

BTO 2018.060 | Mei 2018

## **BTO** rapport

Circulaire afweging van  
alternatieve processen  
voor  
Coagulatie/flocculatie/  
sedimentatie



# BTO

## Circulaire afweging van alternatieve processen voor coagulatie/flocculatie/sedimentatie

BTO 2018.060 | Januari 2018

### Opdrachtnummer

401773

### Projectmanager

B.A. Wols

### Opdrachtgever

BTO - Speerpuntonderzoek

### Kwaliteitsborger

E.R. Cornelissen

### Auteurs

C.H.M. Hofman-Caris, T. van den Brand, H. Huiting, D.  
Vries

### Verzonden aan

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

**Jaar van publicatie**  
2018

**Meer informatie**  
dr.ir. Roberta Hofman-Caris  
T 030-6069674  
E [roberta.hofman-caris@kwrwater.nl](mailto:roberta.hofman-caris@kwrwater.nl)

**Keywords**

Postbus 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
F +31 (0)30 60 61 165  
E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)

**KWR** Watercycle  
Research  
Institute

BTO 2018.060 | Mei 2018 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

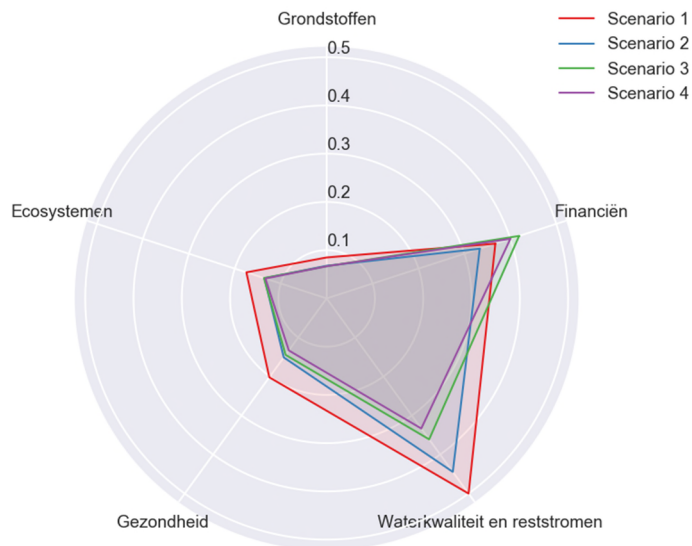
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

# BTO Managementsamenvatting

## Multicriteria-analyse wijst naar capillaire nanofiltratie als duurzamer alternatief voor coagulatie/flocculatie/sedimentatie in De Punt

**Auteurs** dr. ir. C.H.M. Hofman-Caris, dr. ir. T. van den Brand, Ing. H. Huiting, dr. ir. D. Vries

Bij het coagulatie//flocculatie/sedimentatie-proces in De Punt wordt een grote hoeveelheid slib gevormd, die moet worden gestort. Dit is vanuit milieuoogpunt geen wenselijke situatie en bovendien relatief duur. Daarom is onderzocht welke alternatieve processen hier mogelijk kunnen worden toegepast. Vervolgens zijn drie alternatieve processen en het huidige proces met behulp van een multicriteria-analyse vergeleken op het gebied van milieu-impact, kosten, waterkwaliteit en reststromen. Hieruit volgde dat capillaire nanofiltratie een interessant alternatief kan zijn voor het huidige proces.



*Radardiagram van de scores per criterium voor de verschillende scenario's met weegfactoren. Scenario 1 huidige scenario, scenario 2 DAF, scenario 3 capillaire NF met vlokmiddel, scenario 4 capillaire NF zonder vlokmiddel*

### Belang: vermindering van de hoeveelheid te storten slib

De eerste stap in het productieproces bij drinkwaterzuivering De Punt na inname uit de Drentsche AA is een coagulatie/flocculatie/sedimentatie-proces, waarbij PACI wordt toegevoegd als vlokmiddel. Hierbij ontstaan grote hoeveelheden aluminiumhoudend slib met een laag vastestofgehalte. Dit is zowel vanuit financieel als vanuit duurzaamheidsoogpunt onwenselijk. Daarom is in dit onderzoek gekeken

naar mogelijke alternatieven voor dit proces, waarbij minder slib wordt gevormd.

### Aanpak: literatuurstudie en multicriteria-analyse.

In eerste instantie is een literatuuronderzoek uitgevoerd, op basis waarvan drie alternatieve scenario's voor het huidige proces zijn geselecteerd. Dit leverde vier scenario's op om te onderzoeken:

- scenario 1 (huidige proces)
- scenario 2 (dissolved air floatation (DAF) met 50% PACI)

- scenario 3 (capillaire nanofiltratie (NF) met 20% PACI)
- scenario 4 (capillaire NF zonder vlokmiddel).

Van al deze scenario's is een levenscyclusanalyse (LCA) gemaakt en zijn de totale kosten (TCO) berekend. Bovendien zijn enkele waterkwaliteitsaspecten (kleur, hardheid) en vorming/verwerking van slib c.q. concentraat vastgesteld. Op basis van deze gegevens is een multicriteria-analyse uitgevoerd om de vier scenario's te kunnen vergelijken

**Resultaten: capillaire nanofiltratie kan een interessant alternatief zijn.**

Uit de multicriteria-analyse bleek dat het huidige scenario duidelijk het slechtste scoort. Het beste scoort het NF-scenario zonder vlokmiddel (scenario 4). Als toch een vlokmiddel nodig zou blijken, kan zowel NF als DAF een interessant alternatief zijn voor het huidige scenario. Dit betekent dat het de moeite waard is scenario's 3 en 4 experimenteel te toetsen, om het proces in De Punt duurzamer te maken.

**Implementatie: nader onderzoek naar mogelijkheden om capillaire NF toe te passen.**

Experimenteel onderzoek zal moeten uitwijzen of capillaire NF zonder of met een kleine hoeveelheid vlokmiddel inderdaad een geschikt proces is in De Punt. Indien toch PACI nodig blijkt te zijn, zou eventueel ook toepassing van DAF kunnen worden overwogen, want DAF scoort vergelijkbaar met capillaire NF met vlokmiddel. Op deze manier kan het proces in De Punt waarschijnlijk veel duurzamer worden gemaakt.

#### Rapport

Dit speerpuntonderzoek voor Waterbedrijf Groningen is beschreven in het rapport *Circulaire afweging alternatieve processen voor coagulatie/flocculatie/sedimentatie* (BTO-2018.060).

# Samenvatting

Bij Pompstation De Punt is recent het productieproces vernieuwd. Alleen de eerste stap, coagulatie/flocculatie/sedimentatie met behulp van polyaluminiumchloride (PACl) als vlokmiddel, is (nog) niet aangepast. Bij dit procesonderdeel komt veel aluminium houdend slib vrij, met een heel laag vaste stofgehalte (<0,5%, maar na de "slibvijvers" is dit 2-2,5%). Dit slib kan niet verder verwerkt worden, en wordt dus gestort, wat een dure maar geen duurzame oplossing is. Tot nu toe is het niet gelukt een geschikt vlokmiddel te vinden dat leidt tot vergelijkbare coagulatie/flocculatie/sedimentatieprestaties, een vergelijkbare waterkwaliteit en kleinere slibvolumes. De vraag was nu of we alternatieven voor het coagulatie/flocculatie/sedimentatie-proces konden voorstellen, en met behulp van een multi-criteria analyse konden aangeven welk van die alternatieven de voorkeur zou moeten krijgen.

In eerste instantie is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar mogelijkheden om het flocculatieproces zelf te verbeteren, bijvoorbeeld door een ander vlokmiddel te gebruiken, of alternatieve vlokmiddelen toe te passen. IJzerchloride wordt veel als vlokmiddel gebruikt, maar uit onderzoek bij De Punt was gebleken dat dit in dit geval geen goed alternatief is. Alternatieve vlokmiddelen bleken ofwel slecht houdbaar, ofwel slechts onder bepaalde omstandigheden (zoals een beperkt pH-gebied) effectief te zijn, of zijn alleen onder laboratoriumomstandigheden uitgetest (waarbij het de vraag is of ze voor grootschalige toepassingen geschikt en beschikbaar zijn). Een voorbehandeling, bijvoorbeeld met ozon, bleek ook alleen onder bepaalde omstandigheden goed te werken. Bij een te lage ozondosis is de voorbehandeling niet effectief, maar bij een te hoge ozondosis worden de moleculen zover afgebroken dat de flocculatie niet goed meer werkt. Aangezien de waterkwaliteit in de loop van het jaar verandert, viel ook deze optie af. Uiteindelijk kwamen de volgende opties naar voren:

- Dissolved air floatation (DAF). Volgens de literatuur zou hierbij de benodigde hoeveelheid vlokmiddel gehalveerd kunnen worden ten opzichte van de huidige situatie.
- Capillaire nanofiltratie (NF). Uit de literatuur bleek dat de hoeveelheid vlokmiddel die hiervoor nodig is veel lager is dan in de huidige situatie: 0 – 20%.

Dit leidde tot de volgende vier scenario's, die met elkaar vergeleken zijn:

- Scenario 1: het huidige proces met 100% PACl
- Scenario 2: DAF met 50% PACl.
- Scenario 3: capillaire NF met 20% PACl
- Scenario 4: capillaire NF met 0% PACl

Er zijn verschillende parameters waarop processen met elkaar vergeleken kunnen worden, maar de vraag was hoe die verschillende parameters zo goed mogelijk tegen elkaar konden worden afgewogen. Daarvoor is de volgende aanpak gevolgd:

Allereerst is een levenscyclusanalyse (LCA) uitgevoerd voor alle vier de scenario's. De uitkomst hiervan is uitgedrukt in ecopunten (de gemiddelde voetafdruk van een gemiddelde West-Europeaan is 1000 ecopunten per jaar). In de LCA kan de impact op volksgezondheid, ecosystemen en grondstoffen apart worden uitgerekend, waardoor het verschil hierin duidelijk wordt. De impact is ook berekend op basis van de CO<sub>2</sub>-voetafdruk. Doordat als systeemgrens de zuivering t/m de filtratie over actieve kool is meegenomen geeft deze berekening echter geen verschillen te zien voor de verschillende scenario's. De impact van Actieve Kool is namelijk zoveel groter dan die van alle andere onderdelen van het proces, dat de onderlinge verschillen tussen de scenario's verwaarloosbaar worden.

Vervolgens is een berekening van alle kosten (Total cost of ownership, TCO) gemaakt over een periode van 60 jaar.

Daarnaast is als parameter "waterkwaliteit en reststromen" meegenomen. Deze bevatte de onderdelen kleur/DOC, hardheid en concentraat/slib, omdat die laatste component in de beide andere parameters nauwelijks verdisconteerd wordt. LCA kent namelijk geen punten toe aan het storten van aluminiumslib, en omdat we nu nog niet weten hoe het concentraat van NF behandeld zou kunnen worden, konden we daar ook geen kosten voor in rekening brengen. Binnen de parameter waterkwaliteit en reststromen werden deze factoren nu wel meegenomen.

In de MCA werden vervolgens alle drie de parameters, waterkwaliteit/reststromen, TCO en LCA, even zwaar meegewogen. Voor de LCA werden echter de criteria volksgezondheid, ecosystemen en grondstoffen apart gewogen (in een verhouding 4:4:2, zoals dat in LCA-berekeningen van de totale voetafdruk in ecopunten ook gebeurt). Via een minimalisatie werd bepaald welk scenario uiteindelijk het beste scoort.

Uit de MCA-berekening bleek dat het huidige scenario duidelijk het slechtste scoort. Scenario 4, zonder PACI, scoort het beste, en is dus het waarschijnlijk het geschiktste voor nader onderzoek. Scenario 3, capillaire NF met een kleine hoeveelheid PACI scoort iets minder goed dan scenario 4, maar vergelijkbaar met scenario 2 (DAF met 50% PACI). Experimenteel onderzoek zal moeten uitwijzen of scenario 4 in de praktijk goed werkt. Mocht dat toch niet het geval zijn, dan zou scenario 3 of 2 ook een realistische optie kunnen zijn.

# Inhoud

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Samenvatting</b>   | <b>2</b>  |
| <b>Inhoud</b>   | <b>4</b>  |
| <b>1    <b>Introductie</b></b>                                      | <b>6</b>  |
| <b>2    <b>Literatuurstudie</b></b>                                 | <b>8</b>  |
| 2.1 Theoretische achtergrond coagulatie/flocculatie-processen       | 8         |
| 2.2 Effect pH op coagulatie/flocculatie                             | 12        |
| 2.3 Toevoeging van silicum aan ijzer- of aluminium-vlokmiddelen     | 14        |
| 2.4 Toevoeging van kationische polyelektrolyeten                    | 16        |
| 2.5 Effect van pré-oxidatie   | 17        |
| 2.6 Alternatieve coagulatieprocessen                                | 18        |
| 2.7 Alternatieve NOM-verwijdering                                   | 18        |
| 2.8 Ontwaterbaarheid  | 21        |
| <b>3    <b>Scenario-keuze voor De Punt</b></b>                      | <b>22</b> |
| 3.1 Ideeën om het probleem bij De Punt op te lossen                 | 22        |
| 3.2 Uitgewerkte scenario's voor de Punt                             | 24        |
| <b>4    <b>Levenscyclusanalyse</b></b>                              | <b>26</b> |
| 4.1 Keuze van systeemgrenzen en functionele eenheid                 | 26        |
| 4.2 Resultaten van LCA  | 27        |
| <b>5    <b>Total cost of ownership (TCO)</b></b>                    | <b>36</b> |
| 5.1 Gegevens van de verschillende scenario's                        | 36        |
| 5.2 Resultaten TCO-berekeningen                                     | 41        |
| <b>6    <b>Multi-Criteria Analyse</b></b>                           | <b>42</b> |
| 6.1 Beslissingsondersteunende analyses voor vergelijking scenario's | 42        |
| 6.2 Multi-criteria analyse  | 42        |
| 6.3 Definities van het afwegingskader                               | 44        |
| 6.4 Resultaten  | 46        |
| <b>7    <b>Discussie</b></b>  | <b>51</b> |
| <b>8    <b>Conclusies een aanbevelingen</b></b>                     | <b>53</b> |
| 8.1 Conclusies  | 53        |
| 8.2 Aanbevelingen   | 53        |
| <b>9    <b>Literatuur</b></b>                                       | <b>54</b> |
| <b>Bijlage I</b>  | <b>57</b> |

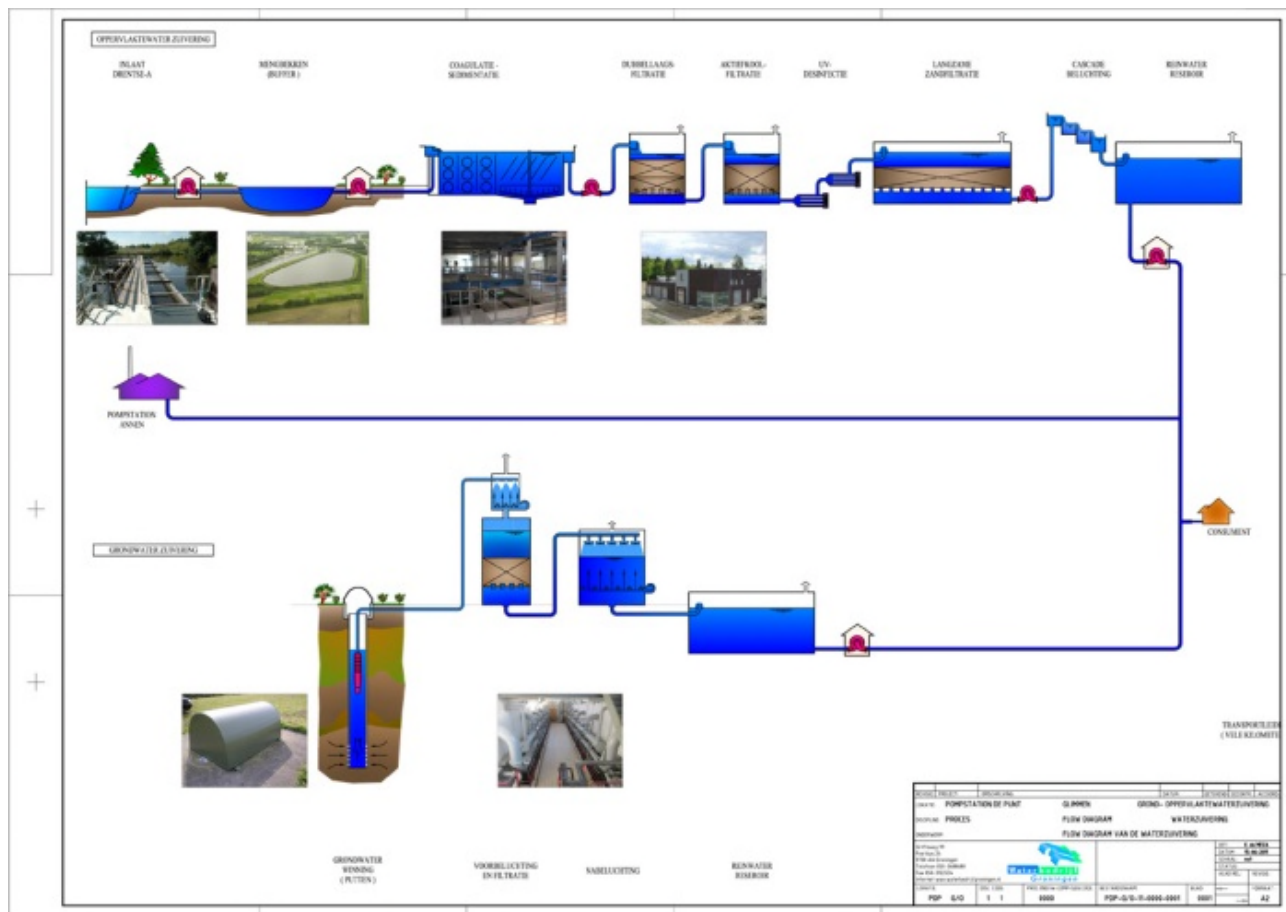


|   |           |
|---|-----------|
| • Gegevens voor berekeningen TCO en LCA   | 57        |
| <b>Bijlage II</b>   | <b>62</b> |
| • LCA-resultaten op basis van marktconforme energie.                                  | 62        |
| <b>Bijlage III</b>  | <b>69</b> |
| • Single point scores voor Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> op basis van groene energie | 69        |
| <b>Bijlage IV</b>   | <b>70</b> |
| • TCO-berekeningen  | 70        |
| <b>Bijlage V</b>  | <b>80</b> |
| • Data MCA  | 80        |
| <b>Bijlage VI</b>   | <b>81</b> |
| • MCA voor de sub-criteria  | 81        |

# 1 Introductie

Bij pompstation De Punt wordt drinkwater geproduceerd uit relatief schoon oppervlaktewater, afkomstig uit de Drentsche Aa. Via een mengbekken wordt dit water ingenomen. De zuivering is in 2012 vernieuwd, afgezien van de eerste processtap: coagulatie/flocculatie/sedimentatie, waarbij polyaluminiumchloride (PAC) als vlokmiddel wordt toegevoegd. Daarnaast is op deze locatie ook een grondwaterzuivering aanwezig en wordt er drinkwater, afkomstig van de WMD, opgemengd met het drinkwater van De Punt.

Het totale proces is weergegeven in Figuur 1.



FIGUUR 1: ZUIVERINGSPROCES BIJ POMPSTATION DE PUNT

Voor het coagulatieproces wordt de pH van het water verlaagd door HCl toe te voegen. Vervolgens wordt polyaluminiumchloride (PACl) toegevoegd, om coagulatie te bewerkstelligen. Doordat het driewaardig aluminium hierin complexen vormt met NOM ontstaat een neerslag, waarin ook deeltjes en dergelijke, die in het water aanwezig zijn, neerslaan. Bij coagulatie/flocculatie/sedimentatie ontstaat op die manier een aluminium houdend slib met uiteindelijk een vaste stofgehalte van slechts 2-2,5%. Dit slib wordt

afgevoerd en gestort, omdat pogingen om het verder te verwerken (bv. het in te dikken samen met RWZI-slib, enz.) tot nu toe niet succesvol of te kostbaar zijn gebleken. Dit is echter de minst duurzame oplossing. Daarom heeft WBG KWR gevraagd na te gaan wat mogelijke alternatieve processen kunnen zijn, en deze processen te vergelijken met het huidige proces op basis van een multi-criteria analyse (MCA). Hierin spelen naast kosten ("total cost of ownership", TCO) duurzaamheidsaspecten (life cycle analysis; LCA) een belangrijke rol. Bovendien zijn de waterkwaliteit en reststromen als parameters in de MCA meegenomen.

In eerste instantie is gekeken naar een verbetering van het coagulatie/flocculatie/sedimentatieproces zelf. Om alternatieve processen te kunnen kiezen is eerst een literatuurstudie (zie hoofdstuk 2) uitgevoerd, waarbij de nadruk lag op vlokmiddelen en technieken waarmee een effectieve coagulatie en ontwatering gerealiseerd kunnen worden. Dit gaf echter geen aanknopingspunten om het flocculatieproces zelf te kunnen verbeteren.

Vervolgens zijn drie alternatieve processen voorgesteld, waarbij niet de nadruk lag op het (type) vlokmiddel, maar meer op een andere manier om het neerslag, indien dat ontstond, te verwijderen. Deze zijn vergeleken met het huidige proces:

- Een proces met 50% van de huidige hoeveelheid vlokmiddel, waarbij de vaste stof door middel van "dissolved air flotation" (DAF) wordt afgescheiden.
- Een proces waarbij 20% van de huidige hoeveelheid vlokmiddel wordt toegevoegd en vaste stof door middel van capillaire nanofiltratie wordt afgescheiden.
- Een proces waarbij geen vlokmiddel wordt toegevoegd en vaste stof door middel van capillaire nanofiltratie wordt afgescheiden.

Deze drie alternatieven zijn in overleg met WBG gekozen voor verdere uitwerking in dit rapport. Omdat de eerste zuiveringsstappen van invloed zijn op de waterkwaliteit in de vervolgstappen van de zuivering, is besloten het proces tot de langzame zandfiltratie te vergelijken.

Voor de vergelijking is gekeken naar drie onderwerpen:

1. Een levenscyclusanalyse (LCA)
2. De berekening van de total cost of ownership (TCO)
3. Waterkwaliteitsaspecten en reststromen

## 2 Literatuurstudie

### 2.1 Theoretische achtergrond coagulatie/flocculatie-processen

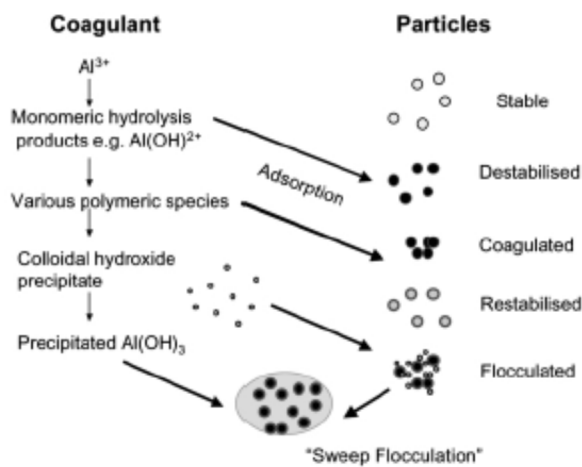
Coagulatie/flocculatie is een proces dat algemeen wordt toegepast in drinkwaterzuiveringsprocessen voor de verwijdering van turbiditeit, 'kleur' (DOC) en pathogenen. Deeltjes vormen vaak stabiele dispersies in water doordat ze gestabiliseerd worden door hun oppervlaktelading. Bij coagulatie wordt de afstotende potentiaal van de elektrische dubbellaag van colloïdale deeltjes zodanig verkleind dat ze agglomeraten kunnen vormen, en er microdeeltjes worden gevormd. Deze botsen met elkaar, waardoor weer grotere structuren ontstaan.

Meestal worden coagulatiecondities in de praktijk geoptimaliseerd voor de verwijdering van turbiditeit. Daarentegen wordt in de literatuur met "geoptimaliseerde coagulatie" over het algemeen bedoeld dat de dosis vlokmiddel en pH zijn geoptimaliseerd voor de verwijdering van organisch materiaal. De term "versterkte" coagulatie heeft betrekking op omstandigheden waarbij een "overmaat" coagulant wordt toegepast in combinatie met veranderingen in pH of de volgorde van toediening van chemicaliën of toediening van alternatieve chemicaliën, om op die manier efficiënter TOC en NOM te kunnen verwijderen (Matilainen et al. 2010).

Chemische coagulatie wordt bereikt door anorganische coagulanten toe te voegen als driewaardige aluminium- en ijzertzouten (Matilainen et al. 2010, Sillanpää et al. 2018). Na hydrolyse vormen deze oplosbare complexen met een vrij hoge positieve lading, waardoor ze adsorberen op het oppervlak van negatief geladen colloïdale deeltjes. Er kunnen monomeren van Fe of Al worden toegepast, oligomeren en neergeslagen/colloïdale deeltjes.  $\text{Al}^{3+}$  en  $\text{Fe}^{3+}$  hebben een primaire hydratatieschil, waarin zich zes watermoleculen bevinden in een octaëder coördinatie. Door de lading van het metaal worden deze watermoleculen gepolariseerd, en kunnen zelfs een proton verliezen. Als gevolg daarvan daalt de pH, terwijl tegelijkertijd  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , en  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  gevormd worden. Uiteindelijk ontstaan oligomere en polymere verbindingen als  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ,  $\text{Al}_3(\text{OH})_4^{5+}$  and  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ . Deze laatste variant bestaat eigenlijk uit een centraal  $\text{AlO}_4^{5-}$  in een tetraëder, omringd door twaalf Al-octaëders met gedeelde hoekpunten (Duan et al. 2003), en wordt polyaluminiumchloride (PACl) genoemd. Hoewel dergelijke polymeren ook ontstaan bij gebruik van  $\text{AlCl}_3$  als vlokmiddel, want de hydrolyse en polymerisatie van monomeren van aluminium zijn enkele ordegrottes sneller dan de complexvorming tussen aluminium en NOM (Yan et al. 2009), blijkt directe toepassing van PACl in de praktijk effectiever te zijn. In het geval van  $\text{Fe}^{3+}$  ontstaan  $\text{Fe}(\text{OH})_x^{(3-x)+}$  en polymere varianten met de algemene formule  $[\text{Fe}_m(\text{OH})_x]_n^{(3m-x)n+}$  (Shi et al. 2004, Ho et al. 2010). De oligomeren zijn over het algemeen het meest efficiënt voor de verwijdering van DOC.

De mechanismes die een rol spelen bij de verwijdering van NOM zijn over het algemeen een combinatie van ladingneutralisatie, invangen, en adsorptie en complexatie met metaalionen in onoplosbare aggregaten. Mechanismen gebaseerd op ladingseffecten vertonen een optimale pH waarde. Bij toepassen van neergeslagen of colloïdale deeltjes komen ook brugvorming en "sweep coagulation" (waarbij deeltjes worden ingevangen in het groeiende hydroxide-neerslag) voor. Hierbij spelen waterstofbruggen, coördinatie-reacties, covalente binding en ionenwisseling een belangrijke rol (Duan et al. 1996). Bij oligomere en monomere coagulanten vindt DOC-verwijdering voornamelijk via complexvorming, adsorptie,

neutralisatie van lading en co-precipitatie plaats (Matilainen et al. 2010). De verschillende coagulatiemechanismen leiden tot vlokken met verschillende eigenschappen zoals afmeting, structuur en sterkte. Hoe effectief het coagulatieproces verloopt hangt mede af van het type en de dosis coagulant, menging, pH, temperatuur, eigenschappen van de deeltjes en van NOM (grootte, functionaliteit, lading, hydrofobiciteit), de aanwezigheid van divalente kationen, en de concentraties van destabiliserende anionen als bicarbonaat, chloride en sulfaat. Deze ionen beïnvloeden de pH van aluminiumneerslag nauwelijks. Ze kunnen echter wel een grote invloed op de pH hebben als het oorspronkelijke neerslag tot vlokken aggregeert. Sulfaat is een middelsterke coördinator met aluminium (het vormt complexen met aluminium vrij stabiel zijn), en in aanwezigheid van een sulfaation wordt het pH-gebied waarin coagulatie plaatsvindt uitgebreid naar de zure kant. Nitraat verbindt zich nauwelijks met metaalionen en beïnvloedt de coagulatie dus ook niet echt (Duan et al. 2003).  $\text{Fe}(\text{Cl})_3$  en  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  en alum (aluminiumsulfaat) reageren zuur (doordat het  $\text{Fe}^{3+}$  complexen vormt met  $\text{OH}^-$ ), en verlagen daardoor de pH na toepassing. Volgens Duan en Gregory (Duan et al. 2003) vindt coagulatie plaats door ladingsneutralisatie van negatief geladen colloïdale deeltjes door kationische hydrolyseproducten, en door inbedding van verontreinigingen in een amorf hydroxide-neerslag ("sweep flocculation"; afvanging in een slibdeken) (zie Figuur 2). De relatieve bijdrage van deze beide processen hangt af van bv. de pH en de dosis coagulant. Voorgehydrolyseerde Al- en Fe-zouten zijn in de regel effectiever dan bv.  $\text{AlCl}_3$  en  $\text{FeCl}_3$ .



FIGUUR 2: INTERACTIE VAN Al MET OORSPRONKELIJK NEGATIEF GELADEN DEELTJES IN WATER. DE DEELTJES RECHTS ZIJN OORSPRONKELIJK STABIEL EN WORDEN DAN GEDESTABILISEERD DOOR LADINGSNEUTRALISATIE. BIJ HOGERE DOSES COAGULANT KUNNEN ZE OPNIEUW GESTABILISEERD WORDEN DOORDAT DE LADING WORDT OMGEKEERD, EN VERVOLGENS KUNNEN ZE WORDEN INGEVANGEN IN EEN HYDROXIDENEERSLAG (SWEEP FLOCCULATION). (DUAN ET AL. 2003).

Duan en Gregory (Duan et al. 2003) onderscheiden vier regimes:

1. Lage dosis coagulant, waarbij de deeltjes negatief geladen blijven en dus stabiel in oplossing
2. Voldoende hoge dosis coagulant om de lading te neutraliseren en coagulatie te veroorzaken (destabilisatie in fig 2)
3. Hogere dosis coagulant waardoor er weer opnieuw lading ontstaat en de deeltjes opnieuw worden gestabiliseerd (restabilisatie in fig 2).

4. Nog hogere dosis coagulant waarbij hydroxides neerslaan en “sweep flocculation” ontstaat (afvanging in slibdeken).

De concentratie van NOM wordt vaak bepaald aan de hand van parameters als oplosbaarheid (opgelost organisch koolstof, DOC) of absorptie van UV-straling met een golflengte van 254 nm (specifieke UV absorptie,  $SUVA_{254}$ ), wat een maat is voor de aromaticiteit van het NOM. De eigenschappen van het NOM hebben een aanzienlijk effect op de benodigde dosis coagulant. Bij NOM met een hoge molmassa is een lagere dosis nodig, aangezien dan vooral ladingsneutralisatie een rol speelt (er is minder vlokmiddel nodig per g NOM als grote moleculen een lading hebben). Indien er echter sprake is van NOM met een lagere molmassa of met minder humuszuren vindt verwijdering plaats via adsorptie op het oppervlak van metaalhydroxides, en is een hogere dosis vereist. De hydrofobe fractie van het NOM, die in het algemeen meer negatieve lading draagt door de aanwezigheid van carboxylaat- en fenolaatgroepen, wordt in de regel beter verwijderd dan de hydrofiele fractie. Volgens Duan en Gregory geven bij lage temperatuur op Fe(III) gebaseerde coagulanten een betere DOC en  $SUVA_{254}$  verwijdering dan op aluminium gebaseerde coagulanten. Matilainen et al. komen tot dezelfde conclusie, met name als het gaat om NOM met een molmassa tussen 1000 en 4000 g (Matilainen et al. 2010). Deze fractie bestaat grotendeels uit fulvinezuren, en de betere verwijdering hangt dan ook waarschijnlijk samen met de hogere ladingsdichtheid van Fe(III) coagulanten. Bovendien blijken de vlokken, die gevormd worden met Fe(III), groter en talrijker te zijn dan vlokken die ontstaan bij toevoeging van Al(III), waardoor de kans op botsingen, en daarmee verwijdering, toeneemt (Matilainen et al. 2010) (zie ook Figuur 3). Dit is overigens in tegenspraak met ervaring in De Punt, waar 2,5 tot 3 keer zoveel ijzer nodig bleek dan aluminium. Sharp et al constateerden dat de samenstelling van het NOM een grote invloed heeft op de effectiviteit van het coagulatieproces. De hydrofiele fulvinezuren blijken kleinere, compactere, vlokken te geven, gebaseerd op adsorptie (Sharp et al. 2006). Humuszuren geven daarentegen een veel opener vlokstructuur, doordat ze zowel elektrostatische als chemische (ligand exchange) interacties aangaan. Deze vlokken zijn gevoeliger voor afschuifkrachten (shear), die optreden tijdens menging. Tijdens sweep flocculatie worden de vlokken veel sneller gevormd en worden ze ook groter. Dit hangt waarschijnlijk samen met de vorming van een hydroxideneerslag, in eerste instantie in de vorm van colloïdale deeltjes (enkele nm in diameter), die bij neutrale pH positief geladen zijn. Deze adsorberen op deeltjes van verontreinigingen, waardoor de lading van deze deeltjes wordt omgekeerd. Vervolgens treedt aggregatie van de colloïdale hydroxidedeeltjes op, hetzij op het deeltjesoppervlak (een vorm van heterocoagulatie) of in de bulk oplossing. Onder “sweep” omstandigheden neemt het volume neergeslagen vlokken evenredig toe met de dosering van hydrolyserend coagulant.

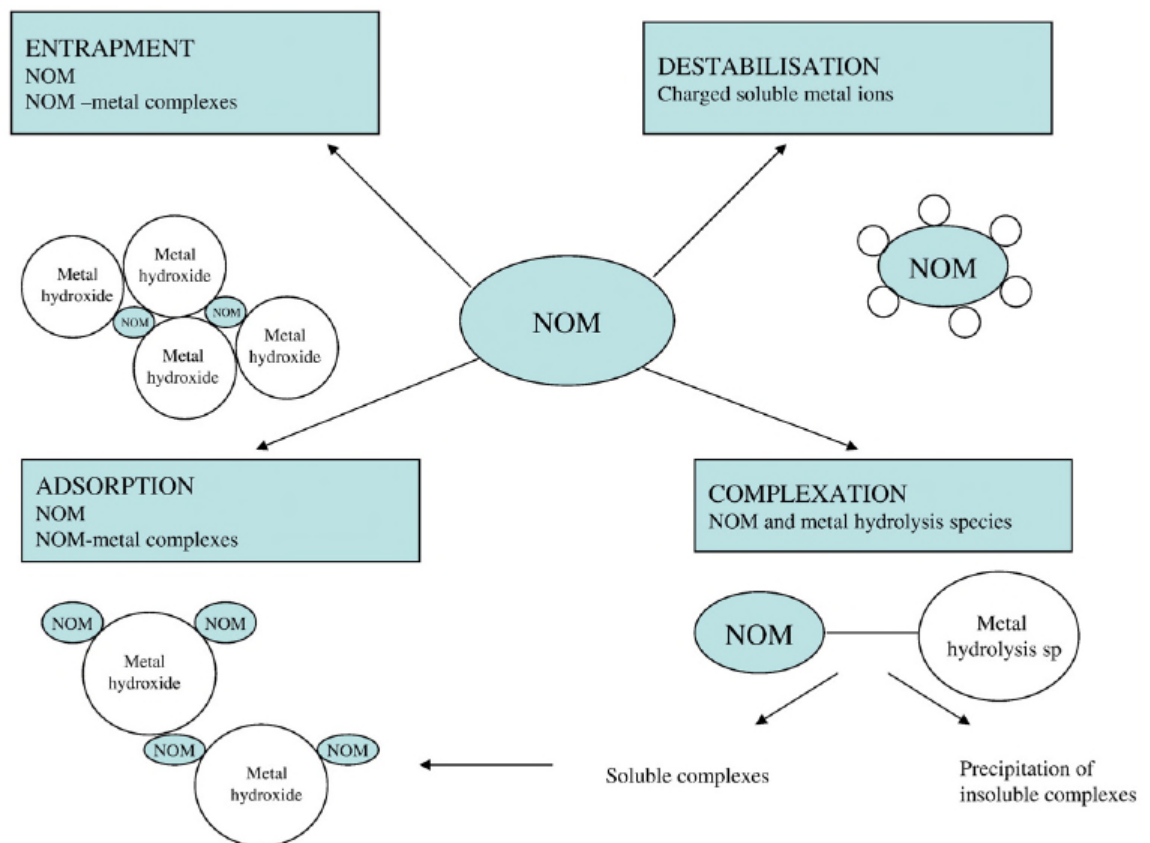


Fig. 2. The possible removal mechanisms of NOM during coagulation (adapted from Jarvis et al. [31]).

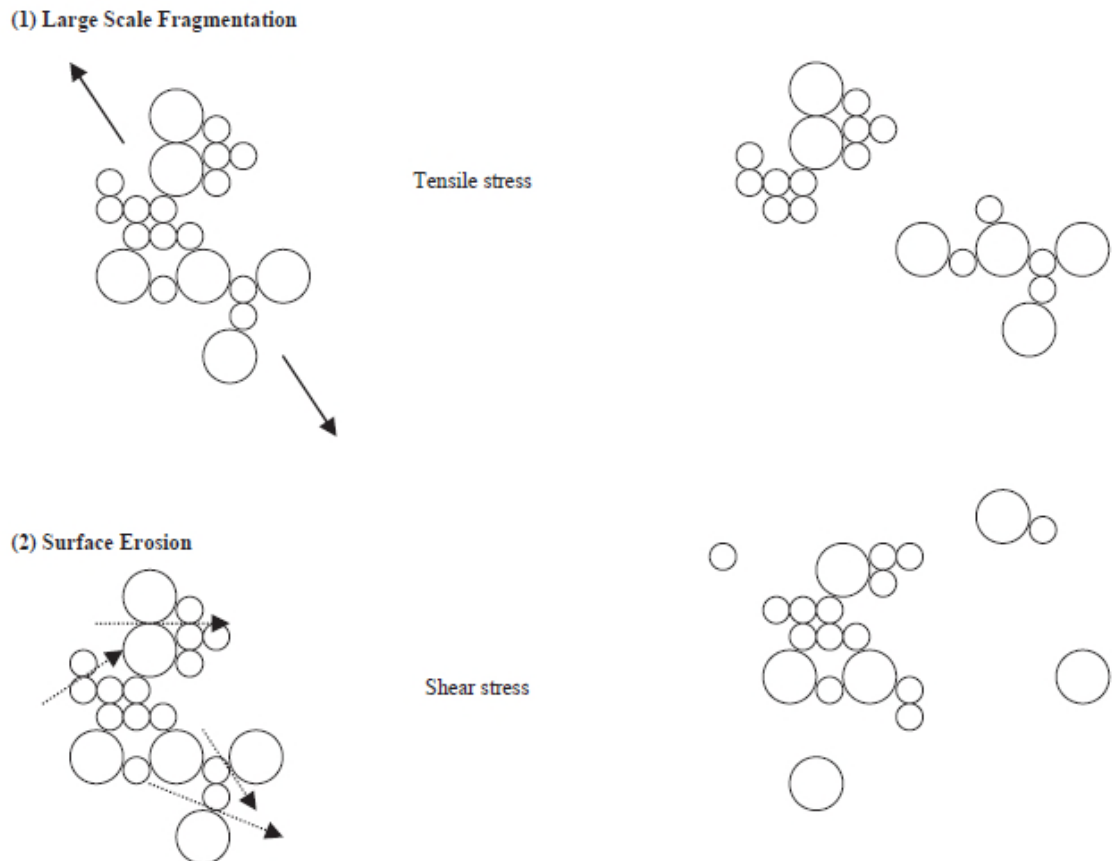
FIGUUR 3: VERWIJDERINGSMECHANISMEN VOLGENS MATILAINEN ET AL. (MATILAINEN ET AL. 2010)

Ook Li et al. onderscheiden deze drie verschillende mechanismen (neutralisatie, sweep en brugvorming), die van invloed zijn op de grootte, sterkte en structuur van de gevormde vlokken (Li et al. 2006), en daarmee dus ook op de ontwaterbaarheid van het gevormde slib.

De roersnelheid kan ook een belangrijke rol spelen bij coagulatie. Meestal wordt in eerste instantie met hoge snelheid gemengd, waarna een tijdje een lagere snelheid wordt aangehouden. In deze tweede fase kunnen meer botsingen van deeltjes voorkomen en kunnen de vlokken groeien. In het begin is de groei van vlokken afhankelijk van de toegepaste shear stress (de energie die daarvoor wordt toegepast) en van de deeltjes concentratie en effectiviteit van de botsingen. Als de vlokken groter worden, wordt verdere groei beperkt door de shear stress, omdat bestaande vlokken kunnen worden gebroken, en omdat de botsingsefficiëntie bij grotere vlokken afneemt.

Daarnaast kan ook de temperatuur van belang zijn. Met toenemende temperatuur (en pH) neemt de hydrolysesnelheid van Fe(III)zouten toe, en worden oplosbare polymeren van ijzer sneller gevormd. Bij lagere temperaturen worden vlokken over het algemeen trager gevormd en zijn ze ook kleiner dan bij hogere temperaturen.

Flocculatie is een dynamisch proces, waarbij vlokken niet alleen gevormd maar ook afgebroken worden. Dit kan via oppervlakte-erosie en door fragmentatie (zie Figuur 4) (Jarvis et al. 2005).



FIGUUR 4: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN VLOKAFBRAAK (JARVIS ET AL. 2005)

Door de hydraulische omstandigheden aan te passen kan de botsingsfrequentie, en daarmee de vlokvorming, beïnvloed worden (Yan et al. 2009). Over het algemeen wordt een vlok sterker naarmate hij groter wordt. Uiteindelijk ontstaat er een soort dynamisch evenwicht tussen vlokvorming en -afbraak. Toevoeging van een polymeer maakt biologische vlokken meestal zwakker, en chemische vlokken in de regel sterker.

## 2.2 Effect pH op coagulatie/flocculatie

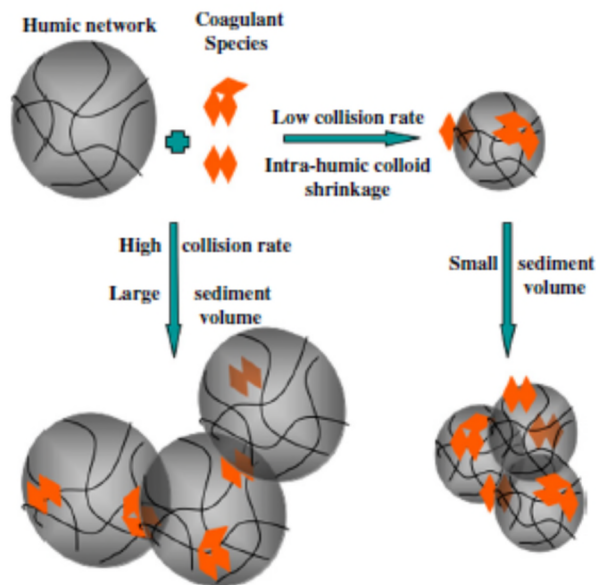
Meestal wordt bij toepassing van aluminium  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  gebruikt, maar ook  $\text{AlCl}_3$  komt voor. Het moeilijkst te verwijderen zijn hydrofiele neutrale NOM-fracties, vooral polysaccharides en hun derivaten, omdat ze geen lading hebben en goed oplosbaar zijn. De optimale pH voor dit proces is 5,0 – 6,5 (5-100 mg Al/L). Er wordt ook veel voorgehydrolyseerd aluminiumcoagulant toegepast, met name PACl. Dit wordt gevormd door  $\text{AlCl}_3$  deels te hydrolyseren. Hierbij ontstaat polyaluminiumchloride (PACl). Het blijkt dat  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ , en polymere vormen als  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ,  $\text{Al}_3(\text{OH})_4^{5+}$  en  $\text{AlO}_4\text{Al}_{12}(\text{OH})_{24}^{7+}$  allemaal binnen één pH-eenheid gelijktijdig voorkomen, terwijl bij ijzer dergelijke hydroxiden wel voorkomen maar verdeeld over 8 pH-eenheden (Duan et al. 2003). Met name " $\text{Al}_{13}$ " ( $\text{AlO}_4\text{Al}_{12}(\text{OH})_{24}^{7+}$ ) blijkt effectief te zijn, vanwege zijn grootte en hogere positieve lading. Het



voordeel is bovendien dat dit middel minder afhankelijk is van temperatuur en pH, en minder bicarbonaat verwijdert. In vergelijking met  $\text{AlCl}_3$  zijn de vlokken die worden gevormd met behulp van PACI groter en eenvoudiger te precipiteren (Yan et al. 2008). PACI blijkt echter niet in alle gevallen effectief voor de verwijdering van NOM. De aanwezigheid van hooggeladen anionen als sulfaat verlagen de positieve lading van het neerslag in een zuur milieu, waardoor grote vlokken over een groter pH-gebied worden gevormd.

De optimale pH voor  $\text{FeCl}_3$  en  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  is in de regel 4,5 – 6, al zou dit kunnen afhangen van de samenstelling van het organisch materiaal. Bij toepassing van alum neemt de verwijdering van DOC toe als de alum concentratie toeneemt tot 100 mg/L (Matilainen et al. 2010). Bij lagere doses reorganiseert het anionische netwerk van humuszuren zich met de kationische coagulant, waarbij een compactere structuur ontstaat. Op die manier ontstaat er een competitie tussen deze reformatie van het netwerk en de botsingssnelheid tussen de gedestabiliseerde colloïdale deeltjes (Matilainen et al. 2010). Ook Yan et al. wijzen op het belang van de pH. Bij een pH van ongeveer 5,0 voor  $\text{FeCl}_3$  en 5,8 voor  $\text{AlCl}_3$  kregen zij de hoogste NOM-verwijdering, die ongeveer het dubbele was van wat bij een niet geoptimaliseerde pH werd bereikt (Yan et al. 2009). Bij neutrale en basische pH-waarden bleek PACI met een hogere verhouding  $\text{OH}^-/\text{Al}$  effectiever te zijn in de verwijdering van NOM en turbiditeit (Yan et al. 2008). De werking van PACI bleek echter minder afhankelijk te zijn van de pH, en werkt ook bij een hogere pH dan 6 (Yan et al. 2008, Yan et al. 2008).

Net als bij aluminium bestaan er ook polymere ijzercoagulanten, zoals polyferrisulfaat (PFS) en polyferrichloride (PFC) (Matilainen et al. 2010, Miyahara et al. 2016). Bij PFC berust de coagulatie meer op adsorptie en het invangen en complexeren dan op ladingsneutralisatie. Siéliéchi et al. hebben aangetoond dat aggregaten van colloïdale deeltjes van humuszuren en gehydrolyseerde ijzerverbindingen bij lage concentraties coagulant tot meer compacte structuren leiden, en bolvormige deeltjes met een grootte van circa 80 nm (Siéliéchi et al. 2008). Vaak wordt er bij een verklaring van het mechanisme van uit gegaan dat ladingsneutralisatie/precipitatie optreedt bij een zure pH, terwijl adsorptie en/of sweep-flocculatie onder basische condities voorkomt. Gehydrolyseerde ijzerverbindingen blijken een sterkte interactie te vertonen met de carboxylaatgroepen van het NOM, waarbij een lage botsingssnelheid leidt tot een klein slibvolume, en een hoge botsingssnelheid tot een groter slibvolume (zie Figuur 5). Door t roersnelheden en/of concentraties te variëren kan dit proces beïnvloed worden.



FIGUUR 5: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE AGGREGATIE VAN NOM MET GEHYDROLYSEERDE IJZERVERBINDINGEN (SIÉLIÉCHI ET AL. 2008).

Bij hydrolyse van metaalzouten vindt verwijdering van humuszuren plaats via de volgende mechanismen:

- De metalen binden aan anionische groepen, waardoor de lading wordt geneutraliseerd en de oplosbaarheid afneemt. Hierbij ontstaat een neerslag, dat kan worden verwijderd.
- Humuszuren adsorberen op amorf neerslag van het metaalhydroxide, omdat het neerslag een positieve lading heeft en humuszuren bij pH 5-6 een negatieve lading hebben.

Het is echter in de praktijk vaak niet mogelijk beide mechanismen te onderscheiden.

Concluderend kan worden gesteld dat de optimale pH voor een coagulatie/flocculatie/sedimentatieproces afhangt van het type vlokmiddel dat wordt toegepast, en van de samenstelling van het NOM.

### 2.3 Toevoeging van silicium aan ijzer- of aluminium-vlokmiddelen

Hoewel PACI goede resultaten geeft bij De Punt, is dit proces verre van optimaal omdat het gevormde slib slecht ontwaterbaar is. Daarom is in de literatuur gezocht naar mogelijkheden de eigenschappen van het gevormde slib te veranderen. Hierbij kan gedacht worden aan combinatie van PACI met een andere verbinding, die ertoe leidt dat de structuur van de gevormde vlokken verandert.

PACI wordt ook wel toegepast in combinatie met geactiveerd  $\text{SiO}_2$  (Matilainen et al. 2010). Dit materiaal heeft een hogere molmassa en een kleinere oppervlaktelading dan PACI, en blijkt beter te werken in water met een lagere turbiditeit (Matilainen et al. 2010). Volgens Duan en Gregory (Duan et al. 1996) wordt de coagulatie bij een vaste Al-concentratie bevorderd door lage concentraties opgelost silica toe te passen, vooral bij een pH-waarde rond 6, maar dit is geen realistische pH-waarde voor drinkwater. Bij toepassing van aluminiumsulfaat blijkt de

coagulatie bij hoge pH-waarden sterk gehinderd te worden bij een silicaconcentratie van ongeveer 10 mg/L, wat een gangbare concentratie is in veel oppervlaktewateren. Oplosbaar silica wordt meestal gekarakteriseerd als  $\text{Si}(\text{OH})_4$ : monokiezelsuur of orthokiezelsuur. Tot een pH van ongeveer 9 is de oplosbaarheid bij 25°C 100-150 mg  $\text{SiO}_2/\text{L}$  (in de vorm van  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ). Boven deze pH neemt de oplosbaarheid sterk toe. In combinatie met een polyvalent metaalion ontstaat een onoplosbaar netwerk. Zo daalt de oplosbaarheid van silica door toevoeging van Al(III) van 110 mg/L tot <10mg/L. Meestal wordt natriumsilicaat ( $\text{Na}_2\text{O}\cdot x\text{SiO}_2$ ;  $x = 1,65 - 4$ ) gebruikt, dat wordt geactiveerd door een zuur als zwavelzuur of aluminiumsulfaat (alum). Men spreekt van "geactiveerd silica" als de suspensie negatief geladen colloïdale deeltjes bevat in de grootteorde van 0,1 tot 1,0  $\mu\text{m}$ . Dit is overigens in de praktijk een viskeuze en lastig te hanteren suspensie. Aluminium en zijn hydrolyseproducten reageren met geactiveerd silica, waarbij  $(\text{HO})_3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiOH}$  wordt gevormd. Bij silicaconcentraties tot 50 mg/L en pH = 6 werd de coagulatie in aanwezigheid van 40  $\mu\text{mol}$  alum verbeterd. De vlokken bereikten daarbij hun evenwichtsafmetingen (die overigens ook afhankelijk zijn van de roersnelheid). Bij hogere silicaconcentraties nam de coagulatie af, totdat bij 200 mg/L geen coagulatie meer kon worden waargenomen. Bij een pH van 7 bleek de coagulatie zonder silica aanzienlijk beter te verlopen dan bij lagere pH. Hier leverde 5 mg silica/L een kleine verbetering op, maar bleek 15 mg/L juist coagulatie totaal te verhinderen.

Gao et al. (Gao et al. 2002) (Gao et al. 2007) pasten een aluminium-silicaat polymeer composietmateriaal (PASiC) toe als een nieuw coagulatiemiddel. In vergelijking met PACl verbeterde het de aggregatie-efficiëntie, en gaf het betere resultaten met betrekking tot de verwijdering van algen, turbiditeit, olie en het verlagen van het chemisch zuurstofverbruik. De pH-range waarover PASiC optimaal werkte was tussen 6,0 en 8,5, terwijl die van PACl tussen 6,0 en 8,0 lag. Het materiaal bleek echter niet stabiel tijdens opslag, en is alleen op labschaal uitgetest. Het onderwerp is weer opgepakt door Cheng et al., die naast PASiC (poly-aluminium-silicaat-chloride) ook PAFSiC (polyaluminium-ferri-silicaatchloride) uittestten. Zij concluderen dat deze beide coagulatiemiddelen beter werken dan PACl in de behandeling van water met een relatief lage turbiditeit, maar dat naast het type coagulant ook de samenstelling van het organische materiaal van cruciale betekenis is (Cheng et al. 2008). Polymere coagulanten blijken minder effectief te zijn in het neutraliseren van de oppervlaktelading van water met een lage turbiditeit. De composieten PASiC en PAFSiC reageren eerst met humuszuren, waarbij colloïdale deeltjes worden gevormd, en daarna met met kaolindeeltjes om de oppervlaktelading te neutraliseren, en grotere vlokken, die kunnen neerslaan, te vormen. Als de coagulant dosis te laag was om een effectieve coagulatie te bewerkstelligen was het ook lastig de turbiditeit voldoende te verlagen.

Ook bij toepassing van ijzerverbindingen als PFS en PFCI kan de effectiviteit worden verbeterd door toevoeging van bv. polykiezelsuur, maar de testen zijn alleen op labschaal uitgevoerd, en het materiaal dat hiervoor wordt beschreven is ook niet op grote schaal beschikbaar (Zouboulis et al. 2008, Zouboulis et al. 2008, Matilainen et al. 2010).

(Yan et al. 2008) pasten ze een nieuw composietmiddel toe (genaamd HPAC), bestaande uit PACl en organische en anorganische additieven, en  $\text{FeCl}_3$ . Dit bleek ongeveer 30% effectiever DOC te verwijderen dan  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{FeCl}_3$  en PACl.

Hoewel toevoeging van silicium het coagultie/flocculatieproces kan verbeteren, zitten er nog enkele praktische haken en ogen aan die methode. Het blijkt zeker niet in alle gevallen te werken, wat afhangt van de samenstelling van het NOM. Bovendien blijkt er vaak sprake te zijn van een optimale dosis silica, waarboven toediening van silica zelfs een negatief effect op de coagulatie/flocculatie kan hebben. Ook kan worden vastgesteld dat de benodigde

verbindingen nog lang niet altijd op grote schaal verkrijgbaar zijn, en dat coagulatie/flocculatie vaak alleen op kleine schaal is uitgetest.

## 2.4 Toevoeging van kationische polyelektrolieten

(Li et al. 2006) beschrijven naast ladingsneutralisatie en “sweep-coagulatie” ook brugvorming (“bridging”). Brugvorming treedt op als een polymeer op meerdere deeltjes tegelijk adsorbeert. Hierdoor ontstaat een veel stabielere vlok dan wanneer alleen neutralisatie door een zout optreedt. Dergelijke vlokken zijn moeilijker te breken. Het kationische polyacrylamide (PAM) is hiervoor erg geschikt als coagulatiemiddel.

Kationische polyelektrolieten verwijderen NOM echter meer via ladingsneutralisatie dan via brugvorming. Een kationisch polymeer is PDADMAC (poly(diallyldimethylammoniumchloride)) (Jarvis et al. 2006, Matilainen et al. 2010). Dit is vrij duur, maar in combinatie met een conventionele coagulant (het polymeer wordt dan enige tijd na de coagulant toegevoegd) kan het proces toch goedkoper worden doordat er minder coagulant nodig is, en de gevormde aggregaten groter worden. Het slibvolume neemt dan af, en het proces is minder gevoelig voor veranderingen in de pH. Op deze manier kon de effectiviteit van PACl,  $\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2$ , en PFS voor de verwijdering van DOC, SUVA en turbiditeit verbeterd worden. Het materiaal is vooral effectief in water met een hogere pH of alkaliniteit, en kan de verwijdering van NOM door PACl 30% efficiënter maken. De structuur van de gevormde vlokken is minder open, waardoor ze sterker zijn dan wanneer alleen NOM en het vlokmiddel aanwezig zijn. Voor praktische toepassing in de Nederlandse drinkwaterproductie zou een Kiwa-watermerk vereist zijn, en die heeft dit materiaal (nog) niet. Een overzicht van de vorming, afbraak en hergroei van vlokken bij toepassing van ijzerzouten al dan niet in combinatie met polymeren wordt gegeven in Tabel 1.

Tabel 1: overzicht van vlokformatie, -afbraak en -hergroei in aanwezigheid van FE-zouten en polymeer (Jarvis et al. 2006).

| Type vlok       | grootte  | Afbraak-snelheid bij lage roersnelheid | Afbraak-snelheid bij hoge roersnelheid | Hergroei-capaciteit bij uitgebreide shear | Hergroei-capaciteit bij korte shear | Neerslaan | Compactheid |
|-----------------|----------|--|--|---|-------------------------------------|-----------|-------------|
| Neerslag        | grootste | Geen afbraak                           | Snelle afname                          | pover                                     | goed                                | goed      | meest       |
| NOM+Fe          | klein    | Stabiele afname                        | Stabiele afname                        | pover                                     | pover                               | pover     | gemiddeld   |
| NOM+Fe+polymeer | kleinste | Stabiele afname                        | Stabiele afname                        | pover                                     | gemiddeld                           | pover     | minst       |

Uit Tabel 1 blijkt dat de optimale roersnelheid sterk afhankelijk is van het type vlokmiddel dat wordt toegepast.

Ho et al. (Ho et al. 2010) stelden vast dat toevoeging van polyacrylamide (PAM), een veel gebruikt organische flocculant, heel geschikt is om de turbiditeit te verlagen. Helaas is dit materiaal slecht biodegradeerbaar. Daarom hebben zij pectine toegepast, dat een veel lagere molmassa heeft dan PAM ( $1,63 \cdot 10^5$  in plaats van  $6,00 \cdot 10^7$ ). Pectine bleek vooral goed te werken bij een pH van 3, een kationconcentratie van 0,55 mM en een pectineconcentratie

van 3 mg/L. Voor PAM bleken deze parameters een pH van 4, een kationconcentratie  $>0,05$  mM en een PAM concentratie tussen 13 en 30 mg/L, wat waarschijnlijk is veroorzaakt door de veel hogere molmassa van het PAM. Overigens heeft ook PAM geen Kiwa-watermerk.

Li et al. (Li et al. 2016) testten een op lignine gebaseerd flocculatiemiddel: lignine-diallyl dimethylammonium chloride-acrylamide (LDA). Het werd toegepast in combinatie met polyijzerchloride (PFC) en PAC. Op deze manier kon ongeveer 12-15% meer organisch koolstof worden verwijderd, maar dit is enkel op labschaal uitgetest. Fang et al. maakten gebruik van een op lignine gebaseerd kationische polymeer L-dAF, maar ook dit is slechts op heel kleine schaal uitgetest (Fang et al. 2010).

Kationische polyelektrolieten vormen een interessante groep van nieuwe vlokmiddelen. Bij toepassing ervan moet wel rekening worden gehouden met het effect van de pH. Verder zijn niet alle polyelektrolieten biodegradeerbaar. Voor grootschalige toepassing in de drinkwaterproductie is echter meer onderzoek nodig, en zouden deze materialen ook een keurmerk moeten hebben.

## 2.5 Effect van pré-oxidatie

Een methode om coagulatie (via PACl) te verbeteren is door pre-oxidatie toe te passen, bv. met behulp van breekpuntchloring. Voor de verwijdering van smaak, geur, kleur en de inactivering van micro-organismen is oxidatie met behulp van ozon een goede voorbehandeling (Matilainen et al. 2010). Factoren die het succes bepalen zijn de ozondosis, het type coagulans dat wordt toegepast en de eigenschappen van de verontreinigingen die in het water aanwezig zijn (Yan et al. 2007). Bij een lagere  $O_3$  dosis worden hydrofobe neutrale organische stoffen met een intermediaire molmassa gevormd, die efficiënt kunnen worden verwijderd tijdens het erop volgende coagulatieproces. Bij hogere  $O_3$  doses ontstaan echter meer hydrofiele en laagmoleculaire verbindingen, die juist minder goed te coaguleren zijn (Yan et al. 2007, Matilainen et al. 2010). Volgens Yan et al. bevordert pre-ozonisatie bij een lage dosis ozon (1,0 mg/L) de verlaging van de turbiditeit en de  $SUVA_{254}$  bij toepassing van  $FeCl_3$ , maar bij een hogere concentratie ozon (2,0 mg/L) heeft het nauwelijks meer effect op de verlaging van de  $SUVA_{254}$ -waarde, hoewel het dan nog wel de turbiditeit verlaagt. Bij toepassing in combinatie met PACl biedt pre-ozonisatie weinig voordelen, omdat het positief geladen polyaluminium toch wel in staat is de stoffen die bij ozonisatie ontstaan te neutraliseren. Bose en Reckhow zagen dat vooral bij fulvinezuren en kleine organische zuren ozonisatie leidt tot een verminderde adsorptie, terwijl bij hydrofiele neutrale verbindingen de adsorptie op aluminiumhydroxide wel toeneemt (Bose et al. 2007). Dit hangt waarschijnlijk samen met de sterkere carboxylzuurgroepen in fulvinezuren, en de vorming van relatief zwakke zuren in de neutrale verbindingen. Ook Chiang et al. geven aan dat ozonisatie bij hydrofoob NOM een gunstig effect heeft op de verwijdering door middel van alum (Chiang et al. 2009). Maar ook deze auteurs wijzen op het negatieve effect van een hogere ozondosis op de verwijdering van NOM.

Sadrnourmohamadi en Gorczyza (Sadrnourmohamadi et al. 2015) pasten ozon als voorbehandeling voor  $FeCl_3$  toe in water met 13,8 mg COD/L en 270 mg  $CaCO_3$ /L. Door toepassing van een ozondosis hoger dan 0,2 mg/mg DOC (in dit geval 0,8 mg/mg DOC) nam de  $SUVA_{254}$ -waarde met 86% af en werd 27% van het DOC verwijderd. Er is geen informatie bekend over gevormde bijproducten in dit proces. Ozon breekt niet alleen organische verbindingen af, maar destabiliseert ook deeltjes en zorgt voor een lagere calciumconcentratie. Yan et al. (Yan et al. 2007, Yan et al. 2009) (Yan et al. 2008) hebben een pilotonderzoek gedaan naar het effect van pre-ozonisatie op het coagulatieproces. Hierbij gebruikten ze een nieuw composietmiddel (HPAC), bestaande uit PACl en organische en anorganische additieven, en  $FeCl_3$ . Ook zij vonden dat bij een dosis van 1,0 mg  $O_3$ /L de

turbiditeit en  $SUVA_{254}$  verwijdering door  $FeCl_3$  verbeterden, terwijl bij 2 mg/L de  $SUVA_{254}$ -verwijdering significant afnam (turbiditeit werd wel nog effectief verwijderd). Bij HPAC was het effect van pre-ozonatie echter verwaarloosbaar. Bij  $FeCl_3$  ( $pH > 7,5$ ) wordt turbiditeit vooral verwijderd door adsorptie van deeltjes op het vers gevormde ijzerneerslag. De toename in negatieve lading verbetert dan de adsorptie en daarmee de verwijdering. Bij polymere Al-verbindingen zijn verschillende mechanismen (neutralisatie, adsorptie en brugvorming) bij de coagulatie betrokken, waardoor pre-ozonatie minder effectief is. Dit maakt dit proces ook niet geschikt voor toepassing in De Punt.

## 2.6 Alternatieve coagulatieprocessen

Een andere manier om coagulatie te veroorzaken, waarbij geen zouten worden toegevoegd, is elektrocoagulatie, waarbij oplosbare anodes van ijzer of aluminium worden toegepast, die oplossen als  $Fe^{2+}$  of  $Al^{3+}$  (Matilainen et al. 2010, Sillanpää et al. 2018). Deze ionen hydrolyseren dan verder tot polymere hydroxiden. Coagulatie treedt dan op als deze metaalkationen gecombineerd worden met negatieve deeltjes die via elektroforese naar de anode toe bewegen. Deze methode is sterk afhankelijk van de eigenschappen van de matrix, met name de geleidbaarheid en pH. Op lab-schaal is dit een keer uitgetest voor De Punt, maar toen bleek er veel extra zout nodig te zijn om voldoende elektrische geleidingsvermogen te verkrijgen.

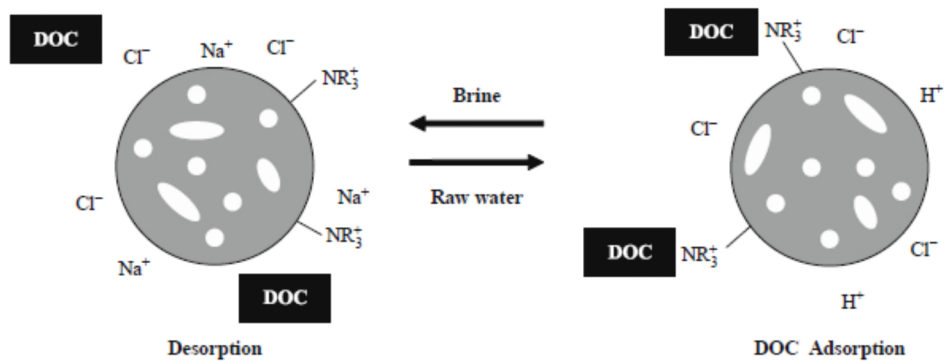
Liu et al. (Liu et al. 2016) beschrijven de vorming van een aeroob granulair slib met behulp van PACI en extracellulaire polymere verbindingen, die worden uitgescheiden door micro-organismen. De vorming van de deeltjes, die in dit onderzoek verschillende dagen in beslag nam, wordt beïnvloed door het entmateriaal, de samenstelling van het substraat, de pH, de temperatuur en de omstandigheden in de reactor. Verder spelen biopolymeren (als polysacchariden) een belangrijke rol in deze vorming, aangezien ze de oppervlakte-eigenschappen, als oppervlaktelading en hydrofobiciteit, van cellen veranderen. Toevoeging van metaalionen als  $Ca^{2+}$  en  $Mg^{2+}$  lijkt een positief effect te hebben, maar toevoeging van PACI is gunstiger.

Xu et al. (Xu et al. 2016) hergebruiken aluminium-humuszuurvlokken om NOM te verwijderen. In eerste instantie breken deze vlokken, maar tijdens de nieuwe vorming bevordert de aanwezigheid van humuszuren de verwijdering van DOC. Een probleem is echter dat toevoegen van humuszuren aan het drinkwaterzuiveringsproces in principe niet is toegestaan. Bovendien is het onderzoek alleen op labschaal uitgevoerd.

Filtratie over actieve kool en membraanfiltratie kunnen ook worden toegepast om NOM te verwijderen (Matilainen et al. 2010).

## 2.7 Alternatieve NOM-verwijdering

MIEX (magnetic ion exchange resin) kan worden toegepast om NOM te verwijderen. Hierbij worden micro deeltjes van de hars in een slurry gebruikt, om een zo groot mogelijk oppervlak voor adsorptie te creëren (Neale et al. 2009, Matilainen et al. 2010). Het principe is weergegeven in Figuur 6.



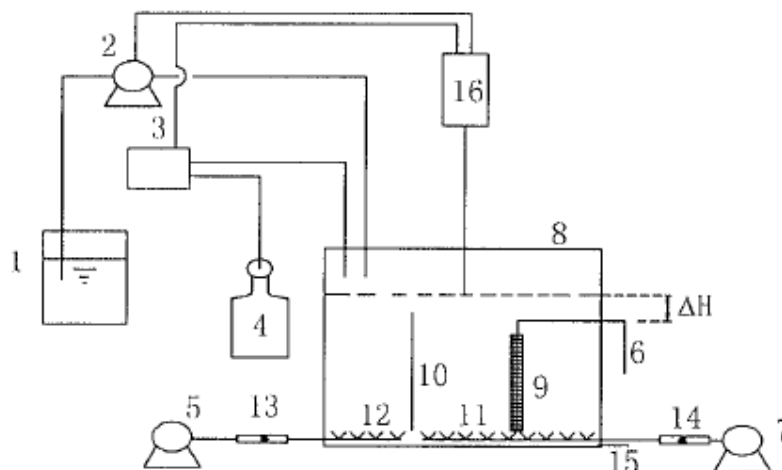
FIGUUR 6: ADSORPTIE EN DESORPTIE OP MIEX MET  $\text{NR}_3^+$  ALS QUATERNAIRE UITWISSELINGSPLEKKEN (NEALE ET AL. 2009)

Op deze manier kunnen sulfaat, nitraat, fosfaat en organische negatief geladen stoffen worden geadsorbeerd. Vanwege de hoge dichtheid en magnetische eigenschappen van de hars kunnen de deeltjes relatief eenvoudig worden verwijderd. Voorbehandeling met MIEX leidt tot een 60% lagere coagulantdosis. Bij toepassing in drinkwaterproductie blijft toevoegen van coagulatiemiddel wel nodig, omdat MIEX niet in staat is turbiditeit te verwijderen (Neale et al. 2009). Ook andere ionenwisselingsprocessen (zoals FIX: (fluidized ion exchange, en SIX (suspended ion exchange) zouden kunnen worden toegepast om geladen NOM te verwijderen.

Een andere behandelingstechniek om NOM en deeltjes uit water te verwijderen is "dissolved air flotation" (DAF) (Edzwald 1995, Khiadani et al. 2014). Hierbij worden deeltjes in de vloeibare fase met behulp van luchtbellen naar het oppervlak getransporteerd. Deze techniek wordt ook wel toegepast voor de verwijdering van bijvoorbeeld olie uit water (Megid et al. 2014). Ook bij DAF-processen kan flocculatiemiddel worden toegevoegd, maar het is niet altijd nodig, of er kan met een kleinere hoeveelheid worden volstaan. Voor de verwijdering van turbiditeit is deze techniek volgens Khiadani et al 10-15% effectiever dan een conventioneel coagulatie/flocculatie/sedimentatieproces, waardoor minder flocculatiemiddel nodig is (Khiadani et al. 2014). Het kenmerk van de gevormde vlokken is dat ze veel kleiner zijn dan vlokken die via sedimentatie worden verwijderd. In de door Khiadani beschreven experimenten bleek de concentratie PACI gehalveerd te kunnen worden voor de verwijdering van turbiditeit. Bovendien is de vaste stofconcentratie van het gevormde slib hoger. Edzwald had voldoende aan 23-27 mg  $\text{FeCl}_3$  voor de verwijdering van humuszuren en kleur uit water.

Bij DAF wordt lucht onder druk opgelost in water, en dan via een serie sproeikoppen op de bodem in het te behandelen water gebracht. Met name bij relatief lage temperaturen ( $< 20^\circ \text{C}$ ) werkt dit systeem goed, en ook bij vlokken met een relatief lage dichtheid. Een goede processturing is wel vereist om het optimale resultaat te behalen (Khiadani et al. 2014).

Bij dynamische membraanfiltratie wordt gebruik gemaakt van een fysische barrière, een membraan, waarop een afzetting wordt gevormd, die als een extra filter fungeert. Het gebruik van dynamische membraanfiltratie met flocculatie als voorbehandeling wordt beschreven door Xu et al. (Xu et al. 2014) (zie Figuur 7). De voordelen van dynamische membraanfiltratie ten opzichte van traditionele membraanfiltratie zijn dat de gebruikte materialen goedkoper zijn, een hogere flux kan worden behaald, en een effectievere filtratie mogelijk is. Deze auteurs hebben het systeem op labschaal getest (zie Figuur 7), maar dynamische filtratie wordt ook wel in de afvalwaterzuivering op full scale toegepast. In de opstelling van Xu et al. werd een flux van 100 L/m<sup>2</sup>h toegepast.



FIGUUR 7: SCHEMATISCHE OPSTELLING VAN DE LAB-OPSTELLING VOOR COAGULATIE/DYNAMISCHE MEMBRAANFILTRATIE (XU ET AL. 2014). 1 OPSLAGTANK VOOR RUW WATER, 2 PERISTATISCHE POMP VOOR INNAME, 3 PERISTATISCHE POMP VOOR DOSERING VLOKMIDDEL, 4 OPSLAGTANK VOOR VLOKMIDDEL, 5 POMP VOOR LUCHTTOEVOER, 6 PIJP VOOR EFFLUENT, 7 POMP VOOR LUCHTTOEVOER, 8 REACTOR, 9 MEMBRAANMODULE, 10 BAFFLE, 11 EN 12 LUCHTINLAAT, 13 EN 14 GASDEBIETMETERS, 15 PIJP VOOR SLIBAFVOER, 16 SENSOR VOOR WATERNIVEAU

Als alternatieve verwijderingstechniek voor NOM kan eventueel ook UF of NF worden toegepast. De verwijdering van NOM met behulp van UF is minder effectief, maar met NF-membranen werden goede resultaten verkregen (de la Rubia et al. 2008). Bij NF berust de verwijdering op molecuulgrootte, elektrostatistische interacties en hydrofobe interacties (Teixeira et al. 2011). Vooral in water met een hoge  $SUVA_{254}$  waarde (en dus relatief veel aromatisch NOM) kan via coagulatie verwijderd worden, maar voor water met een lage  $SUVA_{254}$  waarde is membraanfiltratie effectiever. Ook hier kan een vlokmiddel worden toegevoegd, maar het is niet altijd nodig, afhankelijk van de grootte van de deeltjes stoffen die moeten worden afgevangen. Als het wel wordt toegevoegd zijn veel lagere concentraties (ongeveer 80% lager) nodig dan bij conventionele coagulatie/flocculatie/sedimentatieprocessen. Loi-Brügger et al. passen coagulatie toe voor keramische membraanfiltratie (Loi-Brügger et al. 2006). Zij verwachten dat de extra kosten hiervan, bij een debiet  $>1000 \text{ m}^3/\text{uur}$   $< \text{€}0,10/\text{m}^3$  bedragen, maar dit kan sterk afhangen van lokale omstandigheden. Konieczny et al. rapporteren echter ook goede resultaten met een in-line coagulatie-UF proces, waarbij ze drie verschillende coagulanten hebben toegepast:  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  en  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , met respectievelijk 2,4 mg Fe/L, 2,8 mg Fe/L en 2,9 mg Al/L (ter vergelijking: in De Punt wordt 7 mg Al/L gedoseerd). Met aluminium werden de beste resultaten verkregen. Fouling van het membraan bleek wel voor te komen, maar bij een in-line proces minder dan bij alleen toepassing van UF. Dit komt doordat de filtercake die op het membraan wordt gevormd zelf ook een deel van het NOM opneemt. Bovendien bleek de fouling sterk afhankelijk van het type coagulant en membraan dat werd gebruikt. Bij  $\text{FeCl}_3$  trad meer fouling op dan bij  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  of  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , en in die laatste gevallen kon het membraan vrij eenvoudig worden schoongespoeld met water (Konieczny et al. 2009). Een dergelijk proces blijkt bij De Punt op pilotschaal ook goede resultaten te hebben laten zien. Ook Barbot et al. hebben een dergelijk hybride coagulatie-UF proces bestudeerd, waarbij de coagulatie leidt tot minder porieblokkering en een hogere effectiviteit van het terugspoelen



van het membraan. Met name bij een open vlokstructuur lijkt dit proces te werken, omdat de flux door het membraan dan minder afneemt (Barbot et al. 2008).

Yan et al. beschrijven ook de verwijdering van DOC in combinatie met ontharding. Normaal wordt NOM tijdens ontharding met kalkmelk slechts beperkt verwijderd. Dit hangt samen met de elektrostatische afstoting tussen het negatief geladen humuszuur en het eveneens negatief geladen  $\text{CaCO}_3$ -kristaloppervlak. Het oppervlak van  $\text{Mg(OH)}_2$ -neerslag is daarentegen positief geladen en heeft een amorfe structuur met een groter specifiek oppervlak. Het slaat echter vooral neer bij een  $\text{pH} > 11$ , wat in drinkwaterbehandeling onpraktisch is. Door PACl toe te voegen aan het onthardingsproces blijkt NOM-verwijdering wel te kunnen worden bevorderd bij een  $\text{pH} < 10$  (Yan et al. 2009).

### 2.8 Ontwaterbaarheid

Verrelli et al. (Verrelli et al. 2009, Verrelli et al. 2010) hebben de ontwaterbaarheid van slib bestudeerd. Hierbij pasten ze indikken, centrifugeren en filtratie toe. Het NOM, de dosis coagulant en de pH bleken effect te hebben op zowel de snelheid waarmee ontwatering plaatsvond als het mate van ontwatering, zowel bij toepassing van  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  als van  $\text{FeCl}_3$ . Bij een hogere dosis coagulant wordt materiaal snel ingevangen in vlokken, die daardoor lossere aggregaten vormen, en dus moeilijker te ontwateren zijn. Toepassing van een lagere dosis is dan gunstig. Ook de vorm van de aggregaten speelt een rol in de ontwaterbaarheid. Over het algemeen blijkt een verlaging van de pH van 8 naar 6 gunstig te zijn voor de ontwaterbaarheid, omdat bij pH 8 de vlokken een lagere dichtheid hebben. De auteurs hebben de ontwaterbaarheid van een aantal verschillende slibmonsters vergeleken aan de hand van een model. De eigenschappen variëren per locatie en op één locatie in de tijd.

## 3 Scenario-keuze voor De Punt

### 3.1 Ideeën om het probleem bij De Punt op te lossen

Het probleem bij De Punt is dat het gevormde Al-houdende slib heel moeilijk te ontwateren is. Waarschijnlijk hebben de gevormde vlokken een relatief open structuur, en bestaat het organische materiaal vooral uit micro-organismen (informatie van WLN), waardoor het water er moeilijk uit te verwijderen is. Op grond van het literatuuronderzoek in hoofdstuk 2 zijn verschillende oplossingsstrategieën denkbaar. Die zijn hieronder weergegeven.

#### 1. Vlokken breken.

Een techniek als hydrodynamische cavitatie wordt op het ogenblik onderzocht om de ontwaterbaarheid van RWZI-slib te verbeteren. Deze techniek bestaat wel op pilotschaal, maar is nog niet beschikbaar voor een full scale drinkwaterinstallatie. Bovendien is het de vraag of de ontwaterbaarheid van het slib hiermee voldoende verbetert. Door een poreuze vlok in enkele stukken te breken neemt de porositeit van de brokstukken natuurlijk niet af. Er zal vrij veel onderzoek nodig zijn om de toepasbaarheid van deze techniek in de praktijk te kunnen vaststellen. Bovendien is het op dit moment niet mogelijk een realistische kostenraming te maken, omdat de techniek nog vrij nieuw is.

#### 2. Alternatief flocculatiemiddel.

In het algemeen blijkt PACl effectiever te werken dan  $\text{FeCl}_3$  of  $\text{AlCl}_3$ . Wel zijn er diverse alternatieven voor PACl in de literatuur beschreven, zoals PDADMAC (poly(diallyldimethylammoniumchloride)), lignine-diallyldimethylammoniumchloride-acrylamide, polyacrylamine (PAM), pectine, lignine, en klei (om turbiditeit te verwijderen). Veel van deze middelen zijn nog alleen op labschaal uitgetest, en ook nog niet op grote schaal verkrijgbaar. Bovendien zijn ze vaak erg duur. Combinaties met  $\text{SiO}_2$  lijken succesvol te kunnen zijn, maar ook hier zijn de meeste testen alleen op labschaal uitgevoerd, en blijkt het systeem gevoelig te kunnen zijn voor pH (positief effect bij pH=6, geen verbetering van pH=7). Een aluminium-silicaat polymeer composietmateriaal (PASiC) leek op labschaal goede resultaten te geven, maar bleek niet stabiel tijdens opslag.

Testen die in het verleden zijn uitgevoerd bij De Punt met ijzer als vlokmiddel gaven geen verbeteringen te zien.

Er is ook, in het kader van een ander project, onderzoek gedaan naar mogelijk "hergebruik" van slib. Het idee hierbij is om het neerslag met behulp van zuur te hydrolyseren, en dan opnieuw in te zetten als vlokmiddel. Maar omdat hierbij eerder geadsorbeerde humuszuren zouden kunnen vrijkomen uit het materiaal, is dit systeem mogelijk niet geschikt voor toepassingen in drinkwaterzuivering. In de literatuur wordt het om deze reden vooral ingezet in afvalwaterzuivering.

#### 3. Voorbehandeling van het water vóór flocculatie

Een voorbehandeling met ozon kan heel effectief zijn, maar dat hangt sterk af van de gebruikte ozondosis. Bij een te hoge ozondosis wordt de verwijdering van NOM zelfs slechter. Of deze techniek werkt en wat de optimale ozondosis is hangt sterk af van de samenstelling van het NOM. Dit betekent ook dat het systeem erg gevoelig zal zijn voor

wisselingen in de NOM-samenstelling en -concentratie. Bovendien kunnen door oxidatie bijproducten en transformatieproducten worden gevormd, die mogelijk schadelijk zijn. Dit zou getest moeten worden, en eventueel is een (extra) filtratiestap nodig om dergelijke producten te verwijderen.

#### 4. Elektrocoagulatie

Er is op het ogenblik vrij veel aandacht voor deze techniek, maar voorlopig is hij alleen nog op kleine schaal uitgetest. Een probleem hierbij vormt het stoftransport van en naar de elektroden. Dit probleem kan wel worden opgelost door een groot aantal elektrodes te plaatsen, waardoor de afstand tussen de elektrodes kleiner wordt, maar daardoor stijgen de kosten aanzienlijk (Matilainen et al. 2010, Hutcherson 2015, Sillanpää et al. 2018). Eerdere experimenten bij De Punt lieten zien dat er relatief veel zout moest worden toegevoegd om voldoende elektrische geleidbaarheid te verkrijgen.

#### 5. Dissolved air flotation (DAF)

DAF zou kunnen worden toegepast al dan niet in combinatie met een flocculant. Uit de literatuur blijkt dat hierbij het slibvolume tot ongeveer de helft zou moeten kunnen worden teruggebracht (Edzwald 1995, Khiadani et al. 2014, Megid et al. 2014). Khiadani et al. Halverden de hoeveelheid vlokmiddel die ze nodig hadden voor de verwijdering van turbiditeit in vergelijking tot de hoeveelheid die nodig was bij coagulatie/flocculatie/sedimentatie. Edzwald gaf aan dat 23-27 mg  $\text{FeCl}_3$  nodig te hebben in water met een DOC-gehalte van 4,6 mg/L, om volledige verwijdering van kleur te bewerkstelligen. Dit komt overeen met ongeveer  $1,54 \cdot 10^{-4}$  mol  $\text{Fe}^{3+}$ /L, terwijl in De Punt  $2,60 \cdot 10^{-4}$  mol  $\text{Al}^{3+}$ /L wordt toegepast.

Op basis van deze gegevens is in dit rapport aangenomen dat bij toepassing van DAF ongeveer de helft van de hoeveelheid vlokmiddel nodig zou moeten zijn in vergelijking met het huidige proces. Of deze aanname in de praktijk inderdaad juist is zou experimenteel moeten worden vastgesteld>

#### 6. Membraanprocessen

Hierbij zou gedacht kunnen worden aan toepassing van capillaire NF of aan UF. In beide gevallen moet een oplossing worden gevonden voor behandeling en afvoer van het gevormde concentraat. Een interessante vraag is of er een vlokmiddel nodig is in dit geval (Futselaar et al. 2002, Futselaar et al. 2005, Jamil et al. 2013, Xu et al. 2015). Een bijkomend voordeel van NF is dat ook organische microverontreinigingen worden verwijderd. Bij de beschouwing van alternatieve processen voor De Punt is het totale proces t/m de filtratie over actieve kool bekeken. Actieve kool is wel nog in het verdere proces meegenomen, aangezien we dat proces niet hebben aangepast en bovendien vanwege marmerfiltratie of UV het nog nuttig kan zijn bepaalde stoffen af te vangen. Wel zou dit kunnen betekenen dat de actieve kool een langere standtijd krijgt, waardoor het proces goedkoper wordt en de milieu-impact kleiner. Capillaire nanofiltratie wordt volgens Pentair momenteel al op grote schaal in waterzuivering toegepast.

#### 7. Ionenwisseling

Aangezien NOM vaak voor een belangrijk deel uit humuszuren bestaat zou IEX geschikt kunnen zijn om een groot deel van het NOM te verwijderen (Grefte 2013, Grefte et al. 2013, Grefte et al. 2014, Arias-Paic et al. 2016, Bazri et al. 2016). Door de hars gesuspendeerd toe te passen zou deze techniek rechtstreeks op het oppervlaktewater toepasbaar kunnen zijn

(Zonder voorfilter) (Bazri et al. 2016). Hierbij ontstaat echter een geconcentreerde zoutoplossing, afkomstig van de regeneratie, waarvoor een oplossing gevonden zal moeten worden.

### 3.2 Uitgewerkte scenario's voor de Punt

Het verzoek was om een aantal scenario's uit te werken en te vergelijken, om te zien of er een interessant alternatief mogelijk zou kunnen zijn voor het huidige coagulatie/flocculatie/sedimentatieproces bij de Punt. De randvoorwaarde was wel dat deze scenario's gebaseerd zouden moeten zijn op bewezen technologie. Daarom zijn in dit overzicht geen experimentele technieken meegenomen, die nog niet op grote schaal bewezen toepasbaar zijn.

Voor de vergelijking is uitgegaan van het huidige proces (scenario 1), waar drie verschillende scenario's naast zijn gezet. Deze scenario's zijn hieronder in detail weergegeven (Tabel 2).

TABEL 2: SCENARIO'S DIE IN DEZE STUDIE ZIJN VERGELEKEN

| Scenario 1              | Scenario 2              | Scenario 3                | Scenario 4                |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Inname                  | Inname                  | Inname                    | Inname                    |
| Pompen                  | Pompen                  | Pompen                    | Pompen                    |
| Mengbekken              | Mengbekken              | Mengbekken                | Mengbekken                |
| Pompen                  | Pompen                  | Pompen                    | Pompen                    |
| zuurdosering (HCl)      | zuurdosering (HCl)      | coagulatie/flocculatie/   | Cap. NF                   |
| coagulatie/flocculatie/ | coagulatie/flocculatie/ | sedimentatie              | AKF                       |
| sedimentatie            | sedimentatie            | Cap. NF                   | loog dosering             |
| dubbellaagsfilter       | DAF                     | AKF                       | UV desinfectie            |
| AKF                     | Dubbellaagsfilter       | toevoeging loog           | Marmerfiltratie           |
| pH correctie met        | AKF                     | UV desinfectie            | CO <sub>2</sub> -dosering |
| behulp van loog         | pH correctie met loog   | marmerfiltratie           | LZF                       |
| UV desinfectie          | UV desinfectie          | CO <sub>2</sub> -dosering | beluchting cascade        |
| LZF                     | LZF                     | LZF                       | reinwater                 |
| beluchting cascade      | beluchting cascade      | beluchting cascade        |                           |
| reinwater               | reinwater               | reinwater                 |                           |

Uit de literatuur bleek dat de benodigde hoeveelheid vlokmiddel bij toepassing van DAF ongeveer de helft zou kunnen zijn van wat bij sedimentatie nodig is. Of dit in de praktijk klopt zou experimenteel moeten worden vastgesteld, maar voor deze studie is aangenomen dat de hoeveelheid ongeveer de helft zal zijn. Daarom is in scenario 2 uitgegaan van een toevoeging van 50% van de hoeveelheid PACl die in scenario 1 wordt gebruikt. De hoeveelheden HCl en NaOH die voor pH-aanpassing nodig zijn zijn wel gelijk gehouden.

In scenario 3 wordt capillaire NF toegepast, waarbij wel nog een kleine hoeveelheid vlokmiddel wordt toegevoegd. Het betreft hier 20% van de in scenario 1 gebruikte hoeveelheid PACl, gebaseerd op literatuurgegevens (Futselaar et al. 2002, Futselaar et al. 2005, Jamil et al. 2013). De hoeveelheden HCl en NaOH zijn hierop aangepast. Aangezien bij toepassing van NF alle calcium uit het water wordt verwijderd, is een marmerfiltratie aan het proces toegevoegd om aan de eisen voor drinkwater te kunnen voldoen, en een CO<sub>2</sub>-dosering. De benodigde hoeveelheden zijn uitgerekend met behulp van AquaCalc.

In scenario 4 wordt geen vlokmiddel meer toegepast en uitsluitend capillaire NF gebruikt. Ook hier is een marmerfiltratie aan het proces toegevoegd, en zijn de benodigde hoeveelheden zuur en loog berekend met behulp van AquaCalc.

In Bijlage I zijn de gegevens van de verschillende scenario's weergegeven die zijn gebruikt voor de TCO- en LCA-berekeningen.

Een extra punt van aandacht vormt de behandeling van slib en concentraat. Een overzicht van de hoeveelheden die per scenario vrijkomen is weergegeven in Tabel 3.

TABEL 3: HOEVEELHEDEN SLIB EN CONCENTRAAT (TON/JAAR) DIE VRIJKOMEN BIJ DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S BIJ EEN RECOVERY VOOR NF VAN 80%.

|             | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3           | Scenario 4           |
|-------------|------------|------------|----------------------|----------------------|
| Concentraat | nvt        | nvt        | 1386*10 <sup>3</sup> | 1386*10 <sup>3</sup> |
| Slib *)     | 13.000     | 9476       | 7572 <sup>1)</sup>   | 5950 <sup>1)</sup>   |
| Aluminium   | 141        | 71         | 32                   | 0                    |

\*) Ingedikt concentraat. De kosten van indikking zijn in dit overzicht niet meegenomen, omdat op dit moment volstrekt onduidelijk is hoe hoog deze kosten zouden zijn. Dit punt is daarom kwalitatief meegenomen in de parameter "waterkwaliteit en reststromen" in de MCA.

Slib bevat slechts ongeveer 2 - 2,5% vaste stof en de rest is water. Bij toepassing van nanofiltratie komt een grotere stroom concentraat vrij. Momenteel (in scenario 1) wordt het spoelwater na slibverwijdering hergebruikt door het terug te pompen naar het mengbekken. Dit zou ook van toepassing zijn voor scenario 2. Dit kan echter niet bij de scenario's 3 en 4. Hiervoor zou de huidige spoelwaterverwerking moeten worden uitgebreid met bijvoorbeeld een UF, en lozing van het concentraat (na verwijdering van het slib) op het Noord-Willemskanaal. Hiervoor zou een afvoerleiding aangelegd moeten worden. Deze kosten zijn in dit rapport niet meegenomen, omdat het lastig is hier een betrouwbare inschatting van te geven. Net als in het geval van het NF-concentraat is deze parameter kwalitatief meegenomen in de MCA onder de noemer "waterkwaliteit en reststromen".

## 4 Levenscyclusanalyse

### 4.1 Keuze van systeemgrenzen en functionele eenheid

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. 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). In de hier gerapporteerde analyse komen 1.000 ecopunten (Pt) overeen met de milieu-impact van één West-Europees persoon per jaar, zoals ook in de literatuur wordt aangegeven (Baayen 2000).

Voor de LCA-berekeningen hebben we alleen “consumables” van de chemicaliën in aanmerking genomen, niet de eventuele bouw van installaties en aanleg van leidingen. Het is namelijk erg lastig een goede en eerlijke vergelijking te maken van de milieu-impact van een al lang bestaand systeem met een nog aan te leggen systeem.

Er zijn vier scenario's doorgerekend (zie ook hoofdstuk 3):

1. Huidige situatie; 0,0206 kg PACl/m<sup>3</sup> water
2. Dosering van PACl, gevolgd door DAF; 0,0103 kg PACl/m<sup>3</sup> water
3. Dosering van PACl, gevolgd door capillaire NF; 0,004 kg PACl/m<sup>3</sup> water
4. Geen PACl-dosering, wel capillaire NF

Een uitgebreide beschrijving van de totale processen is gegeven in hoofdstuk 3. Op basis van literatuurgegevens is de hoeveelheid coagulatiemiddel voor DAF en NF verlaagd van 0,0206 kg/m<sup>3</sup> drinkwater naar 0,0103 kg/m<sup>3</sup> voor DAF en 0,004 of 0 kg/m<sup>3</sup> voor NF.

Als functionele eenheid is in dit systeem gekozen voor 1 m<sup>3</sup> water die uit de AKF komt. Verder is het systeem doorgerekend vanaf de pompen voor de inname van het water uit de Drentsche Aa, t/m de filtratie over actieve kool.

Het is objectiever om de milieu-impact uit te drukken in ecopunten in plaats van in CO<sub>2</sub>-voetafdruk, omdat in dat laatste geval bepaalde milieu-effecten, zoals het gebruik van chemicaliën en grond, niet worden meegenomen in de berekening. Op deze manier worden deze andere milieu-effecten wel verdisconteerd. Voor de volledigheid zijn de systemen echter ook doorgerekend op basis van hun CO<sub>2</sub>-voetafdruk.

Voor de zandfilters is uitgegaan van zand dat geleverd wordt door Aquatechniek in Hellevoetsluis. Voor de transportafstand hebben we de afstand genomen van Hellevoetsluis tot de Punt. Het zand zelf is zeer waarschijnlijk van elders afkomstig, maar dat transport maakt dan deel uit van een eventuele LCA-berekening voor Aquatechniek, en valt buiten de grenzen van ons systeem. Een vergelijkbare aanpak is gehanteerd voor het marmer dat voor de marmerfiltratie in scenario's 3 en 4 nodig is, en waarvoor ook alleen is gerekend met de afstand vanaf de leverancier.

Het slib wordt gestort, en hiervoor hebben we aangenomen dat dit in de buurt van het waterbedrijf zal zijn (transportafstand 10 km). Het blijkt dat het programma aluminium(hydr)oxide als een inerte component beschouwt, en hier geen punten aan toekent. Dit is uiteraard niet geheel juist. De enige aluminiumhoudende component die wel strafpunten oplevert bij storting is aluminiumfosfide. Dit is een insecticide en rodenticide, dat bij gebruik leidt tot de vorming van fosfine. Het bleek dat de milieu-impact van het fosfide daardoor enorm groot was, en zeker niet vergelijkbaar met die van het aluminiumhoudende slib. Daarom is toch gewerkt met een impact "0" voor het storten van aluminiumhoudend slib, hoewel dat in feite zeer waarschijnlijk niet geheel juist is. Om uiteindelijk hier toch een waarde aan toe te kennen in de MCA is dit onderdeel meegenomen in het criterium "waterkwaliteit en reststromen".

Aangezien UV-lampen niet in de LCA-database voorkomen, hebben we de invloed van het kwik in de lampen meegenomen in de berekeningen.

#### 4.2 Resultaten van LCA

Alle berekeningen zijn uitgevoerd met twee typen stroom:

- Marktconforme stroom, zoals die gemiddeld in Nederland wordt gebruikt.
- Groene stroom, gebaseerd op windenergie.

Omdat de meeste drinkwaterbedrijven proberen over te gaan op (zoveel mogelijk) groene stroom, zijn die laatste berekeningen waarschijnlijk het meest realistisch. In dit hoofdstuk zijn dan ook voornamelijk de resultaten op basis van groene windenergie weergegeven. Ter vergelijking zijn de resultaten op basis van marktconforme energie weergegeven in Bijlage II.

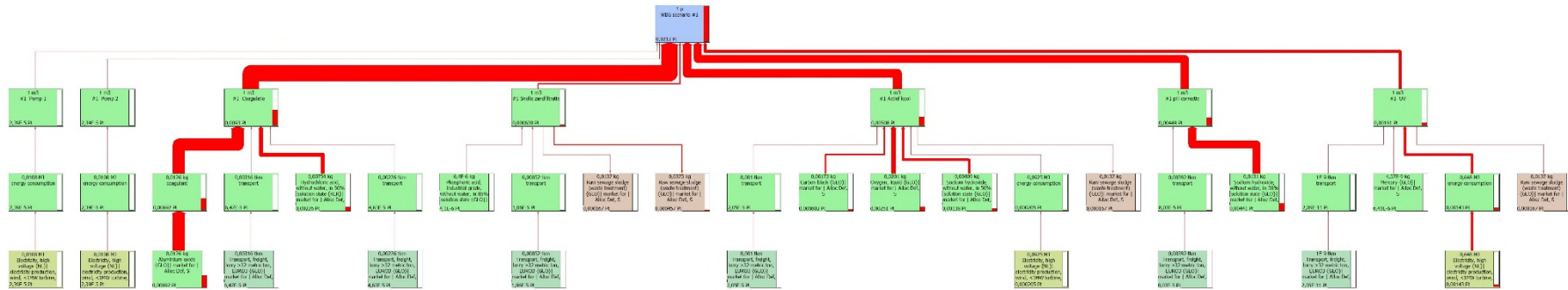
Een overzicht van alle processen, en hun relatieve impact op het milieu is gegeven in Figuur 8. De relatieve impact van de verschillende onderdelen van de scenario's wordt weergegeven door de dikte van de rode lijnen. Dit betekent dat in scenario 1 de grootste impact wordt veroorzaakt door het coagulatieproces, gevolgd door filtratie over actieve kool en pH-correctie, die een vergelijkbare invloed hebben. De impact van UV-desinfectie is veel kleiner, en die van de benodigde pompenergie is vrijwel verwaarloosbaar ten opzichte van de impact van de coagulatie. In scenario 2 heeft het actieve koolproces een vergelijkbare impact als coagulatie, doordat minder coagulant wordt gebruikt. Uiteraard is dit resultaat afhankelijk van hoeveel vlokmiddel er in de praktijk echt nodig zou zijn, maar dat zou experimenteel moeten worden vastgesteld (hier is aangenomen dat het 50% van de huidige hoeveelheid zou zijn, maar dit is niet zeker). Daarna komt de impact van de pH-correctie, de UV-desinfectie en tenslotte het DAF-proces. In scenario 3 heeft nanofiltratie (NF) relatief de grootste impact, gevolgd door pH-correctie en filtratie over actieve kool. Daarna komen achtereenvolgens de impact van UV-desinfectie, coagulatie en marmerfiltratie. De impact van het coagulatieproces is hier relatief veel kleiner dan in de andere twee scenario's, wat wordt veroorzaakt doordat veel minder coagulant nodig is. In het vierde scenario wordt door grootste relatieve impact veroorzaakt door NF, gevolgd door pH-correctie. Daarna komen achtereenvolgens actieve kool, UV-desinfectie en marmerfiltratie.

In Bijlage II zijn de boomdiagrammen op basis van marktconforme energie weergegeven. Hier komt een heel ander beeld uit naar voren. Bij scenario 1 wordt dan de grootste impact gezien bij de UV desinfectie. In vergelijking hiermee zijn de effecten van actieve kool en coagulatie (die beide ongeveer vergelijkbaar zijn) kleiner op het totaal. De invloed van pH-correctie is hier relatief klein in vergelijking met de invloed indien van groene energie wordt uitgegaan. Bij scenario 2 wordt ook de grootste impact gezien bij UV, gevolgd door achtereenvolgens DAF, actieve kool en coagulatie, met een heel kleine impact van pH-

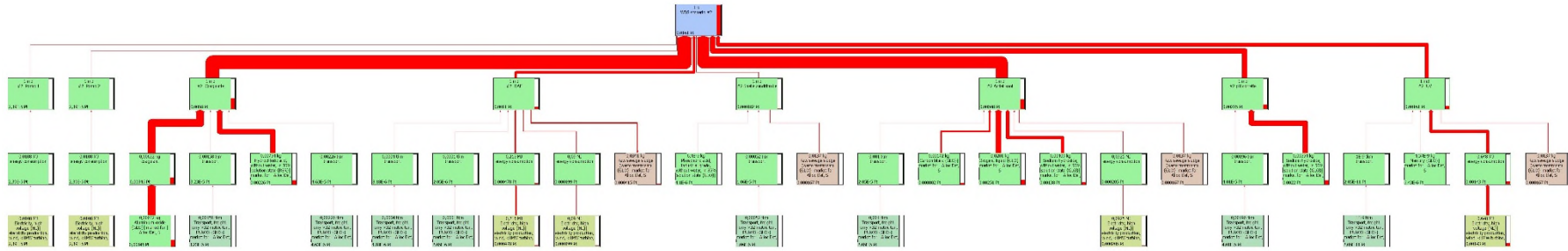
correctie. In scenario 3 en 4 wordt de grootste impact veroorzaakt door NF, gevolgd door een veel kleinere impact door op de eerste plaats UV-desinfectie en vervolgens filtratie over actieve kool. Hierin komt de impact van het gebruik van energie duidelijk naar voren. Bij gebruik van windenergie draagt die component veel minder bij aan de totale impact, waardoor andere factoren, als bijvoorbeeld gebruik van chemicaliën of iets dergelijks, een veel belangrijker rol gaan spelen in de totale impact.



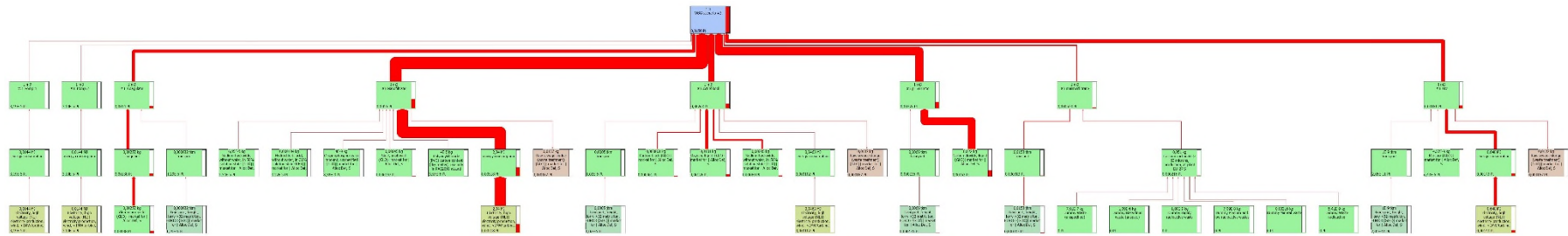
Scenario 1



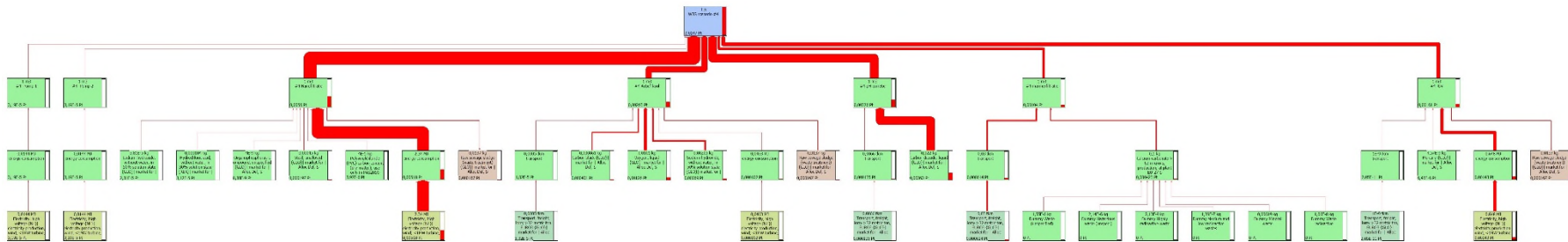
Scenario 2



### Scenario 3



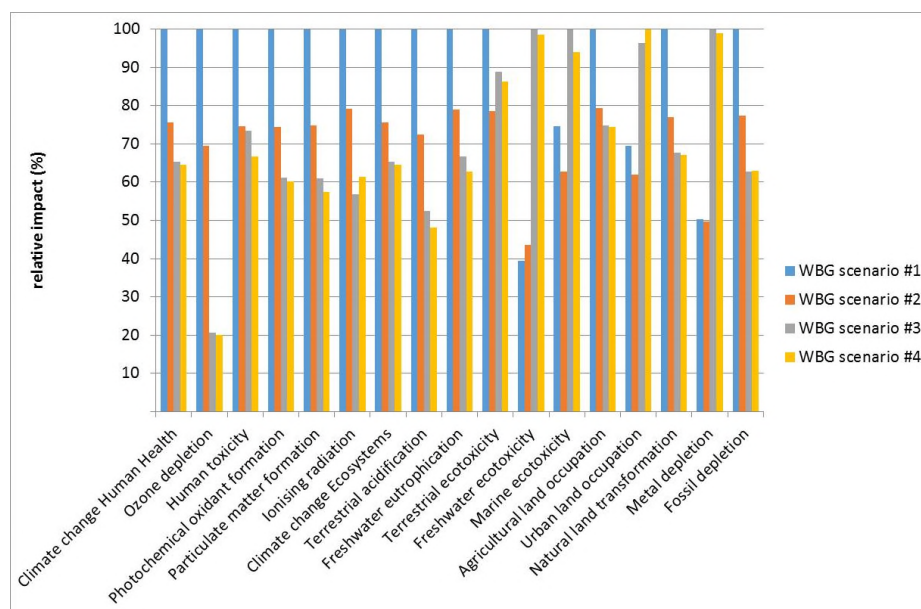
Scenario 4



FIGUUR 8: PROCESSEN IN DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S EN HUN RELatieve IMPACT OP HET MILIEU. DE DIKTE VAN DE RODE LIJNEN GEEFT DE IMPACT AAN. VAN BOVEN NAAR BENEDEN SCENARIO 1 T/M 4. DE IMPACT IS HIER BEREKEND OP BASIS VAN WINDENERGIE.

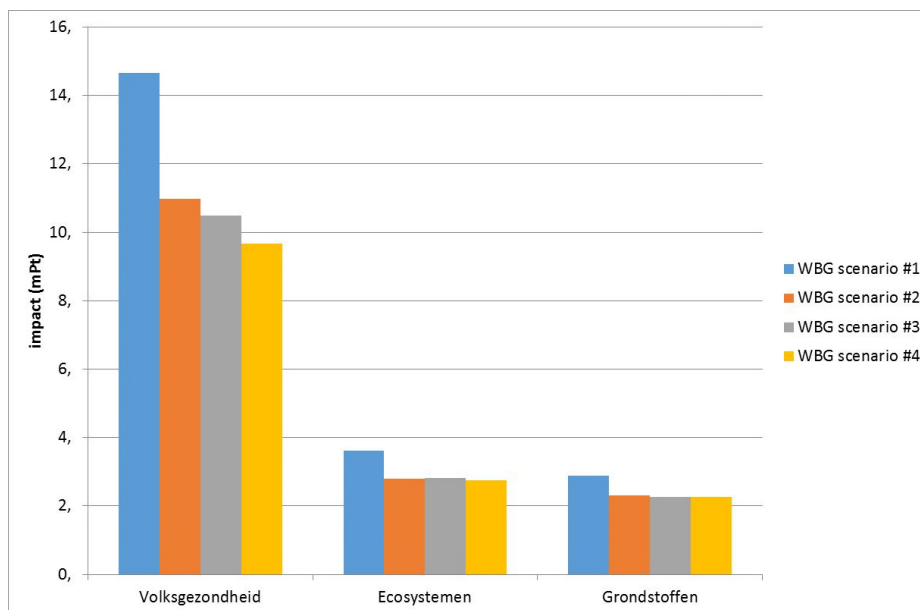
In Figuur 9 is de relatieve impact weergegeven op diverse milieuterreinen. Voor elke parameter is de hoogste impact op 100% gesteld, en zijn de invloeden van de andere scenario's hieraan gerelateerd. Uit deze figuur kan worden geconcludeerd dat bijna in alle gevallen scenario 1 de hoogste impact geeft. Alleen op het gebied van zoet en zout water ecotoxiciteit en uitputting van metalen scoort scenario 3 het hoogste, direct gevolgd door scenario 4, wat logisch is, aangezien het verschil slechts bestaat uit het minder toepassen van coagulatiemiddel. Scenario 4 lijkt de meeste impact te hebben bij de parameter stedelijk landgebruik. Dit heeft te maken met de achtergrondinformatie in de gebruikte database.

Bij gebruik van marktconforme energie (zie Figuur 16 in Bijlage II) is dit beeld anders, en hebben in alle gevallen scenario 3 en 4 de hoogste, meestal vergelijkbare, impact. Vooral op het gebied van klimaatverandering/volksgezondheid, ioniserende straling, klimaatverandering/ecosystemen, agrarisch landgebruik en de uitputting van metalen en fossiele brandstoffen, scoren scenario 1 en 2 in dit geval veel beter.



FIGUUR 9: KARAKTERISERING VAN DE IMPACT VAN DE VIER VERSCHILLENDE SCENARIO'S OP DIVERSE TERREINEN BIJ GEBRUIK VAN WINDENERGIE. DE HOOGSTE IMPACT IS GENORMEERD OP 100%

De impact op drie milieuterreinen (volksgezondheid, ecosystemen en grondstoffen), uitgedrukt in ecopunten, is weergegeven in Figuur 10. De bijbehorende single point grafiek is weergegeven in Bijlage III.



FIGUUR 10: MILIEU-IMPACT VAN VERSCHILLENDE SCENARIO'S OP BASIS VAN GROENE ENERGIE, UITGEDRUKT IN mPt.

Hieruit blijkt dat de impact van het huidige proces over het algemeen iets groter lijkt dan die van de andere drie scenario's. De impact van het vierde proces lijkt iets gunstiger te zijn dan de andere processen, hoewel de verschillen klein, en voor ecosystemen en grondstoffen nauwelijks significant zijn.

Bij gebruik van marktconforme stroom (zie Bijlage II) is het beeld totaal anders, en komen de beide NF-processen duidelijk veel ongunstiger uit de bus. Dit wordt veroorzaakt door het gebruik van fossiele brandstoffen.

Deze uitkomst wordt, zoals eerder vermeld, echter vertekend door het feit dat aan het storten van aluminiumslib in Simapro geen negatieve waarde wordt toegekend, omdat dat effect niet in het model is verwerkt. Daardoor lijkt het huidige proces milieutechnisch veel beter te scoren dan het in werkelijkheid waarschijnlijk doet. Het is immers bekend dat de aanwezigheid van aluminium in het milieu schadelijk kan zijn (Rosseland et al. 1990).

Om de verschillen weer te geven zijn de analyses van alle scenario's op basis van zowel groene als marktconforme stroom weergegeven in Tabel 4.

TABEL 4: IMPACT (mPt) OP VERSCHILLENDE MILIEUTERREINEN VAN DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S OP BASIS VAN ZOWEL WIND- ALS MARKTCONFORME ENERGIE. HET EFFECT VAN HET STORTEN VAN  $Al_2O_3$  WORDT HIERIN ONDERSCHAT.

| Energie      | scenario | volksgezondheid | ecosystemen | grondstoffen | totaal |
|--------------|----------|-----------------|-------------|--------------|--------|
| groen        | 1        | 9,9             | 2,5         | 2,0          | 14,4   |
|              | 2        | 7,7             | 2,0         | 1,7          | 11,4   |
|              | 3        | 8,1             | 2,2         | 1,9          | 12,2   |
|              | 4        | 7,1             | 2,0         | 1,7          | 10,8   |
| marktconform | 1        | 20,6            | 6,7         | 6,9          | 34,2   |
|              | 2        | 22,8            | 7,9         | 8,5          | 39,2   |
|              | 3        | 42,8            | 15,7        | 17,5         | 76     |
|              | 4        | 41,8            | 15,5        | 17,3         | 74,6   |

De impact van de scenario's op basis van marktconforme stroom blijkt circa 3-4 keer zo groot als die van de scenario's die zijn gebaseerd op groene stroom (windenergie).

Zoals hierboven al vermeld, is de impact ook uitgerekend op basis van de  $CO_2$ -uitstoot. In Tabel 5 is deze impact vergeleken met de impact uitgedrukt in ecopunten.

TABEL 5: MILIEU-IMPACT IN PT EN  $KG CO_2$  VOOR ALLE VIER DE SCENARIO'S

| Scenario            | 1     | 2     | 3     | 4     |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| Impact (mPt)        | 21,16 | 16,07 | 15,59 | 14,70 |
| Impact (kg $CO_2$ ) | 12,76 | 12,75 | 12,75 | 12,75 |

Uit Tabel 5 blijkt dat er tussen de verschillende scenario's vrijwel geen verschil is te zien in de impact uitgedrukt in  $kg CO_2$ . Dit wordt veroorzaakt door het feit dat in alle scenario's evenveel actieve kool wordt toegepast, en dit proces verreweg de belangrijkste bijdrage levert aan de  $CO_2$ -voetafdruk: 99,7% van de  $CO_2$ -voetafdruk wordt namelijk bepaald door de toepassing van actieve kool, waardoor het effect van de andere processen eigenlijk pas in de derde decimaal zichtbaar wordt. Hieruit blijkt dat het in dit geval dus niet zinvol is de milieupact op basis van de  $CO_2$ -voetafdruk te bepalen, en dat ecopunten een veel breder effect laten zien.

## 5 Total cost of ownership (TCO)

### 5.1 Gegevens van de verschillende scenario's

Voor het maken van een kosteninschatting voor de vier verschillende scenario's (zie hoofdstuk 5) is het handboek kosten kleinschalige waterbehandeling van DHV gebruikt. Om de TCO te berekenen is een 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. In Bijlage IV wordt de gebruikte methode in detail beschreven. De nauwkeurigheid van deze methode wordt op ongeveer 30% geschat.

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 (over een totale periode van 60 jaar) wordt vervolgens de contante waarde berekend en daarna wordt het geheel gesommeerd tot de TCO.

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 webgebaseerde Kostenstandaard van Royal HaskoningDHV. Naast de bouwkosten zijn ook de voorbereidings- en bijkomende kosten bepaald. Alle kostenposten samen vormen de investeringskosten.

De processen die zijn doorgerekend zijn weergegeven in Figuur 11.

Details van de berekeningen zijn weergegeven in Bijlage IV. Hierin zijn ook de gebruikte kentallen en dergelijke te vinden.





| Scenario 2             | Flotatie |           |                   |      | Weerstanden leidingen |  |       |      | Zuiveringsprocessen        |                            |  |  | Doseringen                  |                             |  |  | RHDHV Kostencalculator Drinkwater |             |  |
|------------------------|----------|-----------|-------------------|------|-----------------------|--|-------|------|----------------------------|----------------------------|--|--|-----------------------------|-----------------------------|--|--|-----------------------------------|-------------|--|
| Nominale productie     |          | 791,1     | m3/h              | 6,93 | Mm3/j                 | Uitgangspunten Hydraulica              |       |      |                            | Coagulatie                 |  |  |                             | HCl dosering                |  |  |                                   | Bouwkosten  |  |
| Ontwerpcapaciteit      |          | 900       | m3/h              |      |                       | Temperatuur                            | 10    | °C   | Capaciteit per bassin      |                            |  |  | Dosering HCl                |                             |  |  | Civiel                            |             |  |
| Piekfactor zuivering   |          | 1,1377    |                   |      |                       | Wandruwheid                            | 5     | mm   | Aantal                     |                            |  |  | Concentratie HCl            |                             |  |  | WTB                               |             |  |
| pomprenement           |          | 75%       |                   |      |                       | Leiding van Innamewerk naar mengbekken |       |      |                            | Volume                     |  |  |                             | Verbruik HCl                |  |  |                                   | ELEK        |  |
|                        |          |           |                   |      |                       | Lengte                                 | 2.000 | m    | Verblijftijd               |                            |  |  | Verbruik HCl                |                             |  |  | Bouwkosten Zuivering              |             |  |
|                        |          |           |                   |      |                       | Aantal                                 | 1     |      | Roerwerken                 |                            |  |  | Kosten                      |                             |  |  | Eerste vulling                    |             |  |
|                        |          |           |                   |      |                       | Capaciteit per leiding                 | 825   | m3/h | Geïnstalleerd vermogen     |                            |  |  | Verbruikskosten             |                             |  |  | SF zand                           |             |  |
|                        | Eff.     | m3/h      | bar               |      | kW                    | looptijd                               | 600   | mm   | verbruik (schatting)       |                            |  |  |                             |                             |  |  | Actieve kool                      |             |  |
|                        |          |           |                   |      |                       | Materiaal                              | GY    |      |                            |                            |  |  |                             |                             |  |  | LZF zand                          |             |  |
| Inlaat Drentse AA      |          |           |                   |      |                       | Statisch hoogteverschil                | 0,85  | mWk  | Flotatie                   |                            |  |  | PACI dosering               |                             |  |  | Totale bouwkosten                 |             |  |
| Pompen (1)             |          | 825,0     | 0,485             | 14,8 | 8,760                 | Dynamische drukval                     | 4     | mWk  | Slibwaterverlies           |                            |  |  | Concentratie Al in PACI opl |                             |  |  |                                   |             |  |
| Mengbekken             |          |           |                   |      |                       | Opvoerhoogte Pompen (1)                | 4,85  | mWk  | Ruimers                    |                            |  |  | Verbruik PACI               |                             |  |  | Voorbereidingskosten tot.         |             |  |
| Pompen (2)             |          | 825,0     | 0,645             | 19,7 | 8,760                 | Leiding mengbekken naar Coagulatie     |       |      |                            | Slibpompen                 |  |  |                             | Density                     |  |  |                                   | Investering |  |
| HCl dosering           |          | 825,0     |                   |      |                       | Lengte                                 | 1.500 | m    | verbruik (schatting)       |                            |  |  | Verbruik PACI oplossing     |                             |  |  |                                   |             |  |
| PACI dosering          |          | 825,0     |                   |      |                       | Aantal                                 | 1     |      | Witwater retour            |                            |  |  | Kosten                      |                             |  |  |                                   |             |  |
| Coagulatie             |          | 825,0     |                   |      |                       | Capaciteit per leiding                 | 825   | m3/h | Druk witwater pomp         |                            |  |  | Verbruikskosten             |                             |  |  |                                   |             |  |
| - roerwerken           |          |           |                   | 10,2 | 8,760                 | Diameter                               | 600   | mm   | Witwater (Edur) pomp eff.  |                            |  |  | Verbruikskosten             |                             |  |  |                                   |             |  |
| Flotatie               | 99,4%    | 907,0     |                   |      |                       | Materiaal                              | GY    |      | Dubbellaagsfilters         |                            |  |  | NaOH dosering               |                             |  |  |                                   |             |  |
| - Ruimers              |          |           |                   | 0,8  | 8,760                 | Statisch hoogteverschil                | 3,45  | mWk  | Aantal filters             |                            |  |  | Dosering NaOH               |                             |  |  |                                   |             |  |
| - Slibpompen           |          |           |                   | 2,4  | 8,760                 | Dynamische drukval                     | 3,00  | mWk  | Oppervlak                  |                            |  |  | Concentratie NaOH           |                             |  |  |                                   |             |  |
| Witwater pomp          | 10%      | 82,0      | 8                 | 33,1 | 8,760                 | Opvoerhoogte Pompen (2)                | 6,45  | mWk  | filtratiesnelheid nominaal |                            |  |  | Verbruik NaOH               |                             |  |  |                                   |             |  |
| Pompen (3)             |          | 819,7     | 0,53              | 16,1 | 8,760                 | Leiding van Flotatie naar snelfilters  |       |      |                            | filtratiesnelheid ontwerp  |  |  |                             | Verbruik NaOH               |  |  |                                   |             |  |
| Dubbellaagsfiltratie   | 97,0%    | 795,1     |                   |      |                       | Lengte                                 | 50    | m    | Aantal filters             |                            |  |  | Kosten                      |                             |  |  |                                   |             |  |
| BW pompen              |          | 1650,0    | 0,5               | 30,6 | 438                   | Aantal                                 | 2     |      | BW pomp Dubbellaagsfilters |                            |  |  | Verbruikskosten             |                             |  |  |                                   |             |  |
| Actieve koolfiltratie  | 99,5%    | 791,1     |                   |      |                       | Capaciteit per leiding                 | 410   | m3/h | BW snelheid                |                            |  |  | d.s. van PACI               |                             |  |  |                                   |             |  |
| NaOH dosering          |          | 791,1     |                   |      |                       | Diameter                               | 400   | mm   | Frequentie                 |                            |  |  | d.s. van SS/DOC             |                             |  |  |                                   |             |  |
| Langzame zandfiltratie |          | 791,1     |                   |      |                       | Materiaal                              | SS    |      | Aan/aflooptijd BW pomp     |                            |  |  | Totaal d.s.                 |                             |  |  |                                   |             |  |
| Pompen (4)             |          | 791,1     | 0,445             | 13,0 | 8,760                 | Statisch hoogteverschil                | 5,05  | mWk  | Tijdsduur BW water         |                            |  |  | d.s. gehalte                |                             |  |  |                                   |             |  |
| UV-desinfectie         |          | 791,1     |                   | 15,8 | 8,760                 | Dynamische drukval                     | 0,25  | mWk  | Aantal filters             |                            |  |  | Totaal slib                 |                             |  |  |                                   |             |  |
| Cascade beluchting     |          |           |                   |      |                       | Opvoerhoogte Pompen (3)                | 5,3   | mWk  | Oppervlak                  |                            |  |  | Kosten per ton slib         |                             |  |  |                                   |             |  |
| Reinwaterkelder        |          |           |                   |      |                       | Leiding LZF buffer naar Cascade        |       |      |                            | filtratiesnelheid nominaal |  |  |                             | Tot kosten voor afvoer slib |  |  |                                   |             |  |
| Pompen                 |          |           |                   |      |                       | Lengte                                 | 20    | m    | filtratiesnelheid ontwerp  |                            |  |  |                             |                             |  |  |                                   |             |  |
| Totaal verbruik        |          | 1.116.766 | kWh               |      |                       | Aantal                                 | 2     |      | Spoelwaterverlies          |                            |  |  |                             |                             |  |  |                                   |             |  |
| Kosten elektriciteit   |          | 0,161     | kWh/m3 rein water |      |                       | Capaciteit per leiding                 | 396   | m3/h | Standtijd kool             |                            |  |  |                             |                             |  |  |                                   |             |  |
| Verbruikskosten        |          | € 55.838  | / jaar            |      |                       | Diameter                               | 500   | mm   | Kosten regeneratie         |                            |  |  |                             |                             |  |  |                                   |             |  |
|                        |          |           |                   |      |                       | Materiaal                              | SS    |      | Kosten regeneratie         |                            |  |  |                             |                             |  |  |                                   |             |  |
|                        |          |           |                   |      |                       | Statisch hoogteverschil                | 4,35  | mWk  | UV-desinfectie             |                            |  |  |                             |                             |  |  |                                   |             |  |
|                        |          |           |                   |      |                       | Dynamische drukval                     | 0,10  | mWk  | Aantal reactoren           |                            |  |  |                             |                             |  |  |                                   |             |  |
|                        |          |           |                   |      |                       | Opvoerhoogte Pompen (4)                | 4,45  | mWk  | UV-lampen                  |                            |  |  |                             |                             |  |  |                                   |             |  |
|                        |          |           |                   |      |                       |  |       |      |                            | elk                        |  |  |                             |                             |  |  |                                   |             |  |
|                        |          |           |                   |      |                       |  |       |      |                            | Energieverbruik            |  |  |                             |                             |  |  |                                   |             |  |
|                        |          |           |                   |      |                       |  |       |      |                            | Kosten lampvervang         |  |  |                             |                             |  |  |                                   |             |  |



| Scenario 4             | Nanofiltratie zonder PACI |                   |      |       |       | Weerstand leidingen                                       |           | Zuiveringsprocessen                      |                   |        | Doseringen                  |                 |        | RHDHV Kostencalculator Drinkwater |              |
|------------------------|---------------------------|-------------------|------|-------|-------|---|-----------|--|-------------------|--------|-----------------------------|-----------------|--------|-----------------------------------|--------------|
| Nominale productie     | 791,1                     | m3/h              | 6,93 | Mm3/j |       | Uitgangspunten Hydraulica                                 |           |  |                   |        |                             |                 |        |                                   |              |
| Ontwerpcapaciteit      | 900                       | m3/h              |      |       |       | Temperatuur   | 10 °C     | Microzeven                               |                   |        | PACI dosering               |                 |        | Bouwkosten                        |              |
| Piekfactor zuivering   | 1,1377                    |                   |      |       |       | Wandruwheid   | 5 mm      | Fijnheid                                 | 100-200           | micron | Dosering Al                 | 0 mg/L          |        | Civiel                            | € 6.597.000  |
| pomprenement           | 75%                       |                   |      |       |       | <b>Leiding van Innamewerk naar mengbekken</b>             |           | Spoelwaterverlies                        | 1,0%              |        | Concentratie Al in PACI opl | 64,8 g/L        |        | WTB                               | € 6.084.000  |
|                        |                           |                   |      |       |       | Lengte  | 2.000 m   | Nanofiltratie                            |                   |        | Verbruik PACI               | 0,0 L/h         |        | ELEK                              | € 3.229.000  |
|                        |                           |                   |      |       |       | Aantal  | 1         | Recovery                                 | 80%               |        | Density                     | 1,20 kg/l       |        | Bouwkosten Zuivering              | € 15.910.000 |
|                        |                           |                   |      |       |       | Capaciteit per leiding                                    | 1009 m3/h | Flux                                     | 20 l/mh           |        | Verbruik PACI oplossing     | 0 Ton/year      | 25 ton | Eerste vulling                    |              |
|                        |                           |                   |      |       |       | Diameter  | 600 mm    | Voedingsdruk (gem)                       | 4,0 bar           |        | Kosten                      | € 5.725 per     |        | membranen                         | € 1.920.000  |
|                        |                           |                   |      |       |       | Materiaal   | GY        | Levensduur                               | 5 jaar            |        | Verbruikskosten             | € 0 / jaar      |        | Marmer                            | € 24.000     |
| Inlaat Drentse AA      |                           |                   |      |       |       | Statisch hoogteverschil                                   | 0,85 mWk  | <b>Marmerfiltratie (bestaande DLF's)</b> |                   |        | CO2 dosering                |                 |        | Actieve kool                      | € 99.000     |
| Pompen (1)             | 1008,9                    | 0,665             | 24,8 | 8.760 |       | Dynamische drukval  | 5,80 mWk  | Aantal filters                           | 6                 |        | Dosering CO2                | 22,0 mg/L       |        | LZF zand                          | € 222.000    |
| Mengbekken             |                           |                   |      |       |       | Opvoerhoogte Pompen (1)                                   | 6,65 mWk  | Oppervlak                                | 30 m2             |        | Verbruik CO2                | 17,6 kg/h       |        | Totale bouwkosten                 | € 18.175.000 |
| Pompen (2)             | 1008,9                    | 0,785             | 29,3 | 8.760 |       | <b>Leiding mengbekken naar Nanofiltratie</b>              |           | filtratiesnelheid nominaal               | 4,4 m/h           |        | Verbruik CO2                | 154,0 Ton/year  |        | Voorbereidingskosten tot.         | € 4.362.000  |
| Microzeven             | 99,0%                     | 1008,9            |      |       |       | Lengte  | 1.500 m   | filtratiesnelheid ontwerp                | 5,0 m/h           |        | Kosten                      | € 70 per        | 1 ton  | Investering                       | € 22.537.000 |
| Nanofiltratie          |                           |                   |      |       |       | Aantal  | 1         | Spoelwaterverlies                        | 0,5%              |        | Verbruikskosten             | € 10.780 / jaar |        |                                   |              |
| - voeding              | 80,0%                     | 998,8             | 4,0  | 148,0 | 8.760 | Capaciteit per leiding                                    | 1009 m3/h | <b>Actieve koolfilters</b>               |                   |        | Remineralisatie             |                 |        |                                   |              |
| - permeaat             | 799,1                     |                   |      |       |       | Diameter  | 600 mm    | Aantal filters                           | 6                 |        | Marmerverbruik              | 51,0 mg/l       |        |                                   |              |
| Pompen (3)             | 799,1                     | 0,53              | 15,7 | 8.760 |       | Materiaal   | GY        | Oppervlak                                | 25 m2             |        | Verbruik CaCO3              | 40,8 kg/h       |        |                                   |              |
| CO2 dosering           | 799,1                     |                   |      |       |       | Statisch hoogteverschil                                   | 3,45 mWk  | filtratiesnelheid nominaal               | 5,3 m/h           |        | Verbruik CaCO3              | 357,0 Ton/year  |        |                                   |              |
| Marmerfiltratie        | 99,5%                     | 799,1             |      |       |       | Dynamische drukval  | 4,40 mWk  | filtratiesnelheid ontwerp                | 6,0 m/h           |        | Kosten                      | € 150 per       | 1 ton  |                                   |              |
| Actieve koolfiltratie  | 99,5%                     | 795,1             |      |       |       | Opvoerhoogte Pompen (2)                                   | 7,85 mWk  | Spoelwaterverlies                        | 0,5%              |        | Verbruikskosten             | € 53.549 / jaar |        |                                   |              |
| Langzame zandfiltratie | 791,1                     |                   |      |       |       | <b>Leiding van Nanofiltratie naar Actieve koolfilters</b> |           | Standtijd kool                           | 6 jaar            |        | Slibproductie               |                 |        |                                   |              |
| Pompen (4)             | 791,1                     | 0,445             | 13,0 | 8.760 |       | Lengte  | 50 m      | Kosten regeneratie                       | € 18.036 / filter |        | d.s. van PACI               | 0 ton/jaar      |        |                                   |              |
| UV-desinfectie         | 791,1                     |                   | 15,8 | 8.760 |       | Aantal  | 2         | Kosten regeneratie                       | € 18.036 / jaar   |        | d.s. van SS/DOC             | 119 ton/jaar    |        |                                   |              |
| Cascade beluchting     |                           |                   |      |       |       | Capaciteit per leiding                                    | 400 m3/h  | <b>UV-desinfectie</b>                    |                   |        | Totaal d.s.                 | 119 ton/jaar    |        |                                   |              |
| Reinwaterkelder        |                           |                   |      |       |       | Diameter  | 400 mm    | Aantal reactoren                         | x stuks           |        | d.s. gehalte                | 2,0%            |        |                                   |              |
| Pompen                 |                           |                   |      |       |       | Materiaal   | SS        | UV-lampen                                | y stuks/rea       |        | Totaal slib                 | 5.950 ton/jaar  |        |                                   |              |
| Totaal verbruik        | 2.161.137                 | kWh               |      |       |       | Statisch hoogteverschil                                   | 5,05 mWk  | UV-lampen elk                            | z kW              |        | Kosten per ton slib         | € 14,62 / ton   |        |                                   |              |
| Kosten elektriciteit   | 0,312                     | kWh/m3 rein water |      |       |       | Dynamische drukval  | 0,25 mWk  | Energieverbruik                          | 20 wh/m3          |        | Tot kosten afvoer slib      | € 86.962 / jaar |        |                                   |              |
| Verbruikskosten        | € 108.057                 | / jaar            |      |       |       | Opvoerhoogte Pompen (3)                                   | 5,3 mWk   | Kosten lampvervanging                    | pm / jaar         |        |                             |                 |        |                                   |              |
|                        |                           |                   |      |       |       | <b>Leiding LZF buffer naar Cascade</b>                    |           |  |                   |        |                             |                 |        |                                   |              |
|                        |                           |                   |      |       |       | Lengte  | 20 m      |  |                   |        |                             |                 |        |                                   |              |
|                        |                           |                   |      |       |       | Aantal  | 2         |  |                   |        |                             |                 |        |                                   |              |
|                        |                           |                   |      |       |       | Capaciteit per leiding                                    | 396 m3/h  |  |                   |        |                             |                 |        |                                   |              |
|                        |                           |                   |      |       |       | Diameter  | 500 mm    |  |                   |        |                             |                 |        |                                   |              |
|                        |                           |                   |      |       |       | Materiaal   | SS        |  |                   |        |                             |                 |        |                                   |              |
|                        |                           |                   |      |       |       | Statisch hoogteverschil                                   | 4,35 mWk  |  |                   |        |                             |                 |        |                                   |              |
|                        |                           |                   |      |       |       | Dynamische drukval  | 0,10 mWk  |  |                   |        |                             |                 |        |                                   |              |
|                        |                           |                   |      |       |       | Opvoerhoogte Pompen (4)                                   | 4,45 mWk  |  |                   |        |                             |                 |        |                                   |              |

FIGUUR 11 : GEGEVENS DOORGEREKENDE SCENARIO'S

## 5.2 Resultaten TCO-berekeningen

De berekeningen (voor details zie Bijlage IV) leiden uiteindelijk tot de volgende totale kosten over een periode van 60 jaar (Tabel 6):

TABEL 6: TCO OVER EEN PERIODE VAN 60 JAAR (M€)

| Kosten                 | Scenario 1   | Scenario 2   | Scenario 3   | Scenario 4   |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Vorbereidingskosten    | 4,13         | 4,31         | 4,36         | 4,36         |
| Kapitaalkosten         | 46,95        | 48,93        | 73,51        | 73,51        |
| Onderhoudskosten       | 28,27        | 29,47        | 38,84        | 38,84        |
| Bedrijfsvoeringskosten | 52,78        | 36,77        | 34,05        | 27,09        |
| Subtotale Kosten       | 132,13       | 119,48       | 150,77       | 143,81       |
| <b>TCO</b>             | <b>83,11</b> | <b>75,42</b> | <b>94,81</b> | <b>90,53</b> |

Bij vergelijking van scenario 2 met scenario 1 blijkt dat de kapitaalslasten en onderhoudskosten licht stijgen vanwege de duurdere flotatie in vergelijking met lamellen-scheiding. De bedrijfsvoeringskosten (met name de slibafvoerkosten) dalen echter aanzienlijk, aannemende dat inderdaad zoveel minder vlokmiddel nodig is. Hierdoor worden de TCO van scenario 2 (M€ 75,42) lager dan die van scenario 1 (M€ 83,11).

Bij vergelijking van scenario's 3 en 4 met scenario 1 blijken de kapitaalslasten en onderhoudskosten aanzienlijk te stijgen vanwege de veel duurdere nanofiltratie (de kosten voor capillaire membranen zijn ruim driemaal zo hoog als de kosten voor spiral wound membranen) in vergelijking met lamellen. Ook hier dalen echter de bedrijfsvoeringskosten (met name de slibafvoerkosten) aanzienlijk. Wel zouden hierbij eigenlijk nog de kosten voor de behandeling en/of afvoer van het concentraat moeten worden opgeteld. Aangezien het op dit moment niet mogelijk is daarvan een realistische inschatting te geven, is dat effect meegenomen in het derde MCA-criterium, de waterkwaliteit en reststromen. De TCO van scenario 3 zijn veel hoger (M€ 94,81) dan die van scenario 1 (M€ 83,11). De TCO van scenario 4 zijn met M€ 90,53 eveneens hoger dan die van scenario 1, maar iets lager dan die van scenario 3 doordat geen slib (in scenario 4 wordt geen PACI toegevoegd) dient te worden afgevoerd.

## 6 Multi-Criteria Analyse

### 6.1 Beslissingsondersteunende analyses voor vergelijking scenario's

Besluiten worden genomen op basis van kennis over de feiten én vanuit een bepaald perspectief op de kwestie. Dit perspectief is in veel gevallen gekleurd door meer dan één voorkeur. Kwantitatieve analyses dwingen de beslissingsnemers om op een transparante manier de voorkeuren (of criteria) te benoemen, de feiten op een rijtje te zetten en vervolgens een waarde aan de feiten toe te kennen. Vanuit sociaal-economische hoek zijn diverse methodieken in het leven geroepen om diverse criteria te kunnen waarderen:

- levenscyclusanalyse, ofwel Life Cycle Analysis (LCA, zie hoofdstuk 4) waarbij punten worden toegekend aan verschillende criteria die betrekking hebben op duurzaamheidscriteria, zoals gezondheid en de ecologische voetafdruk;
- kostenanalyses zoals kosteneffectiviteitanalyses (CEA, vaak gebruikt in gezondheidsstudies), Totale EigendomsKosten (TEK, of TCO: Total Cost of Ownership, zie hoofdstuk 5) en MKB (maatschappelijke kosten-batenanalyse, in het Engels: Cost-Benefit Analysis) waarin allerlei criteria worden vertaald naar kosten met een monetaire eenheid.
- Waterkwaliteit en reststromen.

De analyses hebben ook nadelen: het is vaak moeilijk om een score toe te kennen aan de diverse criteria. Dit nadeel speelt vooral bij sociale of sociaal-maatschappelijke criteria waar financiële kosten aan verbonden worden: deze zijn soms zeer moeilijk vast te stellen, en hebben vaak een grote onzekerheid of subjectiviteit (Dodgson et al. 2009). Door in plaats van kosten een referentiekader met scorepunten te gebruiken en deze toe te kennen aan de diverse criteria kan dit nadeel geheel of gedeeltelijk worden weggenomen. Een dergelijke analyse wordt een multi-criteria analyse genoemd. Deze systematiek is in dit rapport toegepast om de vier verschillende scenario's onderling te kunnen vergelijken.

### 6.2 Multi-criteria analyse

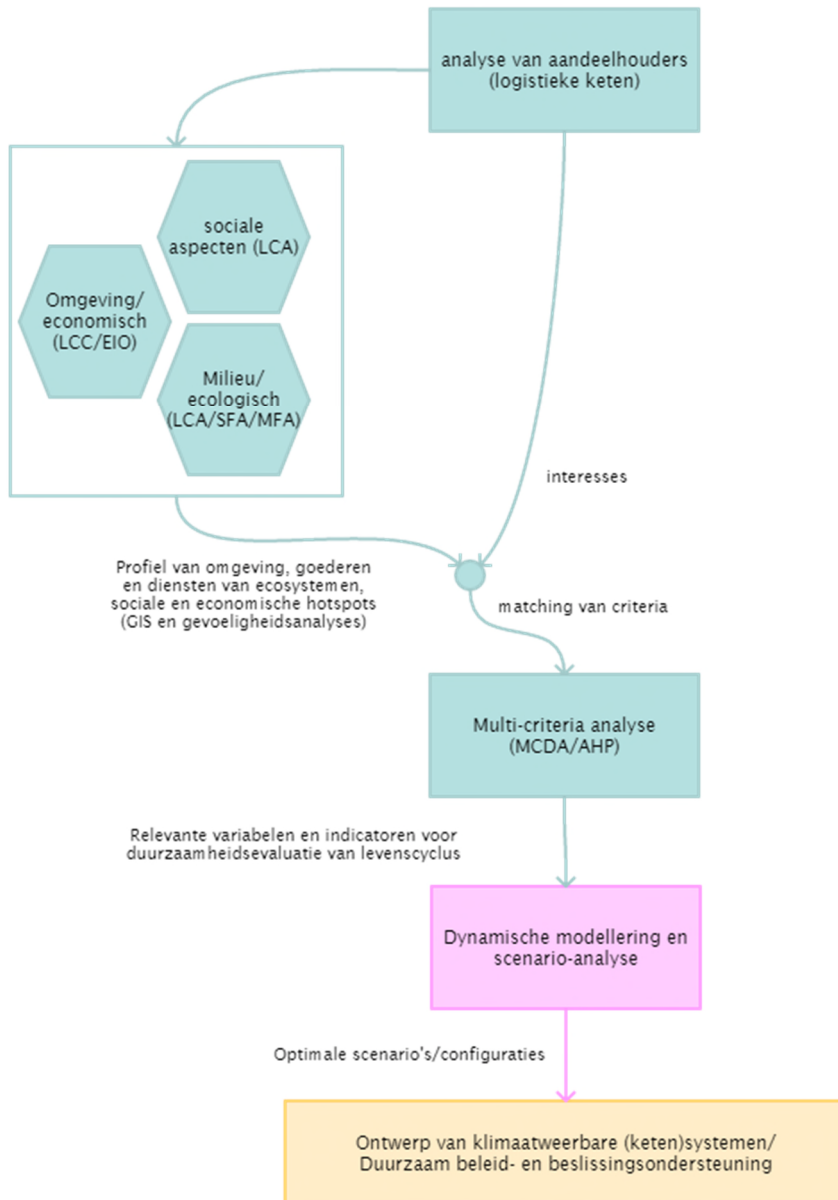
De MCA-methodiek lijkt veel op een besluitvormingsproces, waarbij verschillende stappen worden ondernomen om tot een besluit te komen. Bij gestructureerde besluitvormingsprocessen (en MCA) worden typisch de volgende stappen ondernomen (Dodgson et al. 2009):

1. het identificeren van de doelstelling(en),
2. het identificeren van de verschillende opties (deze worden ook wel alternatieven genoemd) om deze doelen te bereiken,
3. het identificeren van de criteria om de verschillende opties te kunnen vergelijken, en tenslotte,
4. het uiteindelijke besluit en feedback hierop.

Bij verschillende criteria zijn vaak verschillende aandeelhouders bij het probleem betrokken. Criteria beslaan vaak verschillende disciplines: het sociaal-maatschappelijk veld, economisch-financiële motieven, en milieu- en duurzaamheidskwesties. Een stap verder is MCDA: multi-criteria *decision* analysis: hierbij wordt het besluitvormingsproces numeriek opgelost met een optimalisatie. Ook kan een MC(D)A worden uitgebreid met toekomstige interacties met

de omgeving (een dynamische MCA) of verbreed naar een hele keten (Halog et al. 2011), zie ook Figuur 12.

Tenslotte verschilt MC(D)A van informele besluitvormingsprocessen doordat de stappen expliciet worden benoemd en de keuze van alternatieven, de criteria en de gewichten die aan de criteria worden toegekend door consensus ontstaan.



FIGUUR 12: KADER VOOR DE BEPALING VAN MEERDERE CRITERIA. VRIJ NAAR HALOG & MANIK 2011.

Ten behoeve van het afwegen van de verschillende criteria die verbonden zijn aan de vraag welk alternatief het meest duurzaam is voor het aluminium-slibprobleem van De Punt, zijn gegevens verzameld en zijn de stappen van een MCA doorlopen.

### 6.3 Definities van het afwegingskader

De MCA is als volgt opgesteld.

#### 6.3.1 Doelstelling

Het doel van het uitvoeren van de MCA is *het presenteren en scoren van verschillende alternatieven voor het huidige coagulatie/flocculatie/sedimentatieproces (inclusief het huidige proces) op verschillende kosten- en batencriteria, zodat een besluit voor eventuele vervanging van het proces kan worden onderbouwd.*

#### 6.3.2 Alternatieven

De alternatieven in de MCA zijn dezelfde als in de LCA, zie ook Paragraaf 4.1: (1) de huidige situatie; (2) dosering van (50% minder) PACI, gevolgd door DAF; (3) dosering van een kleine (20%) hoeveelheid PACI, gevolgd door capillaire NF en (4) capillaire NF zonder PACI-dosering.

#### 6.3.3 Criteria

De criteria zijn geclusterd volgens drie aandachtsgebieden: *economisch-financieel* (inputgegevens vanuit de TCO), *milieu en duurzaamheid* (input vanuit de LCA) en *waterkwaliteit en reststromen* (kwalitatieve input). Alleen van de LCA worden de verschillende categorieën als apart criterium meegenomen. Een overzicht van de criteria is opgenomen in Tabel 7.

TABEL 7: OVERZICHT VAN CRITERIA PER AANDACHTSGEBIED.

| Aandachtsgebied               | Eenheid                | Criterium en [eenheid]   | Sub-criteria   |
|-------------------------------|------------------------|--|--|
| Milieu en duurzaamheid (LCA)  | Ecopunten              | Ecosystemen [soorten*jaar],<br>Grondstoffen [dollar],<br>Gezondheid [DALY <sup>1</sup> ] | <i>diverse</i>   |
| Economisch-financieel         | Euro                   | TCO [euro]   | <i>diverse</i>   |
| Waterkwaliteit en reststromen | N.v.t. (score 1 t/m 5) | n.v.t.   | Kleur<br>Hardheid<br>Slib- en/of concentraatverwerking |

<sup>1</sup> DALY: Disability-Adjusted Life Year: verloren jaar van een gezond, menselijk leven door verminderde gezondheid of sterfte.



### 6.3.4 Normalisatie en weegfactoren

- Voor het criterium 'Waterkwaliteit en reststromen' zijn 3 sub-criteria gedefinieerd: 'Kleur', 'Hardheid' en 'Slib- en/of concentraatverwerking'. De scores zijn elk met een kwalitatieve score gewaardeerd: van slecht (--, waarde 5) naar zeer goed (+++, waarde 1). De waardes zijn in overleg met WBG en WLN vastgesteld. Deze scores zijn in Tabel 8 weergegeven.
- Voor de berekening van ecopunten gebruikt de LCA-software een normalisatie met bepaalde waarden voor elk criterium (Ecosystemen, Grondstoffen en Gezondheid) en vervolgens een gewichtstoekenning om tot een aantal ecopunten te komen. Hierbij geldt dat de gemiddelde voetafdruk van één West-Europees persoon op 1000 ecopunten (Pt) wordt gesteld. Voor deze MCA zijn de ruwe gegevens van de LCA gebruikt, waarop we zelf een normalisatie hebben toegepast, in een verhouding die gelijk is aan de verhouding die de LCA-software (SimaPro) ook toepast. De LCA-software blijkt aan "Grondstoffen" een lager gewicht toe te kennen (200) dan aan de andere twee LCA-criteria (400). In de MCA hebben we, in overleg met WLN en WBG met betrekking tot de waarde die zij hieraan hechte, ervoor gekozen om de totale LCA even zwaar te laten meetellen als de TCO en het kwalitatieve criterium, dus elk voor één derde deel. Binnen de LCA hebben we de onderdelen gezondheid, ecosystemen en grondstoffen apart meegenomen in de beoordeling. We hebben echter niet dezelfde normalisatie aangehouden als Simapro (die komt uit op een totaal van 1000 punten), maar wel dezelfde verhouding. Dit betekent dat in het totaal de TCO en de "waterkwaliteit en reststromen" elk voor 1/3<sup>de</sup> deel meetellen, gezondheid en ecosystemen elk voor 2/15<sup>de</sup>, en grondstoffen voor 1/15<sup>de</sup>, waarmee de totale bijdrage van de LCA ook weer 1/3<sup>de</sup> wordt. De normalisatie is een minimalisatie per criterium: dat wil zeggen de laagste waarde wordt gehanteerd om de getallen voor elk scenario te schalen. Een overzicht van de getallen, waarmee is geschaald, en de weegfactoren staat in Tabel 9.

TABEL 8: KWALITATIEVE SCORES VOOR WATERKWALITEITSPARAMETERS EN HET SUB-CRITERIUM SLIB-EN/OF CONCENTRAATVERWERKING

|                                      | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 | Scenario 4 |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Kleur                                | 3          | 3          | 1          | 1          |
| Hardheid                             | 1          | 1          | 1,5        | 1,5        |
| Slib en/of concentraatverwerking     | 5          | 4          | 4          | 3,5        |
| <b>Waterkwaliteit en reststromen</b> | <b>9</b>   | <b>8</b>   | <b>6,5</b> | <b>6</b>   |

Het huidige coagulatie/flocculatie/sedimentatieproces is niet in staat alle humuszuren volledig te verwijderen, waardoor het water op dit moment een lichtbruine kleur heeft. Het is de verwachting dat dat in het DAF-scenario niet anders zal zijn. Daarom is hieraan in Tabel 8 een score 3 toegekend. Bij toepassing van NF zal wel alle kleur verwijderd worden, en daarom scoort deze parameter hier een 1.

Op het ogenblik is het water dat in De Punt wordt geproduceerd vrij zacht, en heeft het eigenlijk geen kalkafzettend vermogen. Daarom scoren de scenario's 1 en 2 in Tabel 8 op dit punt een 1. Bij toepassing van NF zal het water door middel van marmerfiltratie moeten worden opgehard tot de ondergrens van 1 mmol/L, die wettelijk verplicht is. De vrees bestaat dat hierdoor microkristallen in het drinkwater terecht kunnen komen, die kunnen fungeren als kernen voor kalkafzetting. Vandaar dat in overleg met WBG is afgesproken de hardheid na NF te scoren op 1,5.

Het is erg lastig om op grond van de nu bekende gegevens een inschatting te geven van de kosten die gemoeid zijn met de behandeling en afvoer van slib of concentraat dat tijdens de zuivering wordt gevormd. Aangezien het lozen van aluminium in de bodem in Simapro geen effect krijgt “toebedeeld” kan ook in de LCA het effect van slib of concentraat niet goed worden meegewogen. Daarom is besloten slib en concentraat in dit kwalitatieve criterium mee te wegen.

Bij toepassing van nanofiltratie komt geen slib vrij dat moet worden afgevoerd. Wel wordt er een concentraatstroom gevormd, die weliswaar minder of geen aluminium bevat, maar wat volume betreft wel significant is (bij een recovery van 80% zou dit  $1,39 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> concentraat zijn, ofwel een stroom die ongeveer een factor 100 keer zo groot is als de hoeveelheid slib (die ook voor circa 98% uit water bestaat). Daarom is in overleg met WLN besloten het criterium waterkwaliteit en reststromen op 4 of 3,5 (zonder aluminium) te schalen.

TABEL 9: NORMALISATIEGETALLEN EN WEEGFACTOREN

| Criterium                     | Weegfactor | Weegfactor | Normalisatie met waarde (scenario) |
|-------------------------------|------------|------------|------------------------------------|
|                               | SimaPro    | MCA        |                                    |
| Financiën (TCO)               | n.v.t.     | 1/3        | € 75.419.158 (2)                   |
| Waterkwaliteit en reststromen | n.v.t.     | 1/3        | 6 (4)                              |
| Gezondheid                    | 400        | 2/15       | 9,95E-07 (4)                       |
| Ecosystemen                   | 400        | 2/15       | 1,89E-09 (4)                       |
| Grondstoffen                  | 200        | 1/15       | 0,00349 (4)                        |

## 6.4 Resultaten

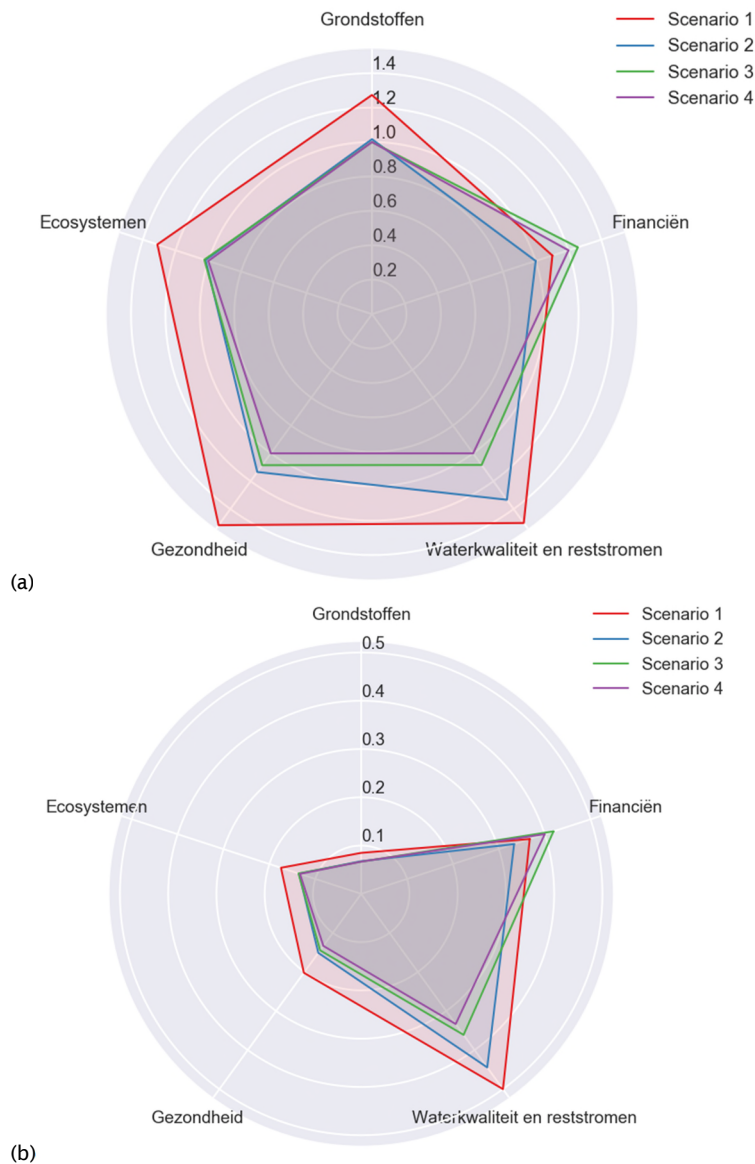
De verschillende criteria zijn doorgerekend op basis van het gegeven dat de elektriciteitslevering uit groene stroom bestaat. De ongewogen en niet-genormaliseerde criteriumgegevens zijn opgenomen in Bijlage V. In Figuur 26, Bijlage VI, worden de scores weergegeven voor elk sub-criterium van de LCA, de TCO en het waterkwaliteitscriterium. Daarin valt op dat de LCA berekent dat er met name grote verschillen optreden tussen de verschillende scenario's in de effecten voor het ozongat, verzuring van de bodem en de ecotoxiciteit als gevolg van de Aluminium-dosering. Hierbij moet wel worden aangetekend dat eventuele effecten van het storten van Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-houdend slib door Simapro niet worden meegerekend, en dat de voetafdruk daardoor in werkelijkheid groter kan zijn voor de scenario's waarin alum als vlokmiddel wordt toegepast (vooral in scenario 1, in iets mindere mate in scenario 2, en nog minder in scenario 3). Daarnaast zijn er verschillen te zien in de kapitaalkosten, waardoor die negatief uitpakken voor NF. De kosten voor de verwerking van slib of concentraat zijn niet meegenomen in dit overzicht, maar die komen kwalitatief terecht in het derde criterium “waterkwaliteit en reststromen”.

### 6.4.1 Score per criterium

De criteriascores en de spreiding per criterium zijn in grafieken Figuur 13, respectievelijk Figuur 14, weergegeven.

De radargrafieken in Figuur 13 tonen op de vijf assen de criteria Grondstoffen, Ecosystemen, Gezondheid, Financiën en “Waterkwaliteit en Reststromen”. Elk scenario heeft een eigen kleur in de grafiek, op de assen kunnen de waardes van de criteria worden afgelezen. Een kleinere waarde betekent een gunstige uitkomst voor dat scenario. Uit het radardiagram blijkt dat Scenario 1 op vrijwel alle vlakken de meeste punten scoort, behalve voor het onderdeel Financiën. Hierdoor geldt scenario 1 dus als het minst gunstige alternatief. Bij scenario 4 is

het tegenovergestelde het geval: dit scenario scoort op alle onderdelen de minste punten, behalve wat kosten betreft. Merk verder op dat de scenario's met nanofiltratie (scenario 3 en 4) goed scoren bij het criterium 'Waterkwaliteit en reststromen'. Scenario 2 scoort op het gebied van gezondheid, ecosystemen en grondstoffen vergelijkbaar met de scenario's 3 en 4, wat kosten betreft is het gunstiger dan 3 en 4, maar op het gebied "waterkwaliteit en reststromen" scoort het beduidend slechter dan die beide scenario's (hoewel iets beter dan scenario 1).

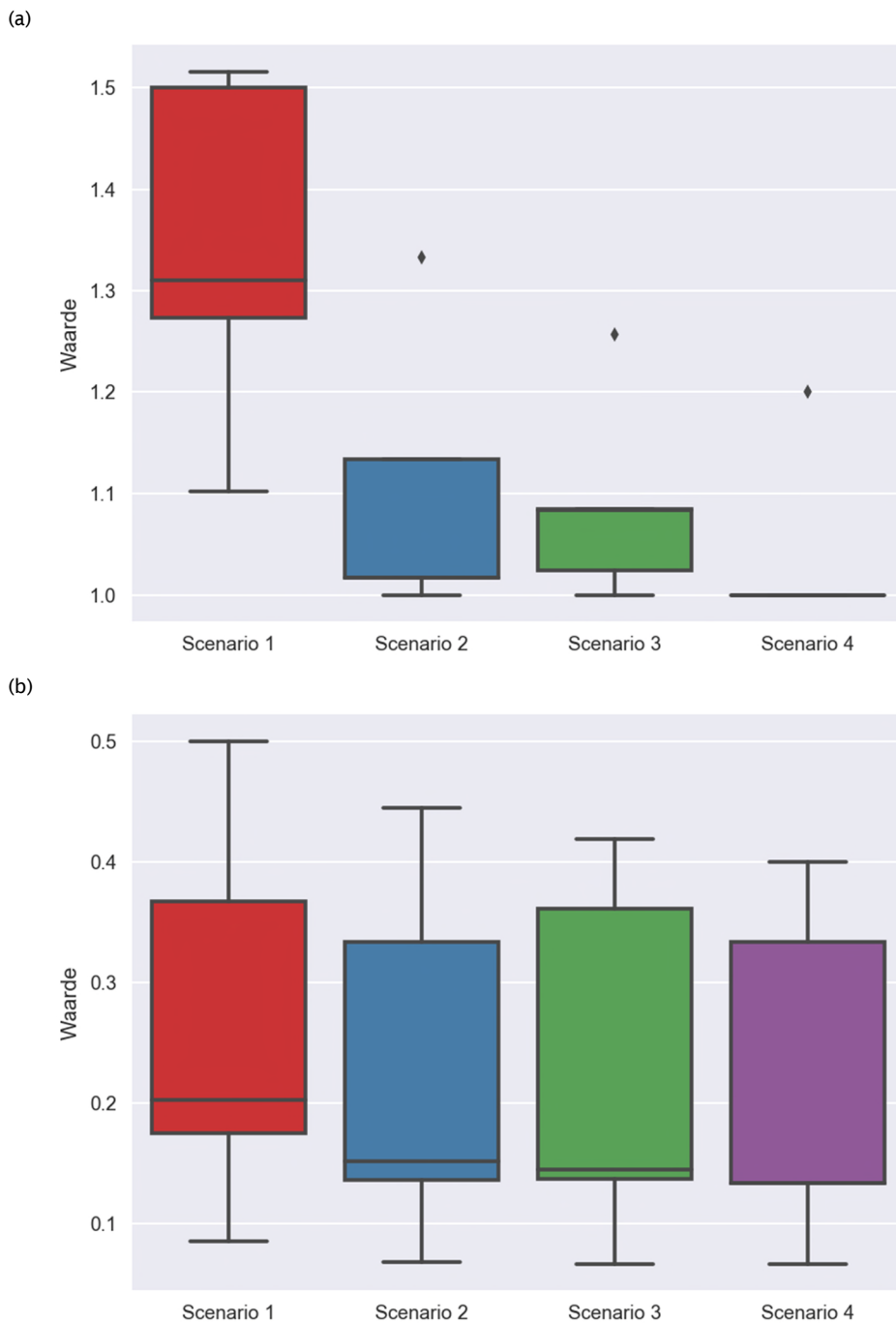


FIGUUR 13: RADARDIAGRAM VAN DE SCORES PER CRITERIUM VOOR DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S ZONDER WEEGFACTOREN (a) EN MET WEEGFACTOREN (b) TOEGEKEND.

Uit het radardiagram blijkt dat Scenario 1 de meeste punten scoort op de minimum-criteria (Grondstoffen, Ecosystemen, Gezondheid en Financiën) en Scenario 4 op het aandachtsgebied Milieu en duurzaamheid het minste (dus beste). Bij Financiën wordt het

duidelijk dat de kosten voor nanofiltratie de score van scenario 3 en 4 verslechteren. Scenario 3 en 4 scoren wel beter bij het criterium 'Waterkwaliteit en reststromen'. De spreiding per scenario is in Figuur 14 met behulp van Box- en Whiskergrafieken weergegeven, waarbij de zwaluwstaartjes ('whiskers') 1,5x de interkwartielafstand weergeven, de horizontale streep in de box de mediaan, en de overige datapunten als een ruitje zijn weergegeven. Merk op dat de boxplots alleen illustratief zijn bedoeld omdat er slechts 5 criteria zijn waaruit de kwartielen worden berekend.

Uit de box- en whiskergrafieken in Figuur 14 blijkt dat de spreiding in scores (weergegeven op de y-as) voor de genormaliseerde scores zonder weging het grootst is bij scenario 1 en 2 en het kleinst voor scenario 4. Na toekenning van de weegfactoren zijn de spreidingen in dezelfde orde van grootte. Verder is het opvallend dat de mediaan van de scores van scenario 2 en 3 bijna gelijk is.



FIGUUR 14: SPREIDING VAN DE (GENORMALISEERDE) CRITERIASCORES VOOR ELK VAN DE SCENARIO'S, ONGEWOGEN (a) EN GEWOGEN (b).

#### 6.4.2 Optimaal scenario (MCDA)

Op basis van de gegeven gewichten en normalisaties, kunnen de scenario's worden gerangschikt naar aantal punten. Een overzicht van de resultaten die dit oplevert is gegeven in Tabel 10. Bij een minimalisatie van het aantal punten komt scenario 4 als meest optimale scenario naar voren – gegeven de eerdere definities voor weging. Scenario 4 wordt gevolgd

door scenario 2 en 3 met nagenoeg hetzelfde aantal punten (pas bij het derde decimaal is er een verschil). Het huidige zuiveringsproces scoort het minst goed.

TABEL 10: SCENARIO'S MET ELKAAR VERGELEKEN

|                   | Financiën | Gezondheid | Ecosystemen | Grondstoffen | Waterkwaliteit en reststromen | Punten | Rang |
|-------------------|-----------|------------|-------------|--------------|-------------------------------|--------|------|
| <i>weegfactor</i> | 1/3       | 2/15       | 2/15        | 1/15         | 1/3                           |        |      |
| Scenario 1        | 1,10      | 1,52       | 1,31        | 1,27         | 1,50                          | 1,33   | 4    |
| Scenario 2        | 1,00      | 1,13       | 1,02        | 1,02         | 1,33                          | 1,13   | 2    |
| Scenario 3        | 1,26      | 1,09       | 1,02        | 1,00         | 1,08                          | 1,13   | 2    |
| Scenario 4        | 1,20      | 1,00       | 1,00        | 1,00         | 1,00                          | 1,07   | 1    |

## 7 Discussie

De vorming van grote hoeveelheden aluminium houdend slib bij de drinkwaterzuivering in De Punt zal op den duur een probleem worden vanwege milieu-overwegingen en kosten. Het vaste stofgehalte is erg laag (2 - 2,5%) en ontwatering blijkt technisch wel mogelijk maar erg kostbaar te zijn, waardoor grote hoeveelheden moeten worden afgevoerd en gestort. Aangezien aluminium niet geheel onomstreden is, is dit zowel vanuit economisch als vanuit milieutechnisch oogpunt erg onwenselijk. Hergebruik is, vanwege het lage vaste stofgehalte, niet rendabel te maken. Daarom is in deze studie gekeken wat voor alternatieven mogelijk zijn voor het coagulatie/flocculatie/sedimentatieproces in De Punt.

Uit een literatuurstudie bleek dat het aanpassen van het coagulatie/flocculatie/sedimentatieproces zelf op korte termijn niet echt mogelijk is. Vlokmiddelen gebaseerd op ijzer zijn in het verleden in De Punt al uitgetest, en bleken – zelfs in combinatie met poly-electrolyet – minder effectief dan PACI. Andere alternatieven of additieven, zoals toevoeging van silica of oxidatie met ozon, bleken in de literatuur slechts effectief onder bepaalde omstandigheden (een beperkt pH-gebied of tot een bepaalde concentratie ozon in combinatie met een bepaalde NOM-concentratie), waren beperkt houdbaar, of nog nooit op grote schaal uitgetest. Voor WBG is het belangrijk dat voorgestelde alternatieven zijn gebaseerd op “bewezen technologie”, en daarom is gekozen voor drie alternatieven:

- DAF met 50% van de huidige PACI-concentratie
- Capillaire NF met 20% van de huidige PACI-concentratie
- Capillaire NF zonder PACI-dosering

Deze alternatieven en de huidige situatie zijn doorgerekend voor wat betreft de LCA en TCO. In een multicriteria analyse zijn de resultaten samengevat. Daarbij is ook een derde criterium meegewogen: waterkwaliteit en reststromen. Binnen dit criterium werd een score gegeven voor kleur en hardheid van het water, en werd gekeken naar het ontstaan en verwerken van slib c.q. concentraat. Deze laatste twee factoren bleken moeilijk te verwerken te zijn in de LCA en TCO. Een oorzaak was dat aan het storten van aluminiumhoudend slib in de LCA geen punten worden toegekend. Bovendien is op dit moment nog niet duidelijk hoeveel concentraat er gevormd zal worden, en wat de samenstelling daarvan precies zal zijn (dat hangt o.a. af van de hoeveelheid vlokmiddel die nodig zou zijn). Aangezien er dus geen absolute waarde aan kon worden toegekend in LCA en TOC is besloten deze punten kwalitatief mee te wegen in de MCA. Alle drie de criteria werden in de MCA even zwaar gewogen, maar binnen de LCA-scores werd op verzoek van WBG apart gekeken naar gezondheid, ecosystemen en grondstoffen.

De resultaten lieten duidelijk zien dat het huidige scenario het slechtste scoort (zie Figuur 13). Omdat Simapro geen effect toekent aan het storten van aluminium(hydr)oxide is dit onderdeel subjectief meegenomen in het derde criterium. Hierin is ook meegewogen dat bij NF-processen een concentraat wordt gevormd, dat zeer waarschijnlijk nabehandeld zal moeten worden. De kosten hiervoor zijn in de TCO nog niet meegenomen, omdat op dit moment nog niet duidelijk is wat de beste manier hiervoor zou zijn.

Het tweede scenario, DAF met 50% PACl, scoort beduidend beter dan het huidige scenario, ook al is hier natuurlijk sprake van een Al-houdend concentraat, maar in een significant kleinere hoeveelheid (zowel in volume, want bij DAF komt in de regel een geconcentreerder slib vrij, als in de hoeveelheid aluminium, die gehalveerd is ten opzichte van het huidige scenario). Flotatie blijkt in kapitaal en onderhoud iets duurder te zijn dan het huidige proces, maar de bedrijfsvoeringskosten zijn lager, waardoor het proces zowel goedkoper als minder milieubelastend is dan het huidige proces. Wat betreft kleur en hardheid van het drinkwater scoort het DAF-scenario hetzelfde als het huidige scenario. Dat betekent dat er geen problemen zijn met de hardheid van het water, maar dat de kleur niet optimaal is. Hierbij moet wel een voorbehoud worden gemaakt, omdat de hoeveelheid vlokmiddel die nodig is in dit scenario op basis van literatuurgegevens is ingeschat, en eigenlijk experimenteel zou moeten worden vastgesteld voor de situatie in De Punt. Het zou dus kunnen dat in werkelijkheid een kleinere besparing op de hoeveelheid vlokmiddel wordt bereikt, waardoor het DAF-scenario slechter zou gaan scoren.

De beide NF-scenario's scoorden duidelijk slechter op het gebied van de totale kosten. Het energieverbruik van de membraaninstallatie en de benodigde conditionering zijn hier debet aan. Daar staat tegenover dat bij deze scenario's geen of heel weinig aluminium vrijkomt. Wat de beste manier is om met het concentraat om te gaan is in deze studie nog niet verwerkt, omdat op dit moment nog niet bekend is wat de mogelijkheden voor dit concentraat zouden zijn. Hiervoor zijn experimenten nodig, om de exacte samenstelling vast te kunnen stellen. Dit effect is echter gecompenseerd in het criterium "waterkwaliteit en reststromen".

Uit de totale afweging komt naar voren dat het NF-scenario zonder vlokmiddel de beste score oplevert. Het verschil met de scenario's 2 en 3 is echter niet zo heel groot, en het verschil tussen deze beide scenario's is verwaarloosbaar. Uiteraard zou het gunstig zijn als er helemaal geen vlokmiddel meer nodig zou zijn, maar experimenten zullen moeten uitwijzen of dit in de praktijk haalbaar is.

De verschillen tussen de scenario's 2, 3 en 4 zijn niet zo groot (zie Tabel 10), maar die scoren wel significant beter dan het huidige scenario. Ook als rekening wordt gehouden met de onzekerheid in de LCA (ca. 20%) en de TCO (ca. 30%) komt scenario 4 (capillaire NF zonder aluminium) het beste uit de bus, en geven de scenario's 3 en 4 een vergelijkbare score te zien. De kosten voor de beide NF-scenario's zijn wel hoger dan voor de andere scenario's, maar dat wordt gecompenseerd door "winst" op het gebied van de milieu-impact en de waterkwaliteit. Of inderdaad vlokmiddel nodig is in een NF-scenario, en zo ja hoeveel precies, zal experimenteel moeten worden uitgezocht.

Ook voor DAF zouden experimenten moeten worden uitgevoerd om de praktische haalbaarheid in dit verband te testen. Zo is op grond van literatuurgegevens uitgegaan van een halvering van de benodigde hoeveelheid aluminium, maar experimenten zouden moeten uitwijzen of dit een realistisch haalbaar scenario is. Bovendien zou moeten worden uitgezocht in hoeverre de ontwaterbaarheid van het slib verbetert ten opzichte van die van het huidige slib, en wat dus precies de hoeveelheid te storten materiaal wordt.



## 8 Conclusies en aanbevelingen

### 8.1 Conclusies

Uit de vergelijking blijkt dat het huidige scenario in een MCA slechter scoort dan de alternatieven die in dit project zijn onderzocht. Het NF-scenario zonder vlokmiddel lijkt op basis van deze MCA de beste score te geven. Er is echter verder onderzoek nodig om vast te stellen of inderdaad geen vlokmiddel nodig is in dit scenario. Indien wel vlokmiddel moet worden gebruikt, maakt het niet veel uit of DAF of capillaire NF wordt toegepast, bij de hier aangenomen hoeveelheden vlokmiddel. Indien onderzoek zou uitwijzen dat andere hoeveelheden vlokmiddel nodig zijn, kunnen deze waarden nog verschuiven, afhankelijk van deze hoeveelheden. De hogere kosten voor NF-processen worden 'gecompenseerd' door de kleinere milieu-impact en winst op het gebied van de waterkwaliteit en de slibverwerking.

### 8.2 Aanbevelingen

Het verdient aanbeveling om op het lab of in een pilot uit te testen of capillaire NF in de praktijk inderdaad een goed alternatief zou zijn voor het proces bij De Punt. Bovendien kan dan worden uitgetest of er nog vlokmiddel nodig is, en zo ja, hoeveel dat zou moeten zijn (we zijn op basis van literatuurgegevens hier uitgegaan van 20% van de huidige hoeveelheid, maar de praktijk moet uitwijzen of dat reëel is). Indien echter een vlokmiddel nodig is, zou ook DAF een goed alternatief kunnen zijn, maar ook daarvoor zijn experimenten nodig om de exacte hoeveelheid aan te tonen.

Dergelijke experimenten zijn ook nodig om de eigenschappen van het slib van DAF of het concentraat van NF vast te stellen, om op die manier een inschatting te kunnen maken van behandelingsmogelijkheden, en de kosten die hiermee gemoeid zijn. Deze zijn nodig om een realistische businesscase te kunnen opstellen.

## 9 Literatuur

- Arias-Paic, M., K. M. Cawley, S. Byg and F. L. Rosario-Ortiz (2016). "Enhanced DOC removal using anion and cation ion exchange resins." *Water Research* **88**: 981-989.
- Baayen, H. (2000). *Eco-indicator 99; manual for designers; A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*. The Hague, The Netherlands, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment.
- Barbot, E., S. Moustier, J. Y. Bottero and P. Moulin (2008). "Coagulation and ultrafiltration: Understanding of the key parameters of the hybrid process." *Journal of Membrane Science* **325**(2): 520-527.
- Bazri, M. M., B. Martijn, J. Kroesbergen and M. Mohseni (2016). "Impact of anionic ion exchange resins on NOM fractions: Effect on N-DBPs and C-DBPs precursors." *Chemosphere* **144**: 1988-1995.
- Bazri, M. M. and M. Mohseni (2016). "Impact of natural organic matter properties on the kinetics of suspended ion exchange process." *Water Research* **91**: 147-155.
- Bose, P. and D. A. Reckhow (2007). "The effect of ozonation on natural organic matter removal by alum coagulation." *Water Research* **41**(7): 1516-1524.
- Cheng, W. P., F. H. Chi, C. C. Li and R. F. Yu (2008). "A study on the removal of organic substances from low-turbidity and low-alkalinity water with metal-polysilicate coagulants." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **312**(2-3): 238-244.
- Chiang, P. C., E. E. Chang, P. C. Chang and C. P. Huang (2009). "Effects of pre-ozonation on the removal of THM precursors by coagulation." *Science of the Total Environment* **407**(21): 5735-5742.
- de la Rubia, A., M. Rodríguez, V. León and D. Prats (2008). "Removal of natural organic matter and THM formation potential by ultra- and nanofiltration of surface water." *Water Research* **42**(3): 714-722.
- Dodgson, J. S., M. Spackman, A. Pearman and L. D. Philips. (2009). "Multi-criteria analysis: a manual." from <http://www.communities.gov.uk/>.
- Duan, J. and J. Gregory (1996). "Influence of soluble silica on coagulation by aluminium sulphate." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **107**: 309-319.
- Duan, J. and J. Gregory (2003). "Coagulation by hydrolysing metal salts." *Advances in Colloid and Interface Science* **100-102**(SUPPL.): 475-502.
- Edzwald, J. K. (1995). "Principles and applications of dissolved air flotation." *Water Science and Technology* **31**(3-4): 1-23.
- Fang, R., X. Cheng and X. Xu (2010). "Synthesis of lignin-base cationic flocculant and its application in removing anionic azo-dyes from simulated wastewater." *Bioresource Technology* **101**(19): 7323-7329.
- Futselaar, H. and I. Dijkstra (2005). "The use of direct capillary nanofiltration for surface water treatment." *Ultrapure Water* **22**(3): 30-34.
- Futselaar, H., H. Schonewille and W. Van Der Meer (2002). "Direct capillary nanofiltration - A new high-grade purification concept." *Desalination* **145**(1-3): 75-80.
- Gao, B.-Y., Q.-Y. Yue and Y. Wang (2007). "Coagulation performance of polyaluminum silicate chloride (PASiC) for water and wastewater treatment." *Separation and Purification Technology* **56**(2): 225-230.
- Gao, B. Y., H. H. Hahn and E. Hoffmann (2002). "Evaluation of aluminum-silicate polymer composite as a coagulant for water treatment." *Water Research* **36**(14): 3573-3581.
- Grefte, A. (2013). *Removal of natural organic matter fractions by anion exchange: impact on drinking water treatment processes and biological stability*. PhD, University of Technology Delft.
- Grefte, A., M. Dignum, E. R. Cornelissen and L. C. Rietveld (2013). "Natural organic matter removal by ion exchange at different positions in the drinking water treatment lane." *Drinking Water Engineering and Science* **6**(1): 1-10.
- Grefte, A., L. Rietveld, M. Dignum and E. Cornelissen (2014). "Verwijdering van natuurlijk organisch materiaal fracties door anionwisseling." *H2O online*.

- Halog, A. and Y. Manik (2011). "Advancing integrated systems modelling framework for life cycle sustainability assessment." *Sustainability* 3(2): 469-499.
- Ho, Y. C., I. Norli, A. F. M. Alkarkhi and N. Morad (2010). "Characterization of biopolymeric flocculant (pectin) and organic synthetic flocculant (PAM): A comparative study on treatment and optimization in kaolin suspension." *Bioresource Technology* 101(4): 1166-1174.
- Hutcherson, J. R. (2015). *A comparison of electrocoagulation and chemical coagulation treatment effectiveness on frac flowback and produced water*. MSc, Colorado State University.
- Jamil, T. S., I. Dijkstra and S. Sayed (2013). "Usage of permeate water for treated domestic wastewater by direct capillary nanofiltration membrane in agriculture reuse." *Desalination and Water Treatment* 51(13-15): 2584-2591.
- Jarvis, P., B. Jefferson, J. Gregory and S. A. Parsons (2005). "A review of floc strength and breakage." *Water Research* 39(14): 3121-3137.
- Jarvis, P., B. Jefferson and S. A. Parsons (2006). "Floc structural characteristics using conventional coagulation for a high doc, low alkalinity surface water source." *Water Research* 40(14): 2727-2737.
- Khiadani, M., R. Kolivand, M. Ahooghalandari and M. Mohajer (2014). "Removal of turbidity from water by dissolved air flotation and conventional sedimentation systems using poly aluminum chloride as coagulant." *Desalination and Water Treatment* 52(4-6): 985-989.
- Konieczny, K., D. Sakol, J. Pionka, M. Rajca and M. Bodzek (2009). "Coagulation-ultrafiltration system for river water treatment." *Desalination* 240(1-3): 151-159.
- Li, R., B. Gao, J. Sun, Q. Yue, Y. Wang and X. Xu (2016). "Synthesis, characterization of a novel lignin-based polymer and its behavior as a coagulant aid in coagulation/ultrafiltration hybrid process." *International Biodeterioration and Biodegradation* 113: 334-341.
- Li, T., Z. Zhu, D. Wang, C. Yao and H. Tang (2006). "Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanisms." *Powder Technology* 168(2): 104-110.
- Liu, Z., Y. Liu, P. Kuschik, J. Wang, Y. Chen and X. Wang (2016). "Poly aluminum chloride (PAC) enhanced formation of aerobic granules: Coupling process between physicochemical-biochemical effects." *Chemical Engineering Journal* 284: 1127-1135.
- Loi-Brügger, A., S. Panglisch, P. Buchta, K. Hattori, H. Yonekawa, Y. Tomita and R. Gimbel (2006). Ceramic membranes for direct river water treatment applying coagulation and microfiltration. *Water Science and Technology: Water Supply*. 6: 89-98.
- Matilainen, A. and M. Sillanpää (2010). "Removal of natural organic matter from drinking water by advanced oxidation processes." *Chemosphere* 80(4): 351-365.
- Matilainen, A., M. Vepsäläinen and M. Sillanpää (2010). "Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review." *Advances in Colloid and Interface Science* 159(2): 189-197.
- Megid, M. H. A., A. A. R. Amer and K. H. Elsayed (2014). "Coagulation and dissolved air floatation for treatment of oil-water emulsion." *Int. J. Eng. Sci.* 3(12): 120-129.
- Miyahara, M., A. Sakamoto, A. Kouzuma and K. Watanabe (2016). "Poly iron sulfate flocculant as an effective additive for improving the performance of microbial fuel cells." *Bioresource Technology* 221: 331-335.
- Neale, P. A. and A. I. Schäfer (2009). "Magnetic ion exchange: Is there potential for international development?" *Desalination* 248(1): 160-168.
- Rosseland, B. O., T. D. Eldhuset and M. Staurnes (1990). "Environmental effects of aluminium." *Environmental Geochemistry and Health* 12(1-2): 17-27.
- Sadrnourmohamadi, M. and B. Gorczyca (2015). "Effects of ozone as a stand-alone and coagulation-aid treatment on the reduction of trihalomethanes precursors from high DOC and hardness water." *Water Research* 73: 171-180.
- Sharp, E. L., P. Jarvis, S. A. Parsons and B. Jefferson (2006). "Impact of fractional character on the coagulation of NOM." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 286(1-3): 104-111.
- Shi, Y., M. Fan, R. C. Brown, S. Sung and J. Van Leeuwen (2004). "Comparison of corrosivity of polymeric sulfate ferric and ferric chloride as coagulants in water treatment." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 43(8): 955-964.

- Siéliéchi, J. M., B. S. Lartiges, G. J. Kayem, S. Hupont, C. Frochot, J. Thieme, J. Ghanbaja, J. B. d'Espinose de la Caillerie, O. Barrès, R. Kamga, P. Levitz and L. J. Michot (2008). "Changes in humic acid conformation during coagulation with ferric chloride: Implications for drinking water treatment." *Water Research* **42**(8-9): 2111-2123.
- Sillanpää, M., M. C. Ncibi, A. Matilainen and M. Vepsäläinen (2018). "Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review." *Chemosphere* **190**: 54-71.
- Teixeira, M. R., S. M. Rosa and V. Sousa (2011). "Natural Organic Matter and Disinfection By-products Formation Potential in Water Treatment." *Water Resources Management* **25**(12): 3005-3015.
- Verrelli, D. I., D. R. Dixon and P. J. Scales (2009). "Effect of coagulation conditions on the dewatering properties of sludges produced in drinking water treatment." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **348**(1-3): 14-23.
- Verrelli, D. I., D. R. Dixon and P. J. Scales (2010). "Assessing dewatering performance of drinking water treatment sludges." *Water Research* **44**(5): 1542-1552.
- Xu, C., X. Wang, X. Dou and B. Gao (2014). "Coagulation-dynamic membrane filtration process at constant flow rate for treating polluted river water." *Desalination and Water Treatment* **52**(1-3): 102-110.
- Xu, W., Q. Yue, B. Gao and B. Du (2015). "Impacts of organic coagulant aid on purification performance and membrane fouling of coagulation/ultrafiltration hybrid process with different Al-based coagulants." *Desalination* **363**: 126-133.
- Xu, Y., T. Chen, Z. Liu, S. Zhu, F. Cui and W. Shi (2016). "The impact of recycling alum-humic-floc (AHF) on the removal of natural organic materials (NOM): Behavior of coagulation and adsorption." *Chemical Engineering Journal* **284**: 1049-1057.
- Yan, M., H. Liu, D. Wang, J. Ni and J. Qu (2009). "Natural organic matter removal by coagulation: Effect of kinetics and hydraulic power." *Water Science and Technology: Water Supply* **9**: 21-30.
- Yan, M., D. Wang, J. Ni, J. Qu, C. W. K. Chow and H. Liu (2008). "Mechanism of natural organic matter removal by polyaluminum chloride: Effect of coagulant particle size and hydrolysis kinetics." *Water Research* **42**(13): 3361-3370.
- Yan, M., D. Wang, J. Ni, J. Qu, W. Ni and J. Van Leeuwen (2009). "Natural organic matter (NOM) removal in a typical North-China water plant by enhanced coagulation: Targets and techniques." *Separation and Purification Technology* **68**(3): 320-327.
- Yan, M., D. Wang, J. Qu, J. Ni and C. W. K. Chow (2008). "Enhanced coagulation for high alkalinity and micro-polluted water: The third way through coagulant optimization." *Water Research* **42**(8-9): 2278-2286.
- Yan, M., D. Wang, B. Shi, M. Wang and Y. Yan (2007). "Effect of Pre-ozonation on Optimized Coagulation of a Typical North-China Source Water." *Chemosphere* **69**(11): 1695-1702.
- Zouboulis, A. I. and P. A. Moussas (2008). "Polyferric silicate sulphate (PFSiS): Preparation, characterisation and coagulation behaviour." *Desalination* **224**(1-3): 307-316.
- Zouboulis, A. I., P. A. Moussas and F. Vasilakou (2008). "Polyferric sulphate: Preparation, characterisation and application in coagulation experiments." *Journal of Hazardous Materials* **155**(3): 459-468.

# Bijlage I

## Gegevens voor berekeningen TCO en LCA

### Scenario 1

|  |   |                                |  |
|--|---|--------------------------------|--|
| <b>scenario 1, huidig proces</b>             |   |                                |  |
| Inname Drentsche Aa                          |   |                                |  |
| pompen                                       |   |                                |  |
| mengbekken                                   |   | AlCl <sub>3</sub>              | 133,349 g/mol  |
| pompen                                       |   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 101 g/mol  |
| coagulatie/sedimentatie                      |   |                                |  |
| dubbellaagsfilter                            |   |                                |  |
| AKF  |   | transport                      | 300 km   |
| Uvdesinfectie                                |   |                                |  |
| LZF  |   |                                |  |
| beluchting cascade                           |   |                                |  |
| reinwater                                    |   |                                |  |
|  |   |                                |  |
| <b>Pomp 1</b>                                | 0,003 kwh/m <sup>3</sup>  |                                |  |
| <b>Pomp 2</b>                                | 0,003 kwh/m <sup>3</sup>  |                                |  |
|  |   |                                |  |
| <b>Coagulatie</b>                            |   |                                |  |
| PACL --> Al <sub>3</sub> Cl                  | 12,64498 gram   | 33,39                          | alCl <sub>3</sub>  |
| transport                                    | 0,003161 tkm  |                                |  |
| HCL  | 0,007542 kg   |                                |  |
| transport                                    | 0,002263 tkm  |                                |  |
| <b>snelle zandfiltratie</b>                  | <b>project: weesperkarspel FU leveren van 1m<sup>3</sup> drinkwater</b> |                                |  |
| water, unspecified origing, NL               | 0,002738 m <sup>3</sup>   |                                |  |
| phosphoric acid, industrial grade, without v | 6,40E-06 kg   |                                |  |
| transport                                    | 0,00052 tkm   |                                |  |
| waste and emissions: raw sewage sludge w     | 0,01369 kg  |                                | Dit komt uit project weesperkarspel. Heb voor de zekerheid gegevens Al slib toegevoegd |
| totale slib productie                        | 1,88 kg   |                                | nat slib   |
| vaste stof in slib                           | 0,0375 kg   |                                | droog slib   |
| Al in slib. In bodem emissie                 | 0 g   | Al                             | 6,75 g Al  |
|  |   |                                |  |
|  |   |                                |  |
| <b>Actief kool (CO<sub>2</sub>)</b>          |   |                                |  |
| carbon blak {glo} market for                 | 1722 mg   |                                |  |
| oxygen, liquid Glo market for                | 20 g  |                                |  |
| loog   | 4,0908 g  |                                |  |
| transport                                    | 0,001 tkm   |                                |  |
| energie consumptie                           | 0,0257 kwh  |                                |  |
| water, nl                                    | 0,0133 m <sup>3</sup>   |                                |  |
|  |   |                                |  |
|  |   |                                |  |
| <b>UV</b>                                    |   |                                |  |
| mercury glo market for                       | 0,00457 mg  |                                |  |
| energy consumption                           | 0,18 kwh  |                                |  |
| transport                                    | 1,00E-09 tkm  |                                |  |
|  |   |                                |  |
| <b>pH correctie</b>                          |   |                                |  |
| loog   | 0,013077 kg   |                                |  |
| transport                                    | 0,003923 tkm  |                                |  |
|  |   |                                |  |
|  |   |                                |  |

## Scenario 2

|  |  |        |   |                                       |  |
|--|--|--------|---|---------------------------------------|--|
| <b>scenario 2</b>                        |  |        |   |                                       |  |
| Inname Drentsche Aa                      |  |        |   |                                       |  |
| pompen                                   |  |        |   |                                       |  |
| mengbekken                               |  |        |   |                                       |  |
| pompen                                   |  |        |   |                                       |  |
| coagulatie/sedimentatie                  |  |        |   |                                       |  |
| DAF                                      |  |        |   |                                       |  |
| dubbellaagsfilter                        |  |        |   |                                       |  |
| AKF                                      |  |        |   |                                       |  |
| Uvdesinfectie                            |  |        |   |                                       |  |
| LZF                                      |  |        |   |                                       |  |
| beluchting cascade                       |  |        |   |                                       |  |
| reinwater                                |  |        |   |                                       |  |
|  |  |        |   |                                       |  |
| <b>Pomp 1</b>                            | 0,003  | kwh/m3 |   |                                       |  |
| <b>Pomp 2</b>                            | 0,003  | kwh/m3 |   |                                       |  |
|  |  |        |   |                                       |  |
| <b>Coagulatie</b>                        |  |        | Zit waarschijnlijk al verwerkt in DAF       |                                       |  |
| PACl --> AlCl3                           | 6,322488   | g      |   |                                       |  |
| transport                                | 0,001581   | tkm    |   |                                       |  |
| HCL                                      | 0,007542   | kg     |   |                                       |  |
| transport                                | 0,002263   | tkm    |   |                                       |  |
| <b>DAF</b>                               | <b>Project: schaliegas: FU zuiveren van m3 water</b>         |        |   |                                       |  |
| air                                      | 0,0271   | kg     |   |                                       |  |
|  |  |        |   |                                       |  |
| energy consumption aeration              | 0,06   | kwh    |   |                                       |  |
| energy consumption dewatering            | 0,025  | kwh    |   |                                       |  |
| transport truck sludge                   | 0,0004   | tkm    | 10 km droog slib                            | 0,019 bij nat slib zonder ontwatering |  |
| transport truck chemicals                | 0,0001   | tkm    |   |                                       |  |
| waste stof in slib                       | 0,0341   | kg     | droog slib                                  | bodem emissie                         |  |
| Al in slib in bodem emissie              | 0  | g      | Al  | 3,375 g Al                            |  |
|  |  |        |   |                                       |  |
|  |  |        |   |                                       |  |
| <b>snelle zandfiltratie</b>              | <b>project: weesperkarspel FU leveren van 1m3 drinkwater</b> |        |   |                                       |  |
| water, unspecified origing, NL           | 0,002738   | m3     |   |                                       |  |
| phosphoric acid, industrial grade, witho | 6,40E-06   | kg     |   |                                       |  |
| transport                                | 0,00052  | tkm    |   |                                       |  |
| waste and emissions: raw sewage sludg    | 0,01369  | kg     | Dit is vergelijkbaar met gewoon drinkwater. |                                       |  |
|  |  |        |   |                                       |  |
|  |  |        |   |                                       |  |
| <b>Actief kool (CO2)</b>                 |  |        |   |                                       |  |
| carbon blak {glo} market for             | 1722   | mg     |   |                                       |  |
| oxygen, liquid Glo market for            | 20   | g      |   |                                       |  |
| loog                                     | 4,0908   | g      |   |                                       |  |
| transport                                | 0,001  | tkm    |   |                                       |  |
| energie consumptie                       | 0,0257   | kwh    |   |                                       |  |
| water, nl                                | 0,0133   | m3     |   |                                       |  |
|  |  |        |   |                                       |  |
|  |  |        |   |                                       |  |
| <b>UV</b>                                |  |        |   |                                       |  |
| mercury glo market for                   | 0,00457  | mg     |   |                                       |  |
| energy consumption                       | 0,18   | kwh    |   |                                       |  |
| transport                                | 1,00E-09   | tkm    |   |                                       |  |
|  |  |        |   |                                       |  |
|  |  |        |   |                                       |  |
| <b>pH correctie</b>                      |  |        |   |                                       |  |
| loog                                     | 0,00654  | kg     |   |                                       |  |
| transport                                | 0,001962   | tkm    |   |                                       |  |



## Scenario 4

|   |  |        |  |  |  |  |
|---|--|--------|--|--|--|--|
| <b>scenario 4</b>   |  |        |  |  |  |  |
| Inname Drentsche Aa                                       |  |        |  |  |  |  |
| pompen  |  |        |  |  |  |  |
| mengbekken  |  |        |  |  |  |  |
| pompen  |  |        |  |  |  |  |
| cap. NF   |  |        |  |  |  |  |
| AKF   |  |        |  |  |  |  |
| Uvdesinfectie   |  |        |  |  |  |  |
| LZF   |  |        |  |  |  |  |
| beluchting cascade  |  |        |  |  |  |  |
| reinwater   |  |        |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
| <b>Pomp 1</b>   | 0,004  | kwh/m3 |  |  |  |  |
| <b>Pomp 2</b>   | 0,004  | kwh/m3 |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
| <b>Nanofiltratie</b>                                      | <b>project: weesperkarspel FU leveren van 1m3 drinkwater</b> |        |  |  |  |  |
| sodium hydroxide, without water, in 50% solution          | 0,0685   | g      |  |  |  |  |
| hydrochloric acid, without water, in 30% solution         | 0,104  | g      |  |  |  |  |
| organophosphorus compound, unspecified                    | 0,004  | mg     |  |  |  |  |
| steel unalloyed steel production                          | 0,00045  | kg     |  |  |  |  |
| polyvinylchloride PVC carbont content                     | 4,00E-05   | kg     |  |  |  |  |
| energy consumption  | 6,50E-01   | kwh    |  |  |  |  |
| verwerking concentraat, met hierin max 38,5 kg vaste stof |  |        |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
| <b>Actief kool (CO2)</b>                                  |  |        |  |  |  |  |
| carbon blak {glo} market for                              | 861  | mg     |  |  |  |  |
| oxygen, liquid Glo market for                             | 10   | g      |  |  |  |  |
| loog  | 2,0454   | g      |  |  |  |  |
| transport   | 0,0005   | tkm    |  |  |  |  |
| energie consumptie  | 0,01285  | kwh    |  |  |  |  |
| water, nl   | 0,00665  | m3     |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
| <b>UV</b>   |  |        |  |  |  |  |
| mercury glo market for                                    | 0,00457  | mg     |  |  |  |  |
| energy consumption  | 0,18   | kwh    |  |  |  |  |
| transport   | 1,00E-09   | tkm    |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
| <b>Marmerfiltratie</b>                                    |  |        |  |  |  |  |
| water unspecified origin NL                               | 0  | m3     |  |  |  |  |
| waste and emission: raw sewage sludge wastew v            | 0  | m3     |  |  |  |  |
| verbruik marmer   | 0,1  | kg     |  |  |  |  |
| transport   | 0,03   | tkm    |  |  |  |  |
|   |  |        |  |  |  |  |
| <b>Zuurdosering</b>                                       |  |        |  |  |  |  |
| CO2   | 0,022  | kg/m3  |  |  |  |  |
| transport   | 0,0066   | tkm    |  |  |  |  |



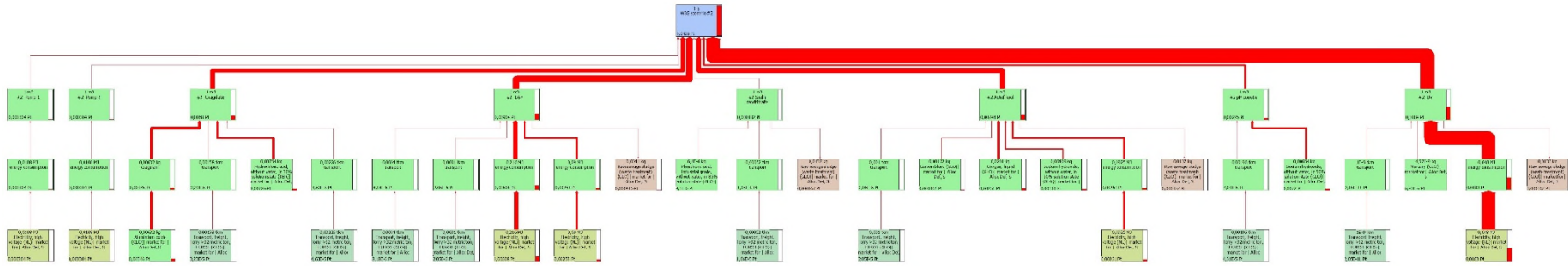
N.B. In scenario's 1 t/m 3 wordt aangegeven dat de emissie van aluminium naar de bodem "0" is. Dit is puur voor de berekening gedaan, aangezien het programma geen waarde bleek toe te kennen aan emissie van aluminium naar de bodem. De werkelijke waarde staat eraast vermeld, maar die bleek niet van invloed te zijn op de LCA-uitkomsten.

## Bijlage II

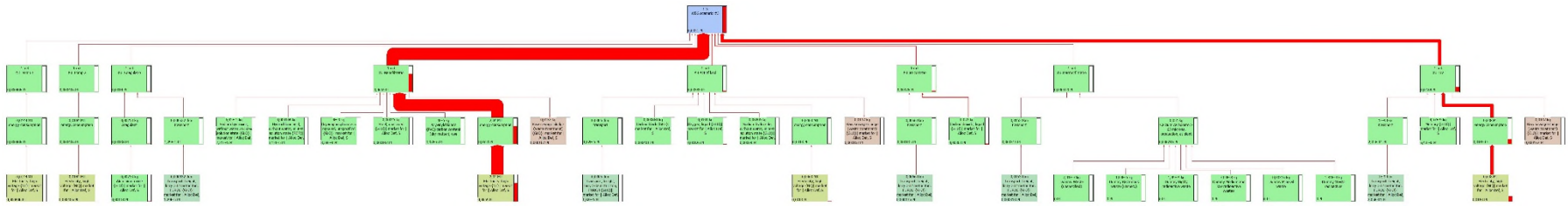
LCA-resultaten op basis van marktconforme energie.



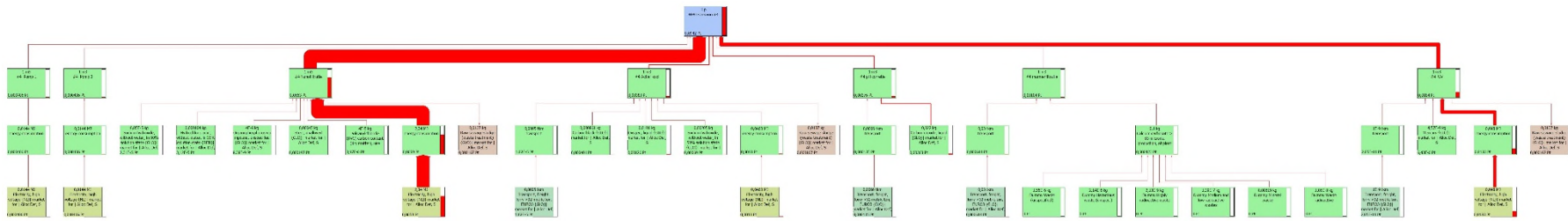
Scenario 2



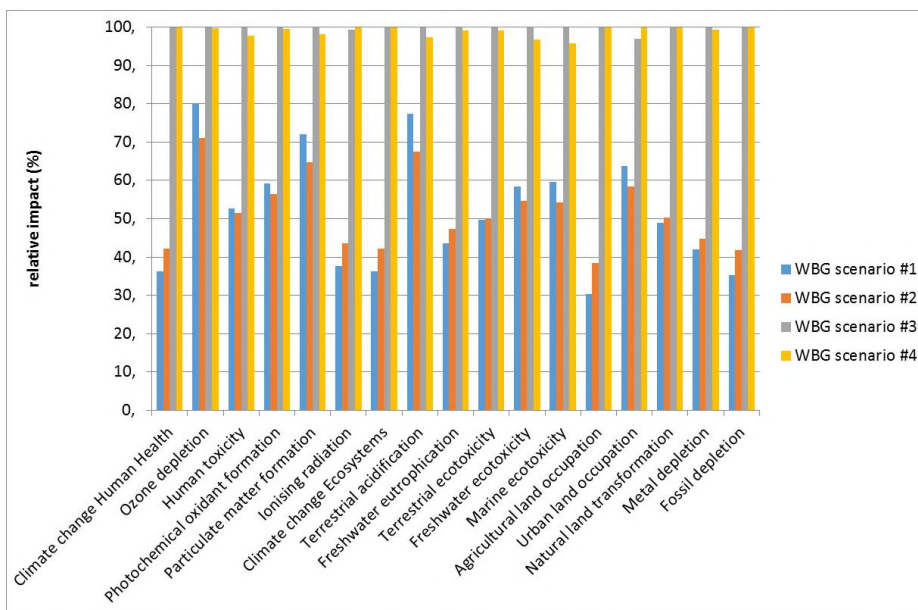
Scenario 3



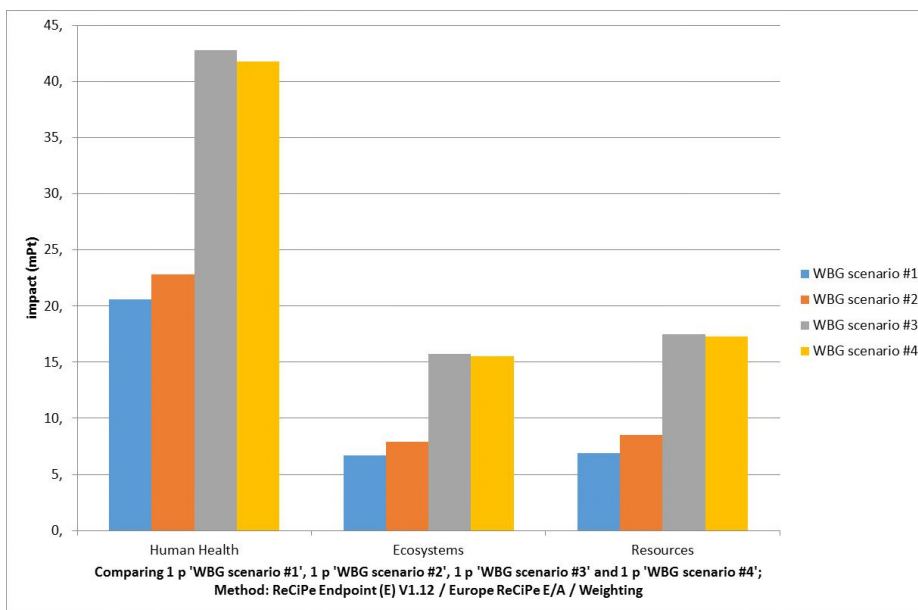
Scenario 4



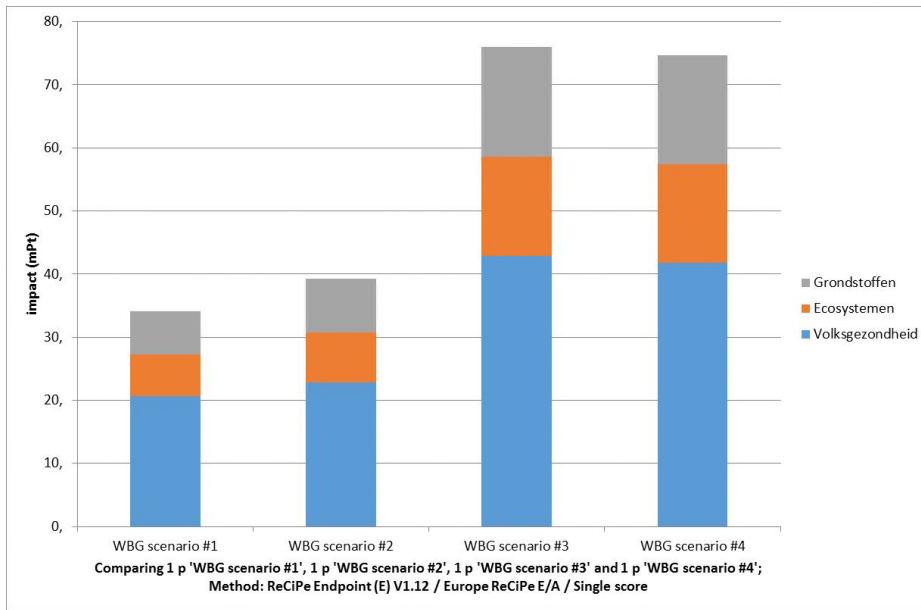
Figuur 15: processen in de verschillende scenario's en hun relatieve impact op het milieu. De dikte van de rode lijnen geeft de impact aan. Van boven naar beneden scenario 1 t/m 4. De impact is hier berekend op basis van marktconforme stroom.



FIGUUR 16: KARAKTERISERING VAN DE IMPACT VAN DE VIER VERSCHILLENDE SCENARIO'S OP DIVERSE TERREINEN (GEBASEERD OP MARKTCONFORME ENERGIE). DE HOOGSTE IMPACT IS GENORMEERD OP 100%



FIGUUR 17: MILIEU-IMPACT VAN VERSCHILLENDE SCENARIO'S OP BASIS VAN MARKTCONFORME ENERGIE, UITGEDRUKT IN mPt.

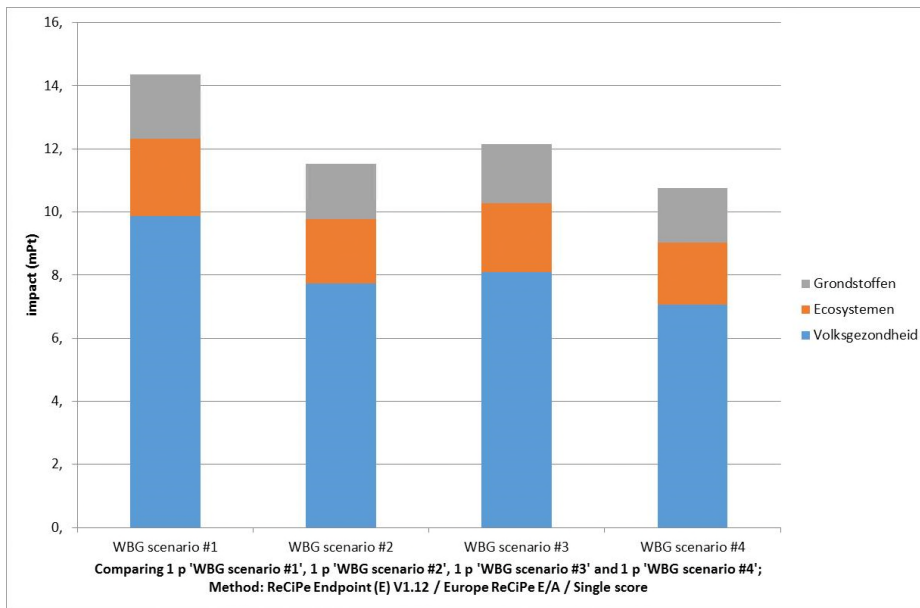


FIGUUR 18: SINGLE POINT SCORE VAN DE SCENARIO'S OP BASIS VAN  $Al_2O_3$  EN MARKTCONFORME ENERGIE



## Bijlage III

### Single point scores voor $\text{Al}_2\text{O}_3$ op basis van groene energie



FIGUUR 19: SINGLE POINT SCORE VAN DE SCENARIO'S OP BASIS VAN  $\text{Al}_2\text{O}_3$  EN GROENE ENERGIE

## Bijlage IV

### TCO-berekeningen

#### **Investerings**

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. De kentallen basisgegevens zijn weergegeven in Figuur 20. Figuur 21 toont de kentallen voor de investering en de exploitatie van scenario 1.

| <b>Algemeen</b>                  |         |                  |
|----------------------------------|---------|------------------|
| Evaluatieperiode installatie     |         | 60 jaar          |
| Afschrijftermijn 1 (civiel)      |         | 30 jaar          |
| Afschrijftermijn 2 (WTB+Electra) |         | 20 jaar          |
| Afschrijftermijn 3               |         | 10 jaar          |
| Afschrijftermijn 4 (membranen)   |         | 5 jaar           |
| Startjaar (Jaar 0)               |         | 2018             |
| Eindjaar                         |         | 2078             |
| <b>Prijsindexen</b>              |         |                  |
| Prijsindex algemeen              |         | 1,50%            |
| Prijsindex elektriciteit         |         | 1,50%            |
| Prijsindex gas                   |         | 1,50%            |
| <b>Water- en Energieprijs</b>    |         |                  |
| Gas                              | € 0,430 | /Nm <sup>3</sup> |
| Elektriciteit                    | € 0,050 | /kWh             |
| Water                            | € -     | /m <sup>3</sup>  |
| <b>Financiering</b>              |         |                  |
| Inbreng eigen vermogen           | € -     |                  |
| Rente op eigen vermogen          |         | 1,50%            |
| Rente op vreemd vermogen         |         | 1,50%            |
| <b>Tarieven Menskracht</b>       |         |                  |
|                                  |         | NVT              |
| Aanleg/bouw                      | € 52    | /uur             |
| Bedrijfsvoering en Onderhoud     | € 80    | /uur             |
| Beheer                           | € 80    | /uur             |
| Ontwerp                          | € 120   | /uur             |
| Oplevering                       | € 80    | /uur             |
| Vergunningen                     | € 100   | /uur             |
| Vorbereiding financiering        | € 80    | /uur             |

FIGUUR 20: KENTALLEN BASISGEGEVENS VOOR KOSTENBEREKENINGEN (SCENARIO 1)

Van belang zijn ook de gebruikte rentes op de leningen. 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 gedeefde rente op eigen vermogen.

|                   |             |
|-------------------|-------------|
| Winning/inname:   | 7227262,8   |
| Dag piekfactor:   | 1           |
| Uur piekfactor:   | 1,454492564 |
| FTE's             |             |
| Werkelijke afzet: | 6930000     |

| Kengetallen investeringen  |  |
|--|--|
| <b>Algemeen</b>  |  |
| Kengetal PA bouwkosten (alleen software/ uren, de hardware in post E&I ) | 750 Eur per I/O  |
| <b>Percentages bijkomende kosten (toeslagen op bouwkosten)</b>           |  |
| A Toeslag voor algemene voorzieningen                                    | 5 % van bouwkosten Ct / Wtb / E&I / PA                   |
| B Inrichtingskosten  | 2 % van bouwkosten Ct / Wtb / E&I / PA                   |
| C Beveiligingskosten   | 1 % van bouwkosten Ct / Wtb / E&I / PA                   |
| D Begeleidingskosten zuiveringsprojecten                                 | 20 % van bouwkosten Ct / Wtb / E&I / PA +A+B+C           |
| E Begeleidingskosten overige projecten                                   | 10 % van bouwkosten Ct / Wtb / E&I / PA +A+B+C           |
| F Overige bijkomende kosten  | 2 % van bouwkosten Ct / Wtb / E&I / PA +A+B+C            |
| G Totale bouwrente   | 3 % van bouwkosten Ct / Wtb / E&I / PA +A+B+C+(D of E)+F |
| <b>Indexering investeringskengetallen</b>                                |  |
| Indexeren tot jaar   | 2017   |
| CBS Index DW installaties  | 1,8 procent  |

| Kengetallen exploitatie                               |   |
|---|---|
| <b>Vaste kosten afschrijvingstermijnen</b>            |   |
| Rente op basis van annuïteit                          | 4 %   |
| Levensduur Winning                                    | 40 jaar   |
| Levensduur Civiele Techniek / Bouwkunde               | 40 jaar   |
| Levensduur Werktuigbouwkunde                          | 25 jaar   |
| Levensduur Elektrotechniek                            | 20 jaar   |
| Levensduur PA   | 5 jaar  |
| Levensduur Transportleidingen                         | 60 jaar   |
| Levensduur Membranen UF / HF                          | 8 jaar  |
| Levensduur Membranen NF / HF                          | 5 jaar  |
| Levensduur Membranen RO zeewater                      | 4 jaar  |
| Vervanging actief kool (nieuw)                        | 2 jaar  |
| Vervanging actief kool (regeneratie)                  | 1,5 jaar  |
| Levensduur overige (filterzand etc.)                  | 10 jaar   |
| <b>Verbruikskosten: energie</b>                       |   |
| Energiekosten (transport/ levering/ belasting)        | 0,08 Eur/kWh                                      |
| <b>Verbruikskosten: chemicaliën</b>                   |   |
| H2SO4 (100%)  | 0,11 Eur /kg                                      |
| HCl (100%)  | 0,22 Eur /kg                                      |
| NaOH (100%)   | 0,225 Eur /kg                                     |
| Ca(OH)2 (100%)  | 0,16 Eur /kg                                      |
| Na2CO3 (100%)   | 0,3 Eur /kg                                       |
| CaCO3 (100%)  | 0,1 Eur /kg                                       |
| FeCl3 6H2O (100%)                                     | 0,25 Eur /kg                                      |
| FeSO4 . 7H2O (100%)                                   | 0,25 Eur /kg                                      |
| PAC (Sachtoclar) (100%)                               | 0,41 Eur /kg                                      |
| Al2(SO4)3 . 18H2O (100%)                              | 0,2 Eur /kg                                       |
| Cl2 (100%)  | 0,51 Eur /kg                                      |
| CO2 (100%)  | 0,25 Eur /kg                                      |
| NaCl (100%)   | 0,07 Eur /kg                                      |
| O3 (100%)   | 0 Eur /kg   |
| H2O2 (100%)   | 1,56 Eur /kg                                      |
| PE (100%)   | 5,9 Eur /kg                                       |
| Citroenzuur (100%)                                    | 1,7 Eur /kg                                       |
| NaOCl (100%)  | 3,15 Eur /kg                                      |
| O2 (100%)   | 0 Eur /kg   |
| Antiscalant (100%)                                    | 1,2 Eur /kg                                       |
| NaHCO3 (100%)   | 0 Eur /kg   |
| KHCO3 (100%)  | 1,35 Eur /kg                                      |
| CaCl2 (100%)  | 0,325 Eur /kg                                     |
| MgCl2 (100%)  | 0,225 Eur /kg                                     |
| Ammoniakoplossing (100%)                              | 0 Eur /kg   |
| <b>Verbruikskosten: verbruiksmaterialen</b>           |   |
| Membranen UF  | 80 Eur/m2   |
| Membranen HF/Nano                                     | 15 Eur/m2   |
| Zeewater HF   | 25 Eur/m2   |
| Entzand ontharding                                    | 70 Eur/ton  |
| Granaatzand ontharding                                | 380 Eur/ton                                       |
| Actieve kool (nieuw)                                  | 662 Eur/m3  |
| Actieve kool (regeneratie)                            | 400 Eur/m3  |
| Antraciet SF  | 282 Eur/m3  |
| Zand SF   | 140 Eur/m3  |
| Zand LZF  | 140 Eur/m3  |
| Marmor  | 90 Eur/m3   |
| Levensduur UV-lampen lage druk                        | 9000 uur  |
| Kosten UV-lampen lage druk                            | 200 Eur/lamp                                      |
| Levensduur UV-lampen midden druk                      | 5000 uur  |
| Kosten UV-lampen midden druk                          | 450 Eur/lamp                                      |
| Levensduur pulse UV-lampen                            | 5000 uur  |
| Kosten pulse UV-lampen                                | 600 Eur/lamp                                      |
| Pakkingsmateriaal beluchtingstoren                    | 100 Eur/m3  |
| Poederkool  | 1200 Eur/ton                                      |
| <b>Verbruikskosten: afvoerkosten</b>                  |   |
| Drinkwaterslib gewoon                                 | 200 Eur per ton ds                                |
| Drinkwaterslib chemisch                               | 400 Eur per ton ds                                |
| Onthardingspellets                                    | 64 Eur per ton                                    |
| Lozingskosten riool                                   | 0,3 Eur/m3  |
| Afvoerkosten brijn                                    | 0,02 Eur/m3                                       |
| Afslroom microzeefinstallatie                         | 0,005 Eur/m3                                      |
| Afvoer neutralisatie demiwater                        | 0,1 Eur/m3  |
| <b>Onderhoudskosten</b>                               |   |
| Civiele Techniek / Bouwkunde                          | 0,5 % van bouwkosten CT / B                       |
| Werktuigbouwkunde                                     | 2 % van bouwkosten WTB                            |
| Elektrotechniek                                       | 4 % van bouwkosten E                              |
| Proces Automatisering                                 | 6 % van bouwkosten PA                             |
| Onderhoud inrichting /algemene voorzieningen          | 6 % van bouwkosten inrichting /alg. voorzieningen |
| <b>Specifieke bedrijfskosten</b>                      |   |
| Personeelskosten (bediening/ onderhoud/optimaliseren) | 60000 Euro per manjaar                            |
| Analysekosten   | 4,61 Euro per KiWA-punt                           |
| Kosten beveiliging                                    | 15 % van bouwkosten beveiliging                   |
| <b>Administratieve beheerskosten</b>                  |   |
| Administratieve beheerskosten                         | 20 % van specifieke bedrijfskosten                |

FIGUUR 21: KENTALLEN VOOR INVESTERING EN EXPLOITATIE (SCENARIO 1).

### Bedrijfsvoeringskosten

Bedrijfsvoeringskosten en kostenbesparingen kunnen worden gespecificeerd in tabblad "bedrijfsvoeringskosten" (zie Figuur 22). Bij bedrijfsvoering kan het jaarlijkse materiaalverbruik, energieverbruik en waterverbruik en de kosten per eenheid worden opgegeven. De spreadsheet berekent vervolgens over alle jaren van de evaluatieperiode de geïndexeerde kosten uit. Ook de kostenbesparingen kunnen op deze manier worden ingevoerd.

Scenario 1:

| <b>SPO de Punt, Waterbedrijf Groningen</b>                 |         |         |                   |                  |
|--|---------|---------|-------------------|------------------|
| Berekening total cost of ownership technische installaties |         |         |                   |                  |
| Bedrijfsvoering  |         |         |                   |                  |
| Omschrijving   | Aantal  | Eenheid | Prijs per eenheid | Totaal           |
| Elektriciteit verbruik                                     | 824.832 | kWh     | 0,05              | € 41.242         |
| Zoutzuur verbruik  | 152     | m3      | 149,50            | € 22.649         |
| PACl verbruik  | 903     | ton     | 229,00            | € 206.880        |
| NaOH verbruik  | 283     | m3      | 154,00            | € 43.613         |
| Reactivatie Actieve Koolfilters                            | 2       |         | € 18.036          | € 36.072         |
| Slibverwerking   | 13.000  | ton     | € 14,62           | € 190.000        |
| <b>Totaal</b>  |         |         |                   | <b>€ 540.456</b> |

Scenario 2:

| Omschrijving                    | Aantal    | Eenheid | Prijs per eenheid | Totaal           |
|---------------------------------|-----------|---------|-------------------|------------------|
| Elektriciteit verbruik          | 1.116.766 | kWh     | 0,05              | € 55.838         |
| Zoutzuur verbruik               | 151,5     | m3      | 149,50            | € 22.649         |
| PACl verbruik                   | 452       | ton     | 229,00            | € 103.440        |
| NaOH verbruik                   | 130       | m3      | 154,00            | € 20.010         |
| Reactivatie Actieve Koolfilters | 2         |         | € 18.036          | € 36.072         |
| Slibverwerking                  | 9.476     | ton     | € 14,62           | € 138.492        |
| <b>Totaal</b>                   |           |         |                   | <b>€ 376.502</b> |

Scenario 3:

| Omschrijving                    | Aantal    | Eenheid | Prijs per eenheid | Totaal           |
|---------------------------------|-----------|---------|-------------------|------------------|
| Elektriciteit verbruik          | 2.161.137 | kWh     | 0,05              | € 108.057        |
| PaCl verbruik                   | 208       | m3      | 229,00            | € 47.588         |
| CO2 verbruik                    | 154       | m3      | 70,00             | € 10.780         |
| CaCO3 verbruik                  | 357       | ton     | 150,00            | € 53.549         |
| Reactivatie Actieve Koolfilters | 1         |         | € 18.036          | € 18.036         |
| Slibverwerking                  | 7.572     | ton     | € 14,62           | € 110.669        |
| <b>Totaal</b>                   |           |         |                   | <b>€ 348.678</b> |

Scenario 4:

| Omschrijving                    | Aantal    | Eenheid | Prijs per eenheid | Totaal           |
|---------------------------------|-----------|---------|-------------------|------------------|
| Elektriciteit verbruik          | 2.161.137 | kWh     | 0,05              | € 108.057        |
| CO2 verbruik                    | 154       | m3      | 70,00             | € 10.780         |
| CaCO3 verbruik                  | 357       | ton     | 150,00            | € 53.549         |
|                                 |           |         |                   |                  |
| Reactivatie Actieve Koolfilters | 1         |         | € 18.036          | € 18.036         |
| Slibverwerking                  | 5.950     | ton     | € 14,62           | € 86.962         |
| <b>Totaal</b>                   |           |         |                   | <b>€ 277.383</b> |

FIGUUR 22: DATA BEDRIJFSVOERING VOOR ALLE VIER SCENARIO'S

## Scenario 1:

| Kostenbesparing/Inkomsten       |        |                |                   |            |
|---------------------------------|--------|----------------|-------------------|------------|
| Omschrijving                    | Aantal | Eenheid        | Prijs per eenheid | Totaal     |
| Verbruik Elektriciteit per jaar | 0      | kWh            | € 0,05            | € -        |
| Verbruik Gas per jaar           | 0      | m <sup>3</sup> | € 0,43            | € -        |
| Verbruik Water per jaar         | 0      | m <sup>3</sup> | € -               | € -        |
| Bedrijfsvoering en Onderhoud    | 0      | uur            | € 80,00           | € -        |
| Bedrijfsvoering en Onderhoud    | 0      | uur            | € 80,00           | € -        |
| Verbruiksmaterialen per jaar    |        |                |                   | € -        |
|                                 |        |                |                   | € -        |
| <b>Totaal</b>                   |        |                |                   | <b>€ -</b> |

## Scenario 2:

| Kostenbesparing/Inkomsten       |        |                |                   |            |
|---------------------------------|--------|----------------|-------------------|------------|
| Omschrijving                    | Aantal | Eenheid        | Prijs per eenheid | Totaal     |
| Verbruik Elektriciteit per jaar | 0      | kWh            | € 0,05            | € -        |
| Verbruik Gas per jaar           | 0      | m <sup>3</sup> | € 0,43            | € -        |
| Verbruik Water per jaar         | 0      | m <sup>3</sup> | € -               | € -        |
| Bedrijfsvoering en Onderhoud    | 0      | uur            | € 80,00           | € -        |
| Bedrijfsvoering en Onderhoud    | 0      | uur            | € 80,00           | € -        |
| Verbruiksmaterialen per jaar    |        |                |                   | € -        |
|                                 |        |                |                   | € -        |
| <b>Totaal</b>                   |        |                |                   | <b>€ -</b> |

## Scenario 3:

| Kostenbesparing/Inkomsten       |        |                |                   |            |
|---------------------------------|--------|----------------|-------------------|------------|
| Omschrijving                    | Aantal | Eenheid        | Prijs per eenheid | Totaal     |
| Verbruik Elektriciteit per jaar | 0      | kWh            | € 0,05            | € -        |
| Verbruik Gas per jaar           | 0      | m <sup>3</sup> | € 0,43            | € -        |
| Verbruik Water per jaar         | 0      | m <sup>3</sup> | € -               | € -        |
| Bedrijfsvoering en Onderhoud    | 0      | uur            | € 80,00           | € -        |
| Bedrijfsvoering en Onderhoud    | 0      | uur            | € 80,00           | € -        |
| Verbruiksmaterialen per jaar    |        |                |                   | € -        |
|                                 |        |                |                   | € -        |
| <b>Totaal</b>                   |        |                |                   | <b>€ -</b> |

## Scenario 4:

| Kostenbesparing/Inkomsten       |        |                |                   |  |            |
|---------------------------------|--------|----------------|-------------------|--|------------|
| Omschrijving                    | Aantal | Eenheid        | Prijs per eenheid |  | Totaal     |
| Verbruik Elektriciteit per jaar | 0      | kWh            | € 0,05            |  | € -        |
| Verbruik Gas per jaar           | 0      | m <sup>3</sup> | € 0,43            |  | € -        |
| Verbruik Water per jaar         | 0      | m <sup>3</sup> | € -               |  | € -        |
| Bedrijfsvoering en Onderhoud    | 0      | uur            | € 80,00           |  | € -        |
| Bedrijfsvoering en Onderhoud    | 0      | uur            | € 80,00           |  | € -        |
| Verbruiksmaterialen per jaar    |        |                |                   |  | € -        |
|                                 |        |                |                   |  | € -        |
| <b>Totaal</b>                   |        |                |                   |  | <b>€ -</b> |

FIGUUR 23: KOSTEN BESPARINGEN EN INKOMSTEN VOOR ALLE VIER SCENARIO'S

### Onderhoud

Onderhoud kan worden ingevoerd op het tabblad "Onderhoud". Dit tabblad bevat een invoerveld voor periodiek onderhoud 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, vindt het onderhoud plaats in de jaren 1, 4, 7 enz. De data die voor onderhoud zijn gebruikt zijn weergegeven in .

#### Scenario 1:

| Periodiek onderhoud              |        |         |                   |        |                  |
|----------------------------------|--------|---------|-------------------|--------|------------------|
| Omschrijving                     | Aantal | Eenheid | Prijs per eenheid | Cyclus | Totaal           |
| Materialen (2.5% van Bouwkosten) | 1      | stuks   | € 289.450         | 1      | € 289.450        |
|                                  |        |         |                   | 15     | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
| <b>Totaal</b>                    |        |         |                   |        | <b>€ 289.450</b> |

#### Scenario 2:

| Periodiek onderhoud              |        |         |                   |        |                  |
|----------------------------------|--------|---------|-------------------|--------|------------------|
| Omschrijving                     | Aantal | Eenheid | Prijs per eenheid | Cyclus | Totaal           |
| Materialen (2.5% van Bouwkosten) | 1      | stuks   | € 301.750         | 1      | € 301.750        |
|                                  |        |         |                   | 15     | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
| <b>Totaal</b>                    |        |         |                   |        | <b>€ 301.750</b> |

#### Scenario 3:



| Periodiek onderhoud              |        |         |                   |        |                  |
|----------------------------------|--------|---------|-------------------|--------|------------------|
| Omschrijving                     | Aantal | Eenheid | Prijs per eenheid | Cyclus | Totaal           |
| Materialen (2.5% van Bouwkosten) | 1      | stuks   | € 397.750         | 1      | € 397.750        |
|                                  |        |         |                   | 15     | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
| <b>Totaal</b>                    |        |         |                   |        | <b>€ 397.750</b> |

## Scenario 4:

| Periodiek onderhoud              |        |         |                   |        |                  |
|----------------------------------|--------|---------|-------------------|--------|------------------|
| Omschrijving                     | Aantal | Eenheid | Prijs per eenheid | Cyclus | Totaal           |
| Materialen (2.5% van Bouwkosten) | 1      | stuks   | € 397.750         | 1      | € 397.750        |
|                                  |        |         |                   | 15     | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
|                                  |        |         |                   | 1      | € -              |
| <b>Totaal</b>                    |        |         |                   |        | <b>€ 397.750</b> |

FIGUUR 24: DATA VOOR PERIODIEK ONDERHOUD VOOR ALLE VIER SCENARIO'S

## Overzicht

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

## Scenario 1:

| Berekening total cost of ownership technische installaties |   |                                     |      |                  |                    |
|--|---|-------------------------------------|------|------------------|--------------------|
| Overzicht  |   |                                     |      |                  |                    |
|  |   | TOTALEN<br>OVER<br>EVALUATIEPERIODE | Jaar | 0<br>2018        | 1<br>2019          |
| Vorbereidingskosten  | € | 4.134.000                           | €    | 4.134.000        |                    |
| Kapitaalkosten   | € | 46.950.822                          |      |                  | € 585.532          |
| Onderhoudskosten   | € | 28.267.071                          |      |                  | € 293.792          |
| Bedrijfsvoeringskosten                                     | € | 52.779.756                          |      |                  | € 548.563          |
| <b>Totale kosten</b>                                       | € | <b>132.131.649</b>                  | €    | <b>4.134.000</b> | <b>€ 1.427.886</b> |
| <b>Contante Waarde Kosten</b>                              | € | <b>83.111.362</b>                   | €    | <b>4.134.000</b> | <b>€ 1.406.784</b> |
| Kostenbesparing/Inkomsten                                  | € | -                                   |      |                  | € -                |
| <b>Contante Waarde Besparing/Inkomsten</b>                 | € | <b>-</b>                            |      |                  | <b>€ -</b>         |
| Kosten+Baten   | € | 132.131.649                         | €    | 4.134.000        | € 1.427.886        |
| <b>TCO</b>   | € | <b>83.111.362</b>                   | €    | <b>4.134.000</b> | <b>€ 1.406.784</b> |

| Totalen                 |                      |
|-------------------------|----------------------|
| Vorbereidingskosten     | € 4.134.000          |
| Kapitaalkosten          | € 46.950.822         |
| Onderhoudskosten        | € 28.267.071         |
| Bedrijfsvoeringskosten  | € 52.779.756         |
| <b>Subtotaal Kosten</b> | <b>€ 132.131.649</b> |
| Besparing/Inkomsten     | € -                  |
| <b>Totaal</b>           | <b>€ 132.131.649</b> |
| <b>TCO</b>              | <b>€ 83.111.362</b>  |

Scenario 2:

| Berekening total cost of ownership technische installaties |   |                                     |      |                  |                    |
|--|---|-------------------------------------|------|------------------|--------------------|
| Overzicht  |   | TOTALEN<br>OVER<br>EVALUATIEPERIODE | Jaar | 0<br>2018        | 1<br>2019          |
| Vorbereidingskosten  | € | 4.311.000                           | €    | 4.311.000        |                    |
| Kapitaalkosten   | € | 48.930.827                          |      |                  | € 610.103          |
| Onderhoudskosten   | € | 29.468.263                          |      |                  | € 306.276          |
| Bedrijfsvoeringskosten                                     | € | 36.768.417                          |      |                  | € 382.150          |
| <b>Totale kosten</b>                                       | € | <b>119.478.507</b>                  | €    | <b>4.311.000</b> | <b>€ 1.298.529</b> |
| <b>Contante Waarde Kosten</b>                              | € | <b>75.419.158</b>                   | €    | <b>4.311.000</b> | <b>€ 1.279.339</b> |
| Kostenbesparing/Inkomsten                                  | € | -                                   |      |                  | € -                |
| <b>Contante Waarde Besparing/Inkomsten</b>                 | € | <b>-</b>                            |      |                  | <b>€ -</b>         |
| Kosten+Baten   | € | 119.478.507                         | €    | 4.311.000        | € 1.298.529        |
| <b>TCO</b>   | € | <b>75.419.158</b>                   | €    | <b>4.311.000</b> | <b>€ 1.279.339</b> |

| Totalen                 |                      |
|-------------------------|----------------------|
| Vorbereidingskosten     | € 4.311.000          |
| Kapitaalkosten          | € 48.930.827         |
| Onderhoudskosten        | € 29.468.263         |
| Bedrijfsvoeringskosten  | € 36.768.417         |
| <b>Subtotaal Kosten</b> | <b>€ 119.478.507</b> |
| Besparing/Inkomsten     | € -                  |
| <b>Totaal</b>           | <b>€ 119.478.507</b> |
| <b>TCO</b>              | <b>€ 75.419.158</b>  |

Scenario 3:

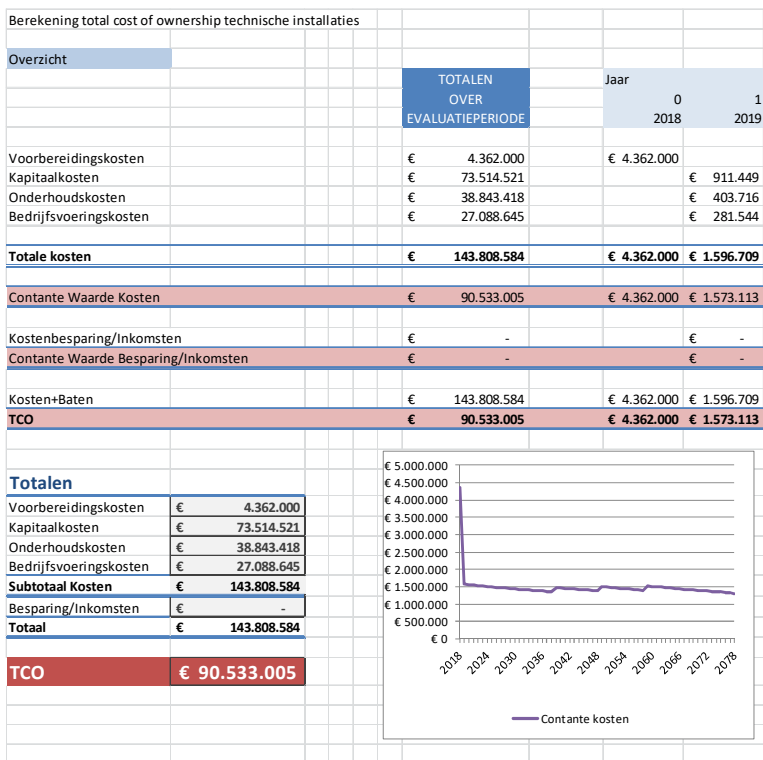
| Berekening total cost of ownership technische installaties |   |                                     |      |                  |                    |
|--|---|-------------------------------------|------|------------------|--------------------|
| Overzicht  |   | TOTALEN<br>OVER<br>EVALUATIEPERIODE | Jaar | 0<br>2018        | 1<br>2019          |
| Vorbereidingskosten  | € | 4.362.000                           | €    | 4.362.000        |                    |
| Kapitaalkosten   | € | 73.514.521                          |      |                  | € 911.449          |
| Onderhoudskosten   | € | 38.843.418                          |      |                  | € 403.716          |
| Bedrijfsvoeringskosten                                     | € | 34.051.170                          |      |                  | € 353.908          |
| <b>Totale kosten</b>                                       | € | <b>150.771.109</b>                  | €    | <b>4.362.000</b> | <b>€ 1.669.074</b> |
| <b>Contante Waarde Kosten</b>                              | € | <b>94.810.710</b>                   | €    | <b>4.362.000</b> | <b>€ 1.644.408</b> |
| Kostenbesparing/Inkomsten                                  | € | -                                   |      |                  | € -                |
| <b>Contante Waarde Besparing/Inkomsten</b>                 | € | <b>-</b>                            |      |                  | <b>€ -</b>         |
| Kosten+Baten   | € | 150.771.109                         | €    | 4.362.000        | € 1.669.074        |
| <b>TCO</b>   | € | <b>94.810.710</b>                   | €    | <b>4.362.000</b> | <b>€ 1.644.408</b> |

| Totalen                 |                      |
|-------------------------|----------------------|
| Vorbereidingskosten     | € 4.362.000          |
| Kapitaalkosten          | € 73.514.521         |
| Onderhoudskosten        | € 38.843.418         |
| Bedrijfsvoeringskosten  | € 34.051.170         |
| <b>Subtotaal Kosten</b> | <b>€ 150.771.109</b> |
| Besparing/Inkomsten     | € -                  |
| <b>Totaal</b>           | <b>€ 150.771.109</b> |
| <b>TCO</b>              | <b>€ 94.810.710</b>  |

Scenario 4:



FIGUUR 25: TOTALEN OVER GEHELE PERIODE EN BEREKENING TCO (TABBLAD "OVERZICHT")

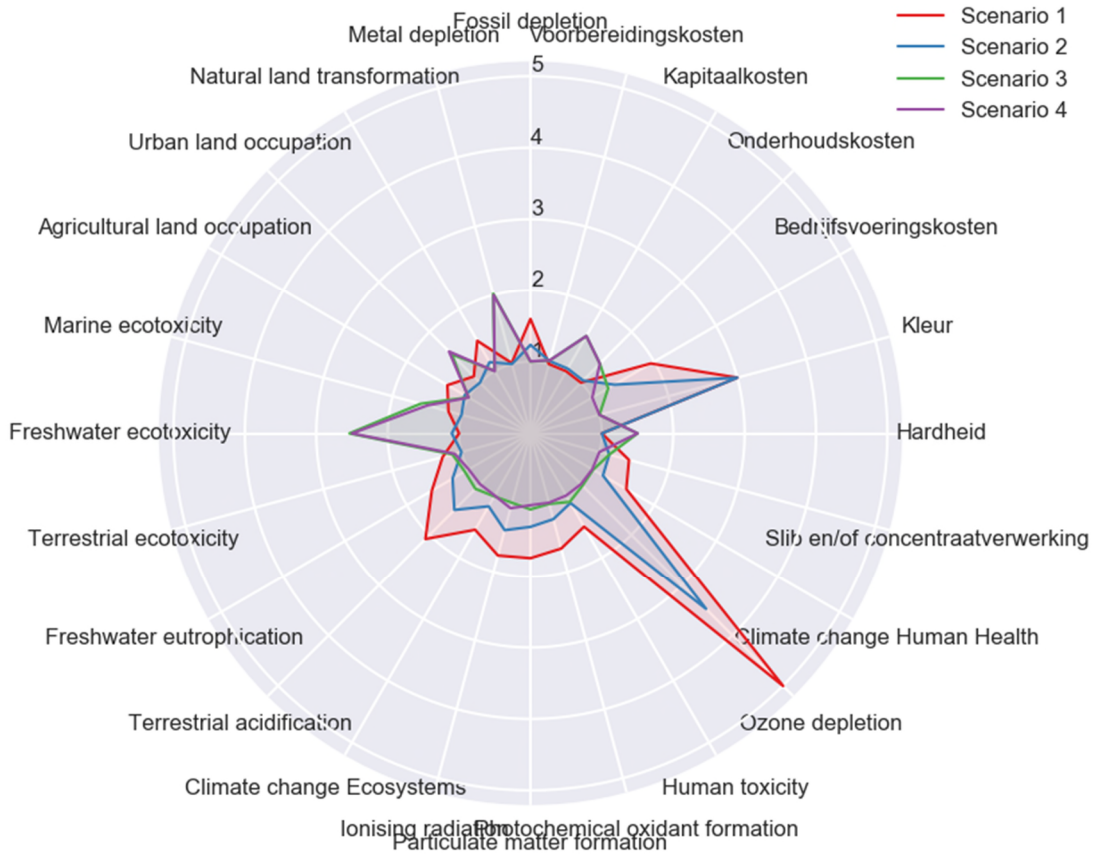
## Bijlage V

### Data MCA

| criterium                     | Eenheid    | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 | Scenario 4 |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Financiën (TCO)               | euro       | 83.111.362 | 75.419.158 | 94.810.710 | 90.533.005 |
| Waterkwaliteit en reststromen | n.v.t.     | 9          | 8          | 6.5        | 6.0        |
| Gezondheid                    | DALY       | 1,5E-06    | 1,1E-06    | 1,1E-06    | 1,0E-06    |
| Ecosystemen                   | species.yr | 2,5E-09    | 1,9E-09    | 1,9E-09    | 1,9E-09    |
| Grondstoffen                  | dollar     | 4,5E-03    | 3,6E-03    | 3,5E-03    | 3,5E-03    |

# Bijlage VI

## MCA voor de sub-criteria



FIGUUR 26: MCA VOOR ELK SUB-CRITERIUM