel</i>
<i>beginhardheid</i>	vast	vast	<i>variabel</i>	<i>variabel</i>	<i>variabel</i>
<i>watertype</i>	<i>variabel</i>	vast	vast	vast	vast
<i>regeneraatverwerking</i>	niet	niet	niet	niet	<i>wel</i>

3.2.1 Stap 1: watersamenstellingsafhankelijkheid

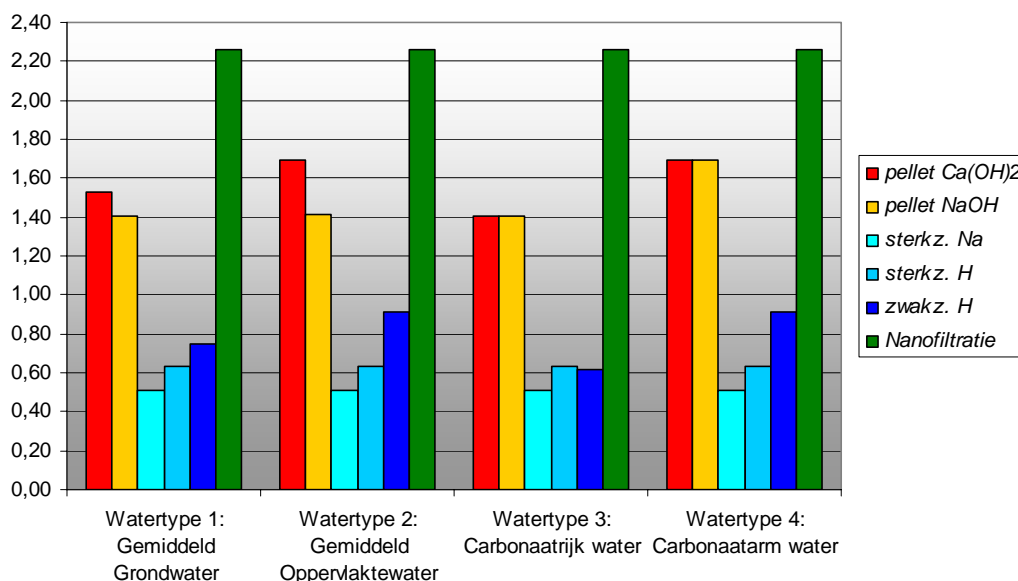
In stap 1 van de economische vergelijking wordt voortgebouwd op de in Figuur 2-3 gepresenteerde deelstroomontharding voor een ontharding van 3,0 mmol/l naar 1,5 mmol/l totale hardheid. Uitgangspunt is een drinkwaterproductiebedrijf met een jaarafzet van 3 Mm³/j en een dagpiekfactor van 1,5 (max.dag. 12.300 m³/dag, zodat de zuivering is uitgelegd op 500 m³/h).

Investerings

De bijbehorende geraamde investeringen zijn weergegeven in Figuur 3-1. Hieruit blijkt dat onafhankelijk van de watersamenstelling het beeld van de investeringsniveaus steeds soortgelijk is. De benodigde investeringen zijn voor nanofiltratie het grootst (2,2 M€). Het investeringsniveau van ionenwisseling is een factor 2-3 lager dan dat van pelletontharding, afhankelijk van de harskeuze en de chemicaliekeuze. Een sterkzure kationwisseling in de Na-vorm is qua investeringen de goedkoopste vorm van ionenwisseling, omdat er dan geen ontgassingsstap behoeft te worden gebouwd.

Het behoeft geen toelichting dat de investeringen van de verschillende systemen variëren als gevolg van de verschillende deelstroomgroottes. Sterkzure kationwisseling en nanofiltratie zijn derhalve ongevoelig voor de watersamenstelling. Voor zwakzure kationwisseling geldt dat afhankelijk van het watertype de investeringen kunnen variëren tussen 600 k€ en 900 k€ (+50%). Pelletontharding is qua investeringen in verhouding tot zwakzure kationwisseling relatief ongevoelig voor watersamenstelling. Het investeringsniveau varieert van 1.400 k€ tot 1.700 k€ (+20%).

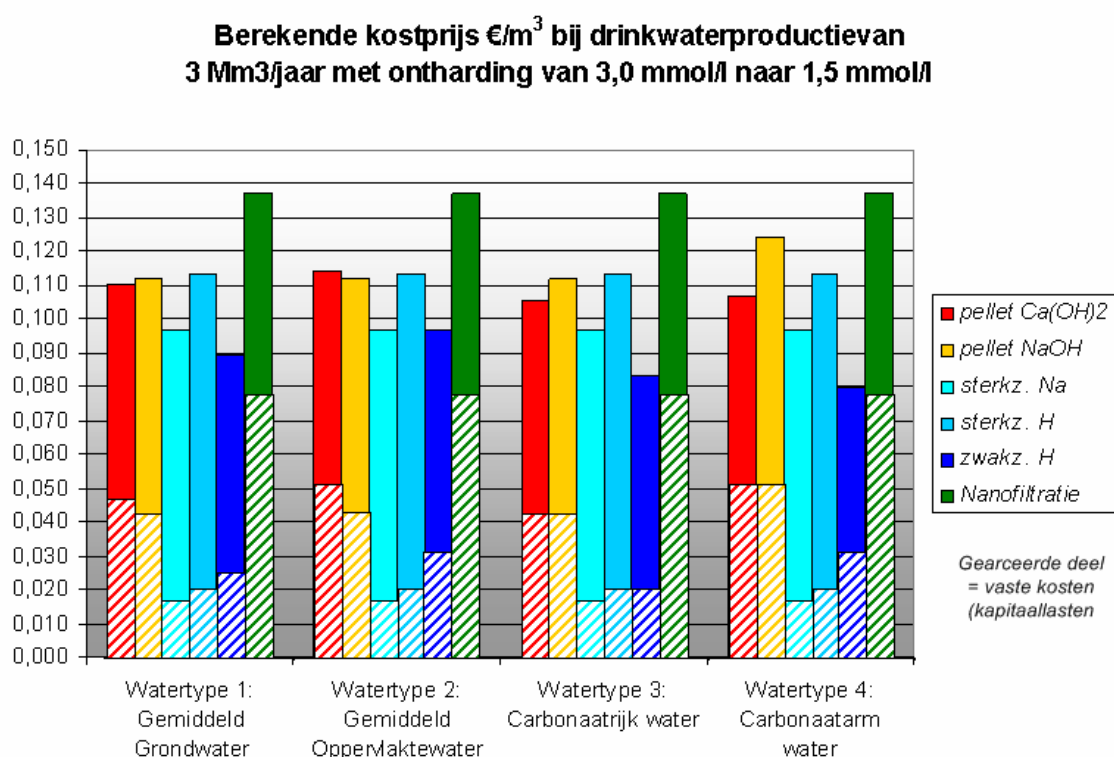
Benodigde investering (M€) bij drinkwaterproductie van 3 Mm³/jaar met ontharding van 3,0 mmol/l naar 1,5 mmol/l



Figuur 3-1: Berekende investeringen (M€) voor productie van 3 Mm³/j met een onthardingstraject van 3,0 mmol/l naar 1,5 mmol/l Totale Hardheid

Kostprijs

De kostprijsverhoging als gevolg van de deelstroomontharding is weergegeven in Figuur 3-2⁶. De kostprijsvergelijking geeft voor de verschillende watertypen hetzelfde beeld. Zwakzure kationwisseling is zonder uitzondering de goedkoopste techniek. Ten opzichte van pelletontharding met kalkmelk is zwakzure kationwisseling bijvoorbeeld 0,02-0,03 €/m³ goedkoper. Dit komt nagenoeg geheel voor rekening van het verschil in kapitaallasten. De operationele kosten zijn namelijk ongeveer gelijk, al is de samenstelling van de operationele kosten wel verschillend. Een nadere analyse hiervan vindt plaats in de volgende stappen van de economische vergelijking (paragrafen 3.2.2 en paragraaf 3.2.5).



Figuur 3-2: Berekende kostprijs (€/m³) voor productie van 3 Mm³/j met een onthardingstraject van 3,0 mmol/l naar 1,5 mmol/l Totale Hardheid (NB. Kostprijs is exclusief regeneraat- of concentraatverwerking)

De vaste kosten (kapitaallasten) hangen uiteraard samen met het investeringsniveau. Derhalve zijn de vaste kosten van sterkzure kationwisseling en nanofiltratie onafhankelijk van de watersamenstelling. Voor zwakzure kationwisseling geldt dat afhankelijk van het watertype de

⁶ De exploitatielasten van de deelstroomontharding komen ten laste van iedere afgezette m³. In de kostprijs zijn voornamelijk geen kosten opgenomen voor de verwerking van de reststromen (regeneraat, concentraat).

vaste kosten kunnen variëren tussen 0,021 €/m³ en 0,031 €/m³ (+40%). Pelletontharding is qua investeringen in verhouding tot zwakzure kationwisseling relatief ongevoelig voor watersamenstelling, variërend van 0,043 €/m³ en 0,051 €/m³ (+20%).

De *operationele kosten* van alle technieken zijn relatief ongevoelig voor de watersamenstelling. Pelletontharding is relatief het gevoeligst voor de watersamenstelling. Ontharding met natronloog varieert bijvoorbeeld in operationele kosten (niet-gearceerde deel in Figuur 3-2) tussen 0,069 €/m³ en 0,073 €/m³ (+5%). De variatie van pelletontharding met kalkmelk is groter. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat de gewenste onthardingsdiepte niet gehaald wordt bij de watertypen 2 en 4, waardoor het chemicaliënverbruik lager uitvalt (met name bij watertype 4).

De operationele kosten van zwakzure kationwisseling variëren nauwelijks (ca. 0,064 €/m³), tenminste als watertype 4 buiten beschouwing wordt gelaten (lager chemicaliënverbruik, omdat onthardingsdoelstelling niet wordt gehaald).

Conclusie

Ionenwisseling is – ongeacht de waterkwaliteit – zowel voor wat betreft investering als exploitatie het goedkoopste systeem voor ontharding op een pompstation van 3 Mm³/j met een onthardingstraject van 3,0 mmol/l naar 1,5 mmol/l. Het niveau van investeringen en exploitatiekosten van pelletontharding en zwakzure kationwisseling is voor een deel afhankelijk van de watersamenstelling.

3.2.2 *Stap 2: capaciteitsafhankelijkheid*

In stap 2 van de economische vergelijking wordt voortgebouwd op deelstroomontharding van watertype 1 (gemiddeld grondwater) voor een ontharding van 3,0 mmol/l naar 1,5 mmol/l totale hardheid. De capaciteit is nu variabel gekozen. De overige instellingen blijven ongewijzigd ten opzichte van de economische vergelijking in paragraaf 3.2.1.

Investeringsen

De bijbehorende geraamde investeringen zijn weergegeven in Figuur 3-3. Hieruit blijkt dat vanaf 1,0 Mm³/j het investeringsniveau van een zwakzure kationwisseling een factor 2 lager is dan die van pelletontharding. Bij kleinere capaciteiten zijn de verschillen kleiner.

Kostprijs

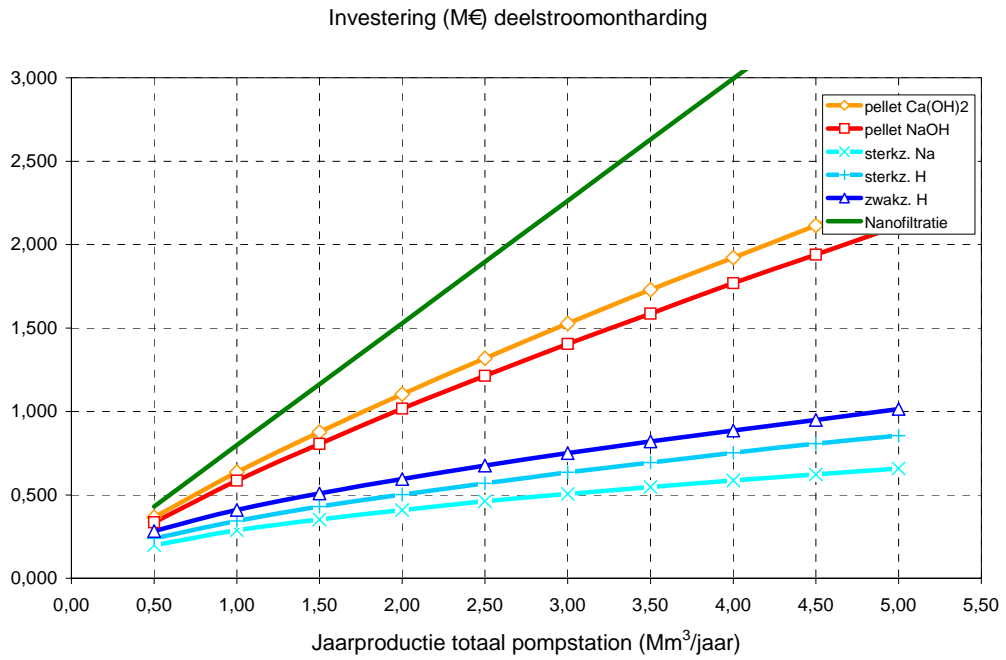
De kostprijsverhoging als gevolg van de deelstroomontharding is weergegeven in Figuur 3-4⁷. Bij zeer kleine capaciteiten (< 0,5 Mm³/j) zijn ionenwisseling en nanofiltratie veel goedkoper dan pelletontharding. Pelletontharding wordt goedkoper dan nanofiltratie bij een capaciteit van > 1,0 Mm³/j. Naarmate de capaciteit toeneemt, daalt de kostprijs van pelletontharding relatief ten opzichte van kationwisseling. Bij een productie van > 8-10 Mm³/j (niet in grafiek opgenomen) is pelletontharding goedkoper dan zwakzure kationwisseling.

De kostprijs van pelletontharding is relatief schaalgevoelig ten opzichte van ionenwisseling. De schaalgevoeligheid van de kostprijs boven 1,0 Mm³/j kan niet worden verklaard vanuit schaaffecten van de investeringen (vaste kosten). Uit Figuur 3-3 blijkt namelijk dat de investeringen nagenoeg lineair zijn met de capaciteit. De verklaring zit veeleer in de schaalgevoeligheid van de variabele kosten, zoals weergegeven in Figuur 3-5. De variabele kosten van ionenwisseling bestaan voor een groot deel uit verbruikskosten (voornamelijk chemicaliënkosten) die direct gerelateerd zijn aan de productie. Deze operationele kosten zijn daarom minder schaalgevoelig. Dit wordt verduidelijkt in Figuur 3-6, waarin de samenstelling van de kostprijs is weergegeven bij twee capaciteiten. De variabele kosten van pelletontharding zijn daarentegen voor een aanzienlijk deel minder afhankelijk van de omvang van de productie. Het betreft de specifieke beheerskosten: personeelskosten die grotendeels ongeacht de productieomvang gemaakt worden voor procesbewaking en procesvoering. Het optredende schaaffect wordt verduidelijkt in Figuur 3-6.

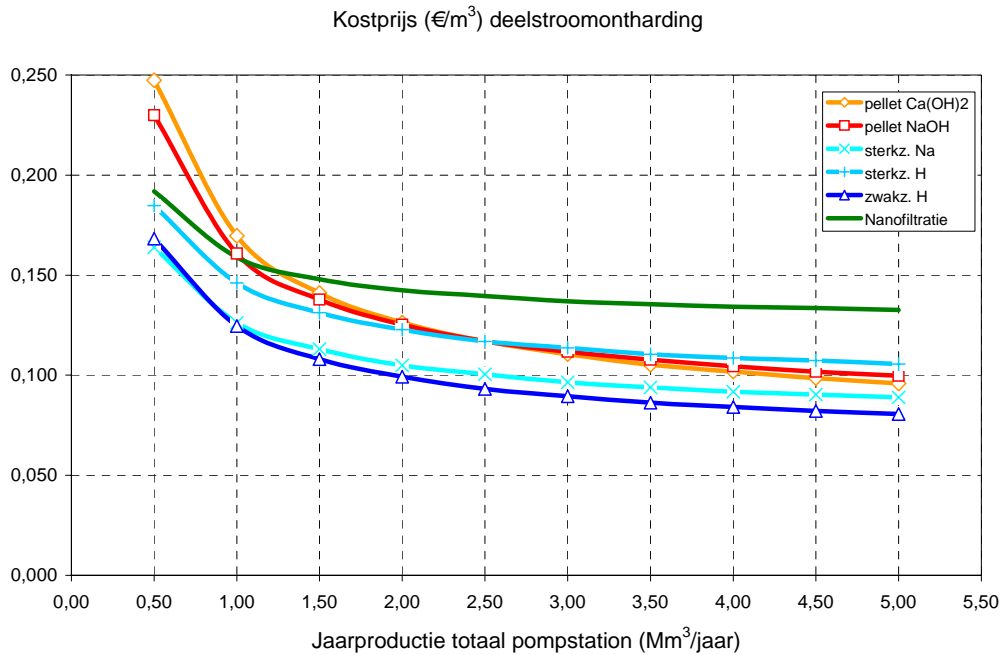
Conclusie

Naarmate de capaciteit kleiner is, is ionenwisseling een aantrekkelijker alternatief voor pelletontharding.

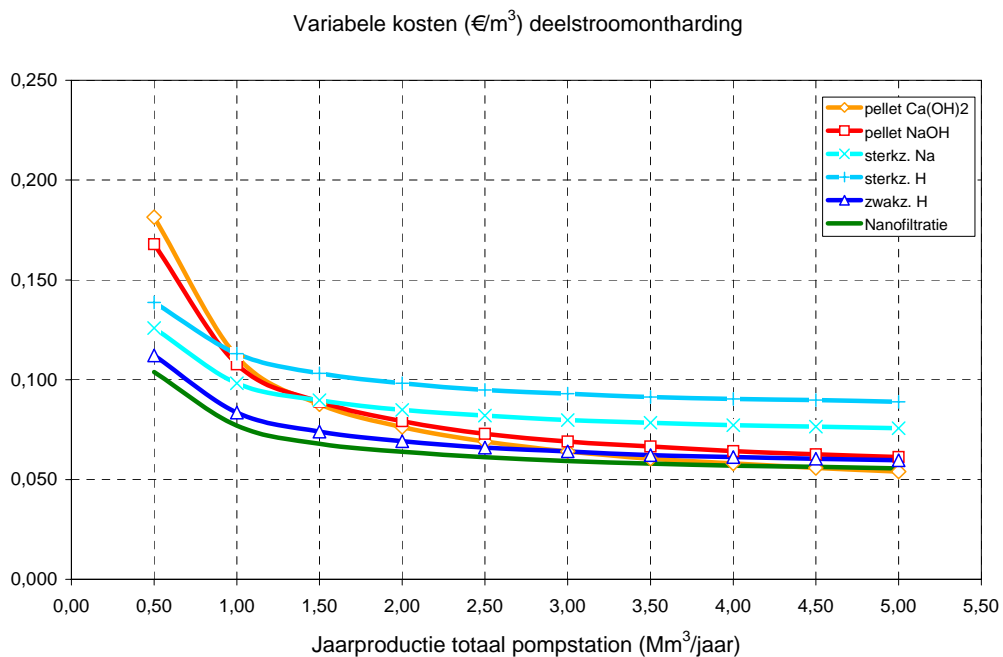
⁷ idem voetnoot 5



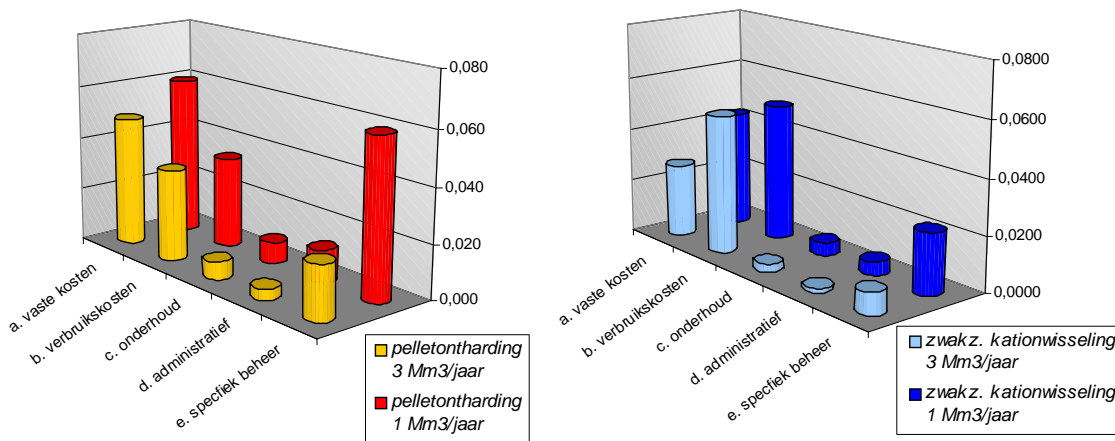
Figuur 3-3: Berekende investeringen (M€) voor ontharding van gemiddeld grondwater (watertype 1) van 3,0 mmol/l naar 1,5 mmol/l Totale Hardheid



Figuur 3-4: Berekende kostprijs (€/m³) voor ontharding van gemiddeld grondwater (watertype 1) van 3,0 mmol/l naar 1,5 mmol/l Totale Hardheid (NB. Kostprijs is exclusief regeneraat- of concentraatverwerking)



Figuur 3-5: Berekende variabele kosten (€/m³) voor ontharding van gemiddeld grondwater (watertype 1) van 3,0 mmol/l naar 1,5 mmol/l Totale Hardheid



Figuur 3-6: Samenstelling en schaafeffect van kostprijs

3.2.3 Stap 3: hardheidsafhankelijkheid

In stap 3 van de economische vergelijking wordt voortgebouwd op deelstroomontharding van watertype 1 (gemiddeld grondwater) met een capaciteit van 3,0 Mm³/j met variabele beginhardheid. De eindhardheid is vast gekozen op 1,5 mmol/l. De overige instellingen blijven ongewijzigd ten opzichte van de economische vergelijking in paragraaf 3.2.1.

Investerings

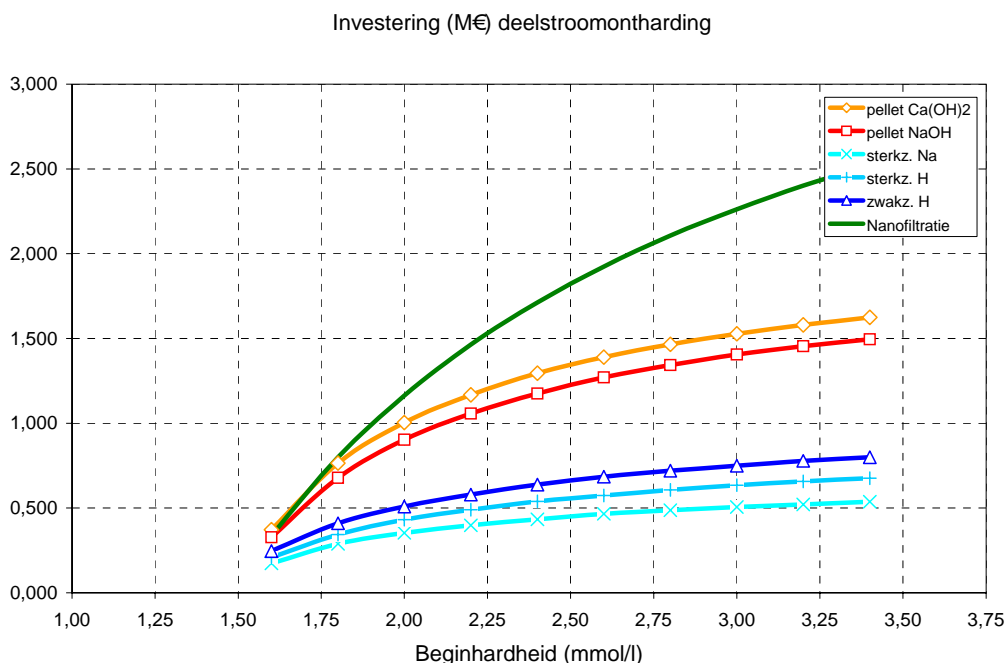
De bijbehorende geraamde investeringen zijn weergegeven in Figuur 3-7. Bij een hogere beginhardheid nemen de investeringen toe, omdat de deelstroom ontharding navenant groter wordt (zie Figuur 3-8).

Kostprijs

De kostprijsverhoging als gevolg van de deelstroomontharding is weergegeven in Figuur 3-9⁸. Voor een deelstroomontharding met een lage beginhardheid is ionenwisseling relatief aantrekkelijk. Naarmate de beginhardheid hoger is, is het voordeel van ionenwisseling kleiner. De verklaring hiervoor is soortgelijk als beschreven in paragraaf 3.2.2.

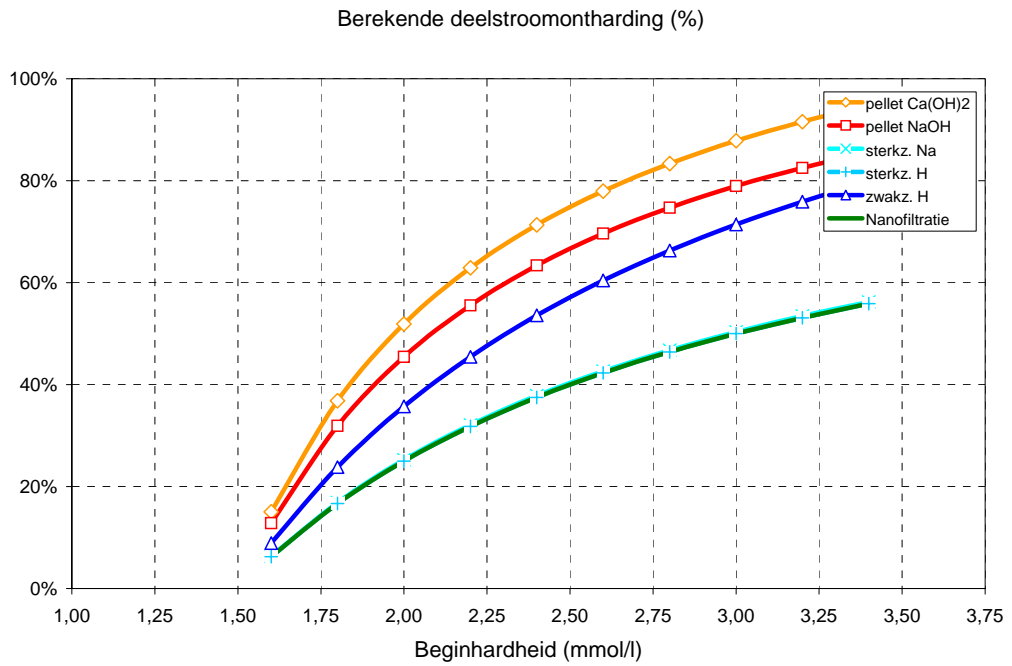
Conclusie

Voor toepassingen op water met een relatief lage beginhardheid is ionenwisseling een aantrekkelijk alternatief voor pelletontharding.

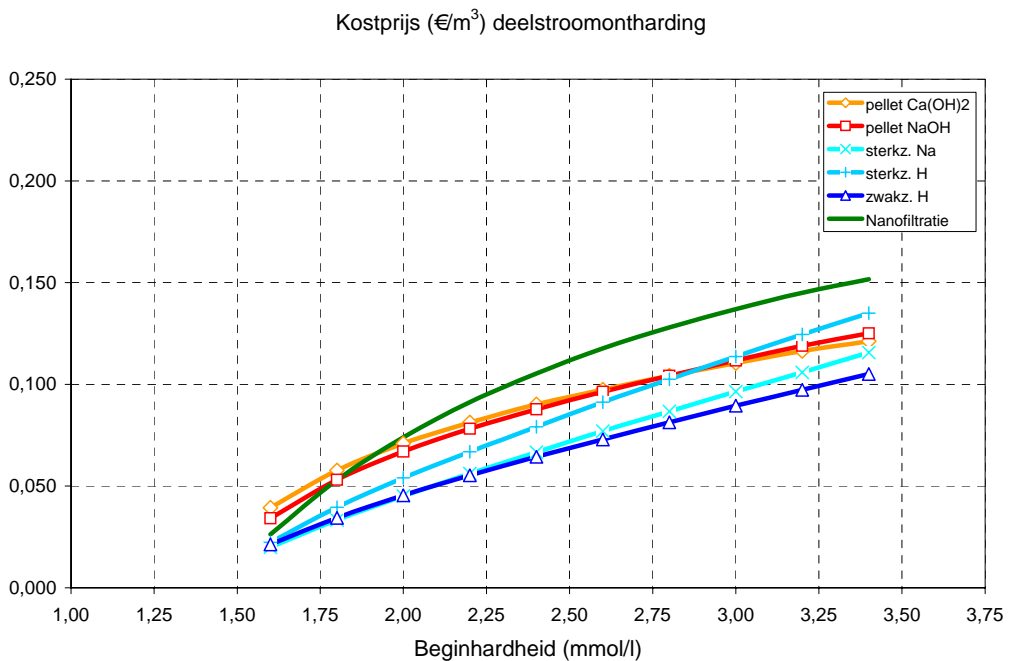


Figuur 3-7: Berekende investeringen (M€) voor ontharding van gemiddeld grondwater (watertype 1) met capaciteit 3,0 Mm³/j bij variabele beginhardheid

⁸ idem voetnoot 5



Figuur 3-8: Berekende deelstroom (%) voor ontharding van gemiddeld grondwater (watertype 1) bij variabele beginhardheid



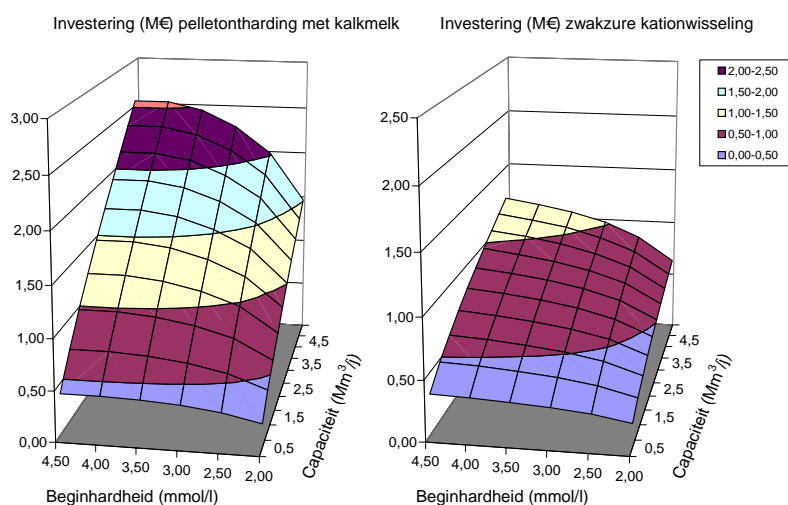
Figuur 3-9: Berekende kostprijs (€/m³) voor ontharding van gemiddeld grondwater (watertype 1) met capaciteit 3,0 Mm³/j bij variabele beginhardheid (NB. Kostprijs is exclusief regeneraat- of concentraatverwerking)

3.2.4 Stap 4: capaciteits- en hardheidsafhankelijk

In stap 4 van de economische vergelijking wordt voortgebouwd op deelstroomontharding van watertype 1 (gemiddeld grondwater) met variabele capaciteit met variabele beginhardheid. De eindhardheid is vast gekozen op 1,5 mmol/l. De overige instellingen blijven ongewijzigd ten opzichte van de economische vergelijking in paragraaf 3.2.1.

Investerings

De bijbehorende geraamde investeringen zijn weergegeven in Figuur 3-10, alleen voor pelletontharding met kalkmelk en zwakzure kationwisseling.



Figuur 3-10: Berekende investering (€) pelletontharding met kalkmelk en zwakzure kationwisseling op gemiddeld grondwater (watertype 1)

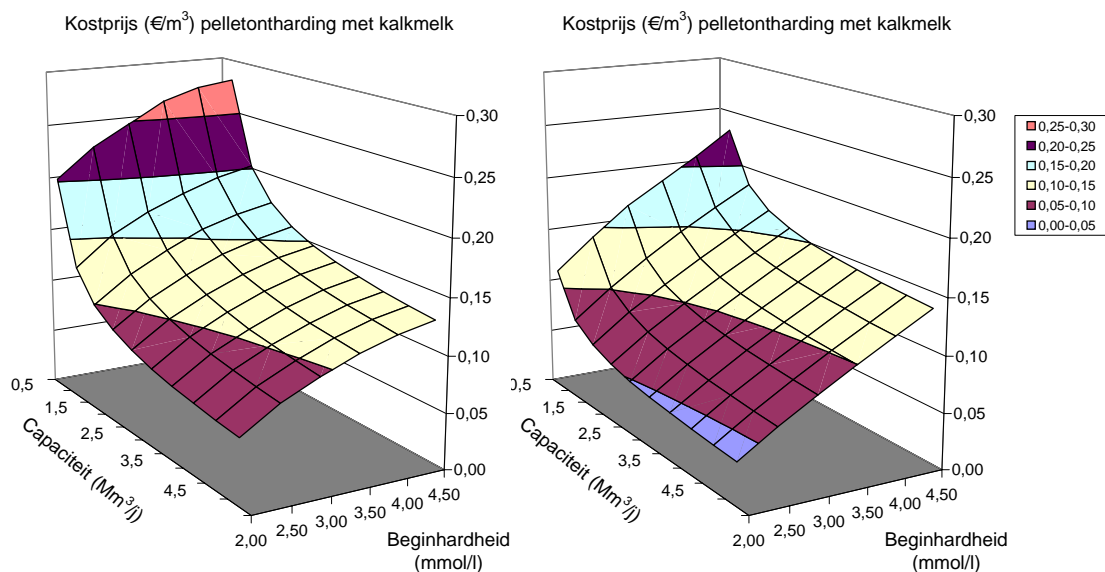
Kostprijs

De kostprijsverhoging als gevolg van de deelstroomontharding is weergegeven in Figuur 3-11⁹, alleen voor pelletontharding met kalkmelk en zwakzure kationwisseling. Het verschil tussen beide kostprijzen is weergegeven in Figuur 3-12.

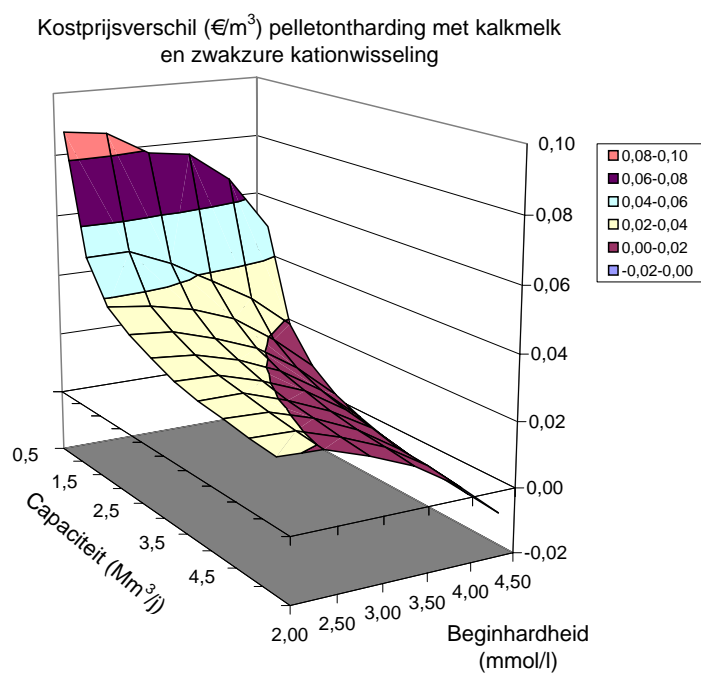
Conclusie

Bij een relatief grote capaciteit (> 5 Mm³/j) in combinatie met een relatief hoge hardheid (> 3,5 mmol/l Totale Hardheid) is pelletontharding relatief goedkoper dan ionenwisseling.

⁹ idem voetnoot 5



Figuur 3-11: Berekende kostprijs (€/m³) pelletontharding met kalkmelk en zwakzure kationwisseling op gemiddeld grondwater (watertype 1; NB. Kostprijs is exclusief regeneraatverwerking)



Figuur 3-12: Berekende kostprijsverschil (€/m³) pelletontharding met kalkmelk en zwakzure kationwisseling op gemiddeld grondwater (watertype 1; NB. Kostprijsverschil is exclusief regeneraatverwerking)

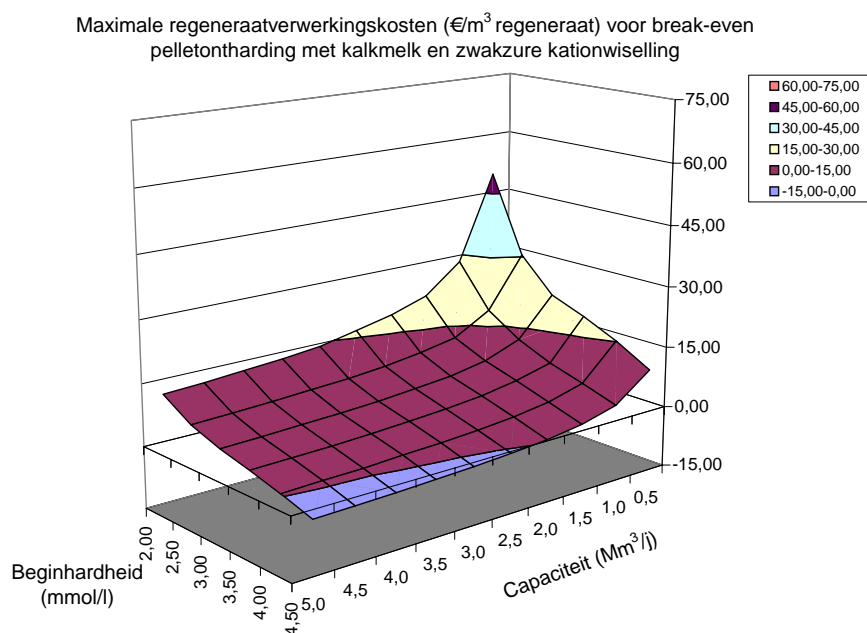
3.2.5 Stap 5: reststoffenproblematiek

In de voorgaande stappen 1 t/m 4 is de reststoffenproblematiek buiten beschouwing gelaten. In stap 5 wordt bepaald hoe duur de regeneraatverwerking mag zijn, wil zwakzure kationwisseling nog concurrerend zijn met pelletontharding met kalkmelk. Hiervoor zijn dezelfde uitgangspunten gehanteerd als voor stap 4.

Zwakzure kationwisseling heeft een regeneraatverlies van ca. 0,5%. De kosten voor regeneraatverwerking tellen dan ook ten hoogste voor 0,5% mee in de kostprijs van iedere m³ geproduceerd water (bij 100% deelstroom). Bij 50% deelstroom is de kostprijsverhoging als gevolg van regeneraatverwerking nog slechts 50% * 0,5% = 0,25%. Uit het kostprijsverschil tussen pelletontharding met kalkmelk en zwakzure kationwisseling uit Figuur 3-12 kan op deze wijze bepaald worden hoe duur de regeneraatverwerking mag zijn, wil zwakzure kationwisseling nog een aantrekkelijke technologie zijn ten opzichte van pelletontharding met kalkmelk. Dit is weergegeven in Figuur 3-13.

Conclusie

Zwakzure kationwisseling is bij kleine capaciteiten concurrerend met pelletontharding, zolang de regeneraatverwerking maximaal 10 – 40 €/m³ regeneraat kost. Uit het deelrapport dat handelt over regeneraatverwerking¹⁰ blijkt dat de maximale kosten voor regeneraatverwerking max. 5-10 €/m³ bedragen.



Figuur 3-13: Maximale kostprijs regeneraatverwerking (€/m³ regeneraat)

3.3 Conclusies economische vergelijking systemen

3.3.1 *Economische systeemvergelijking*

De sortering van de verschillende technieken naar investeringsniveau of kostprijsniveau is onafhankelijk van de watersamenstelling. Het investeringsniveau en de kostprijs van pelletontharding en zwakzure kationwisseling zijn echter wel afhankelijk van de watersamenstelling. Naarmate het water carbonaatrijker is, worden deze technieken goedkoper.

Naarmate de capaciteit kleiner is, is ionenwisseling een aantrekkelijker alternatief voor pelletontharding. Evenzeer geldt dat naarmate de beginhardheid kleiner is, ionenwisseling een aantrekkelijker alternatief voor pelletontharding is.

Zwakzure kationwisseling is concurrerend met pelletontharding, zolang de regeneraatverwerking maximaal 20 - 40 €/m³ regeneraat kost.

3.3.2 *Economische afweging*

De centrale vraag bij de economische afweging is: wanneer is ionenwisseling goedkoper dan pelletontharding en nanofiltratie?

- a. Waar ligt het omslagpunt met betrekking tot schaalgrootte en onthardingsdiepte?
- b. Welke factoren bepalen de bedrijfseconomische haalbaarheid, c.q. welke factoren vormen een risico in financiële zin?

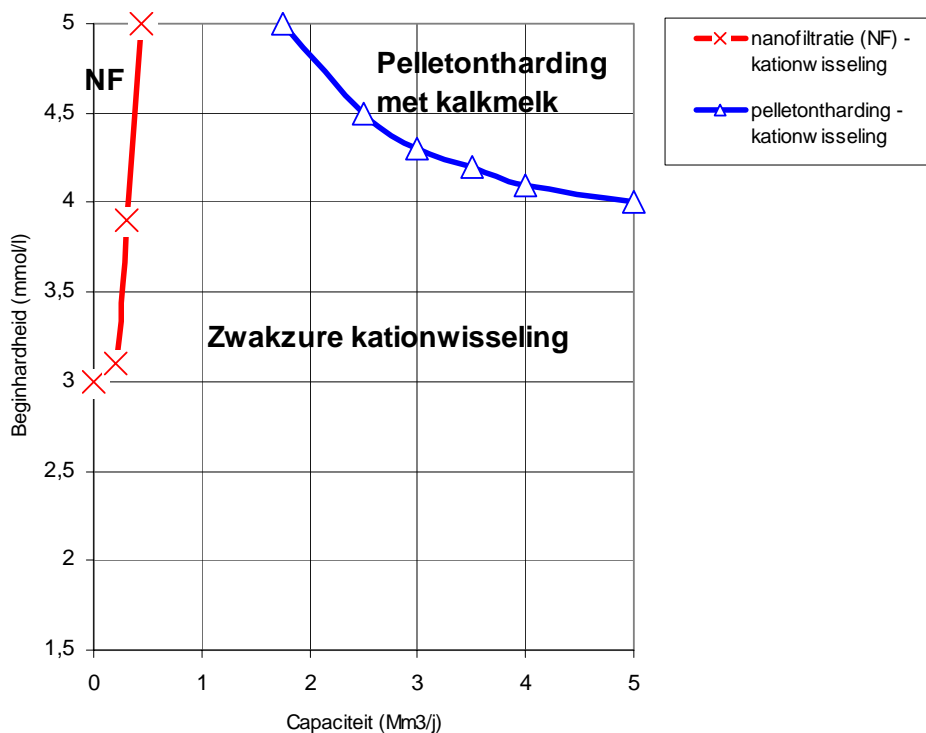
ad a. Waar ligt het omslagpunt?

Voor gemiddeld grondwater is het economische omslagpunt tussen pelletontharding (met kalkmelk) en (zwakzure) kationwisseling zoals weergegeven in Figuur 3-14. Bij kleine capaciteiten (< 1,5 Mm³/j) blijkt ionenwisseling altijd een aantrekkelijk alternatief te zijn, terwijl bij grotere capaciteiten de beginhardheid ook meeweegt (TH < 4 mmol/l). Nanofiltratie blijkt een aantrekkelijk alternatief te zijn in het segment van hele kleine capaciteiten en relatief hoge hardheid (< 0,5 Mm³/j én TH > 3,0 mmol/l).

Deze conclusies gelden als concentraat- en regeneraatverwerkingskosten buiten beschouwing worden gelaten.

¹⁰ Siegers, 2004; gebaseerd op verdamping MSF/MED

Break-even lijnen en toepassingsgebieden verschillende systemen

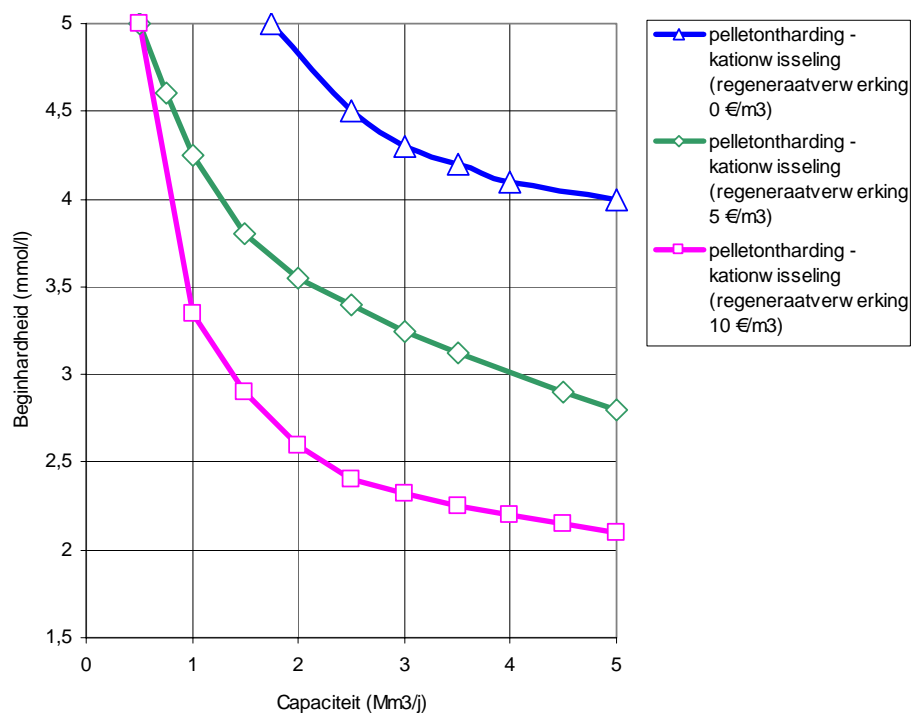


Figuur 3-14: Break-even-lijnen en toepassingsgebieden pelletontharding met kalkmelk, zwakzure kationwisseling en nanofiltratie (NF) op gemiddeld grondwater (watertype 1), zonder concentraat en regeneraatsverwerking

Voor een zuivere systeemvergelijking moet de reststoffenproblematiek (regeneraatsverwerking) uiteraard wel meegenomen worden in de afweging. Vanwege het belang van deze problematiek is hiervoor een aparte (vervolg)deelstudie gedefinieerd. Ter illustratie is de invloed van de regeneraatsverwerking op het omslagpunt weergegeven in Figuur 3-15. Voor regeneraatsverwerking is 5-10 €/m³ aangenomen¹¹. Bij kleine capaciteiten (< 0,5 Mm³/j) blijkt ionenwisseling altijd een aantrekkelijk alternatief te zijn. De praktische bovengrens van het toepassingsgebied van ionenwisseling ligt bij deze aanname op 3 - 4 Mm³/j.

¹¹ idem

Break-even lijnen pelletontharding met kalkmelk en zwakzure kationwisseling (inclusief regeneraathergebruik)



Figuur 3-15: Break-even-lijn pelletontharding met kalkmelk en zwakzure kationwisseling op gemiddeld grondwater (watertype 1), met regeneraatverwerking à 5- 10 €/m³ regeneraat

De inpassingsmogelijkheden van de additionele ontharding op een bestaand pompstation kunnen uiteraard van grote invloed zijn op de economische afweging. Op pompstations waar achter een pelletontharding een carry-over-filtratie moet worden gerealiseerd, is kationwisseling een des te aantrekkelijker alternatief.

Een voorbeeld hiervan is de case PS Hunsel (WML) die in hoofdstuk 5 behandeld wordt.

ad b. Welke bedrijfseconomische factoren bepalen afweging?

Naast het economische omslagpunt zoals bepaald onder a. zijn er nog andere factoren die meespelen in de economische afweging. Zo neemt het drinkwaterbedrijf bij iedere investering een zeker bedrijfsrisico:

1. Het risico dat de afzet lager is dan verwacht, met het gevolg dat er onvoldoende kostendekking aanwezig is met de bestaande tariefstructuur.
2. Het risico dat versneld moet worden afgeschreven vanwege een dreigende sluiting van het pompstation (hetzij door eigen beleid, hetzij door overheidsmaatregelen).

Als het risicoprofiel van een project op (één van) deze punten hoog is, dan kan dit van invloed zijn op de systeemkeuze. Het waterleidingbedrijf zal het investeringsniveau in dit geval willen beperken (vaste kosten laag houden), zodat het effect van een lagere afzet of een bedrijfssluiting zo gering mogelijk is.

Uit de economische systeemvergelijking blijkt dat het investeringsniveau van ionenwisseling een factor 2-3 lager ligt dan dat van pelletontharding. Daarmee is de gevoeligheid van ionenwisseling voor een lagere afzet of een verkorte afschrijving (desinvestering) geringer dan die van pelletontharding.

Een voorbeeld van deze afweging is de case PS Herten (WML) die in hoofdstuk 5 behandeld wordt.

4 Systeemvergelijking overige criteria

4.1 Kwaliteitsaspecten

Het doel van ontharden, buiten het voldoen aan de wettelijke normen, is om de aanwezige samenstelling van het drinkwater zodanig te optimaliseren dat kalkafzetting in leidingwerk en drinkwaterinstallaties wordt beperkt en dat ten aanzien van de comfortbeleving van het drinkwater bij de consument een aanmerkelijke verbetering optreedt. Omdat alle beschouwde systemen met deze doelen worden aangewend, worden alleen de onderlinge verschillen in eindkwaliteit beschouwd.

Bicarbonaat

De keuze van de onthardingschemicalie bij pelletontharding (kalkmelk of natronloog) of de keuze van het type kationwisselaar en de regeneratiechemicaliën is bepalend voor de mate van verwijdering van bicarbonaat. De gewenste verwijdering van bicarbonaat wordt ingegeven door verschillende parameters:

- *TACC₉₀ en PACC₉₀*. TACC₉₀ staat voor 'Theoretisch Afzetbaar Calcium Carbonaatgehalte' bij een verwarming van het water tot 90 °C. Met de zogenaamde kookproef kan de praktische afzetbaarheid worden bepaald (PACC₉₀). De TACC₉₀ geeft een direct verband tussen de watersamenstelling enerzijds en de kalkafzettende eigenschappen van het water anderzijds. Klantonderzoek van WML heeft aangetoond dat de parameters TACC₉₀ en PACC₉₀ de sterkste correlatie vertonen met de mate van comfortbeleving van de klant (TACC₉₀ en PACC₉₀ laag, klanttevredenheid hoog). Lagere waarden voor de TACC₉₀ worden bereikt door niet alleen het calciumgehalte maar ook het waterstofcarbonaatgehalte verregaand te verlagen.
- *Corrosie Index (CI)*. Aantasting van gietijzeren leidingen treedt vooral op in watersoorten met een hoge waarde voor de CI. Omdat CI omgekeerd evenredig is met TAC (Totaal Anorganisch Carbonaat) kan deze een beperking opleggen aan de hoeveelheid te verwijderen bicarbonaat.
- *Koperoplossend vermogen*. Op basis van landelijk onderzoek heeft Kiwa een statistisch verband vastgesteld tussen het koperoplossend vermogen en waterkwaliteitsparameters als zuurgraad, waterstofcarbonaatgehalte en sulfaatgehalte. Het koperoplossend vermogen neemt af door verwijdering van bicarbonaat.

Kalkafzetting door microkristallen (pelletontharding)

In tegenstelling tot kationwisseling kan pelletontharding leiden tot vorming van microkristallen. Als deze in de korrelreactor gevormde microkristallen niet voldoende door nageschakelde carry-over-filters worden verwijderd ontstaan er problemen met kalkafzetting in het distributiegebied. Om microkristallen effectief te verwijderen is op sommige pompstations dubbellaagsfiltratie en vlokmiddeldosering noodzakelijk. Om kalkafzetting door na-ontharding te beperken kan aan het ontharde water een geringe hoeveelheid zuur worden toegevoegd.

Natrium (pelletontharding natronloog, sterkzure kationwisseling in Na-vorm)

Met gebruik van onthardingschemicaliën (NaOH, Na₂CO₃) of sterkzure kationwisseling in de Na-vorm wordt de natriumconcentratie verhoogd (norm < 120 mg/l). Oriënterende berekeningen geven aan dat het natriumgehalte voor mensen met een licht natrium beperkt dieet lager moet zijn dan circa 100 mg/l en voor mensen met een sterk respectievelijk matig natrium beperkt dieet zelfs lager dan 25 tot 50 mg/l. Indien het drinkwater hoge natriumgehalten bevat, zijn deze mensen aangewezen op het gebruik van flessenwater. Van de totale bevolking heeft ongeveer 2% een licht natrium beperkt dieet en ongeveer 0,3% een sterk of matig natrium beperkt dieet.

Magnesium (kationwisseling, nanofiltratie)

Verlaging van de magnesiumconcentratie is een aandachtspunt bij zowel kationwisseling als nanofiltratie, omdat beide technieken aselectief ontharden. Magnesium zit relatief weinig in onze dagelijkse voeding. De hoeveelheid magnesium in het drinkwater wordt daarom bij voorkeur niet verlaagd. Dit is gebaseerd op een advies van de Gezondheidsraad uit 1982, waarin staat dat magnesium in de hoeveelheden waarin het in het water wordt aangetroffen een nuttig mineraal is.

4.2 Bedrijfsvoeringsaspecten

Personele inzet

De focus van de systeemvergelijking ligt bij de pompstations met kleine zuiveringscapaciteit, die in relatief veel gevallen onbemand zal zijn. Verregaande automatisering en procesbewaking op afstand is voor alle systemen mogelijk, zij het dat de aanwezigheid van een bedrijfsvoerder bij diverse bedrijfsprocessen gewenst blijft. Deze aanwezigheid kan variëren van gemiddeld 1 uur per dag tot 30 uur per week op reguliere werkdagen en werktijden. Naast visuele controle van relevante bedrijfsvoeringsparameters (bedhoogte, korreldiameters, tijdsduur van de pelletaftap, etc.) zijn bedrijfsvoerders in het algemeen belast met de chemicaliën- en reststoffen-handling ter plaatse (controle van de aangevoerde chemicaliën, toezicht bij laden/lossen etc.).

Uitgaande van een gelijke mate van automatisering van de systemen is de procescomplexiteit maatgevend voor het aantal metingen voor procesbewaking (hetzij ter plaatse, hetzij vanuit een centraal bedrijfsvoeringscentrum). De procesbewaking is voor de eenvoud van de kostenvergelijking aangenomen als onafhankelijk van capaciteit en onthardingsdiepte, namelijk 1.000 meting voor pelletontharding (gem. 20 uur per week) en 500 uur voor kationwisseling en nanofiltratie (gem. 10 uur per week). Met andere woorden is de inschatting dat pelletontharding orde tweemaal zo arbeidsintensief is als kationwisseling en nanofiltratie.

Daarnaast is het aantal logistieke bewegingen onderscheidend voor wat betreft de personele inzet. Voor de kostenberekening is uitgegaan van 2 metingen per logistieke beweging. Uitgaande van de gegevens in Bijlage I, waarin een voorbeeld is opgenomen van een installatie met een capaciteit van 3,0 Mm³/j met een onthardingsdiepte van 1,5 mmol/l, blijkt de personele inzet op dit punt te variëren: van 100 uur per jaar (gem. 2 uur per week) voor pelletontharding en kationwisseling in de H-vorm, 50 uur per jaar (gem. 1 uur per week) voor sterkzure kationwisseling in Na-vorm tot nauwelijks tijdsbesteding bij nanofiltratie.

Onderhouds- en storingsgevoeligheid

Bij pelletontharding doen zich in verhouding tot de andere systemen relatief veel technische en operationele problemen voor. Daarbij is een natronlooginstallatie in het algemeen eenvoudiger dan een kalkmelk installatie, waardoor onderhouds- en storingsgevoeligheid lager is. De tijd die nodig is voor onderhoud van pelletontharding met natronloog varieert van 1 tot 10 metingen per week [Merks, 1995]. De tijd die nodig is voor onderhoud van pelletontharding met kalkmelk varieert tussen de 3 en 17 metingen per week [Merks, 1995]. Aandachtspunten bij het onderhoud zijn het controleren en iken van meetapparatuur, het verhelpen van verstoppingen van afsluiters in afvoerleidingen van onthard water door kalkafzetting en het reinigen van de kalkmelkinstallatie/natronlooginstallatie. De buitenbedrijfstelling voor

grote onderhoudsacties aan de reactor en reactorbodem varieert in tijdsduur van 1 tot 2 weken per jaar, afhankelijk van het bodemtype.

Ionenwisseling en nanofiltratie zijn qua onderhoudsbehoefte in vergelijking met pelletontharding arbeidsextensief. Hoewel hierover geen exacte gegevens bekend zijn, is dit het beeld dat wordt verkregen vanuit de eerste inventarisatiefase van deze studie. Voor dit project is de inschatting dat periodieke onderhoudsacties beperkt kunnen blijven tot gem. 2 uur per week.

Flexibiliteit

De flexibiliteit in capaciteit van ionenwisseling is groot ten opzichte van pelletontharding en nanofiltratie. De belasting van de ionenwisselaar is relatief vrij te kiezen. Bij pelletontharding en nanofiltratie is sprake van een minimum- en maximumbelasting. Voor pelletontharding is het optimale bereik waarbinnen een goede bedrijfsvoering mogelijk is, zonder risico van het optreden van een vast bed of van een hoog chemicaliëngebruik, 70-100 m/h. Grotere variaties in productie worden bij pelletontharding gerealiseerd door het percentage by-pass aan te passen en/of door in- en uitschakelen van een reactor. Ook bij nanofiltratie is er sprake van een duidelijk bereik (in verband met concentratiepolarisatie), waarbij grotere productievariaties kunnen worden ondervangen door recirculatie en/of in- en uitschakelen van een straat.

4.3 Duurzaamheidsaspecten

Waterverbruik

Het eigen waterverbruik van nanofiltratie is relatief hoog (15-20% van de deelstroom). Het waterverbruik van kationwisseling varieert van 0,5-5% van de behandelde deelstroom. De waterverliezen bij pelletontharding zijn minimaal (transportwater, aanmaakwater, sperwater).

Energieverbruik

Van de beschouwde systemen is het energieverbruik van nanofiltratie verreweg het hoogst (0,2 – 0,4 kWh/m³). Het energieverbruik van ionenwisseling is lager dan dat van pelletontharding (0,04 – 0,06 kWh/m³) door een lagere opvoerhoogte en een kleinere deelstroom.

Chemicaliënverbruik

Het chemicaliënverbruik van de verschillende systemen is weergegeven in Tabel 4-1. Naast de onthardingschemicaliën worden tevens chemicaliën gebruikt voor pH-correctie (zuurdosering op effluent van pelletontharding), voor scalingpreventie (dosering zuur en/of antiscalants nanofiltratie) en reiniging (nanofiltratie).

Tabel 4-1: Chemicaliënverbruik bij hardheidsreductie van 1 mmol/l (exclusief chemicaliën t.b.v. pH-correctie, scalingpreventie en reiniging)

Systeem	Chemicalie	Vebruik t.o.v. stoichiometrie	mmol/l	g/m ³
Pelletontharding	Ca(OH) ₂	110%	1,10	82
Pelletontharding	NaOH	110%	1,10	44
Sterkz. kationw.	NaCl	150%	3,00	176
Sterkz. kationw.	HCl	150%	3,30*	121
Zwakz. kationw.	HCl	110%	2,20	81
Nanofiltratie	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

*ook Na wordt uitgewisseld (gesteld dat er 20 mg/l in het water aanwezig was)

Reststoffen

Bij alle systemen komen reststoffen vrij die verschillen in aard (van pellets bij pelletontharding tot zoute waterstromen bij kationwisseling en nanofiltratie) en omvang (15-20% concentraat tot 0,5-5% regeneraat)¹².

Transportbewegingen

Het aantal logistieke bewegingen varieert sterk per techniek. In Tabel 4-2 zijn de transportbewegingen per jaar weergegeven die benodigd zijn voor behandeling van 1 Mm³/j bij een reductie van hardheid van 1 mmol/l. De gegevens voor pelletontharding zijn afkomstig uit de inventarisatie uit Bijlage III van dit rapport.

Tabel 4-2: Transportbewegingen per jaar voor 1 Mm³/j bij hardheidsreductie van 1 mmol/l

Systeem	Chemicalie	Aanvoer chemicaliën	Aanvoer entzand	Afvoer pellets	TOTAAL
Pelletontharding	Ca(OH) ₂	5	1	5	11
Pelletontharding	NaOH	5	1	5	11
Sterkz. kationw.	NaCl	6	n.v.t.	n.v.t.	6
Sterkz. kationw.	HCl	13	n.v.t.	n.v.t.	13
Zwakz. kationw.	HCl	9	n.v.t.	n.v.t.	9
Nanofiltratie	n.v.t.	4	n.v.t.	n.v.t.	4

¹² Voor een zuivere systeemvergelijking moet de reststoffenproblematiek (regeneraatverwerking) meegenomen worden in de afweging. Vanwege de urgentie van deze problematiek is hiervoor een aparte (vervolg)deelstudie gedefinieerd [Sieggers, 2004]

5 Enkele cases uit de praktijk

Als illustratie van de praktische toepasbaarheid van dit rapport is in Bijlage IV een aantal cases opgenomen. Deze cases tonen aan dat de systeemkeuze per situatie anders kan uitvallen:

1. PS Hunsel (Waterleiding Maatschappij Limburg), waar zwakzure kationwisseling een aantrekkelijk alternatief is voor pelletontharding met kalkmelk.
2. PS Herten (Waterleiding Maatschappij Limburg), waar zwakzure kationwisseling een aantrekkelijk alternatief is voor pelletontharding met kalkmelk.
3. PS Varsseveld (Vitens), waar nanofiltratie de beste kwaliteit tegen een concurrerende kostprijs geeft.
4. PS Macharen (Brabant Water), waar pelletontharding met kalkmelk de meest haalbare optie lijkt te zijn.

Tabel 5-1: Overzicht van cases

Case	Cap. PS (m ³ /h)	Onthard. traject (dTH)	Piek-factor (-)	Carry-over filtratie?	Aanbeveling
Hunsel (WML)	500 Hoog	1,3 Gem.	1,7 Gem.	Ja	kationwisseling
Herten (WML)	300 Gem.	1,0 Gem.	3 Hoog	Nee	kationwisseling
Varsseveld (Vitens)	120 Laag	2,0 Hoog	1,4 Gem.	Ja	nanofiltratie
Macharen (BW)	650 Hoog	1,0 Gem.	1,4 Gem.	Nee	pelletontharding

Met behulp van Tabel 5-1 kan een aantal generieke conclusies getrokken worden ten aanzien van de systeemkeuze:

- Indien bij toepassing van pelletontharding ook een carry-overfiltratie gebouwd moet worden dan zijn de alternatieven relatief aantrekkelijk (Hunsel en Varsseveld). Naarmate het onthardingstraject groter is, wordt nanofiltratie een aantrekkelijker alternatief (Varsseveld).
- Bij een hoge piekfactor, ofwel een lage bezetting van de installatie en dus een lage dekking van de kapitaallasten, is kationwisseling het goedkoopste alternatief (Herten).
- De toepassingsmogelijkheden van kationwisseling zijn in de praktijk beperkt, omdat bij sterkzure kationwisseling in Na-vorm geen bicarbonaat verwijderd wordt (alle cases), of omdat bij zwakzure kationwisseling te veel bicarbonaat verwijderd wordt (Varsseveld, Macharen). Dit betekent: óf sterkzure kationwisseling in Na-vorm combineren met decarbonisatie óf parallele zwakzure en sterkzure kationwisseling toepassen.

6 Conclusies

6.1 Economische haalbaarheid

De komende jaren moet in Nederland op een aantal lokaties nog ontharding van drinkwater worden gerealiseerd. Het gaat daarbij om kleinschalige toepassingen (kleiner dan 3 miljoen m³/j).

In deze studie is bepaald waar het economische omslagpunt ligt van de alternatieve systemen die voor ontharding kunnen worden aangewend, namelijk pelletontharding, ionenwisseling en nanofiltratie. Indien de verwerking van reststoffen (concentraat en regeneraat) buiten beschouwing wordt gelaten, dan hebben de drie beschouwde technologieën ieder een duidelijk afgebakend toepassingsgebied:

- Voor zeer kleine capaciteiten (< 0,5 Mm³/j) in combinatie met relatief hard water (TH > 3 mmol/l) is nanofiltratie de aantrekkelijkste techniek.
- Voor relatief grote capaciteiten (> 1,5 Mm³/j) in combinatie met hard water (TH > 4 mmol/l) is pelletontharding de aantrekkelijkste optie.
- Voor water met relatief lage hardheid is kationwisseling een aantrekkelijk alternatief.

Uiteraard dient de verwerking van met name concentraat en regeneraat wel meegenomen te worden in de economische afweging. Vanwege het belang van deze problematiek is hiervoor een aparte (vervolg)deelstudie uitgevoerd¹³. Het kostprijsniveau van regeneraat- en concentraatverwerking ligt maximaal in de range 5-10 €/m³. Wordt dit kostprijsniveau gehanteerd, dan blijkt er nog steeds een duidelijk toepassingspotentieel voor ionenwisseling te bestaan. Bij zeer kleine capaciteiten is ionenwisseling een aantrekkelijk alternatief voor pelletontharding, ongeacht de hardheid. Bij de grotere capaciteiten (3-4 Mm³/j) geldt dit alleen als de hardheid relatief laag is (TH < 2,5 mmol/l).

Lokale omstandigheden kunnen aanleiding zijn tot een andere economische afweging. Indien voor inpassing van pelletontharding ook nieuwbouw van carry-over-filters noodzakelijk is, dan valt de economische afweging gunstig uit in de richting van kationwisseling. Ook in situaties van onzekere afzet (of hoge piekfactoren), dreigende sluiting etc. is ionenwisseling relatief aantrekkelijk, omdat deze techniek kapitaalextensief ten opzichte van pelletontharding en nanofiltratie.

¹³ Siegers, 2004

6.2 Afweging overige criteria

Kwaliteit

De economische afweging kan niet los worden gezien van de kwaliteitsaspecten. De kwaliteit is vaak richtinggevend en randvoorwaardescheppend. Een voorbeeld hiervan is de gewenste decarbonisatie. De toepassingsmogelijkheden van kationwisseling zijn in de praktijk beperkt, omdat bij sterkzure kationwisseling in Na-vorm geen bicarbonaat verwijderd wordt en omdat bij zwakzure kationwisseling te veel bicarbonaat verwijderd wordt. In feite bestaat er geen passend alternatief voor pelletontharding met natronloog, tenzij relatief dure combinaties worden toegepast (parallel sterkzuur-zwakzuur, of sterkzuur-zuurdosering). Ook de toevoeging van natrium (pelletontharding met natronloog, sterkzure kationwisseling in Na-vorm) en verwijdering van magnesium (ionenwisseling, nanofiltratie) kunnen een beperking vormen voor de toepassingsmogelijkheden van de verschillende systemen.

Een kwaliteitsvoordeel van ionenwisseling en nanofiltratie ten opzichte van pelletontharding is dat er niet op basis van oververzadiging wordt onthard. Hierdoor zal er geen probleem ontstaan van precipitatie in het leidingnet door microkristallen en/of na-ontharding.

Bedrijfsvoering

Voor wat betreft bedrijfsvoering in termen van personele inzet, storingsgevoeligheid en flexibiliteit komt in een eerste kwalitatieve analyse ionenwisseling gunstig uit ten opzichte van pelletontharding, en in mindere mate ook ten opzichte van nanofiltratie. Op dit punt zou een nadere inventarisatie van praktijkervaringen met industriële ionenwisselingstoepassingen uitgevoerd moeten worden om dit aspect nader te onderbouwen.

Duurzaamheid

Op duurzaamheidsaspecten - zoals water- en energieverbruik, chemicaliën, reststoffen en transportbewegingen - geeft de vergelijking een negatiever beeld van kationwisseling. Deze techniek combineert van de andere systemen de slechte punten: een hoog chemicaliënverbruik (als bij pelletontharding) en een zoute reststroom (als bij nanofiltratie).

7 Literatuur

- Brink, H. (1997): "Criteria voor de watersamenstelling na conditioneren bij WML". Kiwa Water Research KOA 97.154.
- DHV (2000): "Handboek kosten: Kleinschalige waterbehandeling".
- DHV (2002): "Standaardisatie van kosten: Drinkwater".
- Dijk, J.C. van; Wilms, D.A. (1991); "Water treatment without waste material – fundamentals and state of the art of pellet softening". J Water SRT-Aqua Vol.40, nr. 5, p. 263-280.
- Graveland, A.; Prinsen Geerligs, W.L.; Soleman, M.A.A. (1973): "Centrale hardheidskorrektie door kristallisatie". H₂O, nr. 15.
- Hoeijmakers, A.J.P. (1998): "Milieugerichte levenscyclusanalyse ontharding Zuid-Limburg: wat mag comfort kosten?".
- Houwelingen, G.A. van; Nooijen, W.F.J.M. (1993): "Water softening by crystallization recovers its costs". DHV 9.1.21.
- Kappelhof, J.W.N.M.; Nederlof, M.M.; Brink, H. (1997): "Keuze ontwerptraject lokatie West (WML) Reductie nitraat en hardheid". Kiwa Water Research KOA 97.027.
- Merks, C.W.A.M.; Nederlof, M.M. (1995): "Stand van zaken ontharden in korrelreactoren in Nederland". Kiwa Water Research SWE 95.001.
- Riemersma, M.C.; Post, J.W.; Siegers, W.G. (2004): "Ionenwisseling als alternatief voor korrelreactoren en andere toepassingen". Kiwa Water Research/DHV. BTO 2004.019.
- Ruhland, A.; Jekel, M. (2004): "Aspekte bei der Wahl von Verfahren der zentralen Trinkwasserenthärtung". GWF-Wasser/Abwasser, nr. 3.
- Siegers W.G. (2003): "Overzicht van de korrelreactoren in Nederland". Kiwa Water Research KWR 02.087.
- Siegers W.G.; Bernhardt, L.; Post, J.W.; Riemersma, M.C. (2004): "Mogelijkheden voor hergebruik van de regeneratievloestof en reguleringen voor lozingen". Kiwa Water Research/DHV. BTO 2004.066
- Wessels, L.P. (1999): "Ionenwisseling voor verwijdering van nitraat; vergelijking met andere technieken"; DHV memo, 2 augustus 1999.

I Methode kostenramingen

I.1 Investerings

In de economische vergelijking zal allereerst worden beschouwd hoe hoog de benodigde investeringen zijn. De investeringen omvatten de totale kosten, die gemaakt worden om een installatie te realiseren. Deze totale kosten kunnen worden onderverdeeld volgens NEN 2631:

- grondkosten
- bouwkosten
- inrichtingskosten
- voorbereidings- en begeleidingskosten
- bouwrente

Bouwkosten

Met name de bouwkosten zijn voor de verschillende systemen onderscheidend. Deze bouwkosten zijn opgebouwd uit de bouwkosten voor de civieltechnische werken, de werktuigbouwkundige installaties en de elektrotechnische installaties. De bouwkostenfuncties die in dit project zijn gebruikt, zijn zoveel mogelijk gebaseerd op referenties van gerealiseerde projecten. Daarnaast is geput uit beschikbare literatuurgegevens, offertes en detailramingen. De bouwkostenfuncties zijn weergegeven in Bijlage 2.

Grondkosten

Het ruimtebeslag van de verschillende systemen is van invloed op de grondkosten. Daar deze van project tot project sterk variëren, afhankelijk van de noodzaak nieuwe grond te kopen, worden de grondkosten buiten beschouwing gelaten.

Overige kosten

De overige kostenposten zijn in mindere mate afhankelijk van het toegepaste systeem. De inrichtingskosten zijn lokatie- en bedrijfsspecifiek. De voorbereidings- en begeleidingskosten hangen voornamelijk af van de gekozen contractvorm. Ook de bouwrente (het renteverlies tijdens de bouw) is niet onderscheidend voor de verschillende systemen.

Staartkosten

Ten behoeve van de systeemvergelijking wordt voor de investeringsopzet gebruik gemaakt van de DHV-kostenstandaard. Uitgangspunt is uitvoering volgens de 'klassieke methode' (geen turn-key, maar constructieve detaillering civiel/bouwkunde door de adviseur).

Uit Tabel 7-1 blijkt dat de zogenaamde 'staartkosten' voor installaties (dat wil zeggen: de kosten die gemaakt worden bovenop de bouwkosten) 37 % van de bouwkosten bedragen.

Tabel 7-1: Opzet staartkosten [DHV kostenstandaard]

Onvoorzien	5,0	%	
Inrichtingskosten	2,0	%	<i>van de bouwkosten</i>
Vorbereiding en uitvoering	20,0	%	<i>van de bouwkosten + inrichtingskosten</i>
Overige bijkomende kosten	2,0	%	<i>van de bouwkosten + inrichtingskosten</i>
Bouwrente	6,0	%	<i>van de bouwkosten</i>

I.2 Exploitatiekosten

De exploitatiekosten omvatten alle kosten die een opdrachtgever heeft om de installatie in stand te houden en te bedrijven (incl. kapitaalslasten). Deze vormen naast de investeringen een belangrijke parameter om de vergelijking op te baseren.

De exploitatiekosten worden volgens de DHV-kostenstandaard als volgt onderverdeeld.

Vaste kosten

Vaste kosten zijn de kosten die verbonden zijn aan het hebben van onroerend goed (installaties). De vaste kosten bestaan voornamelijk uit de rente en afschrijving over de kosten voor verwerving van de bouwgrond (alleen rente, maar in dit project buiten beschouwing gelaten), de bruto bouwkosten civiele werken, de bruto bouwkosten werktuigbouwkundige installaties, de bruto bouwkosten elektrotechnische installaties en de bruto inrichtingskosten. Vergelijking op vaste kosten is – naast vergelijking op investeringen – relevant, omdat voor de verschillende disciplines verschillende afschrijftermijnen worden gehanteerd, zoals weergegeven in Tabel 7-2. Voor de berekening van de vaste kosten wordt gebruik gemaakt van annuïteiten.

Tabel 7-2: Afschrijftermijnen disciplines en specifieke materialen

rentevoet (reëel)	6,0	%	annuïteit
CT	30	jaar	0,07265
WTB	15	jaar	0,10296
ET	15	jaar	0,10296
Membranen	5	jaar	0,23740
Hars	10	jaar	0,13587

Verbruikskosten

Vergelijking op verbruikskosten is relevant, omdat deze kosten kenmerkend zijn voor de verschillende systemen. De verbruikskosten zijn de kosten voor verbruiksgoederen. Hieronder worden alle goederen verstaan die specifiek voor de verschillende processen worden verbruikt. Hiertoe behoren ook de vervangingen van procesonderdelen (bijv. membranen). In het volgende overzicht zijn de verbruikskosten weergegeven die in het kader van dit project relevant zijn.

-	energie en water
-	chemicaliën
•	zuren (HCl, H ₂ SO ₄)
•	basen (NaOH, Ca(OH) ₂ , Na ₂ CO ₃)
•	zout (NaCl)
-	overige verbruiksgoederen
•	entzand ontharding
•	harsbed vervanging
•	membraanvervanging
-	afvoer afvalstoffen
•	afvoer onthardingskorrels
•	verwerking/afvoer regeneraat ionenwisseling
•	verwerking/afvoer concentraat membraanfiltratie
•	afvoer overige afvalstoffen (o.a. rioolheffingen)
-	grondwaterbelasting

Tot de verbruiksgoederen worden niet de algemene onderhoudsstoffen gerekend (verf, smeerolie, gereedschappen e.d.). Deze worden verdisconteerd in de onderhoudskosten.

De prijzen voor de verbruiksgoederen en afvalstoffen zijn sterk afhankelijk van lokale omstandigheden. Van belang is hierbij bijvoorbeeld de grootte en de afname (bulktransport, kwantumkorting) en de afstand tot de productielocaties c.q. stortlocaties (transportkosten). De eenheidsprijzen die in dit project gehanteerd worden, zijn weergegeven in Tabel 7-3.

Tabel 7-3: Eenheidsprijzen verbruiksgoederen

water	0,1700	€/m ³	gw-belasting
energie	0,0800	€/kWh	KWR 02.087
HCl	0,0150	€/m ³ per mmol/l dosering	DHV kostenstandaard
NaOH	0,0150	€/m ³ per mmol/l dosering	KWR 02.087
Ca(OH) ₂	0,0100	€/m ³ per mmol/l dosering	KWR 02.087
Na ₂ CO ₃	0,0300	€/m ³ per mmol/l dosering	DHV kostenstandaard
NaCl	0,0146	€/m ³ per mmol/l dosering	DHV kostenstandaard
Entzand	0,0015	€/m ³ per mmol/l NaOH	KWR 02.087
Entzand	0,0013	€/m ³ per mmol/l Ca(OH) ₂	KWR 02.087

Zoals reeds genoemd in paragraaf 2.4 vormt de afvoer van reststoffen een op zichzelf staande studie. De hieraan gekoppelde kosten zijn dan ook maar ten dele meegenomen, zie Tabel 7-4.

Tabel 7-4: Verwerkingskosten afvalstromen

Pelletafvoer	0,0040	€/m3 per mmol/ NaOH	KWR 02.087
Pelletafvoer	0,0040	€/m3 per mmol/l Ca(OH) ₂	KWR 02.087
Lozing concentraat	0,00	€/m3 concentraat	nader te bepalen
Lozing regeneraat	0,00	€/m3 regeneraat	nader te bepalen

Onderhoudskosten

De onderhoudskosten omvatten alle kosten voor onderhoud, inclusief het herstellen en vervangen van onderdelen van installaties, binnen de afschrijvingstermijn, voor wat betreft deze niet als verbruiksgoederen zijn opgenomen. De onderhoudskosten per jaar worden berekend als percentage van de bouwkosten. De civieltechnische, mechanische en elektrotechnische delen vereisen in verschillende mate onderhoud. Daarom worden hiervoor verschillende percentages gehanteerd, zie Tabel 7-5.

Tabel 7-5: Onderhoudskosten

CT	0,50	% van bouwkosten CT / B	DHV kostenstandaard
WTB	2,00	% van bouwkosten WTB	DHV kostenstandaard
ET	4,00	% van bouwkosten E	DHV kostenstandaard
Inrichtingskosten	10,00	% van bouwkosten inrichting	DHV kostenstandaard

Administratieve beheerskosten

De administratieve beheerskosten zijn de kosten van de administratie, uitsluitend met betrekking tot het beheer van de installatie. Deze kosten worden in dit project als een vast percentage, zijnde 20%, opgezet op de directe personele bedieningskosten (zie *Specifieke bedrijfskosten*).

Specifieke bedrijfskosten

De specifieke bedrijfskosten omvatten de kosten voor bediening (personeel) en kwaliteitsbewaking (analysekosten en procesoptimalisatie). Voor de systeemvergelijking is een analyse gemaakt van bedrijfsvoeringservaringen. Een nadere onderbouwing per systeem vindt plaats in Bijlage II. In Tabel 7-6 is ter illustratie een raming van de bedrijfsvoeringsuren gegeven. Voor de kostenraming wordt uitgegaan van 1.600 manuren per FTE en personele kosten van € 55.000 per jaar.

Tabel 7-6: Bedrijfsvoeringsuren per systeem bij ontharding van watertype 1 van 3,0 mmol/l naar 1,5 mmol/l, met een totale capaciteit van pompstation van 3,0 Mm³/j

Gem. tijdbesteding	pellet Ca(OH) ₂	pellet NaOH	sterkz. Na	sterkz. H	zwakz. H	Nanofiltratie
Procesbeheersing	1.000	1.000	500	500	500	500
Onderhoud	500	250	100	100	100	100
Bedrijfsvoeringsuren	1.500	1.250	600	600	600	600
Transportbeweginger	47	47	26	55	40	4
Laad/losduur	2	2	2	2	2	2
Bedrijfsvoeringsuren	95	95	53	110	80	8
Storngen per jaar	30	10	5	5	5	5
Storingsduur	3	6	3	3	3	3
Storingsmedewerker	2	2	2	2	2	2
Bedrijfsvoeringsuren	180	120	30	30	30	30
Totaal uren	1.775	1.465	683	740	710	638
FTE	1,1	0,9	0,4	0,5	0,4	0,4

Deze bedrijfsvoeringsuren zijn voor een deel onafhankelijk van de capaciteit en het onthardingstraject. Voor dit project is alleen de begeleiding van de transporten variabel gesteld. De overige bedrijfsvoeringskosten (procesbeheersing, onderhoud en storingsverhelping) zijn derhalve niet afhankelijk van de capaciteit en het onthardingstraject.

II Kostenfuncties

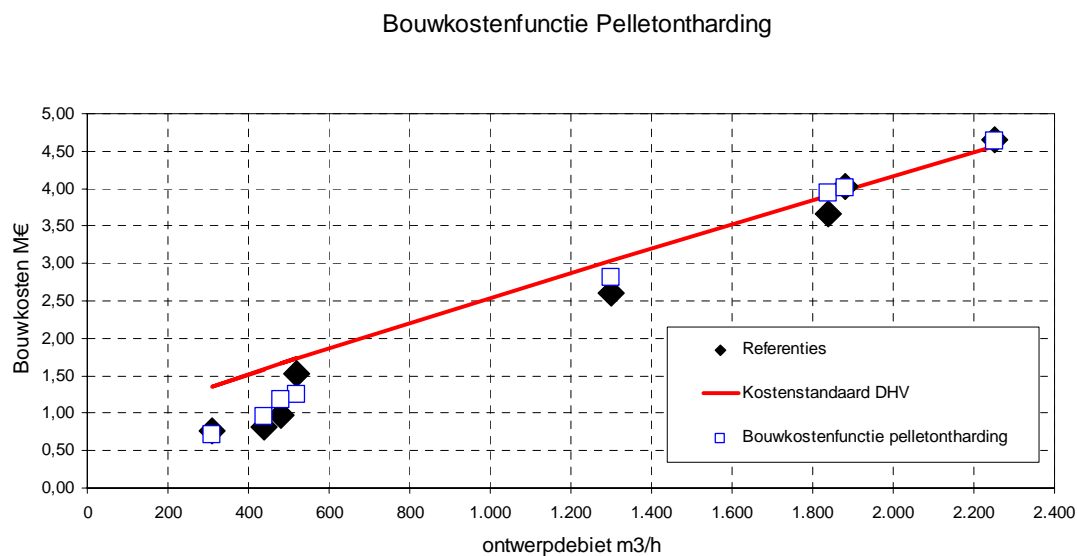
II.1 Pelletontharding

Bouwkosten pelletontharding

Voor een inschatting van de bouwkosten in M€ van pelletontharding wordt gebruik gemaakt van een bouwkostenfunctie, waarbij het ontwerpdebiet (Q) en het aantal reactoren (n) als kostenbepalende parameters zijn gekozen:

$$BK_{\text{pelletontharding}} = 0,291 \cdot n \cdot \left(\frac{Q}{100 \cdot n} \right)^{0,80}$$

Deze functie is tot stand gekomen aan de hand van 9 referentieprojecten in Nederland en België, zie Figuur 1. De nauwkeurigheid van de bouwkostenfunctie ten opzichte van deze referenties is +/- 20%. In Figuur 1 is tevens de DHV-kostenstandaard weergegeven. De kostenfunctie wijkt voor grotere capaciteiten nauwelijks af van deze kostenstandaard, maar is voor kleinere projecten die buiten het bereik van deze kostenstandaard liggen, nauwkeuriger.



Figuur 1: Bouwkostenfunctie ten opzichte van referentieprojecten en DHV-kostenstandaard

De verdeling over de disciplines is gemiddeld 40% CT, 50% WTB en 10% E.

inbegrepen in functie	: reactoren, incl. regelapparatuur en besturing
	: leidingwerk en appendages
	: voedingspompen
	: opslag- en doseervoorzieningen chemicaliën, incl. pelletopslag, entzandopslag, entzandwasser etc.
	: gebouwwolume
	: energievoorzieningen
	: algemene voorzieningen (verlichting, verwarming, koeling, ventilatie)
niet inbegrepen	: entzand

Uiteraard zijn de bouwkosten voor pelletontharding in werkelijkheid niet alleen afhankelijk van capaciteit en aantal reactoren, maar ook van specifieke ontwerpkeuzen, zoals:

- de toegepaste onthardingschemicalie (aanmaakvoorzieningen, doseerinrichting);
- de uitvoeringsvorm van de reactoren (spiractor, flappenbodem, doppenbodem);
- de hoogte van de reactoren (afhankelijk van onthardingschemicalie);
- de ruimte in het gebouw en het architectonisch ontwerp.

Deze aspecten zijn voor de eenvoud buiten beschouwing gelaten.

Bedrijfsvoeringskosten pelletontharding

verbruiksgoederen

Eenheidsprijzen van verbruiksgoederen zijn reeds weergegeven samengevat in Bijlage I. De achterliggende analyse op basis van Kiwa-rapport KWR 02.087 is opgenomen in Bijlage III. Voor de dosering van onthardingschemicaliën is uitgegaan van een overmaat van 10% ten opzichte van de stoichiometrische verhouding (dat wil zeggen dat 1,1 mmol/l base wordt gedoseerd voor de verwijdering van 1 mmol/l Ca).

transportbewegingen

Het aantal transportbewegingen is eveneens geanalyseerd aan de hand van dit rapport. Uit Bijlage III blijkt dat voor pelletontharding met kalkmelk gemiddeld jaarlijks 11 transportbewegingen benodigd zijn per Mm³ onthard water per mmol/l hardheidsreductie, variërend van 9-19 transporten per jaar. Voor pelletontharding met natronloog is het aantal transportbewegingen jaarlijks gemiddeld 10 per Mm³ onthard water per mmol/l hardheidsreductie, variërend van 7-12 transporten per jaar.

personele inzet

De personele inzet is gebaseerd op Kiwa-rapport SWE 95.001. De bedrijfsvoering (controle en regeling) bedraagt gemiddeld 10 uur per week (variërend van 1-30 uur per week)¹⁴. De onderhoudsinspanning van een onthardingsinstallatie met kalkmelk bedraagt gemiddeld 10 uur per week (variërend van 3-17 uur per week), die van een installatie met natronloog gemiddeld 5 uur per week (variërend van 1-10 uur per week)¹⁵. Voor storingsverhelping wordt voor pelletontharding met kalkmelk gerekend met 30 storingen per jaar (variërend van 1-50 per jaar)¹⁶ met een gemiddelde personele inzet van 2 medewerkers gedurende 3 uur. Voor storingsverhelping wordt voor pelletontharding met kalkmelk gerekend met 10 storingen per jaar (variërend van 1-10 per jaar)¹⁷ met een gemiddelde personele inzet van 2 medewerkers gedurende 6 uur.

Voor het begeleiden van transporten (laden en lossen) is 2 uur per transport gerekend.

¹⁴ SWE 95.001, p.43

¹⁵ idem, p. 59

¹⁶ idem, p.60

¹⁷ idem, p.60

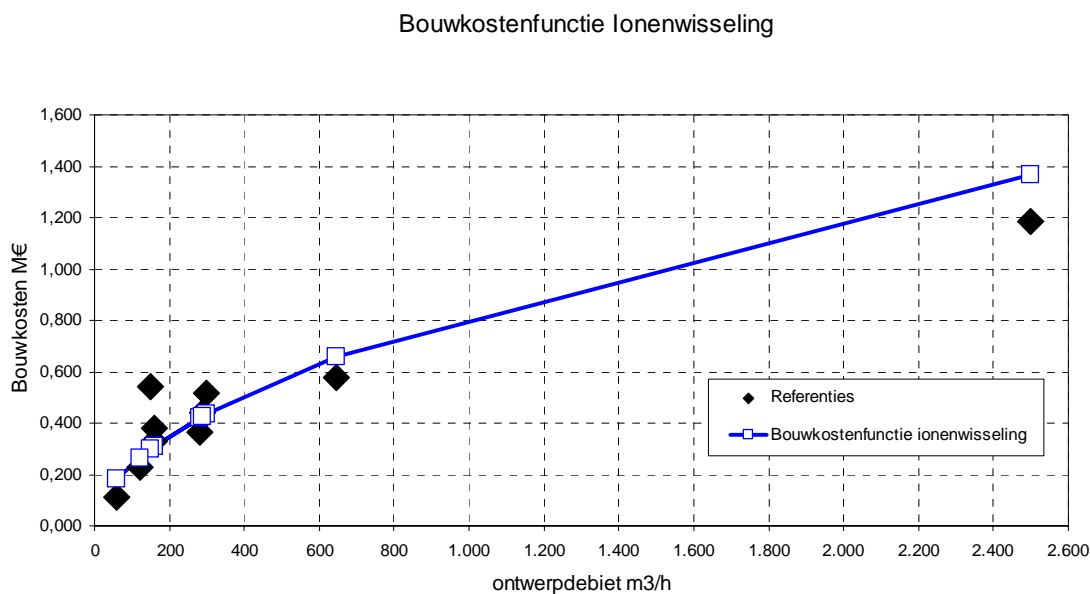
II.1 Ionenwisseling

Bouwkosten ionenwisseling

Voor een inschatting van de bouwkosten in M€ van ionenwisseling wordt gebruik gemaakt van een bouwkostenfunctie, waarbij het ontwerpdebiet (Q) is gekozen als kostenbepalende parameter:

$$BK_{\text{ionenwisseling}} = 0,02 \cdot Q^{0,54}$$

Deze functie is tot stand gekomen aan de hand van 10 industriële, Nederlandse referentieprojecten, Figuur 2. De aangeleverde referenties omvatten alleen de disciplines WTB en E. Voor de totale bouwkosten zijn de referenties gestandaardiseerd en vergelijkbaar gemaakt met de volgende verdeling over de disciplines: 23% CT, 60% WTB en 17% E. De nauwkeurigheid van de bouwkostenfunctie ten opzichte van deze gestandaardiseerde referenties is +/- 30%.



Figuur 2: Bouwkostenfunctie ten opzichte van referentieprojecten

inbegrepen in functie	: tanks, incl. regelapparatuur en besturing
	: waarvan standaard 1 tank in regeneratiemodus
	: leidingwerk en appendages
	: voedingspompen
	: opslag- en doseervoorzieningen regeneratiechemicaliën
	: gebouwwolume
	: energievoorzieningen
	: algemene voorzieningen (verlichting, verwarming, koeling, ventilatie)
niet inbegrepen	: hars
	: voor- en nazuivering (ontgassing)
	: regeneraatbehandeling

NB:

- De bouwkostenfunctie is exclusief hars (sterkzure kationhars à 2.000 €/m³, zwakzure kationhars à 5.000 €/m³).
- In de bouwkostenfunctie is rekening gehouden met de opstelling van één extra tank, omdat standaard gerekend moet worden met één tank in regeneratie. Met andere woorden: bij een ontwerpdebiet van 100 m³/h (invoer bouwkostenfunctie), wordt automatisch gerekend met 2+1 tanks van 50 m³/h (2 operationeel, 1 in regeneratie). Dit verklaart tevens het sterke schaafeffect, omdat bij grote installaties relatief weinig extra capaciteit behoeft te worden opgesteld (bijvoorbeeld geen 2+1 tanks, maar 5+1 tanks).
- Ontgassing is niet meegenomen. Voor kationwisselaars in de H-vorm moet gerekend worden met een ontgassingstap met een bouwkostenformule¹⁸:

$$BK_{\text{Ontgassing}} = 0,02 + 0,0003 \cdot Q$$

De verdeling tussen de disciplines is 45% CT, 50% WTB en 5% E.

¹⁸ Afgeleid van bouwkostenformule uit DHV-handboek Kosten Kleinschalige Waterbehandeling (2000), waarin kostenformule is gegeven voor het WTB/E-deel van industrieel opgezette ontgassing: BK (€) = 9.000 + 150 Q

Bedrijfsvoeringskosten ionenwisseling

verbruiksgoederen

Eenheidsprijzen van verbruiksgoederen zijn reeds weergegeven in Bijlage I.

Voor de regeneratie van sterkzure kationwisseling wordt gerekend met 50% overmaat ten opzichte van de stoïchometrische verhouding (dat wil zeggen dat 3 mmol/l NaCl of HCl wordt gedoseerd voor de verwijdering van 1 mmol/l Ca). In de praktijk varieert deze overmaat tussen 40-80%¹⁹.

Voor de regeneratie van zwakzure kationwisseling wordt gerekend met 10% overmaat ten opzichte van de stoïchometrische verhouding (dat wil zeggen dat 2,2 mmol/l NaCl of HCl wordt gedoseerd voor de verwijdering van 1 mmol/l Ca)²⁰.

transportbewegingen

Het aantal transportbewegingen is berekend aan de hand van het chemicalieverbruik.

Voor sterkzure kationwisselaars is het chemicalieverbruik gemiddeld 3 Mmol per Mm³ onthard water per mmol/l hardheidsreductie. Dit is gelijk aan 175,5 ton NaCl of 438 ton 30% HCl. Afhankelijk van de efficiency van de regeneratie kan het chemicalieverbruik per Mm³ onthard water per mmol/l hardheidsreductie variëren tussen 164-210 ton NaCl en 409-525 ton 30% HCl. Met een transport- en opslagcapaciteit van 30 ton per keer is het aantal vrachten NaCl per Mm³ onthard water per mmol/l gemiddeld 6 voor NaCl (variërend tussen 5-7) en voor HCl gemiddeld 15 (variërend tussen 13-18).

Voor een zwakzure kationwisselaar is het aantal HCl-transportbewegingen beperkt tot gemiddeld 11 per Mm³ onthard water per mmol/l hardheidsreductie.

personele inzet

De personele inzet voor bedrijfsvoering (controle en regeling) is ingeschat op gemiddeld 10 uur per week. De onderhoudsinspanning is ingeschat op gemiddeld 5 uur per week. Voor storingsverhelping wordt gerekend met 5 storingen per jaar met een gemiddelde personele inzet van 2 medewerkers gedurende 3 uur.

Voor het begeleiden van transporten (laden en lossen) is 2 uur per transport gerekend.

¹⁹ BTO 2004.019, p. 19

²⁰ idem

II.3 Nanofiltratie

Bouwkosten nanofiltratie

Voor een inschatting van de bouwkosten in M€ van nanofiltratie (NF) of lage druk RO wordt gebruik gemaakt van de bouwkostenfunctie uit het DHV-handboek Kosten Kleinschalige Waterbehandeling (2000), waarbij de bouwkostenfunctie is uitgebreid voor wat betreft het CT-deel en procesautomatisering.

$$BK_{\text{nanofiltratie}} = 0,028 + 0,00016 \cdot A$$

Hierin het membraanoppervlak (A) als variabele opgenomen. Gerekend wordt met een flux van 30 l/m².h. Voor de aanschaf van membraanmodules moet hierbovenop nog gerekend worden met 20 €/m².

De verdeling over de disciplines is als volgt: 35% CT, 50% WTB en 15% E.

inbegrepen in functie	:	stacks met drukvaten
	:	voedingpompen en cartridgfilters
	:	leidingwerk en appendages
	:	opslag- en doseervoorzieningen antiscalants
	:	reinigingsvoorzieningen (CIP-unit)
	:	gebouwwolume
	:	energievoorzieningen
	:	algemene voorzieningen (verlichting, verwarming, koeling, ventilatie)
niet inbegrepen	:	membranen
	:	voor- en nazuivering (ontgassing)
	:	concentraatbehandeling

Bedrijfsvoeringskosten nanofiltratie

verbruiksgoederen

Eenheidsprijzen van verbruiksgoederen zijn reeds weergegeven in Bijlage I. Meest opvallende verschil met pelletontharding en ionenwisseling is het relatief hoge energieverbruik. Gerekend wordt met 0,5 kWh/m³.

personele inzet

De personele inzet voor bedrijfsvoering (controle en regeling) is ingeschat op gemiddeld 10 uur per week. De onderhoudsinspanning is ingeschat op gemiddeld 5 uur per week. Voor storingsverhelping wordt gerekend met 5 storingen per jaar met een gemiddelde personele inzet van 2 medewerkers gedurende 3 uur.

III Inventarisatie bedrijfsvoering pelletontharding

Analyse bedrijfsvoeringskosten pelletreactoren

op basis van KWR 02.087 en interviews

1. EENHEIDSPRIJZEN

Reactoren met kalkmelk	Menskosten																						
	Hulp en afvalstoffen			Entzand			Afv. pellets			Energie			Onderhoud/storingen			Bedrijfsvoering			Totaal menskosten				
	(€)	(€/ton)	(€/m ³ 1mmol/l)	(€)	(€/ton)	(€/m ³ 1mmol/l)	(€)	(€/ton)	(€/m ³ 1mmol/l)	(€)	(€/m ³)	(€/kWh)	(kWh/m ³)	(€)	(hr/jr)	(€/h)	(FTE)	(FTE / min m ³ 1mmol/l)	(FTE / min m ³ 1mmol/l)				
Cothen	30.000	132	0,0097	10.000	132	0,0032				13.000	0,0068	0,0850	0,0805	17.500	701	25							
Zutphen	49.000	102	0,0076	8.200	42	0,0013	3.600	3	0,0006	4.600	0,0012	0,0850	0,0135	8.200	234	35	11.400	2,080	5	1,4	0,35	0,21	
Baanhoek	300.000	250	0,0185	12.000	288	0,0007	4.000	3	0,0002	205.000	0,0290	0,0700	0,4143	84.000	7.040	81	126.000	2,080	61	1,9	0,26	0,26	
Nietap	175.000	63	0,0046	42.000	314	0,0011	14.000	3	0,0004	377.000	0,0207	0,0850	0,2435	13.600	208	65	44.500	681	65	0,5	0,03	0,02	
Noordbergum	418.000	139	0,0103	6.300	223	0,0002				327.000	0,0207	0,0850	0,2435	13.600	208	65	44.500	681	65	0,5	0,03	0,02	
											0,3144	0,3143	0,1879	645									
											0,0404	0,0313	0,1879	645									

Reactoren met natronloog	Menskosten																						
	Hulp en afvalstoffen			Entzand			Afv. pellets			Energie			Onderhoud/storingen			Bedrijfsvoering			Totaal menskosten				
	(€)	(€/ton)	(€/m ³ 1mmol/l)	(€)	(€/ton)	(€/m ³ 1mmol/l)	(€)	(€/ton)	(€/m ³ 1mmol/l)	(€)	(€/m ³)	(€/kWh)	(kWh/m ³)	(€)	(hr/jr)	(€/h)	(FTE)	(FTE / min m ³ 1mmol/l)	(FTE / min m ³ 1mmol/l)				
Pompstation																							
Hendrik Ido Ambacht	10.500	88	0,0047	8.800	113	0,0017	8.600	179	0,0038	30.500	0,0078	0,0850	0,0921	3.300	42	79	12.370	208	59				
Nijmegen	64.100	307	0,0123	8.800	246	0,0025	1.400	2,8	0,0003	32.100	0,0078	0,0850	0,0921	3.300	42	79	6.900	260	27	0,2	0,04	0,04	
de Beitel	155.400	191	0,0077	51.000	246	0,0025	9.300	6	0,0005	45.700	0,0070	0,0700	0,1004	82.467	1.040	79	123.700	2,080	59	1,9	0,29	0,13	
Spanneburg	910.000	881	0,0352	4.500	373	0,0002				318.000	0,0207	0,0850	0,2435	10.000	126	79	22.700	382	59	0,3	0,03	0,01	
											0,3374	0,3775	0,3963	403									
											0,0604	0,0775	0,3963	403									

Analyse bedrijfsvoeringskosten pelletreactoren

op basis van KWR 02.087 en interviews

2. EFFECTIEVE INZET VAN DE INSTALLATIES

Reactoren met kalkmelk										
Pompstation	Aantal	Diameter per reactor	Oppervlak per reactor	Belasting per reactor	Maximale capaciteit	Jaarproductie 2001	Onthard waterstroom	By-pass waterstroom	Effectiviteit opgestelde hardware	
	(-)	(mm)	(m ²)	(m/h)	(m ³ /jaar)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	% max.	
Cothen	3	1.350	1,43	60	2.257.011	1.600.000	960.000	640.000	71	
Zutphen	2	1.750	2,41	100	4.214.050	1.900.000	1.900.000	0	45	
Baanhoek	3	1.900	2,84	70	7.451.129	4.000.000	4.000.000	0	54	
Nietap	4	2200	3,80	60	13.319.839	12.000.000	7.200.000	4.800.000	90	
IJzeren Kujlén	4	2.700	5,73	60	20.062.319	13.000.000	13.000.000	0	65	
Noordbergum	3	2.900	6,61	60	17.358.447	15.800.000	15.800.000	0	91	

Reactoren met natronloog										
Pompstation	Aantal	Diameter per reactor	Oppervlak per reactor	Belasting per reactor	Maximale capaciteit	Jaarproductie 2001	Onthard waterstroom	By-pass waterstroom	Effectiviteit opgestelde hardware	
	(-)	(mm)	(m ²)	(m/h)	(m ³ /jaar)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	% max.	
Hendrik Ido Ambacht	2	1.250	1,23	100	2.150.026	800.000	600.000	200.000	37	
Nijmegen	2	1.900	2,84	90	4.470.677	4.100.000	4.100.000	0	92	
de Beitel	3	2.490	4,87	70	12.797.159	6.500.000	6.500.000	0	51	
Spannenburg	12	1.890	2,81	60	31.860.938	13.100.000	10.873.000	2.227.000	41	

Analyse bedrijfsvoeringskosten pelletreactoren

op basis van KWR 02.087 en interviews

3. PELLETPRODUCTIE EN -TRANSPORT

Reactoren met kalkmelk Pompstation	Ca reductie					Opslagcapaciteit pellets en transportbewegingen per jaar			
	Opgave in rapport					(aantal)	(m ³ /stuk)	Aantal transporten per jaar	transporten per Mm ³ onthard per mmol/l
(mmol Ca /l)	CaCO ₃ prod. (ton /jaar)	Pelletprod. (ton /dag)	Pelletprod. (m ³ /dag)	Pelletprod. (m ³ /dag)					
Cothen	1,45	278	0,78	0,47	1	60	6	4,11	
Zutphen	1,40	532	1,67	1,01	1	35	12	4,62	
Baanhoek	1,70	1.360	4,26	2,58	2	32	31	4,62	
Nietap	1,00	1.440	4,06	2,46	3	10	90	12,47	
Iuzeren Kuijlen	2,00	5.200	14,61	8,86	1	60	108	4,14	
Noordbergum	1,70	5.372	14,80	8,97	1	85	109	4,06	

Reactoren met natronloog Pompstation	Ca reductie					Opslagcapaciteit pellets en transportbewegingen per jaar			
	Opgave in rapport					(aantal)	(m ³ /stuk)	Aantal transporten per jaar	aantal per mln m ³ onthard per mmol/l
(mmol Ca /l)	Pelletprod. (ton CaCO ₃ /jaar)	Pelletprod. (ton CaCO ₃ /dag)	Pelletprod. (m ³ CaCO ₃ /dag)	Pelletprod. (m ³ CaCO ₃ /dag)					
Hendrik Ido Ambacht	0,80	48	0,14	0,09	2	10	3	6,50	
Nijmegen	1,20	492	1,56	0,95	1	15	23	4,68	
de Beitel	2,25	1.463	4,58	2,77	2	20	51	3,46	
Spannenburg	2,70	2.936	8,08	4,89	1	85	60	2,03	

Analyse bedrijfsvoeringskosten pelletreactoren

op basis van KWR 02.087 en interviews

4. VERBRUIK EN TRANSPORT CHEMICALIEN EN ENTZAND

Reactoren met kalkmelk	CaOH2 dosering				Entmateriaal							TOTAAL transporten per Mm ³ onthard per mmol/l			
	Opgave in rapport				Opgave in rapport			Opgave in rapport							
	(mg/l)	(ton/jaar)	(aantal)	(m ³ /stuk)	Aantal transporten per jaar	transporten per Mm ³ onthard per mmol/l	Pellet afmeting (d50)	Afmeting entzand (d50)	(% entzand in pellets)	Entzand consumptie (ton/jaar)	(aantal)		(m ³ /stuk)	Aantal transporten per jaar	transporten per Mm ³ onthard per mmol/l
Pompstation	Opgave in rapport				Opgave in rapport			Opgave in rapport				Opgave in rapport			
Cothen		0	2	15			1,1	0,281	1,7	4,72					
Zutphen	120	228	2	60	10	3,6	1,00	0,50	14,3	76,00	1	16,0	2,9	1,1	
Baanhoek	120	480	1	70	20	2,9	1,2	0,6	14,3	194,29	1	16,0	7,4	1,1	
Nietap	167	1.202	3	60	50	7,0	1,25	0,38	2,9	41,63	1	20,0	1,3	0,2	
IJzeren Kujlien	215	2.795	2	103	116	4,5	0,96	0,281	2,6	133,76	2	19,7	4,1	0,2	
Noordbergum	190	3.002	2	60	125	4,7	0,95	0,165	0,5	28,29	1	30,0	0,6	0,0	

natronloog	NaOH dosering (100% product)				Entmateriaal							TOTAAL transporten per Mm ³ onthard per mmol/l			
	Opgave in rapport				Opgave in rapport			Opgave in rapport							
	(mg/l)	(ton/jaar)	(aantal)	(m ³ /stuk)	Aantal transporten per jaar	aantal per m ³ onthard per mmol/l	Pellet afmeting (d50)	Afmeting entzand (d50)	(% entzand in pellets)	Entzand consumptie (ton/jaar)	(aantal)		(m ³ /stuk)	Aantal transporten per jaar	aantal per m ³ onthard per mmol/l
Pompstation	Opgave in rapport				Opgave in rapport			Opgave in rapport				Opgave in rapport			
Hendrik Ido Ambacht	150	120	1	27	16	33,3	1,20	0,489	7,2579	3,48	1	5	0,4	0,9	
Nijmegen	51	209	2	45	28	5,7	1,00	0,515	15,8199	77,83	1	6,5	7,3	1,5	
de Beitel	125	813	2	80	108	7,4	0,98	0,489	14,1860	207,47	1	14,2	8,9	0,6	
Spannenburg	95	1.033	2	60	138	4,7	1,25	0,2	0,4113	12,07	1	30,0	0,2	0,0	

IV Cases uit de praktijk

□ Ontharding PS Hunsel (WML)

Situatieschets

Op PS Hunsel (2,5 Mm³/j, 500 m³/h) wordt grondwater gezuiverd met dubbele versproeiing gevolgd door een enkele filtratiestap. Het reinwater heeft een totale hardheid van 2,3 mmol/l. Doelstelling van WML is om de hardheid te verlagen tot 1-1,5 mmol/l en bicarbonaat van 5,2 mmol/l naar minimaal 2 mmol/l. Omdat volgens een klantonderzoek een sterke correlatie is gevonden tussen klanttevredenheid en TACC90 heeft WML tevens de doelstelling om TACC90 te verlagen tot maximaal 0,2 mmol/l.

De kwaliteitsgegevens in Tabel 7-7 dienen als uitgangspunt.

Tabel 7-7: Uitgangspunten systeemvergelijking PS Hunsel

Ruw water ontharding	filtraat	norm/aanbeveling		gewenst WML	
		min	max		
pH	7,7	7,8	8,3		
Natrium	19		120		mg/l
Calcium	72				mg/l
Magnesium	13				mg/l
Totale hardheid	2,3		2,5	1,0-1,5	mmol/l
Chloride	10		150		mg/l
Bicarbonaat	318	120	180	>120	mg/l
Koolzuur*	12				mg/l
Sulfaat	8				mg/l
TACC90*	0,95			<0,2	mmol/l
SI*	0,41				-
Cu-max*	2,67		2		mg/l
Corrosie Index	0,1		1		-

* Berekend met Aquacalc

Kwaliteitsvergelijking

In Tabel 7-8 zijn de diverse systemen vergeleken op reinwaterkwaliteit. De totale hardheid van het reinwater na ontharding is voor alle systemen gelijk (1,0 mmol/l). Ontharding tot 1,5 mmol/l bleek namelijk voor geen van de systemen een bevredigende verlaging van de TACC90 te geven (TACC90 wordt dan verlaagd tot 0,4 mmol/l).

De samenstelling van de totale hardheid is verschillend, doordat met kationwisseling en nanofiltratie naast calcium ook magnesium wordt verwijderd. Grote verschillen zijn er in bicarbonaat, variërend van 318 mg/l (geen verwijdering) tot 136 mg/l (verwijdering van bicarbonaat in combinatie met calcium, magnesium en natrium). TACC90 varieert van 0,1 tot 0,4 mmol/l.

Conclusie is dat sterkzure kationwisseling in Na-vorm niet voldoet, tenzij er aanvullende decarbonisatie plaatsvindt.

Tabel 7-8: Kwaliteitsparameters reinwater PS Hunsel met ontharding

Kwaliteit	pellet Ca(OH) ₂	pellet NaOH	sterkz. Na	sterkz. H	zwakz. H	nano-filtratie	
pH**	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	
Natrium	19	58	79	8	11	8	mg/l
Calcium	20	20	31	31	20	31	mg/l
Magnesium	12	12	5	5	12	5	mg/l
Totale Hardheid	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	mmol/l
Chloride	10	10	10	10	10	4	mg/l
Bicarbonaat	178	257	318	131	159	138	mg/l
Koolzuur*	10	14	18	8	8	8	mg/l
Sulfaat	8	8	8	8	8	3	mg/l
TACC90*	0,1	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	mmol/l
SI*	-0,6	-0,4	-0,2	-0,5	-0,5	-0,5	-
Cu-max*	1,7	2,4	3,0	1,4	1,4	1,3	mg/l
Corrosie Index	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	-

* berekend met Aquacalc

** aanname

Kostenvergelijking

In Tabel 7-9 zijn de diverse systemen vergeleken op investeringen en exploitatiekosten, met de uitgangspunten uit de bijlagen van dit rapport. De onthardingsstap zal waarschijnlijk achter de filtratie worden geplaatst, zodat bij pelletontharding gerekend moet worden met een extra carry-over-filtratie. Deze extra filtratiestap is dan ook opgenomen in de kostenvergelijking, op basis van kostenkentallen [DHV, 2000].

In de kostenvergelijking is geen rekening gehouden met eventuele kosten die gemaakt moeten worden voor verdergaande decarbonisatie bij pelletontharding met natronloog en sterkzure kationwisseling in de Na-vorm.

Wat betreft investeringen is ionenwisseling 3 maal zo goedkoop als pelletontharding met carry-over-filtratie en nanofiltratie (ca. 0,7 M€ ten opzichte van 2,2 M€). In exploitatie is kationwisseling (exclusief regeneraatverwerking) ca. 2 maal zo goedkoop als pelletontharding en nanofiltratie. Zwakzure kationwisseling in 57% deelstroom met een regeneraatverlies van 0,5% is dus een aantrekkelijk alternatief zolang de verwerking van het regeneraat beperkt blijft tot ca. 20 €/m³, berekend als (0,15-0,09) / (57%*0,5%).²¹

Tabel 7-9: Kosten deelstroomontharding PS Hunsel

Kosten	pellet Ca(OH) ₂	pellet NaOH	sterkz. Na	sterkz. H	zwakz. H	nano-filtratie	
Jaarproductie	2,50	2,50	1,43	1,43	1,43	1,43	Mm ³
Ontwerpcap.	499	499	285	285	285	285	m ³ /h
Investerings	2.157.000 (1.658.000)	2.157.000 (1.658.000)	534.000	674.000	649.000	2.504.000	€
a. vaste kosten	199.000 (151.000)	199.000 (151.000)	53.000	65.000	66.000	258.000	€/j
b. verbruikskosten	75.000	101.000	152.000	168.000	113.000	118.000	€/j
c. onderhoud	28.000 (20.000)	28.000 (20.000)	7.000	9.000	8.000	31.000	€/j
d. administratief	12.000	10.000	5.000	5.000	5.000	4.000	€/j
e. specifiek beheer	60.000	49.000	23.000	25.000	24.000	22.000	€/j
Exploitatiekosten	374.000 (318.000)	387.000 (331.000)	240.000	272.000	216.000	433.000	€/j
Kostprijs	0,15 (0,13)	0,15 (0,13)	0,10	0,11	0,09	0,17	€/m ³

De getallen tussen haakjes geven de kosten die gemaakt worden, indien de investeringen in carry-over-filtratie achterwege kunnen blijven (pelletontharding op ruw, onbelucht grondwater).

Conclusie

Voor PS Hunsel is zwakzure kationwisseling een aantrekkelijk alternatief voor pelletontharding (al dan niet gevolgd door carry-over-filtratie). Het verdient aanbeveling om de mogelijkheden van regeneraatverwerking voor PS Hunsel nader te beschouwen.

²¹ Gerekend zonder carry-over-filtratie mag de regeneraatverwerking maximaal 14 €/m³ kosten, berekend als (0,127-0,086) / (57%*0,5%).

□ **Ontharding PS Herten (WML)**

Situatieschets

Op PS Herten (0,9 Mm³/j) wordt grondwater gezuiverd met voorfilters en nafilts²². Daarnaast wordt reinwater afkomstig van Waterproductiebedrijf Heel (WPH) bijgemengd. De zuivering moet in de toekomst maximaal 300 m³/h kunnen behandelen tijdens een storing in de toevoer van Waterproductiebedrijf Heel (WPH).

Het reinwater heeft een totale hardheid van 2,5 mmol/l. Voor wat betreft de kwaliteitsdoelstellingen van WML wordt verwezen naar de voorgaande case (PS Hunsel). De kwaliteitsgegevens in Tabel 7-10 dienen als uitgangspunt.

Tabel 7-10: Uitgangspunten systeemvergelijking PS Herten

Ruw water ontharding	filtraat	norm/aanbeveling		gewenst WML	
		min	max		
pH	7,6	7,8	8,3		
Natrium	14		120		mg/l
Calcium	80				mg/l
Magnesium	10				mg/l
Totale hardheid	2,5		2,5	1,0-1,5	mmol/l
Chloride	22		150		mg/l
Bicarbonaat	252	120	180	>120	mg/l
Koolzuur*	12				mg/l
Sulfaat	35				mg/l
TACC90*	0,8			<0,2	mmol/l
SI*	0,3				-
Cu-max*	2,8		2		mg/l
Corrosie Index	0,3		1		-

* Berekend met Aquacalc

Kwaliteitsvergelijking

In Tabel 7-11 zijn de diverse systemen vergeleken op reinwaterkwaliteit. De totale hardheid van het reinwater na ontharding is voor alle systemen gelijk (1,5 mmol/l).

²² In 2005 is het de bedoeling om over te gaan naar een enkele filtratiestap

Tabel 7-11: Kwaliteitsparameters reinwater PS Herten met ontharding

Kwaliteit	pellet Ca(OH) ₂	pellet NaOH	sterkz. Na	sterkz. H	zwakz. H	nano- filtratie	
pH**	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	
Natrium	14	43	60	8	14	8	mg/l
Calcium	40	40	48	48	48	48	mg/l
Magnesium	12	12	7	7	7	7	mg/l
Totale Hardheid	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	mmol/l
Chloride	22	22	22	22	22	13	mg/l
Bicarbonaat	143	203	252	115	130	151	mg/l
Koolzuur*	18	12	15	7	9	9	mg/l
Sulfaat	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	21,0	mg/l
TACC90*	0,2	0,3	0,5	0,2	0,2	0,2	mmol/l
SI*	-0,4	-0,2	-0,1	-0,4	-0,3	-0,3	-
Cu-max*	1,9	2,5	3,0	1,8	2,0	1,8	mg/l
Corrosie Index	0,59	0,41	0,33	0,68	0,54	0,33	-

* berekend met Aquacalc

** aanname

Kostenvergelijking

In Tabel 7-12 zijn de diverse systemen vergeleken op investeringen en exploitatiekosten, met de uitgangspunten uit de bijlagen van dit rapport. In de kostenvergelijking is geen rekening gehouden met eventuele kosten die gemaakt moeten worden voor verdergaande decarbonisatie bij sterkzure kationwisseling in de Na-vorm.

Uitgangspunt is dat de pelletontharding kan worden ingepast tussen de voor- en nafilts, zodat niet gerekend hoeft te worden met investeringen in een nieuwe carry-over-filtratie. Het is de vraag of na 2005, als de zuivering is aangepast naar een enkele filtratie, deze inpassing tot de mogelijkheden blijft behoren.

*Wat betreft investeringen is ionenwisseling bijna 2 maal zo goedkoop als pelletontharding (ca. 0,45 M€ ten opzichte van 0,8 M€). In exploitatie is kationwisseling (exclusief regeneraatverwerking) ca. 1,5 maal zo goedkoop als pelletontharding en nanofiltratie. Zwakzure kationwisseling in 40% deelstroom met een regeneraatverlies van 0,5% is dus een aantrekkelijk alternatief zolang de verwerking van het regeneraat beperkt blijft tot 30 €/m³, berekend als (0,19-0,12) / (48%*0,5%).*

Tabel 7-12: Kosten deelstroom ontharding PS Herten

Kosten	pellet Ca(OH) ₂	pellet NaOH	sterkz. Na	sterkz. H	zwakz. H	nano- filtratie	
Jaarproductie	0,60	0,60	0,36	0,36	0,44	0,36	Mm3
Ontwerpcap.	200	200	121	120	145	120	m3/h
Investerings	797.000	797.000	342.000	416.000	449.000	1.091.000	€

a. vaste kosten	72.000	72.000	34.000	40.000	45.000	112.000	€/j
b. verbruikskosten	20.000	28.000	41.000	47.000	31.000	30.000	€/j
c. onderhoud	10.000	10.000	5.000	6.000	6.000	14.000	€/j
d. administratief	12.000	10.000	4.000	5.000	4.000	4.000	€/j
e. specifiek beheer	59.000	48.000	22.000	23.000	22.000	22.000	€/j
Exploitatiekosten	173.000	168.000	106.000	121.000	108.000	182.000	€/j

Kostprijs	0,19	0,19	0,12	0,13	0,12	0,20	€/m3
------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Conclusie

Voor PS Herten is kationwisseling een aantrekkelijk alternatief voor pelletontharding, voornamelijk vanwege de lage bezetting van de infrastructuur. Ook de flexibele bedrijfsvoering van ionenwisseling is een pré. Het verdient daarom aanbeveling om de mogelijkheden van regeneraatverwerking voor PS Herten nader te beschouwen.

□ Ontharding PS Varsseveld (Vitens)

Situatieschets

Bij Vitens is het plan "Zachtwater Achterhoek" operationeel, met een investeringsvolume van 50 M€ in 2005. De hardheid zal dan gestuurd worden naar 1,7 mmol/l. Onduidelijk is nog wat met PS Varsseveld (0,75 Mm³/j, 120 m³/h) gaat gebeuren. De hardheid daar is 3,7 mmol/l. (Deel)ontharding met ionenwisseling zou voor Vitens een nieuw gezichtspunt kunnen opleveren, zeker als het regeneraat nagenoeg 100% is her te gebruiken.

In Tabel 7-13 is de kwaliteit van het ruwe water en het snelfiltraat van Varsseveld weergegeven. Er wordt gebruik gemaakt van ondergrondse ontijzering.

Tabel 7-13: Uitgangspunten systeemvergelijking PS Varsseveld

Ruw water ontharding	filtraat	norm/aanbeveling		gewenst WML	
		min	max		
pH	7,1	7,8	8,3		
Natrium	32		120		mg/l
Calcium	135				mg/l
Magnesium	8,1				mg/l
Totale hardheid	3,7		2,5	1,7	mmol/l
Chloride	49		150		mg/l
Bicarbonaat	365	120	180		mg/l
Koolzuur*	51				mg/l
Sulfaat	83,0				mg/l
TACC90*	1,32				mmol/l
SI*	0,09				-
Cu-max*	5,93		2		mg/l
Corrosie Index	0,5		1		-

* Berekend met Aquacalc

Kwaliteitsvergelijking

In Tabel 7-14 zijn de diverse systemen vergeleken op reinwaterkwaliteit. De totale hardheid van het reinwater na ontharding is voor alle systemen gelijk (1,7 mmol/l).

Evenals in de case PS Hunsel is de samenstelling van de totale hardheid is verschillend voor de verschillende systemen, doordat met kationwisseling en nanofiltratie naast calcium ook magnesium wordt verwijderd.

Grote verschillen zijn er in bicarbonaat en daarmee samenhangend de Corrosie Index. Van de systemen geeft alleen deelstroom-nanofiltratie op beide parameters een bevredigende kwaliteit. Voor de overige systemen geldt dat te weinig bicarbonaat wordt verwijderd (pelletontharding met natronloog of sterkzure kationwisseling in de Na-vorm), of een te hoge Corrosie Index wordt behaald (sterkzure kationwisseling in H-vorm, zwakzure kationwisseling).

Conclusie is dat nanofiltratie op kwaliteit het beste resultaat geeft en dat de overige systemen of te weinig bicarbonaat verwijderen of een te hoge Corrosie Index veroorzaken.

Tabel 7-14: Kwaliteitsparameters reinwater PS Varsseveld met ontharding

Kwaliteit	pellet Ca(OH) ₂	pellet NaOH	sterkz. Na	sterkz. H	zwakz. H	nano- filtratie	
pH**	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	
Natrium	32	101	124	15	32	15	mg/l
Calcium	55	55	61	62	55	62	mg/l
Magnesium	8	8	4	4	8	4	mg/l
Totale Hardheid	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	mmol/l
Chloride	49	49	49	49	49	23	mg/l
Bicarbonaat	171	293	365	75	121	168	mg/l
Koolzuur*	8	14	20	6	7	10	mg/l
Sulfaat	83	83	83	83	83	38	mg/l
TACC90*	0,2	0,5	0,9	0,2	0,2	0,4	mmol/l
SI*	-0,3	0,0	0,17	-0,34	-0,32	-0,11	-
Cu-max*	2,9	4,0	5,0	2,6	2,8	2,3	mg/l
Corrosie Index	1,4	0,7	0,5	1,9	1,6	0,5	-

* berekend met Aquacalc

** aanname

Kostenvergelijking

In Tabel 7-15 zijn de diverse systemen vergeleken op investeringen en exploitatiekosten, met de uitgangspunten uit de bijlagen van dit rapport. De onthardingsstap zal waarschijnlijk achter de filtratie worden geplaatst, zodat bij pelletontharding gerekend moet worden met een extra carry-over-filtratie. Deze extra filtratiestap is dan ook opgenomen in de kostenvergelijking, op basis van kostenkentallen [DHV, 2000]. De getallen tussen haakjes geven de kosten die gemaakt worden, indien de investeringen in carry-over-filtratie achterwege kunnen blijven (pelletontharding op ruw, onbelucht grondwater).

Wat betreft investeringen is ionenwisseling 2 maal zo goedkoop als pelletontharding met carry-over-filtratie en nanofiltratie (ca. 0,3 M€ ten opzichte van 0,6 M€). In exploitatie is kationwisseling (exclusief regeneraatoerwerking) even duur als

nanofiltratie (exclusief concentraat). Ionenwisseling en nanofiltratie zijn ca. 30% goedkoper dan pelletontharding met carry-over-filtratie.

Tabel 7-15: Kosten deelstroomontharding PS Varsseveld

Kosten	pellet Ca(OH)2	pellet NaOH	sterkz. Na	sterkz. H	zwakz. H	nano- filtratie	
Jaarproductie	0,52	0,52	0,41	0,41	0,50	0,41	Mm3
Ontwerpcap.	84	84	65	65	80	65	m3/h
Investerings	593.000 (396.000)	593.000 (396.000)	248.000	300.000	329.000	619.000	€
a. vaste kosten	60.000 (40.000)	60.000 (40.000)	24.000	29.000	32.000	63.000	€/j
b. verbruikskosten	30.000	41.000	68.000	76.000	51.000	34.000	€/j
c. onderhoud	9.000 (5.000)	9.000 (5.000)	4.000	4.000	4.000	8.000	€/j
d. administratief	12.000	10.000	4.000	5.000	5.000	4.000	€/j
e. specifiek beheer	59.000	48.000	22.000	23.000	23.000	22.000	€/j
Exploitatiekosten	170.000 (146.000)	168.000 (144.000)	122.000	137.000	115.000	131.000	€/j
Kostprijs	0,23 (0,20)	0,22 (0,20)	0,16	0,18	0,15	0,17	€/m3

Conclusie

Nanofiltratie is vanuit het oogpunt van kwaliteit en kosten een aantrekkelijk alternatief voor ontharding op PS Varsseveld. Concentraatverwerking vormt dan wel een aandachtspunt.

□ Ontharding PS Macharen (Brabant Water)

Situatieschets

Het reinwater van PS Macharen (4 Mm³/j, 650 m³/h) voldoet niet aan de Brabant Water grenswaarde van <2,5 mmol/l totale hardheid. Brabant Water is nog doende met het opzetten van een beleid ten aanzien van de hardheid van het reinwater. Voor PS Macharen is in het verleden al een ontwerp gemaakt voor pelletontharding met kalkmelk. Met kalkmelk kan niet dieper worden onthard dan tot 1,67 mmol/l in verband met de Corrosie Index.

In Tabel 7-16 is de reinwaterkwaliteit opgenomen van PS Macharen.

Tabel 7-16: Uitgangspunten systeemvergelijking PS Macharen

Ruw water	filtraat	norm/aanbeveling		gewenst	
		min	max		
ontharding				WML	
pH	7,2	7,8	8,3		
Natrium	25		120		mg/l
Calcium	90				mg/l
Magnesium	6,1				mg/l
Totale hardheid	2,5		2,5	1,5	mmol/l
Chloride	42		150		mg/l
Bicarbonaat	232	120	180		mg/l
Koolzuur*	10				mg/l
Sulfaat	55,0				mg/l
TACC90*	0,8				mmol/l
SI*	0,4				-
Cu-max*	2,8		2		mg/l
Corrosie Index	0,6		1		-

* berekend met Aquacalc

Kwaliteitsvergelijking

In Tabel 7-14 zijn de diverse systemen vergeleken op reinwaterkwaliteit. De totale hardheid van het reinwater na ontharding is voor alle systemen gelijk (1,5 mmol/l).

Evenals bij de case PS Varsseveld is bij de beschouwde systemen een tegenstrijdigheid tussen bicarbonaatverwijdering en Corrosie Index, met uitzondering van nanofiltratie. Met gemengde systemen is het evenwel mogelijk om tot de gewenste waterkwaliteit te komen. Hierbij kan gedacht worden aan:

- Sterkzure kationwisseling in Na-vorm in combinatie met een zuurdosering en ontgassing (relatief hoog chemicaliënverbruik)
- Twee parallele kationwisselaars: een sterkzure kationwisseling in Na-vorm en een zwakzure kationwisseling.

Conclusie is dat nanofiltratie op kwaliteit het beste resultaat geeft en dat de overige systemen te weinig bicarbonaat verwijderen of een te hoge Corrosie Index veroorzaken.

Tabel 7-17: Kwaliteitsparameters reinwater PS Macharen met ontharding

Kwaliteit	pellet Ca(OH) ₂	pellet NaOH	sterkz. Na	sterkz. H	zwakz. H	nano-filtratie	
pH**	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	
Natrium	25	53	71	15	25	15	mg/l
Calcium	50	50	54	54	50	54	mg/l
Magnesium	6	6	4	4	6	4	mg/l
Totale Hardheid	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	mmol/l
Chloride	40	40	40	40	40	24	mg/l
Bicarbonaat	120	179	232	83	110	139	mg/l
Koolzuur*	7	10	13	6	6	8	mg/l
Sulfaat	55	55	55	55	55	33	mg/l
TACC90*	0,2	0,3	0,5	0,1	0,2	0,3	mmol/l
SI*	-0,3	-0,2	0,0	-0,4	-0,4	-0,2	-
Cu-max*	2,2	2,7	3,2	1,9	2,1	1,9	mg/l
Corrosie Index	1,2	0,8	0,6	1,5	1,3	0,6	-

* berekend met Aquacalc

** aanname

Kostenvergelijking

In Tabel 7-18 zijn de diverse systemen vergeleken op investeringen en exploitatiekosten, met de uitgangspunten uit de bijlagen van dit rapport. De onthardingsstap kan ingepast worden tussen de voorfilters en de nafiltsers.

Wat betreft investeringen is ionenwisseling 2 maal zo goedkoop als pelletontharding (ca. 0,7 M€ ten opzichte van 1,5 M€). In exploitatie is kationwisseling 25% goedkoper dan pelletontharding. Regeneraatverwerking mag ten hoogste 7 €/m³ kosten. Nanofiltratie is het duurste alternatief.

Twee parallele systemen (sterkzure kationwisseling in Na-vorm en zwakzure kationwisseling) geeft een investeringsniveau van 0,9 M€ en een kostprijsniveau van 0,08 €/m³ (ca. 320 k€/j). Dit systeem (exclusief regeneraatverwerking) geeft derhalve een soortgelijk kostenniveau als pelletontharding.

Tabel 7-18: Kosten deelstroomontharding PS Macharen

Kosten	pellet Ca(OH) ₂	pellet NaOH	sterkz. Na	sterkz. H	zwakz. H	nano- filtratie	
Jaarproductie	2,62	2,29	1,61	1,60	2,10	1,60	Mm ³
Ontwerpcap.	425	371	262	260	342	260	m ³ /h
Investerings	1.457.000	1.308.000	509.000	638.000	721.000	2.293.000	€

a. vaste kosten	132.000	119.000	50.000	62.000	73.000	236.000	€/j
b. verbruikskosten	89.000	116.000	182.000	227.000	137.000	132.000	€/j
c. onderhoud	18.000	16.000	7.000	9.000	8.000	28.000	€/j
d. administratief	12.000	10.000	5.000	5.000	5.000	4.000	€/j
e. specifiek beheer	62.470	51.219	23.265	25.729	24.110	21.931	€/j
Exploitatiekosten	313.470	312.219	267.265	328.729	247.110	421.931	€/j

Kostprijs	0,08	0,08	0,07	0,08	0,06	0,11	€/m³
------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	------------------------

Conclusie

Zwazure kationwisseling is de goedkoopste techniek. Het is de vraag of deze ook concurrerend is als regeneraatverwerking meegenomen wordt in de kostenvergelijking, omdat het kostprijsverschil met pelletontharding relatief klein is. Op PS Macharen is pelletontharding daarom waarschijnlijk het aantrekkelijkste alternatief.