



BTO 2016.001a | April 2016

## **BTO** rapport

Ontharding 2.0 bij  
Waternet  
Productielocatie Leiduin;  
herziene versie



# BTO

## Ontharding 2.0 bij Waternet; Productielocatie Leiduin

BTO 2016.001a | April 2016

### Opdrachtnummer

400942

### Projectmanager

Luc Palmen

### Opdrachtgever

Waternet - Speerpuntonderzoek

### Kwaliteitsborger(s)

Frank Oesterholt

### Auteurs

Roberta Hofman-Caris, Hans Huiting, Laura Snip, Tessa van den Brand,  
Luc Palmen

### Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.  
Een jaar na publicatie is het openbaar.

**Jaar van publicatie**  
2016

**Meer informatie**  
Roberta Hofman-Caris  
T 030-6069673  
E Roberta.hofman@kwrwater.nl

**Keywords**  
Ontharding, Hergebruik  
grondstoffen, Calciet,  
Membraanfiltratie, Inpassen in  
zuivering

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
F +31 (0)30 60 61 165  
E  
I www.kwrwater.nl

**KWR** Watercycle  
Research  
Institute

BTO 2016.001a | April 2016 © KWR

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.

# BTO Managementsamenvatting

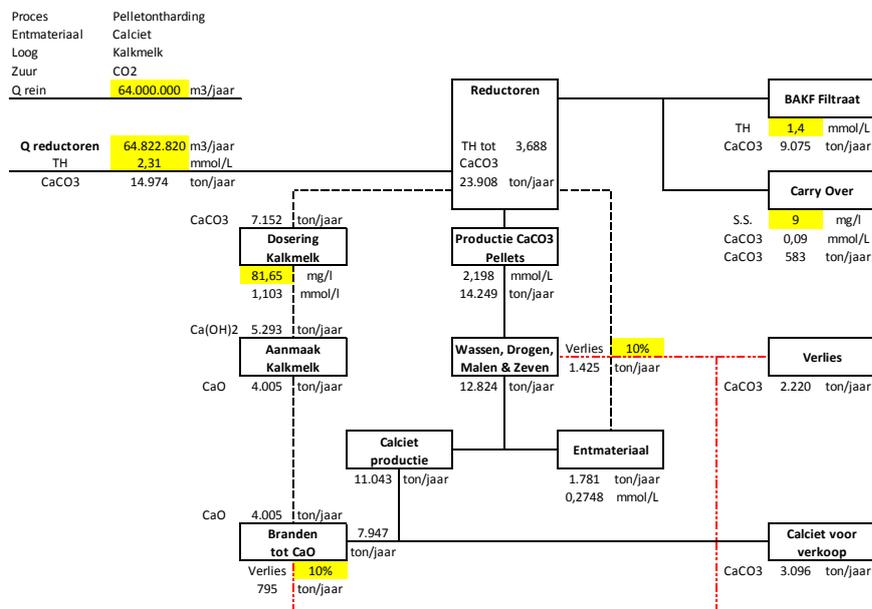
## Pelletontharding goedkoper en milieuvriendelijker dan ontharding met behulp van reverse osmose

**Auteur(s)** Dr.Ir. Roberta Hofman-Caris, ing. Hans Huiting, Laura Snip MSc PhD, Dr.Ir. Tessa van den Brand, ir. Luc Palmen MTD

Vijf mogelijke scenario's voor ontharding op locatie Leiduin zijn met elkaar vergeleken op hun milieu-impact (Life Cycle Analysis ; LCA) en totale kosten (Total Cost of Ownership ; TCO). Het ging hierbij om de volgende scenario's:

1. Huidige ontharding met natronloog en calcië als entmateriaal in plaats van granaatzand, en met zoutzuur voor pH-correctie
2. Huidige ontharding met natronloog en calcië als entmateriaal en met kooldioxide voor pH-correctie
3. Ontharding met calcië als entmateriaal, kalkmelk in plaats van natronloog, en kooldioxide voor pH-correctie
4. Reverse osmose (recovery 80 en 85%) met duinfiltratie, met natronloog voor pH-correctie
5. Reverse Osmose (recovery 80%), zonder duinfiltratie, met natronloog voor pH-correctie.

Uit deze vergelijking blijkt dat scenario's gebaseerd op Reverse Osmose (RO) een grotere negatieve invloed hebben op het milieu en bovendien veel duurder zijn dan pelletontharding. Een interessante optie is om de calcië, die bij pelletontharding wordt gevormd, om te zetten in kalkmelk, en vervolgens in plaats van natronloog te gebruiken bij pelletontharding.



Ontharding gebaseerd op in het proces zelf gevormde kalkmelk (scenario 3)

**Belang: optimale onthardingsproces identificeren**  
De pelletontharding in Leiduin is binnenkort aan vervanging toe. Daarom wil Waternet weten of een ander (type) proces milieuvriendelijker en/of goedkoper zou kunnen zijn.

**Aanpak: labonderzoek naar mogelijkheden kalkbranden; LCA- en TCO-berekeningen.**  
In het laboratorium zijn experimenten uitgevoerd met verschillende calcietspellets uit onthardingsprocessen, om na te gaan of dit calciet inderdaad tot geschikte kalkmelk verwerkt kan worden. Daarnaast zijn vijf zuiveringsscenario's gedefinieerd, waarvoor vervolgens life-cycle-analysis (LCA-) en total cost of ownership (TCO-) berekeningen zijn uitgevoerd

**Resultaten: Pelletontharding gunstiger dan RO.**  
Wanneer *alle* milieuaspecten worden meegenomen, door de LCA te berekenen in ecopunten, blijken pelletontharding veel gunstiger te zijn dan RO. Als uitsluitend naar de CO<sub>2</sub>-voetafdruk wordt gekeken, komt bij gebruik van groene energie RO beter uit de vergelijking. De TCO-berekeningen laten zien dat ontharding met behulp van RO veel duurder is dan pelletontharding.

**Implementatie: vervanging van bestaand onthardingsproces.**  
Pelletontharding is beter voor het milieu en ongeveer 70% goedkoper dan RO. Pelletontharding met behulp van kalkmelk in plaats van natronloog is een interessant alternatief. Voor die laatste stap moet Waternet zich beraden of het wil investeren in een kalkoven en kalkmelkreactor voor kleinschalige kalkmelkproductie.

**Rapport**  
Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het Speerpuntonderzoek voor Waternet, en beschreven in rapport *Ontharding 2.0 bij Waternet* (BTO 2016.001).

# Voorwoord

Dit rapport betreft een herziene versie van het rapport BTO 2016.001 uit jan. 2016. Er is namelijk gebleken dat in het oorspronkelijke rapport een te hoge CO<sub>2</sub>-uitstoot voor het branden van calciet tot kalk was meegenomen in de LCA-berekeningen. Hierbij was uitgegaan van literatuurgegevens over die uitstoot, maar daarin bleek een deel van de uitstoot ten gevolge van het energieverbruik van het proces ook al verwerkt te zijn. In de huidige, herziene versie, zijn de LCA-gegevens van scenario 3 daarop aangepast. Hierdoor is het milieu-effect van scenario 3, uitgedrukt in ecopunten, iets gunstiger geworden dan in de oorspronkelijke versie.

Bovendien is in het huidige rapport een overzichtje meegenomen van het milieu-effect van de verschillende scenario's, als het CO<sub>2</sub>, dat chemisch bij het branden van kalk vrijkomt, als "kort-cyclisch" CO<sub>2</sub> wordt berekend. Dit wordt als minder schadelijk beschouwd dan het CO<sub>2</sub> dat vrijkomt uit bv. fossiele brandstoffen.

# Samenvatting

De centrale hardheidsreductie (korrelreactoren, waarbij natronloog en granaatzand worden toegepast) in Leiduin is bijna dertig jaar in bedrijf. Daardoor komt nu de vraag op of de reactoren vervangen moeten worden, of dat er inmiddels betere alternatieven voor het huidige proces mogelijk zijn? In dit onderzoek zijn vijf verschillende alternatieven onderzocht:

1. De huidige ontharding met behulp van natronloog. Hierbij is nu wel aangenomen dat als entmateriaal in plaats van granaatzand calciet uit het onthardingsproces gebruikt zal worden. Voor de pH-correctie wordt hierbij zoutzuur toegepast (Scenario 1: NaOH & HCl)
2. Idem, maar dan met kooldioxide voor de pH-correctie, aangezien het de bedoeling is in de nabije toekomst hierop over te gaan (Scenario 2: NaOH & CO<sub>2</sub>).
3. Ontharding met behulp van calciet en kalkmelk. (Scenario 3: Ca(OH)<sub>2</sub> & CO<sub>2</sub>) Bij het onthardingsproces wordt calciet gevormd. Door die korrels te malen kan een geschikt entmateriaal worden verkregen, dat het gebruik van granaatzand overbodig maakt. Verder is het mogelijk het calciet te branden tot gebrande kalk, en hier kalkmelk van te maken, die dan in het proces kan worden ingezet in plaats van natronloog. Voor pH-correctie is aangenomen dat kooldioxide zal worden toegepast.
4. Ontharding met behulp van RO (Scenario 4: RO1). In dit scenario wordt na de langzame zandfiltratie, een deelstroom behandeld met behulp van RO en vervolgens gemengd met de bypass. Hier zijn in feite twee opties voor uitgewerkt: één met een recovery van 80% (scenario 4a) en één met een recovery van 85% (scenario 4b).
5. In het tweede RO-scenario (Scenario 5: RO2) wordt een deelstroom van de WRK via directe zuivering (geen duinpassage) behandeld met RO, waarna het RO-filtraat met niet onthard water wordt gemengd.

Om de haalbaarheid van ontharding met behulp van kalkmelk te onderzoeken zijn op het laboratorium bij KWR experimenten uitgevoerd met het branden van kalk. Hieruit bleek dat het inderdaad mogelijk is om kalkmelk te produceren voor het onthardingsproces. De nu geproduceerde kalkmelk is voldoende zuiver, maar lost te traag op voor toepassing in een grootschalig proces (te lage  $\tau$ -waarde). Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat er geen gebruik gemaakt is van een echte kalkoven waardoor tijdens het afkoelen een deel van het CaO weer met kooldioxide uit de lucht gereageerd heeft. De verwachting is dat dit probleem bij toepassing van een echte kalkoven wordt voorkomen. Bovendien lijkt het erop dat in de praktijk een iets hogere  $\tau$ -waarde bruikbaar is (ca. 4 s), die wel dicht in de buurt van de hier gemeten waarden ligt.

Voor alle processen is een Life Cycle Analysis (LCA) uitgevoerd, en zijn de Total Cost of Ownership (TOC) uitgerekend. Uit de LCA blijkt dat de milieu-impact van de scenario's sterke verschillen vertonen. Scenario 3 geeft het gunstigste beeld te zien op basis van ecopunten, maar ook op basis van kooldioxide voetafdruk. Wanneer de voetafdruk echter alleen op basis van kooldioxide wordt berekend, is ontharding met behulp van RO-processen (met name de variant met een recovery van 85% in plaats van 80%) gebaseerd op groene energie toch gunstiger, maar op deze manier worden bepaalde milieueffecten buiten beschouwing gelaten. Overigens wordt hierbij de discussie over kort- en langcyclisch CO<sub>2</sub> buiten beschouwing gelaten. Een significant deel van het CO<sub>2</sub> dat bij het branden van kalk vrijkomt kan immers als kortcyclisch CO<sub>2</sub> worden beschouwd. Daarnaast hangen deze resultaten sterk af van de wijze waarop de NaOH wordt geproduceerd. Dit zou veel gunstiger kunnen dan op het ogenblik het geval is.

De TCO-berekeningen laten zien dat de totale kosten van ontharding met NaOH net iets hoger zijn dan bij ontharding met behulp van kalkmelk (uit eigen calciet), hoewel dit verschil eigenlijk binnen de foutenmarge van de TCO-ramingen ligt. De kosten voor de drie RO-scenario's zijn onderling vergelijkbaar, maar ongeveer 65% hoger dan voor de andere scenario's, gebaseerd op pelletontharding.

Op grond van deze beschouwingen kan worden gesteld dat een ontharding met behulp van kalkmelk (en eigen calcië) gunstig is zowel wat betreft de milieu-impact als wat betreft de TCO. Hierbij moeten echter nog wel enkele kanttekeningen worden gemaakt. Zo hangt het totale plaatje ook af van het type NaOH dat kan worden gebruikt, en de milieu-impact daarvan. Daarnaast is het de vraag of het economisch rendabel (en praktische haalbaar) is om zelf de calcië te behandelen tot entmateriaal of te branden tot kalk, en vervolgens te verwerken tot kalkmelk. Dit heeft te maken met de kleinschalige kalkproductie, want in de regel zijn kalkovens ontworpen voor veel grotere hoeveelheden. Bovendien zijn waarschijnlijk aanpassingen in het proces en/of het ovenontwerp nodig, omdat bij reguliere kalkovens brokken calcië van circa 20 cm worden toegepast, terwijl het in dit geval gaat om korrels met een diameter van ongeveer 1 mm. Mogelijk is het beter om dit proces uit te besteden, aangezien het in Leiduin om relatief kleine hoeveelheden gaat.

# Inhoudsopgave

<b>Voorwoord</b>	<b>1</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>2</b>
<b>Inhoudsopgave</b>	<b>4</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>6</b>
<b>2 Huidig onthardingspraktijk op productielocatie Leiduin</b>	<b>7</b>
2.1 Massabalans huidige ontharding	8
<b>3 Mogelijke alternatieve zuiveringsscenario's</b>	<b>11</b>
3.1 Ontharding met calciëet en kalkmelk	11
3.2 Ontharding met behulp van omgekeerde osmose	13
<b>4 Uitwerking zuiveringsscenario 'Pelletontharding met calciëet en kalkmelk'</b>	<b>18</b>
4.1 Werkwijze bij het branden, blussen en oplossen van de kalk	18
4.2 Kalk branden in de literatuur	19
4.3 Resultaten kalk branden	19
4.4 Massabalans onthardingsproces Leiduin	27
4.5 Accumulatie zware metalen	29
4.6 Investering voor het branden en blussen van kalk	35
<b>5 Uitwerking zuiveringsscenario 'Membraanfiltratie'</b>	<b>36</b>
5.1 Basisontwerp omgekeerde osmose	36
5.2 Noodzaak antiscalant	38
5.3 Investering Omgekeerde Osmose	39
<b>6 Life Cycle Analysis (LCA)</b>	<b>41</b>
6.1 Het doel van de LCA	41
6.2 Functionele eenheid	41
6.3 Gebruikte methode	41
6.4 Systeemgrenzen en uitgangspunten	41
6.5 Resultaten LCA	48
<b>7 Resultaten TCO-berekeningen</b>	<b>55</b>
7.1 Het doel van de TCO	55
7.2 Gebruikte methode	55
7.3 Investeringen	55
7.4 Bedrijfsvoeringskosten	55
7.5 Onderhoud	56
7.6 Resultaten TCO berekeningen	56
<b>8 Discussie</b>	<b>57</b>
8.1 De verschillende scenario's	57
8.2 Life Cycle Analyses	57
8.3 Total Cost of Ownership	58
8.4 Vergelijking verschillende scenario's	58

<b>9</b>	<b>Conclusies</b>	<b>60</b>
<b>10</b>	<b>Literatuur</b>	<b>61</b>
<b>Bijlage I</b>	<b>Samenstelling ongebluste kalk</b>	<b>62</b>
<b>Bijlage II</b>	<b>Metaalgehalten in gebrande kalk</b>	<b>68</b>
<b>Bijlage III</b>	<b>Berekeningen entmaterialen</b>	<b>71</b>
<b>Bijlage IV</b>	<b>ROSA projectie</b>	<b>72</b>
<b>Bijlage V</b>	<b>Genesys MM4 projectie</b>	<b>81</b>
<b>Bijlage VI</b>	<b>Tabellen Data Zware Metalen bij Kalkmelk Scenario</b>	<b>87</b>
<b>Bijlage VII</b>	<b>Berekening Total Cost of Ownership</b>	<b>92</b>

# 1 Inleiding

Bij Waternet wordt sinds 1987 centrale deelontharding toegepast in de waterzuivering. Op de productielocaties Leiduin (LDN) en Weesperkarspel (WPK) staat hiervoor een aantal wervelbedreactoren met 'Amsterdamse' bodem. Ontharding vond in het verleden altijd plaats met granaatzand als entmateriaal en natronloogdosering voor de calciumcarbonaat kristallisatie. De laatste jaren is veel onderzoek uitgevoerd naar de optimalisatie van het proces. Zo is de processturing (wervelbedbeheer) aangepast en is in Weesperkarspel overgeschakeld van granaatzand op calcië (calciumcarbonaat) uit het proces van Leiduin als entmateriaal. Dit laatste levert onthardingskorrels op die volledig uit calciumcarbonaat bestaan, waardoor nieuwe hergebruikstoepassingen mogelijk worden.

Aangezien de huidige reactoren in Leiduin bijna dertig jaar in bedrijf zijn, wordt het tijd na te gaan of, en zo ja, hoe, deze reactoren vervangen moeten worden. Er hebben de laatste jaren tal van ontwikkelingen plaatsgevonden, waardoor wellicht een ander onthardingsproces voor de locatie Leiduin effectiever, efficiënter en milieuvriendelijker is dan het huidige, dat is gebaseerd op NaOH en granaatzand.

Eén van de mogelijkheden is het branden van de geproduceerde kalkkorrels tot gebrande kalk (CaO), waarmee weer kalkmelk kan worden gemaakt. Deze kalkmelk zou een alternatief kunnen zijn voor het door Waternet gebruikte natronloog, maar de kalkmelk zou ook geleverd kunnen worden aan collega drinkwaterbedrijven die al ontharden met kalkmelk.

Naast ontwikkelingen op het gebied van pelletontharding, hebben ook andere onthardingstechnieken ontwikkeling doorgemaakt. Zo zijn er nieuwe nanofiltratie- en omgekeerde osmose membranen ontwikkeld, en zijn er alternatieven zoals elektrodialyse (reversal) en ionenwisseling. Deze laatste alternatieven zijn in dit onderzoek niet meegenomen.

Hergebruik van materialen en reductie van de klimaatvoetafdruk van de drinkwaterzuivering zijn voor Waternet belangrijke afwegingscriteria bij de keuze van zuiveringsprocessen en de bedrijfsvoering daarvan. Ontharding is een proces met een relatief grote invloed op deze aspecten, vooral vanwege de grote milieu impact van natronloog. Omdat de ontharding bij Waternet inmiddels bijna dertig jaar in bedrijf is, is het ook gewenst om de wijze van ontharding te herijken en te onderzoeken welke onthardingsmethode het beste past bij de toekomst. Het uitgangspunt dat ontharding nodig is, staat daarbij niet ter discussie.

Het doel van deze studie is het vaststellen van de mogelijkheden voor ontharding voor de drinkwaterzuivering in Leiduin. Het onderzoek richt zich op de toepassing van:

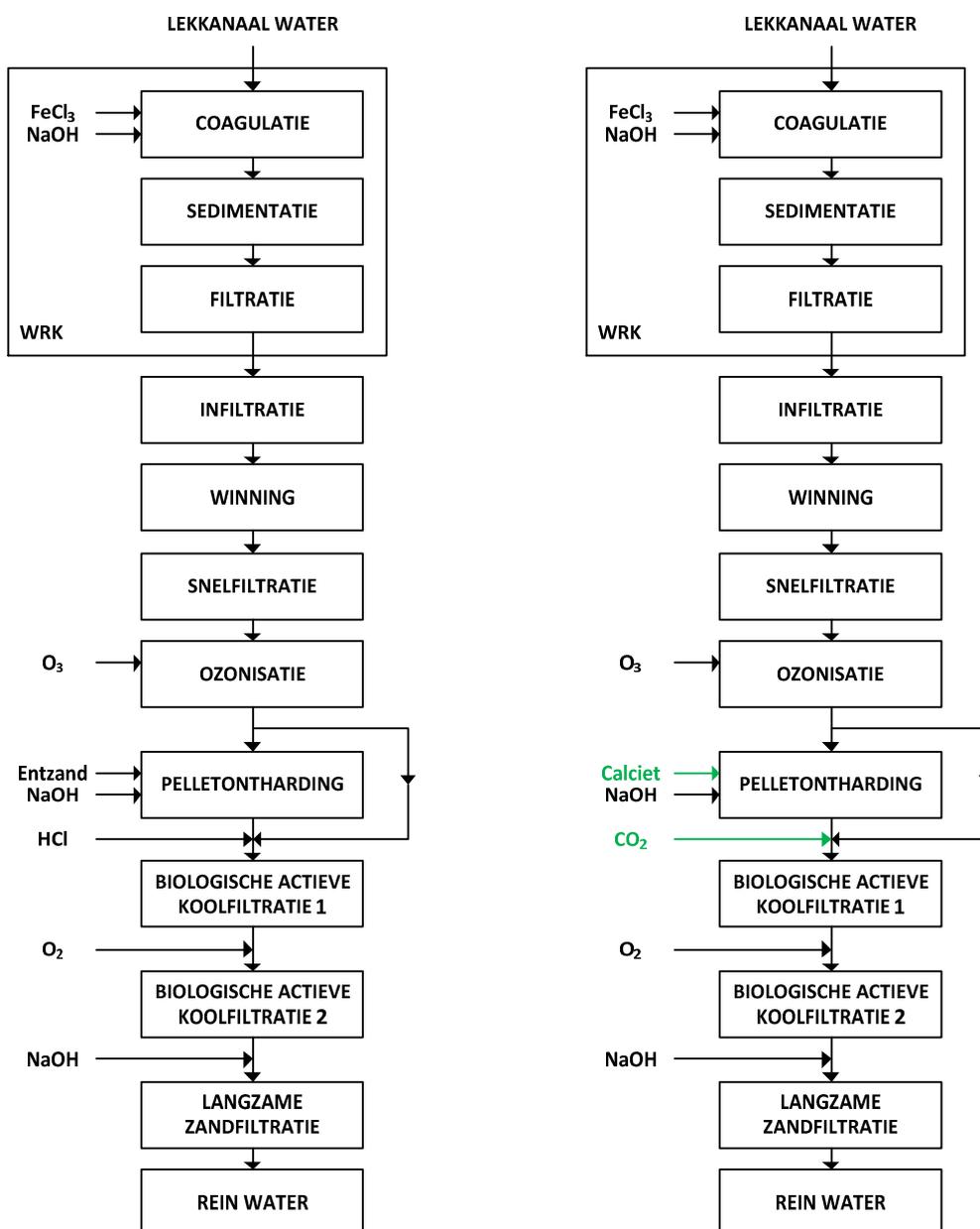
- de huidige onthardingswijze (granaatzand, natronloog)
- ontharding met calcië als entmateriaal en kalkmelk (commercieel of hergebruik)
- ontharding met membraanfiltratie.

Hierbij is gekeken naar de procestecnologische aspecten van deze zuiveringstechnieken, inpassing in de bestaande zuivering, kosten op basis van Total Cost of Ownership (TCO), milieuaspecten (Life Cycle Analysis; LCA) en de afzetbaarheid van reststoffen (kalkkorrels, concentraten).

## 2 Huidig onthardingspraktijk op productielocatie Leiduin

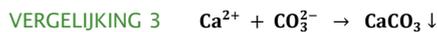
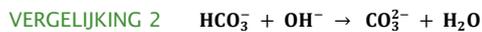
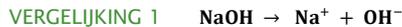
Op productielocatie Leiduin van Waternet is de ontharding gepositioneerd na de ozonisatie en voorafgaand aan de biologische actieve koolfiltratie. De ontharding vindt plaats met behulp van granaatzand (als entmateriaal) en natronloog (als onthardingschemicalie). Na de ontharding wordt zoutzuur gedoseerd voor pH-verlaging. Op korte termijn wordt overgestapt op calciet als entmateriaal en ook op kooldioxide voor verlaging van de pH. Beide processchema's zijn weergegeven in **Error! Reference source not found.**

FIGUUR 1: PROCESSCHEMA HUIDIGE ZUIVERING IN LEIDUIN

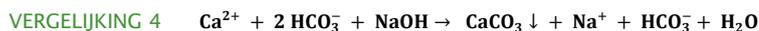


Slechts een deel van het water na de ozonisatie wordt op deze manier onthard, en vervolgens gemengd met een deel niet-onthard water via een bypass, zodat de gewenste hardheid voor het drinkwater wordt bereikt.

De netto-reacties die bij de ontharding een rol spelen zijn weergegeven in Vergelijking 1 tot en met Vergelijking 3



De overall reactie is weergegeven in Vergelijking 4



Hieruit volgt dat voor elk verwijderd calciumion een bicarbonaat-ion wordt onttrokken, maar ook een natrium-ion aan het systeem wordt toegevoegd. Als entmateriaal wordt voor dit proces granaatzand gebruikt.

## 2.1 Massabalans huidige ontharding

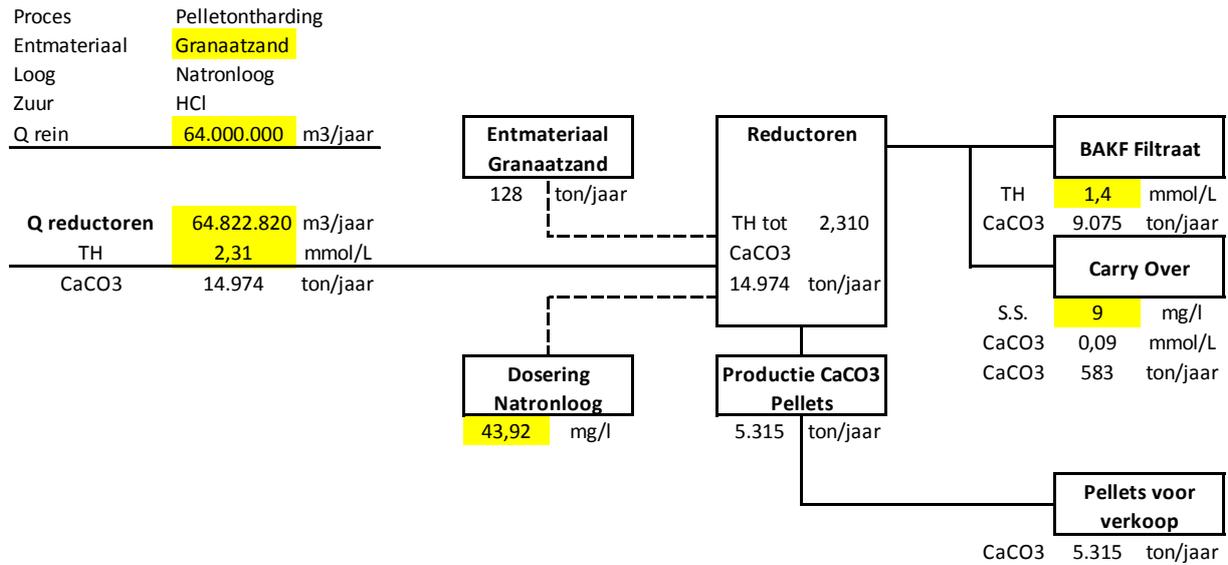
In Leiduin vindt op het ogenblik ontharding plaats met behulp van pelletreactoren en natronloog. Het is de bedoeling dat binnenkort in dit proces in plaats van zoutzuur kooldioxide zal worden gebruikt voor de pH-correctie. Zowel dit nieuwe scenario, als het scenario waarin in plaats van natronloog kalkmelk wordt gebruikt, is gebaseerd op de uitgangspunten van het huidige proces, dat hieronder in detail wordt beschreven. De gegevens uit de massabalansen zijn gebruikt in de LCA-studies, die beschreven worden in Hoofdstuk 6.

Op productielocatie Leiduin bevinden zich 12 reductoren, die een totale maximale productie hebben van 8.000 m<sup>3</sup>/h in de winter en 12.000 m<sup>3</sup>/h in de zomer. Per reductor is de deelstroom in de winter (<5 °C) maximaal 400 m<sup>3</sup>/h, en wordt de totale hardheid (TH) na de reductor teruggebracht tot 0,8 mmol/L. In de zomer is de deelstroom per reductor maximaal 650 m<sup>3</sup>/h, waarna de TH wordt teruggebracht tot 0,9 mmol/L.

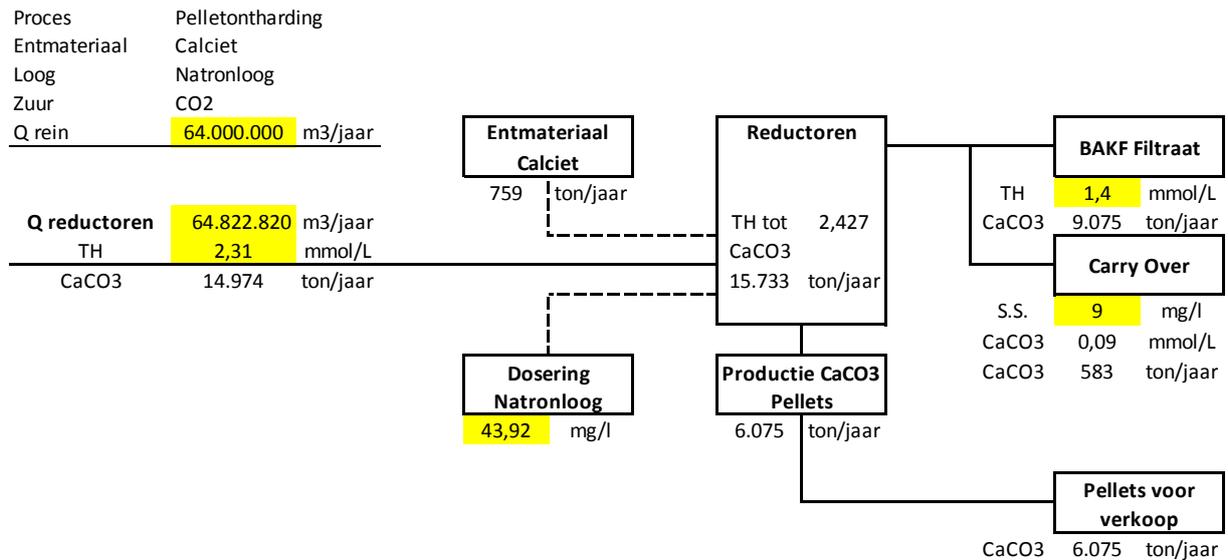
In Figuur 2 is schematisch de calciumcarbonaat massabalans weergegeven van de huidige ontharding met granaatzand als entmateriaal. In Figuur 3 staat dezelfde balans, maar dan voor gebruik van calciet als entmateriaal. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Rein water productie 64 miljoen m<sup>3</sup>/jaar
- Ontharding tot een totale hardheid in het reine water van 1,4 mmol/L
- Dosering van natronloog voor pH-verhoging in de reductoren
- Granaatzand respectievelijk calciet als entmateriaal
- De "carry over" uit de reductoren bestaat volledig uit calciumcarbonaat, dat dus niet wordt neergeslagen op de pellets
- Dosering van zoutzuur respectievelijk kooldioxide voor pH-verlaging na de reductoren

FIGUUR 2: CALCIUMCARBONAAT MASSABALANS VAN DE ONTHARDING MET NaOH EN GRANAATZAND



FIGUUR 3: CALCIUMCARBONAAT MASSABALANS VAN DE ONTHARDING MET NaOH EN CALCIET



Bij gebruik van calciet als entmateriaal is er meer entmateriaal nodig, doordat wordt uitgegaan van grotere korrels, terwijl de uiteindelijke korrels bij dezelfde diameter worden verwijderd. Dit betekent dat er per korrel minder calciet kan worden verwijderd, en dat er dus meer pellets worden geproduceerd, maar wel met een betere kwaliteit.

Op basis van de ruw waterkwaliteit en de gewenste eindhardheid is de benodigde deelstroombehandeling berekend (Tabel 1) met behulp van Aquacalc:

TABEL 1: BEREKENING VAN DE DEELSTROOM-ONTHARDING MET BEHULP VAN NaOH

Berekening deelstroombehandeling met NaOH (per reductor, zomersituatie)						
Toevoer	1.000 m <sup>3</sup> /h	Deelstroom				
Reductor	645 m <sup>3</sup> /h	64.47%				
Bypass	355 m <sup>3</sup> /h	35.53%				
Mengwater	1.000 m <sup>3</sup> /h					
	Water na SF		Mengwater na reductor		Na HCl dosering	
	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L
Ca	76	3,79	39,7	1,98	39,7	1,98
Mg	10	0,82	10	0,82	10	0,82
Na	43	1,86	68	2,96	68	2,96
K	3,8	0,10	3,8	0,10	3,8	0,10
NH <sub>4</sub>	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Som		6,59		5,85		5,85
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	209	3,43	153,3	2,51	151,7	2,49
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	1	0,03	6,4	0,21	0,44	0,01
Cl <sup>-</sup>	77	2,17	77	2,17	85	2,39
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	46	0,95	46	0,95	46	0,95
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3,7	0,06	3,7	0,06	3,7	0,06
Som		6,64		5,91		5,91
TH (mmol/L)		2,31		1,40		1,40
pH	7,9		8,8		7,8	
SI	0,48		0,89		- 0,05	
Temp. (°C)	11,5		11,5		11,5	
Dosering			NaOH (100%)	43,9 mg/L	HCl (100%)	8,2 mg/l

Bij de uitwerking van de verschillende zuiveringsscenario's is ook de maximale ontwerpcapaciteit van de andere zuiveringsstappen in het huidige zuiveringschema van belang. Bij membraanfiltratie ontstaat immers een vrij grote concentraatstroom. Als membraanfiltratie achteraan in het zuiveringsproces wordt opgenomen, dienen de voorafgaande processen deze extra capaciteit te kunnen leveren. Het betreft de volgende zuiveringsstappen met de maximale (en minimale) capaciteiten:

- Snelle zandfiltratie 14.208 m<sup>3</sup>/h (Leiduin 1: 9.600 m<sup>3</sup>/h en Leiduin 2: 2: 4.608 m<sup>3</sup>/h)
- Ozonisatie 16.000 m<sup>3</sup>/h (vier kelders; 4.000 m<sup>3</sup>/h)  
18.000 m<sup>3</sup>/h bij maximale doseerdiepte
- Actieve koolfiltratie 1 & 2 11.562 m<sup>3</sup>/h (per 20 koolfilters); min: 1.156 m<sup>3</sup>/h
- Tussenfiltraatpompen (N=4) 21.400 m<sup>3</sup>/h
- Langzame zandfiltratie 11.200 m<sup>3</sup>/h totaal (min. 3.200 m<sup>3</sup>/h)

## 3 Mogelijke alternatieve zuiveringsscenario's

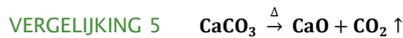
In dit onderzoek zijn twee alternatieve scenario's voor de hardheidverlaging onderzocht:

- Ontharding met behulp van kalkmelk, waarbij calciet als entmateriaal wordt gebruikt.
- Ontharding met behulp van omgekeerde osmose (RO).

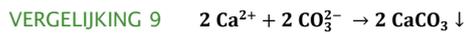
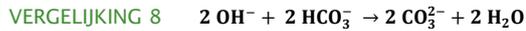
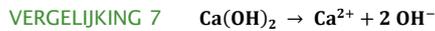
### 3.1 Ontharding met calciet en kalkmelk

Een alternatief voor het in hoofdstuk 2 beschreven onthardingsproces ontstaat door gebruik te maken van het tijdens de ontharding gevormde calciet. Dit zou betekenen dat een deel van het gevormde calciet kan worden toegepast als entmateriaal in plaats van granaatzand. Dat heeft het voordeel dat de gevormde calcietkorrels uit puur calciet bestaan. Bovendien zou een deel van het calciet tot calciumoxide gebrand kunnen worden, en vervolgens als kalkmelk aan het proces worden toegevoegd. Overigens wordt inmiddels ook kooldioxide gebruikt na het onthardingsproces in plaats van zoutzuur. Mogelijk zou hier ook zelfgemaakt kooldioxide voor in aanmerking komen.

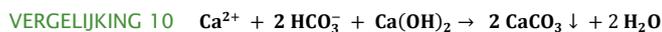
Het branden van kalk verloopt volgens Vergelijking 5, het blussen volgens Vergelijking 6.



Tijdens de ontharding met kalkmelk vinden dan de volgende netto-reacties plaats:



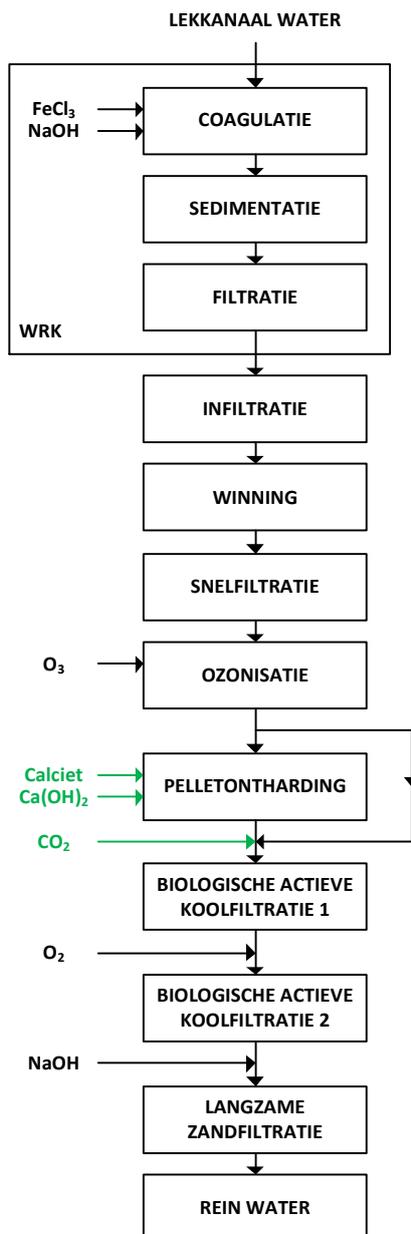
De overall onthardingsreactie is weergegeven in Vergelijking 10



Dit betekent dat voor elk calciumion dat wordt toegevoegd als  $\text{Ca(OH)}_2$  er twee calciumionen neerslaan, en er netto dus één wordt verwijderd. Een nadeel is wel dat per verwijderd calciumion twee bicarbonaationen verdwijnen (vergelijk met Vergelijking 4), waardoor de concentratie onder de aanbevolen limiet van 2 mmol/L zou dalen. Dit zou eventueel te ondervangen zijn door, indien het branden van de kalk op locatie plaatsvindt, het tijdens het branden gevormde kooldioxide (deels) terug te voeren in het water.

Het zuiveringsscenario met ontharding met kalkmelk en calciet is weergegeven in Figuur 4.

FIGUUR 4: PROCESSCHEMA VAN DE ZUIVERING IN LEIDUIN, MET ONTHARDING MET BEHULP VAN CALCIET EN KALKMELK



Op basis van de ruwwaterkwaliteit en de gewenste eindhardheid is de benodigde deelstroombehandeling voor ontharding met kalkmelk berekend met Aquacalc. Bij de berekening met Aquacalc is als uitgangspunt gehanteerd dat de Saturatie Index (SI) van het water na ontharding met kalkmelk gelijk is aan de SI van het water na ontharding met natronloog. De resultaten staan weergegeven in Tabel 2.

TABEL 2: BEREKENING VAN DE DEELSTROOM-ONTHARDING MET BEHULP VAN  $\text{Ca(OH)}_2$ 

Berekening deelstroombehandeling met $\text{Ca(OH)}_2$ (per reductor, zomersituatie)						
Toevoer	1.000 m <sup>3</sup> /h	Deelstroom				
Reductor	645 m <sup>3</sup> /h	64.47%				
Bypass	355 m <sup>3</sup> /h	35.53%				
Mengwater	1.000 m <sup>3</sup> /h					
	Water na SF		Mengwater na reductor		Mengwater na pH correctie	
	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L
Ca	76	3,81	39,7	1,98	39,7	1,98
Mg	10	0,82	10	0,82	10	0,82
Na	43	1,86	43,0	1,86	43,0	1,86
K	3,8	0,10	3,8	0,10	3,8	0,10
NH <sub>4</sub>	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Som		6,59		4,76		4,76
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	209	3,43	87	1,42	98	1,61
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,8	0,03	6,1	0,20	0,4	0,01
Cl <sup>-</sup>	77	2,17	77	2,17	77	2,17
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	46	0,95	46	0,95	46	0,95
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3,7	0,06	3,7	0,06	3,7	0,06
Som		6,64		4,81		4,68
TH (mmol/L)		2,31		1,40		1,40
pH	7,9		9,0		8,0	
SI	0,48		0,89		- 0,05	
Temp. (°C)	11,5		11,5		11,5	
Dosering			Ca(OH) <sub>2</sub> (100%)	81,7 mg/L	CO <sub>2</sub> (100%)	7,7 mg/L

Indien alle benodigde kalkmelk in Leiduin, of uitgaande van calcië van Leiduin, kan worden geproduceerd, betekent dit proces een verandering voor de netto productie van calcië. Alle calcië die, in de vorm van kalkmelk, wordt toegevoegd wordt weer teruggewonnen, en kan worden omgezet in nieuwe kalkmelk. Een deel van het gevormde calcië wordt als entmateriaal ingezet, en bovendien zullen tijdens het branden en blussen van de kalk wel enige verliezen optreden (naar schatting 10% tijdens het branden (Williams, 2004) en 10% tijdens blussen), waardoor de uiteindelijke hoeveelheid calcië die kan worden verkocht naar schatting ongeveer 58% zal bedragen van de huidige productie. De massabalans is uitgebreid beschreven in paragraaf 4.4.2.

De voor- en nadelen van een proces gebaseerd op calcië en kalkmelk zijn weergegeven in Tabel 3.

TABEL 3: VOOR- EN NADELEN VAN EEN ONTHARDING GEBASEERD OP CALCIË EN KALKMELK TEN OPZICHTE VAN DE HUIDIGE ONTHARDING MET BEHULP VAN GRANAATZAND EN NATRONLOOG.

Voordelen	Nadelen
Geen kosten voor aanschaf, transport en opslag van granaatzand	Bicarbonaatgehalte neemt af tot onder streefwaarde van 2,0 mmol/L (mogelijk moet dit gecorrigeerd worden, eventueel door toevoeging van CO <sub>2</sub> uit het brandingsproces).
Zuivere calciëkorrels: meerdere toepassingen van hergebruik mogelijk	Investering in kalkoven en reactor om kalk te blussen en kalkmelk te produceren (indien dit op locatie gebeurt, anders transportkosten naar kalkoven).
Deels gesloten kringloop	Operationele kosten van kalkoven en reactor

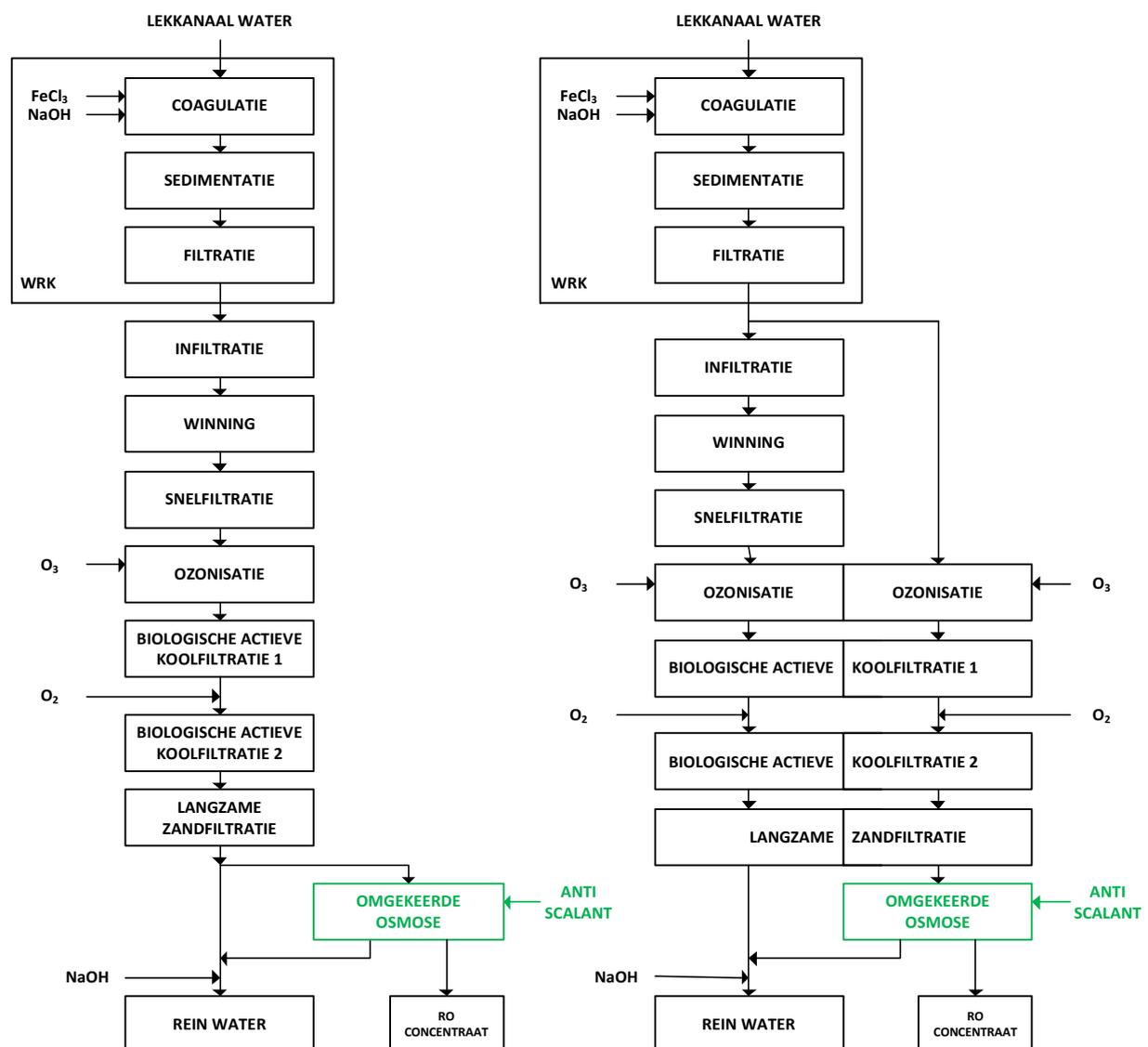
### 3.2 Ontharding met behulp van omgekeerde osmose

De hardheidverlaging die wordt gerealiseerd met omgekeerde osmose wordt vrijwel volledig bepaald door de keuze van de RO-membranen en is niet zoals bij pelletontharding te sturen door chemie. Met RO wordt permeaat geproduceerd dat bijna geen opgeloste zouten meer bevat, waardoor de totale hardheid van het

permeaat nagenoeg nul is. Het RO-permeaat wordt vervolgens gemengd met een deelstroom niet onthard water tot de gewenste hardheid. Doordat de hardheid van het RO-permeaat zeer laag is kan volstaan worden met een relatief kleine deelstroom RO-permeaat en een grote bypass stroom.

Er zijn twee verschillende scenario's uitgewerkt. Bij het eerste scenario (RO1) wordt na de langzame zandfiltratie, een deelstroom behandeld met behulp van RO en vervolgens gemengd met de bypass. In het tweede scenario (RO2) wordt een deelstroom van de WRK via directe zuivering (geen duinpassage) behandeld met RO, waarna het RO-filtraat met niet onthard water wordt gemengd. Beide scenario's zijn schematisch weergegeven in Figuur 5.

FIGUUR 5: PROCESSHEMA VOOR ONTHARDING MET BEHULP VAN OMGEKEERDE OSMOSE LINKS SCENARIO RO1 EN RECHTS SCENARIO RO2.



Op basis van de ruwwaterkwaliteit en de gewenste eindhardheid is de benodigde deelstroombehandeling met omgekeerde osmose berekend met Aquacalc. De resultaten voor RO1 staan weergegeven in Tabel 4. Die van RO2 zijn weergegeven in Tabel 5.

TABEL 4: DEELSTROOM- EN WATERKWALITEITSBEREKENINGEN BIJ TOEPASSING VAN OMGEKEERDE OSMOSE (RO1)

Berekening deelstroombehandeling met RO membranen (vergelijkbare productie met reductor)						
Toevoer	1.099 m <sup>3</sup> /h	Deelstroom				
RO permeaat	394 m <sup>3</sup> /h	39,7%				
Bypass	606 m <sup>3</sup> /h	60,3%				
Mengwater	1.000 m <sup>3</sup> /h					
RO concentraat	99 m <sup>3</sup> /h					
	LDN Water na LZF		RO permeaat		Mengwater	
	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L
Ca	76	3,81	0,20	0,010	46,1	2,30
Mg	10	0,82	0,03	0,002	6,0	0,50
Na	43	1,86	0,27	0,011	25,9	1,13
K	3,8	0,10	0,03	0,001	2,3	0,06
NH <sub>4</sub>	0,01	0,00	0	0,000	0,01	0,00
Som		6,59		0,023		3,98
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	211	3,45	1,4	0,019	127,6	2,09
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,2	0,01	0,00	0,000	0,06	0,00
Cl <sup>-</sup>	77	2,17	0,18	0,005	46,5	1,31
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	46	0,95	0,06	0,001	27,5	0,57
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3,7	0,06	0,08	0,000	2,3	0,04
Som		6,64		0,025		4,02
TH (mmol/L)		2,31		0,005		1,40
pH	8,0		5,3		7,2	
SI	- 0,12		- 6,7		- 0,70	
Temp. (°C)	11,5		11,5		11,5	
Dosering			Antiscalant	2,0 mg/L		

TABEL 5: DEELSTROOM- EN WATERKWALITEITSBEREKENINGEN BIJ TOEPASSING VAN OMGEKEERDE OSMOSE (RO2)

Berekening deelstroombehandeling met RO membranen (vergelijkbare productie met reductor)							
Toevoer	1.099 m <sup>3</sup> /h	Deelstroom					
RO permeaat	394 m <sup>3</sup> /h	39,6%					
Bypass	606 m <sup>3</sup> /h	60,4%					
Mengwater	1.000 m <sup>3</sup> /h						
RO concentraat	99 m <sup>3</sup> /h						
	WRK Water na LZF		RO permeaat		Mengwater		
	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	
Ca	68	3,37	0,16	0,010	46,2	2,30	
Mg	11	0,89	0,03	0,002	6,0	0,50	
Na	44	1,91	0,29	0,011	25,9	1,13	
K	4,2	0,11	0,05	0,001	2,3	0,06	
NH <sub>4</sub>	0,01	0,00	0	0,000	0,01	0,00	
Som		6,28		0,023		3,99	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	169	2,77	1,16	0,019	127,6	2,09	
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,4	0,01	0,00	0,000	0,09	0,00	
Cl <sup>-</sup>	82	2,31	0,18	0,005	46,5	1,31	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	55	1,15	0,06	0,001	27,5	0,57	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10,7	0,17	0,22	0,000	2,3	0,04	
Som		6,42		0,025		4,02	
TH (mmol/L)		2,13		0,005		1,40	
pH	7,4		5,3		7,2		
SI	- 0,16		- 6,9		- 0,70		
Temp. (°C)	11,5		11,5		11,5		
Dosering			Antiscalant	2,0 mg/L			

Als gevolg van de behandeling met omgekeerde osmose neemt niet alleen de hardheid af, maar wordt de concentratie van alle ionen met circa 35-40% verlaagd. Het bicarbonaatgehalte in het mengwater (2,1 mmol/L) ligt nog net boven de door Waternet gehanteerde streefwaarde van 2,0 mmol/L.

De voor- en nadelen van een proces gebaseerd op omgekeerde osmose zijn weergegeven in Tabel 6.

TABEL 6: VOOR- EN NADELEN VAN OMGEKEERDE OSMOSE TEN OPZICHTE VAN DE HUIDIGE ONTHARDING MET BEHULP VAN GRANAATZAND EN NATRONLOOG.

Voordelen	Nadelen
Eenvoudiger proces met minder doseringen van chemicaliën	Waterverlies door RO-concentraat, waardoor voorafgaande zuivering hogere productie moet leveren
Geen kosten voor aanschaf, transport en opslag van granaatzand	Investing in omgekeerde osmose installatie
Extra barrière (deelstroom) voor organische microverontreinigingen	Operationele kosten (energie, antiscalant, membraanvervangning)
Verwijdering bromaat, arseen	

In totaal zijn er dus vijf scenario's doorgerekend voor dit onderzoek:

1. REF\_HCl. De huidige pelletontharding met natronloog, maar met calciëet als entmateriaal, en zoutzuur voor de pH-correctie
2. REF\_CO2. De huidige pelletontharding met natronloog, maar met calciëet als entmateriaal, en kooldioxide voor de pH-correctie
3. KKK. Een pelletontharding op basis van kalkmelk in plaats van natronloog, met calciëet als entmateriaal, en kooldioxide voor de pH-correctie
4. RO1. Omgekeerde osmose met duinpassage
5. RO2. Omgekeerde osmose zonder duinpassage

## 4 Uitwerking zuiveringsscenario 'Pelletontharding met calciëet en kalkmelk'

### 4.1 Werkwijze bij het branden, blussen en oplossen van de kalk

Voor het branden van kalk zijn in dit project drie verschillende typen calciëet gebruikt, twee afkomstig uit Leiduin en één uit Weesperkarspel (Tabel 7). In Weesperkarspel wordt namelijk al gebruik gemaakt van calciëet als entmateriaal, waardoor er korrels worden verkregen die voor 100% uit calciëet bestaan. Het is de bedoeling om in de toekomst ook in Leiduin over te schakelen op calciëet als entmateriaal. Om te kunnen beoordelen of de granaatzandkern in de huidige calciëetkorrels van Leiduin de verdere verwerking van de korrels mogelijk beïnvloedt, zijn korrels uit Weesperkarspel als referentie meegenomen in dit onderzoek. Aangezien het water in Weesperkarspel uit een andere bron afkomstig is dan het water in Leiduin, is het niet uit te sluiten dat het in Weesperkarspel gevormde calciëet net iets anders van samenstelling is dan het calciëet dat in Leiduin wordt gevormd, waardoor het wel belangrijk was om ook calciëet uit Leiduin voor dit onderzoek te gebruiken.

TABEL 7: TYPEN CALCIEET GEBRUIKT IN EXPERIMENTEN MET HET BRANDEN VAN KALK

Type calciëet	Omschrijving
KL	Calciëetkorrels uit Leiduin, met kern van granaatzand
VKL	Gemalen calciëetkorrels uit Leiduin, met kern van granaatzand
ZEW	Op locatie gemalen calciëetkorrels uit Weesperkarspel, met kern van calciëet.

De kalk is in een laboratoriumoven verhit tot 850 of 1.000 °C, waarbij na 5, 8 of 24 uur een monster is genomen. Dit is geblust en vervolgens opgelost volgens het protocol SWE 92.012.

Voor de ICP-MS analyse is het CaO gedestruëerd met behulp van salpeterzuur, en daarna opgelost in water.

Bij het blussen is water toegevoegd aan de CaO, en is 15 min. gewacht, waarbij is gemeten hoe snel de temperatuur oploopt tot 60 °C. Dit is een relatieve maat voor de reactiviteit, die wordt uitgedrukt als "laag reactief", "matig reactief" en "zeer reactief".

Voor de kwaliteit van kalkmelk gelden de volgende parameters:

VERGELIJKING 11  $egv(t) = k \cdot a \cdot (1 - e^{-t/\tau})$

In Vergelijking 11 zijn:

$egv(t)$ : het geleidingsvermogen op tijdstip  $t$  ( $\mu S/m$ )

$k$ : de zuiverheidsconstante (-)

$a$ : het geleidingsvermogen in de eindsituatie, indien de kalkmelk voor 100% uit  $Ca(OH)_2$  bestaat ( $\mu S/m$ )

$t$ : de tijd verstreken na het doseren van de kalkmelk (s)

$\tau$ : de oplostijdsconstante (s)

De zuiverheid  $k$  wordt berekend via Vergelijking 12.

VERGELIJKING 12  $k = egv_{max} / a$

In Vergelijking 11 is:

$egv_{max}$ : het geleidingsvermogen in de eindsituatie ( $\mu S/m$ )

De oplostijdconstante geeft de tijd aan die nodig is om 63% van de eind-geleidbaarheid te bereiken (Vergelijking 13):

$$\text{VERGELIJKING 13} \quad \text{egv}(\tau) = 0,63 \cdot \text{egv}_{\text{max}}$$

Een kalk wordt als zuiver beschouwd als  $k > 0,9$ . Verder moet de kalkmelk snel genoeg oplossen, waarvoor in de praktijk een waarde  $\tau < 1,7$  s wordt aangehouden.

#### 4.2 Kalk branden in de literatuur

Het branden van kalk is een proces dat al eeuwenlang wordt toegepast. Er is dan ook heel veel bekend over het proces en hoe dat technisch het beste kan worden uitgevoerd. De ontleding van calciëet begint bij temperaturen boven 800 °C, mits de partiële druk van kooldioxide niet te hoog is. Over het algemeen vindt het branden plaats bij temperaturen tussen 850 en 1.200 °C (Válek et al., 2014). Een hogere temperatuur en/of langere brandingstijd leidt tot een hogere dichtheid van de kalk door een lagere porositeit en, als gevolg daarvan, een lagere reactiviteit.

In het brandingsproces spelen diverse variabelen een belangrijke rol, die eigenlijk allemaal samenhangen met de chemische kinetiek van het kalk branden en met fysische transportverschijnselen. Door het ontwerp van de oven en de procescondities aan te passen kan het proces worden geoptimaliseerd (Okonkwo en Adefila, 2013). Een belangrijke parameter is de grootte van de calciëetdeeltjes. Die is van belang omdat het branden van de kalk van buiten naar binnen moet plaatsvinden. Als de deeltjes te groot zijn, duurt het lang voordat ook de kern kan reageren. Dit betekent dat hogere temperaturen en/of langere brandingstijden nodig zijn, die er weer voor zorgen dat het buitenste laagje, dat poreus is door het ontwijken van kooldioxide, verdicht, waardoor de reactiviteit van de gebrande kalk afneemt. Een dergelijk probleem doet zich ook voor als de deeltjesgrootteverdeling van het calciëet te breed is. Dan bestaat het risico dat kleine deeltjes te hard gebrand worden, of de grote onvolledig. Bovendien heeft een te brede verdeling een negatieve invloed op de pakkingsgraad in de kalkoven (en kan de warme lucht er bijvoorbeeld niet goed doorheen). In de praktijk (bij grote kalkovens) worden echter geen kleine deeltjes maar grote brokken calciëet in de ovens gebracht.

Over het algemeen kan men kalkovens indelen in twee categorieën: ronddraaiende ovens en verticale ovens. Het temperatuurprofiel in en de stroming door deze typen ovens verschillen (Maerz 2015). Carmeuse is een van oorsprong Belgisch bedrijf met een vestiging in Gouda, dat zich bezighoudt met de productie van kalk, kalksteen en daarvan afgeleide producten. Zo produceert het bijvoorbeeld calciëet, dat als entmateriaal wordt gebruikt, en kalkmelk. Dit bedrijf maakt bij het grootschalig branden van kalk gebruik van brokken calciëet met een grootte van ongeveer 20 cm. Dit betekent wel dat het binnenste deel van de brokken niet reageert, omdat anders de rest van de kalk veel te hard gebrand wordt. Dit leidt tot een onzuiverheid in de kalk.

Omdat CaO erg reactief is (en bijvoorbeeld al met kooldioxide uit de lucht reageert), wordt het meestal toegepast in de vorm van Ca(OH)<sub>2</sub>. Hiertoe wordt de kalk eerst geblust met H<sub>2</sub>O (waarbij voldoende water wordt toegevoegd om vast calciumhydroxide te vormen), en daarna opgelost in water. Dit is een tweetrapsproces, waarbij tijdens de eerste stap veel warmte vrijkomt. Indien een overmaat water wordt gebruikt, zijn de deeltjes in de kalkmelk kleiner. Over het algemeen zal een hoog-reactieve kalk volledig hydrateren in 2-3 minuten. Bij matig-reactieve kalk duurt het 5-10 minuten, en voor laag-reactieve kalk zelfs 15-30 min. Ook voor het blussen van kalk zijn diverse typen processen en reactoren ontworpen (Hassibi, 2009).

#### 4.3 Resultaten kalk branden

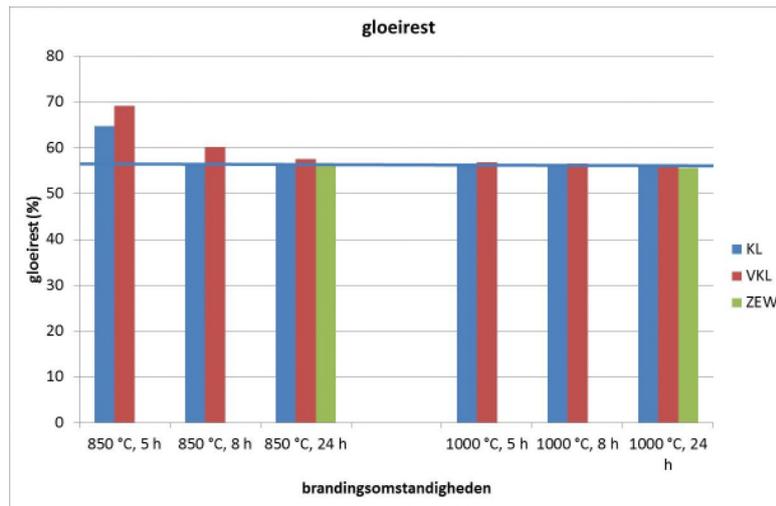
Het branden van kalk vindt normaalgesproken plaats bij een temperatuur van 850-1.200 °C. Kalk die te "hard" is geworden tijdens het branden is weinig reactief en levert geen bruikbare kalkmelk op. Bovendien betekent een lagere brandingstemperatuur een lager energieverbruik. Daarom is besloten om twee series experimenten uit te voeren, en de kalk te branden bij 850 en bij 1.000 °C. Hiervoor is gebruik gemaakt van een "gewone" laboratoriumoven, en niet van een kalkoven, die hier speciaal voor ontworpen is. Dit kan de

uiteindelijke resultaten iets vertekenen, bijvoorbeeld omdat het gevormde kooldioxide niet direct wordt afgevoerd en mogelijk tijdens het afkoelen nog met de kalk kan reageren.

Tijdens het branden zijn monsters genomen na 5, 8 en 24 uur op een bepaalde temperatuur (dit is inclusief de tijd die nodig was voor het opwarmen).

De hoeveelheid calciumoxide die gevormd wordt (de "gloeirest") is theoretisch 56%, maar kan door verontreinigingen in de praktijk hoger of lager zijn. Het resultaat van deze experimenten is weergegeven in Figuur 6. De gebruikte typen calciëet zijn beschreven in Tabel 7

FIGUUR 6: GLOEIREST VAN VERSCHILLENDE MONSTERS CALCIËT



Het blijkt dat voor het volledig branden van de kalk een temperatuur van 850 °C voldoende is, mits hiervoor voldoende tijd wordt genomen (> 8 uur). Het proces verloopt sneller bij een temperatuur van 1.000 °C. Het is opmerkelijk dat het vooraf malen van de calciëetkorrels geen positief effect heeft op het proces van branden (bij lagere temperatuur lijkt het eerder vertragend te werken). Bovendien heeft de aanwezigheid van het granaatzand geen merkbaar effect op de gloeirest van de monsters. Dit is te verklaren uit de hoeveelheid granaatzand die aanwezig is. Het toegevoegde granaatzand heeft een diameter tussen de 0,2 en 0,3 mm, en de dichtheid is 4.110 kg/m<sup>3</sup>. De gevormde calciëetkorrels hebben een diameter van ongeveer 1 mm, en de dichtheid van calciëet is circa 2.671 kg/m<sup>3</sup>. Dit betekent dat de uiteindelijke calciëetkorrels op volumebasis slechts 1,56% granaatzand bevatten, ofwel voor 97,7 massa% uit calciëet bestaan (gegevens uit: Agentschap NL, 2011; Reijnen en Siegers, 2008; Siegers, 2003).

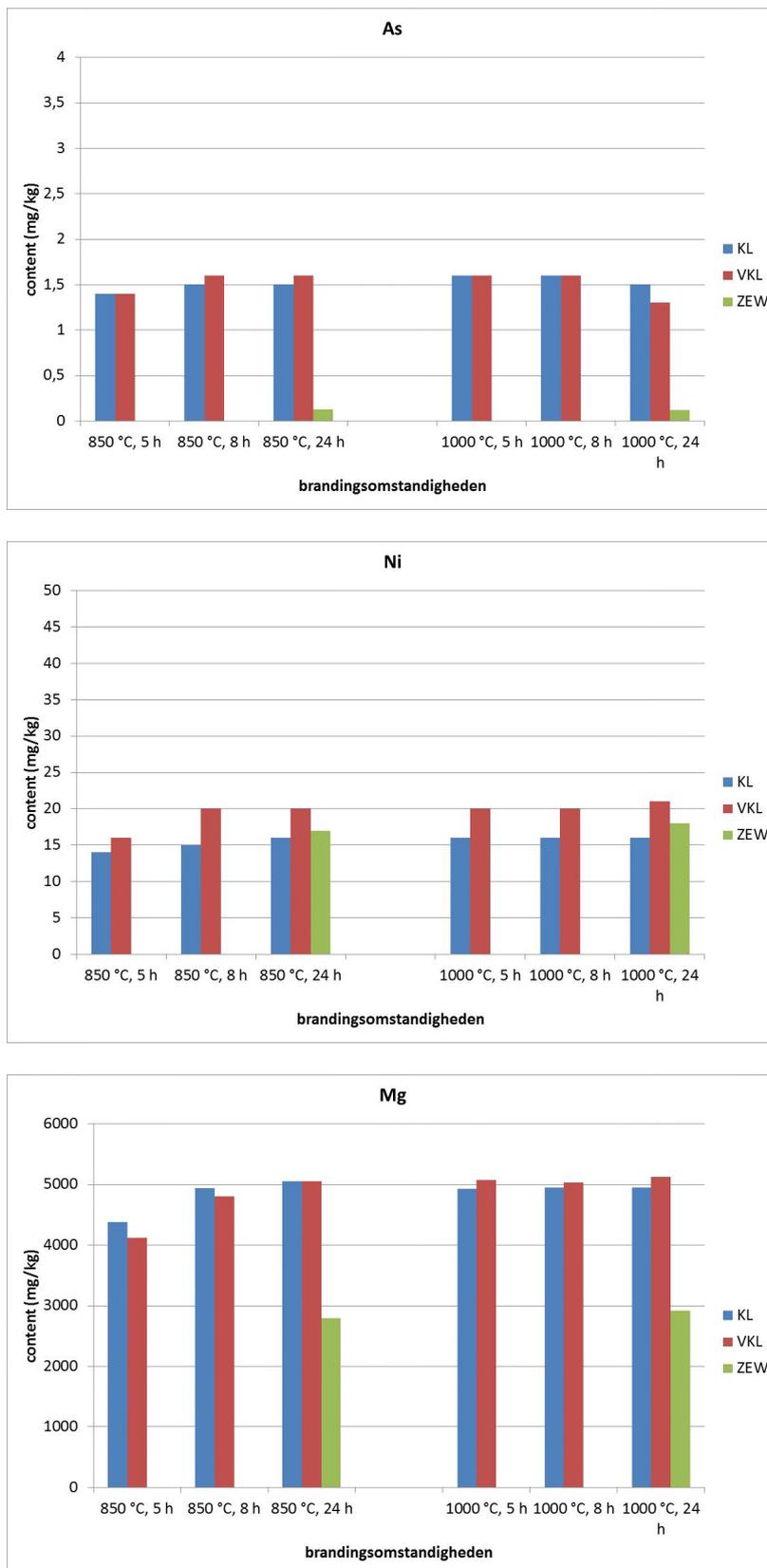
Tijdens de testen zijn wel "steentjes" in de kalk gevonden (Figuur 7 ); waarschijnlijk is dit het granaatzand.

FIGUUR 7: GRANAATZAND DAT IN DE CALCIETKORRELS AANWEZIG WAS BIJ HET BLUSSEN VAN DE KALK



De samenstelling van de kalk is bepaald met behulp van ICP-MS. De totale samenstelling is weergegeven in Bijlage 1. Voor enkele elementen, die met een gehalte > 1 mg/kg voorkomen, is de samenstelling van de verschillende monsters weergegeven in Figuur 8. In de bijlage zijn ook de data voor de overige metalen te vinden.

FIGUUR 8: METAALGEHALTE VAN GEBRANDE KALKMONSTERS. LET OP: DE WAARDEN OP DE VERTICALE ASSEN VERSCHILLEN.

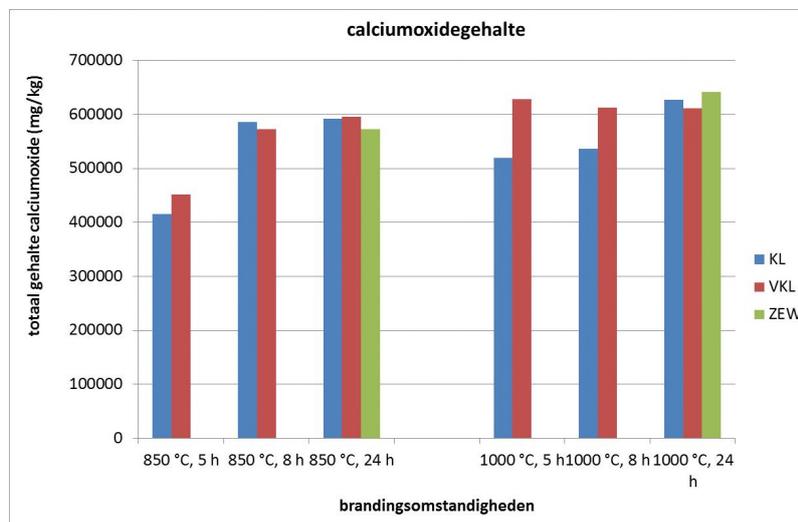


Uit de resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Er zit wel duidelijk verschil tussen korrels uit Leiduin en uit Weesperkarspel. Zo bevatten de laatste minder Pd, Sr, As, Fe, Mn, V, Al, en Mg, maar juist meer Cu. Dit hangt mogelijk samen met de samenstelling van het water. Het water van Leiduin wordt gewonnen uit de Rijn, en bereikt na duinpassage het pompstation. Het water van Weesperkarspel is opkwellend grondwater uit de Utrechtse heuvelrug, vermengd met water afkomstig uit de Loosdrechtse plassen (via bodempassage).
2. Voor de metalen Pd, Sr, As, Cu, Mg, B, Ca maakt het eigenlijk niet uit of de korrels gemalen worden, en bij welke temperatuur of hoe lang ze gebrand worden. Dit is conform de verwachting, want het maalproces zou het metaalgehalte niet moeten beïnvloeden.
3. Gemalen korrels bevatten (veel) meer Ni, Fe, Cr, Ti, K, Al, Na, en Li. De korrels zijn in een RVS-molen bij Delft Solids Solutions (DSS) gemalen, en waarschijnlijk zijn deze metalen afkomstig van de molen. Dit zou betekenen dat malen op een andere manier moet gebeuren dan de methode die is toegepast bij DSS.
4. Het Fe-gehalte neemt toe bij hogere brandingstemperatuur en langere tijden. Dit geldt ook voor Mn, V, K (met wel een klein effect voor langere tijden), en Al. Het is onduidelijk waardoor dit veroorzaakt wordt.
5. Gemalen korrels bevatten meer Na bij 1.000 °C dan bij 850 °C, en bij een vaste temperatuur neemt het gehalte af bij langere brandingstijden. Ook hiervoor is op dit moment nog geen verklaring.
6. K-gehalte neemt af bij hogere brandingstemperatuur en langere brandingstijden. Het is vooralsnog onbekend waardoor dit veroorzaakt wordt.
7. Het calciumgehalte neemt toe bij langer branden bij 850 °C. Bij 1.000 °C is dit effect voor niet-gemalen calciet wel te zien, maar bij gemalen calciet niet. Dit hangt er waarschijnlijk mee samen dat gemalen calciet toch iets effectiever kan worden gebrand, en dus meer CaO wordt gevormd (en dus carbonaat is verdwenen, waardoor het calciumgehalte relatief toeneemt).

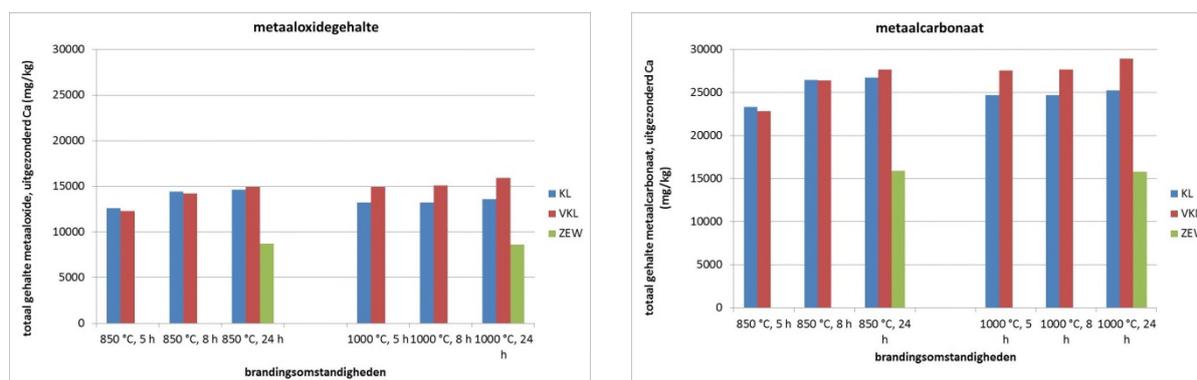
Het calciumoxide-gehalte, dat is berekend aannemende dat alle  $\text{CaCO}_3$  is omgezet in CaO, is weergegeven in Figuur 9.

FIGUUR 9: CALCIUMOXIDE-GEHALTE IN DE BIJ KWR GEBRANDE KALK.



Uit deze gegevens blijkt dat het CaO-gehalte van de gebrande kalk hooguit ongeveer 60% bedraagt. Daarom is uitgerekend hoe groot de totale hoeveelheid aan andere metalen is, ervan uitgaande dat die ofwel in de vorm van oxiden, ofwel in de vorm van carbonaten voorkomen (waarbij voor Ti, As, Pd en B wel is uitgegaan van oxiden, omdat carbonaten hiervan niet veel voorkomen). De resultaten van deze berekeningen zijn weergegeven in Figuur 10. Overigens zijn ook andere verbindingen van metalen mogelijk. Zo is bekend dat silica, aluminium en ijzer bij hoge temperaturen kunnen reageren met calcium- en magnesiumoxides, en dat verbindingen als dicalciumsilicaat en tricalciumaluminaat gevormd kunnen worden (Válek et al., 2014). In elk geval blijkt uit deze resultaten dat calciumoxide en de andere metalen slechts ongeveer 80-85% van het totaal uitmaken. Waarschijnlijk betekent dit dat de destructie met behulp van salpeterzuur als onderdeel van de analyse niet volledig is geweest, waardoor een (kleine) afwijking in de echte samenstelling ten opzichte van de gemeten waarden mogelijk is.

FIGUUR 10: TOTAL GEHALTE AAN ANDERE METALEN DAN CA, UITGAANDE VAN OXIDEN (LINKS) OF CARBONATEN(RECHTS).



In het Drinkwaterbesluit worden maximaal toegestane concentraties voor metalen aangegeven in zowel  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  als  $\text{CaO}$ . In Tabel 8 zijn die vergeleken met de hier gemeten concentraties in het  $\text{CaO}$ . Hieruit volgt dat alle concentraties (ruim) onder de norm blijven. Alleen het nikkelgehalte is relatief hoog, maar nog steeds onder de norm van 20 mg/kg.

TABEL 8: VERGELIJKING VAN METAALGEHALTEN IN GEBRANDE KALKMONSTERS MET TOEGESTANE WAARDEN VOLGENS DRINKWATERBESLUIT.

Drinkwaterbesluit		Gemeten (mg/kg)							
metaal	Per $\text{Ca}(\text{OH})_2$ of $\text{CaO}$ (mg/kg)	KL 850 °C 5 uur	KL 850 °C 8 uur	KL 850 °C 24 uur	KL 1.000 °C 5 uur	KL 1.000 °C 8 uur	KL 1.000 °C 24 uur	ZEW 850 °C 24 uur	ZEW 1.000 °C 24 uur
Sb	4	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
As	5	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,5	0,13	0,12
Cd	2	0,006	0,006	0,007	0,068	0,008	0,010	0,006	0,006
Cr	20	0,58	0,61	0,58	0,62	0,72	0,86	0,59	1,4
Hg	0,3	--	--	--	--	--	--	--	--
Pb	20	0,38	0,50	0,71	0,56	0,43	0,50	0,48	1,2
Ni	20	14	15	16	16	16	16	17	18
Se	4	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10

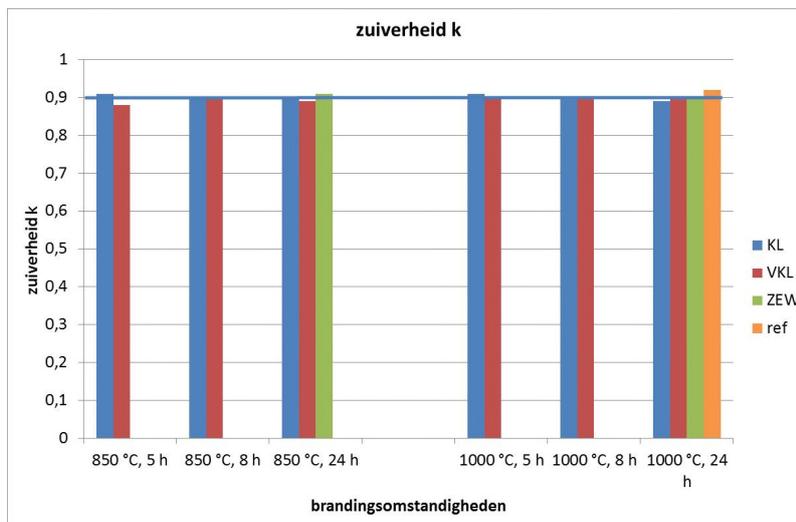
Vervolgens is het gevormde  $\text{CaO}$  geblust en opgelost, en werd de aldus gevormde kalkmelk volgens het protocol getest (Merks et al., 1992a; Merks et al, 1992b; Merks et al., 1995). De reactiviteit (een relatieve waarde, zie ook paragraaf 4.1) is weergegeven in Tabel 9. In principe zou de aanwezigheid van de korrels granaatzand hier geen invloed op moeten hebben gehad, want dat slaat neer en beïnvloedt de elektrische geleiding van de oplossing verder niet.

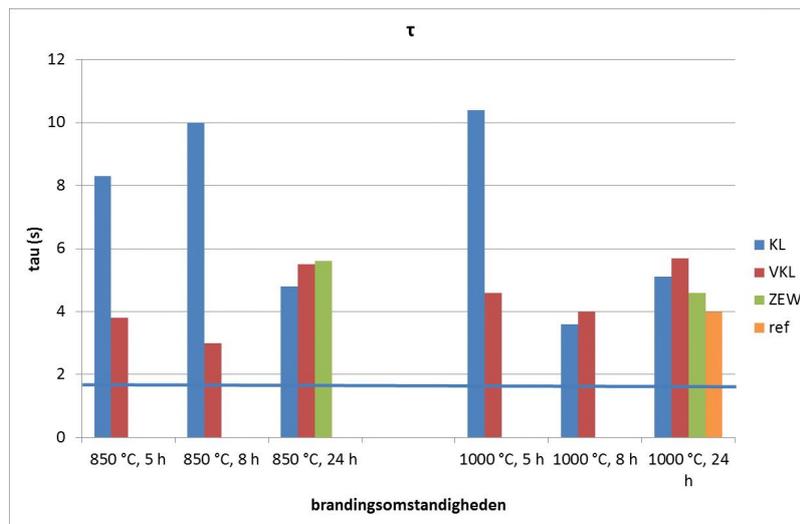
TABEL 9: REACTIVITEIT VAN VERSCHILLENDE TYPEN GEBRANDE KALK BIJ BLUSSEN

Monster	reactiviteit
KL 850 °C 5 uur	Laag tot matig
KL 850 °C 8 uur	Hoog
KL 850 °C 24 uur	Hoog
KL 1.000 °C 5 uur	Matig tot hoog
KL 1.000 °C 8 uur	Hoog
KL 1.000 °C 24 uur	Matig
VKL 850 °C 5 uur	Laag
VKL 850 °C 8 uur	Matig
VKL 850 °C 24 uur	Laag
VKL 1.000 °C 5 uur	Matig
VKL 1.000 °C 8 uur	Matig
VKL 1.000 °C 24 uur	Laag tot matig
ZEW 850 °C 24 uur	Laag tot matig
ZEW 1.000 °C 24 uur	Matig
Referentie CaO	Matig

Belangrijke parameters voor kalkmelk zijn  $\tau$  en de zuiverheid  $k$ . Deze parameters zijn bepaald voor alle hierboven genoemde monsters, en voor zuiver CaO (Boom), dat als referentie werd meegenomen. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 11 en Figuur 12.

FIGUUR 11: ZUIVERHEID K VAN VERSCHILLENDE KALKMONSTERS (ZIE VERGELIJKING 12)



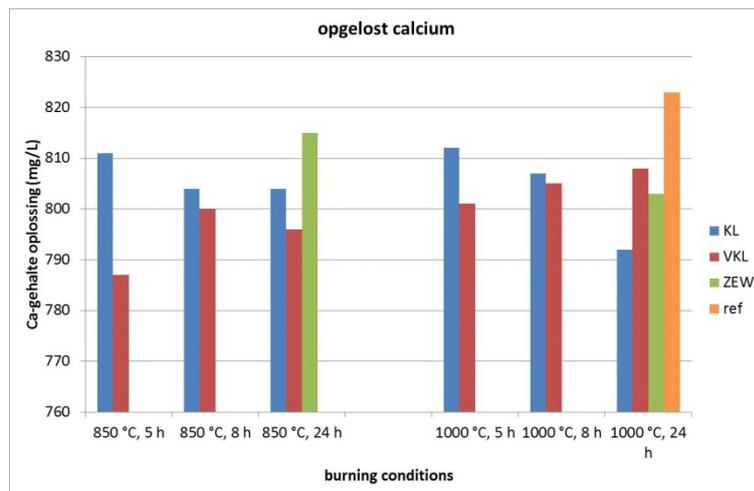
FIGUUR 12:  $\tau$ -WAARDE VAN DE GEBLUSTE KALK (ZIE VERGELIJKING 13)

Voor praktische toepassingen wordt een  $k$ -waarde  $\geq 0,9$  aangehouden (zie horizontale lijn). Uit Figuur 11 blijkt dat de zuiverheid van de korrels uit Leiduin voldoende kan zijn. Bovendien zal de zuiverheid op den duur toenemen, omdat dan het granaatzand uit de korrels verdwenen zal zijn. Daarnaast zouden de gemalen korrels minder metalen moeten bevatten, als ze op een andere manier gemalen worden. De  $\tau$ -waarde van alle gemeten korrels is te hoog, want in de praktijk wordt een maximale waarde van 1,7 s aangehouden (zie horizontale lijn). Een te hoge  $\tau$ -waarde betekent dat de kalkmelk in het onthardingsproces te traag oplost. Hierdoor is meer kalkmelk nodig, en dus ook meer zuur om na afloop het water te neutraliseren, en treedt bovendien meer carry-over op, waardoor het proces niet optimaal verloopt. De hoe  $\tau$ -waarde in dit geval kan echter te maken hebben met de manier waarop de kalk gebrand is. De gebruikte oven was hiervoor niet geoptimaliseerd (het was geen echte kalkoven), en tijdens het afkoelen zou bijvoorbeeld de kalk ook weer met kooldioxide gereageerd kunnen hebben. Hierdoor ontstaat aan de buitenkant weer een laagje  $\text{CaCO}_3$ , dat het oplossen vertraagt. In een echte kalkoven is het proces beter in de hand te houden. Het blijkt ook dat het zuivere  $\text{CaO}$ , dat als referentie werd meegenomen, geen betere  $\tau$ -waarde te zien geeft. Het lijkt erop dat het voor de  $\tau$ -waarde niet echt nodig is de kalk bij 1.000 °C in plaats van bij 850 °C te branden: bij die lagere temperatuur worden vergelijkbare resultaten verkregen. Wel lijkt een minimale brandingstijd van 5 uur betere resultaten te geven, en lijkt ook het vooraf malen van de calciet tot een lagere  $\tau$ -waarde te leiden.

Uit informatie van Carmeuse blijkt dat zij in de praktijk een  $\tau$ -waarde aanhouden die is gebaseerd op 90% oplossing in plaats van 63%. Voor praktische toepassingen gaan ze dan uit van een oplostijdsconstante  $<10$  s, wat overeen zou komen met een  $\tau$ -waarde = 4,35 s. Indien dit inderdaad voldoende is voor toepassing in drinkwaterontharding moet worden geconcludeerd dat aan die eis met de gebrande en gebluste kalk van Leiduin wel te voldoen is.

Het calciumgehalte van de uiteindelijk gevormde kalkmelk (opgelost calcium) is weergegeven in Figuur 13.

FIGUUR 13: GEHALTE OPGELOST CALCIUM IN KALKMELK



Uit Figuur 13 blijkt dat het Ca-gehalte van de uit zelfgebrande kalk gevormde kalkmelk lager is dan van de referentie. Dit zou te maken kunnen hebben met de aanwezigheid van restjes granaatzand, maar dan zou de kalk uit Weesperkarspel betere resultaten moeten geven, en dat is slechts in één meting het geval. Ook kan uit deze resultaten niet worden geconcludeerd wat de invloed van het malen is geweest. Vooral nog is het niet duidelijk of het verschil nadelig is voor het toepassen van zelfgebrande kalk in het onthardingsproces. Er is mogelijk wel een overeenkomst tussen de hoeveelheid opgelost calcium in de kalkmelk (Figuur 13) en de zuiverheid, al is het verschil in k-waarde minimaal (Figuur 11).

#### 4.4 Massabalans onthardingsproces Leiduin

##### 4.4.1 Ontharding met behulp van NaOH

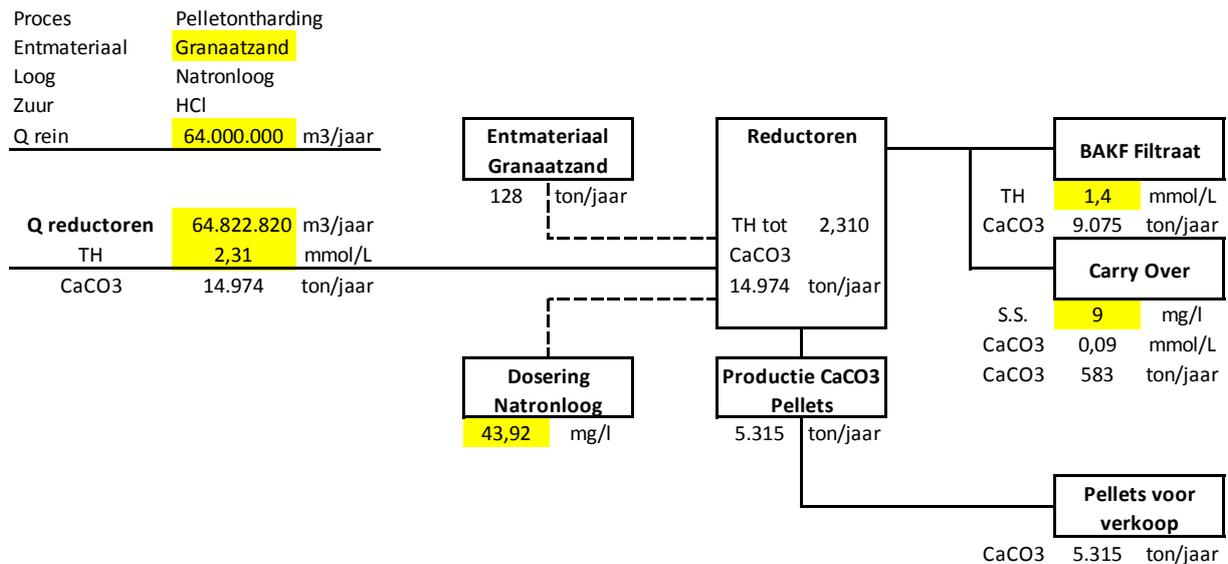
De TH wordt verlaagd van 2,31 meq/L tot 1,40 meq/L. Bij de berekeningen is uitgegaan van een totale productie van  $64 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/jaar (~ productie 2014). Dit betekent dat er per L 0,91 mmol Ca<sup>2+</sup> wordt verwijderd (waarvoor 0,91 meq NaOH nodig is), ofwel dat er 0,91 mmol CaCO<sub>3</sub>/L wordt gevormd. Een klein deel (circa 10%) van de calciumcarbonaat verlaat echter de reductoren als carry over. In totaal moet er dus een hoeveelheid van ongeveer 5.200 ton CaCO<sub>3</sub> per jaar worden neergeslagen op de pellets. Hiervoor is in totaal 2.850 ton NaOH per jaar nodig (zie Figuur 14).

Aangezien één calciëpellet  $1,40 \cdot 10^{-6}$  kg calcië bevat, met een kern van granaatzand, zijn voor de totale verwijdering  $4,15 \cdot 10^{12}$  korrels nodig, ofwel ca. 128 ton granaatzand per jaar (zie kader). In de praktijk wordt 200 ton per jaar toegepast. Dit verschil is eenvoudig te verklaren uit kleine verschillen in diameter van het entmateriaal en de uiteindelijke korrels. Indien bijvoorbeeld de diameter van de verwijderde calciëkorrels niet 1 mm maar 0,8 mm is, is namelijk al twee keer zoveel, ofwel 256 ton granaatzand per jaar nodig. In de praktijk zijn uiteraard niet alle verwijderde calciëkorrels exact even groot.

De straal van een entkorrel granaatzand is  $1,25 \cdot 10^{-4}$  m, waardoor het volume van de entkorrel, aannemende dat het een bolvormige korrel is,  $8,18 \cdot 10^{-12}$  m<sup>3</sup> bedraagt. Bij een dichtheid van 4100 kg/m<sup>3</sup> betekent dit dat de massa van de entkorrel  $3,35 \cdot 10^{-8}$  kg is.

De straal van de uiteindelijke calciëkorrel is bij verwijdering  $5,00 \cdot 10^{-4}$  m, dus het volume van de korrel bedraagt dan  $5,24 \cdot 10^{-10}$  m<sup>3</sup>. Hiervan is  $5,24 \cdot 10^{-10} \cdot 8,18 \cdot 10^{-12} = 5,15 \cdot 10^{-10}$  m<sup>3</sup> calcië. Dit heeft een dichtheid van 2710 kg/m<sup>3</sup>, dus per korrel kan  $5,15 \cdot 10^{-10} \cdot 2710 = 1,40 \cdot 10^{-6}$  kg calcië worden verwijderd. Voor de verwijdering van 5200 ton calcië zijn dan  $4,15 \cdot 10^{12}$  korrels nodig, wat overeenkomt met ongeveer 128 ton granaatzand.

FIGUUR 14: CALCIUMCARBONAAT MASSABALANS VAN DE ONTHARDING MET NaOH EN GRANAATZAND



#### 4.4.2 Ontharding met behulp van Ca(OH)<sub>2</sub>

In dit geval wordt 1 mol Ca(OH)<sub>2</sub> toegevoegd om 1 mol Ca<sup>2+</sup> te verwijderen. Dit betekent dat er per mol toegevoegde Ca(OH)<sub>2</sub> 2 mol CaCO<sub>3</sub> wordt gevormd. Ook voor de verhoging van de pH is een extra hoeveelheid Ca(OH)<sub>2</sub> nodig. De hierdoor toegevoegde hoeveelheid calcium dient ook te worden verwijderd. Er is aangenomen dat de hoeveelheid carry-over gelijk blijft.

In totaal moet, bij een productie van 64\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/jaar 5.200 ton CaCO<sub>3</sub> worden verwijderd, wat in dit geval betekent dat er 14.250 ton CaCO<sub>3</sub> moet worden gevormd (inclusief de als entmateriaal toegevoegde hoeveelheid calciet). Hiervoor is jaarlijks 5.300 ton Ca(OH)<sub>2</sub> nodig.

Calciet kan ook gebruikt worden als entmateriaal voor de ontharding, in plaats van granaatzand. Bij de berekening van de hoeveelheid benodigd entmateriaal is aangenomen dat de massa van de ent gelijk moet blijven. Dit betekent dat de straal van een calciet-ent 0.144 mm moet zijn (dus korrels van ongeveer 0.28 mm; ten opzichte van granaatzand is dit een klein verschil). Bij dezelfde uiteindelijke pelletdiameter van 1 mm, betekent dit dat elke ent dus 1.38\*10<sup>-6</sup> kg CaCO<sub>3</sub> verwijdert. In totaal zijn in dit proces dan 8,40\*10<sup>12</sup> korrels nodig, ofwel 282 ton CaCO<sub>3</sub> moet als entmateriaal worden ingezet.

Het blijkt dat bij Waternet in Weesperkarspel entkorrels calciet van 0,5 mm worden ingezet. Hieruit volgt dat per korrel 1,24\*10<sup>-6</sup> kg CaCO<sub>3</sub> verwijderd kan worden, en er dus 9,34\*10<sup>12</sup> korrels nodig zijn, ofwel 1.780 ton entmateriaal.

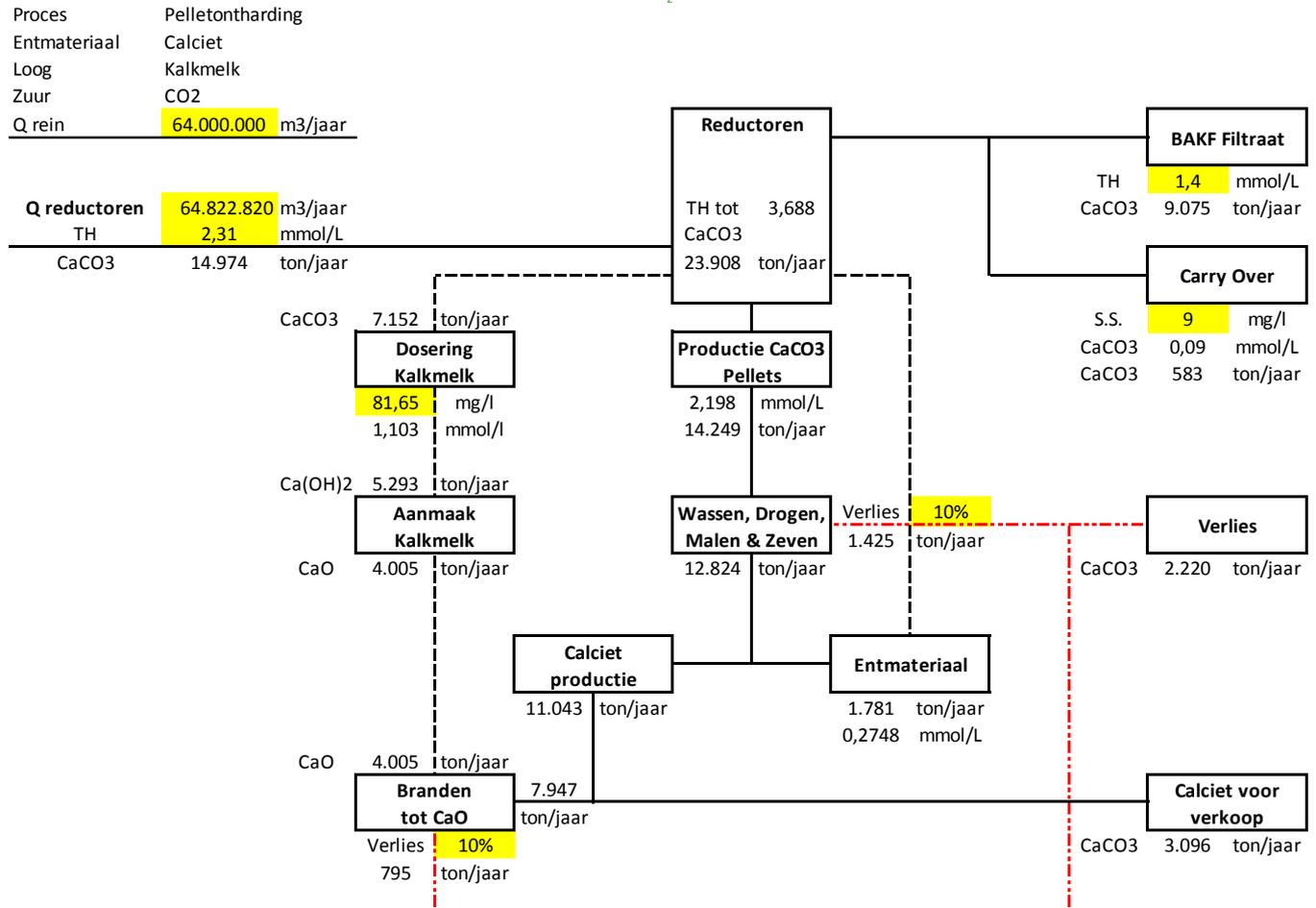
Het gevormde calciet kan worden omgezet in kalkmelk. Aannemende dat het totale verlies tijdens branden en blussen van de kalk ongeveer 20% bedraagt, betekent dit dat er 7.950 ton calciet per jaar gebrand moet worden, en dat er 3.100 ton CaCO<sub>3</sub> per jaar overblijft van de productie. Dit is ca. 58% van de huidige opbrengst.

N.B. Door het gebruik van Ca(OH)<sub>2</sub> als onthardingsmiddel zal het gehalte aan bicarbonaat in het water verlaagd worden. Na de pelletontharding wordt nog wel een hoeveelheid kooldioxide gedoseerd (SI voor BAKF van - 0,05) en in zowel de BAKF als de LZF wordt enkele mg/L kooldioxide gevormd. Na de benodigde loogdosering voor de LZF (SI in reine water van + 0,15) neemt het bicarbonaatgehalte enigszins toe tot 1,68 mmol/L, maar dat is nog steeds lager dan de richtwaarde van 2,0 mmol/L. Mogelijk moet dit uiteindelijk weer op de gewenste waarde worden gebracht. De discussie binnen Waternet over de noodzaak van verdere verhoging van de TAC heeft nog geen beslissing opgeleverd.

Door het overstappen van zoutzuur op kooldioxide in het proces veranderen diverse andere parameters, zoals de SI. Dit betekent dat er in het proces een extra correctie moest plaatsvinden, die ook invloed heeft op de massabalans van het kalkmelkproces. Uiteindelijk heeft dit geleid tot de massabalans die is weergegeven in

Figuur 15: De hierin berekende data zijn ook gebruikt in de LCA, die in hoofdstuk 6 wordt beschreven.

FIGUUR 15: MASSABALANS KALKMELKPROCES BIJ TOEPASSING VAN CO<sub>2</sub> ALS ZUUR

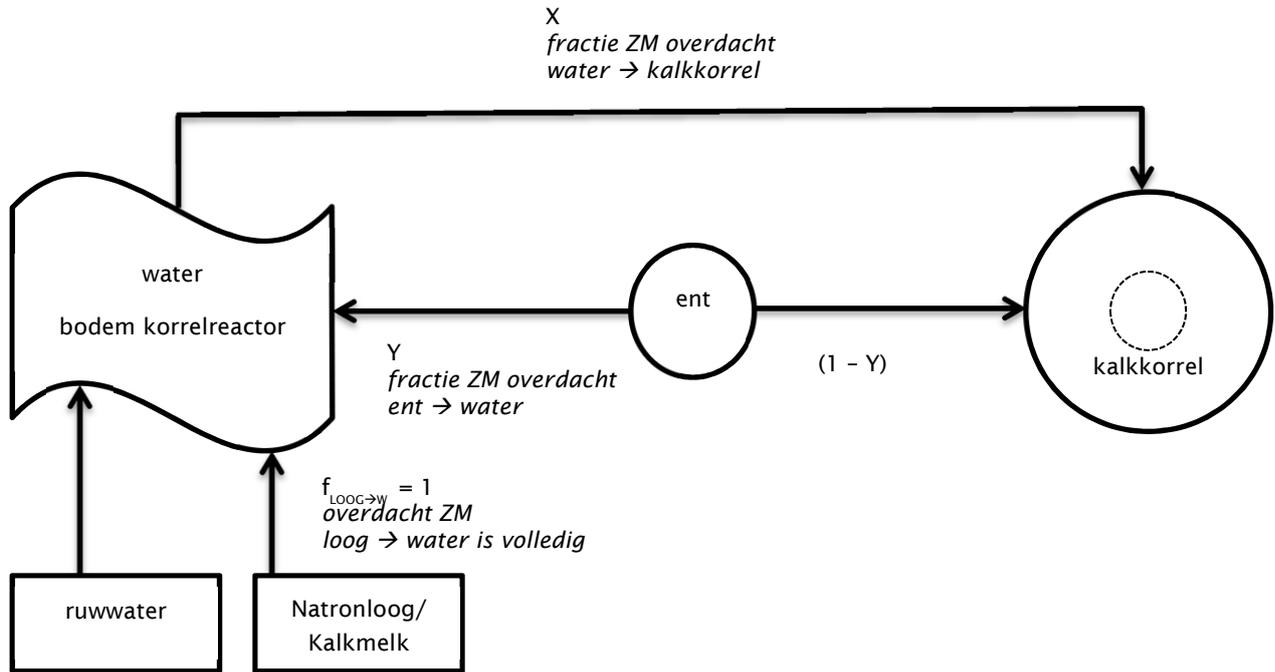


#### 4.5 Accumulatie zware metalen

Het doel is om kalkkorrels, die ontstaan bij pelletontharding, toe te passen als entmateriaal en om er kalkmelk van te maken. Materialen die in aanraking komen met drinkwater dienen volgens de wet te beschikken over een erkende kwaliteitsverklaring. Momenteel is Kiwa-ATA de enige erkende kwaliteitsverklaring. Accumulatie van zware metalen zou ongewenst kunnen zijn omdat het gehalte zware metalen in het calcië (als entmateriaal of als kalkmelk) na verloop van tijd te hoog zou kunnen worden voor toepassing in drinkwaterbereiding. In deze paragraaf is op modelmatige wijze bekeken of, en onder welke omstandigheden, accumulatie van zware metalen optreedt. Tevens is onderzocht hoe de concentratie van zware metalen in de kalkkorrels, het entmateriaal en de kalkmelk afhangt van de concentratie zware metalen in het reactor influent, en de overdracht van zware metalen tussen water, kalk en chemicaliën.

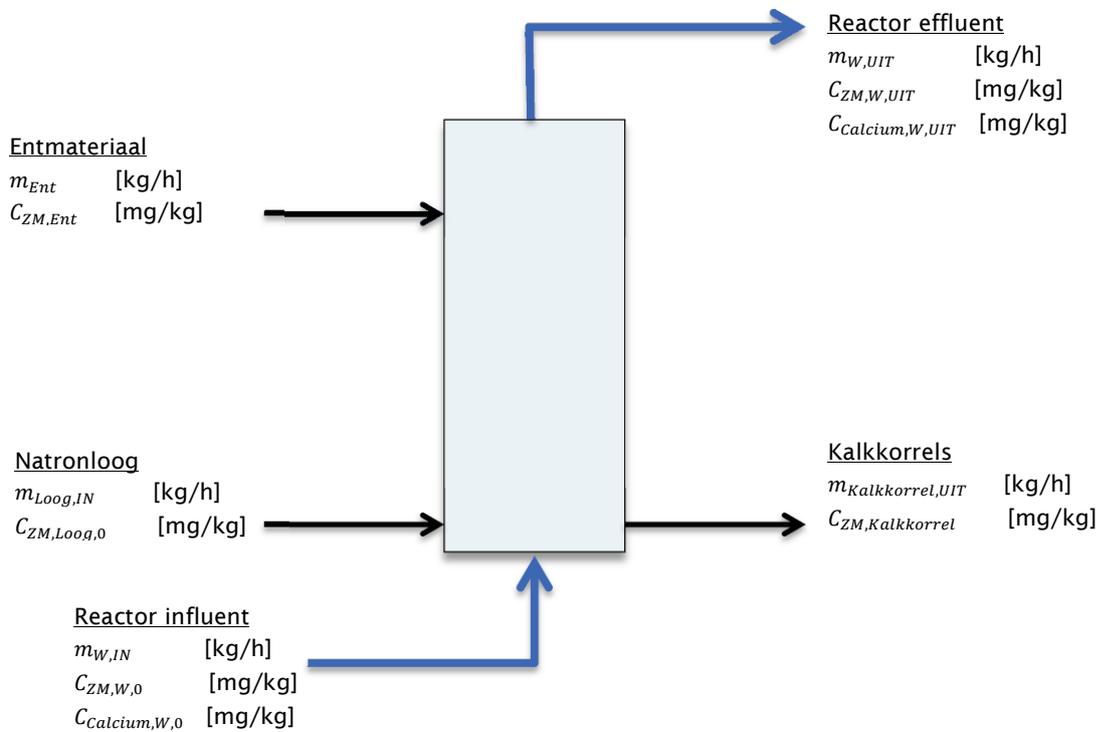
Hierbij is aangenomen dat er geen afgifte van metaal vanuit het apparaat plaatsvindt tijdens het malen van de kalkkorrels. Aangenomen mag worden dat overdracht van zware metalen vanuit entmateriaal naar de waterfase (de fractie Y in Figuur 16) laag is aangezien het milieu in de onthardingsreactor kalkafzettend in plaats van kalkoplossend is. De overdracht van een zwaar metaal vanuit de waterfase naar de kalkkorrelfase is gelijk aan fractie X in Figuur 16. Aangenomen is dat de zware metalen, die aanwezig zijn door de natronloog of de kalkmelk, volledig worden opgenomen in de waterfase.

FIGUUR 16: OVERDRACHTSMODEL VAN ZWARE METALEN (ZM) TIJDENS ONTHARDING



De massabalans van een zwaar metaal ZM in water, loog, entmateriaal en kalkkorrel in het huidige scenario is schematisch weergegeven in Figuur 17.

FIGUUR 17: MASSABALANS VAN DE ONTHARDING IN HET HUIDIGE SCENARIO.



De bijhorende getallen van de massabalans zijn gegeven in paragraaf 2.1. De massabalans van het hergebruik-scenario leidt tot twee wijzigingen in Figuur 17: het entmateriaal wordt geproduceerd uit de kalkkorrels (door middel van drogen, malen en zeven), en de natronloog wordt vervangen door kalkmelk die geproduceerd is uit de kalkkorrels (door middel van branden en blussen). De bijhorende massabalans is weergegeven in paragraaf 4.4.2.

De modellering is als volgt stapsgewijs opgebouwd. Als eerste stap is de concentratie in water berekend door de zware metalen aanwezig in het ruwe water en de natronloog samen te voegen. Hierbij is aangenomen dat alle aanwezige zware metalen in de natronloog overgedragen worden naar de waterfase. Hier wordt de overdracht van een deel van de zware metalen van het entmateriaal naar het water aan toegevoegd (fractie Y) (Figuur 16). Van deze totale concentratie in het water wordt een fractie X weer opgenomen in de korrel, waardoor de eindconcentratie zware metalen in het water kan worden vastgesteld. Door de overdracht van de zware metalen naar de korrel op te tellen bij de overgebleven zware metalen in de korrel, kan de totale massa zware metalen in de kalkkorrel worden bepaald. De concentratie zware metalen in de kalkkorrel is gelijk aan het quotiënt van de vracht van zware metalen van de kalkkorrels en de totale massa kalkkorrels.

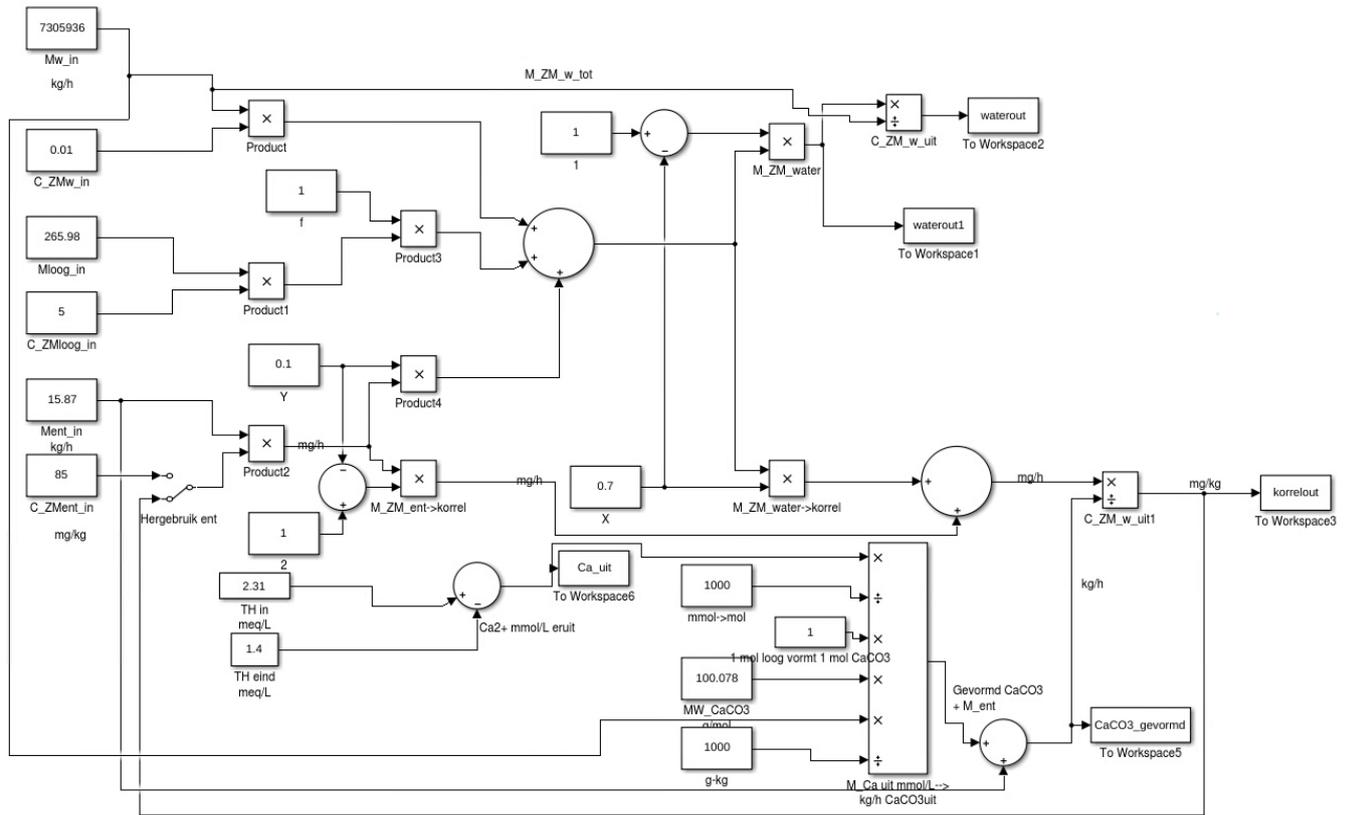
De massa geproduceerde kalkkorrels is gebaseerd op het waterdebiet en het onthardingstraject. Om de eindhardheid van 1,40 mmol/L te behalen dient 0,91 mmol/L  $\text{Ca}^{2+}$  verwijderd worden. In het referentiescenario wordt 0,91 mmol/L  $\text{CaCO}_3$  gevormd, oftewel 681 kg/h. Naast het waterdebiet en het onthardingstraject is de benodigde hoeveelheid entmateriaal een input voor het model.

De situatie met inkoop van entmateriaal en natronloog is gemodelleerd om de scenario's met hergebruik te kunnen vergelijken. Het model is weergegeven in Figuur 18 en de input voor deze situatie is als volgt: De concentratie van een zwaar metaal (ZM) in water is 0,01 mg/L (10  $\mu\text{g/L}$ ), de concentratie ZM in de natronloog is 5 mg/kg loog en de concentratie ZM in het entmateriaal 85 mg/kg droge stof. Het waterdebiet is 7.306  $\text{m}^3/\text{h}$ , het natronloogdebiet is 266 kg/h en de benodigde hoeveelheid entmateriaal is 16 kg/h. Bij een lage overdracht van zware metalen uit entmateriaal naar water (fractie Y) van 10%, en een hoge overdracht van zware metalen vanuit de waterfase naar de kalkkorrel (fractie X) van 70%, komt de evenwichtsconcentratie van zware metalen in water uit op 0,0031 mg/l (3,1  $\mu\text{g/l}$ ), en de concentratie van het zware metaal in de kalkkorrel komt uit op 78,4 mg/kg.

N.B. Tijdens het onderzoek naar mogelijke alternatieven voor het onthardingsproces bleek dat bij toepassing van het kalkmelkscenario én  $\text{CO}_2$  in plaats van zoutzuur in het proces extra kalkmelk nodig zou zijn in verband met de pH-correctie. Deze toename is niet meegenomen in bovenstaande berekening, maar heeft ook geen invloed op de uiteindelijke conclusies met betrekking tot accumulatie van zware metalen in de kalk.

In een volgende stap is het model uitgebreid met hergebruik van kalkkorrels tot entmateriaal. Daartoe wordt in het model in Figuur 18 de "schakelaar" voor hergebruik van entmateriaal omgezet. Uit de simulatie blijkt dat geen sprake is van accumulatie, de concentratie van zware metalen bereikt een stabiele waarde. De betreffende concentraties in de korrel en in het water verschillen nauwelijks van de situatie zonder hergebruik. De evenwichtsconcentratie in water is 3,1  $\mu\text{g/L}$  en de concentratie van het zware metaal in de kalkkorrel is 78,2 mg/kg.

FIGUUR 18: SCHEMATISCH OVERZICHT IN MATLAB/SIMULINK® VAN DE CONCENTRATIES EN OVERDRACHT VAN ZWARE METALEN TIJDENS HET ONTHARDINGSPROCES MET NATRONLOOG EN EEN SCHAKELAAR VOOR HERGEBRUIK VAN KALKKORRELS ALS ENTMATERIAAL.



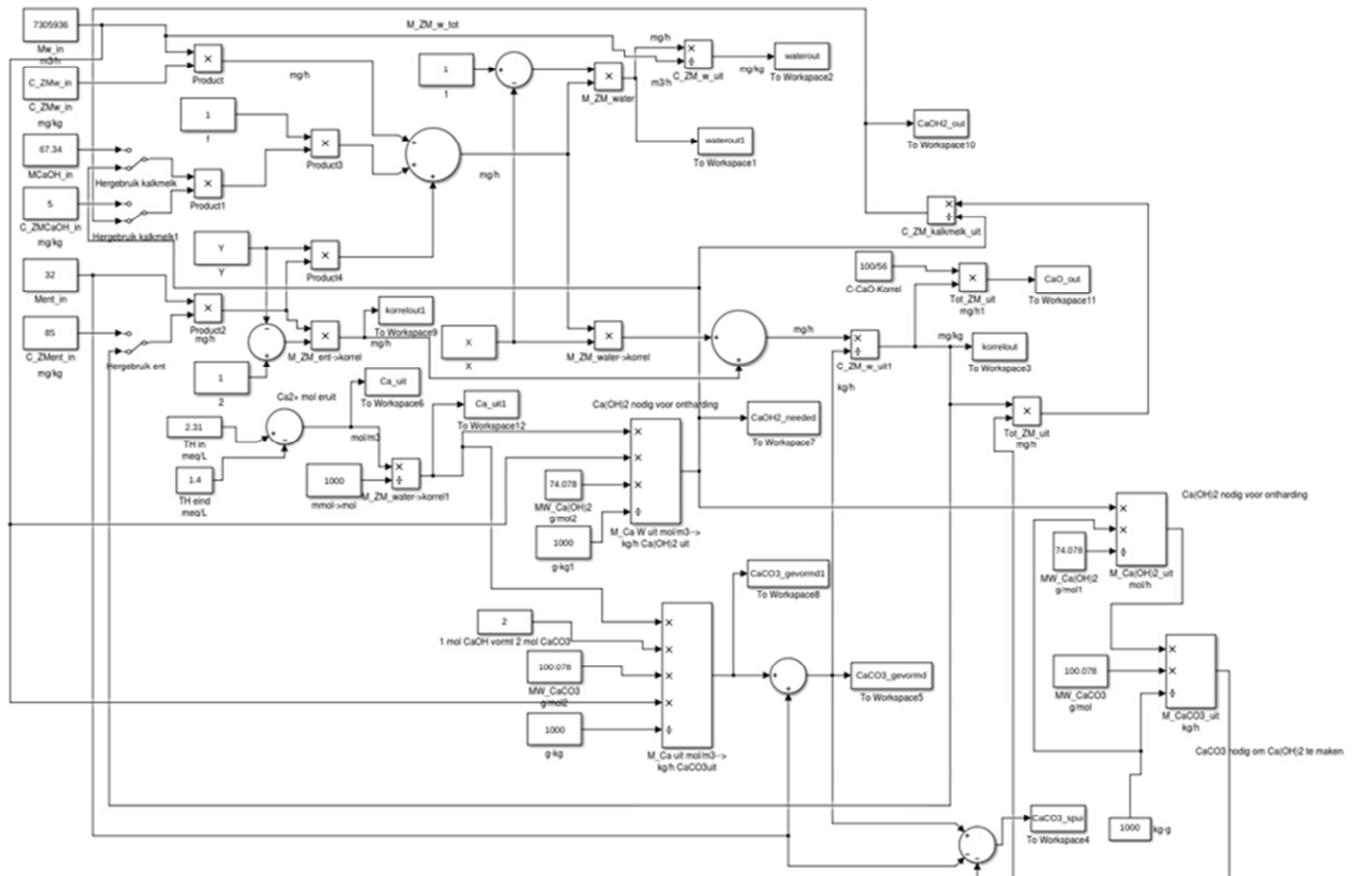
De massabalans van Figuur 17 is verder aangepast om het scenario uit te breiden naar hergebruik van kalkkorrels als kalkmelk (en entmateriaal). Het model is schematisch weergegeven in Figuur 19. Hierbij is aangenomen dat tijdens het branden en blussen van de kalk volledige overdracht plaatsvindt van zware metalen van de calcië naar de kalkmelk. In dit scenario is de kalkkorrel productie twee maal zo groot. Bovendien is het reactor influent de enige externe bron van zware metalen; bij het referentie scenario was ook de natronloog een bron van zware metalen. De modelberekeningen tonen aan dat geen accumulatie van zware metalen plaatsvindt in dit scenario: de concentratie van zware metalen bereikt een stabiele waarde in de kalkkorrel (en daarmee het entmateriaal en de kalkmelk). De analytische oplossing voor de concentratie van een zwaar metaal in de kalkkorrel wordt door de volgende vergelijking weergegeven:

$$C_{ZM,KORREL} = \frac{X \cdot m_{W,IN} \cdot C_{ZM,W,0}}{m_{KORREL} - \left[ X \cdot f_{KALKMELK \rightarrow W} \cdot m_{KALKMELK,IN} \cdot \frac{100}{74} + m_{ENT} \cdot (1 + (X - 1) \cdot Y) \right]}$$

met daarin:

- $C_{ZM,KORREL}$  = concentratie zwaar metaal in de kalkkorrel [mg/kg]
- $X$  = overdracht factor van zwaar metaal van water naar kalkkorrel [-]
- $Y$  = overdracht factor van zwaar metaal van entmateriaal naar water [-]
- $m_{W,IN}$  = massa debiet water influent [kg/h]
- $C_{ZM,W,0}$  = concentratie zwaar metaal in het reactor influent [mg/kg]
- $m_{KORREL}$  = massa debiet kalkkorrel productie [kg/h]
- $f_{KALKMELK \rightarrow W}$  = overdracht factor van zwaar metaal van kalkmelk naar water
- $m_{KALKMELK,IN}$  = massa debiet van kalkmelk [kg/h]
- $100/74$  = quotiënt van resp. calciumcarbonaat en calciumhydroxide
- $m_{ENT,IN}$  = massa debiet entmateriaal toevoer [kg/h]

FIGUUR 19: SCHEMATISCH OVERZICHT IN MATLAB/SIMULINK® VAN DE CONCENTRATIES EN OVERDRACHT VAN ZWARE METALEN TIJDENS HET ONTHARDINGSPROCES MET KALKMELK EN SCHAKELAARS VOOR HERGEBRUIK VAN KALKKORRELS ALS KALKMELK EN ENTMATERIAAL.



Met behulp van de modelberekening is bepaald bij welke concentraties van een zwaar metaal in het reactor influent een concentratie in de kalkkorrel (en daarmee in het entmateriaal en de kalkmelk) wordt bereikt, die niet voldoet aan de kwaliteitseis die geldt voor toepassing van kalkmelk voor ontharding (Regeling Materialen en Chemicaliën), afhankelijk van de overdrachtsfactoren van zware metalen tussen de waterfase en de kalkfase. Daartoe zijn de overdrachtsfactoren X en Y in stappen van 0,1 gewijzigd tussen 0 en 1. De normen voor de maximale concentraties van zware metalen in calciumoxide en calciumhydroxide zijn weergegeven in Tabel 10.

TABEL 10: NORMEN CONCENTRATIES ZWARE METALEN IN KALKPRODUCTEN VOLGENS REGELING MATERIALEN EN CHEMICALIËN ([HTTP://WETTEN.OVERHEID.NL/BWBR0030279/VOLLEDIG/GELDIGHEIDSDATUM\\_10-11-2015#OPSCHRIFT](http://wetten.overheid.nl/BWBR0030279/VOLLEDIG/GELDIGHEIDSDATUM_10-11-2015#OPSCHRIFT))

	CaCO <sub>3</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaO
<b>Antimoon</b>	3 mg/kg	4 mg/kg	4 mg/kg
<b>Arseen</b>	3 mg/kg	5 mg/kg	5 mg/kg
<b>Cadmium</b>	2 mg/kg	2 mg/kg	2 mg/kg
<b>Chroom</b>	10 mg/kg	20 mg/kg	20 mg/kg
<b>Kwik</b>	0,5 mg/kg	0,3 mg/kg	0,3 mg/kg
<b>Lood</b>	10 mg/kg	20 mg/kg	20 mg/kg
<b>Nikkel</b>	10 mg/kg	20 mg/kg	20 mg/kg
<b>Seleen</b>	5 mg/kg	4 mg/kg	4 mg/kg

In Bijlage IV zijn de resultaten weergegeven van de bepalingen van de concentraties in water, en de waarde van de overdrachtsfactoren waarbij niet aan deze normwaarden voldaan kan worden. Tabel 11 en Tabel 12 geven een samenvatting van deze resultaten voor calciumoxide en voor calciumhydroxide. Uit de resultaten blijkt dat de invloed van de overdrachtsfactor tussen ent en water (Y) van kleine invloed is op de eindconcentratie ten opzichte van de overdrachtsfactor tussen water en kalkkorrel (X). De tabellen geven voor alle zware metalen aan wat de maximale overdrachtsfactor X mag zijn, uitgaande van een bepaalde concentratie van het metaal in het reactor influent, opdat nog aan de normwaarden voldaan wordt.

TABEL 11: MAXIMALE OVERDRACHTSFACTOREN X, BIJ GEGEVEN REACTOR INFLUENTCONCENTRATIE, OM AAN CALCIUMOXIDE NORM TE VOLDOEN

	Norm CaO	Concentratie influent reactor	Maximaal toegestane overdracht X
<b>Antimoon</b>	4 mg/kg	1 µg/L	0.3
		2 µg/L	0.1
<b>Arseen</b>	5 mg/kg	1 µg/L	0.4
		2 µg/L	0.2
<b>Cadmium</b>	2 mg/kg	1 µg/L	0.1
<b>Chroom</b>	20 mg/kg	2 µg/L	0.6
<b>Kwik</b>	0,3 mg/kg	0.1 µg/L	0.2
<b>Lood</b>	20 mg/kg	2 µg/L	0.6
<b>Nikkel</b>	20 mg/kg	2 µg/L	0.6
<b>Seleen</b>	4 mg/kg	1 µg/L	0.3
		2 µg/L	0.1

TABEL 12: MAXIMALE OVERDRACHTSFACTOREN X, BIJ GEGEVEN REACTOR INFLUENTCONCENTRATIE, OM AAN CALCIUMHYDROXIDE NORM TE VOLDOEN

	Norm Ca(OH) <sub>2</sub>	Concentratie influent reactor	Maximaal toegestane overdracht X
<b>Antimoon</b>	4 mg/kg	1 µg/L	0.4
		2 µg/L	0.2
<b>Arseen</b>	5 mg/kg	1 µg/L	0.5
		2 µg/L	0.2
<b>Cadmium</b>	2 mg/kg	1 µg/L	0.2
		2 µg/L	0.1
<b>Chroom</b>	20 mg/kg	2 µg/L	0.8
<b>Kwik</b>	0,3 mg/kg	0.1 µg/L	0.3
<b>Lood</b>	20 mg/kg	2 µg/L	0.8
<b>Nikkel</b>	20 mg/kg	2 µg/L	0.8
<b>Seleen</b>	4 mg/kg	1 µg/L	0.4
		2 µg/L	0.2

Uit de resultaten blijkt dat de overdrachtsfactor X voor de gehanteerde influentconcentraties beperkt moet blijven tot 0,1 – 0,4 voor de zware metalen met de laagste normen. Wanneer de concentraties in het reactor influent lager zijn mag de toegestane overdrachtsfactor X toenemen.

Uit deze modelberekeningen blijkt dus dat er geen risico is op ophoping van zware metalen indien zelf geproduceerd calciet als entmateriaal wordt toegepast in de pelletontharding.

#### 4.6 Investering voor het branden en blussen van kalk

In principe zijn er twee typen kalkovens: roterende ovens (met een capaciteit van 100 tot 1.500 ton/dag) en schachtovens (met een capaciteit tussen de 50 en 600 ton/dag). Voor de hoeveelheid kalk die bij Waternet gebrand zou moeten worden komt dus alleen het type schachtoven in aanmerking. Om de kosten te minimaliseren is het belangrijk dat de oven draait op ongeveer 90-95% van de volledige capaciteit. Omdat het energieverbruik bij een niet volledig geladen oven even hoog is, zou een proces bij een lagere productie onevenredig veel energie verbruiken. Constant 100% van de capaciteit benutten leidt echter tot mogelijke schade aan de apparatuur (Boynton, 1980).

De investeringskosten voor de oven bedragen in totaal ca. 180 k\$ (Meier et al., 2005), wat ongeveer overeenkomt met 158 k€. De specificaties voor een conventionele schachtoven met een capaciteit van 50 ton/dag zijn gegeven in Tabel 13.

TABEL 13: SPECIFICATIES VAN EEN CONVENTIONELE 50 TON/DAG SCHACHTOVEN

Parameter	Waarde
Efficiëntie	0,8
Dagen in bedrijf per jaar	358 dagen (24 uur /dag), 7 dagen onderhoud
Productie per jaar	19.900 ton/jaar
Brandstof verbruik	215 kg/h
Elektriciteitsverbruik	30 kWh/ton
Specifieke warmte gebruik	1,163 kWh/kg CaO
Totale energieconsumptie per jaar	21 GWh
CO <sub>2</sub> emissie per GWh brandstofverbruik	440 ton/GWh

Het energieverbruik van het proces ligt tussen de 3,5 en 7,0 GJ/ton CaO (JRC, 2013 (BREF)). Voor Waternet, met een benodigde capaciteit van 4.000 ton CaO per jaar, zou dit betekenen tussen de 14 en  $28 \cdot 10^{12}$  J per jaar. Hierbij is wel aangenomen dat het energieverbruik evenredig is met de hoeveelheid kalk, wat waarschijnlijk niet het geval zal zijn (de capaciteit van de in Tabel 13 genoemde oven is vijf maal zo groot als wat Waternet nodig heeft). Gemiddeld bedraagt de energie-efficiëntie van een kalkoven ca. 80% (Stork et al., 2014). Een overzicht van de geschatte energiekosten en emissies is gegeven in Tabel 14.

TABEL 14: OVERZICHT VAN GESCHATTE ENERGIEVERBRUIK EN EMISSIES BIJ EEN PRODUCTIE VAN 4.000 TON CaO PER JAAR

Productie 4.000 ton CaO/jaar	Per ton CaO	Totaal per jaar
Energieverbruik (J)	3,5 – 7,0 * 10 <sup>9</sup>	14 – 28 * 10 <sup>12</sup>
Inclusief energie-efficiëntie ca. 80% (J)	4,4 – 8,75 * 10 <sup>9</sup>	17,6 – 35 * 10 <sup>12</sup>
Emissie CO <sub>2</sub> uit proces (ton)	0,751	3,0 * 10 <sup>3</sup>
Emissie CO <sub>2</sub> door verbranding brandstof (olie) (ton)	0,322	1,3 * 10 <sup>3</sup>
Emissie CO <sub>2</sub> t.g.v. elektriciteitsgebruik (ton)	0,019	76
Totale emissie CO <sub>2</sub> (ton)	1,092	4,37 * 10 <sup>3</sup>

N.B. Deze tabel is gebaseerd op een kalkoven voor 50 ton/dag, waarbij is aangenomen dat het energieverbruik evenredig is met de hoeveelheid kalk die gebrand wordt. In de praktijk zal dit niet het geval zijn. Aangezien de productie in Leiduin een factor 5 lager is, zou dit betekenen dat de oven slechts één week in een periode van vijf weken in bedrijf hoeft te zijn. Een energieverbruik van een factor  $\pm 4$  lager in plaats van 5 lijkt dan realistischer, in verband met de extra energie die nodig is om de oven op te warmen. In totaal zou dan per jaar  $22 - 44 \cdot 10^{12}$  J/jaar nodig zijn.

# 5 Uitwerking zuiveringsscenario 'Membraanfiltratie'

## 5.1 Basisontwerp omgekeerde osmose

Het basisontwerp voor beide RO scenario's is hetzelfde, aangezien de te behandelen deelstroom voor beide RO-scenario's nagenoeg even groot is. Vooralnog is gekozen voor een even groot aantal RO-units als het huidige aantal reductoren, namelijk 12 stuks. Bij verdere detaillering van een RO-scenario kan het aantal RO-units worden geoptimaliseerd op basis van gewenste redundantie, flexibiliteit en investeringskosten.

De ontwerpflux van de RO-units is gebaseerd op de ervaringen met membraanfiltratie tijdens het "70-83" onderzoek (Hoek, 2000). Destijds is een stabiele bedrijfsvoering met relatief weinig vervuiling gerealiseerd op de WOKOL-straat bij een flux van circa 22 L/m<sup>2</sup>.h en een recovery van 80%.

In de loop der jaren zijn door de diverse membraanleveranciers steeds verbeterde RO-membranen op de markt gebracht. Vrij recentelijk heeft DOW het ECO-440i membraan geïntroduceerd. Het betreft een RO membraan met een relatief hoge productie en een hoge retentie. Hierdoor is het energieverbruik relatief laag. Het ECO-440i element heeft een membraanoppervlak van 40,7 m<sup>2</sup>. Het element is voorzien van een ILec koppeling voor een betere afdichting tussen de elementen onderling, waardoor er minder kans op lekkages bestaat.

Het ontwerp van een RO-unit is berekend met behulp van het projectieprogramma van DOW genaamd ROSA (versie 9.0.0 ConfigDB u399339\_282). Met dit programma zijn de benodigde druk en de geproduceerde waterkwaliteit berekend, uitgaande van voedingswaterkwaliteit, gewenste flux en recovery. Een voorbeeld van een dergelijke berekening is weergegeven in Bijlage IV. In Tabel 15 is een overzicht gegeven van de resultaten van de berekening bij verschillende watertemperaturen bij een constante flux. Voor de LCA-berekening is uitgegaan van een gemiddelde benodigde werkdruk van 1.000 kPa.

TABEL 15: BENODIGDE WERKDRUKKEN AFHANKELIJK VAN WATERTEMPERATUUR

Ontwerpparameter RO	Eenheid	Watertemperatuur (°C)		
		5	11,5	20
Permeaatproductie	m <sup>3</sup> /h	394	394	394
Recovery	%	80	80	80
Flux	L/m <sup>2</sup> .h	22,3	22,3	22,3
Flow factor *	-	0,85	0,85	0,85
Voedingsdruk	kPa	1.250	1.000	750
Voedingscapaciteit	m <sup>3</sup> /h	492,5	492,5	492,5
Concentraatdruk	kPa	1.000	750	525
Concentraatcapaciteit	m <sup>3</sup> /h	98,5	98,5	98,5

\* Benodigde werkdruk berekend met restwaarde van initiële capaciteit

De benodigde staging en het aantal membraanelementen is berekend bij constante flux van 22,3 L/m<sup>2</sup>.h voor een aantal RO-units geïnstalleerd. De resultaten van de berekeningen staan in Tabel 16.

TABEL 16: OVERZICHT CAPACITEITEN EN STAGING RO'S AFHANKELIJK VAN AANTAL RO-UNITS

Ontwerpparameter RO	Eenheid	Aantal RO units			
		12	10	8	6
Productie per unit	m <sup>3</sup> /h	394	473	591	788
Bypass per unit	m <sup>3</sup> /h	606	727	909	1.212
Totale productie per RO-unit	m <sup>3</sup> /h	1.000	1.200	1.500	2.000
Staging					
Drukpaten 1 <sup>ste</sup> trap	stuks	48	58	72	96
Drukpaten 2 <sup>de</sup> trap	stuks	24	29	36	48
Aantal elementen per drukvat	stuks	6	6	6	6
Aantal RO-elementen totaal	stuks	5.184	5.220	5.184	5.184
Flux	L/m <sup>2</sup> .h	22,3	22,1	22,3	22,3

De deelstroomberekeningen zijn gebaseerd op de gemiddelde ruwwatersamenstellingen (LDN voor RO1 en WRK voor RO2) over de periode van 2012-2014 en de met ROSA berekende productkwaliteit bij een ruw watertemperatuur van 11,5 °C, een recovery van 80% en een flux van 22,3 L/m<sup>2</sup>.h. Het resultaat van die berekeningen is weergegeven in Tabel 17 en Tabel 18.

TABEL 17: DEELSTROOM- EN WATERKWALITEITSBEREKENINGEN BIJ TOEPASSING VAN OMGEKEERDE OSMOSE (RO1)

Berekening deelstroombehandeling met RO membranen (vergelijkbare productie met reductor)						
Toevoer	1.099 m <sup>3</sup> /h	Deelstroom				
RO permeaat	394 m <sup>3</sup> /h	39,7%				
Bypass	606 m <sup>3</sup> /h	60,3%				
Mengwater	1.000 m <sup>3</sup> /h					
RO concentraat	99 m <sup>3</sup> /h					
	LDN Water na LZF		RO permeaat		Mengwater	
	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L
Ca	76	3,81	0,20	0,010	46,1	2,30
Mg	10	0,82	0,03	0,002	6,0	0,50
Na	43	1,86	0,27	0,011	25,9	1,13
K	3,8	0,10	0,03	0,001	2,3	0,06
NH <sub>4</sub>	0,01	0,00	0	0,000	0,01	0,00
Som		6,59		0,023		3,98
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	211	3,45	1,4	0,019	127,6	2,09
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,2	0,01	0,00	0,000	0,06	0,00
Cl <sup>-</sup>	77	2,17	0,18	0,005	46,5	1,31
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	46	0,95	0,06	0,001	27,5	0,57
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3,7	0,06	0,08	0,000	2,3	0,04
Som		6,64		0,025		4,02
TH (mmol/L)		2,31		0,005		1,40
pH	8,0		5,3		7,2	
SI	- 0,12		- 6,7		- 0,70	
Temp. (°C)	11,5		11,5		11,5	
Dosering			Antiscalant	2,0 mg/L		

TABEL 18: DEELSTROOM- EN WATERKWALITEITSBEREKENINGEN BIJ TOEPASSING VAN OMGEKEERDE OSMOSE (RO2)

Berekening deelstroombehandeling met RO membranen (vergelijkbare productie met reductor)						
Toevoer	1.099 m <sup>3</sup> /h	Deelstroom				
RO permeaat	394 m <sup>3</sup> /h	39,6%				
Bypass	606 m <sup>3</sup> /h	60,4%				
Mengwater	1.000 m <sup>3</sup> /h					
RO concentraat	99 m <sup>3</sup> /h					
	WRK Water na LZF		RO permeaat		Mengwater	
	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L
Ca	68	3,37	0,16	0,010	46,2	2,30
Mg	11	0,89	0,03	0,002	6,0	0,50
Na	44	1,91	0,29	0,011	25,9	1,13
K	4,2	0,11	0,05	0,001	2,3	0,06
NH <sub>4</sub>	0,01	0,00	0	0,000	0,01	0,00
Som		6,28		0,023		3,99
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	169	2,77	1,16	0,019	127,6	2,09
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,4	0,01	0,00	0,000	0,09	0,00
Cl <sup>-</sup>	82	2,31	0,18	0,005	46,5	1,31
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	55	1,15	0,06	0,001	27,5	0,57
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10,7	0,17	0,22	0,000	2,3	0,04
Som		6,42		0,025		4,02
TH (mmol/L)		2,13		0,005		1,40
pH	7,4		5,3		7,2	
SI	- 0,16		- 6,9		- 0,70	
Temp. (°C)	11,5		11,5		11,5	
Dosering			Antiscalant	2,0 mg/L		

## 5.2 Noodzaak antiscalant

Door verhoging van de concentratie opgeloste zouten in het RO-concentraat bestaat de kans dat bepaalde zouten scaling veroorzaken. Hierbij valt te denken aan scaling door neerslag van bijvoorbeeld calciumcarbonaat, calciumsulfaat, bariumsulfaat en calciumfluoride. Om scaling te voorkomen moet een antiscalant worden gedoseerd aan het voedingswater. De benodigde dosering is afhankelijk van de ruwwatersamenstelling, de recovery, de pH en de watertemperatuur. De scalingspotentie van het water is berekend met het projectieprogramma van een van de mogelijke leveranciers van antiscalant. Het betreft het programma Membrane Master 4.0 (versie v1.23, DLL v1.8.7) van Genesys International. Andere leveranciers, zoals Nalco en GE hebben vergelijkbare programmatuur en producten. Uit de MM4 berekening (zie Figuur 20) blijkt dat bij de opgegeven ruwwaterkwaliteit alleen calciumcarbonaat oververzadigd is. Tijdens het 70-83 onderzoek bleek echter ook bariumsulfaat scaling te veroorzaken. De volledige berekening is weergegeven in Bijlage V.

FIGUUR 20: SCHERMAFDRIUK MEMBRANE MASTER 4 BEREKENING VOOR ANTISCALANT

## Recommended Product GENESYS LF

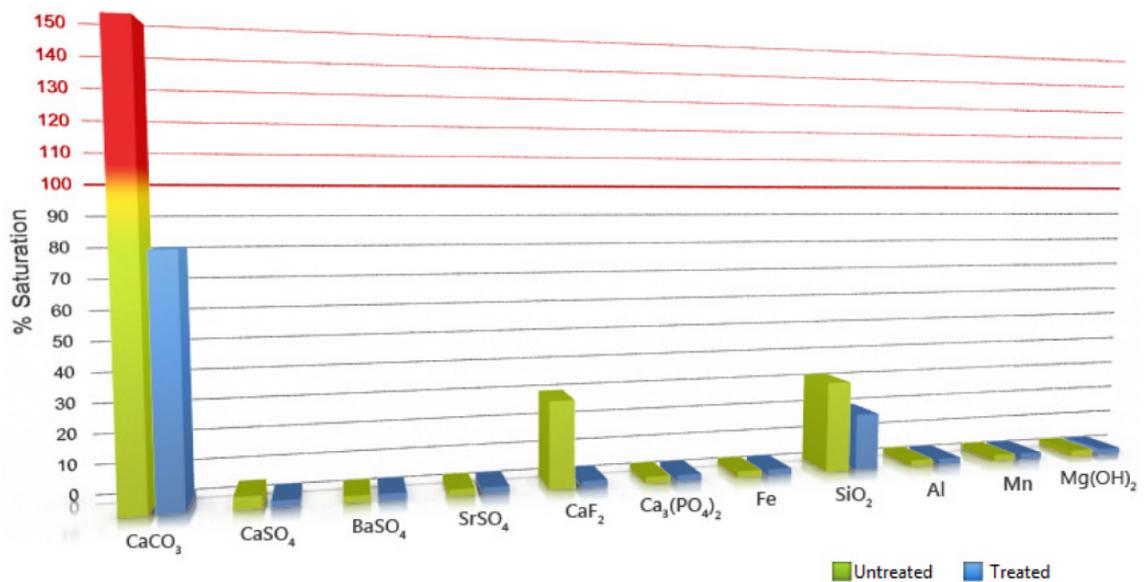
### Dosing Data

For Scale Control - Feed	2.01 mg/l
For Iron Control - Feed	0.00 mg/l
Total Dosage	2.01 mg/l
Dose In Concentrate	10.04 mg/l
Set Dosing Pump To	743,56 ml/hr
Daily Requirement	17.85 l/day

### Acid Dosing

Acid dosing is not required.

### Saturation Graph



Uit de berekening volgt dat een antiscalant noodzakelijk is. MM4 heeft berekend dat bij een recovery van 80% een dosering van 2,0 mg/L Genesys LF benodigd is. Genesys LF is hun multi purpose antiscalant, vergelijkbaar met PC191T van Nalco en Hypersperse MDC220 van GE Water.

Het Genesys LF verbruik bedraagt circa 17,85 L/dag voor een RO-unit met een productie van 394 m<sup>3</sup>/h en een totale mengwaterstroom van 1.000 m<sup>3</sup>/h.

### 5.3 Investering Omgekeerde Osmose

De benodigde investering voor een RO systeem is berekend met behulp van de Royal Haskoning/DHV kostenstandaard (zie <http://www.kostenstandaard.nl/>). Voor een RO-systeem met een maximum productie van 4.728 m<sup>3</sup>/h (= 12 \* 394 m<sup>3</sup>/h) is een totale investering berekend van 37,6 miljoen Euro. In Tabel 19 is een opsplitsing van deze investering weergegeven.

TABEL 19: CAPEX RO-SYSTEEM BEREKEND MET DE KOSTENSTANDAARD VAN ROYALHASKONING/DHV

Kostenplaats	Percentage van bouwkosten	Kosten Milj €
Bouwkosten totaal (BK)	-	28,5
• Civiele techn. (C)	22%	6,3
• Werktuigbouw (W)	41%	11,7
• Elektro techn. (E)	26 %	7,4
• Eerste vulling membranen	11 %	3,2
Algemene Voorzieningen (A)	5 % van C+W+E	1,3
Inrichtingskosten (I)	2 % van C+W+E	0,5
Beveiligingskosten (Bv)	1 % van C+W+E	0,3
Begeleidingskosten (Bg)	20 % van C+W+E+A+I+Bv	5,5
Overige Bijkomende kosten (O)	2 % van C+W+E+A+I+Bv	0,5
Bouwrente	10 % van C+W+E+A+I+Bv+Bg+O	1,0
<b>Investing</b>	<b>Som(BK+A+I+Bv+Bg+O)</b>	<b>37,6</b>

Ter vergelijking is ook de investering berekend van een nieuwe pelletontharding met behulp van dezelfde RHDHV kostenstandaard. Deze bedraagt 12,3 miljoen Euro voor een deelstroomontharding met een maximale capaciteit van 7.740 m<sup>3</sup>/h (12 \* 645 m<sup>3</sup>/h).

## 6 Life Cycle Analysis (LCA)

### 6.1 Het doel van de LCA

In dit hoofdstuk is een life cycle analysis uitgevoerd voor de verschillende onthardingsopties voor het produceren van veilig drinkwater in Leiduin. De verschillende scenario's die zijn bestudeerd zijn:

- Huidige proces: De LCA is gebaseerd op verkregen LCA-gegevens over de zuivering in Leiduin, aangepast aan de huidige stand van zaken in Leiduin. Er is wel een voorschot genomen op het feit dat er straks een calcietskerm als ent wordt gebruikt. Aanvullend is dit proces doorgerekend met zowel zoutzuur (scenario 1; REF\_HCl) als kooldioxide (scenario 2; REF\_CO2) als zuur.
- Kalkmelk-alternatief (scenario 3; KLK): Dit scenario lijkt veel op het huidige proces, waarbij de ontharding echter niet met NaOH maar met  $\text{Ca(OH)}_2$  plaatsvindt. Het voornaamste verschil is dat in plaats van granaatzand als entkorrels gebruik zal worden gemaakt van zelfgeproduceerd calciet, en dat een deel van de geproduceerde calciet zal worden gebrand en verwerkt tot kalkmelk, die weer in het onthardingsproces wordt ingezet.
- Reverse osmose met duinpassage (scenario 4; RO1): Bij dit scenario vindt RO plaats na de langzame zandfiltratie op een deel van de stroom. De andere onthardingsstap komt dan te vervallen.
- Reverse osmose zonder duinpassage (scenario 5; RO2): Dit scenario is vergelijkbaar met scenario 4, alleen wordt er nu vanuit gegaan dat de deelstroom, die met RO wordt behandeld, geen voorbehandeling nodig heeft van infiltratie, beluchting en snelle zandfiltratie.

In de hier gerapporteerde analyse komen 1.000 ecopunten (Pt) overeen met de milieu-impact van één West-Europees persoon per jaar.

### 6.2 Functionele eenheid

Om de duurzaamheidsimpact van elk scenario eerlijk te kunnen vergelijken moet de eenheid, waarover de berekeningen worden gemaakt (de "functionele eenheid"), goed gekozen worden. In dit geval is ervoor gekozen als functionele eenheid de productie van 1 m<sup>3</sup> veilig drinkwater te nemen. Dit heeft wel tot gevolg dat er voor de verschillende scenario's verschillende hoeveelheden ruw water nodig zijn, doordat de waterverliezen bij de verschillende processtappen variëren. Doordat er verschillende hoeveelheden ruw water worden ingenomen is het noodzakelijk een vergelijking te maken vanaf het begin van het proces, omdat een andere inname hier kan leiden tot een hoger of lager energie- en/of chemicaliënverbruik. Naast de behandeling van het ruw water is ook de behandeling van spoelwater in de LCA meegenomen, want ook die varieert in de verschillende scenario's, wat weer gevolgen heeft voor het energie- en chemicaliënverbruik.

### 6.3 Gebruikte methode

Voor deze LCA is gebruik gemaakt van SimaPro 8 software. De achtergrondinformatie hiervoor is afkomstig uit de Ecoinvent 3.0 database. De berekeningen zijn uitgevoerd met ReCiPe Endpoint € V1.10/Europe ReCiPe E/A, en uitgedrukt in ecopunten. De vergelijking tussen de scenario's is ook uitgedrukt in CO<sub>2</sub>-equivalenten; daarvoor is de single issue methode "greenhouse gas protocol" gebruikt. Er is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van data die specifiek zijn voor Nederland. Indien deze niet beschikbaar waren is deze volgorde toegepast: 1) data voor Europa (RER), 2) Zwitserland (CH), en 3) de rest van de wereld (ROW).

### 6.4 Systeemgrenzen en uitgangspunten

In deze LCA zijn alleen operationele parameters bestudeerd. Het ontwerpen en bouwen van elk van deze systemen is dus niet meegenomen in de analyse. De uitgangspunten zijn hieronder vermeld:

## 6.4.1 Aannames en uitgangspunten

### 6.4.1.1 Het huidige scenario (scenario 1 en 2)

De LCA voor het huidige scenario is gebaseerd op cijfers uit het rapport "Milieu-aspecten Productie-uitbreiding 70-83 Leiduin" (1991). De gegevens voor de WRK-behandeling (inname Lekkanaal water, coagulatie, sedimentatie en filtratie) zijn afkomstig uit de "Duurzaamheidstoets verschuiving WRK behandeling". Hierbij is aangenomen dat er tijdens coagulatie geen waterverlies optreedt, maar dat bij sedimentatie het waterverlies 1% bedraagt en bij filtratie 2%. Bij infiltratie in de duinen wordt ervan uitgegaan dat geen energie kost en dat er geen verliezen optreden. Er is al wel rekening gehouden met het feit dat volgend jaar een aanpassing naar calciet als entmateriaal gepland is. Dit houdt ook in dat de gevormde kalkkorrels hoogwaardig afgezet kunnen worden, waardoor er ook "voorkomen emissies" (vanwege hoogwaardige toepassing) opgevoerd mogen worden. Alle gevormde kalkkorrels worden opgevoerd als voorkomen emissies, en een transport van 300 km voor de inkoop (door derden) wordt nu voorkomen (er is hierbij aangenomen dat de calcietkorrels "in de buurt" kunnen worden afgezet, en dat de klanten dus hun calciet van minder ver hoeven te laten transporteren).

Voor het uitrekenen van een LCA van de ontharding is uitgegaan van gegevens van een eerdere LCA van Waternet. In de huidige LCA zijn de gegevens wel aangepast, omdat bij die oorspronkelijke LCA werd uitgegaan van een eindhardheid van 1,5 mmol/L, terwijl op het ogenblik een streefwaarde van 1,4 mmol/L wordt gehanteerd. Het betekent dat meer NaOH moet worden gedoseerd, en dat er meer kalkkorrels worden geproduceerd. Als gevolg van de lagere hardheid en de lagere bicarbonaatconcentratie in het mengwater na de ontharding kan volstaan worden met een lagere zuurdosering (zoutzuur of kooldioxide) na de reductoren (SI voor BAKF = - 0,05). Ook bij de benodigde loogdosering voorafgaand aan de LZF voor het verhogen van de SI van het reine water tot + 0,15 kan volstaan worden met een lagere dosering. Alle benodigde doseringen zijn doorgerekend met behulp van Aquacalc. Aangezien de hydraulische capaciteit door de reductoren niet verandert, is aangenomen dat het energieverbruik van het onthardingsproces niet verandert.

TABEL 20: AANGEPASTE LCA-DATA HUIDIGE ONTHARDING (MET CALCJET ALS ENT EN LOOGDOSERING) IN LEIDUIN

Aangepaste gegevens	Nieuwe hoeveelheid
Hardheid ruw water	2,31 mmol/L
Hardheid rein water	1,4 mmol/L
NaOH dosering	43.9 mg/L
Entmateriaal calciet	759 TON/jaar
Geproduceerde kalkkorrels	6075 ton CaCO <sub>3</sub>
Voorkomen transport	300 km
HCl dosering (SI voor BAKF = - 0,05)	8,2 mg/L
Of CO <sub>2</sub> dosering (SI voor BAKF = - 0,05)	7,7 mg/L

### 6.4.1.2 Ontharding met kalkmelk (scenario 3)

Voor de ontharding met kalkmelk zijn grotendeels dezelfde gegevens gebruikt als bij het huidige scenario, want alleen de ontharding zelf verschilt iets. Door dezelfde begin- en eindhardheid te hanteren werd een Ca(OH)<sub>2</sub> dosering van 81.65 mg/L ( $4.310 \cdot 10^3 / 64 \cdot 10^6 \cdot 10^3$ ) bij een 100% concentratie gebruikt. Daarnaast is er 1.780 ton/jaar aan entmateriaal nodig om dezelfde eindhardheid te bereiken. Dit entmateriaal wordt verkregen uit de opwerking van de geproduceerde pellets tot calcietkorrel. Er wordt dan 14.250 ton CaCO<sub>3</sub> geproduceerd per jaar (zie ook paragraaf 4.4.2).

In dit scenario worden de geproduceerde pellets hergebruikt als entmateriaal en tevens benut om de benodigde kalkmelk te produceren. Om de gevormde pellets te kunnen toepassen als entmateriaal moeten ze worden gewassen, gemalen (waarbij erop moet worden gelet dat er geen verontreiniging optreedt) en gezeefd. De gegevens voor deze processtappen zijn overgenomen uit het TKI-project "Met Hollandse calciet de markt op".

Voor het omzetten van  $\text{CaCO}_3$  naar  $\text{CaO}$  zijn twee chemische processtappen nodig: branden en vervolgens blussen. De gegevens voor deze processen zijn overgenomen uit Sagastume Gutiérrez et al. (2012). Houdt er echter wel rekening mee, dat de  $\text{CO}_2$  uitstoot die hier is beschreven ook de output als resultaat van elektriciteit verbruik bevat; in tabel 23 is dit aangepast.

TABEL 21: AANVULLENDE GEGEVENS ONTHARDING MET KALKMELK, SCENARIO 3 (SAGASTUME GUTIÉRREZ, VAN CANEGHEM ET AL. 2012)

Aanvullende gegevens	Hoeveelheid
Ca(OH) <sub>2</sub> dosering	81,65 mg/L
Entmateriaal	1.781 ton $\text{CaCO}_3$
Geproduceerde kalkkorrels	14.249 ton $\text{CaCO}_3$
Elektriciteitsverbruik branden <sup>1</sup>	37,5 kWh/ton $\text{Ca(OH)}_2$
CO <sub>2</sub> uitstoot branden <sup>1</sup>	721 kg CO <sub>2</sub> /ton $\text{Ca(OH)}_2$
Elektriciteitsverbruik blussen <sup>1</sup>	13,1 kWh/ton $\text{Ca(OH)}_2$
Elektriciteitsverbruik wassen, malen, zeven, drogen	200 kWh/ton $\text{CaCO}_3$
Voorkomen emissie kalk	3.096 ton /jaar

#### 6.4.1.3 Reverse osmose met duinpassage (scenario 4)

Wanneer er gebruik wordt gemaakt van omgekeerde osmose hoeft er geen verdere ontharding plaats te vinden. Om vervuiling van het membraan tegen te gaan wordt er antiscalant gedoseerd (2,0 mg/L Genesys LF). Niet de gehele waterstroom zal op deze wijze behandeld hoeven te worden: er vindt een splitsing plaats waarbij slechts 39,7% van het water door de RO-installatie wordt geleid. Deze processtap geeft wel een waterverlies van 20%. Gemiddeld genomen zal een druk van 1000 kPa (10 bar) gehanteerd worden, wat resulteert in een energieverbruik van 0,40 kWh per m<sup>3</sup> RO permeaat (zie Tabel 22).

TABEL 22: AANVULLENDE GEGEVENS VOOR RO MET DUINPASSAGE (SCENARIO 4)

Aanvullende gegevens	Hoeveelheid
Waterinvoer	39,7%
Waterverlies	20%
Waterdruk	10 bar
Elektriciteitsverbruik	0,40 kWh/m <sup>3</sup>
Antiscalant	2,0 mg/L
Zouten	280,4 mg/L

Er zijn twee verschillende scenario's met een omgekeerde osmose-stap (met en zonder duinpassage), waarbij de plaats van de splitsing van het water in het proces verschilt. Dit heeft als gevolg dat er verschillende hoeveelheden water door de processtappen stromen, wat tot verschillende verbruiken van energie, water en chemicaliën leidt.

In scenario 4 is er gerekend met een recovery van 80%. Het is echter wenselijk om het effect op de duurzaamheid te onderzoeken als er een recovery van 85% gehaald kan worden (scenario 4(85%)). Als er een hogere recovery gehaald wordt, hoeft immers minder water in de voorgaande stappen behandeld te worden, omdat dit niet verloren gaat. Deze aanpassing heeft dus niet alleen effect op de RO stap zelf, maar op alle voorgaande zuiveringsstappen. Bovendien is een lagere antiscalant dosering nodig, namelijk 1,7 mg/L.

#### 6.4.1.4 Reverse osmose zonder duinpassage (scenario 5)

Het verschil tussen de gegevens die nodig zijn voor scenario 5 ten opzichte van scenario 4, wordt veroorzaakt door het verschil in de plaatsing van de RO installatie in het proces (zie hoofdstuk 5). De plaatsing van de RO installatie bepaalt hoeveel water er door de voorgaande zuiveringen moet worden behandeld. De aannamen zijn verder dus gelijk aan de variant RO met duinpassage.

#### 6.4.2 Uitgangspunten van de LCA-studies

Alle verzamelde gegevens zijn zodanig omgerekend dat de resultaten per m<sup>3</sup> geleverd drinkwater gerapporteerd kunnen worden. De gegevens, die ingevoerd zijn in SimaPro, zijn vermeld in Tabel 23.



Ozon							
<b>Energieverbruik</b>	kwh/m <sup>3</sup>	0,0103	0,0103	0,0103	0,0112	0,0112	0,0112
<b>Waternverlies</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,0021	0,0021	0,0021	0,0023	0,0023	0,0022
<b>pomp energie naar berging</b>	kwh/m <sup>3</sup>	0,0427	0,0427	0,0427	0,0470	0,0466	0,0457
<b>zuurstof (aq)</b>	g/m <sup>3</sup>	11,74	11,74	11,74	12,91	12,82	12,56
<b>Transport</b>	tkm/m <sup>3</sup>	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
Ontharding							
<b>Waternverlies</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,0000	0,0000	0,0000			
<b>Ent (calciet)</b>	g/m <sup>3</sup>	11,86	11,86				
<b>Transport ent</b>	Tkm/m <sup>3</sup>	0,0024	0,0024				
<b>NaOH (100%)</b>	g/m <sup>3</sup>	44,48	44,48				
<b>carry over productie</b>	g/m <sup>3</sup>	9,12	9,12	9,12			
<b>kalkkorrel productie</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,0922	0,0922	0,2207			
<b>Energieverbruik</b>	kwh/m <sup>3</sup>	0,0060	0,0060	0,0060			
<b>transport weg</b>	tkm/m <sup>3</sup>	0,0098	0,0098				
<b>electriciteitsverbruik branden</b>	kwh/m <sup>3</sup>			0,0047			
<b>CO<sub>2</sub> uitstoot</b>	kg/m <sup>3</sup>			0,055			
<b>electriciteitsverbruik blussen</b>	kwh/m <sup>3</sup>			0,0016			
<b>Wassen, zeven, malen, drogen</b>	kwh/m <sup>3</sup>			0,0445			
<b>voorkomen transport kalk</b>	tkm/m <sup>3</sup>	0,0285	0,0285	0,0145			
<b>voorkomen kalk (afvoer)</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,0949	0,0949	0,0484			
<b>voorkomen energie</b>	kwh/m <sup>3</sup>			0,0097			
Zuurdosering							
<b>HCl dosering (36%)</b>	g/m <sup>3</sup>	8,31					
<b>CO<sub>2</sub> (100%)</b>	g/m <sup>3</sup>		10,84	7,82	12,35	9,66	12,02
<b>Transport</b>	tkm/m <sup>3</sup>	0,0018	0,0005	0,0004	0,0006	0,0005	0,0006

Actief kool							
<b>Waternerlies</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,0133	0,0133	0,0133	0,0146	0,0145	0,0142
<b>O<sub>2</sub> dosering (aq)</b>	g/m <sup>3</sup>	2,0131	2,0131	2,0131	1,1134	1,1067	1,0838
<b>pomp energie</b>	kwh/m <sup>3</sup>	0,0256	0,0256	0,0256	0,0282	0,0280	0,0274
<b>NaOH dosering (50%)</b>	g/m <sup>3</sup>	4,97	4,09	3,09			
<b>Carbon</b>	mg/m <sup>3</sup>	1722	1722	1722	1869	1869	1869
<b>transport</b>	tkm/m <sup>3</sup>	0,0012	0,0010	0,0008	0,0001	0,0001	0,0001
Langzame zand filtratie							
<b>zilverzand</b>	g/m <sup>3</sup>	8,38	8,38	8,38	8,38	8,38	8,38
<b>waternerlies</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>energie verbruik</b>	kwh/m <sup>3</sup>	0,0025	0,0025	0,0025	0,0027	0,0027	0,0026
<b>transport</b>	tkm/m <sup>3</sup>	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
RO							
<b>waternerlies</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>				0,0993	0,0990	0,0701
<b>elektriciteit</b>	kwh/m <sup>3</sup>				0,1985	0,1980	0,1868
<b>antiscalant</b>	mg/m <sup>3</sup>				993	990	794
<b>Zouten</b>	mg/m <sup>3</sup>				139.149	138.798	130.963
<b>NaOH (50%)</b>	g/m <sup>3</sup>				14,18	24,86	13,81
<b>transport</b>	tkm/m <sup>3</sup>				0,0033	0,0057	0,0032
Spoelwater behandeling							
<b>FeCl<sub>3</sub> totaal</b>	mg/m <sup>3</sup>	35,23	35,23	35,23	38,73	21,39	37,70
<b>Energie totaal</b>	Kwh/m <sup>3</sup>	0,0028	0,0028	0,0028	0,0029	0,0022	0,0029
<b>transport</b>	Kwh/m <sup>3</sup>	7,8E-06	7,8E-06	7,8E-06	8,5E-06	4,7E-06	8,3E-06

## 6.5 Resultaten LCA

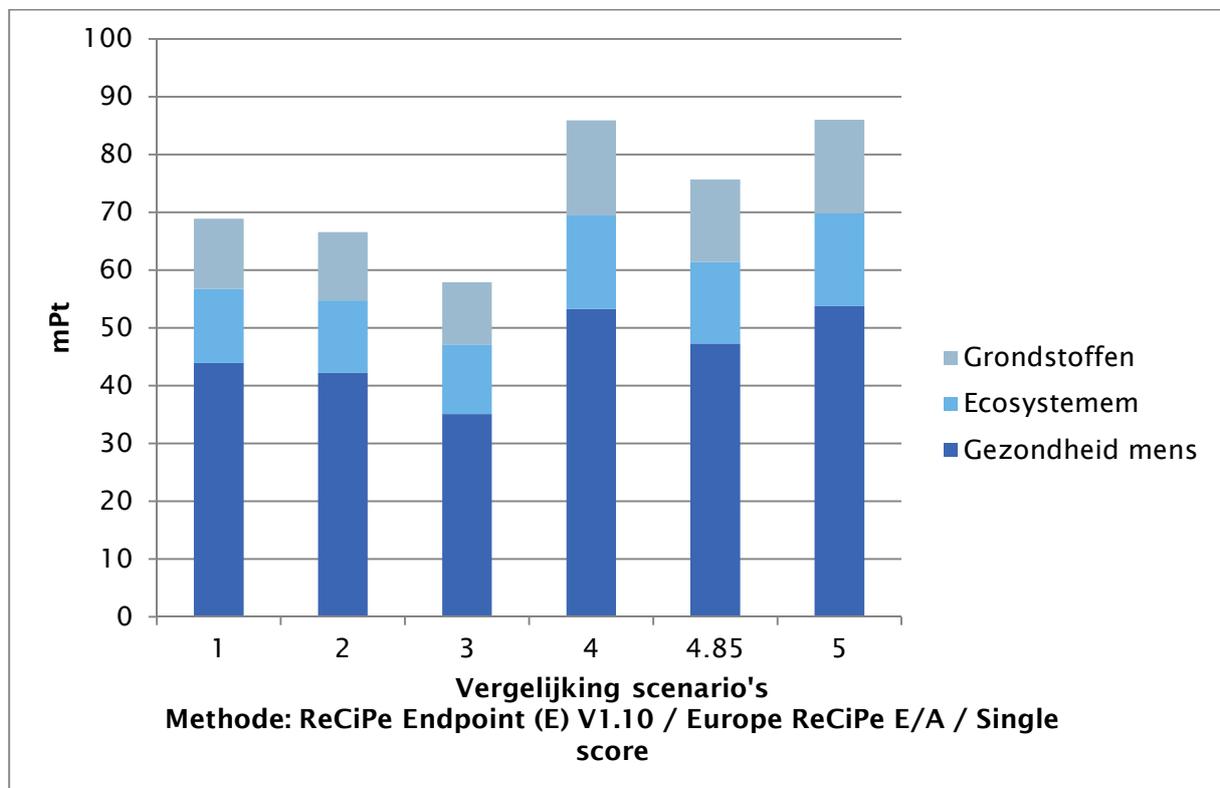
De resultaten van de LCA-berekeningen (in ecopunten) zijn weergegeven in Figuur 21 en Tabel 24. Tabel 24 laat zien dat de productie van 1m<sup>3</sup> drinkwater in het kalkmelkscenario (3) de laagste milieu-impact kent (het laagste aantal ecopunten). Het kalkmelkscenario heeft namelijk 16% minder ecopunten dan het huidige scenario (1). De beide reverse osmose scenario's kennen een significant hogere milieu-impact (~20%) dan het huidige scenario. Het onderlinge verschil tussen de reverse osmose scenario's is echter zeer gering (<0.1), waardoor dit als niet significant wordt beschouwd. Wanneer RO wordt toegepast zonder duinpassage, hoeft er ook minder water voorgezuiverd te worden, waardoor zowel het energie-, water- als chemicaliënverbruik gereduceerd worden. Echter, omdat er wordt aangestuurd op een SI van +0.15, is er een hoge additionele loog dosering nodig, waardoor de eerder genoemde voordelen worden opgeheven.

TABEL 24: TOTAAL OVERZICHT ECOPUNTEN VAN VERSCHILLENDE SCENARIO'S PER M<sup>3</sup> DRINKWATER; HUIDIG MET HCL (1), HUIDIG MET CO<sub>2</sub> (2), KALKMELK (3), REVERSE OSMOSE MET DUINPASSAGE (4) EN REVERSE OSMOSE ZONDER DUINPASSAGE (5)

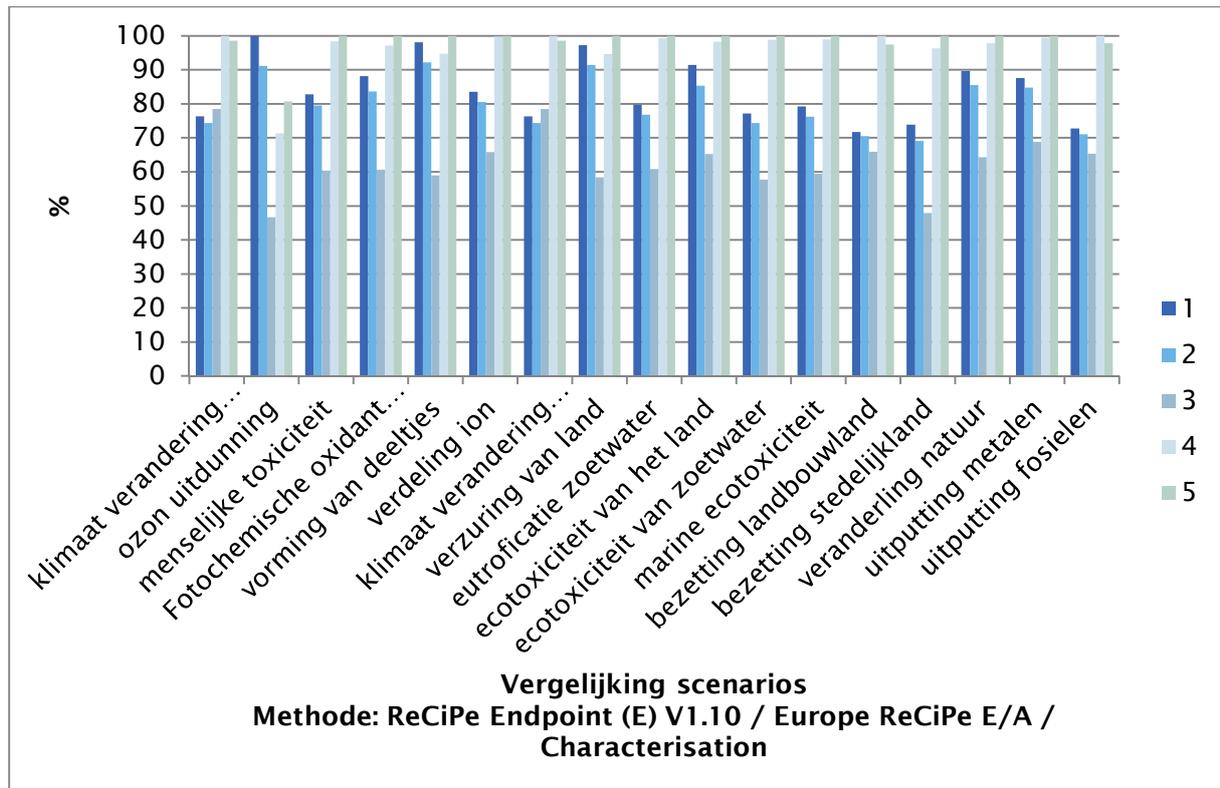
Categorie	Eenheid	1	2	3	4	5
Totaal	mPt	68,9	66,6	57,9	85,9	86,0

In een LCA-studie wordt de milieu-impact op drie verschillende categorieën beoordeeld; namelijk gezondheid van de mens, ecosystemen en grondstoffen. Figuur 21 laat zien dat de milieu-impact vooral betrekking heeft op de gezondheid van de mens. Percentueel gezien hebben de verschillende scenario's wel dezelfde impact verdeling over de drie genoemde categorieën.

FIGUUR 21: BIJDRAGE VAN IMPACT VAN VERSCHILLENDE SCENARIO'S OP GRONDSTOFFEN, ECOSYSTEMEN EN GEZONDHEID VAN DE MENS VOOR HET HUIDIGE SCENARIO MET HCL (1), HUIDIGE SCENARIO MET CO<sub>2</sub> (2), SCENARIO MET KALKMELK (3), SCENARIO RO MET DUINPASSAGE (4) EN SCENARIO RO ZONDER DUINPASSAGE (5) OP HET TOTAAL AANTAL ECOPUNTEN.



FIGUUR 22: RELATIEVE IMPACT VAN VERSCHILLENDE SCENARIO'S OP DIVERSE TERREINEN. DE HOOGSTE BIJDRAGE IS GENORMEERD OP 100%



Bij LCA-studies wordt de impact van een stof of proces op allerlei terreinen berekend. Figuur 22 geeft een overzicht van de impact van de verschillende scenario's op diverse terreinen, waarbij de hoogste bijdrage is genormeerd op 100%. Het blijkt dat over het algemeen het kalkmelkskenario (3) de laagste invloed heeft, waarbij in de meeste gevallen de beide RO-scenario's (scenario 4 en 5) de grootste invloed laten zien. Met betrekking tot de ozon uitdunning scores de NaOH-processen (scenario's 1 en 2, REF\_HCl en REF\_CO2) het slechtste, maar ook op het terrein van de vorming van deeltjes, de verzuring van land, de ecotoxiciteit van land, de verandering van de natuur en de uitputting van metalen scores deze beide scenario's maar iets minder slecht dan de beide RO-scenario's. Waarschijnlijk hangt dat bij scenario 1 en 2 samen met de impact die de productie van natronloog heeft op allerlei terreinen, terwijl de slechte scores van RO processen veroorzaakt worden door hun hoge energieverbruik. Bij toepassing van groene energie, wat in dit plaatje nog niet is meegenomen (maar in paragraaf 6.5.1.2 uitgebreid aan bod komt) zal RO dan ook duidelijk beter gaan scoren.

Tot nu toe zijn de resultaten uitgedrukt in ecopunten; het is echter ook mogelijk om dit om te rekenen naar een kooldioxide-voetafdruk. Het is vaak gebruikelijk de milieu-impact van een proces uit te drukken in de kooldioxide-voetafdruk. De kooldioxide-voetafdruk wordt standaard bepaald aan de hand van vier factoren; kooldioxide afkomstig uit fossiele brandstoffen, kooldioxide van biogene oorsprong, kooldioxide afkomstig van transformatie van land en kooldioxide-opname. Voor alle scenario's behalve scenario 3 geldt dat >95% van de kooldioxide afkomstig is van fossiele brandstoffen, en verder is er slechts sprake van een minimale opname van kooldioxide. Bij scenario 3 wordt extra CO<sub>2</sub> gevormd dat vrijkomt bij het branden van calciet. Dit CO<sub>2</sub> kan echter beschouwd worden als zogenaamd "kortcyclisch" CO<sub>2</sub>, in tegenstelling tot het CO<sub>2</sub> uit fossiele brandstoffen, dat "langcyclisch" is. De milieu-impact van kortcyclisch CO<sub>2</sub> is kleiner.

Het onderscheid tussen het gebruik van de kooldioxide-voetafdruk en ecopunten om de milieu-impact te berekenen is dat bij ecopunten ook allerlei andere effecten, die niet noodzakelijkerwijs leiden tot kooldioxide-uitstoot maar wel invloed hebben op het milieu, worden meegerekend. Ecopunten zijn gebaseerd op elk gebruik van energie, materialen, land en water. Om een goede vergelijking te kunnen maken van de

totale milieu-impact is het dan ook beter uit te gaan van ecopunten dan van de kooldioxide-voetafdruk. De gegevens voor de kooldioxide-voetafdruk van de onderzochte scenario's zijn weergegeven in Tabel 25. Wanneer de scenario's worden vergeleken op basis van ecopunten, komt het kalkmelkscenario het duurzaamst uit. Het huidige scenario met kooldioxide als zuurdosering (2) heeft echter een lagere impact als er wordt gekozen voor een kooldioxide-equivalent (g) uitdrukking, al is het verschil met het kalkmelkscenario niet significant. De voorstellen met betrekking tot reverse osmose blijven, ook als de milieu-impact in kooldioxide-equivalenten wordt uitgedrukt, minder goed scoren.

TABEL 25: MILIEU-IMPACTEN VAN DE SCENARIOS UITGEDRUKT IN CO<sub>2</sub>-EQUIVALENTEN (G) EN ECOPUNTEN (MPT) PER M<sup>3</sup> DRINKWATER

scenario	1	2	3	4	4 (85%)	5
CO <sub>2</sub> equivalent (kg)	0,337	0,333	0,345	0,444	0,384	0,437
Ecopunten (mPt)	68,9	66,6	57,9	85,9	75,7	86,0

### 6.5.1 Parameter sensitiviteit-analyse

Het is mogelijk om in een LCA na te gaan wat het effect is van verschillende parameters op de uitkomst van de LCA-analyse. Op die manier kan worden nagegaan hoe gevoelig het systeem hiervoor is, en hoe zinvol het kan zijn een optimalisatiestap op die parameter te richten. In deze studie is een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd voor de volgende parameters: de recovery van de RO-stap, de energiebron en het loogverbruik.

#### 6.5.1.1 RO recovery

De recovery van een RO-installatie bepaalt hoeveel waterverlies er bij deze processtap optreedt. Omdat bij een groter waterverlies er meer water door de voorgaande stappen van de zuivering moet worden behandeld, heeft de recovery een groot effect op de totale milieu-impact van een drinkwaterzuivering. Tabel 26 laat het verschil in ecopunten zien wanneer de recovery voor scenario 4 (RO met duinpassage), van 80% wordt verhoogd naar 85%. Een verhoging in de recovery van 80 naar 85%, levert, onder de huidige aannamen, een verbetering op van 11,8%. Nog steeds is de milieu-impact van scenario 4 hoger dan die van scenario 3 (kalkmelk). Een verdere verhoging van de recovery is niet reëel vanwege mogelijke scaling, maar zal ook niet leiden tot een gunstiger scenario dan wanneer er gebruik wordt gemaakt van kalkmelk bij de ontharding.

TABEL 26: PARAMETERSENSITIVITEITSANALYSE VAN DE GEKOZEN RECOVERY VAN DE RO INSTALLATIE IN SCENARIO 4 (RO MET DUINPASSAGE)

Recovery	Ecopunten (mPt)	CO <sub>2</sub> -equivalenten
80%	85,9	0,444
85%	75,7	0,384

Indien de milieu-impact wordt uitgedrukt in CO<sub>2</sub>-equivalenten wordt het verschil tussen een RO met 85% recovery (0,384 equivalenten) en ontharding met behulp van kalkmelk (0,382 equivalenten) veel kleiner dan wanneer de vergelijking wordt gebaseerd op ecopunten. Zoals eerder al aangegeven, neemt die laatste vergelijking alle aspecten mee (bijvoorbeeld het gebruik van antiscalants), wat bij het gebruik van CO<sub>2</sub>-equivalenten niet het geval is.

#### 6.5.1.2 Energiebron

Er wordt momenteel hard gewerkt aan de introductie van hernieuwbare energievormen. In EcoInvent 3,0 bestaat de mogelijkheid verschillende "typen" energie door te rekenen, die onderling verschillen in de manier waarop de energie is opgewekt, waar die wordt opgewekt, en hoe die getransporteerd wordt. Als basis is "high voltage markt" genomen, maar het is ook mogelijk uit te gaan van "high voltage" voor de industrie, medium voltage of bijvoorbeeld wind- of kernenergie. Voor het huidige scenario met kooldioxide (scenario

2), is de consumptie van energie verantwoordelijk voor 49% van de milieu-impact. Een “groenere vorm” van energie heeft dan ook een groot effect op het totale aantal ecopunten. In Tabel 27 is het effect van de gekozen energiebron op het aantal ecopunten in de verschillende scenario's weergegeven. Een duurzame energievorm zoals windenergie, resulteert in alle scenario's in een forse daling van de milieu-impact. De verlaging van het aantal ecopunten was voor elk scenario verschillend maar minstens 44% (scenario 1) en maximaal 59% (scenario 4). Deze grote veranderingen worden verklaard door het feit dat de consumptie van energie verantwoordelijk is voor een aanzienlijk deel van de ecopunten: in scenario 1 is dat bijvoorbeeld 49% van het aantal ecopunten. In scenario 4 ligt het aandeel van energieconsumptie hoger, waardoor het veranderen van de energiebron een nog groter effect heeft. Ondanks de keuze voor een duurzamere energievorm, blijft scenario 3 (kalkmelk) op basis van ecopunten de situatie met de laagste milieu-impact. Wel worden de reverse osmose voorstellen, zowel met als zonder duinpassage, met groene energie interessanter dan het huidige scenario.

TABEL 27: PARAMETERSENSITIVITEITSANALYSE VAN HET EFFECT VAN DE GEKOZEN ENERGIEBRON OP HET AANTAL ECOPUNTEN PER M<sup>3</sup> DRINKWATER IN DE VERSCHILLENDE SCENARIOS.

Energiebron	1	2	3	4	4 (85%)	5
High voltage markt (basis)	68,9	66,6	57,9	85,9	75,7	86,0
High voltage productie	63,3	61,0	51,7	76,4	67,7	77,0
Medium voltage markt	69,9	67,6	59,1	87,6	77,1	87,6
Windenergie	38,8	36,4	24,4	34,9	32,9	37,8
Kernenergie	40,3	38,0	26,1	37,5	35,1	40,3

Uiteraard kan de invloed van het type energiebron ook worden uitgedrukt in CO<sub>2</sub>-equivalenten, zoals weergegeven in Tabel 28. Aangezien het gebruik van fossiele energie een hoge CO<sub>2</sub>-uitstoot veroorzaakt, en het energieverbruik vooral bij de RO-processen hoog is, heeft een verandering van energiebron de meeste impact op de kooldioxide-voetafdruk van de RO-processen. Gebruik van groene energie (windenergie) lijkt nu zelfs ertoe te leiden dat de beide RO-scenario's er gunstiger uitspringen dan het huidige op NaOH-gebaseerde scenario, of het scenario gebaseerd op kalkmelk. Zoals eerder al aangegeven, wordt op deze manier een deel van de milieu-impact echter niet meegerekend in het effect.

TABEL 28: PARAMETERSENSITIVITEITSANALYSE VAN HET EFFECT VAN DE GEKOZEN ENERGIEBRON IN CO<sub>2</sub>-EQUIVALENTEN IN DE VERSCHILLENDE SCENARIOS.

Energiebron	1	2	3	4	4 (85%)	5
High voltage markt (basis)	0,337	0,333	0,345	0,444	0,384	0,437
High voltage productie	0,341	0,335	0,350	0,451	0,390	0,444
Medium voltage markt	0,339	0,332	0,347	0,447	0,387	0,44
Windenergie	0,137	0,130	0,122	0,105	0,099	0,117
Kernenergie	0,136	0,130	0,122	0,104	0,099	0,116

### 6.5.1.3 Loog impact

In SimaPro wordt voor de impact van loog uitgegaan van de productie van natronloog met behulp van een soort “standaard” proces, waarbij de impact gerelateerd is aan 1,36 g CO<sub>2</sub> equivalenten (1,36 g CO<sub>2</sub>/g (100%) NaOH). Waternet rekent zelf doorgaans voor 1 gram loog met een CO<sub>2</sub>-equivalent waarde van 1,92 g CO<sub>2</sub>, maar in gesprekken met Waternet kwam een “groenere” vorm van loog ter sprake die een waarde zou hebben van 0,86 g CO<sub>2</sub> (gegevens van een leverancier van loog). Aangezien loog in het huidige scenario, waarbij gebruikt wordt gemaakt van kooldioxide als zuur, verantwoordelijk is voor 29% van de milieu-impact heeft het gekozen uitgangspunt voor de loogwaarden een groot effect. Als basis is in deze LCA-studie uitgegaan van de getallen zoals die beschikbaar zijn in de database Ecolnvent 3,0, maar in deze paragraaf is

een parametersensitiviteitsanalyse gedaan naar groenere vormen van loog, die (nog) niet in deze database zijn opgenomen. Het is ook niet mogelijk om die gegevens handmatig in te voeren. Daarom is in de berekeningen in SimaPro de hoeveelheid gebruikte loog verlaagd totdat de totale CO<sub>2</sub>-equivalent impact aan de gewenste waarde voldeed. Het resultaat hiervan is weergegeven in Tabel 29.

De keuze voor een duurzamere vorm van loog (met een lagere kooldioxide-voetafdruk) heeft uiteraard een positief effect op het aantal ecopunten. In elk scenario is sprake van een vermindering van 2,3% (scenario 3, kalkmelk) tot maximaal 11% (scenario 2, huidige zuivering met kooldioxide dosering). Het toekennen van duurzamere vormen van loog heeft nauwelijks effect op het kalkmelk scenario (3), omdat er weinig loog wordt geconsumeerd in dit scenario. Dit in tegenstelling tot de beide huidige scenario's. Ondanks het feit dat het kalkmelkscenario ook met de duurzaamste loogvariant nog het beste scoort, is het verschil met de huidige scenario's met zoutzuur en kooldioxide (<5%) minimaal geworden. Wanneer er (nog) duurzamere vormen van loog daadwerkelijk gerealiseerd kunnen worden, zal het kalkmelk-scenario op basis van deze milieu-impactanalyse moeilijk kunnen concurreren met de huidige scenario's.

Zoals eerder beschreven liggen de RO-scenario's op basis van milieu-impact dicht bij elkaar met minder dan 0.1 verschil in ecopunten per m<sup>3</sup> drinkwater. Ondanks dat er minder water door de voorgaande zuiveringsstappen hoeft te worden behandeld wanneer RO zonder duinpassage wordt toegepast, was er geen verschil in milieu-impact, omdat er een hogere loogdosering nodig was om op de juiste SI te kunnen bereiken. Nu de impact van de loog wordt meegenomen, is voor een duurzamere loog inderdaad zichtbaar dat een RO installatie zonder duinpassage beter scoort op basis van milieu-impact (ecopunten). Dit geeft aan dat de slechtere score van scenario 5 inderdaad veroorzaakt werd door het loogverbruik. Door een duurzamere loog te gebruiken wordt de milieu-impact van scenario 5 (zonder duinpassage) vergelijkbaar met die van scenario 4 (met duinpassage). Voor de vergelijking is voor beide scenario's uitgegaan van een recovery van 80%.

TABEL 29: PARAMETERSENSITIVITEITSANALYSE VAN HET EFFECT VAN DUURZAMERE VORMEN VAN LOOG OP HET AANTAL ECOPUNTEN PER M<sup>3</sup> DRINKWATER IN DE VERSCHILLENDE SCENARIOS.

Loog informatieve bron	1	2	3	4	4 (85%)	5
EcoInvent (1,36 gCO <sub>2</sub> /g NaOH)	68,9	66,6	57,9	85,9	75,7	86,0
Waternet (1,92gCO <sub>2</sub> /g NaOH)	77,0	74,5	59,6	89,2	78,9	90,7
Fabrikant (0,86 gCO <sub>2</sub> /g NaOH)	61,7	59,5	56,5	82,9	72,8	81,7

Uiteraard kan de invloed van het type loog ook in CO<sub>2</sub>-equivalenten worden uitgedrukt (Tabel 30).

TABEL 30: PARAMETERSENSITIVITEITSANALYSE VAN HET EFFECT VAN DUURZAMERE VORMEN VAN LOOG IN CO<sub>2</sub>-EQUIVALENTEN PER M<sup>3</sup> DRINKWATER IN DE VERSCHILLENDE SCENARIOS.

Loog informatieve bron	1	2	3	4	4 (85%)	5
EcoInvent (1,36 gCO <sub>2</sub> )	0,337	0,333	0,345	0,444	0,384	0,437
Waternet (1,92gCO <sub>2</sub> )	0,409	0,402	0,352	0,474	0,413	0,480
Fabrikant (0,86 gCO <sub>2</sub> )	0,326	0,319	0,339	0,439	0,379	0,431

Omdat in scenario 3 (kalkmelk) relatief weinig loog wordt toegepast, heeft het type loog weinig invloed op het aantal CO<sub>2</sub>-equivalenten in dit scenario. Ook blijkt uit Tabel 30, net als uit Tabel 29, dat de slechtere score van scenario 5 ten opzichte van scenario 4 (zonder of met duinpassage) vooral veroorzaakt wordt door

het loogverbruik. Scenario 4 met een recovery van 85% komt nu echter wel dichterbij in de buurt van het scenario gebaseerd op kalkmelk (3).

#### 6.5.1.4 Kort-cyclisch versus lang-cyclisch CO<sub>2</sub>

In voorgaande paragrafen is al kort opgemerkt dat het karakter van het CO<sub>2</sub> dat vrijkomt bij het branden van kalk anders is dan het karakter van het CO<sub>2</sub> dat uit het gebruik van fossiele energiebronnen afkomstig is. Het eerste is kort-cyclisch, omdat het CO<sub>2</sub> afkomstig is uit (bi)carbonaat in het water, dat weer in evenwicht is met de atmosfeer. Dit heeft in principe dus een kleiner milieu-effect dan CO<sub>2</sub> uit fossiele brandstoffen.

Het blijkt mogelijk te zijn om in Simapro aan te geven wat voor type CO<sub>2</sub> het is. We hebben hiervoor het uit het CaCO<sub>3</sub> afkomstige CO<sub>2</sub> als CO<sub>2</sub> "van biogene oorsprong" meegenomen. Dit leidt tot een lagere milieu-impact op basis van ecopunten. Indien het milieu-effect op basis van de hoeveelheid CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> drinkwater wordt bepaald, maakt kan hiervoor in Simapro niet gecorrigeerd worden. Eventueel kan men ervoor kiezen om het biogene CO<sub>2</sub> dan niet mee te nemen in de berekening, maar het is de vraag of dat geoorloofd is.

Rekening houdend met kort-cyclisch CO<sub>2</sub> wordt het effect van verschillende typen energie nu weergegeven in Tabel 31.

TABEL 31: PARAMETERSENSITIVITEITSANALYSE VAN HET EFFECT VAN DE GEKOZEN ENERGIEBRON OP HET AANTAL ECOPUNTEN PER M<sup>3</sup> DRINKWATER IN DE VERSCHILLENDE SCENARIOS.

Energiebron	1	2	3 Lang- cyclisch CO <sub>2</sub>	3 kort- cyclisch CO <sub>2</sub>	4	4 (85%)	5
High voltage markt (basis)	68,9	66,6	57,9	54,6	85,9	75,7	86,0
High voltage productie	63,3	61,0	51,7	48,3	76,4	67,7	77,0
Medium voltage markt	69,9	67,6	59,1	55,7	87,6	77,1	87,6
Windenergie	38,8	36,4	24,4	21,0	34,9	32,9	37,8
Kernenergie	40,3	38,0	26,1	22,8	37,5	35,1	40,3

Uit Tabel 31 blijkt dat scenario 3, rekening houdend met kort-cyclisch CO<sub>2</sub>, significant beter scoort wat milieu-impact betreft dan de overige scenario's.

### 6.5.2 Afval

Bij alle processen komt natuurlijk ook “afval” vrij. Bij de pelletprocessen (scenario's 1, 2, en 3) gaat het hierbij vooral om calciëet dat als carry over vrijkomt, bij de RO-processen (scenario 4 en 5) gaat het om het concentraat. Dit concentraat bevat voornamelijk zouten die uit het water verwijderd worden, en natuurlijk antiscalant die in het proces wordt toegevoegd. Tegenwoordig mag een dergelijk concentraat in Nederland niet meer geloosd worden (in andere landen is dat vaak wel nog het geval). In de LCA wordt het concentraat meegerekend als “inert afval”, maar voor de huidige Nederlandse situatie is dat dus eigenlijk niet juist. De hoeveelheden “afval” die per proces vrijkomen en het aantal ecopunten die zij in de LCA opleveren zijn weergegeven in Tabel 32.

TABEL 32: DE BIJDRAGE VAN AFVAL AAN DE LCA

Scenario	Type afval	Hoeveelheid afval (g/m <sup>3</sup> drinkwater)	mPt
1 REF_HCl	Calciëet	9,0	0,074
2 REF_CO2	Calciëet	9,0	0,074
KLK	calciëet	9,0	0,074
RO1 (80%)	concentraat	139	4,08
RO1 (85%)	concentraat	130	3,84
RO2	concentraat	139	4,07

Uit Tabel 32 blijkt dat de bijdrage van de vorming van “afval” aan de LCA voor de drie RO-scenario's beduidend groter is dan voor de pellets-scenario's, hoewel de absolute bijdrage klein is. Hierbij moet dus wel worden aangetekend dat de impact voor de RO-scenario's, in Nederland, waarschijnlijk iets groter zal zijn, omdat concentraat in feite niet als “inert afval” beschouwd mag worden.

## 7 Resultaten TCO-berekeningen

### 7.1 Het doel van de TCO

Waternet heeft de ambitie om op productiebedrijf Leiduin een duurzamere ontharding te realiseren. De opties om duurzaamheid te bereiken moeten echter ook kosteneffectief zijn. Om een goede afweging van de kosteneffectiviteit te maken, zijn voor alle scenario's Total Cost of Ownership berekeningen uitgevoerd.

### 7.2 Gebruikte methode

Om de TCO te berekenen is een speciale spreadsheet ontwikkeld. In deze spreadsheet dient eerst een aantal basisuitgangspunten te worden gedefinieerd. Vervolgens kan worden ingevoerd welke investeringen gedaan moeten worden, welke bedrijfsvoeringskosten worden verwacht en welke (periodieke) onderhoudskosten worden verwacht.

Vervolgens worden de jaarlijkse kosten hieruit berekend. De kosten worden geïndexeerd. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen een algemene inflatiecorrectie en daarnaast een aparte indexering voor kosten voor gas en elektriciteit. Van de jaarlijkse kosten wordt vervolgens de contante waarde berekend en het geheel gesommeerd tot de TCO. In Bijlage VII wordt de gebruikte methode in detail beschreven.

### 7.3 Investeringen

Wat betreft Capex zijn bij de TCO-berekeningen alleen de investeringen van nieuw te bouwen procesonderdelen meegenomen. Voor scenario 1 & 2 betreft het alleen een nieuwe pelletontharding. Bij scenario 3 betreft het, naast een nieuwe pelletontharding, ook installaties om pellets te wassen, te drogen, te malen en te zeven, een kalkoven om de gemalen pellets tot CaO te branden en een kalkmelk aanmaakinstallatie. Voor de scenario's 4 en 5 betreft het een nieuwe omgekeerde osmose installatie inclusief antiscalant dosering en CIP-installatie.

Voor alle investeringen zijn de bouwkosten bepaald op basis van literatuurgegevens (Boynton, 1980; Meier et al., 2005; JRC, 2013 (BREF); Stork et al., 2014) of met behulp van de webbased Kostenstandaard van Royal HaskoningDHV. Naast de bouwkosten zijn ook de voorbereidings- en bijkomende kosten bepaald. Alle kostenposten samen vormen de investeringskosten.

De bouwkosten van een installatie zijn opgesplitst naar Civiele werken (Ct), Werktuigbouwkundige werken (Wtb) en Elektro en Instrumentatie technische werken (E&I). Deze onderdelen worden over verschillende periodes afgeschreven. Na die periode is rekening gehouden met de benodigde herinvestering. De gehanteerde afschrijvingsperiodes zijn:

- Ct 40 jaar
- Wtb 25 jaar
- E&I 15 jaar

Voor membranen is een levensduur van 5 jaar aangehouden.

De TCO-berekeningen zijn uitgevoerd voor een periode van 75 jaar. Hierin vindt dus eenmaal een herinvestering plaats van de Ct installatie delen, tweemaal een herinvestering van de Wtb delen en viermaal van de E&I delen. Aan het eind van deze periode van 75 jaar is de gehele technische installatie afgeschreven en is er alleen een beperkte restboekwaarde van de civiele werken.

### 7.4 Bedrijfsvoeringskosten

De variabele kosten (Opex) zijn berekend op basis van de werkelijke verbruiken zoals gehanteerd in de LCA berekeningen. In bijlage VII zijn de gehanteerde kosten voor water, energie en de chemicaliën weergegeven.

## 7.5 Onderhoud

Voor de jaarlijkse kosten van onderhoud van de verschillende installatiedelen zijn de volgende percentages van de bouwkosten gehanteerd:

- Ct 0.5 % per jaar
- Wtb 2 % per jaar
- E&I 4 % per jaar
- Inrichting 10 % per jaar

## 7.6 Resultaten TCO berekeningen

De resultaten van de TCO-berekeningen staan weergegeven in Tabel 33

TABEL 33: RESULTATEN VAN DE TCO-BEREKENINGEN (AFGEROND OP 5 M€) VOOR DE VERSCHILLENDE SCENARIOS VOOR EEN PERIODE VAN 75 JAAR.

		Scenario 1 NaOH + HCl	Scenario 2 NaOH + CO2	Scenario 3 Ca(OH)2 + CO2	Scenario 4a RO1 (80%)	Scenario 4b RO1 (85%)	Scenario 5 RO2
Vorbereidingskosten	M€	3,2	3,2	3,4	9,1	9,1	9,1
Kapitaalkosten	M€	81	81	86	368	368	368
Onderhoudskosten	M€	40	40	41	129	129	129
Bedrijfsvoeringskosten	M€	1.147	1.104	1.034	1.562	1.495	1.528
Subtotaal Kosten	M€	1.271	1.229	1.164	2.068	2.001	2.034
Besparing/Inkomsten	M€	-5,5	-5,5	-41	0	0	0
Totaal	M€	1.266	1.223	1.124	2.068	2.001	2.034
<b>TCO</b>	<b>M€</b>	<b>495</b>	<b>475</b>	<b>420</b>	<b>800</b>	<b>775</b>	<b>790</b>

Uit Tabel 33 blijkt dat bij toepassing van pelletontharding het huidige scenario, met een ontharding gebaseerd op NaOH (weliswaar met calcië als entmateriaal in plaats van granaatzand) en een pH-correctie met behulp van zoutzuur, de hoogste TCO met zich meebrengt, maar ook dat scenario 2, met een pH-correctie met behulp van kooldioxide hier nauwelijks van afwijkt. Het kalkmelkscenario (scenario 3) is circa 15% goedkoper.

De drie scenario's waarin RO wordt toegepast zijn echter aanzienlijk (ca. 65%) duurder dan het huidige proces. Scenario 5, zonder duinpassage, is slechts een paar procent goedkoper dan proces 4a met duinpassage (waarbij voor allebei een recovery van 80% wordt aangenomen). Bij een hogere recovery (85%) is het proces met duinpassage iets goedkoper, maar waarschijnlijk vallen deze verschillen binnen de foutenmarge van de kostenraming (die circa 30% bedraagt).

## 8 Discussie

In dit hoofdstuk zijn de in dit rapport uitgewerkte zuiveringsscenario's onderling vergeleken op basis van de totale kosten voor het proces en het effect ervan op het milieu. Hoewel de vraag in eerste instantie was om te kijken naar het onthardingsproces, bleek het toch nodig om het hele proces in de beschouwing mee te nemen. Dit is veroorzaakt door de scenario's waarin RO wordt toegepast. Doordat bij dit proces de recovery slechts 80 of 85% is, moet in het hele proces meer water worden ingenomen en behandeld, waardoor een vergelijking alleen mogelijk is indien voor alle scenario's het hele proces wordt doorgerekend.

### 8.1 De verschillende scenario's

Voor de duidelijkheid zijn de in dit rapport uitgewerkte scenario's nog eens naast elkaar weergegeven in Tabel 34

TABEL 34: OVERZICHT VAN DE VERSCHILLENDE ZUIVERINGSSCENARIO'S

Scenario	Omschrijving
1	Huidige proces, met ontharding op basis van NaOH, pH-correctie met behulp van HCl, en calciet als entmateriaal in plaats van granaatzand
2	Huidige proces met ontharding op basis van NaOH, pH-correctie met behulp van CO <sub>2</sub> , en calciet als entmateriaal in plaats van granaatzand
3	Ontharding met behulp van kalkmelk, pH-correctie met behulp van CO <sub>2</sub> , en calciet als entmateriaal
4a	Duinpassage en RO met een recovery van 80%
4b	Duinpassage en RO met een recovery van 85%
5	RO met een recovery van 80%; geen duinpassage

Voor elk scenario is een massabalans opgesteld, en de hieruit voortkomende gegevens zijn gebruikt in zowel de LCA-analyses als de TCO-berekeningen.

Aangezien het de bedoeling is in Leiduin over te stappen op calciet als entmateriaal in plaats van granaatzand, is dit in alle berekeningen al meegenomen. Daarnaast is het de bedoeling in plaats van zoutzuur kooldioxide te gaan gebruiken voor de pH-correctie. Ter vergelijking is het proces met zoutzuur in scenario 1 wel nog meegenomen, maar in de andere scenario's wordt kooldioxide toegepast. Het gebruik van kooldioxide bleek ook van invloed te zijn op allerlei evenwichten in het water, zoals de SI, waardoor het op diverse plekken van invloed bleek op de massabalansen.

In de analyses is verder gewerkt met drie "typen" loog, die onderling verschillen in hun milieu-impact (zoals beschreven in hoofdstuk 6).

### 8.2 Life Cycle Analyses

LCA is een tool die dient om de milieu-impact van verschillende scenario's met elkaar te vergelijken. Alle milieueffecten zijn daarbij in deze studie uitgedrukt in ecopunten per m<sup>3</sup> drinkwater. Als referentie komt 1000 ecopunten overeen met de milieu-impact van één West-Europeaan in één jaar. Hoe lager het aantal ecopunten voor een scenario, des te gunstiger is dit scenario voor het milieu. Bovendien kan de LCA-tool ook ingezet worden voor een sensitiviteitsanalyse voor één enkele parameter.

Van de onderzochte scenario's scoort het kalkmelkscenario op basis van ecopunten het best (minst negatieve effect op het milieu). De voorgestelde RO scenario's scoren op basis van de milieu-impact slechter dan het huidige scenario met NaOH. Dit blijft ook zo wanneer er voor duurzamere energie of loog wordt gekozen.

Het verschil tussen het huidige en het kalkmelkscenario wordt echter wel kleiner wanneer er voor een duurzamere vorm van loog wordt gekozen, maar het verschil tussen beide scenario's wordt niet sterk beïnvloed door de keuze van de energiebron. Om een goede afweging te kunnen maken op basis van de milieu-impact is het dan ook zaak om te kijken wat de daadwerkelijke voetafdruk van de gebruikte loog is, maar ook hoeveel dit in de (nabije) toekomst nog kan verbeteren. Daarnaast is in dit overzicht nog niet meegenomen dat toepassing van energierecovery op de concentraatstroom het totale energieverbruik deels zou kunnen verminderen.

Het is ook mogelijk de milieu-impact uit te rekenen in CO<sub>2</sub>-equivalenten. Door vergelijkingen te maken op basis van deze CO<sub>2</sub>-equivalenten wordt het verschil tussen bijvoorbeeld scenario 4 (RO met duinpassage, 85% recovery) en scenario 3 (ontharding met behulp van kalkmelk) veel kleiner, of komt scenario 4 er zelfs als gunstigste uit, bijvoorbeeld bij het gebruik van duurzame (wind)energie. Hierbij moet wel worden aangetekend dat op deze manier andere invloeden op het milieu totaal buiten beschouwing worden gelaten.

In dit project is de duurzaamheid via een LCA bepaald. Andere duurzaamheidsindicatoren zijn de mate van hergebruik of 'resource efficiency', en bijdragen aan de circulaire economie. De laatst genoemde indicatoren zijn in dit rapport niet gekwantificeerd, maar het is evident dat scenario 3, waarbij de kalk wordt gebrand en omgezet in kalkmelk, die weer kan worden gebruikt voor de ontharding, een goed voorbeeld is van resource recovery en prima past bij de gedachte van de circulaire economie. Dit geldt uiteraard ook voor het gebruik van calcië uit het onthardingsproces als entmateriaal voor datzelfde onthardingsproces, in plaats van gebruik te maken van telkens opnieuw aan te voeren granaatzand. Mogelijk kan zelfs het kooldioxide, dat vrijkomt bij het branden van kalk, worden gebruikt voor pH-correcties in het proces. Een dergelijk hergebruikconcept heeft tevens een positief effect op het imago van de watersector.

### 8.3 Total Cost of Ownership

Een vergelijking van de TCO van alle vijf de genoemde scenario's laat zien dat die TCO in twee categorieën kunnen worden ingedeeld:

1. Ontharding met behulp van NaOH of kalkmelk (scenario's 1-3): totale kosten ca. 450 M€ over een periode van 75 jaar.
2. Ontharding met behulp van RO (scenario's 4-5): totale kosten ca. 800 M€ over een periode van 75 jaar

Hieruit blijkt heel duidelijk dat de RO scenario's, al dan niet in combinatie met duinfiltratie, veel duurder zijn dan de scenario's waarbij kalkmelk of NaOH wordt gebruikt voor de ontharding.

Bij deze analyse moet echter wel een opmerking worden geplaatst. In de berekening is ervan uitgegaan dat de calcië die in het onthardingsproces wordt gevormd, na wassen, drogen, malen en zeven als entmateriaal kan worden ingezet. Een ander deel van het calcië wordt gebrand tot kalk en geblust. Het is echter maar zeer de vraag of een dergelijke behandeling van de calcië (wassen, malen, zeven, branden) ter plekke economisch rendabel is. Hiervoor is om te beginnen een behoorlijke investering vereist en daarnaast zijn bestaande commerciële kalkovens meestal berekend op (veel) grotere hoeveelheden, en daardoor minder efficiënt voor toepassing op kleinere schaal. Dit geldt zeker voor kalkovens, waarvan de kleinste typen in de praktijk voor vijf keer zoveel calcië zijn ontworpen dan er in Leiduin wordt geproduceerd. Het is heel ongunstig voor een kalkoven om die niet constant in bedrijf te laten zijn, omdat de oven dan telkens opnieuw moet worden opgewarmd en afgekoeld. Het zal dan waarschijnlijk ook economisch rendabeler zijn om de behandeling van de gevormde calcië uit te besteden aan een hierin gespecialiseerd bedrijf, of eventueel de activiteit te centraliseren met mogelijk een rol voor de Reststoffenunie. Overigens worden bij de meeste kalkovens grote brokken calcië toegepast, die vele malen groter zijn dan de korrels die uit een onthardingsreactor komen. Dit kan ook gevolgen hebben voor het ontwerp van de kalkoven of de procesomstandigheden.

### 8.4 Vergelijking verschillende scenario's

In Tabel 35 is een vergelijking gemaakt van de resultaten die voor de verschillende scenario's zijn verkregen, gebaseerd op windenergie (aangezien Waternet streeft naar 100% gebruik van groene energie):

TABEL 35: VERGELIJKING VERSCHILLENDE SCENARIO'S IN LCA EN TCO

Scenario	1	2	3	4	4 (85%)	5
LCA (ecopoints)	38,8	36,4	26,5	34,9	32,9	37,8
LCA (CO <sub>2</sub> voetafdruk)	0,137	0,130	0,157	0,105	0,099	0,117
TCO (M€) (over 75 jaar)	495	475	420	800	775	790

Uit dit overzicht blijkt dat kalkmelk een goed alternatief kan zijn voor de ontharding met NaOH. De RO-varianten zijn allemaal veel duurder, en hebben een veel grotere invloed op het milieu. Alleen indien de milieu-impact wordt uitgerekend op basis van CO<sub>2</sub>-equivalenten, komen de RO-scenario's wat milieu-impact betreft gunstiger uit de bus.

Of kalkmelk daadwerkelijk kan worden toegepast zal afhangen van de mogelijkheden om kalk ter plekke te branden of elders te laten branden. Bij dat laatste moeten wel transportkosten worden meegerekend, maar bij afstanden tot 100 km zijn die verwaarloosbaar ten opzichte van het hele proces.

Een belangrijk aspect dat bij deze studie buiten beschouwing is gebleven, is de bedrijfszekerheid van de verschillende scenario's. Die is ook met behulp van een LCA- of TCO-model niet vast te stellen, maar zal bij de keuze voor het toekomstige onthardingsproces zeker een belangrijke rol moeten spelen.

## 9 Conclusies

In dit project zijn vijf verschillende scenario's voor ontharding in Leiduin vergeleken op basis van LCA en TCO. Hieruit blijkt dat alle scenario's op basis van RO, zowel met en zonder duinpassage, op basis van ecopunten een grotere impact hebben op het milieu dan een scenario op basis van NaOH of kalkmelk. Dat laatste proces zou de kleinste milieu-impact kunnen hebben, maar dat hangt af van de mogelijkheden om dergelijke hoeveelheden kalkkorrels in de praktijk op een economisch rendabele manier te branden en te blussen. Eventueel zou kunnen worden besloten om dit proces uit te besteden.

Indien bij de vergelijking van de milieu-impact alleen wordt gelet op de kooldioxide-voetafdruk komen de RO-scenario's veel gunstiger uit de vergelijking, maar dan worden andere milieueffecten buiten beschouwing gelaten. Maar of het milieueffect nu wordt uitgedrukt in ecopunten of kooldioxide-voetafdruk, volgens deze berekening heeft het kalkmelkscenario nog steeds het minst negatieve effect op het milieu. Indien echter wordt uitgegaan van groene energie lijken de RO-scenario's gunstiger te zijn dan het kalkmelkscenario. Er valt echter te twisten over deze conclusie. De CO<sub>2</sub>-uitstoot van het branden van kalkmelk wordt immers voor een aanzienlijk deel bepaald door de chemische omzetting van calciumcarbonaat, maar het CO<sub>2</sub> dat hierbij vrijkomt is in feite "kortcyclisch" CO<sub>2</sub>, in tegenstelling tot het andere CO<sub>2</sub> dat in alle processen gevormd wordt, en dat wel "langcyclisch" is.

Uit de TCO-analyse blijkt dat de RO-scenario's aanzienlijk duurder zijn dan de scenario's met pelletontharding. Het kalkmelkscenario lijkt het goedkoopste te zijn, maar dit hangt sterk af van de mogelijkheden om kalk ter plekke te verwerken tot entkorrels en kalkmelk. Eventueel zou dit proces kunnen worden uitbesteed. Daarbij moet dan wel rekening worden gehouden met extra transportkosten, al bleek wel uit de parametersensitiviteitsanalyse dat bij afstanden tot 100 km dit transport niet significant bijdraagt aan de totale milieu-impact, en ook geen wezenlijke invloed op de totale proceskosten heeft.

De oorspronkelijke vraag van Waternet was welk proces voor ontharding het beste zou zijn, nu de huidige ontharding in Leiduin bijna aan vervanging toe is. Vanuit het oogpunt van hergebruik van grondstoffen en circulaire economie zou een ontharding gebaseerd op in het proces zelf geproduceerde kalkmelk de voorkeur verdienen. Ook wat betreft milieu-impact en kosten scoort dit scenario het beste. Het is echter de vraag of het haalbaar is de gevormde calciëte op locatie te verwerken. Hiervoor is een uitgebreidere studie naar de mogelijkheden en kosten van kalkovens noodzakelijk, en een vergelijking met de kosten die een centrale kalkverwerking voor de waterbedrijven of eventueel uitbesteding aan een bestaand gespecialiseerd bedrijf met zich mee zouden brengen. Een ander punt waarmee zeker rekening moet worden gehouden is de bedrijfszekerheid, die bij dit onderzoek buiten beschouwing is gelaten, maar bij een onderzoek naar toepassing van kalkovens zeker moet worden meegenomen.

# 10 Literatuur

Agentschap NL (2011). Ketenvergelijking straalmiddelen: Grittal, korund en granaatzand. P015610179, M10A0302

Hassibi, M. (2009). An overview of lime slaking and factors that affect the process. Presentation to 3rd International Sorbalit Symposium, 1999 - carmeusena.com

Hoek, J.P. van der (2000). Mogelijkheden uitbreiding productiecapaciteit Gemeentewaterleidingen Amsterdam; Samenvattend eindrapport; Gemeentewaterleidingen Amsterdam (ook wel "70-83 studie" genoemd).

JRC, 2013 (BREF), JRC – IPTS, 2013 Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, JRC - IPTS (Joint Research Centre - Institute for Prospective Technological Studies), Seville, Spain, 2013.

MAERZ; The MAERZ parallel flow regenerative lime kiln; [www.maerz.com](http://www.maerz.com) (2015).

Meier, A., Gremaud, N., Steinfeld, A. (2005). Economic evaluation of the industrial solar production of lime. *Energy Conversion and Management* 46, 905-926.

Merks, C.W.A.M., v. Eekeren, M.W.M. (1992a). Parameters voor de kwaliteit van kalkmelk. Rapport SWE92.011

Merks, C.W.A.M., v. Eekeren, M.W.M., van der Jagt, H. (1992b). Voorschrift kwaliteitstest kalkmelk. Rapport SWE92.012

Merks, C.W.A.M., Bos, R.H.M., Nederlof, M.M. (1995). Kwaliteitstest voor kalkmelk, H2O 28 (3), 67-70

Okonkwo, P.C., Adefila, S.S. (2013). Investigation of some factors that affect jakura limestone burning. *African J. Pure Appl. Chem.*, 7(8), 280-290.

Reijnen, G., Siegers, W. (2008). Tips voor het ontwerpen en verbeteren van korrelreactoren. KWR 08.017.

Sagastume Gutiérrez, A., J. Van Caneghem, et al. (2012). Evaluation of the environmental performance of lime production in Cuba." *Journal of Cleaner Production* 31, 126-136.

Siegers, W. (2003). Overzicht van korrelreactoren in Nederland; KWR02.087.

Stork, M., Meindersma, W., Overgaag, M., Neelies, M. (2014). A Competitive and Efficient Lime Industry - Cornerstone for a Sustainable Europe. Ecofys report, Project nummer INDNL14090.

Válek, J., van Halem, E., Viani, A., Pérez-Estébanez, M., Ševčík, R., Šašek, P. (2014). Determination of optimal burning temperature ranges for production of natural hydraulic limes. *Construc. Build. Mat.*, 66, 771-780.

Williams, R. (2004); Lime kilns and lime burning. Shire Library; Shire Classics; Princes Risborough, Buckinghamshire, UK.

# Bijlage I Samenstelling ongebluste kalk

## Gebruikte methodes

Methode ID	Code	Omschrijving
0	Gl	gloeirest 600 °C: LAM-066, eigen methode Op verzoek aangepaste temperaturen en tijden.

## Resultaten:

Codering opdrachtgever : zie tabel

Monstercodenummer(s) : C-15 1355, C-15 1356, C-15 1357

Componenten	Meth ID	KL 850°C 5 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1355	KL 850°C 8 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1356	KL 850°C 24 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1357
gloeirest 850°C	# 0	64,8 %	56,6 %	56,0 %

Codering opdrachtgever : zie tabel

Monstercodenummer(s) : C-15 1358, C-15 1359, C-15 1360

Componenten	Meth ID	KL 1000°C 5 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1358	KL 1000°C 8 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1359	KL 1000°C 24 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1360
gloeirest 1000°C	# 0	56,1 %	56,0 %	55,9 %

*Resultaten:*

Codering opdrachtgever : zie tabel

Monstercodenummer(s) : C-15 1361, C-15 1362, C-15 1363

Componenten	Meth ID	VKL 850°C 5 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1361	VKL 850°C 8 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1362	VKL 850°C 24 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1363
gloeirest 850°C	* 0	69,2 %	60,2 %	57,5 %

Codering opdrachtgever : zie tabel

Monstercodenummer(s) : C-15 1364, C-15 1365, C-15 1366

Componenten	Meth ID	VKL 1000°C 5 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1364	VKL 1000°C 8 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1365	VKL 1000°C 24 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1366
gloeirest 1000°C	* 0	56,9 %	56,6 %	56,5 %

Codering opdrachtgever : zie tabel

Monstercodenummer(s) : C-15 1367, C-15 1368, C-15 1369

Componenten	Meth ID	ZEW 850°C 24 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1367	ZEW 1000°C 24 uur chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1368	Zuiver CaO als referentie (referentie kalkmelktest) chemicaliën calciumoxide 10-06-2015 C-15 1369
gloeirest 1000°C	0	-	55,6 %	-
gloeirest 850°C	0	56,1 %	-	-

*Legenda:*

	De gloeirest is bepaald zonder de tussenstap van 105°C. Dit is afwijkend van het voorschrift.
	Monsters zijn in duplo ingezet vanwege de benodigde hoeveelheid. De gemiddelde gloeirest is in dit rapport gerapporteerd.
-	Analyse niet gevraagd door opdrachtgever.
#	KL zijn kalkkorrels. Nadat deze in de oven zijn geweest vormt dit één massa. Nadat er kracht op uitgeoefend is, valt deze uit elkaar.
*	VKL zijn kalkkorrels welke gemalen zijn. Dit is een fijn poeder. Nadat deze in de oven zijn geweest vormt dit één massa. Nadat er grote kracht op uitgeoefend is, valt deze uit elkaar. Er is enige moeite nodig om deze weer in poedervorm te krijgen.

*Uitgebreide informatie omtrent de kengetallen bij de parameters (rapportagegrenzen, reproduceerbaarheden, meetonzekerheden, etc.) treft u aan op internet: <http://www.kwrwater.nl>.*

TABEL 36: ELEMENTSAMENSTELLING VAN DE KALKMONSTERS

		<b>C-15</b>	<b>C-15</b>	<b>C-15</b>	<b>C-15</b>	<b>C-15</b>	<b>C-15</b>	<b>C-15</b>	<b>C-15</b>	<b>C-15</b>	<b>C-15</b>	<b>C-15</b>	<b>C-15</b>	<b>C-15</b>	<b>C-15</b>
	<b>**</b>	<b>1355</b>	<b>1356</b>	<b>1357</b>	<b>1358</b>	<b>1359</b>	<b>1360</b>	<b>1361</b>	<b>1362</b>	<b>1363</b>	<b>1364</b>	<b>1365</b>	<b>1366</b>	<b>1367</b>	<b>1368</b>
7Li	mg/kg	1,8	1,7	1,5	0,71	0,59	0,41	2,0	2,4	2,2	0,90	0,80	0,71	2,2	1,3
9Be	mg/kg	0,005	0,007	0,008	0,008	0,008	0,007	0,006	0,008	0,008	0,008	0,008	0,010	0,010	0,010
11B	mg/kg	1,3	1,3	1,3	1,6	2,2	1,3	1,0	1,2	1,3	1,3	1,5	1,3	1,3	1,4
23Na	mg/kg	1030	1200	1075	590	460	370	965	1120	1115	955	850	835	1045	700
24Mg	mg/kg	4380	4935	5055	4930	4950	4945	4115	4805	5050	5070	5030	5125	2795	2920
27Al	mg/kg	195	385	485	190	190	275	240	280	400	480	565	765	41	73
39K	mg/kg	36	42	42	25	21	17	36	50	62	30	34	34	70	45
44Ca	mg/kg	296860	418270	422700	370965	383345	447905	322715	408635	425760	448935	437665	436980	409040	458260
45Sc	mg/kg	0,44	0,72	0,74	0,40	0,42	0,52	0,59	0,66	0,78	0,70	0,84	0,97	0,24	0,28
47Ti	mg/kg	2,9	3,5	2,6	4,1	4,0	3,9	30	27	25	32	36	33	2,5	2,1
51V	mg/kg	0,75	1,6	2,1	2,8	2,8	3,1	1,5	1,8	2,2	2,7	3,2	3,2	0,13	0,17
52Cr	mg/kg	0,58	0,61	0,58	0,62	0,72	0,86	7,0	9,6	9,9	10	11	11	0,59	1,4
55Mn	mg/kg	14	16	15	25	31	48	19	20	21	25	30	36	5,1	4,8
56Fe	mg/kg	480	535	445	515	590	830	720	730	715	745	880	1090	210	210
59Co	mg/kg	1,4	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,5	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,7	1,8
60Ni	mg/kg	14	15	16	16	16	16	16	20	20	20	20	21	17	18
65Cu	mg/kg	4,8	5,4	8,0	5,6	4,8	5,6	5,2	6,6	7,8	6,1	6,9	9,5	22	24
66Zn	mg/kg	0,40	0,54	0,46	0,51	0,49	0,71	0,87	1,0	1,1	1,1	1,3	1,7	1,5	1,4
71Ga	mg/kg	0,025	0,042	0,044	0,022	0,020	0,025	0,041	0,044	0,046	0,046	0,056	0,073	0,013	0,020
72Ge	mg/kg	0,24	0,26	0,26	0,26	0,26	0,31	0,28	0,32	0,31	0,31	0,35	0,38	0,22	0,21
75As	mg/kg	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,5	1,4	1,6	1,6	1,6	1,6	1,3	0,13	0,12
82Se	mg/kg	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
85Rb	mg/kg	0,072	0,088	0,096	0,053	0,041	0,036	0,063	0,087	0,12	0,047	0,047	0,050	0,16	0,095
88Sr	mg/kg	2210	2380	2470	2415	2440	2425	2000	2340	2440	2450	2405	2420	1170	1245
89Y	mg/kg	0,62	1,4	1,2	0,70	0,72	1,0	0,81	1,0	1,3	1,1	1,4	1,5	0,13	0,13
90Zr	mg/kg	0,39	0,24	0,20	0,31	0,21	0,14	1,2	0,85	0,55	0,48	0,36	0,14	0,35	0,19
93Nb	mg/kg	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010	< 0.010	0,087	0,061	0,037	0,043	0,040	0,028	< 0.010	< 0.010



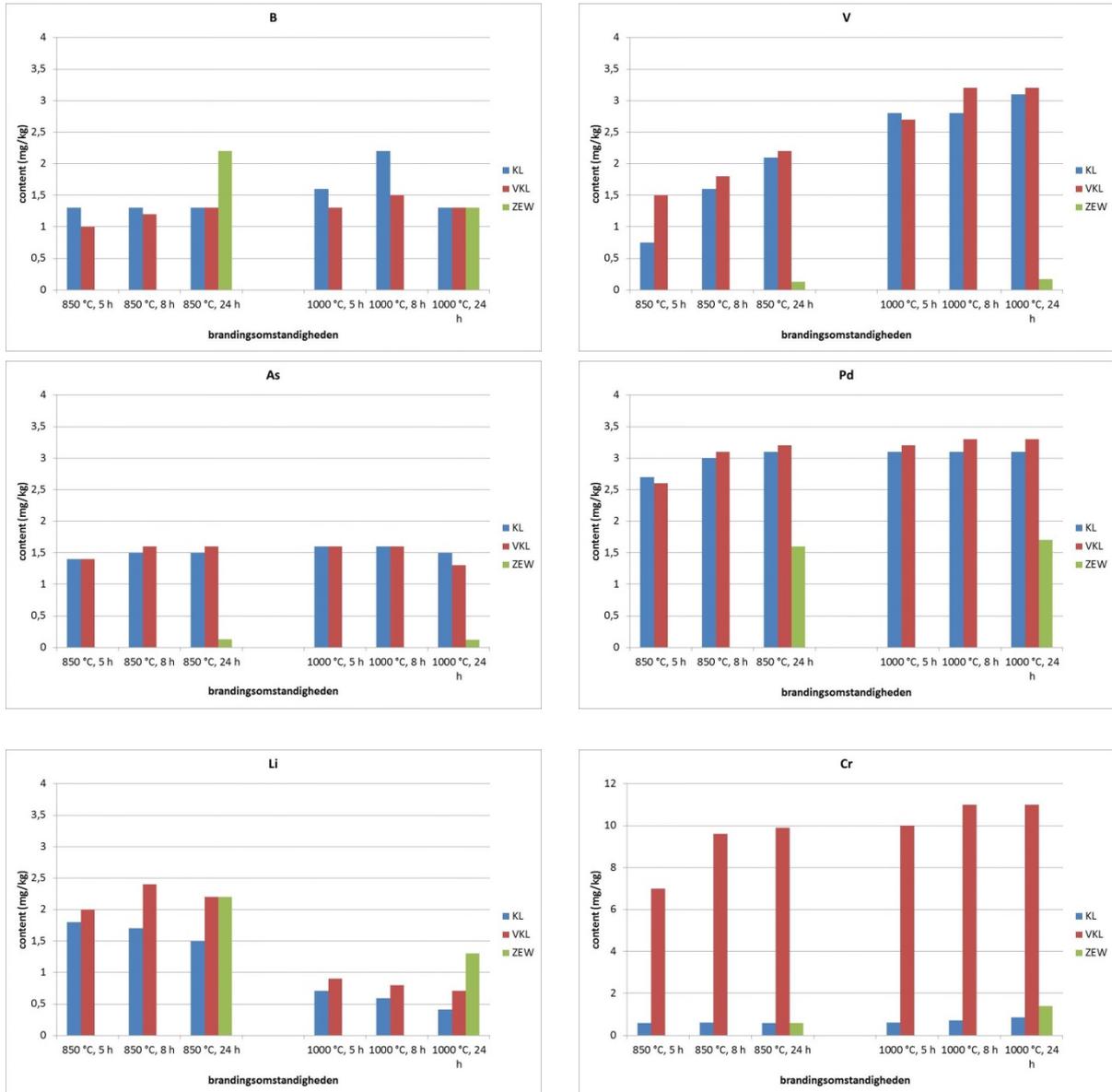
193Ir	mg/kg	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
195Pt	mg/kg	0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	0,005	0,006	0,006	0,004	0,004	0,002	< 0,002	< 0,002
205Tl	mg/kg	0,021	0,020	0,025	0,013	0,011	0,004	0,018	0,019	0,022	0,013	0,005	< 0,002	0,002	0,005
208Pb	mg/kg	0,38	0,51	0,71	0,56	0,43	0,50	0,21	0,26	0,34	0,33	0,34	0,50	0,48	1,2
209Bi	mg/kg	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	0,014	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010
232Th	mg/kg	0,23	0,22	0,036	0,026	0,014	0,009	0,59	0,37	0,12	0,035	0,029	0,015	< 0,002	< 0,002
238U	mg/kg	0,22	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,034	0,035

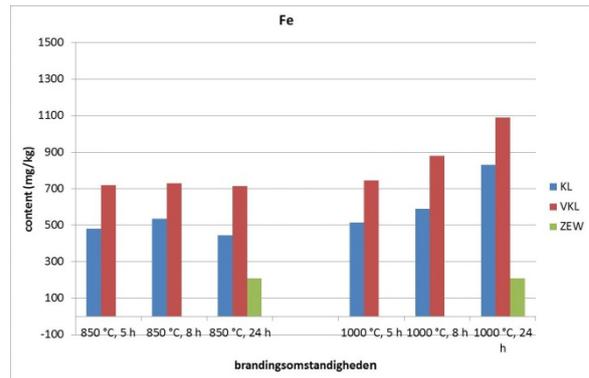
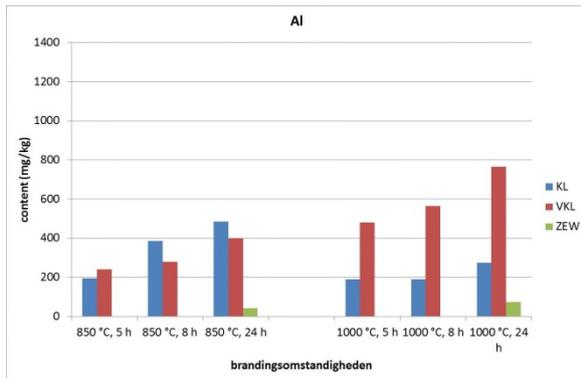
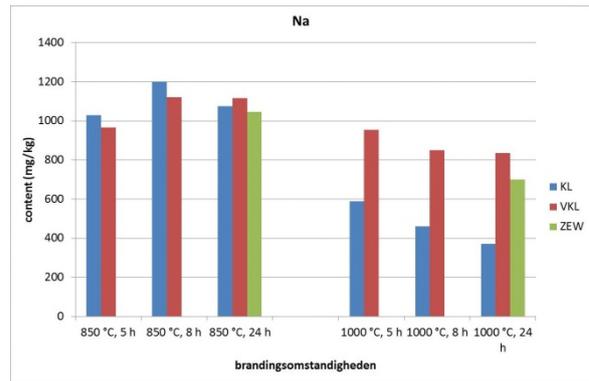
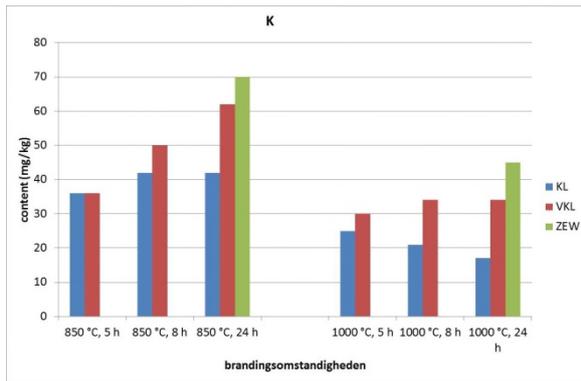
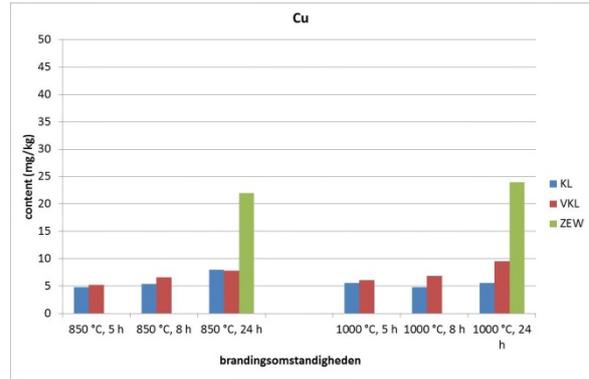
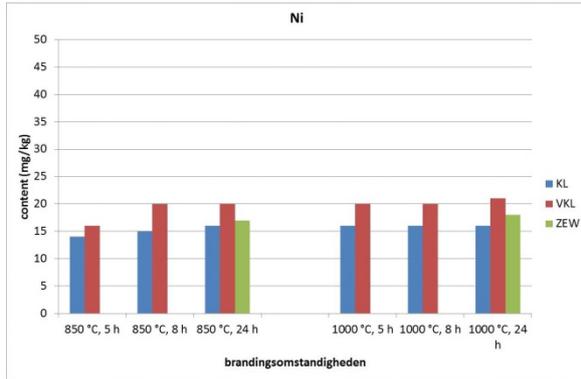
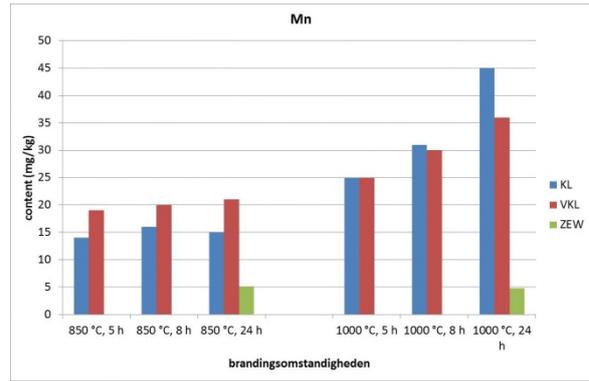
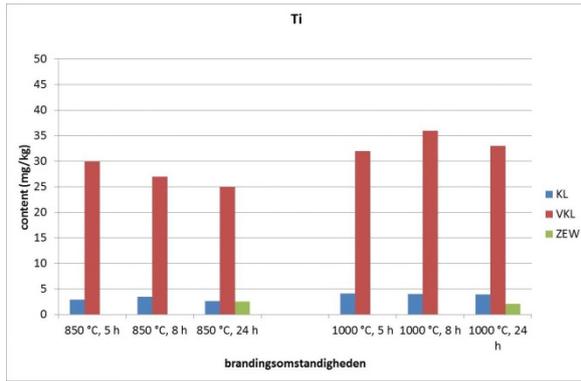
\*\*

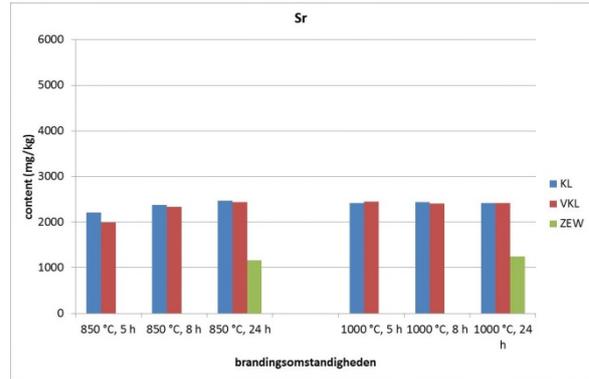
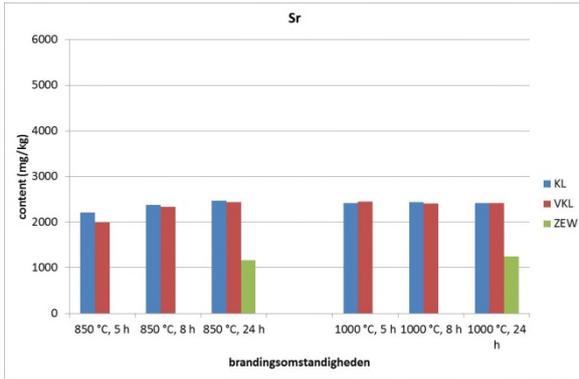
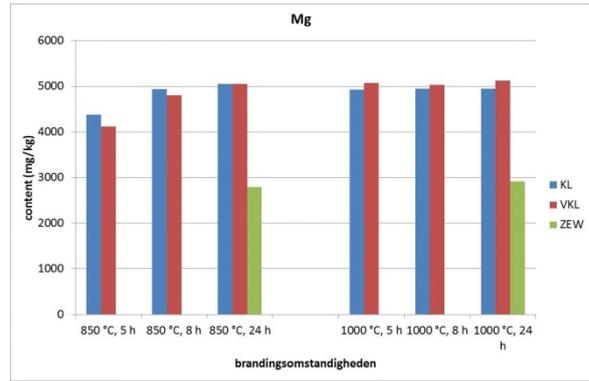
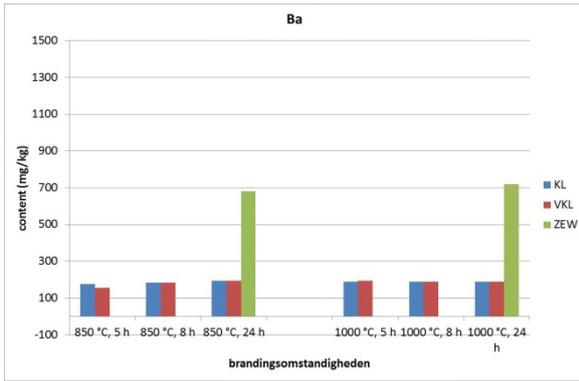
# Bijlage II Metaalgehalten in gebrande kalk

In deze bijlage zijn de gemeten metaalgehalten in de op het laboratorium gebrande kalk weergegeven.

FIGUUR 23: ELEMENTSAMENSTELLING VAN GEBRANDE KALKMONSTERS. LET OP: DE WAARDEN OP DE VERTICALE ASSEN VERSCHILLEN.







## Bijlage III Berekeningen entmaterialen

TABEL 37: GEGEVENS GRANAATZAND EN CALCJET

materiaal	granaatzand	calciet
Dichtheid (kg/m <sup>3</sup> )	4.100	2.700
Diameter ent/pellet (mm)	0,2-0,3	1
Gebruikte straal (mm)	0,125	0,5
Volume (m <sup>3</sup> )	$8,18 \cdot 10^{-12}$	$5,24 \cdot 10^{-10}$
Massa ent/calciet <sup>*)</sup> (kg)	$3,35 \cdot 10^{-8}$	$1,40 \cdot 10^{-6}$

\*) Exclusief massa granaatkorrel in pellet.

Stel dat een entkorrel  $\text{CaCO}_3$  net zo zwaar moet zijn als een granaatzandkorrel, dan is hiervoor een korrel nodig met een straal van 0,144 mm. In Weesperkarspel wordt inderdaad calciet als entmateriaal toegepast, maar daarvoor worden korrels met een straal van 0,25 mm gebruikt.

# Bijlage IV ROSA projectie

## Scenario RO1: Berekening bij Recovery 80% en temperatuur 11,5 °C

ROSA Detailed Report

Page 1 of 3

Reverse Osmosis System Analysis for FILMTEC™ Membranes  
 Project: RO1 Waternet Ontharding 20  
 Hans Huiting, KWR Waterecycle Research Institute

ROSA 9.0.0 ConfigDB u399339\_282  
 Case: 1  
 6/8/2015

**Project Information:** Waternet Ontharding 2.0

**Case-specific:** RO ECO440i membranes T = 11.5 °C Recovery 80%

### System Details

Feed Flow to Stage 1	492.51 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	394.04 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	492.51 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	80.01 %	Feed	0.23 bar
Feed Pressure	9.19 bar	Feed Temperature	11.5 C	Concentrate	1.11 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	478.16 mg/l	Average	0.67 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	432	Average NDP	7.53 bar
Total Active Area	17658.43 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	22.31 lmh	Power	157.15 kW
Water Classification: Surface Supply SDI < 3				Specific Energy	0.40 kWh/m <sup>3</sup>

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	ECO-440i	48	6	492.51	8.84	0.00	213.08	8.02	279.44	23.74	0.00	0.00	1.52
2	ECO-440i	24	6	213.08	7.67	0.00	98.48	6.97	114.60	19.47	0.00	0.00	4.25

Pass Streams (mg/l as Ion)								
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate			
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total	
NH4+ + NH3	0.01	0.01	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	
K	3.77	3.77	8.69	18.70	0.02	0.08	0.04	
Na	42.75	44.11	101.77	219.54	0.15	0.57	0.27	
Mg	9.96	9.96	23.00	49.71	0.01	0.06	0.03	
Ca	76.36	76.36	176.35	381.10	0.11	0.42	0.20	
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO3	0.26	0.26	1.56	7.48	0.00	0.00	0.00	
HCO3	210.60	210.60	484.07	1036.46	1.03	2.44	1.41	
NO3	3.71	3.71	8.52	18.22	0.05	0.17	0.08	
Cl	76.93	76.93	177.69	384.03	0.10	0.38	0.18	
F	0.13	0.13	0.30	0.65	0.00	0.00	0.00	
SO4	45.50	45.50	105.13	227.33	0.03	0.12	0.06	
SiO2	6.81	6.81	15.73	34.00	0.01	0.02	0.01	
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO2	15.74	15.74	16.29	18.64	15.54	16.71	15.91	
TDS	476.80	478.16	1102.83	2377.28	1.52	4.25	2.28	
pH	7.34	7.34	7.64	7.87	5.15	5.48	5.27	

\*Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume any obligation or liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, customer is responsible for determining whether products are appropriate for customer's use. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

## ROSA Detailed Report

Page 2 of 3

Reverse Osmosis System Analysis for FILMTEC™ Membranes  
 Project: RO1 Waternet Ontharding 20  
 Hans Huiting, KWR Watercycle Research Institute

ROSA 9.0.0 ConfigDB u399339\_282  
 Case: 1  
 6/8/2015

**Design Warnings**

WARNING: Maximum element recovery has been exceeded. Please change your system design to reduce the element recoveries.  
 (Product: ECO-440i, Limit: 17.00%)

**Solubility Warnings**

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

**Stage Details**

Stage 1 Element Recovery		Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.10	1.02	1.14	10.26	478.16	8.84
2	0.11	1.00	1.23	9.24	530.98	8.65
3	0.12	0.98	1.36	8.24	595.19	8.48
4	0.13	0.96	1.53	7.26	675.09	8.33
5	0.15	0.94	1.78	6.30	777.44	8.20
6	0.17	0.92	2.17	5.36	913.41	8.10
Stage 2 Element Recovery		Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.10	0.87	2.58	8.88	1102.83	7.67
2	0.11	0.84	3.01	8.01	1222.06	7.51
3	0.11	0.81	3.59	7.17	1364.95	7.36
4	0.12	0.78	4.39	6.35	1538.86	7.24
5	0.13	0.75	5.51	5.57	1754.23	7.13
6	0.15	0.72	7.14	4.82	2026.30	7.04

Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume any obligation or liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, customer is responsible for determining whether products are appropriate for customer's use. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

## ROSA Detailed Report

Page 3 of 3

## Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	7.34	7.34	7.87
Langelier Saturation Index	-0.33	-0.33	1.51
Stiff & Davis Stability Index	0.35	0.35	1.62
Ionic Strength (Molal)	0.01	0.01	0.05
TDS (mg/l)	476.80	478.16	2377.28
HCO <sub>3</sub>	210.60	210.60	1036.46
CO <sub>2</sub>	15.74	15.74	18.64
CO <sub>3</sub>	0.26	0.26	7.48
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.89	0.89	12.29
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.17	0.17	21.17
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	6.95	6.95	34.39
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.01

To balance: 1.36 mg/l Na added to feed.

# Scenario RO1: Berekening bij Recovery 85% en temperatuur 11,5 °C

ROSA Detailed Report

Page 1 of 3

Reverse Osmosis System Analysis for FILMTEC™ Membranes  
 Project: RO1 Waternet Ontharding 20  
 Hans Huiting, KWR Watercycle Research Institute

ROSA 9.0.0 ConfigDB u399339\_282  
 Case: 2  
 11/11/2015

**Project Information:** Waternet Ontharding 2.0

**Case-specific:** RO ECO440i membranes T = 11.5 °C Recovery 85%

**System Details**

Feed Flow to Stage 1	463.54 m³/h	Pass 1 Permeate Flow	393.96 m³/h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	463.54 m³/h	Pass 1 Recovery	84.99 %	Feed	0.23 bar
Feed Pressure	9.19 bar	Feed Temperature	11.5 C	Concentrate	1.46 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	478.11 mg/l	Average	0.85 bar
Chem. Dose (100% H2SO4)	0.00 mg/l	Number of Elements	432	Average NDP	7.53 bar
Total Active Area	17658.43 M²	Average Pass 1 Flux	22.31 l/mh	Power	147.90 kW
Water Classification: Surface Supply SDI < 3				Specific Energy	0.38 kWh/m³

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m³/h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m³/h)	Conc Flow (m³/h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m³/h)	Avg Flux (l/mh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	ECO-440i	48	6	463.54	8.84	0.00	183.50	8.10	280.04	23.79	0.00	0.00	1.58
2	ECO-440i	24	6	183.50	7.75	0.00	69.58	7.21	113.92	19.35	0.00	0.00	5.57

Pass Streams (mg/l as Ion)							
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate		
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	0.01	0.01	0.03	0.07	0.00	0.00	0.00
K	3.77	3.77	9.49	24.85	0.02	0.11	0.05
Na	42.75	44.09	111.14	291.88	0.16	0.76	0.33
Mg	9.96	9.96	25.14	66.17	0.02	0.07	0.03
Ca	76.36	76.36	192.71	507.32	0.12	0.56	0.25
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	0.26	0.26	1.88	12.82	0.00	0.00	0.00
HCO3	210.60	210.60	528.56	1373.10	1.06	3.15	1.61
NO3	3.71	3.71	9.30	24.14	0.05	0.23	0.10
Cl	76.90	76.90	194.10	511.06	0.11	0.50	0.22
F	0.13	0.13	0.33	0.86	0.00	0.00	0.00
SO4	45.50	45.50	114.89	302.73	0.03	0.16	0.07
SiO2	6.81	6.81	17.19	45.28	0.01	0.03	0.02
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	15.74	15.74	16.43	20.71	15.57	17.22	16.08
TDS	476.77	478.11	1204.75	3160.29	1.58	5.57	2.68
pH	7.34	7.34	7.67	7.92	5.16	5.58	5.32

\*Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume any obligation or liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, customer is responsible for determining whether products are appropriate for customer's use. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

## ROSA Detailed Report

Page 2 of 3

Reverse Osmosis System Analysis for FILMTEC™ Membranes  
 Project: RO1 Waternet Ontharding 20  
 Hans Huiting, KWR Watercycle Research Institute

ROSA 9.0.0 ConfigDB u399339\_282  
 Case: 2  
 11/11/2015

**Design Warnings**

WARNING: Maximum element recovery has been exceeded. Please change your system design to reduce the element recoveries.  
 (Product: ECO-440i, Limit: 17.00%)

CAUTION: The concentrate flow rate is less than the recommended minimum flow. Please change your system design to increase concentrate flow rates. (Product: ECO-440i, Limit: 2.95m<sup>3</sup>/h)

**Solubility Warnings**

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

**Stage Details**

Stage 1 Element Recovery		Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.11	1.02	1.14	9.66	478.11	8.84
2	0.12	1.00	1.24	8.63	534.64	8.66
3	0.13	0.98	1.38	7.63	604.53	8.51
4	0.14	0.96	1.58	6.65	693.34	8.37
5	0.17	0.94	1.88	5.69	810.13	8.26
6	0.19	0.93	2.37	4.75	970.67	8.17
Stage 2 Element Recovery		Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.11	0.87	2.92	7.65	1204.75	7.75
2	0.12	0.84	3.52	6.77	1359.04	7.62
3	0.14	0.81	4.37	5.93	1551.41	7.50
4	0.15	0.78	5.63	5.12	1796.96	7.41
5	0.17	0.74	7.58	4.34	2118.82	7.33
6	0.19	0.69	10.73	3.59	2553.42	7.26

Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume any obligation or liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, customer is responsible for determining whether products are appropriate for customer's use. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

**Scaling Calculations**

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	7.34	7.34	7.92
Langelier Saturation Index	-0.33	-0.33	1.81
Stiff & Davis Stability Index	0.35	0.35	1.80
Ionic Strength (Molal)	0.01	0.01	0.06
TDS (mg/l)	476.77	478.11	3160.29
HCO <sub>3</sub>	210.60	210.60	1373.10
CO <sub>2</sub>	15.74	15.74	20.70
CO <sub>3</sub>	0.26	0.26	12.82
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.89	0.89	18.39
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.17	0.17	49.82
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	6.95	6.95	44.32
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.02

To balance: 1.34 mg/l Na added to feed.

# Scenario RO2: Berekening bij Recovery 80% en temperatuur 11,5 °C

ROSA Detailed Report

Page 1 of 3

Reverse Osmosis System Analysis for FILMTEC™ Membranes  
 Project: RO2 Waternet Ontharding 20  
 Hans Huiting, KWR Watercycle Research Institute

ROSA 9.0.0 ConfigDB u399339\_282  
 Case: 1  
 6/8/2015

**Project Information:** Waternet Ontharding 2.0

**Case-specific:** RO ECO440i membranes T = 11.5 °C Recovery 80%

**System Details**

Feed Flow to Stage 1	492.54 m³/h	Pass 1 Permeate Flow	394.06 m³/h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	492.54 m³/h	Pass 1 Recovery	80.01 %	Feed	0.23 bar
Feed Pressure	9.16 bar	Feed Temperature	11.5 C	Concentrate	1.07 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	446.97 mg/l	Average	0.65 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	432	Average NDP	7.53 bar
Total Active Area	17658.43 M²	Average Pass 1 Flux	22.32 lmh	Power	156.75 kW
Water Classification: Surface Supply SDI < 3				Specific Energy	0.40 kWh/m³

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m³/h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m³/h)	Conc Flow (m³/h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m³/h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	ECO-440i	48	6	492.54	8.82	0.00	213.29	7.99	279.25	23.72	0.00	0.00	1.41
2	ECO-440i	24	6	213.29	7.65	0.00	98.48	6.94	114.81	19.50	0.00	0.00	4.04

Pass Streams (mg/l as Ion)							
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate		
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	0.01	0.01	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00
K	4.20	4.20	9.66	20.81	0.03	0.10	0.05
Na	43.90	47.02	108.36	233.99	0.16	0.61	0.29
Mg	10.80	10.80	24.92	53.91	0.01	0.05	0.03
Ca	67.60	67.60	155.99	337.47	0.09	0.33	0.16
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	0.24	0.24	1.41	6.56	0.00	0.00	0.00
HCO3	169.10	169.10	388.13	831.37	0.86	1.99	1.16
NO3	10.70	10.70	24.55	52.65	0.12	0.45	0.22
Cl	81.90	81.90	189.00	408.90	0.10	0.37	0.18
F	0.12	0.12	0.28	0.60	0.00	0.00	0.00
SO4	55.00	55.00	126.96	274.83	0.04	0.13	0.06
SiO2	0.28	0.28	0.65	1.40	0.00	0.00	0.00
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	11.05	11.04	11.54	13.55	10.88	11.90	11.20
TDS	443.86	446.97	1029.94	2222.54	1.41	4.04	2.15
pH	7.40	7.40	7.70	7.91	5.22	5.54	5.34

\*Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume any obligation or liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, customer is responsible for determining whether products are appropriate for customer's use. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

## ROSA Detailed Report

Page 2 of 3

Reverse Osmosis System Analysis for FILMTEC™ Membranes  
 Project: RO2 Waternet Ontharding 20  
 Hans Huiting, KWR Watercycle Research Institute

ROSA 9.0.0 ConfigDB u399339\_282  
 Case: 1  
 6/8/2015

**Design Warnings**

WARNING: Maximum element recovery has been exceeded. Please change your system design to reduce the element recoveries.  
 (Product: ECO-440i, Limit: 17.00%)

**Solubility Warnings**

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

**Stage Details**

Stage 1 Element Recovery		Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.10	1.02	1.05	10.26	446.97	8.82
2	0.11	1.00	1.13	9.24	496.27	8.62
3	0.12	0.98	1.25	8.24	556.20	8.45
4	0.13	0.96	1.42	7.27	630.76	8.31
5	0.15	0.94	1.67	6.31	726.26	8.18
6	0.17	0.92	2.04	5.37	853.14	8.08
Stage 2 Element Recovery		Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.10	0.87	2.44	8.89	1029.94	7.65
2	0.11	0.84	2.86	8.02	1141.22	7.48
3	0.11	0.81	3.41	7.18	1274.63	7.34
4	0.12	0.79	4.17	6.36	1437.10	7.21
5	0.14	0.75	5.24	5.58	1638.47	7.11
6	0.15	0.72	6.80	4.82	1893.13	7.02

Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume any obligation or liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, customer is responsible for determining whether products are appropriate for customer's use. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

**Scaling Calculations**

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	7.40	7.40	7.91
Langelier Saturation Index	-0.42	-0.42	1.41
Stiff & Davis Stability Index	0.27	0.27	1.53
Ionic Strength (Molal)	0.01	0.01	0.05
TDS (mg/l)	443.86	446.97	2222.54
HCO <sub>3</sub>	169.10	169.10	831.37
CO <sub>2</sub>	11.05	11.05	13.55
CO <sub>3</sub>	0.24	0.24	6.56
CaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.95	0.95	13.41
BaSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub> (% Saturation)	0.13	0.13	16.00
SiO <sub>2</sub> (% Saturation)	0.29	0.29	1.38
Mg(OH) <sub>2</sub> (% Saturation)	0.00	0.00	0.01

To balance: 3.12 mg/l Na added to feed.

# Bijlage V Genesys MM4 projectie

## Scenario RO1: Berekening bij Recovery 80% en temperatuur 11,5 °C

# MM4 Report

### User & Plant Details

Project Name / Reference: Ontharding 2.0  
 Contact Name: Leon Kors  
 Company: Waternet  
 Date: 1 juni 2015  
 Report Author: Hans Huiting (KWR)  
 Contact Number:  
 Email Address:

### Water and Membrane Details

Water Type: Brackish Water  
 Membrane Manufacturer: Dow  
 Membrane Type: FilmTec XLE-440  
 Average Salt Passage: 1.0 %

Recommended Product GENESYS LF

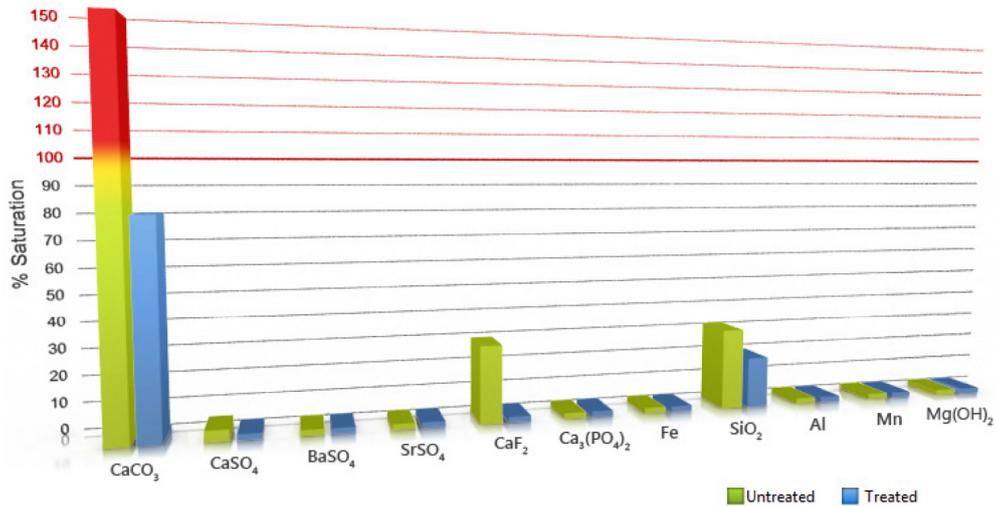
### Dosing Data

For Scale Control - Feed: 2.01 mg/l  
 For Iron Control - Feed: 0.00 mg/l  
 Total Dosage: 2.01 mg/l  
 Dose In Concentrate: 10.04 mg/l  
 Set Dosing Pump To: 743.56 ml/hr  
 Daily Requirement: 17.85 l/day

### Acid Dosing

Acid dosing is not required.

### Saturation Graph



### Scaling Indices

	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	BaSO <sub>4</sub>	SrSO <sub>4</sub>	CaF <sub>2</sub>	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Fe(OH) <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al(OH) <sub>3</sub>	Mn(OH) <sub>2</sub>	Mg(OH) <sub>2</sub>
Conc. Untreated	155.16	4.31	0.00	0.00	27.06	0.00	0.00	29.65	0.00	0.00	0.03
Conc. Treat.	80.26	1.54	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	19.77	0.00	0.00	0.00

# MM4 Report

## Water Analysis Data

Component	Feed Water mg/l	Concentrate mg/l
Ca <sup>2+</sup>	76.40	378.18
Mg <sup>2+</sup>	10.00	49.50
Na <sup>+</sup>	42.80	211.86
K <sup>+</sup>	3.80	18.81
Ba <sup>2+</sup>	0.00	0.00
Sr <sup>2+</sup>	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.00
Al <sup>3+</sup>	0.00	0.00
Mn <sup>2+</sup>	0.00	0.00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	45.50	225.22
Cl <sup>-</sup>	76.90	380.66
F <sup>-</sup>	0.13	0.64
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	210.20	1040.50
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.24	1.20
CO <sub>2</sub>	13.38	13.38
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.70	18.32
SiO <sub>2</sub>	6.81	33.71
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.00	0.00

## Operation Details

Permeate Flow	394.0 m <sup>3</sup> /hr
Recovery Rate	80.0 %
Feed Flow	492.5 m <sup>3</sup> /hr
Concentration Factor	5.00
Concentrate Flow	98.5 m <sup>3</sup> /hr
pH Raw Water	7.3
pH Feed Water	7.3
Operating Pressure	10.0 Bar
Operating Temperature	11.5 °C
Operating Time	24.0 hr/day

## Water Indices

Index	Feed Water	Concentrate
pH	7.34	7.97
TDS	476.64	2359.37
Ionic Strength (I)	0.01	0.05
LSI	-0.36	1.65
Alkalinity ppm CaCO <sub>3</sub>	172.74	855.45

## Scaling Indices Feed

Scalant Type	Feed Water Untreated (%)	Feed Water Treated (%)
CaCO <sub>3</sub>	87.87	45.45
CaSO <sub>4</sub>	0.22	0.08
BaSO <sub>4</sub>	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub>	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub>	0.22	0.00
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.00	0.00
Fe(OH) <sub>3</sub>	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub>	6.91	4.61
Al(OH) <sub>3</sub>	0.00	0.00
Mn(OH) <sub>2</sub>	0.00	0.00
Mg(OH) <sub>2</sub>	0.00	0.00

## Scaling Indices Concentrate

Scalant Type	Concentrate Untreated (%)	Concentrate Treated (%)
CaCO <sub>3</sub>	155.16	80.26
CaSO <sub>4</sub>	4.31	1.54
BaSO <sub>4</sub>	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub>	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub>	27.06	0.19
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.00	0.00
Fe(OH) <sub>3</sub>	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub>	29.65	19.77
Al(OH) <sub>3</sub>	0.00	0.00
Mn(OH) <sub>2</sub>	0.00	0.00
Mg(OH) <sub>2</sub>	0.03	0.00

The data used in Genesys Membrane Master 4 is provided in good faith.  
The system operation is outside our control and we accept no product liability for consequential results

MM4 Software Version: v1.23 (DLL v1.8.7)  
Report generated at 11:30:36 on 11/11/2015

## Scenario RO1: Berekening bij Recovery 85% en temperatuur 11,5 °C

# MM4 Report

### User & Plant Details

Project Name / Ontharding 2.0  
 Reference  
 Contact Name Leon Kors  
 Company Waternet  
 Date 1 juni 2015  
 Report Author Hans Huiting (KWR)  
 Contact Number  
 Email Address

### Water and Membrane Details

Water Type Brackish Water  
 Membrane Manufacturer Dow  
 Membrane Type FilmTec XLE-440  
 Average Salt Passage 1.0 %

Recommended Product **GENESYS LF**

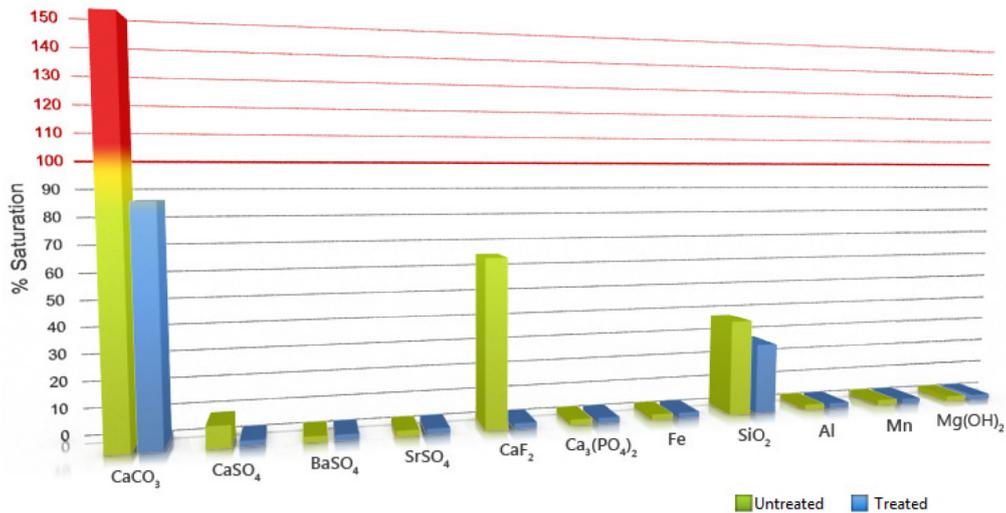
### Dosing Data

For Scale Control - Feed 1.67 mg/l  
 For Iron Control - Feed 0.00 mg/l  
 Total Dosage 1.67 mg/l  
 Dose In Concentrate 11.15 mg/l  
 Set Dosing Pump To 582.90 ml/hr  
 Daily Requirement 13.99 l/day

### Acid Dosing

Acid dosing is not required.

### Saturation Graph



### Scaling Indices

	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	BaSO <sub>4</sub>	SrSO <sub>4</sub>	CaF <sub>2</sub>	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Fe(OH) <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al(OH) <sub>3</sub>	Mn(OH) <sub>2</sub>	Mg(OH) <sub>2</sub>
Conc. Untreated	167.04	7.11	0.00	0.00	64.15	0.00	0.00	37.97	0.00	0.00	0.07
Conc. Treat.	86.40	2.54	0.00	0.00	0.46	0.00	0.00	25.31	0.00	0.00	0.00

# MM4 Report

## Water Analysis Data

Component	Feed Water mg/l	Concentrate mg/l
Ca <sup>2+</sup>	76.40	504.24
Mg <sup>2+</sup>	10.00	66.00
Na <sup>+</sup>	42.80	282.48
K <sup>+</sup>	3.80	25.08
Ba <sup>2+</sup>	0.00	0.00
Sr <sup>2+</sup>	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.00
Al <sup>3+</sup>	0.00	0.00
Mn <sup>2+</sup>	0.00	0.00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	45.50	300.30
Cl <sup>-</sup>	76.90	507.54
F <sup>-</sup>	0.13	0.86
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	210.20	1387.34
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.24	1.60
CO <sub>2</sub>	13.38	13.38
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.70	24.42
SiO <sub>2</sub>	6.81	44.95
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.00	0.00

## Operation Details

Permeate Flow	394.0 m <sup>3</sup> /hr
Recovery Rate	85.0 %
Feed Flow	463.5 m <sup>3</sup> /hr
Concentration Factor	6.67
Concentrate Flow	69.5 m <sup>3</sup> /hr
pH Raw Water	7.3
pH Feed Water	7.3
Operating Pressure	10.0 Bar
Operating Temperature	11.5 °C
Operating Time	24.0 hr/day

## Water Indices

Index	Feed Water	Concentrate
pH	7.34	8.08
TDS	476.64	3145.82
Ionic Strength (I)	0.01	0.06
LSI	-0.36	2.01
Alkalinity ppm CaCO <sub>3</sub>	172.74	1140.60

## Scaling Indices Feed

Scalant Type	Feed Water Untreated (%)	Feed Water Treated (%)
CaCO <sub>3</sub>	87.87	45.45
CaSO <sub>4</sub>	0.22	0.08
BaSO <sub>4</sub>	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub>	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub>	0.22	0.00
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.00	0.00
Fe(OH) <sub>3</sub>	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub>	6.91	4.61
Al(OH) <sub>3</sub>	0.00	0.00
Mn(OH) <sub>2</sub>	0.00	0.00
Mg(OH) <sub>2</sub>	0.00	0.00

## Scaling Indices Concentrate

Scalant Type	Concentrate Untreated (%)	Concentrate Treated (%)
CaCO <sub>3</sub>	<b>167.04</b>	86.40
CaSO <sub>4</sub>	7.11	2.54
BaSO <sub>4</sub>	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub>	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub>	64.15	0.46
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.00	0.00
Fe(OH) <sub>3</sub>	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub>	37.97	25.31
Al(OH) <sub>3</sub>	0.00	0.00
Mn(OH) <sub>2</sub>	0.00	0.00
Mg(OH) <sub>2</sub>	0.07	0.00

The data used in Genesys Membrane Master 4 is provided in good faith.  
The system operation is outside our control and we accept no product liability for consequential results

MM4 Software Version: v1.23 (DLL v1.8.7)  
Report generated at 15:13:35 on 11/11/2015

## Scenario RO2: Berekening bij Recovery 80% en temperatuur 11,5 °C

# MM4 Report

### User & Plant Details

Project Name / Ontharding 2.0  
 Reference  
 Contact Name Leon Kors  
 Company Waternet  
 Date 1 juni 2015  
 Report Author Hans Huiting (KWR)  
 Contact Number  
 Email Address

### Water and Membrane Details

Water Type Brackish Water  
 Membrane Manufacturer Dow  
 Membrane Type FilmTec XLE-440  
 Average Salt Passage 1.0 %

Recommended Product GENESYS LF

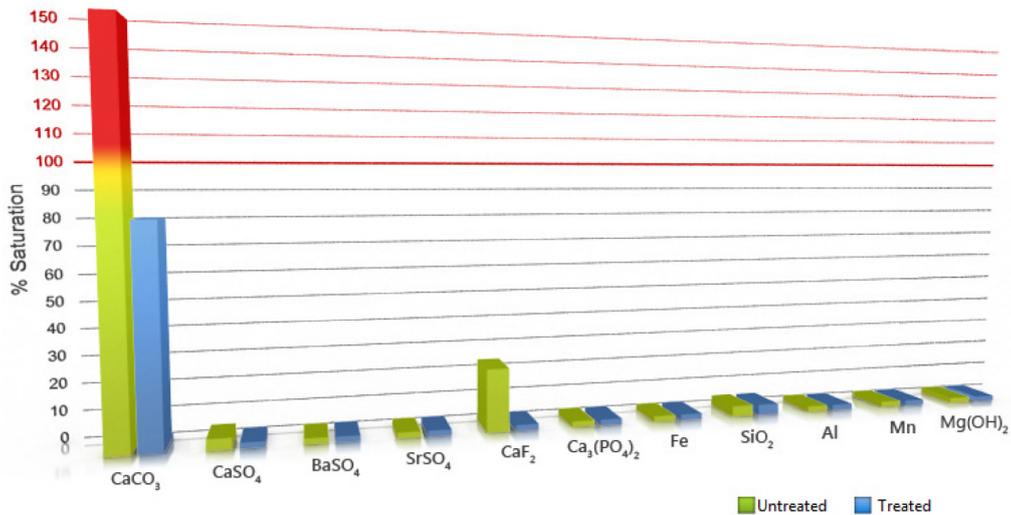
### Dosing Data

For Scale Control - Feed 1.98 mg/l  
 For Iron Control - Feed 0.00 mg/l  
 Total Dosage 1.98 mg/l  
 Dose In Concentrate 9.90 mg/l  
 Set Dosing Pump To 733.20 ml/hr  
 Daily Requirement 17.60 l/day

### Acid Dosing

Acid dosing is not required.

### Saturation Graph



### Scaling Indices

	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	BaSO <sub>4</sub>	SrSO <sub>4</sub>	CaF <sub>2</sub>	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Fe(OH) <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al(OH) <sub>3</sub>	Mn(OH) <sub>2</sub>	Mg(OH) <sub>2</sub>
Conc. Untreated	153.62	4.68	0.00	0.00	20.40	0.00	0.00	1.17	0.00	0.00	0.06
Conc. Treat.	79.46	1.67	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.78	0.00	0.00	0.00

# MM4 Report

## Water Analysis Data

Component	Feed Water mg/l	Concentrate mg/l
Ca <sup>2+</sup>	67.60	334.62
Mg <sup>2+</sup>	10.80	53.46
Na <sup>+</sup>	43.90	217.31
K <sup>+</sup>	4.20	20.79
Ba <sup>2+</sup>	0.00	0.00
Sr <sup>2+</sup>	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.00
Al <sup>3+</sup>	0.00	0.00
Mn <sup>2+</sup>	0.00	0.00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	55.00	272.25
Cl <sup>-</sup>	81.90	405.41
F <sup>-</sup>	0.12	0.59
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	168.66	834.85
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.24	1.20
CO <sub>2</sub>	8.56	8.56
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10.70	52.96
SiO <sub>2</sub>	0.28	1.39
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.00	0.00

## Operation Details

Permeate Flow	394.0 m <sup>3</sup> /hr
Recovery Rate	80.0 %
Feed Flow	492.5 m <sup>3</sup> /hr
Concentration Factor	5.00
Concentrate Flow	98.5 m <sup>3</sup> /hr
pH Raw Water	7.4
pH Feed Water	7.4
Operating Pressure	10.0 Bar
Operating Temperature	11.5 °C
Operating Time	24.0 hr/day

## Water Indices

Index	Feed Water	Concentrate
pH	7.44	8.07
TDS	443.60	2195.82
Ionic Strength (l)	0.01	0.04
LSI	-0.41	1.61
Alkalinity ppm CaCO <sub>3</sub>	138.71	686.80

## Scaling Indices Feed

Scalant Type	Feed Water Untreated (%)	Feed Water Treated (%)
CaCO <sub>3</sub>	86.26	44.62
CaSO <sub>4</sub>	0.23	0.08
BaSO <sub>4</sub>	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub>	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub>	0.17	0.00
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.00	0.00
Fe(OH) <sub>3</sub>	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub>	0.28	0.19
Al(OH) <sub>3</sub>	0.00	0.00
Mn(OH) <sub>2</sub>	0.00	0.00
Mg(OH) <sub>2</sub>	0.00	0.00

## Scaling Indices Concentrate

Scalant Type	Concentrate Untreated (%)	Concentrate Treated (%)
CaCO <sub>3</sub>	153.62	79.46
CaSO <sub>4</sub>	4.68	1.67
BaSO <sub>4</sub>	0.00	0.00
SrSO <sub>4</sub>	0.00	0.00
CaF <sub>2</sub>	20.40	0.15
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.00	0.00
Fe(OH) <sub>3</sub>	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub>	1.17	0.78
Al(OH) <sub>3</sub>	0.00	0.00
Mn(OH) <sub>2</sub>	0.00	0.00
Mg(OH) <sub>2</sub>	0.06	0.00

The data used in Genesys Membrane Master 4 is provided in good faith.  
The system operation is outside our control and we accept no product liability for consequential results

MM4 Software Version: v1.23 (DLL v1.8.7)  
Report generated at 11:58:22 on 11/11/2015

## Bijlage VI Tabellen Data Zware Metalen bij Kalkmelk Scenario

De maximaal toelaatbare concentraties van verschillende metalen in mg/kg droog product  $\text{Ca(OH)}_2$  en CaO zijn in onderstaande tabel (Tabel 38) weergegeven.

TABEL 38: MAXIMAAL TOELAATBARE CONCENTRATIES VAN METALEN IN  $\text{Ca(OH)}_2$  EN CAO  
([HTTP://WETTEN.OVERHEID.NL/BWBR0030279/VOLLEDIG/GELDIGHEIDSDATUM\\_10-11-2015#OPSCHRIFT](http://wetten.overheid.nl/BWBR0030279/VOLLEDIG/GELDIGHEIDSDATUM_10-11-2015#OPSCHRIFT)).

.	$\text{CaCO}_3$	$\text{Ca(OH)}_2$	CaO
Antimoon	3 mg/kg	4 mg/kg	4 mg/kg
Arseen	3 mg/kg	5 mg/kg	5 mg/kg
Cadmium	2 mg/kg	2 mg/kg	2 mg/kg
Chroom	10 mg/kg	20 mg/kg	20 mg/kg
Kwik	0,5 mg/kg	0,3 mg/kg	0,3 mg/kg
Lood	10 mg/kg	20 mg/kg	20 mg/kg
Nikkel	10 mg/kg	20 mg/kg	20 mg/kg
Seleen	5 mg/kg	4 mg/kg	4 mg/kg

Door de concentratie zware metalen in water te variëren, kan bepaald worden bij welke overdrachtsfracties de maximale toelaatbare concentraties in CaO en  $\text{Ca(OH)}_2$  worden gehaald. De concentratie in water is hiervoor gevarieerd van 0,0001, 0,001 en 0,002  $\mu\text{g/L}$ . De maximaal toegestane overdrachtsfactor is in de onderstaande tabellen geel gemarkeerd.

TABEL 39: CONCENTRATIES ZWARE METALEN IN CAO BIJ EEN CONCENTRATIE 0,0001 MG/L ZWARE METALEN IN WATER. DE NORM VOOR KWIK (0,3 MG/KG) WORDT GEHAALD BIJ  $X < 0,3$ .

Overdracht zware metalen uit korrel naar	X	Overdracht zware metalen uit water naar korrel										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Y	0	0,000	0,103	0,218	0,346	0,490	0,654	0,840	1,056	1,307	1,604	1,961
	0,1	0,000	0,103	0,217	0,345	0,489	0,653	0,839	1,055	1,306	1,604	1,961
	0,2	0,000	0,103	0,217	0,345	0,488	0,652	0,838	1,053	1,305	1,603	1,961
	0,3	0,000	0,102	0,216	0,344	0,488	0,650	0,837	1,052	1,304	1,602	1,961
	0,4	0,000	0,102	0,216	0,343	0,487	0,649	0,836	1,051	1,303	1,601	1,961
	0,5	0,000	0,102	0,216	0,343	0,486	0,648	0,835	1,050	1,302	1,601	1,961
	0,6	0,000	0,102	0,215	0,342	0,485	0,647	0,833	1,049	1,301	1,600	1,961
	0,7	0,000	0,102	0,215	0,341	0,484	0,646	0,832	1,048	1,300	1,599	1,961
	0,8	0,000	0,101	0,214	0,341	0,483	0,645	0,831	1,047	1,299	1,599	1,961
	0,9	0,000	0,101	0,214	0,340	0,482	0,644	0,830	1,045	1,298	1,598	1,961
	1	0,000	0,101	0,213	0,339	0,482	0,643	0,829	1,044	1,297	1,597	1,961

TABEL 40: CONCENTRATIES ZWARE METALEN IN  $Ca(OH)_2$  BIJ EEN CONCENTRATIE 0,0001 MG/L ZWARE METALEN IN WATER. DE NORM VOOR KWIK (0,3 MG/KG) WORDT GEHAALD BIJ  $X < 0,4$ .

Overdracht zware metalen uit water naar water	X	Overdracht zware metalen uit water naar korrel										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Y												
0	0,000	0,078	0,165	0,262	0,371	0,494	0,636	0,799	0,989	1,214	1,483	
0,1	0,000	0,078	0,164	0,261	0,370	0,494	0,635	0,798	0,988	1,213	1,483	
0,2	0,000	0,078	0,164	0,261	0,370	0,493	0,634	0,797	0,987	1,213	1,483	
0,3	0,000	0,078	0,164	0,260	0,369	0,492	0,633	0,796	0,987	1,212	1,483	
0,4	0,000	0,077	0,163	0,260	0,368	0,491	0,632	0,795	0,986	1,212	1,483	
0,5	0,000	0,077	0,163	0,259	0,368	0,491	0,631	0,794	0,985	1,211	1,483	
0,6	0,000	0,077	0,163	0,259	0,367	0,490	0,631	0,793	0,984	1,211	1,483	
0,7	0,000	0,077	0,162	0,258	0,366	0,489	0,630	0,793	0,983	1,210	1,483	
0,8	0,000	0,077	0,162	0,258	0,366	0,488	0,629	0,792	0,983	1,209	1,483	
0,9	0,000	0,077	0,162	0,257	0,365	0,487	0,628	0,791	0,982	1,209	1,483	
1	0,000	0,076	0,161	0,257	0,364	0,487	0,627	0,790	0,981	1,208	1,483	

TABEL 41: CONCENTRATIES ZWARE METALEN IN  $CaCO_3$  BIJ EEN CONCENTRATIE 0,0001 MG/L ZWARE METALEN IN WATER. DE NORM VOOR KWIK (0,5 MG/KG) WORDT GEHAALD BIJ  $X < 0,7$ .

Overdracht zware metalen uit water naar water	X	Overdracht zware metalen uit water naar korrel										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Y												
0	0,000	0,0578	0,1220	0,1938	0,2745	0,3660	0,4706	0,5913	0,7320	0,8984	1,0980	
0,1	0,000	0,0577	0,1217	0,1934	0,2740	0,3654	0,4699	0,5906	0,7314	0,8980	1,0980	
0,2	0,000	0,0575	0,1215	0,1930	0,2735	0,3648	0,4693	0,5899	0,7309	0,8976	1,0980	
0,3	0,000	0,0574	0,1212	0,1926	0,2730	0,3643	0,4687	0,5893	0,7303	0,8972	1,0980	
0,4	0,000	0,0573	0,1210	0,1922	0,2725	0,3637	0,4680	0,5886	0,7297	0,8968	1,0980	
0,5	0,000	0,0571	0,1207	0,1919	0,2721	0,3631	0,4674	0,5880	0,7291	0,8964	1,0980	
0,6	0,000	0,0570	0,1205	0,1915	0,2716	0,3625	0,4667	0,5873	0,7285	0,8960	1,0980	
0,7	0,000	0,0569	0,1202	0,1911	0,2711	0,3620	0,4661	0,5867	0,7279	0,8957	1,0980	
0,8	0,000	0,0568	0,1200	0,1908	0,2706	0,3614	0,4655	0,5861	0,7274	0,8953	1,0980	
0,9	0,000	0,0566	0,1197	0,1904	0,2701	0,3608	0,4648	0,5854	0,7268	0,8949	1,0980	
1	0,000	0,0565	0,1195	0,1900	0,2696	0,3602	0,4642	0,5848	0,7262	0,8945	1,0980	

TABEL 42: CONCENTRATIES ZWARE METALEN IN CAO BIJ EEN CONCENTRATIE 0,001 MG/L ZWARE METALEN IN WATER. DE FRACTIES WAARBIJ DE NORM VOOR 2, 4 EN 5 MG/KG ZIJN WEERGEGEVEN MIDDELS ARCKERING.

Overdracht zware metalen uit korrel naar water	X	Overdracht zware metalen uit water naar korrel										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Y												
0	0,000	0,000	1,032	2,179	3,460	4,902	6,536	8,403	10,558	13,072	16,043	19,608
0,1	0,000	0,000	1,030	2,174	3,453	4,893	6,526	8,392	10,546	13,061	16,036	19,608
0,2	0,000	0,000	1,027	2,169	3,447	4,884	6,515	8,380	10,535	13,051	16,029	19,608
0,3	0,000	0,000	1,025	2,165	3,440	4,876	6,505	8,369	10,523	13,041	16,022	19,608
0,4	0,000	0,000	1,023	2,160	3,433	4,867	6,494	8,357	10,511	13,030	16,015	19,608
0,5	0,000	0,000	1,020	2,156	3,426	4,858	6,484	8,346	10,500	13,020	16,008	19,608
0,6	0,000	0,000	1,018	2,151	3,420	4,850	6,474	8,335	10,488	13,009	16,001	19,608
0,7	0,000	0,000	1,016	2,147	3,413	4,841	6,463	8,323	10,477	12,999	15,994	19,608
0,8	0,000	0,000	1,014	2,142	3,406	4,832	6,453	8,312	10,465	12,989	15,987	19,608
0,9	0,000	0,000	1,011	2,138	3,400	4,824	6,443	8,301	10,454	12,978	15,980	19,608
1	0,000	0,000	1,009	2,133	3,393	4,815	6,433	8,289	10,442	12,968	15,973	19,608

TABEL 43: CONCENTRATIES ZWARE METALEN IN CA(OH)<sub>2</sub> BIJ EEN CONCENTRATIE 0,001 MG/L ZWARE METALEN IN WATER. DE FRACTIES WAARBIJ DE NORM VOOR 2, 4 EN 5 MG/KG ZIJN WEERGEGEVEN MIDDELS ARCKERING.

Overdracht zware metalen uit korrel naar water	X	Overdracht zware metalen uit water naar korrel										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Y												
0	0,000	0,000	0,7808	1,6483	2,6178	3,7086	4,9448	6,3576	7,9877	9,8896	12,1372	14,8344
0,1	0,000	0,000	0,7790	1,6447	2,6127	3,7019	4,9369	6,3489	7,9789	9,8817	12,1319	14,8344
0,2	0,000	0,000	0,7772	1,6412	2,6075	3,6953	4,9290	6,3402	7,9701	9,8738	12,1266	14,8344
0,3	0,000	0,000	0,7755	1,6378	2,6024	3,6886	4,9211	6,3315	7,9612	9,8659	12,1213	14,8344
0,4	0,000	0,000	0,7737	1,6343	2,5973	3,6820	4,9133	6,3228	7,9524	9,8580	12,1160	14,8344
0,5	0,000	0,000	0,7720	1,6308	2,5922	3,6755	4,9055	6,3142	7,9437	9,8501	12,1107	14,8344
0,6	0,000	0,000	0,7702	1,6274	2,5871	3,6689	4,8977	6,3056	7,9349	9,8423	12,1055	14,8344
0,7	0,000	0,000	0,7685	1,6240	2,5820	3,6624	4,8899	6,2970	7,9262	9,8344	12,1002	14,8344
0,8	0,000	0,000	0,7668	1,6206	2,5770	3,6558	4,8822	6,2885	7,9174	9,8266	12,0949	14,8344
0,9	0,000	0,000	0,7651	1,6172	2,5720	3,6494	4,8745	6,2799	7,9087	9,8188	12,0896	14,8344
1	0,000	0,000	0,7634	1,6138	2,5670	3,6429	4,8668	6,2714	7,9001	9,8109	12,0844	14,8344

TABEL 44: CONCENTRATIES ZWARE METALEN IN  $\text{CaCO}_3$  BIJ EEN CONCENTRATIE 0,001 MG/L ZWARE METALEN IN WATER. DE FRACTIES WAARBIJ DE NORM VOOR 0,5, 2, 3 EN 5 MG/KG ZIJN WEERGEGEVEN MIDDELS ARCERING.

Overdracht zware metalen uit korrel naar water	X	Overdracht zware metalen uit water naar korrel										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Y												
0	0,000	0,578	1,220	1,938	2,745	3,660	4,706	5,913	7,320	8,984	10,980	
0,1	0,000	0,577	1,217	1,934	2,740	3,654	4,699	5,906	7,314	8,980	10,980	
0,2	0,000	0,575	1,215	1,930	2,735	3,648	4,693	5,899	7,309	8,976	10,980	
0,3	0,000	0,574	1,212	1,926	2,730	3,643	4,687	5,893	7,303	8,972	10,980	
0,4	0,000	0,573	1,210	1,922	2,725	3,637	4,680	5,886	7,297	8,968	10,980	
0,5	0,000	0,571	1,207	1,919	2,721	3,631	4,674	5,880	7,291	8,964	10,980	
0,6	0,000	0,570	1,205	1,915	2,716	3,625	4,667	5,873	7,285	8,960	10,980	
0,7	0,000	0,569	1,202	1,911	2,711	3,620	4,661	5,867	7,279	8,957	10,980	
0,8	0,000	0,568	1,200	1,908	2,706	3,614	4,655	5,861	7,274	8,953	10,980	
0,9	0,000	0,566	1,197	1,904	2,701	3,608	4,648	5,854	7,268	8,949	10,980	
1	0,000	0,565	1,195	1,900	2,696	3,602	4,642	5,848	7,262	8,945	10,980	

TABEL 45: CONCENTRATIES ZWARE METALEN IN CAO BIJ EEN CONCENTRATIE 0,002 MG/L ZWARE METALEN IN WATER. DE FRACTIES WAARBIJ DE NORM VOOR 2, 4, 5 EN 20 MG/KG ZIJN WEERGEGEVEN.

Overdracht zware metalen uit korrel naar water	X	Overdracht zware metalen uit water naar korrel										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Y												
0	0,000	2,064	4,357	6,920	9,804	13,072	16,807	21,116	26,144	32,086	39,216	
0,1	0,000	2,059	4,348	6,907	9,786	13,051	16,784	21,093	26,123	32,072	39,216	
0,2	0,000	2,055	4,339	6,893	9,769	13,030	16,761	21,069	26,102	32,058	39,216	
0,3	0,000	2,050	4,330	6,880	9,751	13,009	16,738	21,046	26,081	32,044	39,216	
0,4	0,000	2,045	4,320	6,866	9,734	12,989	16,715	21,023	26,060	32,030	39,216	
0,5	0,000	2,041	4,311	6,853	9,716	12,968	16,692	21,000	26,040	32,016	39,216	
0,6	0,000	2,036	4,302	6,839	9,699	12,947	16,669	20,977	26,019	32,002	39,216	
0,7	0,000	2,032	4,293	6,826	9,682	12,927	16,647	20,953	25,998	31,988	39,216	
0,8	0,000	2,027	4,284	6,813	9,665	12,906	16,624	20,930	25,977	31,974	39,216	
0,9	0,000	2,023	4,275	6,799	9,647	12,886	16,601	20,907	25,957	31,960	39,216	
1	0,000	2,018	4,266	6,786	9,630	12,866	16,579	20,884	25,936	31,946	39,216	

TABEL 46: CONCENTRATIES ZWARE METALEN IN  $Ca(OH)_2$  BIJ EEN CONCENTRATIE 0,002 MG/L ZWARE METALEN IN WATER. DE FRACTIES WAARBIJ DE NORM VOOR 2, 4, 5 EN 20 MG/KG ZIJN WEERGEGEVEN.

Overdracht zware metalen uit korrel naar water	X	Overdracht zware metalen uit water naar korrel										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Y												
0	0,000	0,000	1,562	3,297	5,236	7,417	9,890	12,715	15,975	19,779	24,274	29,669
0,1	0,000	0,000	1,558	3,289	5,225	7,404	9,874	12,698	15,958	19,763	24,264	29,669
0,2	0,000	0,000	1,554	3,282	5,215	7,391	9,858	12,680	15,940	19,748	24,253	29,669
0,3	0,000	0,000	1,551	3,276	5,205	7,377	9,842	12,663	15,922	19,732	24,243	29,669
0,4	0,000	0,000	1,547	3,269	5,195	7,364	9,827	12,646	15,905	19,716	24,232	29,669
0,5	0,000	0,000	1,544	3,262	5,184	7,351	9,811	12,628	15,887	19,700	24,221	29,669
0,6	0,000	0,000	1,540	3,255	5,174	7,338	9,795	12,611	15,870	19,685	24,211	29,669
0,7	0,000	0,000	1,537	3,248	5,164	7,325	9,780	12,594	15,852	19,669	24,200	29,669
0,8	0,000	0,000	1,534	3,241	5,154	7,312	9,764	12,577	15,835	19,653	24,190	29,669
0,9	0,000	0,000	1,530	3,234	5,144	7,299	9,749	12,560	15,817	19,638	24,179	29,669
1	0,000	0,000	1,527	3,228	5,134	7,286	9,734	12,543	15,800	19,622	24,169	29,669

TABEL 47: CONCENTRATIES ZWARE METALEN IN  $CaCO_3$  BIJ EEN CONCENTRATIE 0,002 MG/L ZWARE METALEN IN WATER. DE FRACTIES WAARBIJ DE NORM VOOR 2, 3, 5 EN 10 MG/KG ZIJN WEERGEGEVEN.

Overdracht zware metalen uit korrel naar water	X	Overdracht zware metalen uit water naar korrel										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Y												
0	0,000	0,000	1,156	2,440	3,875	5,490	7,320	9,412	11,825	14,641	17,968	21,961
0,1	0,000	0,000	1,153	2,435	3,868	5,480	7,309	9,399	11,812	14,629	17,960	21,961
0,2	0,000	0,000	1,151	2,430	3,860	5,470	7,297	9,386	11,799	14,617	17,952	21,961
0,3	0,000	0,000	1,148	2,425	3,853	5,461	7,285	9,373	11,786	14,605	17,944	21,961
0,4	0,000	0,000	1,145	2,419	3,845	5,451	7,274	9,360	11,773	14,594	17,937	21,961
0,5	0,000	0,000	1,143	2,414	3,837	5,441	7,262	9,348	11,760	14,582	17,929	21,961
0,6	0,000	0,000	1,140	2,409	3,830	5,431	7,251	9,335	11,747	14,571	17,921	21,961
0,7	0,000	0,000	1,138	2,404	3,822	5,422	7,239	9,322	11,734	14,559	17,913	21,961
0,8	0,000	0,000	1,135	2,399	3,815	5,412	7,228	9,309	11,721	14,547	17,905	21,961
0,9	0,000	0,000	1,133	2,394	3,808	5,403	7,216	9,297	11,708	14,536	17,898	21,961
1	0,000	0,000	1,130	2,389	3,800	5,393	7,205	9,284	11,695	14,524	17,890	21,961

# Bijlage VII Berekening Total Cost of Ownership

## Inleiding

Waternet heeft de ambitie om op productiebedrijf Leiduin een duurzamere ontharding te realiseren. De opties om duurzaamheid te bereiken moeten echter ook kosteneffectief zijn. Om een goede afweging van de kosteneffectiviteit te maken, zijn de opties beoordeeld op Total Cost of Ownership.

Om de TCO te berekenen is een speciale spreadsheet ontwikkeld. In deze spreadsheet dient eerst een aantal basisuitgangspunten te worden gedefinieerd, vervolgens kan worden ingevoerd welke investeringen gedaan moeten worden, kan worden ingevoerd welke bedrijfsvoeringskosten worden verwacht en welke (periodieke) onderhoudskosten worden verwacht.

Vervolgens worden de jaarlijkse kosten hieruit berekend. De kosten worden geïndexeerd. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen een algemene inflatiecorrectie en daarnaast een aparte indexering voor kosten voor gas en elektriciteit. Van de jaarlijkse kosten wordt vervolgens de contante waarde berekend en het geheel gesommeerd tot de TCO. Hieronder wordt de berekening in detail beschreven.

## Investeringen

De investeringen moeten worden gespecificeerd op twee tabbladen. De eerste groep gegevens die moeten worden ingevoerd, betreffen de afschrijftermijnen en de evaluatieperiode waarover de TCO moet worden berekend. Er kunnen vier verschillende afschrijftermijnen worden ingevuld voor verschillende onderdelen van de installatie. Op deze manier kan onderscheid gemaakt worden tussen civiele constructies, elektrotechniek, werktuigbouwkundige werken of onderdelen die op korte termijn worden afgeschreven. Figuur 24 toont het voorbeeld en de gebruikte standaardwaarden.

FIGUUR 24: INVOERVELD VOOR AFSCHRIJF- EN EVALUATIETERMIJNEN (TABBLAD "BASISGEGEVENS").

Algemeen			
Evaluatieperiode installatie		75	jaar
Afschrijftermijn 1 (civiel)		40	jaar
Afschrijftermijn 2 (WTB)		25	jaar
Afschrijftermijn 3 (elektra)		15	jaar
Afschrijftermijn 4 (kort)		5	jaar
Startjaar (Jaar 0)		2015	
Eindjaar		2090	

Van belang zijn ook de gebruikte rentes op de leningen (Figuur 25). Alle leningen (vreemd vermogen) worden annuïtair afgeschreven. Naast vreemd vermogen is het mogelijk om ook eigen vermogen in te brengen in de spreadsheet. Voor het eigen vermogen wordt gerekend met een percentage dat compenseert voor de gederfde rente op eigen vermogen.

FIGUUR 25: INVOERVELD RENTES OP EIGEN EN VREEMD VERMOGEN. OOK WORDT HIER HET BEDRAG VAN HET INGEBRACHT EIGEN VERMOGEN GESPECIFICEERD (TABBLAD "BASISGEGEVENS").

Financiering			
Inbreng eigen vermogen		€	0
Rente op eigen vermogen		0,00%	
Rente op vreemd vermogen		4,58%	

Op het tabblad "Stichtingskosten" kunnen vervolgens de werkelijke investeringskosten en voorbereidingskosten worden ingevoerd (Figuur 26). Op dit blad zijn vier invoervelden te vinden, die gekoppeld zijn aan de vier verschillende afschrijftermijnen. Verder kan worden aangegeven of een investering na de afschrijftermijn opnieuw moet worden gedaan, bijvoorbeeld voor vervangende onderdelen. Na afloop van elke afschrijftermijn wordt dan opnieuw het bedrag van de investering opgenomen, waarbij het bedrag geïndexeerd wordt met de algemene index.

Vorbereidingskosten worden ook bij de stichtingskosten meegeteld en komen terecht in jaar 0 (Figuur 27). Op de voorbereidingskosten wordt niet afgeschreven. Hier kunnen bijvoorbeeld kosten voor adviseurs of kosten voor vergunningaanvragen worden vermeld.

FIGUUR 26: INVOERVELD INVESTERINGSKOSTEN VOOR AFSCHRIJFTERMIJN 40 JAAR. OOK VOOR DE ANDERE AFSCHRIJFTERMIJNEN ZIJN VERGELIJKBARE INVOERVELDEN AANWEZIG (TABBLAD "STICHTINGSKOSTEN").

Investeringskosten		40 jaar					
Afschrijftermijn							
Omschrijving	Aantal	Eenheid	Prijs per eenheid	Totaal	Herinvestering?	2015	2055
Pelletsoftening	1	stuks	€ 3.340.000	€ 3.340.000	Ja	€ 3.340.000	€ 7.374.852
	1	stuks		€ -	Ja	€ -	€ -
	1	stuks		€ -	Ja	€ -	€ -
	1	stuks		€ -	Ja	€ -	€ -
Civiele deel van installaties				€ -		€ -	
				Af: Inzet Eigen Vermogen		€ -0	
<b>Totaal</b>						<b>€ 3.340.000</b>	<b>€ 7.374.852</b>

FIGUUR 27: INVOERVELD VOOR VOORBEREIDINGSKOSTEN (TABBLAD "STICHTINGSKOSTEN").

Vorbereidingskosten							
Geen Afschrijving							
Omschrijving	Aantal	Eenheid	Prijs per eenheid			Totaal	
Pelletsoftening	1	stuks	€ 3.230.000			€ 3.230.000	
	1	stuks				€ -	
	1	stuks				€ -	
	1	stuks				€ -	
Staartkosten conform RH/DHV						€ -	
<b>Totaal</b>						<b>€ 3.230.000</b>	

### Bedrijfsvoeringskosten

Bedrijfsvoeringskosten en kostenbesparingen kunnen worden gespecificeerd in tabblad "bedrijfsvoeringskosten". Bij bedrijfsvoering kan het jaarlijkse materiaalverbruik, energieverbruik en waterverbruik en de kosten per eenheid worden opgegeven (Figuur 28). De spreadsheet berekent vervolgens over alle jaren van de evaluatieperiode de geïndexeerde kosten uit. Ook de kostenbesparingen kunnen op deze manier worden ingevoerd (Figuur 29).

FIGUUR 28: INVOERVELD BEDRIJFSVOERINGSKOSTEN (TABBLAD "BEDRIJFSVOERING").

Bedrijfsvoering						0	1	2
						2015	2016	2017
Omschrijving	Aantal	Eenheid	Prijs per eenheid	Totaal				
Elektriciteit per jaar	20492668	kWh	€ 0,06	€ 1.229.560		€ 1.284.890	€ 1.342.710	
Verbruik Gas per jaar	0	m <sup>3</sup>	€ 0,43	€ -				
Verbruik Water per jaar	0	m <sup>3</sup>	€ 1,00	€ -				
FeCl3	556,2	ton/jaar	€ 109,00	40% € 151.554		€ 154.585	€ 157.676	
NaOH	4878,1	ton/jaar	€ 160,00	50% € 1.560.986		€ 1.592.205	€ 1.624.049	
Zuurstof	880,0	ton/jaar	€ 87,00	€ 76.560		€ 78.091	€ 79.653	
HCl	531,8	ton/jaar	€ 168,50	33% € 271.561		€ 276.992	€ 282.532	
GAC	110,1	ton/jaar	€ 999,00	€ 109.970		€ 112.169	€ 114.413	
Granaatzand	0,0	ton/jaar	€ 385,58	€ -				
Calciet	759,4	ton/jaar	€ 169,00	€ 128.331		€ 130.897	€ 133.515	
<b>Totaal</b>				<b>€ 3.528.521</b>		<b>€ 3.629.830</b>	<b>€ 3.734.549</b>	

FIGUUR 29: INVOERVELD KOSTENBESPARINGEN EN INKOMSTEN (TABBLAD "BEDRIJFSVOERING").

Kostenbesparing/Inkomsten						0	1	2
Omschrijving	Aantal	Eenheid	Prijs per eenheid	Totaal		2015	2016	2017
Verbruik Elektriciteit per jaar	0	kWh	€ 0,06	€ -				
Verbruik Gas per jaar	0	m <sup>3</sup>	€ 0,43	€ -				
Verbruik Water per jaar	0	m <sup>3</sup>	€ 1,00	€ -				
Verkoop Calciet	6074,8	ton/jaar	€ 5,20	€ -31.589		€ -32.221	€ -32.865	
		uur		€ -				
				€ -				
				€ -				
<b>Totaal</b>				<b>€ -31.589</b>		<b>€ -32.221</b>	<b>€ -32.865</b>	

Op het tabblad "basisgegevens" kunnen de kostprijzen worden ingevoerd voor water, energie en chemicaliën (zie Figuur 30)

FIGUUR 30: INVOERVELDEN WATER-, ENERGIE EN CHEMICALIËNPRIJZEN (TABBLAD "BASISGEGEVENS").

Water- en Energieprijs			
Gas		€ 0,430	/Nm <sup>3</sup>
Elektriciteit		€ 0,060	/kWh
Water		€ 1,00	/m <sup>3</sup>
Chemicaliënprijzen		Conc.	
FeCl <sub>3</sub>	40%	€ 109	/ton
NaOH	50%	€ 160	/ton
Zuurstof		€ 87	/ton
HCl	33%	€ 169	/ton
CO <sub>2</sub>	100%	€ 64	/ton
Antiscalant	100%	€ 6.000	/ton
GAC (verse)		€ 999	/ton
Calciet (italiaans)		€ 169	/ton
Calciet (verkoop)		€ 75	/ton
Granaatzand		€ 385,58	/ton
Pellets (zand ent)	lasten	€ 3,03	/ton
Pellets (calciet ent)	baten	€ 5,20	/ton

### Onderhoud

Onderhoud kan worden ingevoerd op het tabblad "Onderhoud". Dit tabblad bevat een invoerveld voor periodiek onderhoud (Figuur 31) en een voor incidenteel onderhoud. Dat laatste is natuurlijk in een ontwerptraject niet te voorspellen, maar kan gebruikt worden om de TCO voor een bestaande installatie actueel bij te houden.

Bijzonder aan het periodiek onderhoud is dat ook de cyclus moet worden ingevoerd. Indien de ingevulde waarde voor de cyclus hoger is dan 1, dan wordt de kosten voor de betreffende onderhoudsregel met een langere tussenperiodes ingevuld. Bijvoorbeeld als de cyclus op 3 staat, vind het onderhoud plaats in de jaren 1, 4, 7 enz.

Figuur 31: Invoerveld voor periodiek onderhoud (Tabblad "Onderhoud").

Periodiek onderhoud						1	2
Omschrijving	Aantal	Eenheid	Prijs per eenheid	Cyclus	Totaal	2016	2017
Onderhoud CIV	1	stuks	€ 16.700	1	€ 16.700	€ 17.034	€ 17.375
Onderhoud WTB	1	stuks	€ 79.400	1	€ 79.400	€ 80.988	€ 82.608
Onderhoud ELEC	1	stuks	€ 68.800	1	€ 68.800	€ 70.176	€ 71.580
Onderhoud Inrichting	1	stuks	€ 63.210	1	€ 63.210	€ 64.474	€ 65.764
				1	€ -		
				1	€ -		
				1	€ -		
<b>Totaal</b>					<b>€ 228.110</b>	<b>€ 232.672</b>	<b>€ 237.326</b>

## Overzicht

In het tabblad "Overzicht" worden vervolgens alle berekeningen samengebracht en wordt de TCO berekend.

FIGUUR 32: TOTALEN OVER GEHELE PERIODE EN BEREKENING TCO (TABBLAD "OVERZICHT")

Overzicht	TOTALEN OVER EVALUATIEPERIODE	Jaar	
		0 2015	1 2016
Vorbereidingskosten	€ 3.230.000	€ 3.230.000	
Kapitaalkosten	€ 81.371.951		€ 614.564
Onderhoudskosten	€ 39.738.498		€ 232.672
Bedrijfsvoeringskosten	€ 1.147.074.678		€ 3.629.830
<b>Totale kosten</b>	<b>€ 1.271.415.127</b>	<b>€ 3.230.000</b>	<b>€ 4.477.066</b>
Contante Waarde Kosten	€ 493.094.791	€ 3.230.000	€ 4.389.280
Kostenbesparing/Inkomsten	€ -5.503.059		€ -32.221
Contante Waarde Besparing/Inkomsten	€ -2.369.181		€ -31.589
Kosten+Baten	€ 1.265.912.068	€ 3.230.000	€ 4.444.845
<b>TCO</b>	<b>€ 490.725.610</b>	<b>€ 3.230.000</b>	<b>€ 4.357.691</b>

Totalen		
Vorbereidingskosten	3,2	m€
Kapitaalkosten	81,4	m€
Onderhoudskosten	39,7	m€
Bedrijfsvoeringskosten	1.147,1	m€
<b>Subtotaal Kosten</b>	<b>1.271,4</b>	<b>m€</b>
Besparing/Inkomsten	-5,5	m€
<b>Totaal</b>	<b>1.265,9</b>	<b>m€</b>

<b>TCO</b>	<b>490,7</b>	<b>m€</b>
------------	--------------	-----------