

BTO 2005.030
mei 2005

De vervuiling van NF- membranen door NOM bij de drinkwaterbereiding

Stage literatuur- en labonderzoek 2004-2005



BTO 2005.030
mei 2005

De vervuiling van NF- membranen door NOM bij de drinkwaterbereiding

Stage literatuur- en labonderzoek 2004-2005

© 2005 Kiwa N.V.
Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag
worden verveelvoudigd,
opgeslagen in een
geautomatiseerd
gegevensbestand, of
openbaar gemaakt, in enige
vorm of op enige wijze,
hetzij elektronisch,
mechanisch, door
fotokopieën, opnamen, of
enig andere manier, zonder
voorafgaande schriftelijke
toestemming van de
uitgever.

Kiwa N.V.
Water Research
Groningenhaven 7
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein

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

Colofon

Titel

De vervuiling van NF- membranen door NOM bij
de drinkwaterbereiding

Projectnummer

11.1511.081

Kwaliteitsborger(s)

Emile Cornelissen
Wolter Siegers

Auteurs

Manu De Ridder
Olivier Van Coppenolle

Voorwoord

Allereerst zouden we Kiwa N.V. willen bedanken voor de ongelooflijke kans die ze ons aangeboden heeft. Het verblijf in Nederland heeft ons vele nieuwe inzichten gegeven in de kwaliteiten die de inwoners van “onze bovenste beste buur” zo uniek maken.

We zouden iedereen van de afdeling waterbehandeling willen bedanken. Ook al waren we “twee Belgische toeristen” die slechts maandag en dinsdag experimenten kwamen doen, toch zorgden jullie ervoor dat Kiwa onze “home away from home” werd. De heerlijke sfeer van de koffiepauzes zullen we blijven missen. Onze dank gaat ook naar de talrijke stagiaires die Kiwa rijk is, met name Guillaume, Mélanie, Arne en Julien.

We hadden het voorrecht om op Kiwa door twee promotors begeleid te worden. Onze grootste bedankingen gaan daarom naar Wolter en Emile. Niet alleen voor de fantastische begeleiding, maar vooral voor de synergie tussen jullie beiden die op ons neerstraalde.

Hulp kwam vaak ook van buitenaf. We zouden daarom graag René en Mike van Waterleidingbedrijf Amsterdam willen bedanken voor de hulp bij het afhalen van het water, Andy Baker voor de fluorescentiebepalingen, Stefan Huber voor de LC-OCD metingen.

Als je een probleem hebt kan je altijd bij iemand terecht. Daarom zouden we de volgende personen van de verschillende facilitaire diensten willen bedanken. We bedanken, Sonja voor het regelen van de huisvesting, Ton voor de technische bijstand en Bianca voor de analyses. We zouden ook Danny willen bedanken om ons het water van Spannenburg te bezorgen.

Mensen die zeker niet vergeten mogen worden zijn onze vrienden die steeds klaarstonden om ons de nodig ontspanning te bezorgen. In vaak moeilijke perioden konden we steeds rekenen op hun begrip. Ook willen we onze ouders danken voor de steun tijdens deze vaak harde periode en voor de kansen die ze ons geven om ons ten volle te kunnen ontwikkelen.

Deze stageperiode heeft een grote invloed gehad op ons en we zullen de vele prachtige momenten zeker niet vergeten. We zijn er zeker van dat we iedereen zullen missen en dat heimwee ons zal treffen, ook al zou het zijn voor het broodje kroket met melk tijdens de middagpauze.

Gedurende je leven zijn er personen die een stempel drukken op je verdere leven. Sven heeft ons laten inzien dat voor een industrieel ingenieur niet alleen het technische aspect belangrijk is, maar ook het menselijke. Sven, je kan niet beseffen hoe dankbaar we zijn dat je onze promotor bent geweest. Merci.

Abstract

De inzet van nanofiltratie is één van de belangrijke evoluties in de bereiding van drinkwater. Net zoals bij alle membraanprocessen is de beheersing van de vervuiling van het membraan echter essentieel. In dit concrete geval zal de aanwezigheid van Natural Organic Matter (NOM) aan de basis liggen van de vervuiling van het NF-membraan. Het verwerven van een beter inzicht in het foulinggedrag van NOM is de centrale doelstelling van dit eindwerk.

In eerste instantie werd een uitgebreide literatuurstudie uitgevoerd als basis voor het onderbouwen van de conclusies uit het experimenteel werk.

Voor dit laatste werd gebruik gemaakt van waters afkomstig van twee locaties en na verschillende behandelingsstappen in het huidige proces. Met een MTA (Membraan Test Apparaat) werden voor de verschillende waters fluxexperimenten uitgevoerd. Deze toonden in het algemeen een drastische daling van de flux ten gevolge van vervuiling. Deze daling werd echter sterk beïnvloed door de aard van het water en de voorbehandeling. Een hogere NOM-concentratie in het water, meer bepaald een hoger humuszuurgehalte, resulteert in een sterkere daling, net zoals de aanwezigheid van Fe- en/of Ca-ionen.

Contacthoekmetingen op de membranen, met de sessile drop en de captive bubble methode, gaven een indicatie dat de vervuiling een hydrofoob karakter heeft.

Aan de hand van detailanalyses op de voedingswaters en de permeaatstromen, voornamelijk gebruik makende van de LC-OCD-methode, werd het effect van vervuiling op de retentie van de verschillende componenten van NOM nagegaan. Voor de componenten die in een relevante concentratie aanwezig waren, werd een verhoging van de retentie vastgesteld.

Op basis van zowel de fluxmetingen, als de detailanalyses, kon geconcludeerd worden dat de humuszuren een belangrijke rol spelen in het foulingmechanisme van NOM.

Experimenteel werd ook bevestigd dat er zich in aanwezigheid van Ca-ionen complexvorming voordoet. Deze complexen resulteren in een dense, hydrofobe gellaag die een zeer belangrijk element vormt in het foulingmechanisme van NOM. Deze conclusie is in overeenstemming met de literatuur en werd op een consistente manier vastgesteld bij zowel de fluxmetingen, als bij de karakterisatie van het membraan en de invloed van vervuiling op het retentiegedrag van de verschillende componenten.

Verder onderzoek in dit verband kan zich onder andere richten op het verder onderzoeken van de mogelijkheden van excitatie emissie fluorescentie metingen als alternatief voor LC-OCD.

Inhoud

1	<u>INLEIDING</u>	17
1.1	ACHTERGROND	17
1.2	AANPAK	18
1.3	DOELSTELLINGEN	19
2	<u>THEORETISCHE ACHTERGROND</u>	21
2.1	NANOFILTRATIE (NF)	21
2.1.1	HISTORIEK	21
2.1.2	ROL IN DRINKWATER	22
2.1.3	NANOFILTRATIE: PRINCIPES EN TOEPASSINGEN	22
2.1.4	CONCRETE UITVOERING	25
2.1.5	KENGETALLEN MEMBRANEN	28
2.1.6	VERVUILING	31
2.2	NOM	35
2.2.1	OORSPRONG EN VOORKOMEN	35
2.2.2	KARAKTERISERING EN CHEMISCHE EIGENSCHAPPEN	36
2.2.3	VERWIJDERING VAN NOM	40
2.3	FOULING VAN NOM OP NF-MEMBRANEN	45
2.3.1	INLEIDING	45
2.3.2	OORZAKEN EN GEVOLGEN VAN FOULING	45
2.3.3	INVLOED VAN NOM- EN MEMBRAANKARAKTERISTIEK	46
2.3.4	INVLOEDEN VAN HYDRODYNAMISCHE AARD	48
2.3.5	INVLOED VAN CHEMISCHE SAMENSTELLING	49
2.3.6	CONCLUSIE	54
2.4	WATERBEHANDELINGEN	57
2.4.1	ONDERSCHIED GROND- EN OPPERVLAKTEWATER	57
2.4.2	OZONISATIE	58
2.4.3	PELLET ONTHARDING	59
	<u>EXPERIMENTEEL GEDEELTE</u>	63
3	<u>FLUXVERLOOP</u>	67
3.1	GEBRUIKTE WATERS	67
3.1.1	WEESPERKARSPER (WLB AMSTERDAM)	67
3.1.2	SPANNENBURG	68
3.2	PROEFOPSTELLING	69
3.2.1	MTA	69
3.2.2	SEPA-CELL	70
3.2.3	MEMBRAAN	71

3.3	VERLOOP VAN DE EXPERIMENTEN	73
3.3.1	ALGEMEEN	73
3.4	BESCHRIJVING VAN DE PROEVEN	74
3.4.1	BENAMING VAN DE EXPERIMENTEN	74
3.4.2	WEESPERKARSPEL	74
3.4.3	SPANNENBURG	75
3.5	BESPREKING VAN DE FLUXVERLOPEN	77
3.6	KARAKTERISERING VAN DE MEMBRANEN	81
3.6.1	KALIBRATIECURVE	81
3.6.2	RETENTIE	82
3.6.3	WATEROVERDRACHTSCOËFFICIËNT (Kw)	83
3.7	MEMBRANEN	85
3.7.1	ONGEBRUIKT MEMBRAAN	85
3.7.2	VERVUILDE MEMBRANEN	85
3.8	VERKLARING VOOR DE FOULING VAN SPANNENBURG	86
4	<u>CONTACTHOEKMETINGEN</u>	<u>89</u>
4.1	DOELSTELLING EN AANPAK	89
4.2	PRINCIPE	90
4.2.1	SESSILE DROP	90
4.2.2	CAPTIVE BUBBLE	90
4.3	OPSTELLING EN UITVOERING	91
4.3.1	SESSILE DROP	91
4.3.2	CAPTIVE BUBBLE	92
4.4	OPMERKINGEN	93
4.4.1	SESSILE DROP	93
4.4.2	CAPTIVE BUBBLE	94
4.5	BESPREKING EN CONCLUSIES	95
4.5.1	SESSILE DROP	95
4.5.2	CAPTIVE BUBBLE	96
5	<u>ANALYSE VAN VOEDING EN PERMEAAT</u>	<u>99</u>
5.1	DOELSTELLING EN AANPAK	99
5.2	LC-OCD	100
5.2.1	BESCHRIJVING VAN DE METHODE	100
5.2.2	VOEDING	105
5.2.3	SP (SALT PASSAGE)	112
5.2.4	VARIATIE VAN SAMENSTELLING	118
5.2.5	MASSABALANS	122
5.2.6	SUVA	124
5.2.7	DE INVLOED VAN FOULING OP HET PERMEAAT	126
5.2.8	MOLECULAIR GEWICHT VAN DE HUMUSFRACTIE	128
5.3	EXCITATIE-EMISSIONS FLUORESCENTIE	129
5.3.1	BESCHRIJVING VAN DE METHODE	129

5.3.2	RESULTATEN	131
5.4	FLUORESCENTIE VERGELEKEN MET LC-OCD	134
5.4.1	BESLUIT	135
6	<u>CALCIUM-COMPLEXVORMING</u>	137
6.1	DOELSTELLING	137
6.2	BESCHRIJVING VAN DE METHODE	137
6.2.1	WERKINGSPRINCIPE	137
6.2.2	UITVOERING	137
6.2.3	TYPE ANIONENWISSELAAR	137
6.3	OPMERKINGEN	138
6.4	RESULTATEN EN CONCLUSIES	138
6.5	ANDERE BEVINDINGEN	140
7	<u>CONCLUSIES</u>	143
7.1	DE GEBRUIKTE WATERS BEVATTEN NOM	143
7.2	NOM VEROORZAAKT FLUXDALING DOOR FOULING	144
7.3	SAMENSTELLING VAN DE FOULINGLAAG	145
7.4	CALCIUM VORMT COMPLEXEN MET NOM	146
7.5	EFFECT VAN CALCIUM-NOM COMPLEXVORMING OP FOULING	146
7.6	VERBAND TUSSEN CONTACTHOEK EN VERVUILING	147
7.7	HET NUT VAN DE ANALYSEMETHODEN	147
7.8	HYPOTHESE VOOR DE OPBOUW VAN DE FOULINGLAAG	148
8	<u>AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK</u>	149
8.1	FLUXEXPERIMENTEN	149
8.1.1	EXPERIMENTEN	149
8.1.2	WATERTYPE	149
8.2	ANALYSES	150
8.3	CONTACTHOEKMETING	150
8.4	CALCIUMCOMPLEX	150
9	<u>LITERATUUR</u>	153
10	<u>BIJLAGEN</u>	159

Afkortingen

BAC	Biologische Actief-Koolfiltratie
BB	Building Blocks
CA	Cellulose Acetaat
CDOC	Chromatographic Organic Carbon
CDOM	Coloured Dissolved Organic Matter
CP	Concentratiepolarisatie
DDT	dichloordifenyiltrichloorethaan
DBP	Disinfection By-Product
DOC	Dissolved Organic Carbon
EEM	Emissie-Excitatie Matrix
GAC	Granulair Actieve Kool
HAA	Haloacetic acid
HOC	Hydrophobic Organic Carbon
HS	Humic Substances
LC-OCD	Liquid Chromatography – Organic Carbon Detection
MF	Microfiltratie
MIEX	Magnetized Ion Exchange
MM	Moleculaire Massa
MTA	Membraan Test Apparaat
MWCO	Molecular Weight Cut-Off
N/A	Neutrale en amfifiele stoffen
NF	NanoFiltratie
NOM	Natural Organic Carbon
OC	Organic Carbon
OZ	Vrije organische zuren
PA	polyamide
PAK	Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen
POC	Particulate Organic Carbon
PS	Polysaccharide
PVC	polyvinylchloride
R	Retentie
RO	Reversed Osmosis
SEC	Size Exclusion Chromatography
SP	Salt Passage
SUVA	Specifieke UV ₂₅₄ Absorbantie
THM	Trihalomethanen
TMP	Transmembraandruk
TOC	Total Organic Carbon
UF	Ultrafiltratie
UV	Ultra Violet

Symbolen

Å	Angstrom	[1.10 ⁻¹⁰ m]
A _m	membraanoppervlak	[m ²]
C	Concentraatdebiet	[mg/l]
C _C	Concentraatconcentratie	[mg/l]
C _f	Voedingsconcentratie	[mg/l]
C _P	Permeaatconcentratie	[mg/l]
C _v	Voedingsconcentratie	[mg/l]
D	Dalton	[g/mol]
dm/dt	hoeveelheid geadsorbeerd NOM	[mg/h]
dV/dt	volume per tijdseenheid	[l/h]
F	Voedingsdebiet	[l/h]
J	Flux	[l/(m ² .h)]
K _w	wateroverdrachtscoëfficiënt	[l/(m ² .h.bar)]
MM	Moleculaire Massa	[g/mol]
MWCO	Molecular weight cut-off	[Da]
P	Permeaatdebiet	[l/h]
P _C	De SP van een component	[-]
P _T	De SP van TOC	[-]
Q	debiet	[l/h]
Q _p	permeaatdebiet	[l/h]
Q _v	voedingsdebiet	[l/h]
R	retentie	[-]
S	Recovery	[-]
ΔP	drukval over het membraan	[bar]
SP	salt passage	[-]
T	temperatuur	[°C]
T _P	De concentratie van TOC in het permeaat	[mg/l]
Δ%TOC	verschil in %TOC waarde tussen permeaat en voeding	[%]
θ	Contacthoek	[°]

Kiwa NV.

Dit eerste hoofdstuk geeft een kort overzicht van de structuur en de organisatie van Kiwa N.V. Het is een internationaal bedrijf, onderverdeeld in verschillende afdelingen die onafhankelijk maar toch gecoördineerd werken. Tijdens onze stage waren wij werkzaam op de afdeling “Water Research” in Nieuwegein.

Profiel en missie

Het hoofddoel van Kiwa is certificering en keuring. Andere activiteiten zijn inspectie, onderzoek en adviesverlening. Om dit alles optimaal te laten verlopen is Kiwa Nederland ingedeeld in verschillende onderdelen die onafhankelijk werken, maar wel continu informatie uitwisselen. De verschillende afdelingen van het bedrijf zijn :

- Kiwa Certificatie en Keuringen;
- Kiwa Inspectie;
- Kiwa Water en Research;
- Kiwa Management Consultants;
- Kiwa Trainingen.

Kiwa Certificatie en Keuringen

Kiwa Certificatie en Keuringen is een kwaliteitszorgbedrijf. Ze bieden (inter)nationale opdrachtgevers hulp aan bij het certificatietraject. Dat varieert van het opstellen van normen, specificaties en beoordelingsrichtlijnen, tot certificatie in een groot aantal marktsectoren.

Kiwa Inspectie

Inspecties waarborgen de integriteit van opslaginstallaties, (transport)leidingen en bodembeschermende voorzieningen. De inspecties, keuringen en onderzoeken richten zich op de werking van het object, maar ook op aanverwante zaken, zoals veiligheid, milieuaspecten, levenscyclus en communicatie. Het resultaat is een duidelijk beeld van de installatie of voorziening en een onafhankelijk bewijs van goed onderhoud.

Kiwa Water en Research

Kiwa Water Research is een kennisinstituut voor water en aanverwante milieu- en natuuraspecten. Samen met, en in opdracht van de Nederlandse waterbedrijven en Vewin (Vereniging van waterbedrijven in Nederland) onderzoeken en ontwikkelen ze technieken om de waterkwaliteit te verbeteren en te bepalen. Verder zoeken ze naar methodes om de waterkwaliteit te verbeteren en voeren opdrachten uit voor de industrie, overheden, waterbedrijven en andere belanghebbenden voor waterkwaliteit. Ten slotte geven ze adviezen, en zorgen ze voor kwaliteitsborging.

In de laboratoria van Kiwa Water Research worden bepalingsmethoden ontwikkeld, advies uitgevaardigd, ringonderzoeken en bijzondere analyses uitgevoerd.

Kiwa Management Consultants

Kiwa Management Consultants in Nieuwegein adviseert bedrijven bij het management en de uitvoering van veranderingsprocessen, waarbij men procesdenken als uitgangspunt neemt. Daarnaast ondersteunt het bureau bij de opzet en invoering van managementsystemen voor kwaliteit, milieu, arbeidsomstandigheden en veiligheid.

Kiwa Trainingen

Kiwa wil de ontwikkeling en de prestaties van mensen en organisaties stimuleren. Om dit te realiseren bieden ze een heel gamma van cursussen en opleidingen aan.

Kiwa internationaal

Kiwa is een internationaal bedrijf met vestigingen in Nederland, België, Duitsland, Italië en Engeland en samenwerkingsverbanden met partners in andere Europese landen. De vestigingen bedienen lokale opdrachtgevers met alle diensten van Kiwa N.V. Door de multinationale samenwerking tussen de bedrijven en de one stop shopping formule garandeert Kiwa dat alle certificatiezorgen aan één loket uit handen worden genomen.

Kiwa Belgium N.V. is een kwaliteitszorgbedrijf dat (inter)nationale opdrachtgevers terzijde staat bij het gehele certificatietraject. Dat varieert van het opstellen van normen, specificaties en beoordelingsrichtlijnen, tot certificatie in een groot aantal marktsectoren.

Kiwa brengt met keuringsrapporten en certificaten de kwaliteit van bedrijven en organisaties in beeld.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Dit onderzoek is onderdeel van het Q21-project binnen Kiwa Water en Research. Het project Q21 tracht nieuwe- of bestaande behandelingsmethodes voor drinkwaterbereiding te ontwikkelen/optimaliseren om zo de kwaliteit van het drinkwater in de 21^{ste} eeuw te garanderen.

Één van de problemen in de 21^{ste} eeuw is het feit dat er meer en meer schaarste gaat zijn van drinkwater en dat men meer water gaat moeten hergebruiken. Dit impliceert dat men meer oppervlaktewater gaat moeten gebruiken. Processen om oppervlaktewater terug te brengen tot drinkwater bestaan reeds vele jaren, denk maar aan coagulatie-flotatie, ontharding door middel van pelletreactoren, oxidatie door middel van ozon,... .

Reeds enkele jaren is er ook een nieuwe techniek op de markt voor de zuivering van water, meer bepaald nanofiltratie (NF). Deze techniek wordt reeds op sommige plaatsen commercieel op grote schaal gebruikt. NF wordt gezien als alternatief voor een aantal “oude” technieken. Zo kan NF in één klap de hardheid verlagen, de kleur verwijderen (NOM) en bestrijdingsmiddelen deels verwijderen.

Deze nieuwe techniek brengt wel enkele problemen met zich mee. Dit onderzoek richt zich dan ook op één van deze problemen. Het probleem dat hier verder onderzocht zal worden is het probleem van vervuiling van het membraan. Deze vervuiling ontstaat door het NOM aanwezig in het water, voornamelijk het oppervlakte water. Het NOM zal zich deels afzetten op het membraan en zo een foulinglaag vormen op het membraan. Deze foulinglaag kan twee effecten veroorzaken. Enerzijds kan de foulinglaag nog meer componenten tegen houden, vormt dus een dichtere structuur dan het membraan, anderzijds kan het ook zijn dat het geen extra barrière vormt voor de componenten.

Het is dus duidelijk dat een goed begrip van NOM noodzakelijk is om de effecten ervan te kennen op NF membranen. Op dit vlak werd reeds sinds vele jaren onderzoek gedaan, maar NOM is zo complex dat verder onderzoek nog steeds vereist is.

1.2 Aanpak

Zoals opgemerkt kan worden zal één van de hoofdzaken in dit eindwerk de literatuurstudie zijn. Dit om inzicht in het mechanisme van NOM-fouling op membranen te weten te komen. Deze studie wordt besproken in deel één samen met de historiek van NF membranen.

In deel twee wordt dan de uitvoering uitvoerig besproken. Hoe dat de fouling door NOM op NF membranen is onderzocht en hoe de NOM geanalyseerd is.

In dit project wordt getracht om de foulingmechanismen van NOM op NF-membranen te onderzoeken. Dit zal gebeuren door een bepaald type water te laten stromen doorheen een membraan testapparaat (MTA). Hierna zal er dan een profiel gemaakt worden van de efficiëntiedaling van het membraan naarmate de vervuiling zich ophoopt. Om de samenstelling van de vervuiling te achterhalen zullen er verschillende analysemethodes toegepast worden.

Er zal ook getracht worden om het karakter van de vervuiling op het membraan aan te tonen door contacthoekmetingen.

Tenslotte zal er geprobeerd worden om met behulp van een ionenwisselaar de Ca^{2+} -NOM complexvorming aan te tonen.

1.3 Doelstellingen

De concrete doelstellingen van dit eindwerk kunnen als volgt geformuleerd worden:

- Het experimenteel verifiëren van de invloed van de aanwezigheid van NOM op het fluxgedrag bij nanofiltratie met bijzondere aandacht voor de invloed van de oorsprong van het water enerzijds en de doorlopen voorbehandelingsstappen anderzijds;
- Via verschillende experimentele technieken de foulinglaag karakteriseren en dit zowel op vlak van het hydrofobe of hydrofiele karakter en de bijdrage van de verschillende componenten in NOM tot de foulinglaag;
- de invloed van complexvorming op de foulinglaag onderzoeken.

Bovendien zal van de resultaten gebruik gemaakt worden om de verschillende technieken gebruikt om het NOM te bestuderen met elkaar te vergelijken.

2 Theoretische achtergrond

2.1 Nanofiltratie (NF)

2.1.1 Historiek

Voor het ontstaan van NF moeten we al teruggaan naar de begin jaren zestig. NF begon als een nevenproduct naast omgekeerde osmose (RO) en ultrafiltratie (UF), en stond oorspronkelijk gekend als open RO, los RO of nauw UF. De oorsprong van NF membranen, alsook andere drukgedreven membranen, is te vinden eind jaren vijftig bij de ontwikkeling van asymmetrische cellulose acetaat (CA) membranen voor de ontzouting van zeewater. Deze membranen vormden de basis voor de ontwikkeling van de moderne RO en UF membranen.

Bij asymmetrische membranen zijn de poriën in het begin zeer klein, maar deze worden snel groter. Hierdoor zal de stromingsweerstand lager liggen dan bij symmetrische membranen, waarbij de poriën over de gehele dikte van het membraan even klein zijn. Door deze ontwikkeling zal het filtratiedebiet per m² oppervlak vergroten.

De verdere ontwikkelingen in RO en UF liggen aan de basis van het ontstaan van een nieuw soort membraan: NF. Het onderzoek naar deze nieuwe technologie heeft zo'n vijftien jaar in beslag genomen. Begin jaren zeventig was er al een hele range CA asymmetrische membranen beschikbaar, van RO naar NF tot UF.

Bij onderzoek naar de verbetering voor waterbehandeling en andere commerciële toepassingen, werden al snel de beperkingen van CA membranen ontdekt. Deze beperkingen beperkten ook het aantal toepassingen en belemmerden de verdere ontwikkeling van NF. Een oplossing voor dit probleem was het ontwikkelen van nieuwe asymmetrische membranen uit andere materialen dan CA; zoals polyamides (PA), polyvinylchloride (PVC),... . Deze nieuwe soorten membranen konden de verwachtingen nog altijd niet vervullen. [SCHÄFER, et al., 2005]

De echte doorbraak in NF is er pas gekomen bij de uitvinding van composietmembranen. Op een stevig asymmetrisch UF membraan met grove poriën brengt men een zeer dun symmetrisch membraan aan, soms zelfs van een andere materiaalsoort. Deze membranen is men kunnen gaan ontwikkelen met nieuwe technieken zoals interfase polymerisatie en fase inversie die ontwikkeld werden in de jaren zeventig. Hierdoor werden composiet NF membranen pas midden jaren tachtig commercieel beschikbaar.

Vandaag de dag heeft NF reeds vele toepassingen zoals: waterontharding, verwijdering van Natuurlijke Organische Materialen (NOM), verwijdering van pesticiden uit grondwater en nog veel meer. Maar het aantal toepassingen is nog steeds laag in vergelijking met de echte

mogelijkheden van NF.

2.1.2 Rol in drinkwater

De rol van NF bij de bereiding van drinkwater wordt alsmaar belangrijker. Deze stijging is te danken aan het feit dat aan drinkwaterkwaliteit steeds hogere eisen worden gesteld. Om op een economische manier te voldoen aan sommige van deze hoge eisen kan men enkel gebruik maken van membranen. Hiernaast zijn de kosten van membraansystemen gedaald zijn door technologische vooruitgang.

Een andere reden voor de stijging van het gebruik van membranen bij de bereiding van drinkwater is het feit dat in sommige gevallen het gebruik van membranen goedkoper is dan de conventionele methodes. Dit komt doordat ongewenste componenten kunnen verwijderd worden met slechts één enkele behandelingsstap. Met de conventionele methodes zouden er verschillende behandelingen moeten aangewend worden. Dit is deels waar voor NF, dat in één stap zowel opgeloste organische als anorganische componenten kan verwijderen.

Bij het gebruik van grondwater voor drinkwaterbereiding zal er meestal geopteerd worden voor een NF of RO. Het grondwater kan met een beperkte voorbehandeling naar de membranen gestuurd worden. Meestal is dit anaeroob grondwater.

Bij oppervlaktewater kunnen membraanprocessen niet op dezelfde manier worden toegepast als bij grondwater omdat oppervlaktewater meer vervuiling van de membranen met zich meebrengt. Dit heeft tot gevolg dat oppervlaktewaterbehandeling in verschillende stappen moet gebeuren. [Berlijn 2001, p.17]

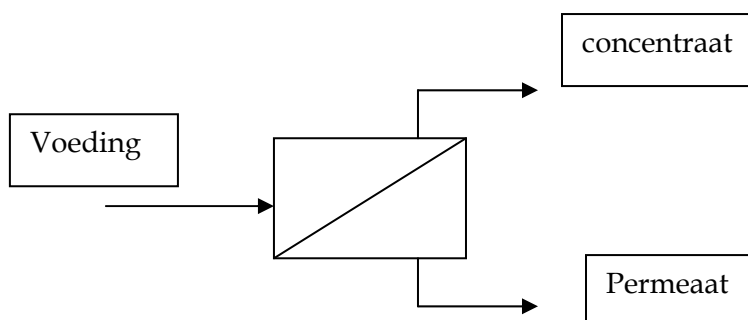
2.1.3 NanoFiltratie: principes en toepassingen

2.1.3.1 Algemeen

Een membraan is een selectieve barrière die een scheiding veroorzaakt op basis van de deeltjesgrootte. De scheiding tussen twee fasen kan pas gebeuren onder invloed van een drijvende kracht. De verschillende mogelijke drijvende krachten zijn druk, concentratie, temperatuur en elektrische potentiaal. [MULDER, M., 1996] NF is een drukgedreven membraanproces.

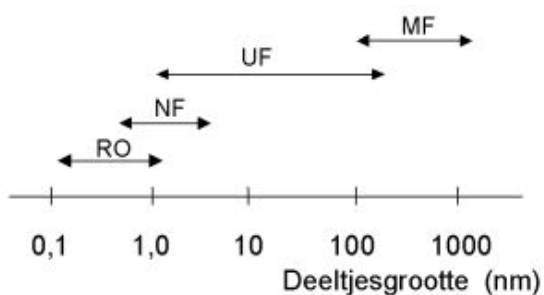
Een membraan heeft de eigenschap om sommige componenten in de voedingsstroom meer door te laten dan andere. De voedingsstroom wordt opgesplitst in een filtraat- of permeaatstroom en een retentaat- of concentraatstroom.

In Figuur 2.1-1 wordt het algemene membraanschema weergegeven, met de aanduiding van de verschillende stromen.



Figuur 2.1-1 Voorstelling van membraanfiltratie

Er bestaan 4 verschillende soorten drukgedreven membraanprocessen: microfiltratie (MF), ultrafiltratie (UF), nanofiltratie (NF) en omgekeerde osmose (RO). Deze onderscheidt men van elkaar op basis van de deeltjesgrootte die ze tegenhouden. Figuur 2.1-2 illustreert het werkingsgebied van de verschillende membraantypes.



Figuur 2.1-2 Werkingsgebied van de verschillende membraantypes¹

Bij MF is de gemiddelde poriediameter zo gekozen dat laagmoleculaire stoffen en opgeloste macromoleculen doorheen het membraan kunnen. Bacteriën, gisten, schimmels en niet opgeloste stoffen kunnen niet doorheen het membraan.

De poriediameter van een MF-membraan ligt tussen de 10 en 0.05 μm . De uitwendig aangelegde druk schommelt tussen 0.1 en 2 bar en is dus vrij laag.

UF membranen hebben een poriegrootte die ligt tussen de 1 en 100 nm en drukken tussen 1 en 10 bar. UF wordt vooral bij waterbehandeling gebruikt om stoffen met hoog moleculair gewicht te verwijderen, zoals zwevende en colloïdale stoffen, bacteriën en virussen.

RO membranen hebben de meest dense structuur. Daarom moet men ook grotere drukken aanleggen die zich bevinden tussen 20 en 100 bar. De kleine poriën laten enkel water door en hebben dus een goede retentie voor éénwaardige zouten.

¹<http://www.vito.be>

2.1.3.2 Nanofiltratie: Kenmerken

NF is in staat om deels opgeloste moleculen tegen te houden. Dit impliceert dan ook dat de poriëngrootte kleiner moet zijn dan bij UF. Het is een composietmembraan opgebouwd uit 2 lagen, een onderlaag van ongeveer 150 μm dik en een toplaag van ongeveer 1 μm dik met een poriëngrootte kleiner dan 2 nm. Door de kleinere poriën moet men ook werken met hogere drukken (10 tot 25 bar). Het principe van scheiding is gebaseerd op diffusie en zeefwerking.

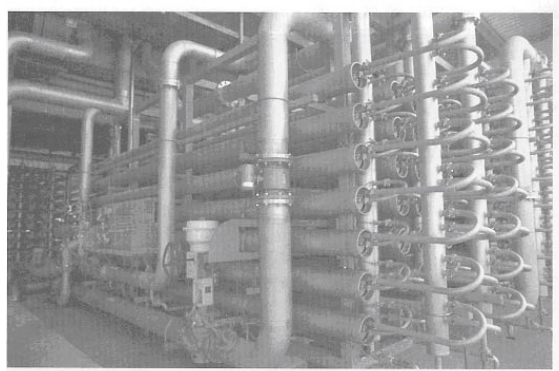
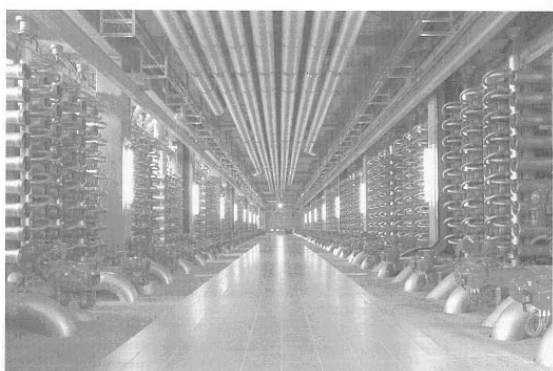
De onderlaag is vaak een UF membraan dat zorgt voor de stevigheid. Men kan de toplaag met twee verschillende mechanismen hierop aanbrengen: via interfase polymerisatie of via fase inversie. Bij interfase polymerisatie moeten de twee lagen niet persé van hetzelfde materiaal zijn, bij fase inversie hebben de twee lagen wel dezelfde samenstelling. Fase inversie kan in één stap geschieden wat deze membranen over het algemeen goedkoper maken.

De meest typische eigenschappen van NF membranen zijn: [SCHÄFER, et al., 2005]

- De retentie van multivalente ionen, zoals sulfaat (SO_4^{2-}), fosfaat (PO_3^{3-}), calcium (Ca^{2+}) en magnesium (Mg^{2+}) is bijna totaal.
- De retentie van natriumchloride (NaCl) varieert van 70% tot 0%.
- De retentie van ongeladen, opgeloste deeltjes alsook van positief geladen ionen in oplossing hangt af van de grootte en de vorm van de molecule in kwestie.

Voor dit onderzoek werd het membraantype Trisep 4040-TS80-TSF gebruikt, dit is een polyamide (PA) membraan. Dit membraan kan op de twee verschillende manieren worden aangemaakt. Het membraan heeft voor MgSO_4 een gemiddelde retentie van 99% en minimaal 97%.

Ter illustratie wordt in Figuur 2.1-3 een voorstelling van een NF installatie gegeven. Deze installatie heeft een capaciteit van 140.000 m^3/dag en bevindt zich in Méry-sur-Oise, vlakbij Parijs. Het voorziet 800.000 mensen van drinkwater met hoge kwaliteit. Het voedingswater is afkomstig van voorbehandelt water uit de rivier Oise. [SCHÄFER, et al., 2005]



Figuur 2.1-3: NF installatie van Méry-sur-Oise (Parijs)

2.1.4 Concrete uitvoering

2.1.4.1 De Module

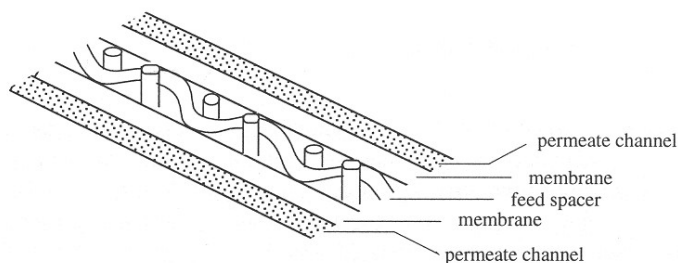
Membranen zijn zeer dunne kwetsbare halfdoorlaatbare vliezen en kunnen als zodanig niet rechtstreeks gebruikt worden. Daarom worden ze meestal verwerkt in een module. Deze module heeft twee functies: het ondersteunen van het membraan en zorgen voor een goed stroomgedrag van de vloeistof.

Membranen worden uitgevoerd in vlakke, buisvormige, holle-vezel of spiraal gewonden modules. De vlakke en buisvormige membranen zijn niet zelf ondersteunend en moeten daarom tegen een poreuze wand geplaatst worden die de aangelegde druk kan weerstaan en welke het aangevoerde permeaat kan afvoeren. Holle vezels zijn zelfondersteunend maar worden bijna niet aangewend voor NF, omdat voor NF dikkere wanden zijn vereist om de hogere druk te kunnen weerstaan.

De laatste jaren worden vooral de vlakke modules het meest aangewend voor NF en dan meer bepaald de spiraal gewonden modules. Hier zal dan ook dieper op worden ingegaan later in dit hoofdstuk.

Wanneer men verschillende membranen in een module gaat verenigen, zal men er rekening mee moeten houden dat de aanvoer van de voeding en de afvoer van het permeaat vlot kan verlopen. Indien dit niet zou gebeuren, zouden de membranen tegen elkaar kleven en geen permeaat leveren.

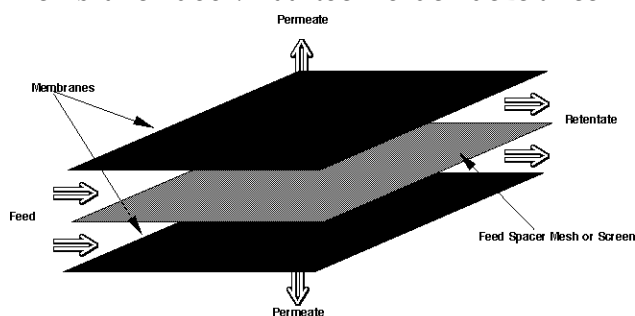
Om dit tegen te gaan zal men een feedspacer tussen twee membranen aanbrengen. Dit heeft twee voordelen, het zorgt voor een turbulente stroming en voor een beter massatransport. Er zal ook een permeaatspacer aangebracht worden om een vlotte afvoer van het permeaat te garanderen.



Figuur 2.1-4: schematische voorstelling van een spacer

2.1.4.2 De vlakke module

Deze module wordt weergegeven in Figuur 2.1-5. Twee membranen worden tegen elkaar geplaatst met de voedingszijde naar elkaar toe gericht. De voeding moet tussen de twee membranen door. Daartoe worden deze twee membranen door een spacer uiteengehouden.

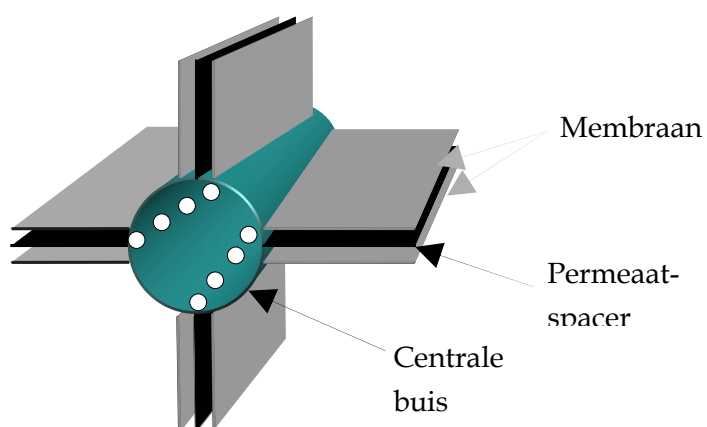


Figuur 2.1-5 Kussenmembraan²

2.1.4.3 Spiraal gewonden module

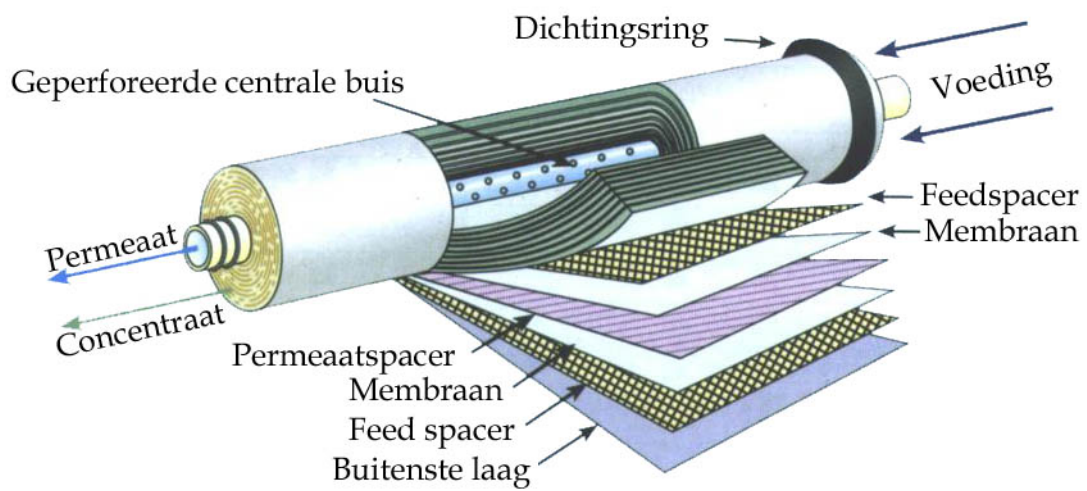
Dit is een vlakke module die rond een centrale geperforeerde buis is gewikkeld. De twee membranen zijn hier gescheiden door een permeaatspacer en dan langs drie kanten samengekleefd tot een envelop. De zijde die niet wordt samengekleefd, wordt verbonden met de centrale buis. De permeaatspacer ondersteunt de membranen zodat ze niet tegen elkaar gaan kleven onder de druk en voert het permeaat af naar de centrale- of collectorbuis. Tussen de verschillende enveloppen wordt een feedspacer aangebracht die zorgt voor een goed massatransport. De enveloppen worden ten slotte rond de centrale buis gewikkeld.

De voeding stroomt axiaal door de spiraal gewonden module. Het gaat via de feedspacer door het membraan en wordt deels gecollecteerd door de permeaatspacer die het verder zal afvoeren naar de centrale buis. Het deel dat niet door het membraan passeert stroomt verder door de module via de feedspacer. Aan het einde van de module heeft men in de centrale buis het permeaat en rond deze centrale buis zit het concentraat.



Figuur 2.1-6 spiraal gewonden module

² <http://membranes.nist.gov>



Figuur 2.1-7 Ontrolde spiraal gewonden module



Figuur 2.1-8: voorbeeld van een spiraal gewonden module³

³ <http://www.osmosistemi.it>

2.1.5 Kengetallen membranen

2.1.5.1 Algemeen

Een membraan wordt gekenmerkt door 5 parameters

- flux (J);
- Wateroverdrachtscoëfficiënt (Kw);
- retentie (R);
- molecular weight cut-off (MWCO);
- recovery (S);
- Transmembraandruk (TMP).

2.1.5.2 Flux (J)

De flux (J) is een kwantitatieve parameter die een maat geeft voor de hoeveelheid vloeistof die per tijdseenheid door een membraanoppervlak stroomt.

$$J = \frac{Q_p}{A_m} = \frac{1}{A_m} \cdot \frac{dV}{dT} \quad [l/(m^2.h)]$$

Met:

A_m	membraanoppervlak	$[m^2]$
Q_p	het permeaat debiet	$[l/h]$
dV/dt	volume per tijdseenheid	$[l/h]$

2.1.5.3 Wateroverdrachtscoëfficiënt (Kw-waarde)

De Kw-waarde is een gestandaardiseerde flux. Door de flux te delen door de druk en de temperatuur te corrigeren wordt een waarde verkregen die constant zal zijn ongeacht de druk en de temperatuurvariaties waarbij het filtratieproces wordt uitgevoerd.

$$K_w = \frac{Q_p}{A_m \cdot \Delta P} \cdot 1,026^{(T-25)} \quad [l/(m^2.h.bar)]$$

Met:

A_m	membraanoppervlak	$[m^2]$
Q_p	het permeaat debiet	$[l/h]$
ΔP	de drukval over het membraan	$[bar]$
T	de heersende temperatuur	$[^{\circ}C]$

2.1.5.4 Retentie (R)

De retentie is een waarde voor het tegenhoudend vermogen van het membraan voor een bepaalde component en wordt gegeven door volgende formule.

$$R = \frac{C_v - C_p}{C_v} = 1 - \frac{C_p}{C_v} \quad [-]$$

Met:

C_v	de voedingsconcentratie aan opgeloste stof	[mg/l]
C_p	de permeaatconcentratie aan opgeloste stof	[mg/l]

De retentie is een dimensieloze eenheid en wordt meestal uitgedrukt in een percentage. Een retentie van 100% betekent dat die bepaalde component volledig wordt tegengehouden. Dit zou voorkomen bij een 'ideaal' semi-permeabel membraan. Een retentie van 0% impliceert dat de oplossing vrij door het membraan kan permeëren.

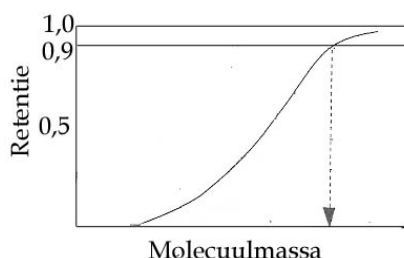
Vaak gebruikt men salt passage (SP) in plaats van retentie. De SP bepaalt het percentage opgeloste stof dat door het membraan gaat en is het omgekeerde van de retentie. Zoals de retentie is de SP ook een dimensieloze parameter.

$$SP = 1 - R = \frac{C_p}{C_v} \quad [-]$$

2.1.5.5 Molecular weight cut-off (MWCO)

De MWCO wordt gedefinieerd als het moleculaire gewicht van een standaard molecule die voor 90% wordt tegengehouden door het membraan.

Een MWCO van 500 Da betekent dat een referentie molecule met een MM van 500 g/mol een retentie heeft van 90%.



Figuur 2.1-9: voorstelling van de MWCO

2.1.5.6 Recovery (S)

De recovery wordt omschreven als de verhouding tussen permeaat en voeding. Het is een maat voor de hoeveelheid permeaat die uit een voeding kan gehaald worden.

$$S = \frac{Q_p}{Q_v} \quad [-]$$

Met:

Q_p	permeaatdebiet	[l/h]
Q_v	voedingsdebiet	[l/h]

De recovery is een economische factor. Membranen die vaak worden ingezet bij commerciële processen worden meestal zo ontworpen dat ze een zo hoog mogelijke recovery halen. Op laboschaal zal er gewerkt worden met een lage recovery vanwege de praktische haalbaarheid en om een zo goed mogelijke scheiding te verwezenlijken.

2.1.5.7 Transmembraandruk (TMP)

De TMP is de drijvende kracht van het membraanproces en wordt gegeven door:

$$TMP = \frac{P_f + P_c}{2} - P_p \quad [\text{Pa}]$$

Met:

P_f	De druk aan de voedingszijde	[Pa]
P_c	De druk aan de concentraatzijde	[Pa]
P_p	De druk aan de permeaatzijde	[Pa]

2.1.6 Vervuiling

2.1.6.1 Algemeen

Om een scheiding te krijgen via een membraanproces moet eerst een geschikt membraan geselecteerd worden. Een groot probleem hierbij is dat de eigenschappen van het membraan veranderen in functie van de tijd. Een effect hiervan is de fluxdaling. Deze afname van flux wordt veroorzaakt door verschillende factoren, zoals: concentratiepolarisatie, scaling, adsorptie, gellaag-vorming en porieverstopping.

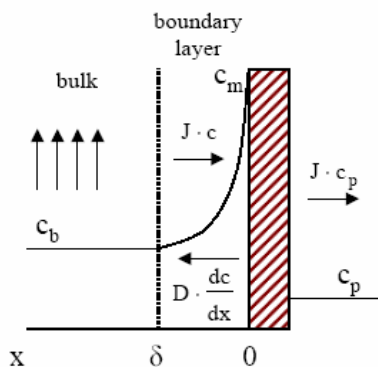
De oorzaak van deze verschillende factoren kan men in de samenstelling van de voeding gaan zoeken alsook bij de aard van het membraan. De voeding bevat verschillende vervuilende componenten zoals: zwevende deeltjes en (an)organische stoffen.

NF membranen hebben diverse eigenschappen waardoor ze ook verschillende foulingmechanismen hebben. Over het algemeen zullen membranen met kleinere poriën in mindere mate vervuilen. Wanneer een vervuilende stof in staat is om te permeëren door een membraan zal de kans op vervuiling groter zijn als indringing in de poriën mogelijk is.

Belangrijke factoren bij de vervuiling van membranen zijn de karakteristieken van het membraan en van de vervuilende stof. De lading van het membraanoppervlak speelt een belangrijke rol bij vervuiling. In het beste geval is de lading van de opgeloste stof in de voeding en de lading van het membraanoppervlak gelijk zodat er repulsie tussen beide is. Hierdoor zal er minder afzetting op het membraan plaatsvinden. Men moet ook rekening houden met de hydrofobe interacties tussen de opgeloste stof en het membraan. Deze kunnen de elektrostatische repulsie teniet doen.[SCHÄFER, A.-I. et al., 2005]

2.1.6.2 Concentratiepolarisatie (CP)

Bij een membraanproces is er een constante stroom van bulk- naar permeaatzijde. Dit zorgt voor een ophoping van opgeloste stof aan het membraanoppervlak, zodat er een concentratieprofiel ontstaat. Dit profiel met een concentratiemaximum aan het membraanoppervlak veroorzaakt een tegendiffusie van de opgeloste stof gericht naar de bulkfase. Na een bepaalde tijd zal er zich een evenwichtstoestand voordoen, waarbij de permeaatstroom gelijk is aan de som van de convectieve stroom van de oplossing naar het membraan en de diffusie weg van het membraan. (zie Figuur 2.1-1) De concentratie aan het membraanoppervlak is kritisch voor zowel vervuiling als retentie.



Figuur 2.1-10: voorstelling van concentratie polarisatie⁴

Verondersteld wordt dat CP snel ontstaat in het begin van filtratie. CP bij NF veroorzaakt een fluxdaling die voornamelijk te wijten is aan een stijging van de osmotische druk en de vorming van een gellaag door organische moleculen die worden tegengehouden.

Men kan CP tegengaan door een hoger voedingsdebiet waardoor er een turbulentere stroming aan de bulkzijde ontstaat. Men kan ook turbulentie promotoren gebruiken voor meer menging, zoals voedingsspace. Hierdoor is er een groter spoeleffect en is de laminaire grenslaag kleiner, waardoor de concentratie opgeloste stof aan het membraan lager wordt.

Een andere mogelijkheid om CP tegen te gaan is werken bij een hogere temperatuur, die ervoor gaat zorgen dat er meer tegendiffusie is. Hier moet wel rekening gehouden worden met het feit of dat temperatuursverhoging wel economisch haalbaar is en of het membraan wel bestand is tegen deze hogere temperatuur. Indien men toch kiest om bij hogere temperaturen te werken moet er gecontroleerd worden dat er geen biologische groei optreedt aan het membraanoppervlak.

2.1.6.3 *Scaling*

Men spreekt van scaling wanneer de concentratie van oplosbare zouten het oplosbaarheidproduct bereiken. De belangrijkste is calciumcarbonaat. Hierdoor zullen de zouten neerslaan en een ketelsteenachtige laag vormen met fluxdaling als gevolg.

Scaling zal in de hand worden gewerkt als men werkt bij een hoge recovery. Hierdoor is de kans groter dat de maximale oplosbaarheid van het zout bereikt wordt.

Men kan scaling tegengaan door een turbulentere stroming of ervoor te zorgen dat de zouten vroeger neerslaan of uitkristalliseren door gebruik te maken van anti-scalants.

⁴http://www.etseq.urv.es/DEQ/Doctorat/index/running/2003_2005/courses_d/13F_membrane_separations/apunts/Membrane%20Separations%20PDF%20files/Memb08a.pdf

2.1.6.4 Adsorptie

Adsorptie speelt een belangrijke rol bij de vervuiling van NF membranen door organische componenten. In feite wordt adsorptie vaak gezien als de eerste stap in membraan vervuiling.

Adsorptie doet zich zowel op het oppervlak van het membraan als in de poriën voor. Op elk punt waar er contact is tussen het membraan en de oplossing, kan er porievernauwing en -verstopping ontstaan. Dit is afhankelijk van de porie grootte, de molecuulgrootte en -vorm.

Adsorptie kan ook op zichzelf een bron zijn voor een grotere foulinglaag of zelf zorgen voor vervuiling. Adsorptie van organische componenten kan ook een verandering van de karakteristieken van het membraanoppervlak met zich meebrengen; zoals stijgende hydrofobiciteit of verandering van de lading van het membraanoppervlak.

Om dit soort vervuiling tegen te gaan moet eerst een goede keuze van het membraanmateriaal gemaakt worden. Bijvoorbeeld als men een hydrofobe voeding heeft neemt men best een hydrofiel membraan en omgekeerd.

2.1.6.5 Gellaag-vorming

Gellaagvorming wordt aanzien als de afzetting van organische componenten op het membraanoppervlak. Dit vindt meestal plaats als de concentratie in de laminaire grenslaag als gevolg van CP de oplosbaarheidsgrens van de organische componenten bereikt. De afzetting op het membraanoppervlak door componenten die te groot zijn om in of door het membraan te penetreren bereiken een evenwichtssituatie. Bij dit evenwicht zal de gellaag niet meer dikker worden. Gellaagvorming betekent niet direct dat er irreversibele fluxdaling is.

Deze vervuiling kan geminimaliseerd worden door te werken met een hogere langsstroomsnelheid, maar die maakt het proces duurder.

2.2 NOM

2.2.1 Oorsprong en voorkomen

Natural organic matter (NOM) is een complex mengsel van verschillende organische stoffen aanwezig in bijna alle watertypen en is het product van humificering. NOM bestaat voornamelijk uit humusmaterialen. Dit zijn macromoleculen van zowel alifatische als aromatische opbouw die conglomeren tot poreuze structuren met moleculengrootte variërend van enkele honderden tot ongeveer 2000 Da. [Berlijn 2001, p.43] Deze poreuze structuren worden opgevuld door andere kleinere moleculen. Buiten deze humusmaterialen maken ook andere biopolymeren zoals polysacchariden, complexe vetten en aminosuikers deel uit van het NOM.

Het NOM kan van autochtone of allochtone oorsprong zijn. Het autochtone NOM is afkomstig van algen en bacteriën aanwezig in het water zelf. Het allochtone NOM is afkomstig van humificering van hogere planten. Door regenval zal dit NOM, afkomstig van bossen, via de bodem naar rivieren gebracht worden. Daar wordt het gemengd met het autochtone NOM. Hogere planten bevatten door hun dikkere celwand meer aromatische verbindingen dan algen (voornamelijk lignine). Hierdoor zal het allochtone NOM meer aromatische verbindingen bevatten dan het autochtone. Het autochtone NOM zal gemakkelijker biodegradeerbaar zijn vanwege haar hoger stikstofgehalte en haar lagere aromaticiteit. [Berlijn 2001, p.5]

Volgens Maybeck (1981) is de gemiddelde NOM-concentratie van de stromen in de wereld gelijk aan 5,75 mg C/L. De hoogste concentratie is te vinden in de koudere klimaatzones (10 mg C/L) en de laagste in de warmere gebieden (3 mg C/L). [Berlijn 2001, p.81]

Uit de vorige paragrafen kan geconcludeerd worden dat zowel de hoeveelheid als de samenstelling van het NOM afhankelijk zijn van het klimaat, het type begroeiing rondom het water en van het water zelf. Onregelmatigheden kunnen voorkomen worden door regenbuien, bladerval en ongewone biologische activiteit. Dit maakt NOM zeer complex.

NOM is ook in de handel als poeder verkrijgbaar. Hiervan worden Suwannee River Humic Acid en Suwannee River Fulvic Acid het meest gebruikt. Het NOM wordt uit het water onttrokken door RO gevolgd door evaporatie. Vanwege de betere kennis van dit NOM wordt het vaak gebruikt voor experimenteel onderzoek.

Over hoe NOM precies ontstaat bestaan vele hypothesen die buiten het bestek van dit eindwerk vallen. Het ontstaan en de precieze samenstelling van NOM is nog steeds niet goed bekend en is het onderwerp van vele wetenschappelijke studies.

2.2.2 Karakterisering en chemische eigenschappen

2.2.2.1 Karakterisering

Qua aard kan NOM onderverdeeld worden in een humusfractie en een niet-humusfractie.

De niet-humusmaterialen kunnen in volgende fracties ingedeeld worden:

- Polysacchariden, met inbegrip van aminosuikers, polypeptiden en proteïnen, vormen een zeer zware ($50.000 \text{ Da} < \text{MM} < 2 \text{ mio Da}$), hydrofiele en niet-UV-absorberende fractie. Deze stoffen zijn afkomstig van algen en bacteriën en komen daarom alleen voor in oppervlaktewaters. (5 à 25% van het NOM)
- Moleculen met een $\text{MM} < 350 \text{ Da}$ bestaan meestal uit alifatische organische zuren en neutrale stoffen. Deze neutrale stoffen bestaan uit licht hydrofiele of licht hydrofobe (amfifiel, zowel hydrofiel als hydrofoob) stoffen zoals alcoholen, aldehyden, ketonen en aminozuren.
- Vetten (2 à 6% van het NOM)

De humusmaterialen zijn UV-absorberende stoffen die het water een geelbruinachtige kleur geven. Ze kunnen onderverdeeld worden op basis van hun oplosbaarheid in water. Deze onderverdeling werd 200 jaar geleden gemaakt en wordt nog vaak gebruikt, ondanks de nieuwere karakteriseringmethodes.

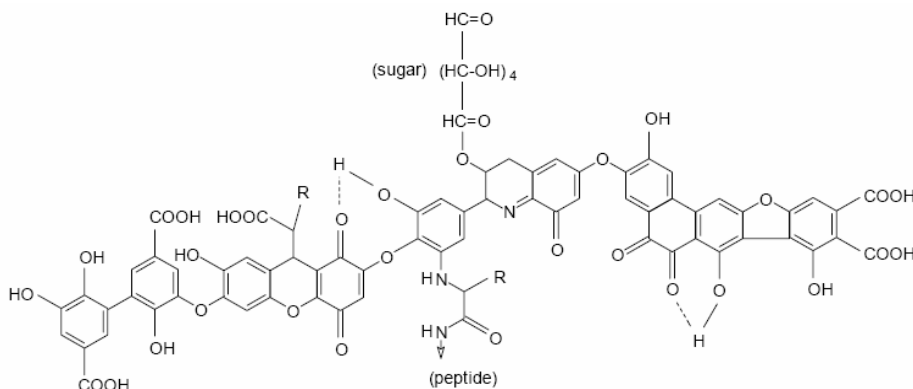
- De geelachtige fulvinezuren vormen de lichtste fractie ($500 \text{ Da} < \text{MM} < 1000 \text{ Da}$) en zijn ongeacht de pH oplosbaar in water.
- De bruine humuszuren zijn zwaarder dan de fulvinezuren ($1000 \text{ Da} < \text{MM} < 100.000 \text{ Da}$) en zijn onoplosbaar bij pH kleiner dan 2.
- Er bestaat ook het zware humine ($\text{MM} > 100.000 \text{ Da}$). Deze fractie blijft onder alle pH-omstandigheden onoplosbaar in water en zal daarom enkel in zeer turbulente waters voorkomen. Meestal blijft deze fractie op de bodem van rivieren liggen en zal het niet voorkomen in het drinkwaterbereidingproces.

Een fractie die ook gerekend wordt tot de humusmaterialen zijn de “building blocks”. Het zijn moleculen met een MM tussen 300 en 500 Da. Ze zijn een degradatieproduct van humusmaterialen door hydrolyse. Bij hydrolyse zal een molecule opgesplitst worden in twee delen waarbij een deel een OH-groep krijgt en het andere deel een proton. Hierdoor hebben building blocks vele zuurstofhoudende functionele groepen en zijn ze hydrofieler dan de humus- en fulvinezuren.

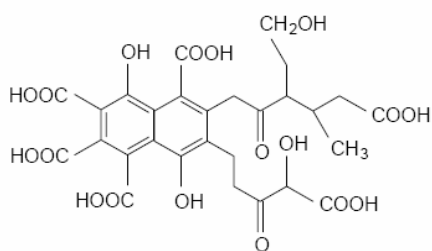
2.2.2.2 Chemische structuur

Uit analyses blijkt dat humuszuren polymeerstructuren hebben in de vorm van ringen, kettingen en clusters. De grootte van de macromoleculen ligt tussen 60 en 500 Å. De grootte en de ruimtelijke structuur zijn afhankelijk van het humificeringsproces.

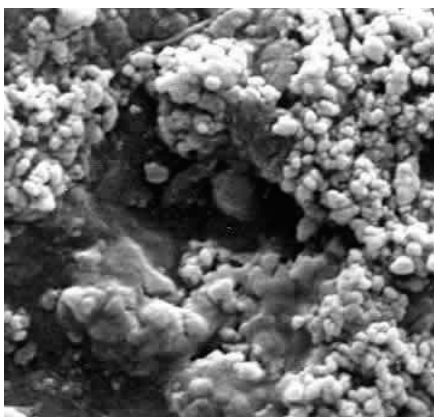
Uit de structuurmodellen voor humuszuur (Figuur 2.2-1) en fulvinezuur (Figuur 2.2-2) kan worden afgeleid dat de kleinere fulvinezuren meer carboxylgroepen bevatten. Dit verklaart de grotere oplosbaarheid van de fulvinezuren in water. Humuszuren zullen hydrofober zijn dan de fulvinezuren. De hydrofobiciteit van NOM neemt typisch toe bij stijgende MM.



Figuur 2.2-1 Structuurmodel voor humuszuur volgens Stevenson⁵



Figuur 2.2-2 Structuurmodel voor fulvinezuur volgens Buffle⁶



Figuur 2.2-3 humus bij 3500x vergroting⁷

⁵ STEVENSON F.J.: Humus chemistry. Genesis, composition, reactions. Wiley New York, 1982.

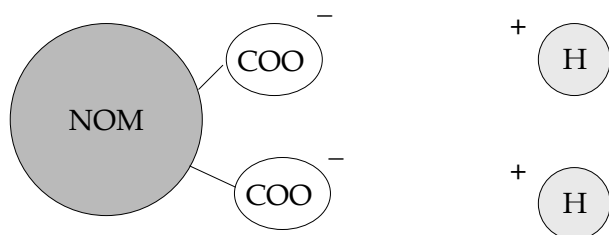
⁶ Buffle J., Greter F.L., Haerdi W.: Measurement of complexation properties of humic and fulvic acids in natural waters with lead and copper ion-selective electrodes. Anal. Chem. 49:216. 222, 1977.

⁷ <http://www.humintech.com>

2.2.2.3 Chemische eigenschappen

Humusmaterialen zijn negatief geladen macromoleculen met een grote verscheidenheid aan functionele groepen. De meest voorkomende groepen zijn de carboxyl- (COOH) en fenolgroepen (cyclisch C_6H_5OH). 60 tot 90% van de functionele groepen zijn carboxylgroepen. Dit verklaart de zure aard van de humusmaterialen.

Carboxyl- en fenolgroepen van humuszuren zullen in het pH-gebied van de meeste natuurlijke waters (pH 8) in gedissocieerde toestand voorkomen. Het bijhorende proton zal niet aan de zure groep gebonden blijven. Hierdoor zijn humuszuren in het pH-gebied van natuurlijke waters steeds een negatieve lading. (Figuur 2.2-4)



Figuur 2.2-4 Negatieve lading van NOM in water

2.2.2.4 Ultraviolet absorptie van humusmaterialen

UV₂₅₄-stralen worden voornamelijk geabsorbeerd door de onverzadigde en aromatische bindingen van het NOM. Dit zijn meestal hydrofobe componenten. Hydrofiele functionele groepen kunnen echter deze hydrofobe stoffen hydrofiel maken. Humusmaterialen zullen vanwege hun aromatische kern een hoge UV₂₅₄-absorptie hebben, maar hoeven daarom niet hydrofoob te zijn.

Een UV₂₅₄-absorptie geeft slechts een kwantitatieve benadering van het aantal aromatische verbindingen opgelost in water. Daarom zal UV₂₅₄-absorptie gekoppeld worden aan de koolstofhoeveelheid om een beter idee te geven van de aromaticiteit van het NOM.

De SUVA (specifieke UV absorptie) wordt berekend als het quotiënt van de concentratie van het oplosbaar organische koolstof (DOC (mg/L)) en de UV-absorptie bij 254 nm (m⁻¹).

$$\text{SUVA}(\text{l / mg.m}) = \text{UV}_{254}(\text{cm}^{-1}) \times \frac{100}{\text{DOC}(\text{mg / l})}$$

Singer⁸ toonde aan dat er een rechtevenredig verband is tussen SUVA en de procentuele hoeveelheid aromatische koolstof. Zo wijzen SUVA waarden boven 3 L/(mg*m) op een hoge aanwezigheid van humusmaterialen. [AWWA research foundation, 2001]

SUVA	
>4	Hoge hydrofobiciteit, hoge MM, humusmaterialen
2-4	Mengsel van hydrofoob en hydrofiel materiaal
<2	Lage hydrofobiciteit, lage MM, niet-humusmaterialen

Tabel 2.2-1 Verband tussen SUVA en hydrofobiciteit

⁸ SINGER, P., C., *Humic substances as precursors for potentially harmful disinfection by-products*, Water, Science and Technology 40 (9), (1999), p 25-30

2.2.3 Verwijdering van NOM

2.2.3.1 *Waarom verwijderen?*

NOM is op zich niet schadelijk voor de mens, maar omwille van onderstaande redenen is een vermindering van NOM wenselijk.

- NOM wordt voornamelijk verwijderd vanwege de negatieve effecten die het heeft op verschillende waterzuiveringstechnieken. Door adsorptie van NOM op de actieve bestanddelen van de zuiveringsmethode wordt de werking ervan belemmerd. Deze worden verder besproken in § 2.2.3.2.
- Bijproductvorming bij desinfectie/oxidatie kan leiden tot carcinogene stoffen
- Een minder belangrijke reden is van esthetische aard. NOM heeft immers een geelbruine kleur en zal bij grotere concentraties diezelfde kleur aan het water geven. Deze kleur is bijvoorbeeld te zien in een witte badkuip. Ditzelfde NOM geeft ook een humusgeur en -smaak aan het water. Dit is echter zeer subjectief omdat de meeste mensen water met NOM niet speciaal vies vinden. Daarom is een sterk doorgedreven verwijdering voor de bereiding van drinkwater niet strikt noodzakelijk.
- Ondanks de bovenbeschreven smaaktolerantie stelt de consument inzake waterzuivering steeds strengere eisen.
- Vanwege het biodegradeerbaar karakter van een deel van het NOM kan het de microbiologische groei bevorderen zodat de houdbaarheid van het water vermindert.
- NOM kan complexen vormen met zware metalen en organische micro-polluenten zoals Cu, Pb, Hg, PCB, DDT, PAK's etc. [Kördel W. et al., 1997] Bij consumptie zullen deze stoffen in het zure milieu van het spijsverteringsstelsel gemakkelijk uit het NOM worden verdreven en door het lichaam worden opgenomen. [Berlijn 2001, p 45]

2.2.3.2 *Technieken voor NOM-vermindering*

A. Coagulatie

Coagulatie is één van de meest gebruikte methoden voor de verwijdering van NOM bij drinkwaterbereiding. Door toevoeging van coagulanten aan het water worden de negatieve ladingen op het NOM geneutraliseerd en klitten de elektrisch neutrale deeltjes onder invloed van London- en Van Der Waalskrachten samen tot grotere aggregaten. Deze vlokken kunnen dan worden verwijderd door bezinking of flotatie.

Driewaardige ionen blijken zeer efficiënt te zijn. De meest gebruikte coagulanten zijn FeCl_3 en $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. De beste NOM-verwijdering gebeurt echter met FeCl_3 omdat het lagere pH's kan genereren en omdat het tweemaal meer positieve ladingen heeft per drooggewicht dan aluminiumsulfaat. Waters die veel NOM bevatten vragen om hoge doses coagulanten, die de pH van het water drastisch zullen verlagen (tot ongeveer pH 5). Daarom is er een pH-correctie nodig voordat het water de waterzuivering verlaat.

Organische componenten met een hoge MM en een hoge SUVA (aromaticiteit) worden het beste verwijderd door coagulatie. Hiertoe behoren de hydrofobe humusmaterialen en de polysacchariden. Building blocks en componenten met een lage MM worden minder goed verwijderd. [Fearing D. et al., 2004]

De verwijdering van NOM door coagulatie schommelt tussen 30 en 70%. Deze waarde is afhankelijk van de keuze en de dosis van het coagulant, de pH-waarde van het water en van de mengtijd. Mits optimalisatie van deze factoren kan NOM tot 90% verwijderd worden. Het nadeel van grote doses is de vorming van kwetsbare vlokken die betere scheidingstechnieken eisen.

B. Membraanfiltratie

Een combinatie van een MF en een nauwe UF (MWCO < 1000 Da) is een effectieve manier om NOM te verminderen. [Berlijn, 2001, p.15] Met NF-membranen worden retenties bereikt van 95%.

Bij UF en NF adsorbeert NOM op het membraanoppervlak en in de poriën, waardoor zowel de levensduur als de efficiëntie van het membraan worden ingekort. Dit zal uitvoerig besproken worden in § 2.3.

C. Actief-koolfiltratie

Adsorptie op granulair actief kool (GAC) is een zuiveringsproces gebaseerd op adsorptie. Hierbij hechten stoffen zich aan het oppervlak onder invloed van Van der Waalskrachten. Door een zeer groot oppervlak per massa aan te bieden kan een relatief goede verwijdering worden verkregen. Voor de drinkwaterproductie gaat het om de adsorptie van apolaire microverontreinigingen, waartoe de meeste pesticiden als bentazon en atrazine behoren. Het water stroomt hierbij neerwaarts door een filterbed van actieve koolkorrels. [Moel P. et al, 2001]

Naast de te verwijderen microverontreinigingen hecht ook NOM zich aan het oppervlak, hetgeen resulteert in biologische groei van bacteriën en organismen van hogere orde op het actief kool oppervlak. De biologische activiteit heeft voor- en nadelen. Door biologische afbraak wordt het geadsorbeerde NOM omgezet waardoor weer oppervlak vrijkomt, maar het biologisch materiaal dekt zelf ook een groot oppervlak af. Het netto effect is doorgaans zo dat de biologische activiteit resulteert in een verlenging van de looptijd van de actief kool. [Moel P. et al, 2001]

Dit noemt men biologische actief koolfiltratie (BAKF).

Vanwege haar adsorberende eigenschappen wordt NOM meestal als een vervuilende stof beschouwd, die liefst eerst verwijderd wordt. Door deze adsorberende eigenschap is actief koolfiltratie wel in staat om een verwijdering tussen 60 en 80% te verkrijgen.

D. Desinfectie

Desinfectie vernietigt bacteriën door koken, bestraling met UV-licht, ultrageluidstrillingen of vergift hen met chloor, broom, jodium, ozon en andere chemicaliën.

Kwalitatief gezien is ozon de meest aantrekkelijke techniek. Nadat het zijn werk heeft gedaan valt het uiteen in moleculaire en atomaire zuurstof. Indien er veel NOM aanwezig is, zal het NOM onder invloed van ozon oxideren en ontbinden. Hierdoor zal de benodigde ozonconcentratie sterk dalen. Om de minimumconcentratie voor desinfectie (0,1 mg/l) te bereiken zullen hoge en zeer dure dosissen ozon nodig zijn.

Een bezwaar van ozon is dat het bromaat kan vormen bij reactie van NOM met bromide dat in oppervlaktewater vaak aanwezig is

De chloorhoudende desinfectieproducten zoals chloor (Cl_2) chloorkalk ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) en chloorbleekloog (NaOCl) hebben het grote nadeel dat ze toxische en kankerverwekkende desinfectiebijproducten (DBP) vormen met NOM. Tot deze DBP's behoren de trihalomethanen (THM) zoals chloroform (CHCl_3). In combinatie met bromide kan er een breed gamma aan DBP's ontstaan.

In Europa wordt er vooral gebruik gemaakt van Ozon en UV, terwijl in de VS nog zeer vaak chloorhoudende desinfectieproducten worden gebruikt. Onderzoek in de VS aangaande NOM spitst zich daarom vooral toe op DBP vorming en vermindering van THM en HAA.

E. Anionenwisselaars

Anionenwisselaars zijn harskorrels met een grote specifieke oppervlakte die negatief geladen deeltjes kunnen adsorberen. Het negatief geladen NOM zal zich op de anionenwisselaar hechten. Tot het negatief geladen NOM behoren de humuszuren, de building blocks en de organische zuren. Door scheiding van de anionenwisselaarskorrels en het water is het mogelijk om NOM uit water te verwijderen.

Een nieuw veelbelovend hars is het gemagnetiseerde anionenwisselend hars MIEX® (Magnetized Ion Exchange). Het is een magnetische anionenwisselaar met een hoge adsorptieve capaciteit voor NOM. Door haar kleine korrelgrootte en haar grote contactoppervlak slaagt MIEX® er in om een snelle adsorptie te bekomen. Het magnetisme van de korrel zorgt ervoor dat de anionenwisselaars aaneenklitten en makkelijk te verwijderen zijn. Daarna kunnen ze gereactiveerd worden om opnieuw gebruikt te worden.

MIEX® geeft de beste verwijdering voor componenten met een kleine MM en een hoge ladingsdichtheid. In tegenstelling tot coagulatie worden grotere componenten slechter verwijderd. [Fearing D. et al., 2004] Door MIEX en coagulatie te combineren zal NOM met zowel een hoge als met een lage MM verwijderd worden. [Berlijn 2001, p.78]

F. Ontharding

Ontharding wordt traditioneel ontworpen om de hardheid van het water te verlagen, maar het is ook in staat om partikels en organisch materiaal te verwijderen. Toevoeging van kalkmelk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) resulteert in neerslag van calciumcarbonaat (CaCO_3) en magnesiumhydroxide ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Afhankelijk van de dosering wordt een onderscheid gemaakt tussen drie types [Kweon J. & Lawler D.F., 2002]:

- Standaard ontharding gebeurt tot aanvaardbare calciumneerslag.
- Bij verdere dosering begint magnesium neer te slaan in de vorm van $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Indien dit niet in grote mate gebeurt (95%) spreekt men van “enhanced softening”
- Nog grotere doses resulteren in massale neerslag van magnesium. Dan spreekt men van magnesiumontharding.

De verwijdering van NOM is afhankelijk van het type ontharding en schommelt tussen 5 en 40%. De beste NOM verwijdering gebeurt bij magnesiumontharding. Voornamelijk de hydrofobe fractie van het NOM wordt verwijderd. De hydrofiele fractie vermindert nauwelijks. Standaard en enhanced ontharding verwijderen evenveel hydrofoob NOM, terwijl bij magnesiumontharding de hydrofobe fractie aanzienlijk afneemt. [Kweon J. & Lawler D.F., 2002]

G. Biologisch

Biologische afbraak met behulp van micro-organismen zal alleen het biodegradeerbare gedeelte van NOM verwijderen. Deze fractie varieert tussen 5 en 20%. Deze fractie kan echter wel verhoogd worden door vooraf het NOM met ozon te behandelen. Hierdoor worden de NOM-moleculen kleiner en makkelijker afbreekbaar door micro-organismen.

Methode	Verwijdering DOC	Verwijderde fractie
GAC	60 - 80%	Hydrofoob
UF/NF	80 - 100%	Hydrofiel
Coagulatie	10 - 60%	Hydrofoob, hoge MM
Biologie	5 - 20%	Lage MM
Ontharding	5 - 40%	Hydrofoob
Ionenwisseling	80%	Lage MM, hoge ladingsdichtheid
MIEX®	80%	Lage MM

2.3 Fouling van NOM op NF-membranen

2.3.1 Inleiding

Humusmaterialen in water adsorberen gemakkelijk op minerale oppervlakken, zoals klei en metaaloxiden. Vanwege het belang van NOM-adsorptie op minerale oppervlakken in geochemische processen is er sinds de jaren tachtig veel onderzoek naar NOM verricht. Uit deze onderzoeken bleek dat vooral de pH en de aanwezigheid van divalente kationen een invloed hebben op NOM-adsorptie. Daarbij speelden ook de hydrofobiciteit en de molecuulengrootte een belangrijke rol. Deze studies kunnen inzicht geven in de mechanismen van NOM-adsorptie, maar kunnen NOM-fouling bij membraanfiltratie niet volledig verklaren vanwege de hydrodynamische aspecten van membraanfouling. [Hong S. & Elimelech M., 1997]

2.3.2 Oorzaken en gevolgen van fouling

Er is tot op heden aangetoond dat NOM-fouling op NF-membranen gecontroleerd wordt door een samenspel van zowel fysische als chemische interacties.

NOM-fouling op NF-membranen wordt veroorzaakt door:

1. De eigenschappen van zowel het NOM als het membraan; (§ 2.3.3)
2. Hydrodynamische omstandigheden van de membraanfiltratie-eenheid; (§ 2.3.4)
3. Chemische samenstelling van het water (pH, aanwezigheid van ionen). (§ 2.3.5)

De meest voorkomende negatieve effecten hiervan op de foulinglaag zijn:

1. Vorming van een dikkere foulinglaag met een grotere stromingsweerstand;
2. Een meer samengedrukte foulinglaag die moeilijker water doorlaat;
3. Een sterkere binding tussen het membraan en de geadsorbeerde stof zodat het NOM niet afgespoeld wordt door de tangentiële stroming;

2.3.3 Invloed van NOM- en membraankarakteristiek

2.3.3.1 *Hydrofobiciteit van membraan en NOM*

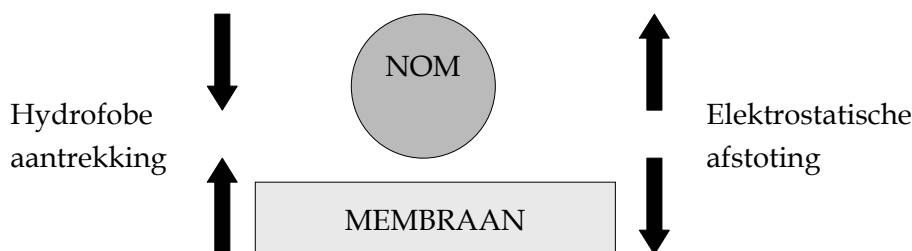
Er is vaak gebleken dat bij hydrofobe membranen de hydrofobe NOM-fractie de grootste veroorzaker is van fouling en bijgevolg van fluxdaling. Tot deze fractie behoren de lipiden en de humusmaterialen. Hydrofobe aantrekking is het resultaat van Van der Waalskrachten tussen moleculen.

De hydrofobiciteit van NOM neemt typisch toe bij een stijgend MM en bij een dalend aantal zure groepen.

Er bestaan ook hydrofiele cellulosemembranen waarbij hydrofiele componenten fouling zullen veroorzaken. Hierop zal niet verder op worden ingegaan.

2.3.3.2 *Lading van membraan en NOM*

Zowel het membraan als het NOM bevatten negatief geladen carboxylgroepen. Hierdoor is er niet alleen een afstotende kracht tussen de NOM-moleculen en het membraan, maar ook tussen NOM-moleculen onderling. Deze kracht werkt tegen de hydrofobe aantrekkingskracht. De Van der Waals energie per CH_2 -groep is ongeveer 2,5 kJ/mol. De dissociatie-energie van een geladen groep is ongeveer 30 kJ/mol. Indien er meer dan 12 koolstofatomen per geladen groep zijn in een NOM-molecule zal deze molecule zich hechten op een hydrofoob oppervlak zoals een membraanoppervlak. Het evenwicht tussen hydrofobe aantrekking en elektrostatische repulsie is bepalend voor de vervuiling van een membraan. [Liu C., et al.]



Figuur 2.3-1 Interacties tussen NOM en membraan

2.3.3.3 *Moleculaire Massa (MM)*

In § 2.2.2.2 werd reeds besproken dat het aantal ladingen per C-atoom afneemt met toenemende MM. Daarom zullen de zwaardere humusmaterialen meer hydrofoob zijn en zal NOM-adsorptie op membranen meer voorkomen door hoogmoleculaire humusmaterialen.

2.3.3.4 *NOM-concentratie*

Een hoge NOM-concentratie veroorzaakt twee effecten :

- Een dikke foulinglaag;
- Een slechtere doorlaatbaarheid van de foulinglaag.

Onderzoek naar de invloed van de NOM-concentratie op de fluxdaling toonde aan dat hogere NOM-concentraties resulteren in hogere fluxdalingen. Dit is te wijten aan een hogere NOM-afzetting op het membraan. De foulinglaag heeft meer massa bij grotere NOM-concentraties. [Kilduff J.E. et al., 2004]

In hetzelfde onderzoek werd vastgesteld dat de specifieke weerstand (per massa NOM) van de foulinglaag toeneemt wanneer de NOM-concentratie stijgt. Dit is te wijten aan een verminderde porositeit van de foulinglaag doordat de NOM-moleculen zich compacter schikken. Er blijkt echter wel een maximumwaarde voor deze weerstand te zijn, want bij stijgende NOM-concentraties blijkt de specifieke weerstand naar een constante waarde te streven.

2.3.3.5 *Waterstofbruggen en dipoolmoment*

Zoals reeds vernoemd in § 2.2.1 worden NOM-moleculen bijeen gehouden door waterstofbruggen. Deze krachten spelen ook een rol in de samenhang van NOM, maar zijn veel kleiner dan de hydrofobe en elektrostatische krachten en zullen daarom niet verder besproken worden. [Liu C., et al.]

2.3.4 Invloeden van hydrodynamische aard

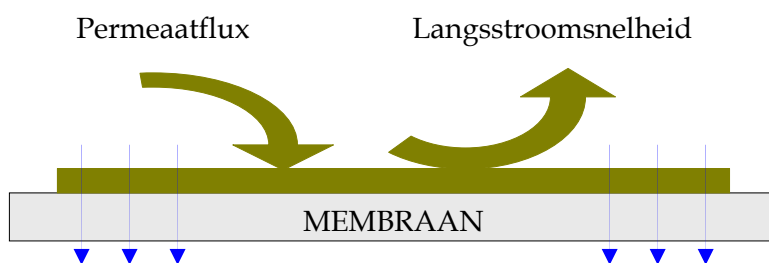
2.3.4.1 *Langsstroomsnelheid*

De langsstroomsnelheid bepaalt de mate van vervuiling. Bij hogere langsstroomsnelheden wordt het NOM onderworpen aan schuifkrachten en zal de accumulatie van NOM verminderen. Indien de langsstroomsnelheid klein is zal de foulinglaag zich gemakkelijk kunnen opbouwen. [Seidel A. & Elimelech M., 2002]

2.3.4.2 *Permeaatflux*

De permeaatflux is afhankelijk van de druk en heeft een belangrijke invloed op de vervuiling. Een hoge permeaatflux veroorzaakt een hoger convectief transport van het NOM naar het membraan. De NOM-moleculen worden als het ware tegen het membraan gedrukt. Dit resulteert in een grotere NOM-fouling.

Door een goede regeling van de langsstroomsnelheid en de permeaatflux kan NOM-fouling op NF gecontroleerd en verminderd worden. Bij hoge langsstroomsnelheden (40,4 cm/s) en lage permeaatfluxen (5,6 $\mu\text{m/s}$) zal NOM-fouling op NF bijna verwaarloosbaar zijn. [Seidel A. & Elimelech M., 2002]



Figuur 2.3-2 Invloed van permeaatflux en langsstroomsnelheid op fouling

2.3.5 Invloed van chemische samenstelling

2.3.5.1 Algemeen

Zoals in § 2.3.3 reeds werd besproken, is NOM-fouling een samenspel van hydrofobe aantrekking en elektrostatistische afstoting. Dit zowel voor NOM-moleculen onderling als voor NOM-moleculen en membranen. Deze intermoleculaire krachten bepalen de sterkte van de foulinglaag en bijgevolg ook de flux.

De hydrofobiciteit is te danken aan de Van der Waalskrachten tussen de verschillende koolstofmoleculen. Deze kracht wordt bepaald door de chemische structuur van het NOM en kan niet beïnvloed worden. De elektrostatistische krachten zijn echter afhankelijk van de pH, de ionsterkte en de aanwezigheid van divalente kationen.

In een eerste fase zal het foulingproces bepaald worden door elektrostatistische en hydrofobe interacties tussen het propere membraan en de NOM-moleculen. Nadat de foulinglaag gevormd is, zullen gelijkaardige interacties optreden tussen de NOM-moleculen op het membraan en die in de bulkfase.

Verskillende observaties hebben aangetoond dat de pH en de ionconcentratie een grote invloed hebben op de foulinglaag en op de fluxdaling. In volgorde van stijgend foulingpotentieel zijn deze:

- Na^+ ;
- Mg^{2+} ;
- Ca^{2+} .

Andere kationen kunnen andere resultaten leveren, maar enkel deze drie zullen besproken worden, omdat ze in grote mate voorkomen in de productie van drinkwater.

2.3.5.2 *Invloed van pH op fouling*

Onderzoek heeft aangetoond dat NOM beter verwijderd wordt door NF-membranen bij pH 3 dan bij pH 8. De oorzaak hiervan is dat het iso-elektrisch punt van een aromatisch polyamidemembraan rond pH 3 ligt. Ditzelfde aromatisch polyamidemembraan werd in dit eindwerk gebruikt voor experimenten. [Hong S. & Elimelech M., 1997], [Childress A. & Elimelech M., 1996].

Een aromatisch polyamidemembraan bevat carboxylgroepen (COOH) en aminogroepen (NH₂). De carboxylgroepen zullen bij hoge pH hun protonen verliezen en negatief geladen worden (COO⁻). De aminogroepen zullen bij een lage pH geprotoneerd worden en daarom positief geladen worden (NH₃⁺). Het iso-elektrisch punt bevindt zich bij pH 3.

- pH < 3: positief geladen;
- pH = 3: neutraal;
- pH > 3: negatief geladen.

Bijgevolg zal het membraan in normale omstandigheden (pH 7 à 8) een negatieve lading hebben.

In § 2.2.2.3 werd besproken dat NOM-moleculen ook negatief geladen zijn. Dit is de reden waarom er een negatief geladen membraan gebruikt wordt. Een negatief geladen membraan zal minder adsorptie ondervinden van negatief geladen NOM.

Zowel NOM als het membraan krijgen een zwakkere lading bij lage pH-waarden. Hierdoor zullen de Van der Waalskrachten meer invloed krijgen en zal het NOM steviger aan het membraan gehecht zijn. De foulinglaag zal ook sterker zijn.

De lagere lading van het NOM bij lage pH heeft een invloed op de configuratie van het NOM. NOM-moleculen rekken zich vanwege de hoge ladingsdichtheid bij hoge pH tot vlakke lineaire moleculen. Dit resulteert in een normale losse foulinglaag. Indien de pH wordt verlaagd zullen de ladingen van het NOM verzwakt worden, waardoor de humusmoleculen een opgekrulde, sferische en compacte vorm krijgen. Hierdoor ontstaat een veel compactere foulinglaag waardoor het water moeilijker kan permeëren. Daarom zal de flux dalen bij lage pH-waarden.

2.3.5.3 *Invloed van de ionsterkte op fouling*

De ionsterkte van een oplossing van zouten is afhankelijk van de concentratie en de lading van alle ionen. De ionsterkte beïnvloedt de lading van geladen opgeloste stoffen zoals NOM. Een hoge ionsterkte vermindert immers de elektrostatische lading van een geladen stof. Het negatief geladen NOM zal omringd worden door positieve ionen, zodat de negatieve lading van het NOM wordt afgeschermd. In een oplossing van hoge ionsterkte zullen opgeloste moleculen (of ionen) minder geladen zijn dan in een oplossing met een lage ionsterkte. Door de lagere elektrostatische krachten zullen NOM-moleculen onder invloed van Van der Waalskrachten elkaar sterker aantrekken.

De ionsterkte heeft dezelfde invloed op het membraan. Negatief geladen membranen in een oplossing met een hoge ionsterkte zullen een minder negatieve lading krijgen.

Aangezien bij hoge ionsterkte het membraan en het NOM minder negatief geladen zijn, zullen ze elkaar minder afstoten door elektrostatische repulsie. Hierdoor zal de foulinglaag bij oplossingen met een hoge ionsterkte sterk gebonden zijn aan het membraan en zal het NOM een stevige foulinglaag vormen.

Deze theorie wordt experimenteel bevestigd. [Hong S. & Elimelech, 1997], [Kilduff J.E. et al., 2004] Onderzoek heeft aangetoond dat een verhoogde ionsterkte resulteert in een verhoogde fluxdaling. Er kon geen verschil worden aangetoond in de hoeveelheid geadsorbeerd NOM. Daarom is de fluxdaling te wijten aan een verhoogde hydraulische weerstand van de foulinglaag door een sterkere binding van het NOM.

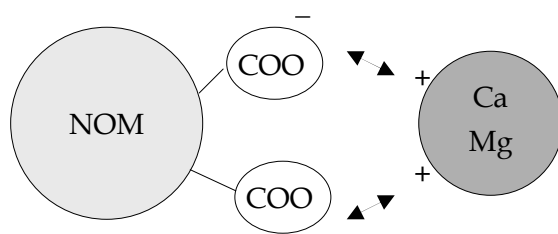
Net als bij de pH zal de ionsterkte invloed hebben op de configuratie van het NOM. NOM-moleculen nemen bij lage ionsterkte een vlakke lineaire vorm aan, hetgeen resulteert in een normale losse foulinglaag. Bij hoge ionsterkte zullen de humusmoleculen een opgekrulde, sferische en compacte vorm krijgen, waardoor een compactere foulinglaag ontstaat en de flux zal dalen.

2.3.5.4 *Complexvorming door divalente kationen*

In zeer veel onderzoeken werd aangetoond dat membraanfouling door humeuze zuren bevorderd wordt in aanwezigheid van divalente kationen. De meest voorkomende divalente kationen in water zijn calcium en magnesium. Deze divalente ionen veroorzaken een grotere fluxdaling dan monovalente ionen bij eenzelfde ionconcentratie. Een 0,1 M Ca^{2+} - of Mg^{2+} -oplossing zal meer NOM-fouling veroorzaken dan een 0,2 M Na^{+} -oplossing.

Een mogelijke oorzaak zou te wijten kunnen zijn dat de lading van het membraan anders is bij divalente kationen. De gemeten zeta potentiaal van het membraan is gelijk voor calcium, magnesium en natrium bij gelijke ionsterkte. (Figuur 2.3-3). De lading van het membraan is alleen afhankelijk van de ionsterkte en pH en niet van het type ion. Daarom kan worden uitgesloten dat de tweewaardige lading van divalente kationen verantwoordelijk zou zijn voor de grotere fouling. [Hong S. & Elimelech M., 1997]

Divalente kationen zoals calcium en magnesium vormen intramoleculaire complexen met de carboxylgroepen van de humuszuren en veranderen dus de elektrokinetische eigenschappen van het NOM. Het positieve ion zal door complexvorming de negatieve lading van het NOM neutraliseren waardoor de intramoleculaire repulsie sterk zal dalen. Net zoals in de voorgaande paragrafen zal dit resulteren in een compacte en stevige foulinglaag, gemaakt van kleinere en gekrulde moleculen die sterk met elkaar gebonden zijn. [Seidel A. & Elimelech M., 2002],



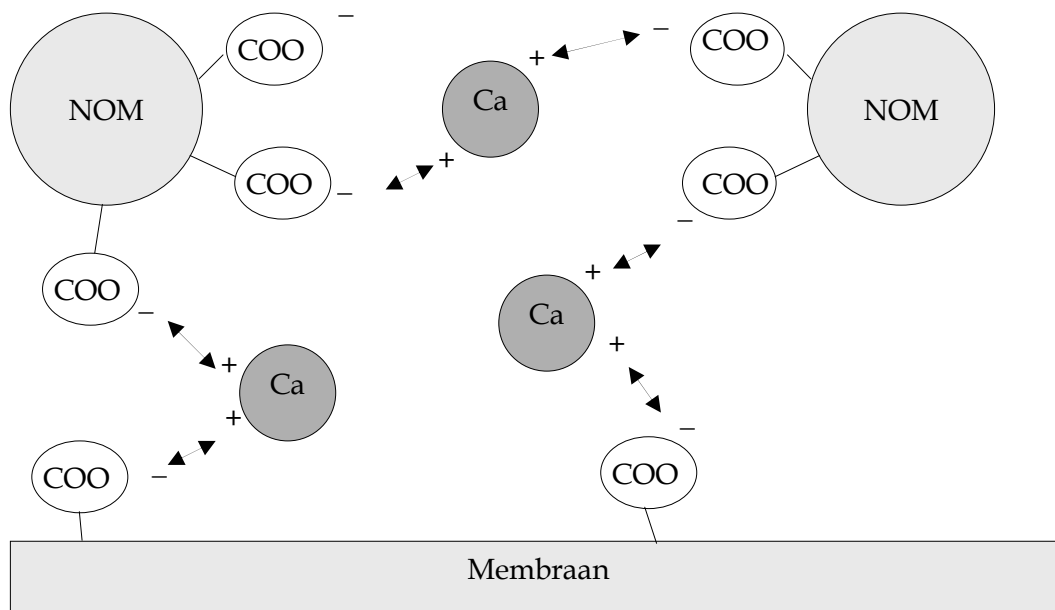
Figuur 2.3-3 Complexvorming door divalente kationen

2.3.5.5 Cross-linking door calciumionen

Calcium veroorzaakt meer fouling dan magnesium. Het calcium-NOM complex en het magnesium-NOM complex hebben echter dezelfde stabiliteitsconstante. Dit kan dus niet de oorzaak zijn van de hogere fouling van calcium. [Li Q. & Elimelech M.]

Calcium, in tegenstelling tot magnesium, kan verschillende NOM-moleculen met elkaar verbinden door cross-linking. Het positieve calciumion zal een brug vormen tussen de negatief geladen NOM moleculen. Deze cross-linking gebeurt ook tussen de carboxylgroepen van het NOM en de carboxylgroepen van het membraan. (Figuur 2.3-4) [Hong S. & Elimelech M., 1997]

Deze cross-linking zorgt voor een zeer compacte en dikke foulinglaag met zeer hoge resistentie voor hydrodynamische krachten. Fouling bij hoge calciumconcentraties zal moeilijk te verminderen zijn door verhoging van de langstroomsnelheid. [Seidel A. & Elimelech M., 2002]



Figuur 2.3-4 Cross-linking door calcium

2.3.6 Conclusie

Uit bovenstaande paragrafen kan men besluiten dat:

NOM-fouling van NF-membranen wordt veroorzaakt door een wisselwerking van hydrofobe en elektrostatistische interacties tussen NOM en membraan en

- Hydrofobe membranen worden vervuild door hydrofobe componenten;
- De vervuiling neemt toe naarmate de NOM-concentratie stijgt;
- Hoge langsstroomsnelheden en lage permeaatfluxen verminderen vervuiling;
- Een lage pH en een hoge ionsterkte geven een dicht gepakte foulinglaag die sterk aan het membraan gehecht is;
- Divalente kationen zoals Ca^{2+} en Mg^{2+} complexeren met het aanwezige NOM en zorgen voor een dichtere foulinglaag;
- Ca^{2+} veroorzaakt crosslinking en zorgt voor een spectaculaire fouling.

2.4 Waterbehandelingen

2.4.1 Onderscheid grond- en oppervlaktewater

2.4.1.1 Zuivering grondwater

Grondwater heeft het voordeel dat het op vele plaatsen kan worden gewonnen waardoor lange transportleidingen overbodig zijn. Het is bovendien hygiënisch betrouwbaar en heeft een constante samenstelling. Als nadeel moet worden genoemd dat de winbare hoeveelheden beperkt zijn en elke onttrekking met een verlaging van de grondwaterstand gepaard gaat, waardoor schade aan landbouw en aan de natuur kan worden toegebracht.

Grondwater bevat vaak opgeloste metalen zoals ijzer, mangaan, calcium en magnesium. Waar nodig worden deze deeltjes eruit gehaald tijdens de zuivering. Indien er nog ongewenste stoffen zijn achtergebleven, dan wordt het water nabehandeld met actieve koolfilters. Soms kan het zelfs zonder zuivering worden gedistribueerd. Vaak is een eenvoudige en goedkope zuivering voldoende. [Moel P. et al, 2001]

Nanofiltratie wordt reeds op een aantal locaties in Nederland uitgevoerd op grondwater. Voor de verwijdering van ijzer en mangaan mag er geen zuurstof in het water komen, omdat anders de membranen vervuilen door geoxideerde ijzer en mangaanafzettingen. [Moel P. et al., 2001]

2.4.1.2 Zuivering oppervlaktewater

Vergeleken met grondwater vertoont oppervlaktewater een sterkere variatie in samenstelling en hoeveelheid. Bestrijdingsmiddelen, lozingen, rioolwater en calamiteiten hebben een negatieve invloed op de kwaliteit van het oppervlaktewater. Door de verontreinigingen is de zuivering van oppervlaktewater een stuk complexer dan die van grondwater. Temeer omdat de temperatuur en de concentraties van de verontreinigingen sterk kunnen variëren. Bovendien vergt de verwijdering van bacteriën en virussen extra zuivering.

Oppervlaktewater bevat meestal meer NOM dan grondwater, waardoor er meer NOM-fouling op NF kan voorkomen dan bij grondwater. [Liu C. et al.]

2.4.2 Ozonisatie

2.4.2.1 *Principe*

Ozonisatie werkt volgens het principe van oxidatie. De statisch geladen ozonmolecule (O_3) is instabiel en wil naar zijn oorspronkelijk vorm (O_2) terugkeren door reductie. Ozon zal dan bij aanraking met een oxideerbare molecule haar interne spanning hieraan doorgeven. Bij het oxideren komt het derde zuurstofatoom door ontleding los van het ozon en bindt het zich aan andere materie waardoor van het ozon uiteindelijk alleen nog stabiel zuurstof overblijft.

2.4.2.2 *Invloed op NOM*

Ozon zal zich voornamelijk richten op moleculen met een hoge elektronendichtheid. Hiertoe behoren de meervoudige en aromatische koolstofbindingen. Door oxidatie zullen deze bindingen verbroken worden of zal het koolstofatoom geoxideerd worden.

Humus bevat vele aromatische en meervoudige bindingen en zal het meest onderhevig zijn aan ozonisatie. Door oxidatie en verbreking van moleculen treden een verschuiving op van humus naar building blocks en van building blocks naar ketonen, aldehyden en carbonzuren.

Door afbraak van aromatische stoffen zal de SUVA dalen. Het NOM zal hydrofieler worden vanwege het lager aantal aromatische bindingen en door het hoger aantal functionele groepen met zuurstof. Er komt een daling van het aantal hydrofobe componenten en een stijging van het aantal hydrofiële componenten. [Marhaba T. et al.], [AWWA research foundation, 2001], [Gül S., 2002]

De kleur van het water wordt voornamelijk veroorzaakt door het humus, daarom is ozonisatie een goede methode voor kleurverwijdering. De gevormde fracties zijn ook gemakkelijker biologisch afbreekbaar. Wanneer de ozondosis de gebruikelijke waarden overschrijdt, zal de kleur van het water niet veel verminderen, maar zal de biodegradeerbaarheid van het water sterk toenemen.

Ozonisatie vormt echter wel het DBP bromaat met het reeds in het water aanwezige bromide. Bromaatvorming is typisch voor ozonisatie en kan op lange termijn bij blijvende blootstelling kanker veroorzaken. Bromaat is echter veel minder toxisch dan de DBP's die gevormd worden met andere desinfectiemethoden.

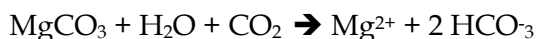
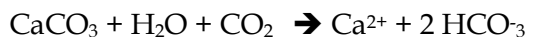
2.4.2.3 *Invloed op NOM-fouling*

Door oxidatie van aromatische bindingen zullen humusmoleculen minder hydrofoob zijn en zal er minder fouling zijn.

2.4.3 Pellet ontharding

2.4.3.1 Probleemsituering

Calciumcarbonaat (CaCO_3) en magnesiumcarbonaat (MgCO_3) zijn slecht oplosbare zouten, die veel voorkomen in grond en gesteenten. Beide zouten reageren met water waarin koolstofdioxide is opgelost tot calciumbicarbonaat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) en magnesiumbicarbonaat ($\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$).



De calcium- en magnesiumionen, die eerst gebonden in grond en gesteente zaten, bevinden zich nu in opgeloste vorm in het grond- en oppervlaktewater. Gezuiverd drinkwater wordt geproduceerd met een lage hardheid. Dit is nodig, omdat de omgekeerde reactie kan voorkomen in huishoudtoestellen bij hoge temperaturen. De ideale norm voor drinkwater schommelt rond 60 mg Ca/l. Onbehandeld water heeft een hardheid die varieert rondom 110 mg Ca/l en zal behandeld moeten worden om een hardheid van 60 mg Ca/l te bekomen.

Steeds vaker wordt niet alleen het grondwater aëroob onthard, maar vindt ook ontharding direct op het anaërobe water plaats. Voordeel van deze anaërobe ontharding is dat een groot deel van het aanwezige ijzer in de pellets wordt opgevangen, waardoor aanzienlijk op spoelwater- en slibbehandeling kan worden bespaard.

2.4.3.2 Invloed op NOM

CaCO_3 slaat neer als een dense kristallijne vaste stof met een kleine oppervlakte. Hierdoor zijn er weinig adsorptieplaatsen voor het NOM. Elektrostatische repulsie van de hoge negatieve ladingsdichtheid van zowel het NOM als het calciumcarbonaatoppervlak bij hoge pH-waarde leiden tot lage NOM-adsorptie.

Bij hogere kalkmelkconcentraties en bij hogere pH-waarden is een TOC-daling waarneembaar. Verwijdering van NOM door ontharding wordt verkregen bij magnesiumontharding. Hierbij zal er zeer veel kalkmelk toegevoegd worden, waardoor $\text{Mg}(\text{OH})_2$ neerslaat. [Bob M. & Walker H.W., 2001] Dit gebeurt bij pH 11,5. Calciumontharding gebeurt meestal bij pH 10,5. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -neerslag is meer vlokvormig van structuur. Door het grotere contactoppervlak en de positieve oppervlaktelading van deze neerslag biedt $\text{Mg}(\text{OH})_2$ betere adsorptieve capaciteiten voor NOM dan CaCO_3 . SUVA dalingen van het water wijzen op adsorptie van voornamelijk hydrofobe componenten. [Kweon J.H. & Lawler D.F., 2002]

2.4.3.3 *Invloed op NOM-fouling*

Deze verwijdering van hydrofobe componenten heeft een positieve invloed op de fluxdaling van NF door NOM-fouling. De beste resultaten werden echter verkregen bij magnesiumontharding. [Kweon J.H. & Lawler D.F., 2002]

Bij pellet-ontharding komen deze voorwaarden niet voor, maar zal NOM-adsorptie toch in lichte mate voorkomen door adsorptie op de pellets. Toch heeft ontharding een belangrijke invloed op fouling. De verwijdering van calciumionen kan het foulinggedrag drastisch verstoren met een minder grote fluxdaling als gevolg.

Experimenteel gedeelte

Het tweede luik van dit eindwerk omvat een uitgebreid experimenteel onderzoek. Hierbij is de algemene doelstelling het verifiëren van de stellingen die bij de aanvang van dit eindwerk geformuleerd werden.

Het onderzoek zal uitgevoerd worden met twee reële voedingswaters voor drinkwaterbereiding. Voor beide waters wordt gewerkt met verschillende stalen, genomen op verschillende plaatsen in het proces van de drinkwaterbereiding.

Voor de verschillende experimenten zal telkens kort de gebruikte methodiek worden aangegeven om vervolgens over te gaan tot een gedetailleerde bespreking van een aantal representatieve resultaten. Het overzicht van alle resultaten is terug te vinden in Bijlage IV :

In eerste instantie wordt het **fluxgedrag** voor de verschillende waters onderzocht gebruik makende van een membraan test apparaat (MTA). Hierbij zal de invloed van NOM-vervuiling, gekoppeld aan de aard van de reeds doorlopen behandelingsstappen, centraal staan.

De aanwezigheid van NOM-vervuiling zal een wijziging van de **membraankarakteristieken** van het gebruikte membraan t.o.v. een nieuw membraan teweegbrengen. Om dit experimenteel te verifiëren zullen verschillende methodes worden aangewend met zowel een kwalitatief, d.m.v. visuele waarneming als een kwantitatief karakter. Voor de kwantitatieve methoden zullen het fluxverloop en het retentiegedrag met een standaardoplossing bij een vervuild en niet vervuild membraan met elkaar vergeleken worden.

Als laatste element van de membraankarakteristieken wordt nagegaan in welke mate de aanwezigheid van NOM op het membraan de fysische eigenschappen van het membraan zelf zal beïnvloeden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de sessile drop methode en de captive bubble methode. Met deze methodes kan de hydrofobiciteit van een oppervlakte geverifieerd worden.

Vervolgens zal het **retentiegedrag** van het NOM zelf **kwantitatief** bestudeerd worden gebruik makende van LC-OCD. Deze analysetechniek laat toe om de concentraties van de verschillende samenstellende componenten van NOM afzonderlijk te meten. Door dit toe te passen op de voedings - en permeaatstroom kan nagegaan worden in welke mate NF een invloed heeft op de relatieve samenstelling van NOM wat op zijn beurt aan de basis kan liggen van een verklaring voor het foulinggedrag.

De gebruikte methode is echter zeer duur en tijdrovend. Emissie-excitatie daarentegen is een veel goedkopere en snellere methode, die echter slechts een **semi-kwantitatief** beeld geeft van een beperkt aantal parameters van NOM. Beide methodes zullen met elkaar vergeleken worden, waarbij wordt nagegaan in welke mate er een correlatie tussen beide bestaat.

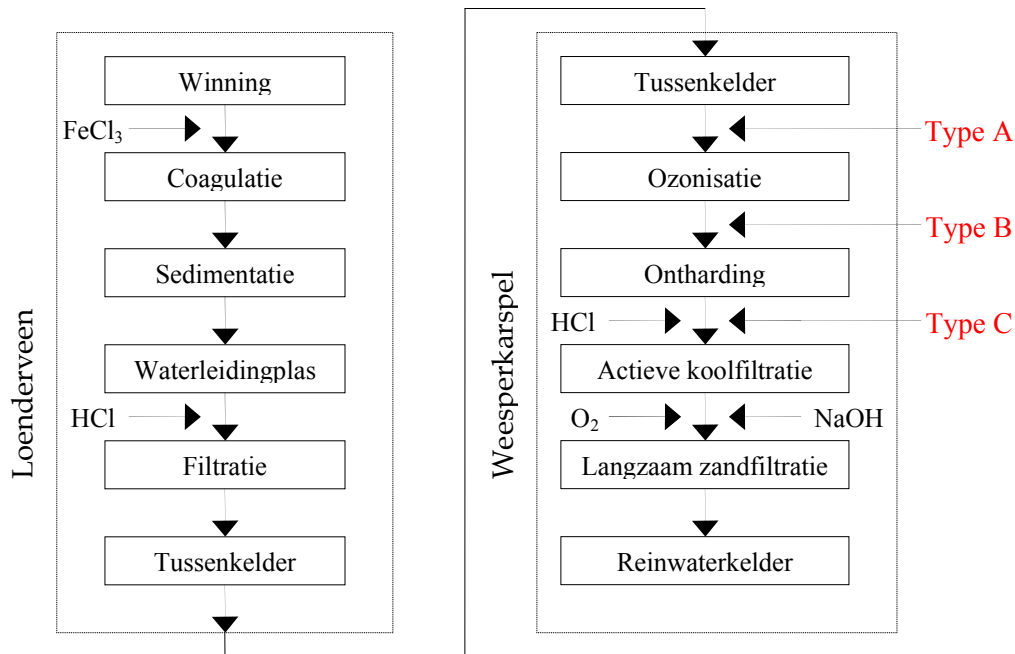
Tijdens de experimenten zal later blijken dat de aanwezigheid van Ca-ionen een belangrijke invloed heeft op het foulinggedrag. Vermits dit een belangrijk element kan zijn in het verklaren van het foulinggedrag zal in een laatste experimenteel luik nagegaan worden in welke mate de aanwezigheid van deze ionen aanleiding geeft tot complexvorming.

Op basis van de experimentele bevindingen en resultaten zullen tot slot een aantal suggesties geformuleerd worden voor verder experimenteel onderzoek.

3 Fluxverloop

3.1 Gebruikte Waters

3.1.1 Weesperkarspel (WLB Amsterdam)



Figuur 3.1-1 Blokschema van de zuivering van zuiveringsstation Weesperkarspel

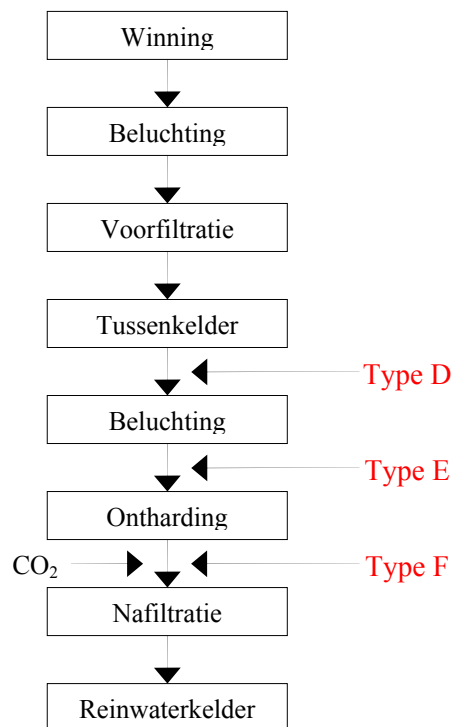
Op het zuiveringsstation Weesperkarspel wordt voorgezuiverd oppervlaktewater van Loenderveen verder behandeld. Het water ondergaat een ozonbehandeling gevolgd door een ontharding. Na conditionering met zoutzuur wordt het ontharde water naar actiefkoolfilters geleid voor verwijdering van schadelijke bestanddelen en zwevend stof.

Voor het onderzoek van water afkomstig van Weesperkarspel worden drie soorten waters gebruikt: (zie Figuur 3.1-1)

- Type A voor ozonisatie;
- Type B tussen ozon en ontharding;
- Type C na ontharding.

Het type onthardingschemicalie dat men gebruikt in Weesperkarspel is natronloog met een concentratie van 50% en een dosering van 37,5 g NaOH/m³. [Siegers W., 2003]

3.1.2 Spannenburg



Figuur 3.1-2 Blokschema van de zuivering van zuiveringsstation Spannenburg

Het water dat gezuiverd wordt in Spannenburg is grondwater. Zoals reeds vermeld in § 2.1.2 heeft dit water minder voorbehandelingen nodig. Dit is dan ook te zien in Figuur 3.1-2.

Voor het onderzoek van water afkomstig van Spannenburg werden 2 soorten waters gebruikt: (zie Figuur 3.1-2)

- Type D voor beluchting
- Type E voor ontharding;
- Type F na ontharding.

Het type onthardingschemicalie dat men gebruikt in Spannenburg is natronloog met een concentratie van 50% en een dosering van 95 g NaOH/m³. [Siegers W.,2003]

3.2 Proefopstelling

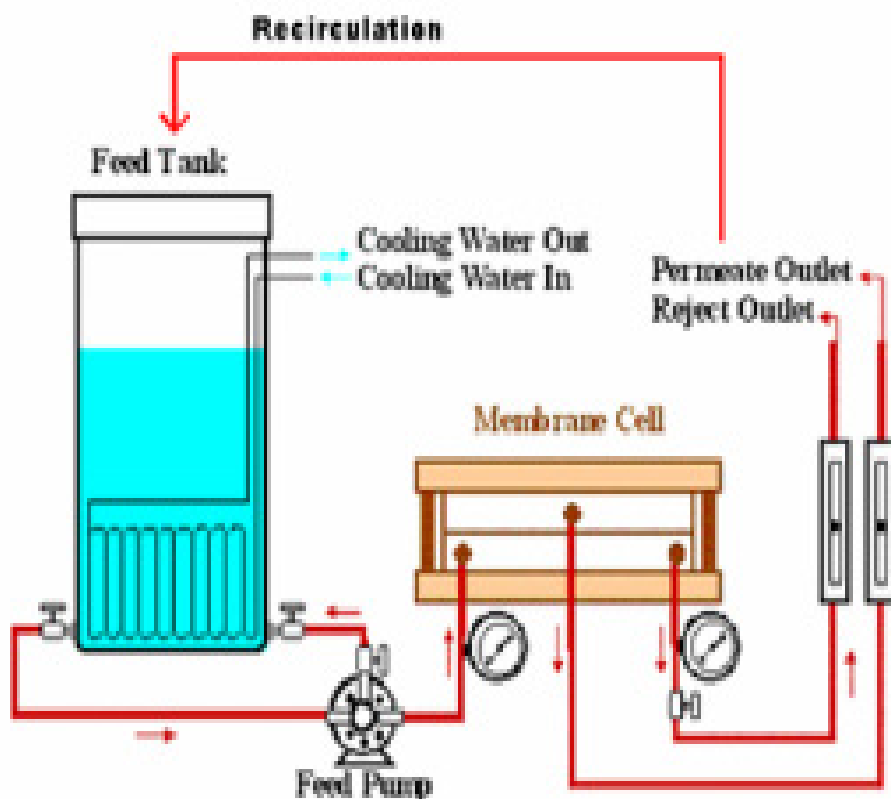
3.2.1 MTA

De testen zijn uitgevoerd op laboschaal met het MTA (membraan test apparaat). In Figuur 3.2-1 is het MTA schematisch voorgesteld.

De voedingstank heeft een maximum inhoud van 100L, en wordt op een constante temperatuur van 20°C gehouden door een koel- en verwarmingselement. De pomp heeft een maximum capaciteit van 600 l/h en levert een maximum druk van 20 bar. Na de pomp is er een regelbare bypass om de druk te regelen. Voor de pomp kan ook nog een voorfilter (45µm) geplaatst worden om sterk vervuilende waters deels te zuiveren voor ze naar het NF membraan gestuurd worden.

De voedingsstroom stroomt via een debietmeter naar de SEPA-cell. (zie § 3.2.2) Het permeaat en het concentraat staan in verbinding met een debietmeter, waarna de twee stromen worden opgevangen in een gemeenschappelijk kanaal om zo terug te stromen naar het voedingsvat. De druk meet men op aan de voedings- en concentraatzijde.

Het MTA kan ingezet worden met andere testcellen dan de SEPA-cell. [Konings, S.,2003-2004]



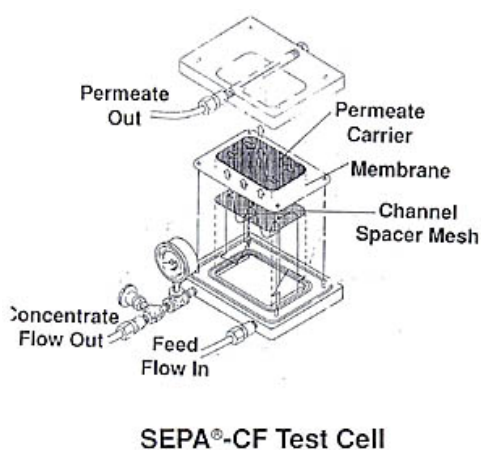
Figuur 3.2-1: schematische voorstelling van de MTA

3.2.2 SEPA-cell

In de SEPA-cell (Figuur 3.2-3 en Figuur 3.2-2) is telkens een vlak stukje membraan gelegd, gesneden uit het membraan van een spiraalgewonden module (Trisep 4040-TS80-TSA). Het membraan is zo gelegd dat de actieve zijde naar onder gericht is. Onder het membraan ligt een feedspacer om het voedingswater goed te verdelen over heel het membraanoppervlak. Op het membraan ligt een permeaatspacer die ervoor zorgt dat het permeaat gecollecteerd wordt en langs de permeaatuitgang de SEPA-cell verlaat. Het concentraat loopt langs het membraan en verlaat de SEPA-cell aan de andere kant. Het membraan heeft een effectief oppervlak van 132 cm².

Het MTA is zodanig gebouwd dat het stromingsgedrag in de module vergelijkbaar is met het stromingsgedrag in een reële module die werkt volgens het TFF (Tangentiële Flow Filtratie)- principe. Hierbij stroomt de voeding aan hoge snelheid langs het membraan. Dit moet theoretisch leiden tot een dynamisch evenwicht waarbij de verdere opbouw van de foulinglaag in evenwicht komt met het 'afspoelen' van deze laag ten gevolge van de turbulente stroming. Op die manier wordt het mogelijk in stationaire toestand stabiele fluxwaarden te bekomen. Op die manier zijn de bekomen resultaten en conclusies representatief voor het gedrag bij reële modules.

De SEPA-cell is onder druk gezet door een drukpomp, die een druk aanlegt op de SEPA-cell. Deze druk moet steeds 5 bar hoger liggen dan de werkingsdruk van de SEPA-cell.



Figuur 3.2-3: Voorstelling van het inwendige van de Sepa-cell



Figuur 3.2-2: Foto van de testcel

3.2.3 Membraan

Het membraan dat gebruikt is om de testen op uit te voeren is een membraantype dat vaak gebruikt wordt voor waterzuivering. (Trisep 4040-TS80-TSA membraan).

Dit is een spiraalgewonden aromatisch polyamide membraan met een effectief membraanoppervlak van 7,5 m².

Het spiraalgewonden membraan is eerst ontrollen en dan versneden om zo vlakke membranen te bekomen die gebruikt kunnen worden in de SEPA-cell. Bij het uitsnijden van de membranen is er steeds voor gezorgd dat er zich tussen het uitgesneden membraan en de rand van het membraan 5 cm bevindt. Dit om grote variaties in Kw-waarden te voorkomen, die veroorzaakt zouden kunnen worden doordat de lijmlaag die de twee membranen samenhoudt deels is uitgelopen. De uitgesneden membranen zijn dan bewaard in een 1% NaS₂O₅ oplossing bij een temperatuur van 5°C om mogelijke microbiologische groei te voorkomen.

Dit membraan is gekozen geweest omdat het door 'Vitens' gebruikt wordt voor een reële installatie voor drinkwaterbereiding. Het zou de grootste bestendigheid tegen NOM fouling vertonen.

3.3 Verloop van de experimenten

3.3.1 Algemeen

Bij de start van elke proef is eerst een karakterisering van het membraan uitgevoerd. Dit gebeurde om de wateroverdrachtscoëfficiënt en de retentie van het membraan te kunnen bepalen. (zie § 3.6) Na afloop van de karakterisering is het MTA nog nagespoeld met gedemineraliseerd water voor de verwijdering van het eventueel achtergebleven MgSO_4 . De karakterisering werd uitgevoerd met een standaardoplossing van ± 450 ppm MgSO_4 onder een druk van 2,5 bar.

Na de reiniging werd de proef opgestart. Het vat van het MTA werd gevuld met 80 liter NOM-houdend water. De proeven werden gedurende een week bij 15 bar en 20°C uitgevoerd om er zeker van te zijn dat er vervuiling optreedt. Zowel bij de karakterisering als bij de fluxverlopen werd het voedingsdebiet constant gehouden op 27,2 l/h. Tijdens de proef werden van de drie stromen de conductiviteit, de pH en de debieten gemeten. De flux kan bepaald worden door het permeaatdebiet te delen door de oppervlakte van het membraan (132 cm^2).

Het verloop van deze flux in functie van de tijd vormt de essentie van deze experimenten. Naarmate er meer vervuiling optreedt zal de flux in functie van de tijd dalen. Deze daling zal in het begin sterk toenemen om daarna te stabiliseren tot een evenwichtswaarde. De snelheid waarmee de flux daalt en de waarde die bereikt wordt zijn praktische indicatoren voor de vervuiling van het membraan.

Na zeven dagen werd nogmaals een karakterisering van het membraan uitgevoerd om te kijken of de wateroverdrachtscoëfficiënt en retentie veranderden door fouling.

In het begin en op het einde van de proef zijn telkens zes stalen genomen, twee van de voeding, twee van het concentraat en twee van het permeaat. Deze stalen zijn dan opgestuurd naar DOC-labor in Duitsland voor LC-OCD metingen en naar de Universiteit van Birmingham voor Excitatie-emissie fluorescentie metingen.

3.4 Beschrijving van de proeven

3.4.1 Benaming van de experimenten

Er werd gekozen voor een eenvoudige benaming van de verschillende watertypes.

Letters A, B, en C zijn de watertypes van Weesperkarspel en D, E en F zijn de watertypes van Spannenburg.

3.4.2 Weesperkarspel

Er werden 5 experimenten uitgevoerd met het water van Weesperkarspel.

Het eerste experiment werd uitgevoerd met het water “voor ozonisatie” (experiment A’).

Hier werd gekeken welke druk het makkelijkst toepasbaar was voor verdere experimenten.

Er werd een druk van 16,2 bar aangehouden. Dit is echter de hoogst instelbare druk van het MTA. Daarom werd deze proef slechts gedurende 46 uur uitgevoerd. Er werd gekozen om het experiment te herhalen bij 15 bar (experiment A).

Daarna werden twee experimenten uitgevoerd voor het water “tussen ozonisatie en ontharding”. Dit zijn experimenten B en B’. Omdat er te weinig meetgegevens waren voor de flux werd gekozen om de proef opnieuw te doen, evenwel zonder analyses. (experiment B’)

Vervolgens werd een experiment met water “na ontharding” uitgevoerd (experiment C).

Tabel 3.4-1 Benaming en opmerkingen bij de experimenten

Proef	watertype	opmerkingen
A’	Weesp voor ozon	16,2bar; 46 uur
A	Weesp voor ozon	Normaal
B	Weesp na ozon en voor ontharding	Weinig fluxdata
B’	Weesp na ozon en voor ontharding	Geen analyse
C	Weesp na ontharding	Normaal

3.4.3 Spannenburg

Er werden 5 experimenten met het water van Spannenburg uitgevoerd.

Eerst werd getracht om met het ruwe grondwater een experiment uit te voeren (experiment D'). Dit water deed de flux na enkele uren dalen naar nul. Er was een dikke roodbruine fouling op het membraan zichtbaar. Het MTA moest daarna grondig gereinigd worden met salpeterzuur en chloorbleekloog om alle mogelijke afzetting in de leidingen te verwijderen.

Daarna werden twee experimenten uitgevoerd met het water “voor ontharding”. Dit zijn experimenten E en E'. Eerst werd gestart met experiment E'. Ook hier werd echter een zeer snelle en drastische daling van de flux vastgesteld. Daarom werd besloten om een voorfilter te gebruiken. Deze voorfilter houdt de zwevende delen uit het water tegen, zodat ze niet in de SEPA-cell geraken. Er werden stalen voor en na de voorfilter genomen om te zien of de voorfilter geen NOM verwijderd.

Vervolgens werd een experiment met water “na ontharding” uitgevoerd (experiment F). Verassend genoeg werd ook hier een roodbruine fouling geconstateerd. Deze foulinglaag was veel korreliger en zorgde niet voor een extreme fluxdaling. Daarom werd beslist om de proef te herhalen met een voorfilter, maar zonder verdere analyses (experiment F').

Tabel 3.4-2 Benaming en opmerkingen bij de experimenten van Spannenburg

Proef	watertype	opmerkingen
D'	Spannenburg voor beluchting	Zonder voorfilter
E	Spannenburg voor ontharding	Met voorfilter
E'	Spannenburg voor ontharding	Zonder voorfilter
F	Spannenburg na ontharding	Zonder voorfilter
F'	Spannenburg na ontharding	Met voorfilter

3.5 Bespreking van de fluxverlopen

3.5.1.1 *Genormaliseerde flux*

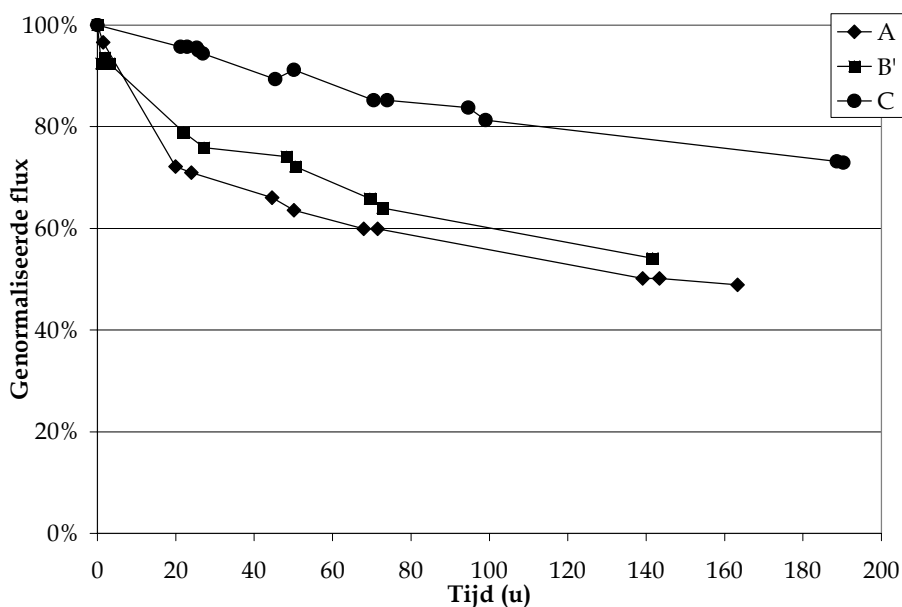
Voor het voorstellen van de resultaten zal gebruik gemaakt worden van de genormaliseerde flux (t.o.v. de beginflux). Zo kunnen de verschillende experimenten op een correcte manier met elkaar vergeleken worden, ongeacht de beginwaarde van de flux.

3.5.1.2 *Weesperkarspel*

Er kan een fluxdaling geconstateerd worden voor alle waters. Deze daling is eerst sterk, maar evolueert na enige tijd naar een meer constante daling. Er wordt echter geen stabiele fluxwaarde bereikt. Dit wijst erop dat de foulinglaag niet stabiliseert, maar blijft toenemen.

Zowel ozonisatie (A en B) als ontharding (C) hebben een gunstig effect op het fluxverloop. Het effect van ozonisatie is echter gering. Tijdens de ozonisatie treden er oxidatiereacties op die hetzij resulteren in een verhoging van de polariteit van moleculen door bijkomende bindingen met zuurstof, hetzij aanleiding geven tot kleinere moleculen door het breken van C-C bindingen.

Ontharding daarentegen geeft wel een drastische fluxdaling. De fluxdaling vermindert van 50% naar 25%. Onthard water bevat minder calciumionen en dit beïnvloedt blijkbaar het foulinggedrag zeer sterk. De invloed van calcium is echter beperkt tot geladen deeltjes, zoals humusmaterialen. Dit doet sterk vermoeden dat de negatief geladen humusmaterialen een belangrijke rol spelen in het foulinggedrag.



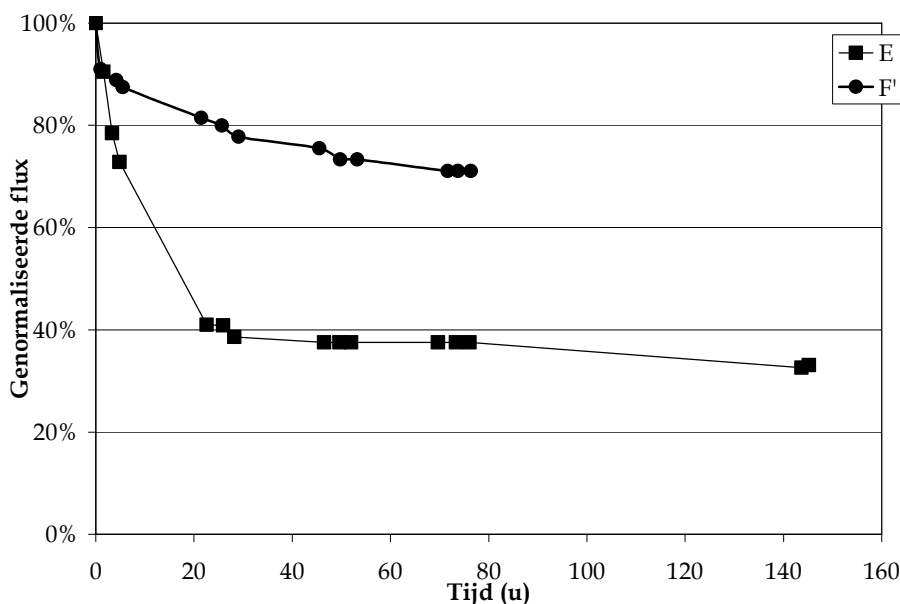
Grafiek 3.5-1 Genormaliseerde flux van Weesperkarspel

3.5.1.3 Spannenburg met voorfilter

Het fluxdalingsverloop van Spannenburg is vergelijkbaar met dat van Weesperkarspel. Het watertype van voor ontharding (E) vertoont wel een meer stabiele fluxdaling, maar de fluxdaling bedraagt meer dan 60%. Dit wijst erop dat het water van Spannenburg meer fouling veroorzaakt dan dat van Weesperkarspel.

Meestal wordt grondwater gebruikt omdat het gemakkelijker te behandelen is dan oppervlaktewater. Hier is dit niet het geval. Dit is te wijten aan de voorbehandeling (coagulatie) die het water van Weesperkarspel heeft ondergaan in Loenderveen. Dit wordt later verder besproken na de karakterisatie van de membranen.

Het effect van ontharding, besproken in vorige paragraaf, wordt hier bevestigd. De fluxdaling verminderd van 60% naar 30%.

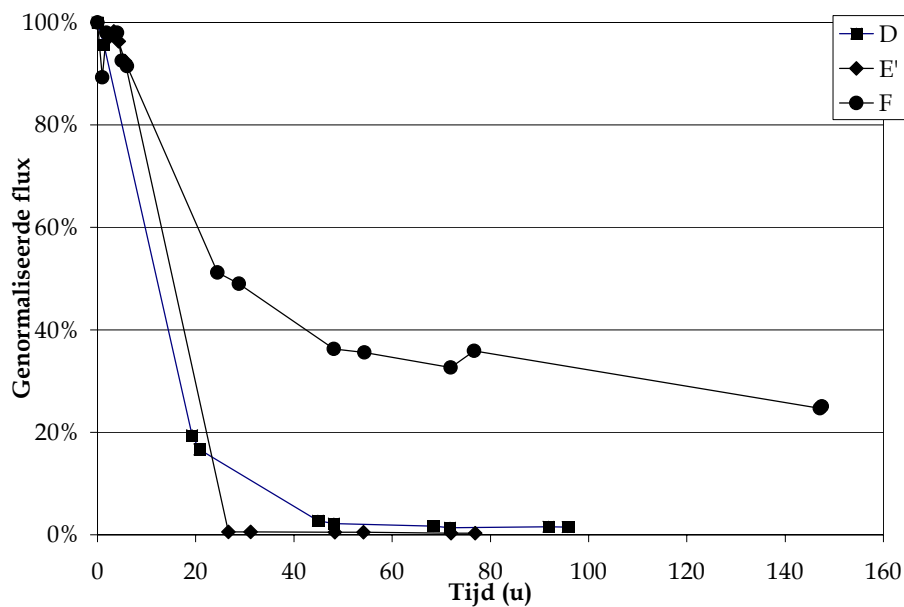


Grafiek 3.5-2 Genormaliseerde flux van Spannenburg met voorfilter

3.5.1.4 Spannenburg zonder voorfilter

Wanneer geen voorfilter wordt gebruikt is de fluxdaling zeer groot. De flux daalt na ongeveer één dag naar nul (D en E'). Dit wijst op een foulinglaag die de poriën volledig blokkeert. De foulinglaag is zo dens en stevig dat ze geen water doorlaat.

Blijkbaar heeft pellet-ontharding een positieve invloed op de fouling (F). De fluxdaling van F geeft immers een normaler verloop. Toch is deze daling veel groter, vergeleken met dezelfde proef bij gebruik van een voorfilter.



Grafiek 3.5-3 Fluxverlopen van Spannenburg zonder voorfilter

3.6 Karakterisering van de membranen

3.6.1 Kalibratiecurve

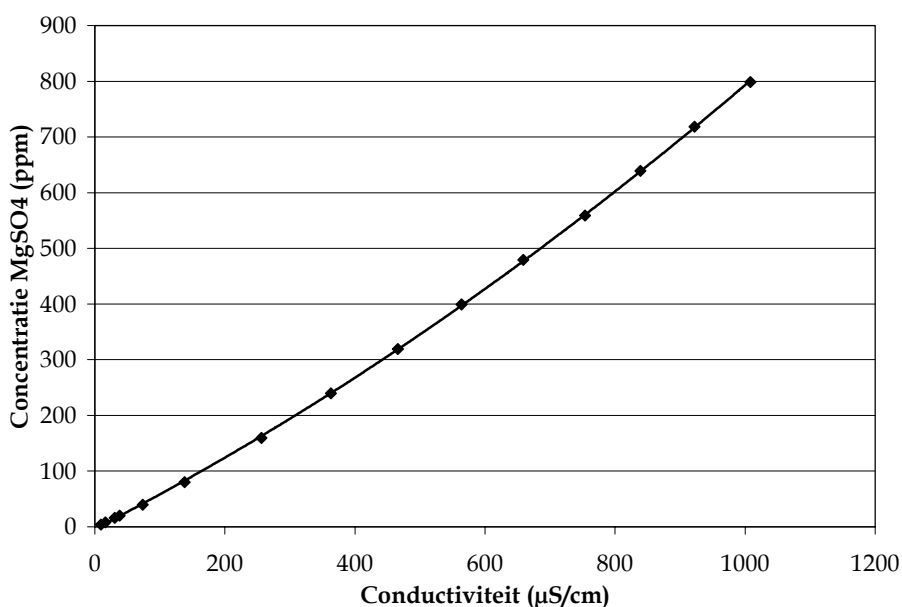
Om de retentie te berekenen moeten de MgSO_4 -concentraties van voeding en permeaat gekend zijn. Daarom is er eerst een kalibratiecurve opgesteld. Deze curve geeft het verband tussen de conductiviteit en de MgSO_4 -concentratie. De conductiviteit is telkens opgemeten met een conductiviteitsmeter om de concentratie van voeding en permeaat te kunnen bepalen.

Grafiek 3.6-1 is opgesteld door de conductiviteit van verschillende concentraties MgSO_4 op te meten. Alle oplossingen zijn bereid met MilliQ-water, zodat de conductiviteit alleen maar van het MgSO_4 afkomstig kan zijn.

Gebruik makende van Excel werd volgende benaderende tweedegraadsvergelijking voor de standaardisatie bekomen:

$$y = 0,0002 x^2 + 0,5996 x - 3,5829$$

Deze vergelijking wordt gebruikt bij de karakterisering van het membraan. Door de conductiviteit in te vullen in bovenstaande formule kan de MgSO_4 -concentratie berekend worden. Met behulp van de concentraties van voeding en permeaat kan dan de retentie van MgSO_4 bepaald worden.



Grafiek 3.6-1 Kalibratiecurve voor MgSO_4

3.6.2 Retentie

Tabel 3.6-1 toont de retenties bepaald door karakterisering voor en na de fluxexperimenten. De karakterisering gebeurde bij 2,5 bar en 20 °C. De MgSO_4 -concentratie werd bepaald met behulp van de kalibratiecurve voor de conductiviteit van MgSO_4 .

Tabel 3.6-2 toont de gemiddelde retentie voor de non-fouling membranen. Voor de berekening van deze waarde is de retentie van C niet meegerekend vanwege de opvallend lage waarde, mogelijk te wijten aan een foutieve meting van de conductiviteit. De gemeten gemiddelde retentie ($95,9 \pm 1,4\%$) ligt in de buurt van de minimum retentie (97%), geleverd door de fabrikant (Trisep), zoals opgenomen in Bijlage XIII :

De gemeten verschillen zijn weinig significant. De gemeten waarden hebben een te lage nauwkeurigheid om besluiten te kunnen trekken uit de verschillen. Dit is voornamelijk te wijten aan de lage MgSO_4 -concentratie van het permeaat. Het gebruik van hogere concentraties is dus aangewezen.

Tabel 3.6-1 Retenties bepaald uit karakterisatie

	R begin	R einde	R verschil
	%	%	%
A	96,4	97,7	1,3
A'	97,0	97,4	0,4
B	95,4	93,0	-2,4
B'	95,1	96,9	1,8
C	83,9	99,5	15,6
D	98,5		
E	91,9	87,9	-4,0
E'	97,1		
F	95,7	97,8	2,1

Tabel 3.6-2 Gemiddelde retentie van de ongebruikte membranen

R membraan	%
gemiddelde	95,9
gemiddelde afwijking	1,4

3.6.3 Wateroverdrachtscoëfficiënt (Kw)

NOM-fouling van een membraan veroorzaakt een daling van de Kw-waarde. Deze waarde is evenredig met de fluxdaling. De Kw-waarde daling is voor elke proef anders en varieert voor de experimenten waarbij geen ijzerhydroxidefouling voorkwam tussen $12 \cdot 10^{-8} \text{ m/(s.bar)}$ en $94 \cdot 10^{-8} \text{ m/(s.bar)}$. Bij de membranen waarbij ijzerhydroxidefouling voorkwam was de flux verwaarloosbaar.

De gemiddelde Kw-waarde van het membraan bedraagt $(175 \pm 13) \cdot 10^{-8} \text{ m/(s.bar)}$. Deze waarde is niet te vinden in productspecificaties van de fabrikant en kon daarom niet vergeleken worden.

Tabel 3.6-3 Kw-waarden bepaald uit de karakterisaties

	Kw begin m/(s.bar)	Kw einde m/(s.bar)	Kw verschil %
A	$172 \cdot 10^{-8}$	$118 \cdot 10^{-8}$	-32%
A'	$183 \cdot 10^{-8}$	$166 \cdot 10^{-8}$	-9%
B	$156 \cdot 10^{-8}$	$81 \cdot 10^{-8}$	-48%
B'	$187 \cdot 10^{-8}$	$73 \cdot 10^{-8}$	-61%
C	$160 \cdot 10^{-8}$	$148 \cdot 10^{-8}$	-8%
D	$152 \cdot 10^{-8}$	~0	-100%
E	$191 \cdot 10^{-8}$	$97 \cdot 10^{-8}$	-49%
E'	$182 \cdot 10^{-8}$	~0	-100%
F	$193 \cdot 10^{-8}$	$85 \cdot 10^{-8}$	-56%

Tabel 3.6-4 Gemiddelde Kw-waarde van de propere membranen

Kw membraan	m/(s*bar)
gemiddelde	$175 \cdot 10^{-8}$
gemiddelde afwijking	$13 \cdot 10^{-8}$

3.7 Membranen

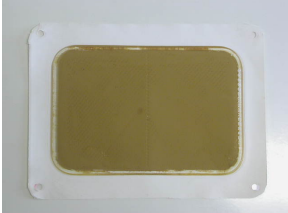
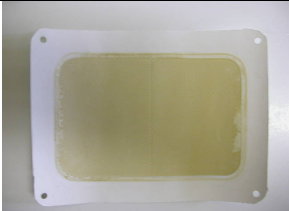
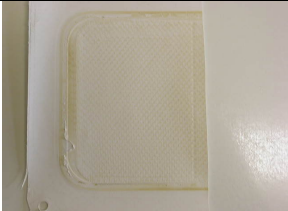
Onderstaande foto's geven een visueel beeld van de vervuiling op het membraan voor en na de experimenten op de verschillende waters.

3.7.1 Ongebruikt membraan

Proper



3.7.2 Vervuilde membranen

Weesperkarspel A		Weesperkarspel A'		Spannenburg D	
					
Weesperkarspel B	Weesperkarspel B'	Spannenburg E		Spannenburg E'	
					
Weesperkarspel C		Spannenburg F			
					

Een ongebruikt membraan heeft een witte kleur. Op de membranen van Weesperkarspel is een geelbruine foulinglaag te zien. Dit duidt op de aanwezigheid van NOM.

De membranen van Spannenburg waarbij geen voorfilter gebruikt werd hebben een roodbruine foulinglaag. Wanneer een voorfilter gebruikt wordt heeft de foulinglaag van E dezelfde kleur als die van Weesperkarspel. De foulinglaag na ontharding (F) was ook niet zo stevig als bij D' en E. Ze was veel korreliger en ze kon bijna met de hand verwijderd worden.

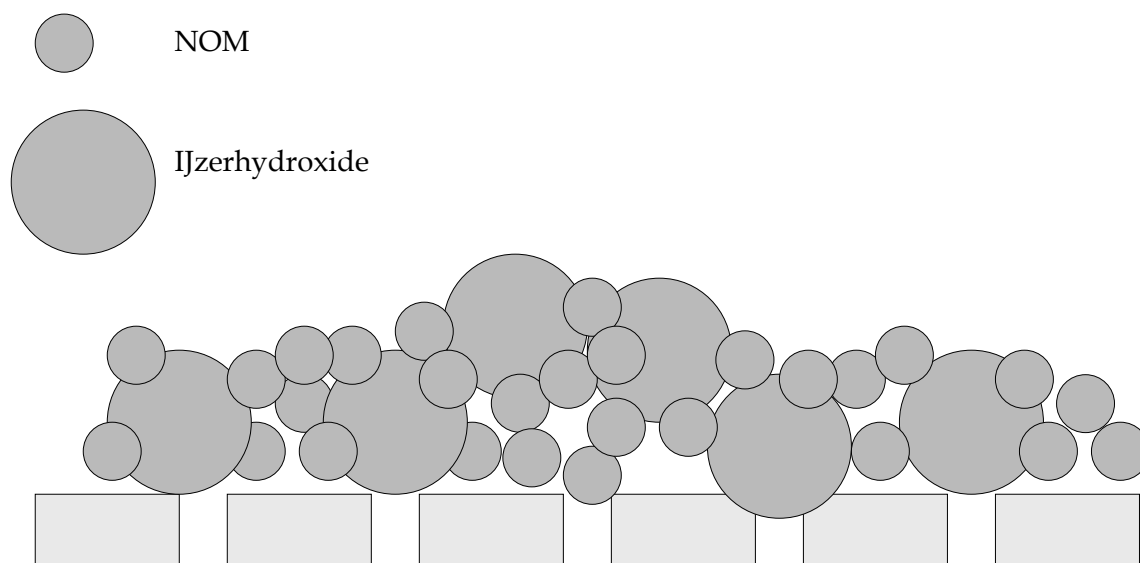
3.8 Verklaring voor de fouling van Spannenburg

Er is een vermoeden dat de extreme fouling van Spannenburg zonder voorfilter te wijten is aan ijzerhydroxidefouling. Driewaardige ijzerhydroxiden ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) hebben een roodbruine kleur. Dezelfde kleur is visueel waargenomen op het membraan. Daarbij staan driewaardige ionen, en voornamelijk ijzer, bekend om hun coagulerende werking. Driewaardig ijzer wordt ook gebruikt bij flocculatie, meer bepaald bij “sweep flocc”. Bij deze techniek wordt niet alleen de lading van het NOM geneutraliseerd, maar wordt het NOM ook ingesloten in ijzerhydroxidevlokken.

Het water van Spannenburg is grondwater met een hoge concentratie aan opgelost ijzer (Fe^{2+}). Wanneer dit ijzer belucht wordt zullen in het heldere water na enige tijd roestbruine partikels verschijnen. De zuurstof zorgt ervoor dat ijzer oxideert tot Fe^{3+} . In niet zure waters zal dan, bij overschrijding van het oplosbaarheidproduct, ijzerhydroxide gevormd worden. Vlokken van ijzerhydroxiden zijn zichtbaar in het water als roestbruine partikels. Deze partikels kunnen verwijderd worden met een voorfilter.

Vermoedelijk is deze foulinglaag gevolg van gewone NOM-fouling op het membraan. Hierna zullen ijzerhydroxidevlokken zich hechten op deze NOM-foulinglaag. Het ijzerhydroxide zal ervoor zorgen dat de lading van het NOM volledig geneutraliseerd wordt en dat de foulinglaag een sterk netwerk vormt. Hierdoor ontstaat een zeer sterk gebonden hydrofobe foulinglaag die blijkbaar zo dicht is dat er geen water door de foulinglaag kan.

Ijzerhydroxidefouling is zeer hardnekkig. Daarom moet er steeds een voorfilter gebruikt worden indien ijzerhoudend grondwater behandeld wordt met NF.



Figuur 3.8-1 Fouling door ijzerpartikels en NOM

4 Contacthoekmetingen

4.1 Doelstelling en aanpak

Membraanfouling wordt voornamelijk veroorzaakt door adsorptie van hydrofobe componenten op het membraanoppervlak (zie § 2.3.3.1). De hydrofobiciteit van een membraan zou misschien een indicator kunnen zijn voor de aanwezigheid en de mate van vervuiling. De hydrofobiciteit van een oppervlak kan bepaald worden door contacthoekmeting.

Er bestaan twee methodes om de contacthoek van een oppervlak te bepalen. De eerste methode karakteriseert de vorm van een vloeistofdruppel op een droog oppervlak en wordt de “sessile drop” methode genoemd. De tweede methode karakteriseert de vorm van een luchtbel onder een in water gedompeld oppervlak en wordt de “captive-bubble” methode genoemd.

De vorm van de gasbel of van de vloeistofdruppel wordt bepaald door interacties tussen gas, vloeistof en het vaste oppervlak. Indien steeds hetzelfde gas en vloeistof worden gebruikt zal de contacthoek uitsluitend afhankelijk zijn van het oppervlak. In de meeste gevallen wordt er gebruik gemaakt van gedemineraliseerd water en lucht.

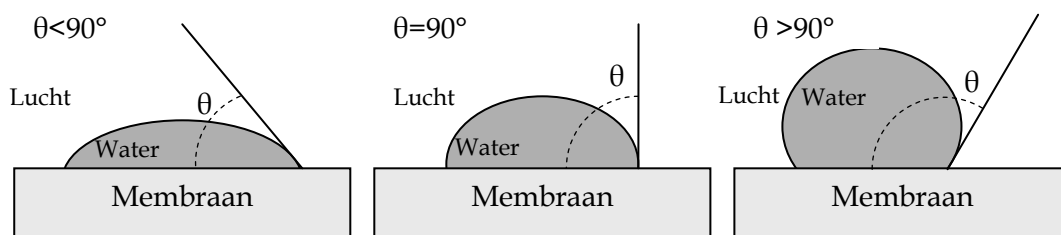
De contacthoek zal bij alle gebruikte membranen gemeten worden, zowel met de captive bubble als met de sessile-drop methode. Er zullen ook op ongebruikte membranen metingen uitgevoerd worden om het effect van fouling aan te tonen. Voor de visualisatie van de druppel wordt gekozen voor een projectiemethode en een directe methode.

Deze experimenten hebben het doel om na te gaan of er aanzienlijke verschillen zijn tussen vervuilde en niet vervuilde membranen. Vervolgens zal bepaald worden welke methode en welke opstelling de beste resultaten oplevert.

4.2 Principe

4.2.1 Sessile drop

De contacthoek (θ) volgens de sessile drop methode is de hoek gevormd door de vloeistof aan de grens waar de vloeistof, het vaste oppervlak en het omgevende gas samenkomen.

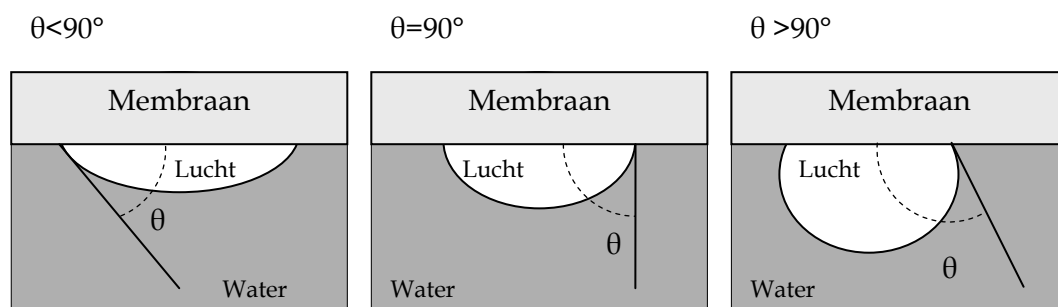


Figuur 4.2-1: Meting van de contacthoek met de sessile drop methode

Een druppel op een hydrofiel oppervlak krijgt een vlakke vorm en een kleine contacthoek. Op hydrofobe oppervlakken zal een druppel boller staan en bijgevolg een grotere contacthoek hebben.

4.2.2 Captive bubble

De contacthoek volgens de captive bubble methode is de hoek gevormd door lucht aan de grens waar de gasbel, het vaste oppervlak en de omgevende vloeistof samenkomen.



Figuur 4.2-2: Meting van de contacthoek met de captive bubble methode

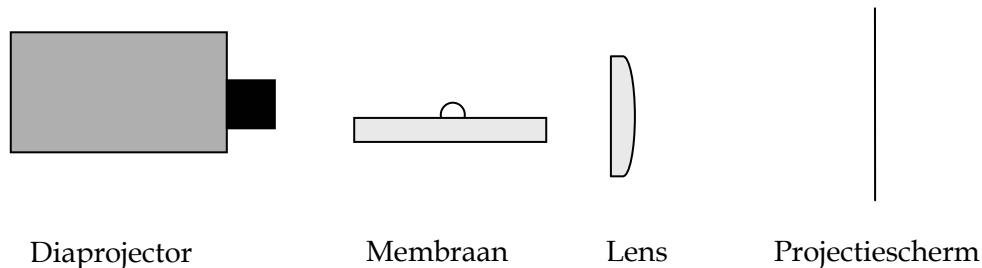
Een luchtbel onder een hydrofiel oppervlak krijgt een bolle vorm en een grote contacthoek. Op hydrofobe oppervlakken zal de luchtbel vlakker zijn en een kleinere contacthoek hebben.

Het voordeel van de captive bubble methode ten opzichte van de sessile drop methode is dat het totale oppervlak gehydrateerd wordt. Bij de sessile drop methode kan het water van de druppel doordringen in het oppervlak, met als gevolg dat na enige tijd de contacthoek veranderd vanwege een vochtiger oppervlak. [Roudman A.R. & DiGiano F.A., 2000]

4.3 Opstelling en uitvoering

4.3.1 Sessile drop

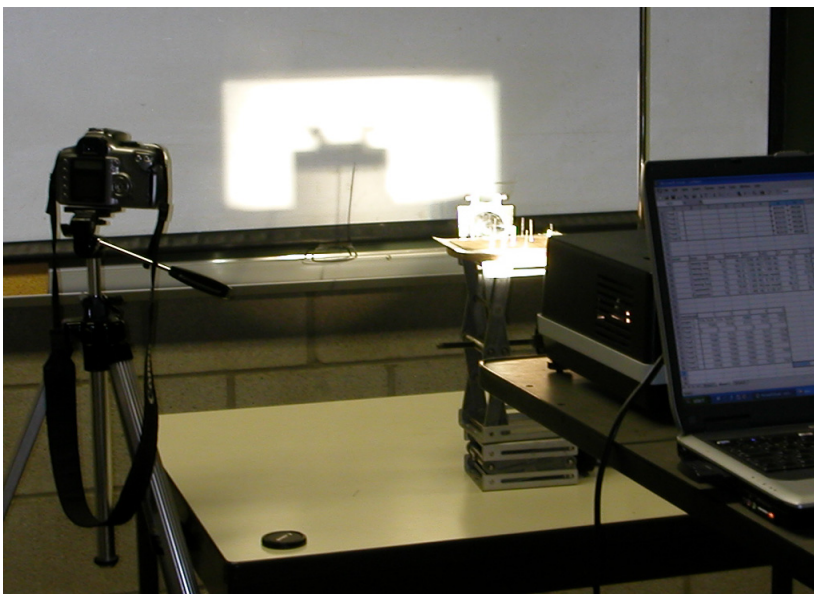
Voor de sessile drop methode werd er gekozen voor een opstelling met een lenzensysteem. De projectie van de schaduw van de druppel op het membraanoppervlak werd verkregen met behulp van een diaprojector en een lens. (Figuur 4.3-1)



Figuur 4.3-1: Schematische voorstelling van de sessile drop methode

Met een digitaal fototoestel werd een opname van deze projectie gemaakt. Met deze opname kon de raaklijn aan de druppel worden getekend en werd de contacthoek bepaald. Dit gebeurde voor beide kanten van de druppel, waardoor elke geprojecteerde druppel twee contacthoeken opleverde.

Deze proef werd toegepast op alle gebruikte en twee ongebruikte membranen. Per membraan werden er telkens 5 druppels geprojecteerd om de statistische nauwkeurigheid van de resultaten te vergroten.



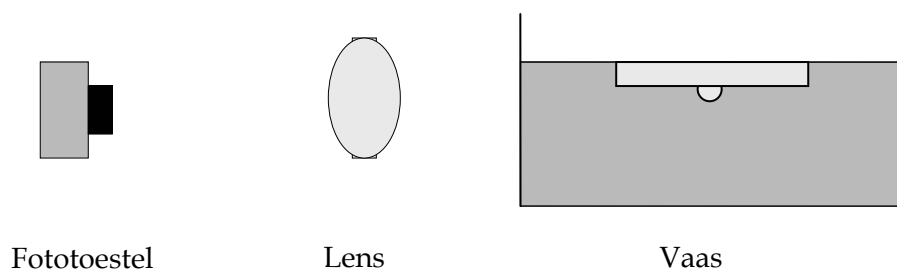
Figuur 4.3-2: Gebruikte opstelling

4.3.2 Captive bubble

Voor de captive bubble methode werd er gekozen voor een directe methode. Er werd rechtstreeks een foto genomen van de druppel. Dit gebeurt met behulp van een digitale camera, een vergrootglas en een vierkante glazen houder.

Het te onderzoeken oppervlak werd onder water gehouden in MilliQ-water, met de actieve zijde van het membraan naar beneden gericht. Doordat het membraan bleef drijven op het water moest het niet bevestigd worden. Daarna werd met behulp van een U-vormige injectienaald een luchtbel onder het oppervlak aangebracht en werd de luchtbel gefotografeerd. Met deze foto's werden de contacthoeken gemeten zoals bij de vorige methode. Net zoals bij de sessile drop methode werd de proef telkens 5 maal herhaald.

De lens werd gebruikt om een eerste vergroting van de luchtbel te verkrijgen. De camera bleek ook minder moeite te hebben om juist te focussen wanneer de lens werd gebruikt.



Figuur 4.3-3: Schematische voorstelling van de captive bubble methode

4.4 Opmerkingen

4.4.1 Sessile drop

De metingen werden niet alleen uitgevoerd op alle gebruikte membranen, maar ook op 2 ongebruikte. De vervuilde membranen van Spannenburg bleken nutteloos te zijn voor contacthoekmeting met de sessile drop methode. Druppels op de membranen, vervuild door water van Spannenburg, werden meteen opgezogen door de ijzerhydroxide-foulinglaag (Figuur 4.4-1). Dit principe werd besproken in § 4.2.2.

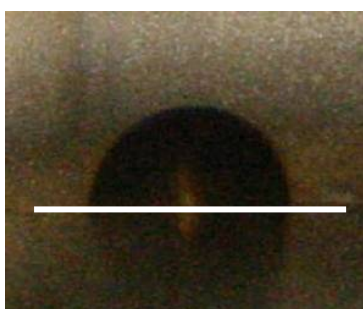


Figuur 4.4-1: Waterdruppels op Spannenburg-fouling

De membranen die vervuild werden door water van Weesperkarspel (Figuur 4.4-2) leverden geen problemen op met het opzuigen van het water. De projecties van deze druppels leverden beelden op zoals Figuur 4.4-3.



Figuur 4.4-2: Waterdruppels op Weesperkarspel-fouling



Figuur 4.4-3: Projectie van een druppel

4.4.2 Captive bubble

De contacthoekmetingen werden uitgevoerd met zowel het water van Weesperkarspel als met het water van Spannenburg.

Het uitvoeren van de captive bubble methode is omslachtiger dan een sessile drop methode. Het is ook moeilijker om een druppel stil te krijgen en tegelijk te fotograferen. De captive bubble methode kan best door twee personen uitgevoerd worden. De sessile drop methode laat toe om de proef alleen uit te voeren.

De druppelopnames met een digitaal fototoestel (Figuur 4.4-4) waren na enige oefening eenvoudig uit te voeren. Deze methode is minder omslachtig dan projectie. Daarom is het raadzaam om toekomstige experimenten met directe foto-opname uit te voeren.

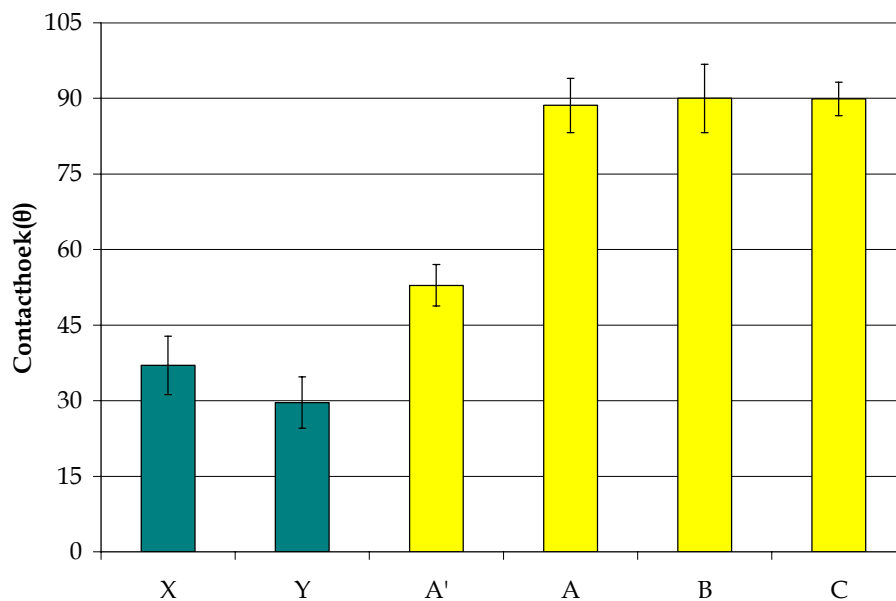


Figuur 4.4-4: Opname van een druppel met captive bubble methode

4.5 Bespreking en conclusies

4.5.1 Sessile drop

Zoals blijkt uit Grafiek 4.5-1 hebben de ongebruikte membranen (X en Y) een contacthoek van ongeveer 30°. De vervuilde membranen vertonen voor de drie types een gelijke contacthoek van ongeveer 90°. Type A'-water heeft in principe minder fouling vanwege de kortere tijd dat de proef heeft gewerkt. Dit is te merken aan de lagere contacthoek van ongeveer 50°.



Grafiek 4.5-1: Contacthoek van de verschillende membranen (sessile drop)

De stijging van de contacthoek toont aan dat de fouling van hydrofobe aard is. De mogelijke oorzaken zijn adsorptie van humus, BB, HOC en PS.

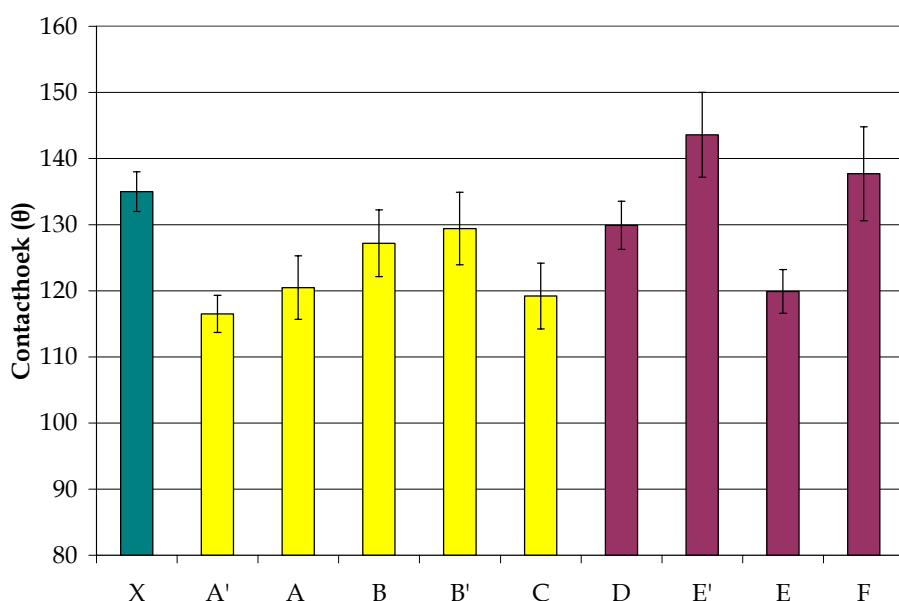
Er is een duidelijk verschil in contacthoek tussen een fouling- en een non-fouling membraan. Een mindere fouling van hetzelfde watertype geeft zelfs een tussenwaarde. Dit wijst op een verband tussen de contacthoek en de hoeveelheid fouling. Dit zal echter nog verder onderzocht moeten worden.

De contacthoeken van de gebruikte membranen blijken bijna identiek te zijn, ongeacht de behandeling die het water ondergaan heeft. Met deze kwalitatieve methode is het bijgevolg niet mogelijk om een mogelijke wijziging in het karakter van de fouling-laag te verifiëren.

4.5.2 Captive bubble

Grafiek 4.5-2 toont de resultaten van de captive bubble methode. De membranen van Weesperkarspel hebben een kleinere contacthoek dan de propere membranen (X). Bijgevolg hebben deze membranen een hogere hydrofobiciteit. Proef E is de enige proef van Spannenburg met voorfilter waarvoor de contacthoek bepaald werd. Deze waarde is vergelijkbaar met die van Weesperkarspel. De membranen die door ijzerhydroxide vervuild zijn hebben zeer verschillende waarden. Toch kan hier gesteld worden dat deze membranen een minder grote hydrofobiciteit hebben.

De gemeten verschillen zijn echter veel te klein om deftige conclusies te kunnen trekken.



Grafiek 4.5-2: Contacthoek van de verschillende membranen (captive bubble)

In het algemeen kan over deze beide methodes geconcludeerd worden dat ze voor verder gebruik bij het analyseren van de fouling-laag bij NOM-vervuiling, ondanks hun eenvoud, geen bijkomende meerwaarde opleveren t.o.v. de andere analysemethoden. De resultaten zijn te kwalitatief om verregaande conclusies te kunnen trekken. In het kader van dit eindwerk waren de uitgevoerde proeven echter wel interessant om op een visuele, praktische en eenvoudige manier een eerste indicatie te bekomen.

5 Analyse van voeding en permeaat

5.1 Doelstelling en aanpak

Op basis van de fluxexperimenten konden reeds voorlopige conclusies geformuleerd worden aangaande de invloed van NOM-vervuiling op het fluxgedrag, de aard van de foulinglaag en de invloed van de aard van de voorbehandeling. Hierbij is gebleken dat de NOM-foulinglaag wellicht een hydrofoob karakter heeft en dat de impact van de vervuiling toeneemt ten gevolge van de aanwezigheid van Ca-ionen.

De algemene doelstelling van dit hoofdstuk is nagaan of op basis van meer kwantitatieve analyses van de voedings- en permeaatstromen deze voorlopige conclusies kunnen geverifieerd worden en verder onderbouwd. Uit detailanalyses kan mogelijk afgeleid worden welke componenten uit NOM de belangrijkste rol spelen in het foulinggedrag.

Voor de analyses wordt in eerste instantie gebruik gemaakt van LC-OCD metingen op de voedings- en permeaatstromen. Op basis van de resultaten zal voor de verschillende componenten uit NOM hun SP-waarde berekend worden en dit voor zowel non-fouling als fouling membranen.

Tot slot werden excitatie-emissie fluorescentie bepalingen uitgevoerd. Hierbij is het de bedoeling om na te gaan in welke mate deze goedkopere en eenvoudigere techniek een mogelijk alternatief zijn voor de dure, complexe LC-OCD metingen.

5.2 LC-OCD

5.2.1 Beschrijving van de methode

5.2.1.1 *Inleiding*

LC-OCD (Liquid Chromatography – Organic Carbon Detection) is een vrij nieuwe analysetechniek die vaak bij onderzoek naar membranen wordt gebruikt. Het is een dure methode, maar ze levert zeer nauwkeurige resultaten.

Het NOM wordt eerst in fracties verdeeld door vloeistofchromatografie (LC of SEC). Daarna worden de concentraties van de verschillende fracties gemeten met een organische koolstof detector (OCD). Een UV-detector (254 nm) wordt in het systeem geïntegreerd voor informatie omtrent de aromaticiteit van de fracties.

De nauwkeurigheid van de metingen is 2 tot 10 ppb voor de TOC-meting en 5 tot 50 ppb voor de verschillende fracties. Deze hoge gevoeligheid laat toe om analyses van waters met zeer lage NOM-concentratie te maken. De monsters moeten ook niet voorgeconcentreerd worden.

De metingen werden uitgevoerd door DOC-Labor. Dit is een Duits commercieel laboratorium in Karlsruhe. DOC-Labor werd opgericht in 1995 door Dr. S. Huber en ontwikkelt sinds 1997 ook zelf LC-OCD systemen.

De monsters werden telkens in het begin en aan het einde van elk fluxexperiment genomen in speciaal geprepareerde 50 ml flesjes. Nadat ze gedurende 40 minuten tussen 60 en 80°C werden gepasteuriseerd werden de monsterflesjes in een koelbox gestuurd naar Duitsland. DOC-Labor bezorgde zowel de monsterflesjes als de koelbox.

5.2.1.2 Karakterisering

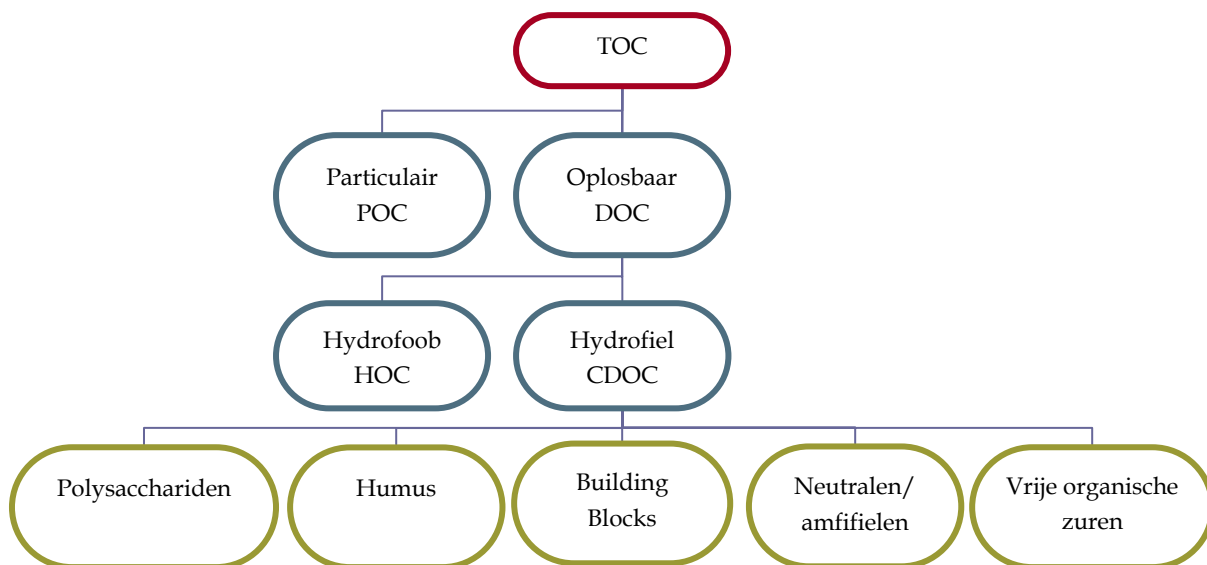
Allereerst wordt het TOC (total organic carbon) gemeten. Daarna wordt er een eerste scheiding gemaakt met behulp van een 0,45 µm-filter. Deze splits het TOC op in DOC (dissolved organic carbon) en POC (Particulate organic carbon). POC is de fractie die door de filter tegengehouden wordt. De POC-fractie wordt bepaald door het verschil te nemen tussen TOC en DOC.

Het oplosbare DOC kan zowel hydrofiel als hydrofoob zijn. De hydrofobe fractie wordt HOC (Hydrophobic Organic Carbon) genoemd en de hydrofiële fractie CDOC (Chromatographic DOC). Zoals de naam doet vermoeden is het CDOC de fractie die door de kolom van de chromatograaf beweegt. Het HOC blijft in de kolom en zal bij reiniging verwijderd worden. De hoeveelheid HOC wordt berekend door het verschil te berekenen tussen het DOC en het CDOC.

De hydrofiële fractie (CDOC) wordt daarna volgens molecuulgewicht verdeeld in 5 fracties. In volgorde van stijgende moleculaire massa zijn deze :

Tabel 5.2-1 Verdeling van de MM over de verschillende fracties

Fractie	Afkorting	MM
Vrije organische zuren	OZ	< 350
Neutralen en amfifielen	N/ A	< 350
Building blocks	BB	350 - 500
Humusmaterialen	Humics	500 - 1200
Polysacchariden	PS	> 10 000



Figuur 5.2-1 karakterisering volgens DOC-Labor

Tabel 5.2-2 Fracties bepaald door LC-OCD

Afkorting	Naam	Verklaring
TOC	totale organische koolstof	De totale hoeveelheid organische koolstof gemeten op het oorspronkelijke staal, nog voor het staal de chromatograafkolom is binnengedrongen.
DOC	oplosbare OC	De oplosbare fractie die doorheen een 0,45 µm-filter gaat.
POC	particulair OC	De fractie die wordt tegengehouden door de 0,45 µm-filter net voor het binnentreden van de kolom. Deze fractie wordt bepaald als het verschil tussen TOC en DOC
CDOC	chromatografeerbare oplosbare OC	De fractie die doorheen de chromatograafkolom gaat. Deze stoffen zijn meestal van hydrofiele oorsprong.
HOC	hydrofobe OC	De fractie die in de kolom blijft. Deze sterk hydrofobe fractie wordt bepaald als het verschil tussen DOC en CDOC. Hiertoe behoren voornamelijk lipiden.
PS	polysacchariden	Tot deze fractie behoren aminosuikers, polypeptiden en proteïnen met hoge MM
Humus	humuszuren	Humusmaterialen, voornamelijk polycarboxylzuren en gesubstitueerde fenolen
BB	building blocks	Oxidatieproducten van humus, voornamelijk polycarboxylzuren
N/A	neutrale en amfifielen	Kleine organische stoffen met zoals alcoholen, aldehyden, ketonen en aminozuren
OZ	vrije organische zuren	Laagmoleculaire zuren

Tabel 5.2-3 Nauwkeurigheid van LC-OCD

Chromatografische fracties	Detectielimiet (ppb)	Betrouwbaarheidsinterval (%)
TOC	1	5
HOC	50	11
Humus	20	2
BB	10	6
PS	2	5
N/A	5	5
OZ	5	10

5.2.1.3 Rapportering

A. Chromatogram en tabelvorm

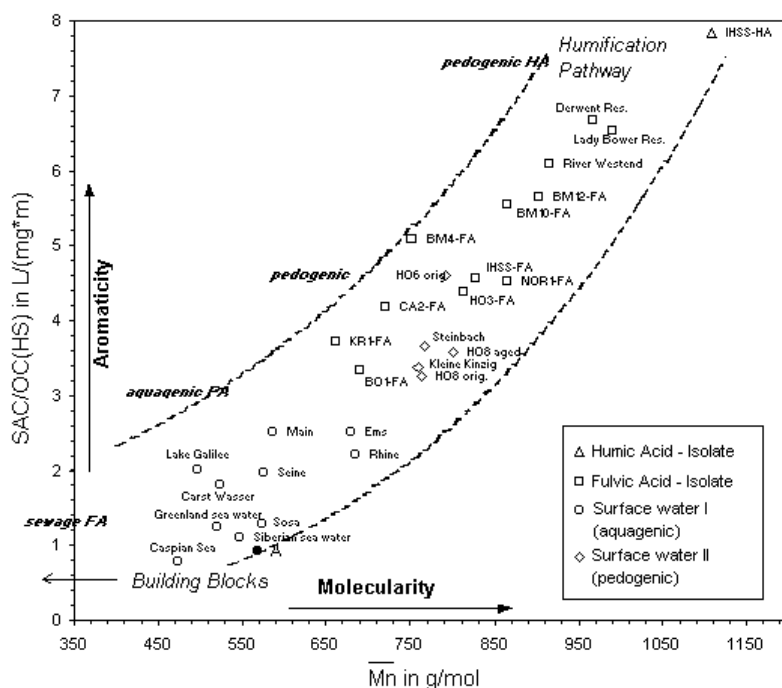
De resultaten worden verkregen in chromatogram-vorm, vergelijkbaar met Figuur 5.2-2. Dit is echter van illustratieve aard. Na bewerking van het chromatogram met de FIFFIKUS-software worden de werkelijke waarden in tabelvorm weergegeven. De resultaten worden gerapporteerd in ppb en in hun procentuele bijdrage aan het TOC.

B. HS-diagram

Zoals in vorig hoofdstuk besproken kunnen de humusmaterialen (HS) ingedeeld worden in humuszuren, fulvinezuren en humine. Dit verschil op basis van oplosbaarheid is echter te primitief voor de opgeloste humusmaterialen. Daarom maakt DOC-Labor gebruik van een HS-diagram. In een HS-diagram worden de gemiddelde molecuulmassa en de SAC (Spectraal absorptiecoëfficiënt bij 254nm gedeeld door de concentratie humus) van de humusfractie grafisch uitgezet.

Humuszuren bevinden zich rechtsboven en stellen de meer aromatische humusmaterialen voor. De fulvinezuren zijn afkomstig uit microbiologische activiteit en hebben hierdoor een lage aromaticiteit en molecuulmassa. Fulvinezuren bevinden zich daarom linksonder in het HS-diagram. Sinds NOM van grondwater wordt gekenmerkt door een hogere aromaticiteit en MM, zal grondwater zich rechtsboven in een HS-diagram situeren en oppervlaktewater linksonder

Het HS-diagram geeft dus voornamelijk de mate van humificering weer.



Figuur 5.2-2 HS-diagram

5.2.2 Voeding

5.2.2.1 Samenstelling

Tabel 5.2-4 geeft een algemeen overzicht van de voedingssamenstelling en andere eigenschappen van de verschillende gebruikte watertypes. De parameters die tijdens de verdere bespreking van belang zijn werden expliciet aangeduid.

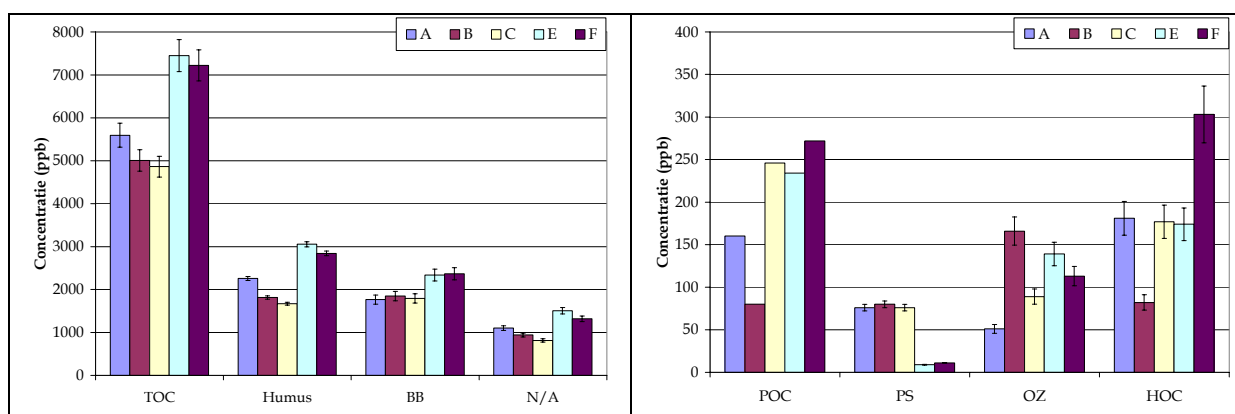
Met deze gegevens is het mogelijk om de invloeden van ozonisatie en ontharding op NOM aan te tonen.

Tabel 5.2-4 Samenstelling van bronnen

	Weesperkarspel			Spannenburg	
	A	B	C	E	F
pH	7,9	7,9	7,9	8,0	8,0
Conductiviteit ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	550	530	500	670	510
Calcium (mg/l)	77	76	47	105	27
Magnesium (mg/l)	6,5	6,5	6,1	13	9,7
TOC (ppb)	5594	5006	4861	7449	7222
DOC (ppb)	5433	4926	4615	7215	6951
POC (ppb)	160	80	246	234	272
Polysacchariden (ppb)	76	80	76	9	11
Humics (ppb)	2258	1813	1669	3053	2841
Building Blocks (ppb)	1765	1847	1793	2336	2366
Organische zuren (ppb)	51	166	89	139	113
Neutralen en amfifielen (ppb)	1103	938	811	1504	1317
HOC (ppb)	181	82	177	174	303
Moleculemassa humics (g/mol)	665	686	671	769	751
Aromaticiteit humics ($\text{l}/(\text{mg}\cdot\text{m})$)	2,52	3,08	2,12	3,24	3,22
SUVA ($\text{l}/(\text{mg}\cdot\text{m})$)	1,73	1,52	1,63	2,47	2,74

5.2.2.2 Absolute samenstelling

A. Gegevens



Grafiek 5.2-1 Concentraties van de verschillende fracties voor elke voeding

B. Vergelijking Spannenburg-Weesperkarspel

Grafiek 5.2-1 toont de concentratie van elke fractie. Uit deze tabel valt af te leiden dat het TOC van Weesperkarspel en Spannenburg sterk verschillen. De TOC waarde van Spannenburg ligt veel hoger dan die van Weesperkarspel. Dit is eigenlijk niet in overeenstemming met de literatuur. Het water van Spannenburg is immers grondwater en zou minder NOM bevatten dan het oppervlaktewater van Weesperkarspel. Dit concentratieverschil is te wijten aan het feit dat het water van Weesperkarspel voorbehandeld is geweest door coagulatie in Loenderveen.

Uitgaande van de concentratie van de humusfractie zal het water van Spannenburg meer fouling opleveren. Zie hiervoor § 2.3.3.4.

Alle componenten zijn in grotere concentratie aanwezig in het water van Spannenburg. De polysacchariden vormen de uitzondering op de regel. Polysacchariden zijn namelijk een product van microbiologische groei en zullen daarom in mindere mate voorkomen in het anaërobe grondwater.

Op basis van de concentratie van het TOC, en voornamelijk van humus en BB, kan gesteld worden dat het water van Weesperkarspel minder vervuiling en een kleinere fluxdaling zou moeten veroorzaken dan het water van Spannenburg.

C. Invloed van de behandelingsstappen

Zowel bij Weesperkarspel als bij Spannenburg daalt bij elke behandelingsstap het TOC-gehalte. Deze daling is te wijten aan de daling van humus en N/A.

De concentraties van polysacchariden en BB blijven constant bij de behandelingsstappen, en dit voor beide waters.

Na ozonisatie is er een stijging van de organische zuren (OZ). Dit is te wijten aan de oxidatie van N/A en BB en misschien ook van HOC. Voor beide watertypes werd er een daling van OZ waargenomen na ontharding.

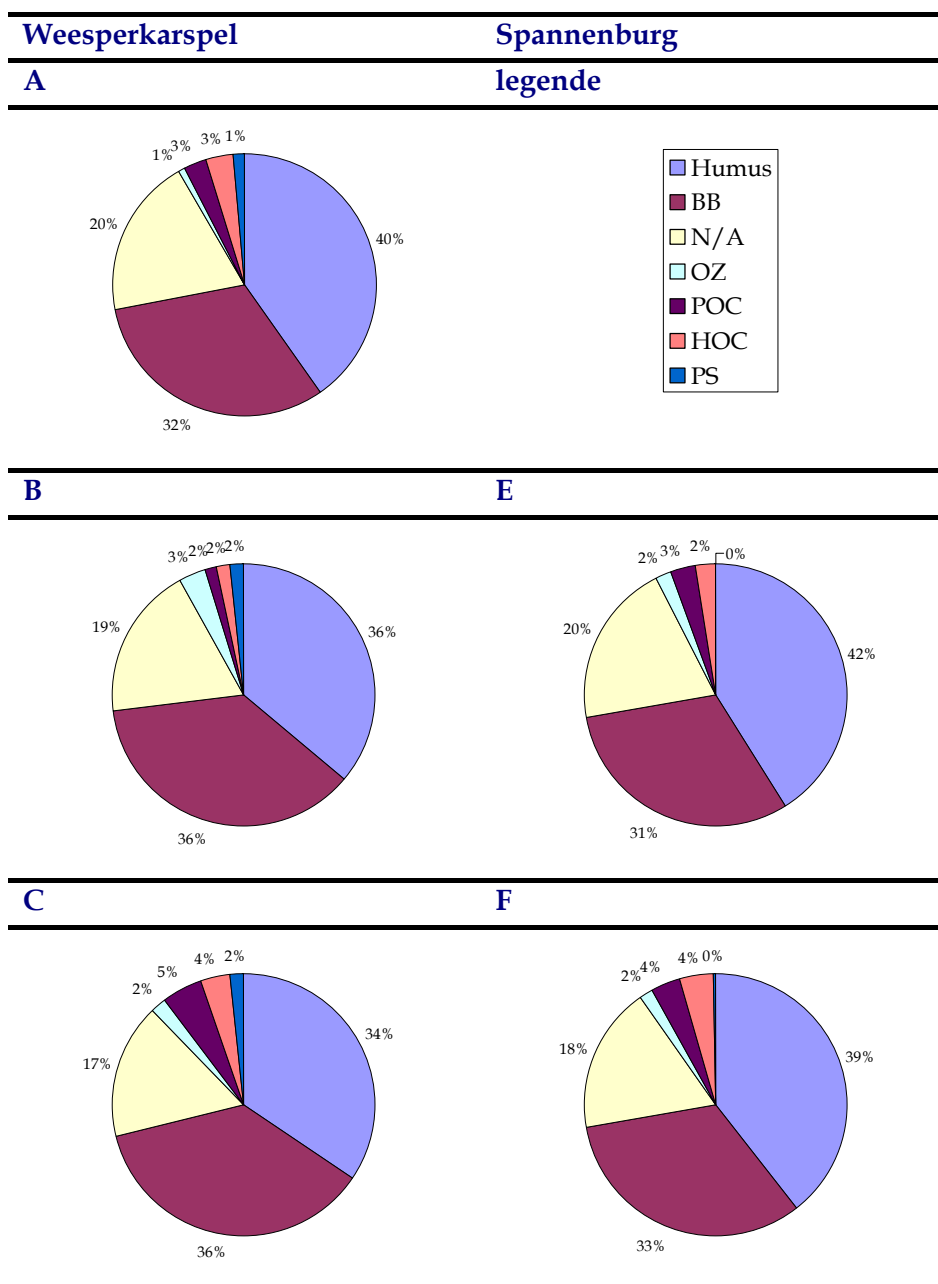
Over de concentratie HOC valt niet veel te vertellen omdat de waardes te sterk verschillen en er geen eenduidig verband is tussen de verschillende waardes. De oorzaak ligt hoogst waarschijnlijk aan de manier waarop HOC bepaald wordt. Hij wordt immers berekend als het verschil tussen DOC en CDOC en niet rechtstreeks opgemeten.

5.2.2.3 Relatieve samenstelling

Tabel 5.2-5 toont dat het aandeel dat elke fractie bijdraagt aan het totale NOM (%TOC) min of meer constant is voor de verschillende waters. Deze gelijkende samenstelling laat toe om beide watertypes met elkaar te vergelijken.

Verder kan gezegd worden dat het NOM voor ongeveer 70% bestaat uit humusmaterialen (BB en humus). De neutrale en amfifiele stoffen (N/A) vormen ook een belangrijke fractie.

Tabel 5.2-5 Samenstelling van de verschillende voedingen



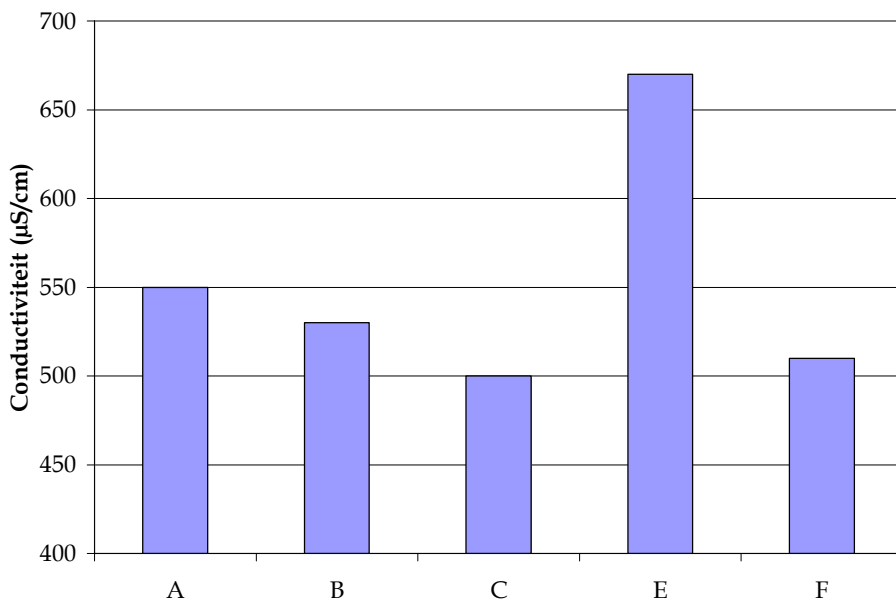
5.2.2.4 Hardheid van het water

De calciumconcentratie is een belangrijke component die fouling door NOM kan bevorderen. De calciumconcentratie ligt hoger bij Spannenburg dan bij Weesperkarspel omdat het hier gaat om grondwater (zie Tabel 5.2-4). Ozonisatie (B) heeft duidelijk geen invloed op de aanwezige Ca^{2+} . Ontharding (C en F) daarentegen heeft duidelijk wel invloed op de concentratie, die reeds besproken is in § 2.4.3. Het verschil in concentratiedaling bij Spannenburg en Weesperkarspel is merkbaar. Dit komt door het feit dat de dosering van natronloog veel hoger ligt bij Spannenburg dan bij Weesperkarspel (zie Tabel 5.2-6), en zal dus meer Ca^{2+} verwijderen.

Tabel 5.2-6 Verandering van hardheid na pellet-ontharding

	Ca^{2+}-daling (mg Ca/l)	NaOH dosering (g NaOH/m ³)
Weesperkarspel	29	37,5
Spannenburg	78	95

De hardheid van water heeft zijn gevolg in conductiviteit, bij een hogere ionenconcentratie zal de conductiviteit toenemen. Grafiek 5.2-2 geeft de conductiviteit weer van elke voeding apart. Hier is een duidelijk verband te zien tussen de concentratie Ca^{2+} en de conductiviteit. Na ontharding, wanneer de concentratie Ca^{2+} gedaald is, is er ook een daling in conductiviteit.

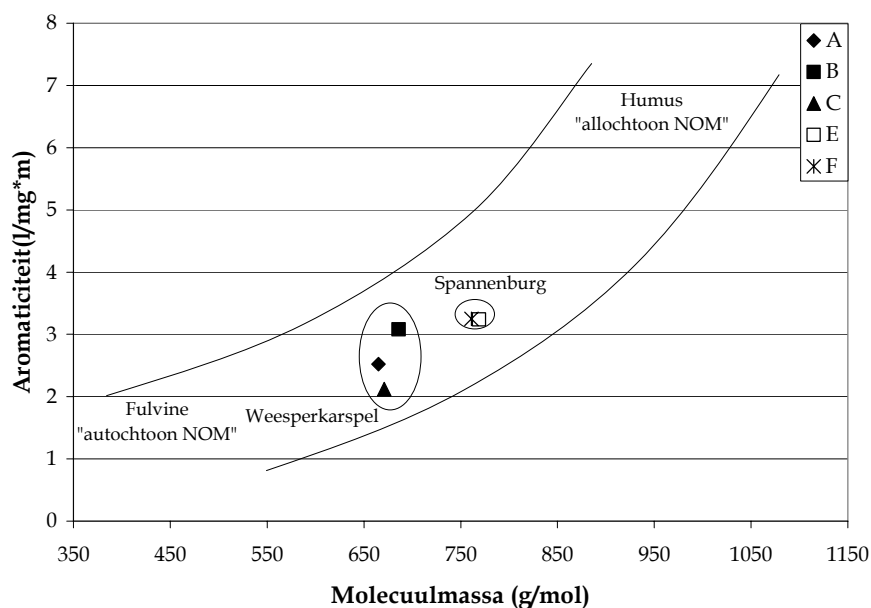


Grafiek 5.2-2 Conductiviteit van elk watertype

5.2.2.5 Eigenschappen van de humusfractie

De gegevens van de humusfractie, verkregen door LC-OCD, kan men in één grafiek zetten. Een HS-diagram is een voorstelling van de gemiddelde moleculaire massa en de SAC (Een SUVA-waarde voor de humusfractie) (Grafiek 5.2-3). In deze grafiek is te zien dat het humus van Spannenburg aromatischer is dan het humus van Weesperkarspel. De hogere SUVA waarde is te wijten aan het feit dat grondwater meer NOM afkomstig van hogere planten bevat. Oppervlaktewater bevat meer producten van bacteriën en micro-organismen.

Indien fouling te wijten zou zijn aan humus, zal het water van Spannenburg meer fouling veroorzaken dan het water van Weesperkarspel.



Grafiek 5.2-3 HS-diagram van de verschillende humusfracties

5.2.3 SP (Salt Passage)

5.2.3.1 Resultaten

De bespreking van de doorlaatbaarheid van het membraan voor de verschillende componenten uit NOM zal gebeuren gebruik makende van de eerder gedefinieerde SP-waarde, gebruik makende van de LC-OCD resultaten van de voedingsstromen en de permeaatstromen.

In dit deel wordt de SP besproken voor de verschillende componenten en dit bij de verschillende watertypes. Hoe hoger de SP voor een component, des te hoger de doorlaatbaarheid van het membraan voor deze component.

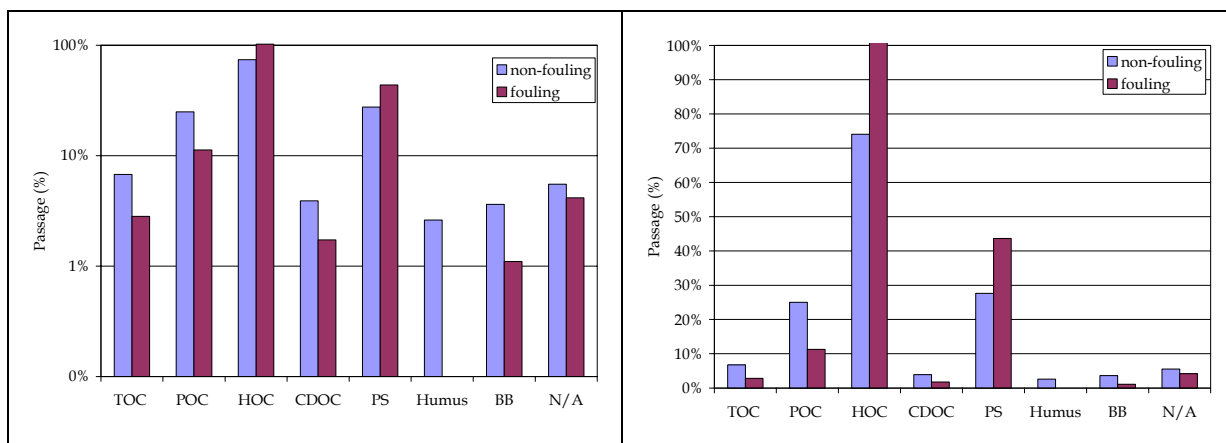
De SP kan beïnvloed worden door de foulinglaag van het membraan. Een foulinglaag kan de doorlaatbaarheid van bepaalde componenten beïnvloeden waardoor de SP meestal zal dalen, maar sporadisch ook een verhoging van de SP kan veroorzaken. Een stijging van de doorlaatbaarheid voor een bepaalde component kan hierbij toegeschreven worden aan een opconcentrering van deze component ter hoogte van het membraan met een betere diffusie tot gevolg. Indien de doorlaatbaarheid afneemt vormt de foulinglaag als het ware een bijkomend membraan met een densere structuur.

Er werd gekozen voor een lineaire en een logaritmische voorstelling. De gewone lineaire voorstelling toont het verschil tussen hoge en lage passages. De logaritmische voorstelling toont een kleiner verschil tussen grote en kleine waarden, terwijl kleine verschillen zichtbaar blijven.

Hierna worden de SP-waarden voor en na fouling uitgezet voor elk watertype apart. Na bespreking van de verschillende watertypes wordt er een algemeen besluit getrokken voor de verschillende watertypes.

5.2.3.2 Water afkomstig van Weesperkarspel

A. voor ozon (proef A)

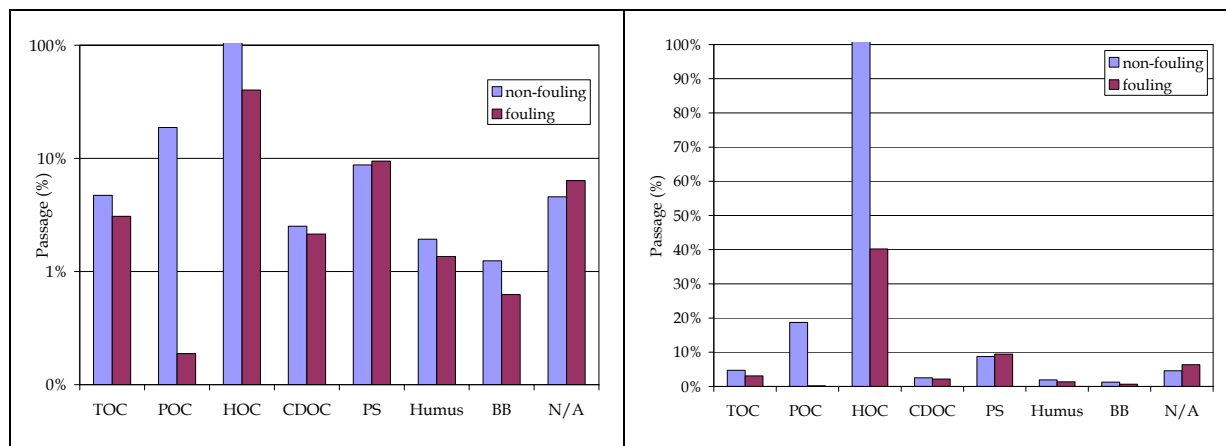


Grafiek 5.2-4: SP van proef A

In deze grafiek is te zien dat de SP van TOC daalt na fouling. Deze is een gevolg van de daling van verschillende componenten, zoals humus, BB, N/A en in mindere mate POC, die de grootste fractie van de totale TOC uitmaken.

Wat opvalt is de hoge SP van HOC en PS, die zelfs nog groter wordt na fouling. Deze waarden moeten wel gerelativeerd worden omdat het maar een heel kleine fractie is van het totale TOC en een kleine meetnauwkeurigheid heeft.

B. na ozon (proef B)



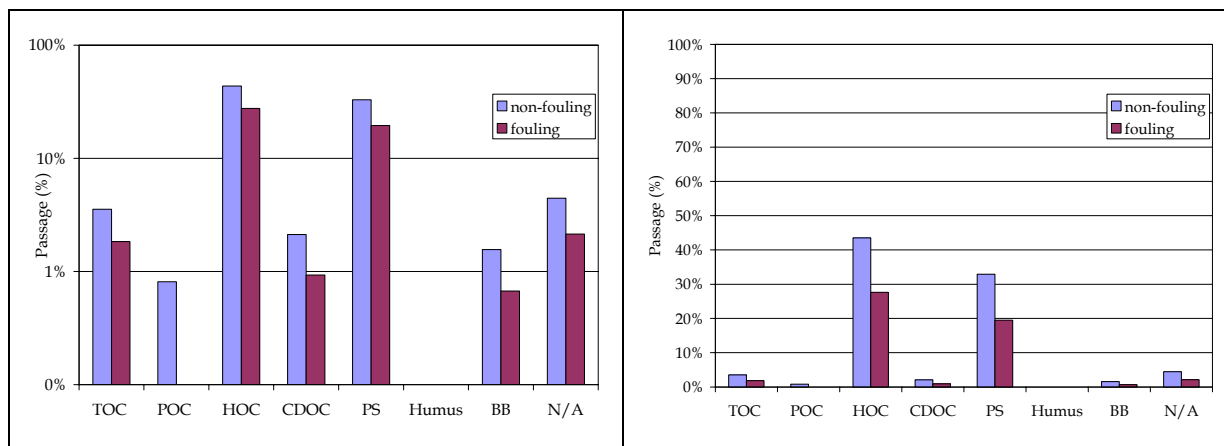
Grafiek 5.2-5: SP van proef B

De daling van SP van TOC na fouling is merkbaar, doordat de verschillende componenten humus, BB en POC deze daling ook vertonen.

De component HOC vertoont een SP van meer dan 100% voor vervuiling wat uiteraard niet mogelijk is. Dit is waarschijnlijk een gevolg van de reeds eerder besproken methode voor de bepaling van de HOC-concentratie.

De enige componenten die geen daling na vervuiling vertonen zijn de PS en N/A. De vastgestelde lichte stijging is verwaarloosbaar, zodat er eigenlijk kan van worden uitgegaan dat de SP constant blijft.

C. na ontharding (proef C)



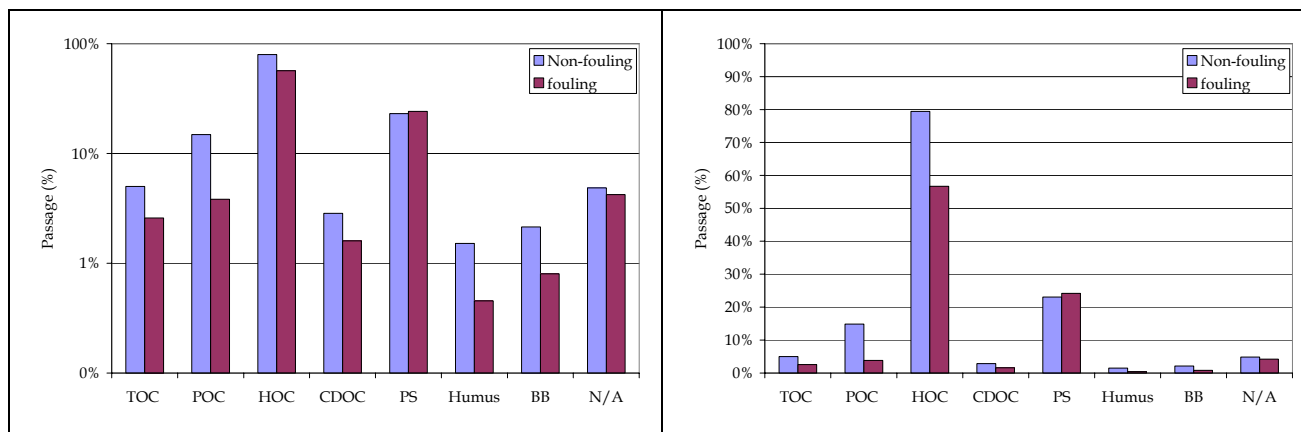
Grafiek 5.2-6: SP van proef C

Dit type water heeft zowel een ozonbehandeling als een ontharding gehad. Het vertoonde de kleinste fluxdaling tussen de verschillende waters van Weesperkarspel. (zie § 3.5)

In het algemeen ligt voor elke component de SP bij dit type water lager dan bij de andere types.

De SP van al de componenten daalt na vervuiling, wat wijst op een dense foulinglaag die meer componenten tegenhoudt.

D. Gemiddelde SP van Weesperkarspel



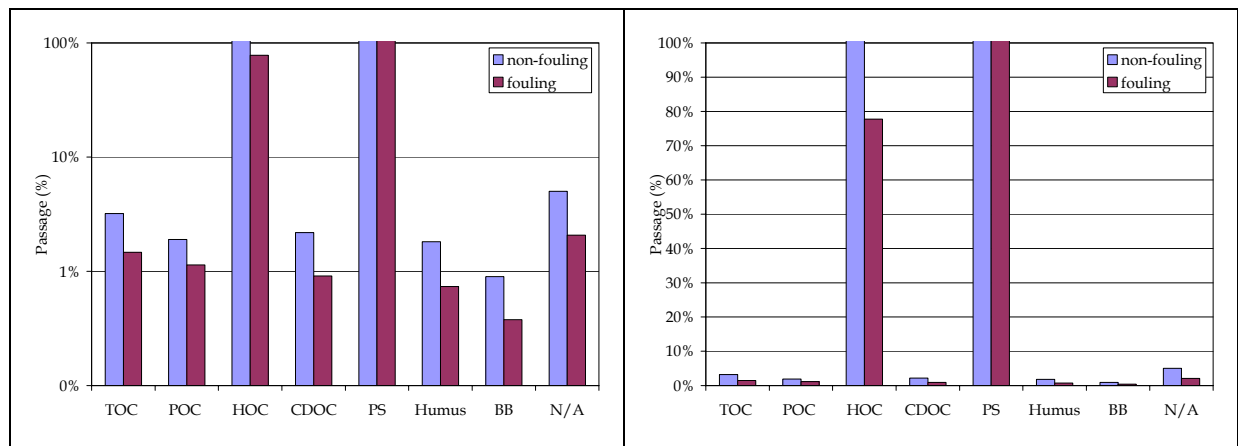
Grafiek 5.2-7: gemiddelde SP van proef A,B,C

Uit deze grafiek blijkt dat de SP daalt na fouling van het membraan. Dit wijst op het feit dat de foulinglaag een bijkomende hindernis vormt voor de doorlaatbaarheid van de verschillende componenten.

Wat opmerkelijk is, is de hoge SP voor HOC en PS. Wat wel verwonderlijk is omdat PS een hoge MM hebben. Hier wordt dan gesproken van "creeping", de kleinere PS kunnen door het membraan kruipen.

5.2.3.3 Water afkomstig van Spannenburg

A. voor ontharding (proef E)

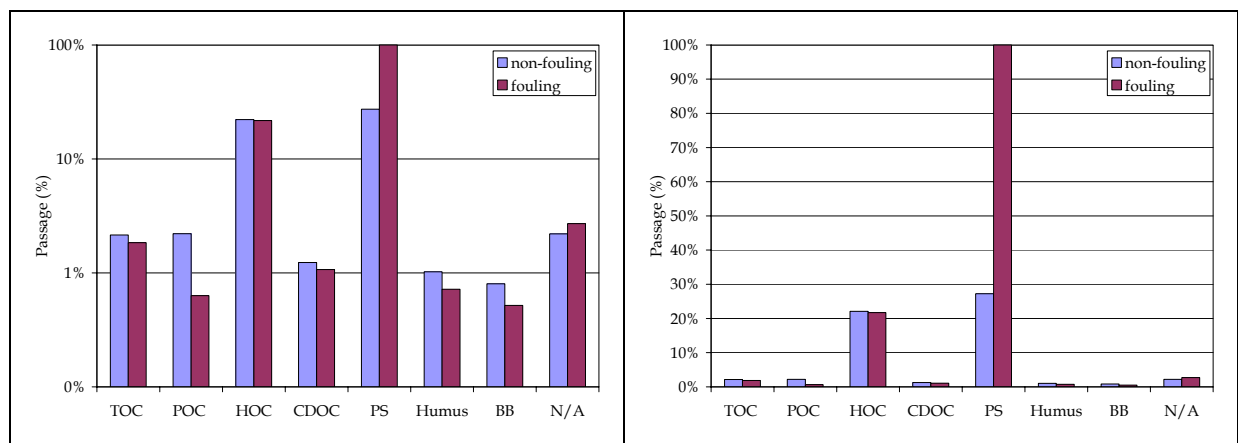


Grafiek 5.2-8: SP van proef E

Hier is steeds een daling van SP te zien, wat ook verwacht wordt. De foulinglaag vormt dus een extra barrière voor de verschillende componenten.

De componenten HOC en POC vertonen een SP van meer dan 100% wat onmogelijk is. Dit is wellicht te wijten aan een onnauwkeurige meting. Deze vertonen wel een SP daling na fouling wat in overeenstemming is met de andere componenten.

B. na ontharding (proef F)

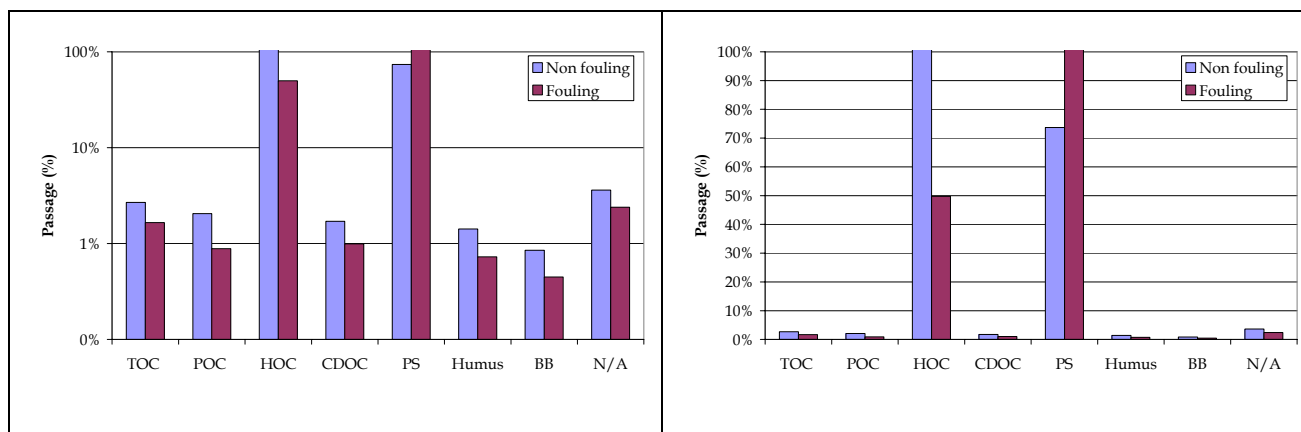


Grafiek 5.2-9: SP van proef F

In deze grafiek is te zien dat ook hier de SP daalt na fouling op enkele uitzonderingen na. De SP van HOC en PS liggen hier het hoogst wat erop wijst dat deze componenten deels door het membraan permeëren. Wat hoogst opmerkelijk is omdat PS een hoge MM hebben.

De componenten die een hogere SP vertonen na fouling zijn PS en de N/A. Bij HOC blijft de SP constant voor en na fouling. Dit is hoogst waarschijnlijk door een afwijking op de meting.

C. Gemiddelde SP van Spannenburg

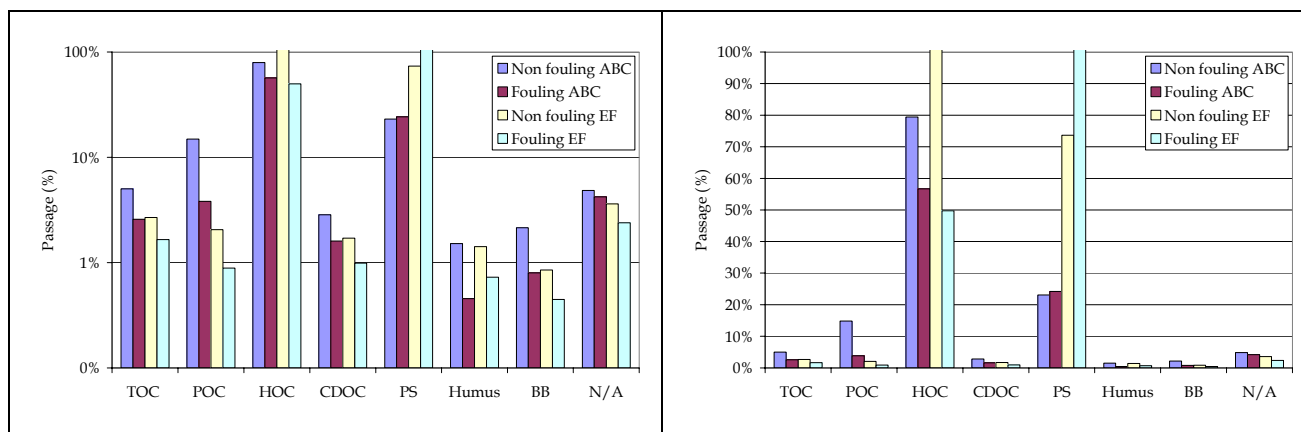


Grafiek 5.2-10: Gemiddelde SP van proef E,F

Deze grafiek geeft de gemiddelde SP weer van de verschillende componenten uit het water van Spannenburg. Hier is goed te zien dat er in het algemeen een daling is van de SP na fouling. De fouling zorgt dus voor een extra barrière voor de componenten. Enkel bij PS is dit niet zo, de SP stijgt zelfs tot boven 100% wat niet mogelijk is. Zoals reeds gezegd is dit waarschijnlijk te wijten aan de afwijking van de meting.

Wat hier wel opvalt is de hoge SP voor HOC en PS. Deze twee componenten zullen dus permeëren door het membraan.

5.2.3.4 Conclusie



Grafiek 5.2-11: gemiddelde SP van proef ABCEF

Uit deze grafiek is te zien dat de SP van TOC hoger ligt bij Weesperkarspel. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat er minder Ca^{2+} aanwezig is in het water waardoor er minder complexen gevormd worden. Deze complexen kunnen een compactere foulinglaag veroorzaken waardoor de SP kleiner is. (zie § 2.3.5.5)

De SP daalt bij de twee verschillende types water na fouling, wat er op wijst dat de foulinglaag een dense structuur heeft die een hogere weerstand voor de verschillende componenten met zich mee brengt.

Wat zeer opvallend is, is de hoge SP voor HOC en PS. We weten dat de HOC wordt aangetrokken door het membraan omdat beide hydrofoob zijn. Door deze aantrekking zal een deel van het HOC door het membraan permeëren. Bij de PS ziet men een stijging na fouling, wat eigenlijk niet mogelijk is. Deze waardes moet men wel nuanceren omdat het gaat over een hele kleine concentratie waar de fout dan ook groot op is. Maar men mag dit niet zo maar verwaarlozen omdat wel duidelijk is dat de PS deels door het membraan permeëren. Dit is zeer raar vanwege de hoge MM van PS. Waar rekening moet mee gehouden worden is, is het feit dat niet alle een PS een hoge MM hebben. De PS met een kleine MM zullen door het membraan kruipen: "CREEPING", terwijl deze met een hoge MM op het membraan zullen achter blijven.

5.2.4 Variatie van samenstelling

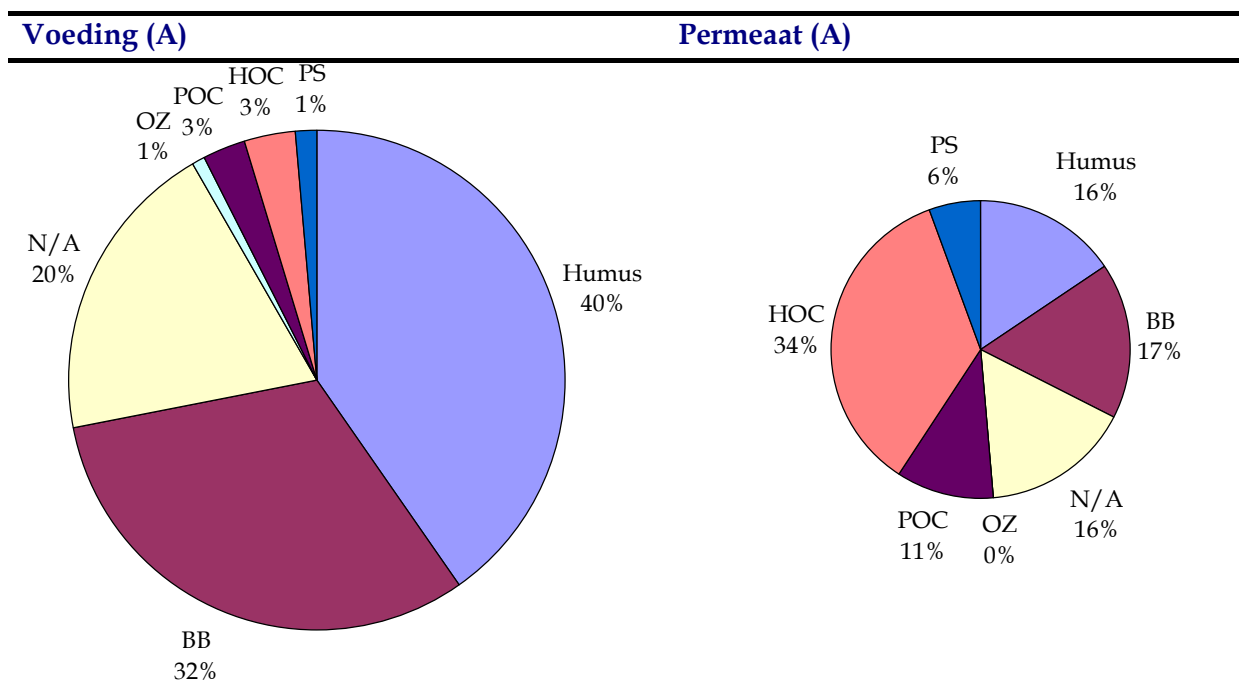
5.2.4.1 %TOC-waarde

Wanneer NOM doorheen een membraan permeëert zal de TOC-concentratie dalen. De bijdrage van elke fractie aan het TOC zal echter ook veranderen. De volledige schijf van Grafiek 5.2-12 stelt de volledige TOC-fractie voor. Elk deel van de schijf is een fractie van het TOC. Deze fracties kunnen procentueel worden uitgedrukt en zullen verder vernoemd worden als “%TOC-waarden”. De %TOC waarde van een fractie is gelijk aan de concentratie van die fractie gedeeld door de concentratie van het TOC.

$$\%TOC = \frac{\text{concentratie van een component}}{\text{concentratie TOC}}$$

Uit de schijfvoorstelling van watertype A bij non-fouling condities kunnen volgende vaststellingen geformuleerd worden:

- Het permeaat bevat minder %TOC Humus en BB dan de voeding;
- Het permeaat bevat meer %TOC HOC en PS dan de voeding.



Grafiek 5.2-12: NOM-samenstelling van voeding en permeaat voor watertype A (non-fouling)

5.2.4.2 Verschil in %TOC-waarde

Het verschil in %TOC waarde tussen permeaat en voeding ($\Delta\%TOC$) is een indicator voor de verandering van de samenstelling. Deze waarde kan met behulp van de SP worden omgezet naar een beter interpreteerbare waarde.

$$\Delta\%TOC = \%TOC_p - \%TOC_v$$

$$\Delta\%TOC = \frac{C_p}{T_p} - \frac{C_v}{T_v}$$

$$P_c = \frac{C_p}{C_v}$$

$$P_T = \frac{T_p}{T_v}$$

$$\boxed{\Delta\%TOC = \%TOC_v \cdot \left(\frac{P_c - P_T}{P_T} \right)} \quad \text{of} \quad \Delta\%TOC = \%TOC_p \cdot \left(\frac{P_c - P_T}{P_c} \right)$$

Met :

C_p	De concentratie van een component in het permeaat	[mg/l]
C_v	De concentratie van een component in de voeding	[mg/l]
T_p	De concentratie van TOC in het permeaat	[mg/l]
T_v	De concentratie van TOC in de voeding	[mg/l]
P_c	De SP van een component	[-]
P_T	De SP van TOC	[-]

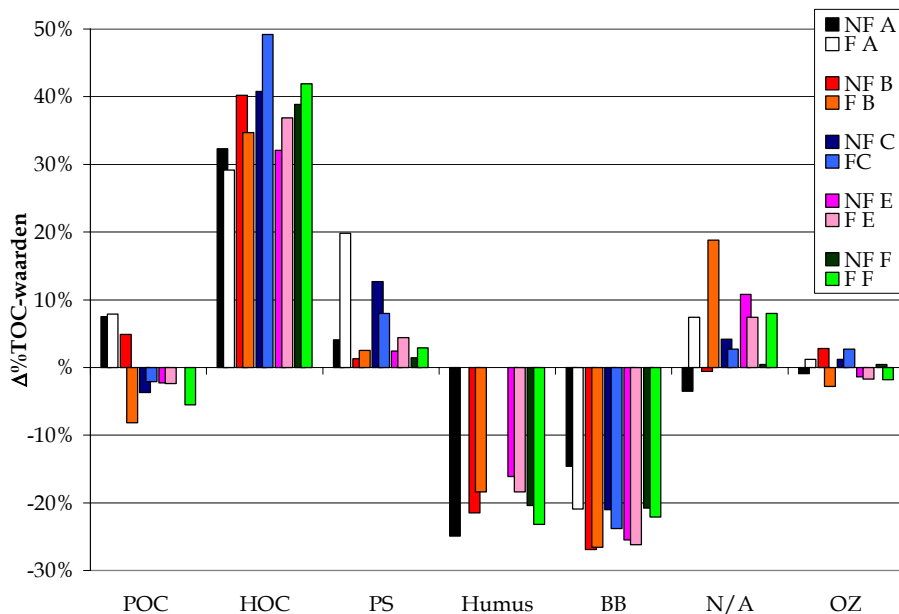
De $\Delta\%TOC$ -waarde bestaat uit twee delen. Het ene deel is de relatieve stijging van de SP van een component ten opzichte van de SP van het TOC. Het andere deel ($\%TOC_v$) kan beschouwd worden als een correctiefactor. Componenten die een lage concentratie hebben, maar die hoge passages vertonen kunnen een vertekend beeld geven op de situatie. Zo zullen bijvoorbeeld de PS een zeer hoge passage hebben ten opzicht van het TOC, toch zijn de PS slechts een kleine fractie die van minder belang zijn. Deze $\%TOC_v$ -correctiefactor zal de grote piek van de PS relativeren. Het omgekeerde is waar voor componenten die een grote bijdrage leveren aan het TOC.

- Een positieve $\Delta\%TOC$ -waarde voor een component houdt in dat de SP van een bepaalde component hoger ligt dan de SP van het TOC;
- Een negatieve $\Delta\%TOC$ -waarde voor een component houdt in dat de SP van een bepaalde component lager ligt dan de SP van het TOC;
- De hoogte van de piek wordt bepaald door het relatieve passageverschil en door de bijdrage van de component aan het totale organisch koolstofgehalte.

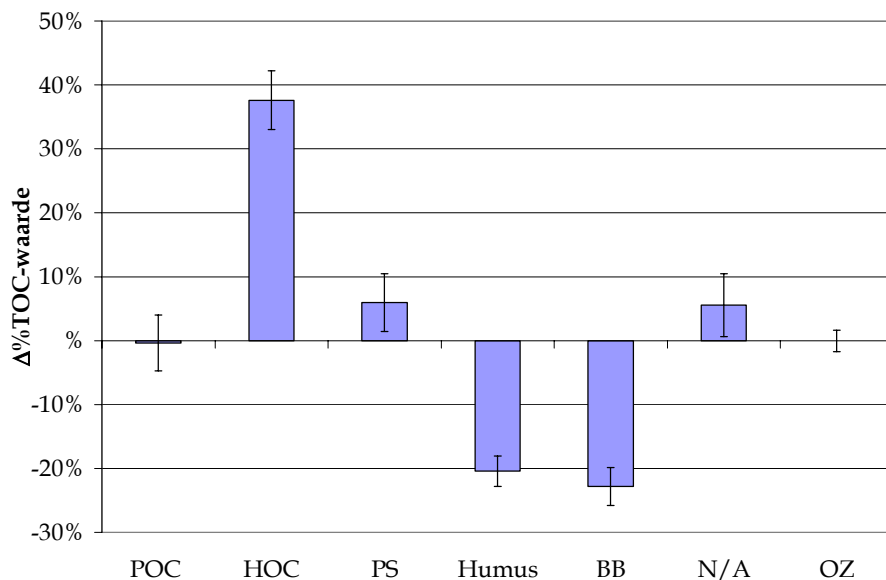
Hieruit kan besloten worden dat de $\Delta\%TOC$ -waarde een maat is voor een betere of slechtere passage van een component ten opzichte van het totale NOM-mengsel.

5.2.4.3 Resultaten

Grafiek 5.2-13 geeft de $\Delta\%$ TOC-waarden weer voor alle watertypes onder zowel non-fouling (NF) als onder foulingcondities (F). Ze toont een duidelijke gelijkens voor de verschillende watertypes, zowel voor als na fouling. Grafiek 5.2-14 toont hiervan de gemiddelde waarde.



Grafiek 5.2-13: $\Delta\%$ TOC-waarde voor de 5 watertypes



Grafiek 5.2-14: gemiddelde $\Delta\%$ TOC-waarde

5.2.4.4 *Conclusies*

Zoals verwacht geeft het membraan geen gelijke scheiding voor alle stoffen.

De zeer kleine organische zuren vormen een te kleine fractie (1%) om enig belang bij fouling te hebben.

Iets grotere moleculen zoals de neutrale en amfifiele stoffen hebben ten opzichte van het totale NOM een hoge doorlaatbaarheid. Het is daarom weinig waarschijnlijk dat deze stoffen een invloed zullen hebben op fouling.

De hydrofobe lipiden zullen gemakkelijk doorheen het membraan permeëren vanwege hun hydrofoob karakter.

Polysacchariden zouden vanwege hun zeer grote moleculaire massa niet doorheen het membraan kunnen permeëren. Toch zou er met deze stoffen rekening gehouden moeten worden. De mogelijke verklaring voor de hoge doorlaatbaarheid van PS zou te wijten kunnen zijn aan creeping. Zie hiervoor § 5.2.3.4

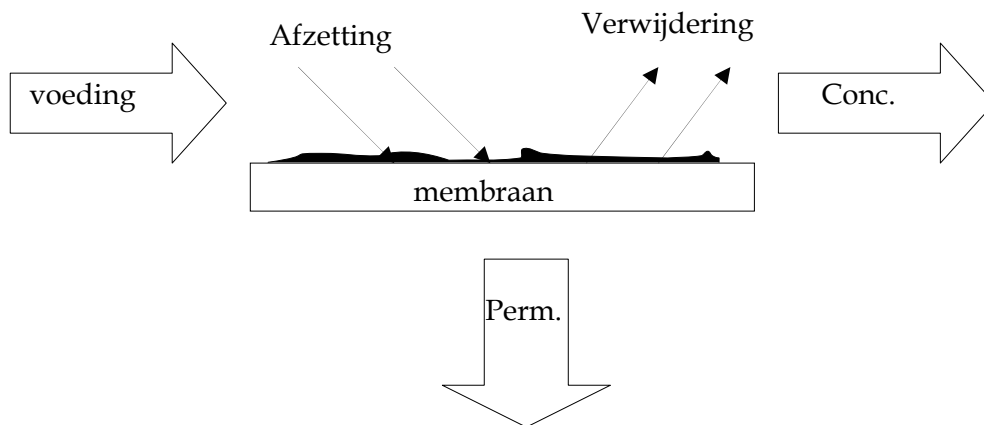
Grotere moleculen zoals de BB en het humus hebben een grotere ruimtelijke structuur en zullen daarom een lagere permeabiliteit vertonen. Vanwege hun lage permeabiliteit zouden deze stoffen zich kunnen ophopen ter hoogte van het membraan. Dit betekent niet persé dat ze fouling veroorzaken. Indien er interacties zouden optreden tussen de humusmaterialen en het membraan en tussen de humusmaterialen onderling zou dit wel fouling kunnen veroorzaken.

Uitgaande van deze methode kon geen verband gelegd worden tussen fouling en non-foulingcondities. Het effect van fouling zal later nog ter sprake komen.

5.2.5 Massabalans

5.2.5.1 Principe

Bij de opbouw van een foulinglaag zullen bepaalde componenten op het membraan adsorberen of achterblijven in de foulinglaag op het membraan. Hierdoor zal de hoeveelheid NOM die de SEPA-cell ingaat niet gelijk zijn aan de uitgaande hoeveelheid.



Volgende componentvergelijking kan worden opgesteld voor SEPA-cell [Huber S., 1998]:

$$Q_F \cdot C_F = Q_C \cdot C_C + Q_P \cdot C_P + \left(\frac{dm}{dt} \right)$$

Hierbij stelt de factor dm/dt het geadsorbeerde NOM voor.

$dm/dt < 0$: Membraan wordt armer aan NOM [mg/h]

$dm/dt > 0$: Membraan wordt rijker aan NOM [mg/h]

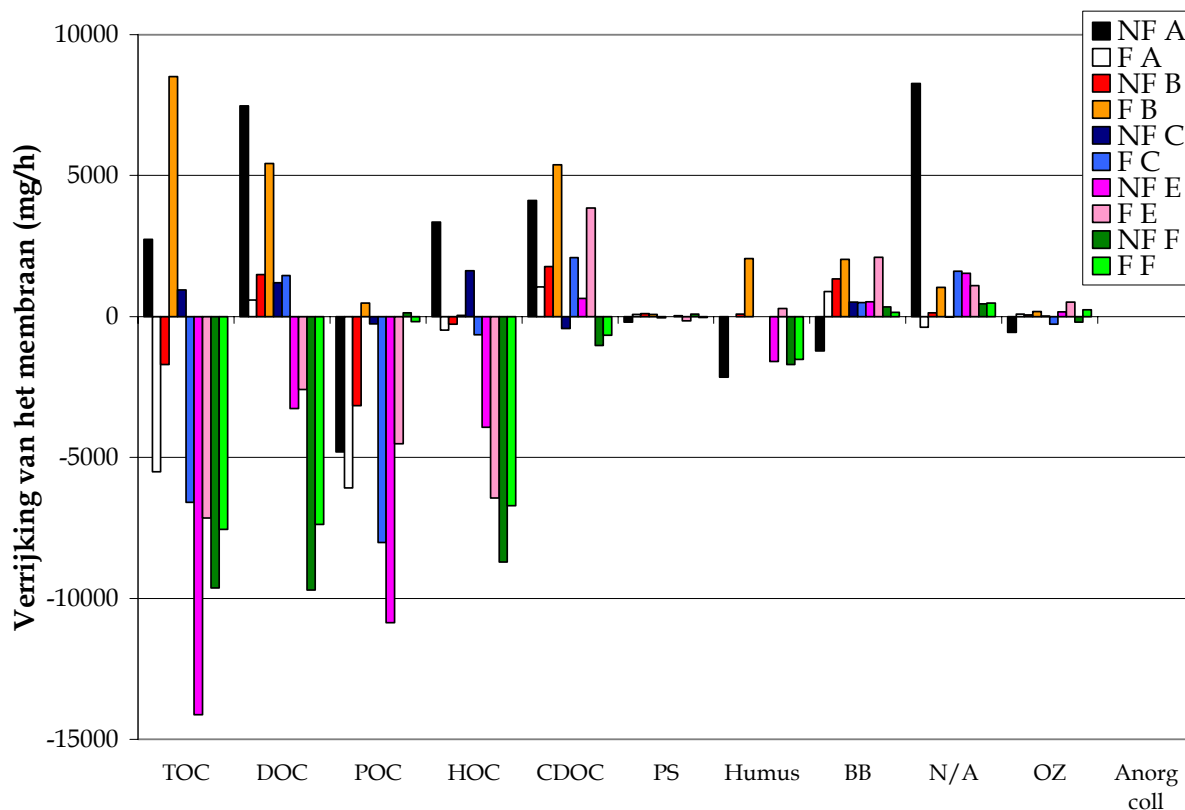
dm/dt kan bepaald worden door invoering van de recovery in vorige formule:

$$\left(\frac{dm}{dt} \right) = Q_F \cdot [C_F - C_C \cdot (1 - R) - C_P \cdot R]$$

Het opstellen van de verschillende componentbalansen kan een bijkomend inzicht geven in de adsorptiemechanismen van NOM op het membraan en welke componenten bijdragen tot de foulinglaag.

5.2.5.2 Resultaten

Grafiek 5.2-15 toont de verrijking van het membraan in mg per uur. Deze grafiek toont zeer variërende resultaten die moeilijk interpreteerbaar zijn.



Grafiek 5.2-15 Verrijking van het membraan per component

5.2.5.3 Conclusie

Ondanks de eenvoud van de methode resulteerde het opstellen van de componentbalansen in moeilijk interpreteerbare en weinig consistente resultaten. Dit is het gevolg van de lage recovery (tussen 4 en 1%) die werd aangewend tijdens het uitvoeren van de fluxexperimenten. Een hogere recovery zou immers resulteren in grotere verschillen tussen de concentraties van voeding en concentraat.

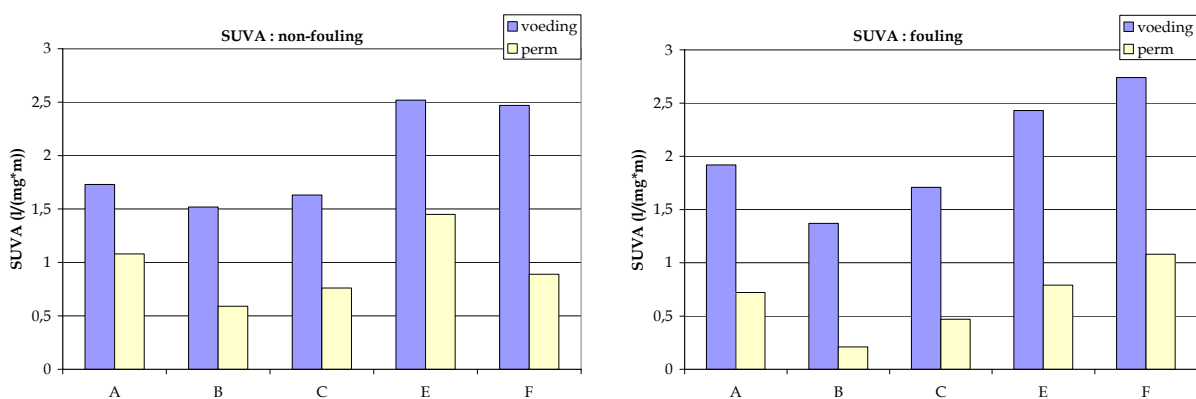
De massabalans zou bepaald kunnen worden indien de recovery van het systeem verhoogd zou kunnen worden. Dit zou met dezelfde installatie kunnen gebeuren door een deel van de concentraatstroom terug te sturen naar de voeding, waardoor de nieuwe voedingsstroom geconcentreerder wordt. De bespreking van deze opstelling valt buiten het bestek van deze thesis en zal daarom niet verder besproken worden.

5.2.6 SUVA

Grafiek 5.2-16 toont een lagere SUVA waarde voor het permeaat dan voor de voeding, voor zowel fouling als non-fouling condities. Dit betekent dat UV_{254} -absorberende stoffen zoals humus en BB een lagere %TOC-waarde zullen hebben in het permeaat. Dit is dus een bevestiging van de resultaten van § 5.2.4. Niet- UV_{254} absorberende stoffen zoals HOC en PS zullen in het permeaat een hogere %TOC-waarde hebben.

De SUVA daling is groter na fouling van het membraan. Dit betekent dat de vorige trend wordt versterkt door de foulinglaag. Deze waarneming is in overeenstemming met de literatuur waarin staat dat componenten met hoge SUVA beter worden verwijderd na fouling. [Frimmel F.H., et al.]

Een mogelijke hypothese zou kunnen zijn dat humus en BB zich sterk aangetrokken voelen tot de foulinglaag. Hierdoor zou de foulinglaag steeds aangroeien, waardoor de foulinglaag steeds toeneemt. Dit werd ook waargenomen bij de fluxdaling. De fluxdaling zal blijven toenemen vanwege de continue opbouw van een humus en BB laag.



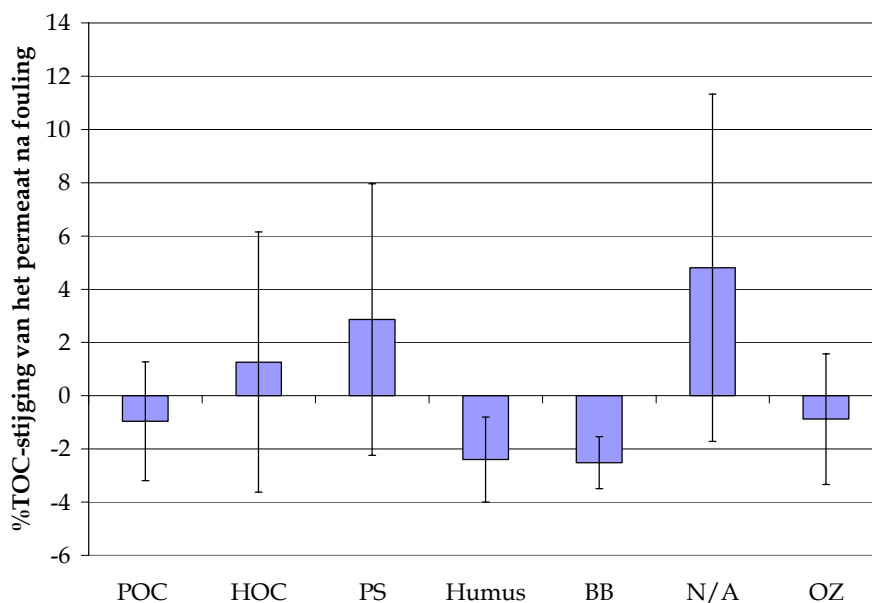
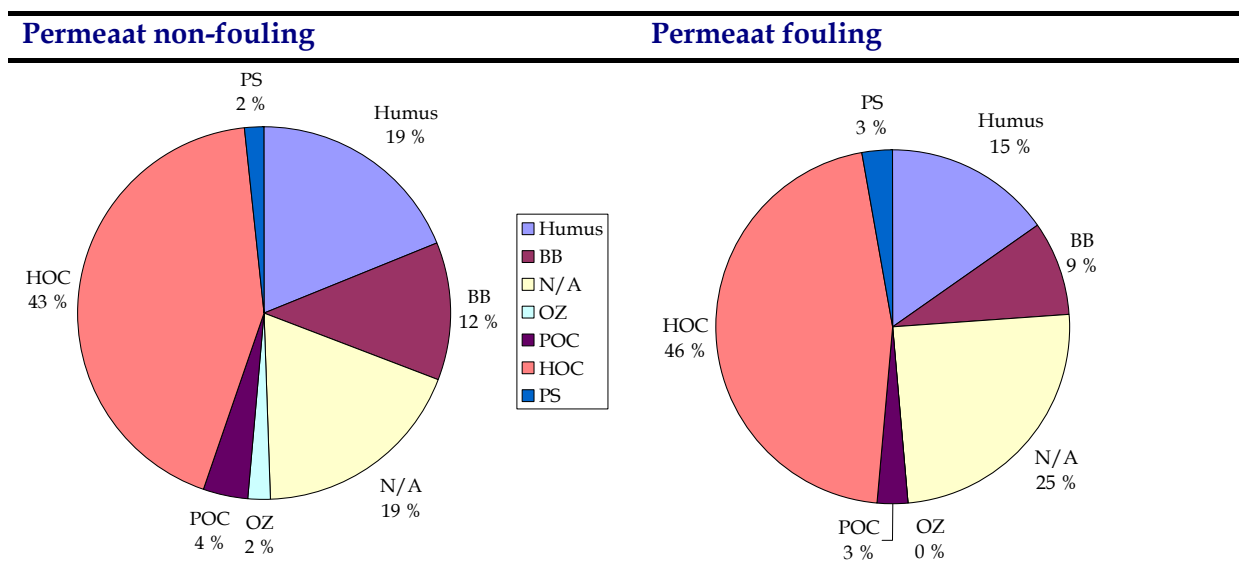
Grafiek 5.2-16 SUVA van voeding en permeaat bij non-fouling en fouling condities

5.2.7 De invloed van fouling op het permeaat

De samenstelling van het permeaat geeft een goed idee van wat er precies in de foulinglaag gebeurt.

Wanneer de procentuele samenstelling van het permeaat (%TOC) vóór en na fouling worden vergeleken, kan worden vastgesteld dat door de opbouw van een foulinglaag de samenstelling van het permeaat zal veranderen. De samenstelling van het permeaat voor en na fouling wordt weergegeven in Tabel 5.2-7 en de gemiddelde verandering door fouling wordt weergegeven in Grafiek 5.2-17

Tabel 5.2-7 Verandering van de samenstelling van het permeaat na fouling



Grafiek 5.2-17 Verandering van de samenstelling van het permeaat na fouling

Stoffen met een lage UV₂₅₄ absorptantie, zoals N/A, PS en HOC, zullen een groter aandeel hebben in het permeaat na fouling. Deze waarden vertoonden een grote gemiddelde afwijking. Daarom kunnen over deze fracties moeilijk conclusies getrokken worden.

De %TOC waarden van humus en BB in het permeaat onder foulingcondities zijn lager dan deze onder non-foulingcondities. Deze daling wijst erop dat humus en BB beter worden verwijderd door de foulinglaag.

De %TOC-waarde van HOC, PS en N/A neemt dus toe ten koste van humus en BB. De %TOC daling van humus en BB verklaart het verschil in UV₂₅₄ absorptantie tussen non-fouling en fouling.

Onder foulingcondities zullen HOC en PS gemakkelijk doorheen het membraan permeëren. Dit wordt wellicht veroorzaakt door concentratiepolarisatie aan het membraan. Er ontstaat immers een hoger concentratieverschil tussen de voedings- en de permeatzijde van het membraan waardoor de drijvende kracht voor de ongewenste diffusie van deze componenten doorheen het membraan toeneemt.

5.2.8 Moleculair gewicht van de humusfractie

De gemiddelde MM van de humusfracties in het permeaat kon vanwege de lage concentratie niet altijd berekend worden. Slechts bij drie experimenten is de MM van humus bepaald bij zowel fouling als non-fouling condities. Bij deze drie experimenten is een daling in MM geobserveerd. Deze daling is groter dan de zeer kleine daling van de MM van de voeding. Er kan niet gezegd worden dat deze verschillen groot zijn, maar deze daling bevestigt het vermoeden dat de foulinglaag grotere moleculen minder makkelijk doorlaat dan het membraan zelf.

Tabel 5.2-8 Daling van de MM van humus na fouling

	non-fouling		fouling		verschil	
	voeding	permeaat	voeding	permeaat	voeding	permeaat
B	686	596	684	553	-2	-43
E	685	575	682	564	-3	-11
F	761	748	751	726	-10	-22

Deze resultaten kunnen in verband gelegd worden met de retentiestijging van de MgSO_4 -oplossing bij de karakterisatie.

De dichtheid van de foulinglaag speelt een grote rol in de MM-daling van de humusfractie en de retentie. Misschien is er een verband tussen de retentiedaling en de dichtheid van de foulinglaag. De dichtheid van de foulinglaag zou beïnvloed kunnen worden door de calciumconcentratie. F brengt een grotere MM-daling teweeg dan E. Dit staat haaks op de bewering dat hoge calciumconcentraties dichtere foulinglagen voortbrengen. Blijkbaar is deze methode niet krachtig en precies genoeg om conclusies te trekken over foulingdichtheden

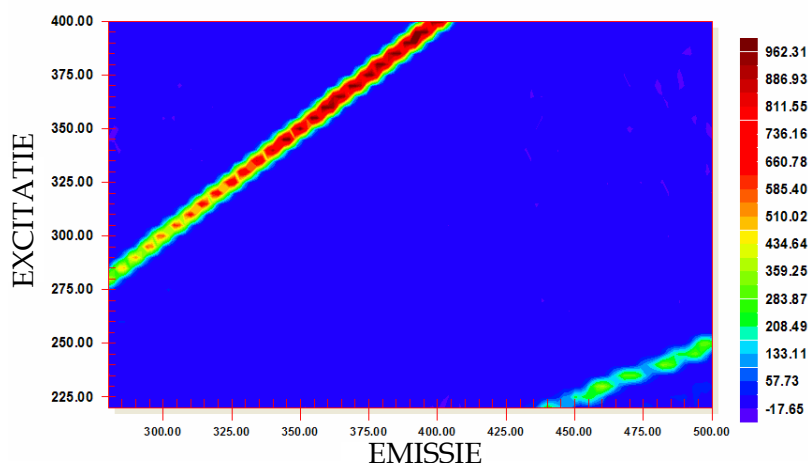
5.3 Excitatie-emissie fluorescentie

5.3.1 Beschrijving van de methode

5.3.1.1 Inleiding

Een analyse methode die wordt gehanteerd voor bepaling van het NOM is excitatie-emissie fluorescentie. NOM moleculen zullen wanneer ze geëxciteerd worden door straling een bepaalde straling terugsturen (emissie). De emissiegolflengte zal altijd langer zijn dan de excitatiegolflengte. De intensiteit is een maat voor de hoeveelheid geëxciteerde straling.

Bij excitatie-emissie fluorescentie worden bij verschillende excitatiegolflengten zowel golflengte als intensiteit van de teruggestuurde emissiestraling uitgezet in een driedimensionale voorstelling. De verticale as is de excitatiegolflengte en de horizontale as is de emissiegolflengte. De kleur is de intensiteit van de emissie. Deze driedimensionale voorstelling noemt men een Excitatie-emissie matrix (EEM). (Figuur 5.3-1)



Figuur 5.3-1: Voorbeeld van een EEM

Op de figuur zijn er duidelijk twee rechten te zien. Deze lijnen zijn afkomstig van reflectie aan de wanden van de houder van het staal. De rechte die zich links bevindt komt door de eerste reflectie van het glas. De rechtse rechte komt door de tweede reflectie van het glas.

Voor de interpretatie van deze metingen moet men goed kijken naar de schaalverdeling van de intensiteit. Bij verschillende metingen stelt dezelfde kleur niet altijd dezelfde intensiteit voor. Daarom mogen twee EEM's niet altijd vergeleken worden, uitgaande van de kleur.

De stalen werden verstuurd naar de Universiteit van Birmingham waar Dr. Andrew Baker de testen uitvoert. Het contact met licht beïnvloedt de fluorescentie. Daarom werden de monsters ingepakt in zilverpapier. Bij de verzending moeten de stalen koel gehouden worden zodat er geen verandering van samenstelling kan plaats nemen.

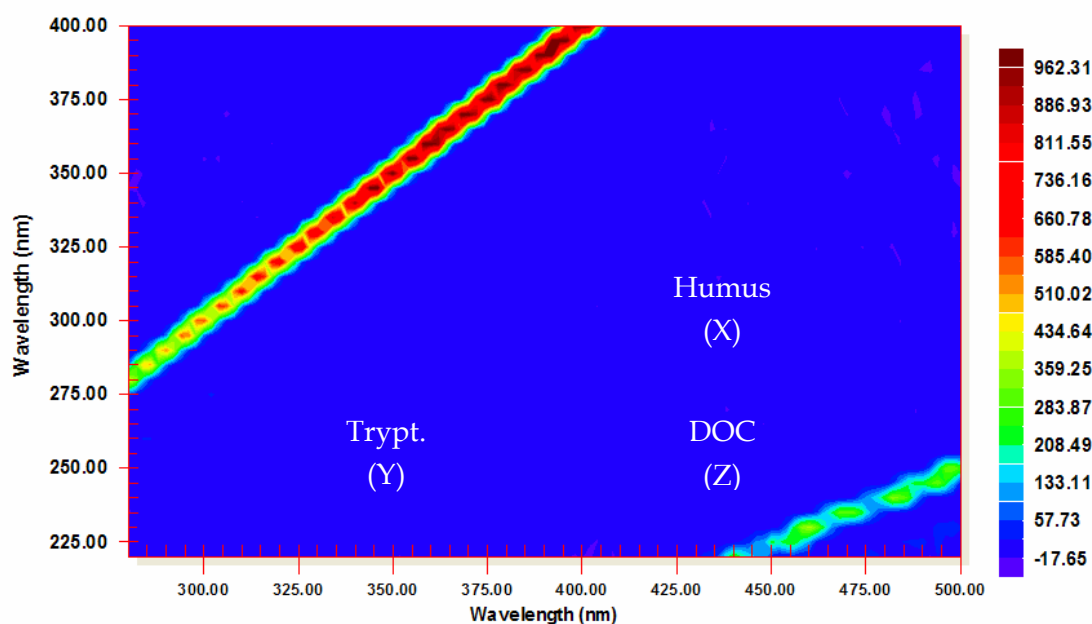
5.3.1.2 Detectie van DOM

Het gedeelte van NOM dat opgemeten is met fluorescentie, is CDOM (coloured dissolved organic matter; gekleurd opgelost organische materie). De twee componenten van het CDOM die de meeste fluorescentie vertonen zijn de humeuze componenten en de producten afkomstig van microbiologische groei.

De humeuze componenten vertonen een excitatie bij 300-350 nm en een emissie bij 400-450 nm. Terwijl producten afkomstig van microbiologische groei zoals tryptofaan een excitatie en emissie hebben bij 250-300 nm respectievelijk 300-350 nm. [AMY, G., et al., 2004] Zie Tabel 5.3-1 en Figuur 5.3-2 voor verschillende excitatie en emissie waardes.

Tabel 5.3-1: verschillende excitatie en emissie waardes

	Beschrijving	Excitatie (nm)	Emissie (nm)
X	Humus materiaal	300-350	400-450
Y	Tryptofaan	225-275	325-375
Z	DOC	250-300	400-450



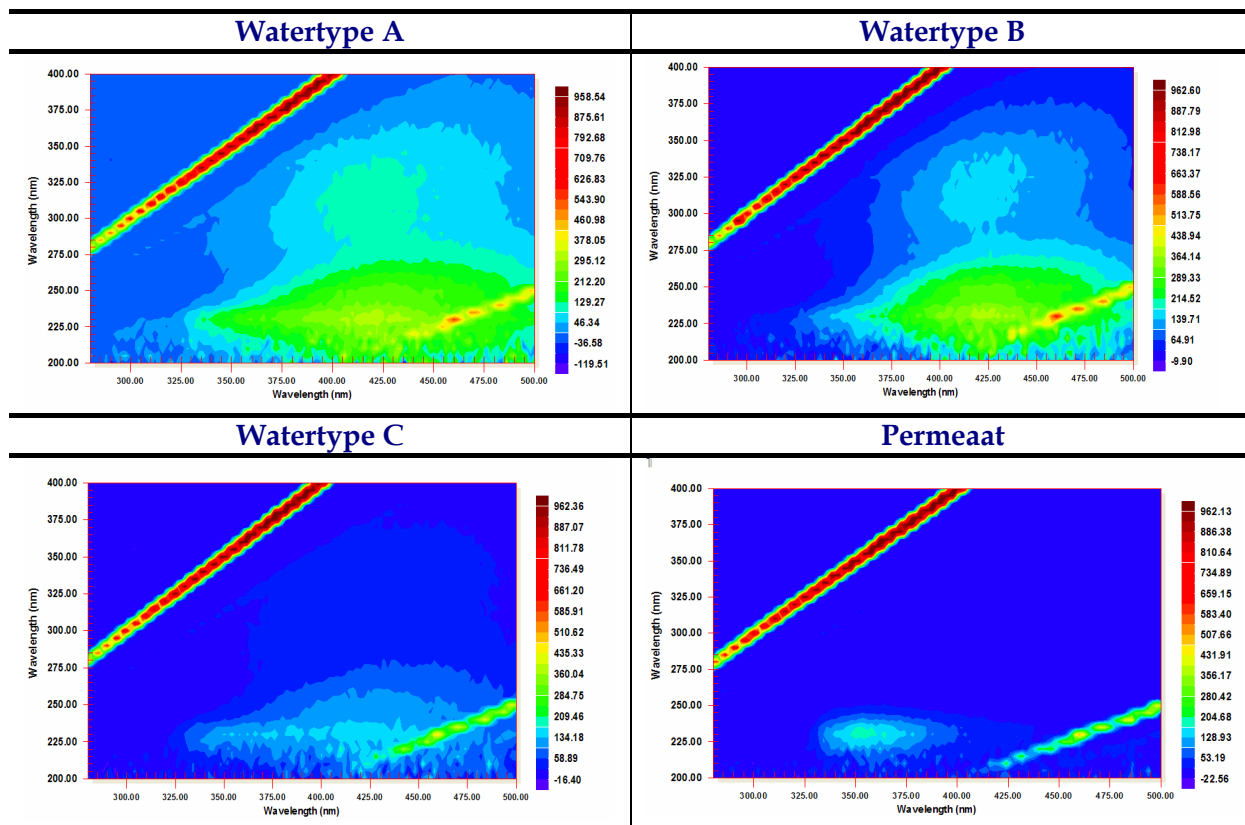
Figuur 5.3-2: voorstelling van de mogelijke fracties

Deze methode is in staat een snelle (~ 1min) detectie van CDOM fluorescentie uit te voeren. Dit over een groot bereik van zowel excitatie als emissie golflengtes om zo een EEM te vormen. Een EEM zal een gebied bestrijken van excitatie en emissie golflengtes van ~200nm (korte golflengte UV) tot ~500nm (zichtbaar blauwgroen licht). [BAKER, A., et al., 2004]

5.3.2 Resultaten

5.3.2.1 Weesperkarspel

Tabel 5.3-2: EEM metingen Weesperkarspel

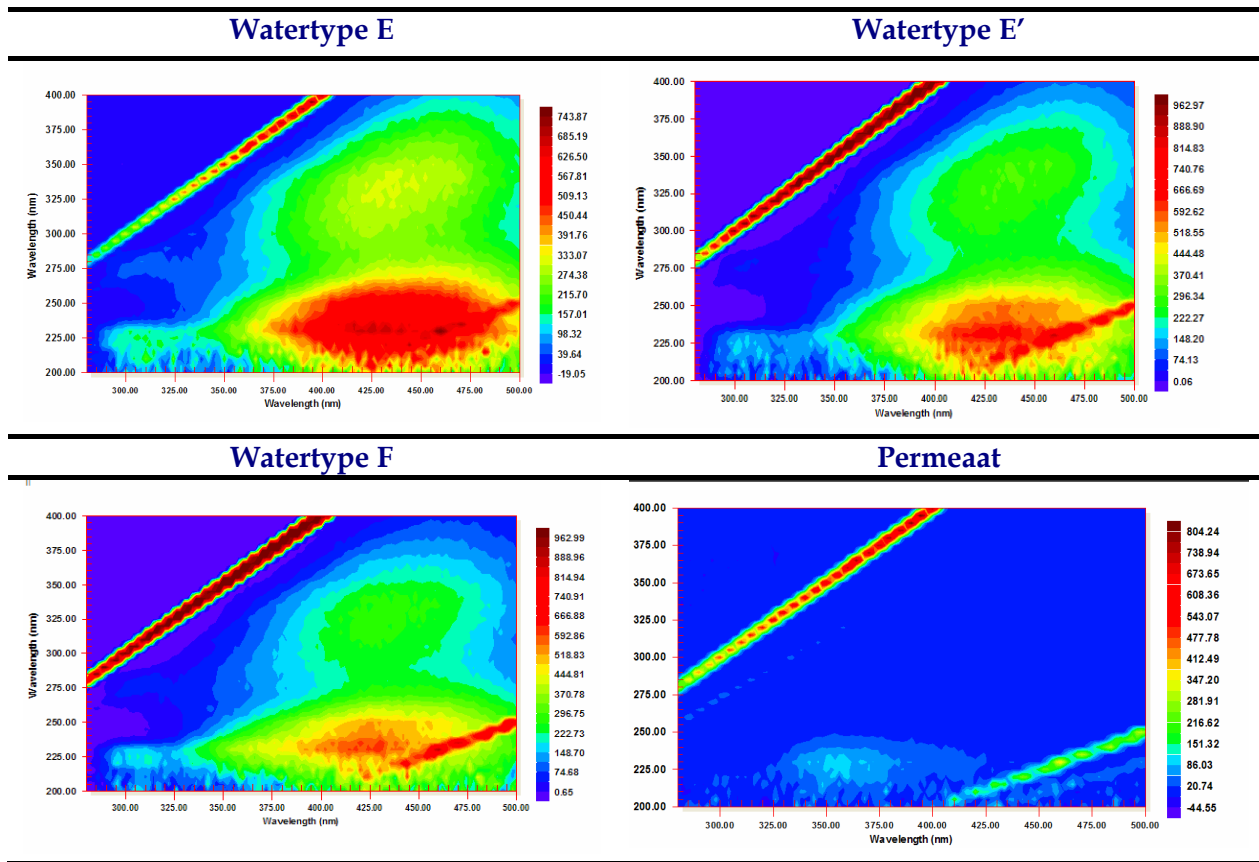


Uit de gegeven figuren kan met het effect duidelijk zien van de verschillende behandelingsstappen. Bij elke stap verlaagt het gehalte aan humusfractie en DOC. Dit kon ook voorspeld worden door wat er gezien is in § 2.4.2 en § 2.4.3.

Bij elk type water dat getest is ziet men hetzelfde steeds terug komen. Dit is te zien in de Tabel 5.3-2 bij permeaat. Bij een excitatie:emissie van ~230/~350 nm ontstaat een piek. Deze piek wijst op mogelijke producten van microbiologische groei, zoals triptophanen.

5.3.2.2 Spannenburg

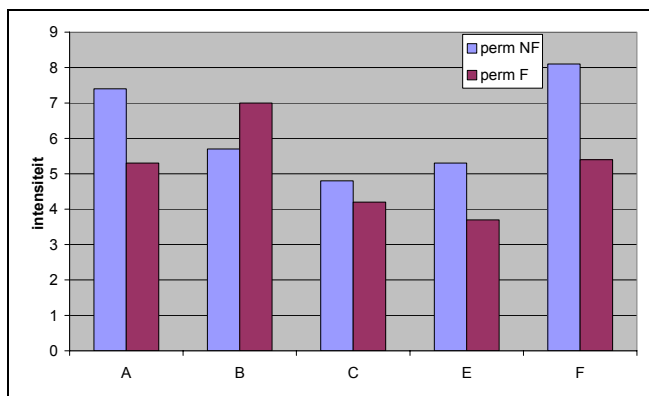
Tabel 5.3-3: EEM metingen Spannenburg



Op het eerste zicht lijkt er een groot verschil tussen type E en E', maar dit komt doordat er is gemeten bij verschillende intensiteiten. Bij nader onderzoek blijkt dat er geen verschil te zijn tussen deze twee types water. Dit is logisch aangezien deze twee watertypes vanuit dezelfde behandelingsstap komen. Maar men mag niet vergeten dat de staalname van type E na de voorfilter is genomen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat uit deze figuren niet te zien is welke delen van het NOM nu juist achterblijven op de voorfilter.

De piek bij een excitatie/emissie van ~230/~350nm is hier te zien in de voeding en het permeaat. Dit impliceert dus dat er reeds producten van microbiologische groei aanwezig waren in de voeding.

5.3.2.3 *Verskil tussen intensiteit bij fouling en non-fouling*



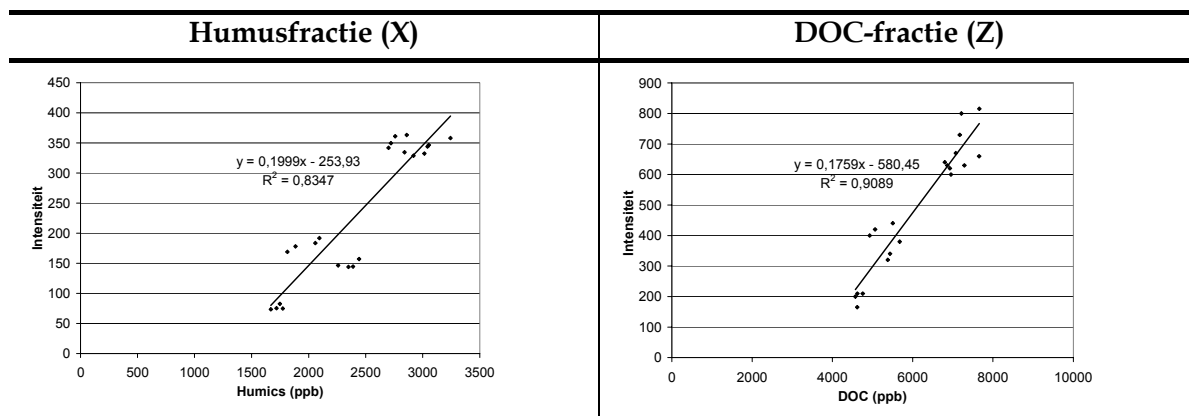
Grafiek 5.3-1: Intensiteit van Humus fractie bij EEM meting

In deze grafiek is de intensiteit afkomstig van humus (300-350/400-450nm) uitgezet voor elk watertype apart. Door deze voorstelling is te zien dat er een daling is van de intensiteit na fouling wat er op wijst dat er minder humus aanwezig is in het permeaat na fouling. De foulinglaag heeft een dense structuur welke een extra barrière vormt voor de humusfractie. Dit werd ook al vastgesteld in §5.2.3.

5.4 Fluorescentie vergeleken met LC-OCD

In dit deel wordt er gecontroleerd of de metingen van fluorescentie overeenkomen met de waarden die bekomen worden met LC-OCD. Om deze te kunnen vergelijken moeten eerst de intensiteiten bepaald worden bij een bepaalde zone van de emissie-excitatie meting. Hier is er gekozen voor twee zones die besproken zijn in § 5.3; Humus(X) en DOC (Z).

Tabel 5.4-1: lineair verband tussen fluorescentie en LC-OCD

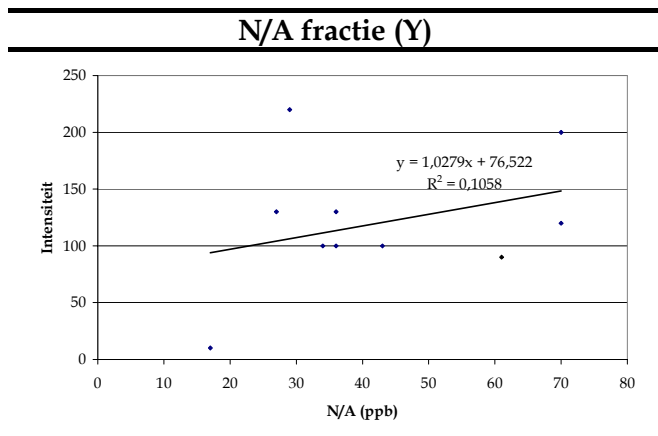


Om het verband te vinden tussen LC-OCD en fluorescentie metingen werden de intensiteiten uitgezet ten opzichte van de hoeveelheden gemeten door LC-OCD. (hier Humics en DOC)

Deze grafieken laten duidelijk zien dat er een verband is tussen de intensiteit en de gemeten hoeveelheid van de component.

Met zone Y, waar zich de producten van microbiologische groei zoals tryptophanen bevinden, werd geprobeerd een correlatie te vinden tussen N/A en fluorescentie metingen. Dit omdat tryptophanen een neutraal amino zuur is. Maar deze blijken geen correlatie met elkaar te vertonen. (zie Tabel 5.4-2)

Tabel 5.4-2: lineair verband tussen Intensiteit en N/A



5.4.1 Besluit

Met de EEM methode kan men snel de invloeden van verschillende behandelingsstappen bekijken. Er is na elke behandeling een daling van de hoeveelheid NOM waar te nemen wat ook te zien is in Tabel 5.2-4.

Er is een verband gezocht tussen Fluorescentie en LC-OCD door de intensiteit uit te zetten ten opzichte van de concentratie van een bepaalde component. Via deze grafiek werd er bevestigd wat er in de theorie is vermeld. De zone X komt overeen met de hoeveelheid humus aanwezig en de zone Z komt overeen met de hoeveelheid DOC aanwezig. Er moet toegegeven worden dat het kwantitatief verband tussen excitatie-emissie fluorescentie en LC-OCD een beetje tegenvalt.

Het verschil tussen voeding en permeaat is ook duidelijk waarneembaar en laat zien dat het NF membraan weinig NOM doorlaat. Het enige wat er volgens deze meting doorgaat zijn de producten afkomstig van microbiologische groei, zoals triptophanen welke fluorescerende componenten van PS zijn. Deze SP van PS is ook te zien in § 5.2.3.

6 Calcium-complexvorming

6.1 Doelstelling

Humuszuren zijn in staat om complexen te vormen met Ca^{2+} (§ 2.3.5.5). Deze proef zal trachten te achterhalen hoeveel humuszuur er precies complexen vormt met het aanwezige Ca^{2+} . Deze bepaling zal gebeuren met alle gebruikte watertypes.

6.2 Beschrijving van de methode

6.2.1 Werkingsprincipe

Een anionenwisselaar bezit negatief geladen chloorionen die ze kan omwisselen met andere negatief geladen moleculen die een sterkere binding opleveren. Hiertoe behoren de negatief geladen humuszuren. De anionenwisselaar ruilt haar negatief chloorion om met een negatief geladen humuszuur. Er werd vanuitgegaan dat het Ca^{2+} -NOM-complex onaangetast blijft.

Anionenwisselaars zullen niet alleen de humuszuren opnemen, maar ook de totale calciumconcentratie doen verminderen.

De gebruikte calciummeettoestellen meten zowel het opgeloste als het gecomplexeerde calcium. Indien het Ca^{2+} -NOM-complex verwijderd wordt zal een daling in calciumconcentratie worden waargenomen. Het calciumconcentratieverschil tussen een behandelde en een onbehandelde oplossing stelt de gecomplexeerde hoeveelheid calcium voor.

6.2.2 Uitvoering

De experimenten werden batchgewijs uitgevoerd in 1L-flessen. De flessen werden voorzien van een dosis anionenwisselaar en van water. Het geheel werd dan gedurende 2 weken goed geroerd bij een constante temperatuur (10°C). Hierna zouden de korrels genoeg NOM moeten opgenomen hebben. Calciumconcentratie, DOC en fluorescentie werden van elk staal gemeten door het laboratorium van Kiwa N.V.

Voor elk type water werden volgende doses anionenwisselaar gebruikt:

- 0 mg/L (blanco-oplossing);
- 150 mg/L;
- 300 mg/L.

6.2.3 Type anionenwisselaar

Amberlite IRA 958 Cl, speciaal geschikt voor het wisselen van negatief geladen organische stoffen.

6.3 Opmerkingen

De flessen met anionenwisselaar werden gedurende 2 weken bij 10°C geroerd. Hierna kon worden vastgesteld dat de witte anionenwisselaars bruin kleurden. De blanco-flessen werden niet geroerd.

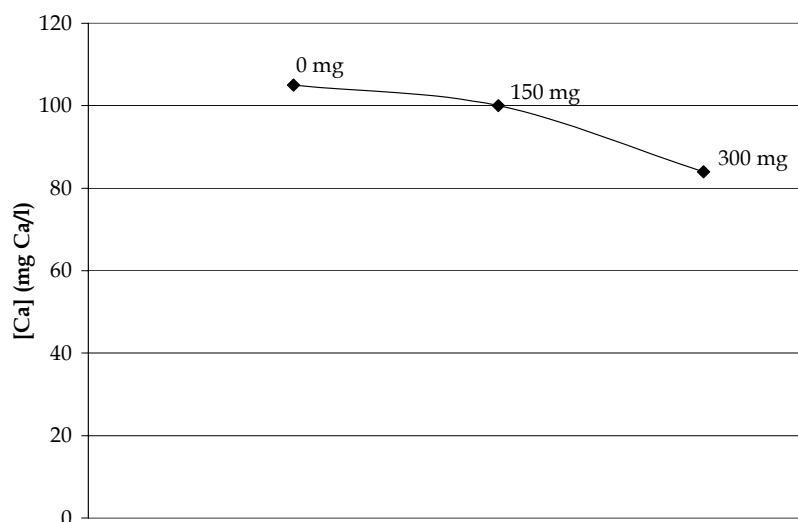
De blanco-flessen van Spannenburg vertoonden een bruine neerslag. Dit wijst wederom op de aanwezigheid van ijzer in het grondwater. Nadat de flessen van Spannenburg geschud werden om het ijzer terug in oplossing te brengen werden de stalen genomen voor onderzoek.

6.4 Resultaten en conclusies

Er wordt nauwelijks een calciumconcentratieverschil gemeten tussen de behandelde en onbehandelde stalen van Weesperkarspel. Alleen bij het water van Spannenburg voor ontharding (E) is een concentratiedaling waarneembaar. Voor watertype E is calciumcomplexering aangetoond. Na ontharding is er geen daling meetbaar.

Tabel 6.4-1 Resultaten van de metingen

Type	dosering	UV E/m	DOC mg C/l	Calcium mg Ca/l	SUVA l/mg*m	rendement %
A	0 mg	15,0	5,5	76	2,73	
	150 mg	2,7	2,2	76	1,23	60%
	300 mg	2,1	1,8	78	1,17	67%
B	0 mg	9,2	5,2	77	1,77	
	150 mg	1,7	2,0	77	0,85	62%
	300 mg	1,2	1,6	76	0,75	69%
C	0 mg	8,8	5,1	48	1,73	
	150 mg	1,5	1,8	49	0,83	65%
	300 mg	1,1	1,5	49	0,73	71%
E	0 mg	21,5	7,9	105	2,72	
	150 mg	3,0	2,4	100	1,25	70%
	300 mg	2,1	1,9	84	1,11	76%
F	0 mg	20,9	7,8	27	2,68	
	150 mg	3,6	2,4	27	1,50	69%
	300 mg	3,0	2,1	27	1,43	73%



Grafiek 6.4-1 Concentratiedaling bij type E water

Waarom is calcium-complexvorming alleen maar aangetoond bij watertype E?

Waarschijnlijk verwijderd pelletontharding ook het gebonden calcium. Hierdoor kunnen watertypes C en F uitgesloten worden. Maar waarom vertonen watertypes A en B dan geen daling?

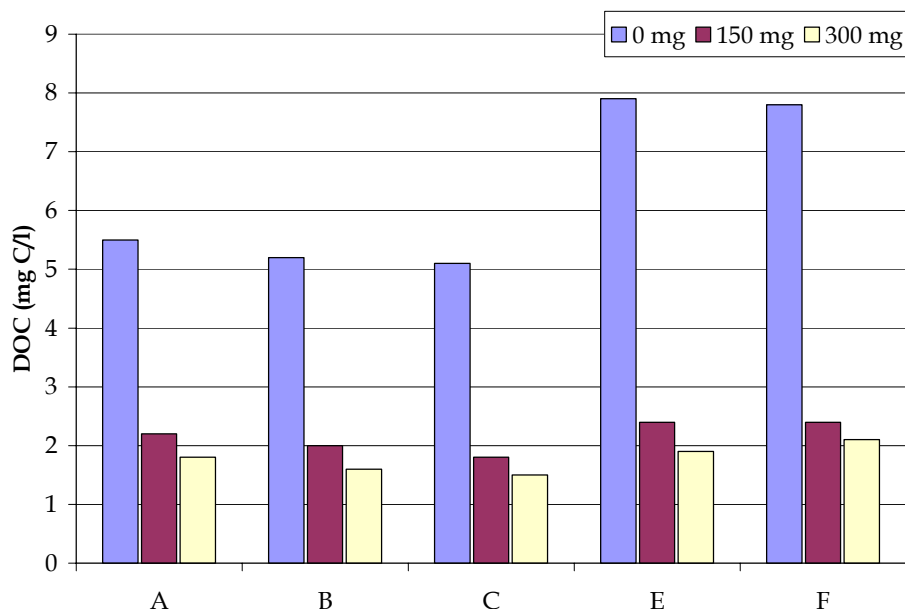
Een eerste mogelijke verklaring zou zijn dat de calciumconcentratie van dit watertype veel te laag ligt. Dit lijkt vrij onzeker aangezien de concentratie van type E water daalt van 105 naar 84 mg Ca/l. Deze waarde ligt erg in de buurt van de resultaten van A en B (76 mg Ca/l). Daarom kan geen verband gelegd worden met de concentratie.

Een tweede mogelijkheid is de invloed van de voorbehandeling van het water van Weesperkarspel in Loenderveen. In Loenderveen is het water al behandeld door coagulatie. Coagulatie is voornamelijk werkzaam op hydrofobe componenten. Bij de verhoging van de zuurtegraad door FeCl_3 zouden calciumionen uit hun complex getrokken worden.

Een echte oorzaak is niet gevonden. Verder onderzoek naar calciumcomplexvorming zou nodig zijn om meer inzicht te krijgen in de mechanismen.

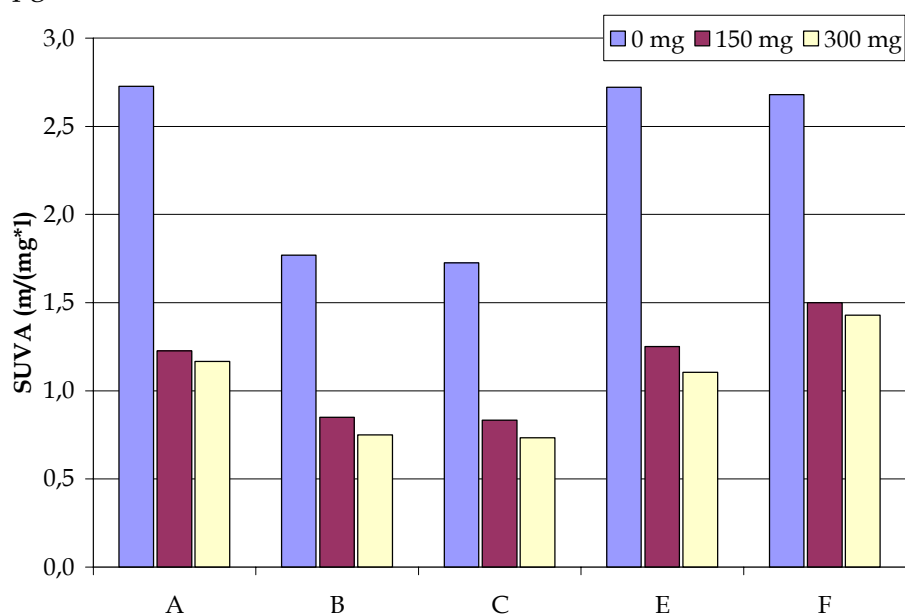
6.5 Andere bevindingen

De anionenwisselaars blijken een rendement van ongeveer 70% te hebben. Het rendement neemt met ongeveer 6% toe bij de 300 mg dosering. (Grafiek 6.5-1)



Grafiek 6.5-1 Doc waarden van de monsters

De verlaging van de SUVA waarde door behandeling met de anionenwisselaars (Grafiek 6.5-2) toont aan dat voornamelijk aromatische stoffen zoals humus en BB worden opgenomen door de anionenwisselaar. Met LC-OCD werd aangetoond dat 70% van het NOM bestaat uit humus en BB. Met deze methode werd ongeveer 70% NOM verwijderd. Dit doet een vermoeden rijzen dat voornamelijk humus en BB met deze methode worden opgenomen.



Grafiek 6.5-2 SUVA-waarden van alle stalen

7 Conclusies

7.1 De gebruikte waters bevatten NOM

De aanwezigheid van NOM wordt bevestigd door zowel emissie-excitatie fluorescentie als LC-OCD in zowel het oppervlaktewater van Weesperkarspel als in het grondwater van Spannenburg.

De NOM-concentratie is in overeenstemming met de literatuur. Het TOC van de gebruikte waters varieert tussen 4,9 en 7,2 ppm. In § 2.2.1 werd 5,75 ppm beschouwd als het globale gemiddelde.

Het grondwater van Spannenburg bevat meer NOM dan het voorbehandelde oppervlaktewater van Weesperkarspel. Normaalgezien zou oppervlaktewater meer NOM moeten bevatten dan grondwater. Dit is vermoedelijk te wijten aan de voorbehandeling van het water van Weesperkarspel.

Hoewel het water van Spannenburg een hogere TOC-concentratie heeft dan het water van Weesperkarspel, is de samenstelling bijna gelijk. De polysaccharidefractie is in beide gevallen zeer klein, maar komt in iets grotere mate voor in het oppervlaktewater van Weesperkarspel. In beide gevallen bevat het water ongeveer 70% humusmaterialen (humus en BB)

Fluorescentie gaf twee pieken die overeenstemmen met de humusmaterialen en DOC. Er werd getracht om een verband te zoeken tussen de intensiteit en de concentratie van deze twee componenten. De derde piek die bij de permeaten voorkomt zou te wijten zijn aan de fluorescentie van tryptofaan, afkomstig van bacteriën.

De SUVA-waarden van Spannenburg lagen beduidend hoger dan deze van Weesperkarspel. Dit wijst op een hogere aromaticiteit van de humusfractie van Spannenburg.

7.2 NOM veroorzaakt fluxdaling door fouling

De fluxdalingen die experimenteel verkregen werden na 1 week varieerden tussen 20 en 60% en zijn een belangrijke indicator voor fouling. Door karakterisering werd een daling van de waterdoorlaatbaarheid na fouling aangetoond. De retentie van het membraan steeg licht na fouling. De foulinglaag zorgt dus niet alleen voor een extra weerstand voor de stroming van het water, maar het zal ook vermijden dat organische materialen naar het permeaat kunnen.

De foulinglaag was ook visueel waarneembaar. Het oorspronkelijk witte membraanoppervlak kreeg aan de voedingszijde een geelbruine kleur. Deze kleurverandering wijst op adsorptie van NOM aan het membraanoppervlak.

Bij hoge ijzerconcentraties werd er een bruinrode ijzerhydroxidefouling waargenomen. Dit gaf een drastische fluxdaling. Fouling van deze partikels op het membraanoppervlak werden tegengehouden door de voorfilter. Deze fouling is te wijten aan de beluchting die het water heeft ondergaan voor de staalname. Nanofiltratie van grondwater zal daarom best onder anaërobe omstandigheden gebeuren.

Zoals voorspeld in de literatuurstudie zal het water van Spannenburg meer vervuilen vanwege haar grotere humusconcentratie, haar hogere aromaticiteit van de humusfractie en haar hogere calciumconcentratie.

7.3 Samenstelling van de foulinglaag

Ontharding van water zorgt voor een drastische vermindering van de fluxdaling. Aangezien de NOM samenstelling weinig wordt beïnvloed door ontharding moet deze daling te wijten zijn aan de calciumconcentratie. De calciumconcentratie beïnvloedt de ionensterkte, de calciumcomplexvorming en de calcium cross-linking. Deze interacties kunnen alleen een invloed hebben op negatief geladen deeltjes zoals humus en BB. Daarom kan verondersteld worden dat de foulinglaag voornamelijk is opgebouwd uit humus en BB.

Zowel de negatieve lading van humus en BB als de Calcium-NOM complexvorming werden aangetoond door middel van anionenwisseling.

Er werd getracht om met behulp van de resultaten van LC-OCD een massabalans voor het membraan op te stellen. Deze massabalans zou kunnen aantonen uit welke fracties de foulinglaag bestaat. De resultaten gaven echter geen inzicht in de vorming van fouling vanwege de slechte nauwkeurigheid, te wijten aan de lage recovery van het MTA. Door een massabalans op te stellen voor een systeem met een hogere recovery kan bepaald worden welke componenten precies op het membraan adsorberen.

Contacthoekmeting met de sessile-drop methode doet vermoeden dat de foulinglaag is opgebouwd uit hydrofobe componenten. Mogelijke fracties die de foulinglaag vormen zijn dan HOC, Humus en BB.

De componenten die moeilijk door het membraan gaan zullen ophopen ter hoogte van het membraan (dit noemt men concentratiepolarisatie, wat vaak niet als fouling bestempeld wordt). Door concentratiepolarisatie zou normaalgezien de retentie moeten afnemen. De vraag is dan hoe deze componenten zich fysisch gedragen ter hoogte van dat membraan. Indien ze adsorberen op het membraan of indien ze met elkaar en met anderen een netwerk vormen zal ondanks de concentratiepolarisatie de retentie toch toenemen. De resultaten van de SP tonen aan dat de retentie van humus en BB stijgt door fouling. Dit wijst op adsorptie van deze componenten. Dit is ook merkbaar in de toenemende fluxdaling door fouling.

Vermoedelijk bestaat de foulinglaag dus uit een netwerk van humus en BB geadsorbeerd op het membraan. Neutralen en amfifielen zullen ook aanwezig zijn in de foulinglaag. Ze zullen niet geadsorbeerd worden in de foulinglaag en zullen weinig hinder ondervinden van de foulinglaag.

De hydrofobe lipiden zouden op het eerste zicht sterk aangetrokken moeten worden door zowel de foulinglaag als het membraan. Toch is voor deze een zeer lage retentie waargenomen. Het hydrofobe karakter van de lipiden belet niet dat ze door de foulinglaag worden aangetrokken. Vanwege hun kleine grootte zullen ze echter gemakkelijk doorheen de foulinglaag en het membraan permeëren.

Ook voor polysacchariden werd een verdacht kleine retentie waargenomen. Dit is echter verwonderlijk aangezien dit stoffen zijn met zeer hoge MM. Een mogelijke hypothese omtrent deze waarneming is het fenomeen "creeping". Polysacchariden hebben een lange lineaire structuur. Ze zouden daarom doorheen het membraan kunnen kruipen.

7.4 Calcium vormt complexen met NOM

In de theorie werd besproken hoe de aanwezigheid van calcium NOM-fouling kan verhogen door complexvorming. Slechts met het water van Spannenburg kon calcium-NOM complexvorming aangetoond worden. Ongeveer 20% van het aanwezige calcium was gecomplexeerd met NOM.

Het NOM van Weesperkarspel vormde geen calciumcomplexen. Dit is mogelijk te wijten aan de coagulatie die dit water heeft ondergaan in Loenderveen, maar het kan ook te wijten zijn aan de lagere calciumconcentratie.

7.5 Effect van calcium-NOM complexvorming op fouling

De calciumconcentratie van Spannenburg (100 mg Ca/l) was hoger dan die van Weesperkarspel (77 mg Ca/l) en gaf ook een grotere fluxdaling. Door calcium-complexvorming en cross-linking zal de lading van de humusmaterialen veel minder negatief zijn. Hierdoor zullen de humusmaterialen gemakkelijker geadsorbeerd worden op het membraan. Hoge calciumconcentraties resulteren in een hogere fluxdaling.

De invloed van calciumionen op NOM-fouling kon ook worden aangetoond door het effect van ontharding op de flux. Dit effect werd aangetoond door de fluxverlopen. De ontharding van Spannenburg (78 mg Ca/l) is groter dan die van Weesperkarspel (29 mg Ca/l). Het fluxdalingsverschil van Spannenburg (30%) was dan ook groter dan dat van Weesperkarspel (20%).

7.6 Verband tussen contacthoek en vervuiling

De sessile-drop methode is een eenvoudige manier om de hydrofobiciteit van een membraan en van een foulinglaag te bepalen. De captive-bubble methode is moeilijker uit te voeren en geeft geen betrouwbare resultaten.

Een membraan dat slechts 46 uren vervuild werd met NOM bleek een minder hoge hydrofobiciteit te hebben dan de membranen die 7 dagen behandeld werden. Dit is slechts één tussenwaarde en er zouden meer experimenten moeten gebeuren om een verband te kunnen aantonen tussen de ernst van de fouling en de hydrofobiciteit.

Er kon door contacthoekmeting ook geen verschil gevonden worden tussen de foulinglagen van de verschillende behandelingen van Weesperkarspel.

7.7 Het nut van de analysemethoden

LC-OCD verdeelt NOM in fracties die nuttig zijn voor onderzoek naar NOM-fouling. De methode geeft kwantitatieve waarden in het ppb-bereik, waardoor zelfs de concentraties van de verschillende fracties in permeaatstromen kunnen opgemeten worden. LC-OCD is in staat om massabalansen op te stellen, zodat de samenstelling van een foulinglaag bepaald zou kunnen worden. Dit kon met het MTA niet aangetoond worden omdat de recovery te laag was.

Excitatie-emissie fluorescentie geeft een semi-kwantitatieve voorstelling van het NOM. Deze methode geeft een algemeen beeld over de aanwezigheid van humus en DOC. Het voordeel van deze methode is dat ze aanzienlijk goedkoper is dan LC-OCD.

Er is getracht een correlatie te vinden tussen de concentratie gemeten door LC-OCD en de intensiteit gemeten door fluorescentie. Er kon slechts een weinig overtuigende correlatie gevonden worden.

Voor onderzoek naar NOM-fouling lijkt LC-OCD de meest geschikte methode.

7.8 Hypothese voor de opbouw van de foulinglaag

Concentratiepolarisatie veroorzaakt een ophoping van zowel NOM als calcium ter hoogte van het membraanoppervlak.

Negatief geladen humusmaterialen (humus en BB) zullen met calcium complexen vormen waardoor hun negatieve lading verminderd. Hierdoor zullen ze elkaar minder afstoten en zal onder invloed van Van der Waalskrachten de humusmaterialen een netwerk vormen op het membraanoppervlak. Calcium versterkt deze aantrekking door humusmaterialen met elkaar te verbinden door cross-linking. In principe zouden de negatieve humusmaterialen afgestoten worden door het membraan, maar door de mindere lading zullen ze toch aangetrokken worden. Dit resulteert in een netwerk van humusmaterialen verstevigd door de aanwezigheid van calcium dat verbonden is met het membraan.

Naarmate het voedingswater doorheen de foulinglaag wordt gestuwd, zullen de humusmaterialen worden tegengehouden door de foulinglaag. Waarschijnlijk zullen ze de foulinglaag aanvullen doordat ze aan de foulinglaag adsorberen. Hierdoor zal de foulinglaag steeds toenemen, waardoor de fluxdaling niet naar een constante waarde streeft.

8 Aanbevelingen voor verder onderzoek

8.1 Fluxexperimenten

8.1.1 Experimenten

Werken bij 10 bar gedurende 4 dagen zou voldoende zijn om fouling te verkrijgen. Dit is ook een meer realistische druk bij nanofiltratie.

1000 ppm MgSO_4 gebruiken bij karakterisatie zodat de retentie beter bepaald kan worden. Aangezien de retentie toch moeilijk bepaald kan worden, zou de karakterisatie ook kunnen gebeuren met MilliQ water. Door de schoonwaterflux op te meten kan de Kw waarde ook bepaald worden. De Kw-waarde van de karakterisatie na fouling zal aan nauwkeurigheid winnen omdat de foulinglaag niet verstoord wordt door magnesiumionen.

Door de recovery te verhogen zou een massabalans opgesteld kunnen worden. Hierdoor zou ook de samenstelling van de foulinglaag bepaald kunnen worden. Dit kan gebeuren door een recycle van het concentraat naar de voeding.

pH en conductiviteit hoeven niet opgemeten te worden tijdens de fluxexperimenten. De tijd die nodig is om deze metingen uit te voeren zou gebruikt kunnen worden om meer fluxen op te kunnen meten, vooral in het begin van de proef.

8.1.2 Watertype

Water van Spannenburg voor ontharding lijkt de beste oplossing om foulingexperimenten op uit te voeren. Het water van Spannenburg na ontharding kan ook nog gebruikt worden om experimenten uit te voeren voor calcium-NOM complexvorming.

Het gebruik van het water van Spannenburg vereist het gebruik van een voorfilter. Deze voorfilter bleek geen grote invloed te hebben op de samenstelling van het NOM. Deze filter zou wel elke maand vervangen moeten worden om microbiologische groei te vermijden.

8.2 Analyses

LC-OCD blijkt een goede methode voor de analyse van NOM. De meetresultaten zijn zeer nauwkeurig en de karakterisering van het NOM gebeurt door een fractionering die relevant is voor dit soort onderzoek.

LC-OCD zou gebruikt kunnen worden om massabalansen uit te rekenen, maar dit moet bij hogere recovery gebeuren om betrouwbare resultaten te leveren.

Fluorescentie geeft eerder een algemene indruk over de concentratie van het DOC en de hoeveelheid humusmaterialen. Er kon echter geen humus worden waargenomen in het permeaat.

Het is een goedkope methode die eerder een semi-kwantitatief beeld geeft van het NOM. De methode zal nog veel moeten verbeterd worden voordat er resultaten kunnen geleverd worden die nuttig kunnen zijn in dit soort onderzoek.

8.3 Contacthoekmeting

De sessile-drop methode geeft grote verschillen tussen een vervuild en een niet vervuild membraan. De captive-bubble methode geeft weinig betrouwbare resultaten.

Daarom wordt aangeraden om contacthoekmetingen uit te voeren met de sessile-drop methode door directe foto-opname.

Er zou verder onderzoek gevoerd kunnen worden naar het verband tussen de contacthoek en de mate van vervuiling. Dit kan gebeuren door een membraan te vervuilen gedurende 1 dag, 2 dagen, 3 dagen, 5 dagen en 7 dagen.

8.4 Calciumcomplex

Er wordt aangeraden om water van Spannenburg voor ontharding te gebruiken voor verder onderzoek naar complexvorming. Er zouden ook experimenten kunnen verricht worden met het water van Spannenburg na ontharding om te zien of door toevoeging van calcium de complexvorming toeneemt.

De 300 mg/l dosering gaf de beste resultaten. Hogere doses zijn echter niet vereist aangezien bijna al het negatief geladen NOM opgenomen wordt (70%).

9 Literatuur

Artikels

- [1] AMY, G., CHO, J., "Interactions between natural organic matter (NOM) and membranes : rejection and fouling", *Water Science and Technology*, (1999), vol.40, nr.9, p.131-139.
- [2] AMY, G., HER, N, Size exclusion chromatography (SEC) with multiple detectors: a powerful tool in treatment process selection and performance monitoring, *Water Science and technology: Water Supply*, vol. 4, p. 19-24.
- [3] BAKER, A., WARD, D., LIETEN, S.H., PERIERA, R., SIMPSON, E.C., SLATER, M., Measurement of protein-like fluorescence in river and waste water using a handled spectrophotometer, *Water Research*, vol. 38, (2004), p. 2934- 2938.
- [4] BIAN, R., WATANABE, Y., TAMBO, N., OZAWA, G., "Removal of humic substances by UF and NF membrane systems", *Water Science and Technology*, (1999), vol.40, nr. 9, p.121-129.
- [5] BOB, M., WALKER, H.W., "Enhanced adsorption of natural organic matter on calcium carbonate particles through surface charge modification", *Colloids and surfaces: physicochemical and Engineering Aspects*, (2001), nr.191, p. 17-25.
- [6] Chen, J., C., LI, Q., ELIMELECH, M., "In situ monitoring techniques for concentration polarization and fouling phenomena in membrane filtration", *Advances in colloid and interface science*, (2004), nr. 107, p. 83-108.
- [7] CHILDRESS, A., E., ELIMELECH, M., "Relating nanofiltration membrane performance to membrane charge (elektrokinetic) characteristics", *Environmental Science and Technology*, (2000) nr. 34, p. 3710-3716
- [8] CHO, J., AMY, G., PELLEGRINO, J., "Membrane filtration of natural organic matter: factors and mechanisms affecting rejection and flux decline with charged ultrafiltration (UF) membrane", *Journal of Membrane Science*, (2000) nr.164, p.89-110.
- [9] CHO, J., AMY, G., PELLEGRINO, J., YOON, Y., "Characterization of clean and natural organic matter (NOM) fouled NF and UF membranes, and foulants characterization", *Desalination*, (1998), nr.118, p.101-108.
- [10] CHO, J., SOHN, J., CHOI, H., KIM, S., AMY, G., "Effects of molecular weight cutoff, f/k ratio (a hydrodynamic condition), and hydrophobic interactions on natural organic matter rejection and fouling in membranes", *Journal of Water Supply: Research and Technology*, (2002), nr. 51.2, p. 109-123
- [11] DRIKAS, M., "Recent advances in NOM removal", *2nd IWA leading-edge conference on water and wastewater treatment technologies, abstracts, Prague, Czech Republic, 1-4 june 2004*, p. 65-67.
- [12] EIKEBROKK, B., VOGT, R., D., LILTVED, H., "NOM increase in Northern European source waters: discussion of possible causes and impacts on coagulation/contact filtration processes", *Water, Science and Technology: Water Supply*, vol. 4, nr. 4, p. 47-54.
- [13] FEARING, D., A., BANKS, J., WILSON, D., HILLIS, P., H., CAMPBELL, A., T., PARSONS, S., "NOM control options: the next generation", *Water Science and Technology: Water Supply*, (2004), Vol. 4, nr. 4, p. 139-145
- [14] FRIMMEL, F., H., SARAVIA, F., GORENFLO, A., "NOM removal from raw waters by membrane filtration", *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 4, p. 165-174
- [15] GÜL, S., "effects of ozonation on characteristics of aquatic fulvic acid", *Turkish Journal of Chemistry*, (2002), nr. 26, p. 287-293
- [16] HER, N., AMY, G., FOSS, D., CHO, Y., YOON, Y., KOSENKA, P., "Optimization of Method for Detecting and Characterizing NOM by HPLC-Size Exclusion

Chromatography with UV and On-Line DOC Detection", *Environmental Science and Technology*, (2002), vol.36, nr.5, p.1069-1076.

- [17] HER, N., AMY, G., JARUSUTTHIRAK, C., "Seasonal variations of nanofiltration (NF) foulants : identification and control", *Proceedings of the Conference on Membranes in Drinking and Industrial Water Production, Desalination Publications, L'aquila, Italy, oktober 2002*, vol. 2, p. 257-274
- [18] HER, N., AMY, G., MC KNIGHT, D., SOHN, J., YOON, Y., "Characterization of DOM as a function of MW by fluorescence EEM and HPLC-SEC using UVA, DOC, and fluorescence detection", *Water Research*, (2003) nr.37, p.4295-4303.
- [19] HER, N., AMY, G., YOON, J., SONG, M., "Novel methods for characterizing algogenic organic matter and associated nanofiltration membrane fouling", *Water Science and Technology: Water supply*, (2003), vol.3, nr.5-6, p.165-174.
- [20] HOEK, E., M., V., ELIMELECH, M., "Cake-enhanced concentration polarization: A new fouling mechanism for salt-rejection membranes", *Environmental science and technology*, (2003), nr. 37, p. 5581-5588.
- [21] HONG, S., ELIMELECH, M., "Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes", *Journal of Membrane Science*, (1997), nr. 132, p.159-181.
- [22] HUBER, S., A., "Evidence for membrane fouling b specific TOC constituents", *Desalination*, (1998), nr. 119, p. 229-234.
- [23] HUBER., S., A., FRIMMEL, F., H., "Direct gel chromatographic characterization and quantification of marine dissolved organic carbon using high-sensitivity DOC detection", *Environmental science and technology*, (1994), vol. 28, p. 1194-1197.
- [24] JACANGELO, J-G., Strategies for removal of natural organic matter by pressure driven membrane processes, *Montgomery Watson USA*, p.17
- [25] KHAYET, M., MENGUAL, J.I., "Effect of salt concentration during the treatment of humic acid solutions by membrane distillation", *Desalination*, (2004), nr.168, p.373-381.
- [26] KILDUFF, J.E., MATTARAJ, S., BELFORT, G., "Flux decline during nanofiltration of naturally-occurring dissolved organic matter: effects of osmotic pressure, membrane permeability, and cake formation", *Journal of Membrane Science*, (2004), nr.239, p.39-53.
- [27] KÖRDEL, W., DASSENAKIS, M., LINTELMANN, J., PADBERG, S., "The importance of natural organic material for environmental processes in waters and soils", (1997), *Pure and Applied Chemistry*, vol. 69, nr. 7, p. 1571-1600.
- [28] KWEON, J. H. , LAWLER, D. F., "Evaluating Precipitative Softening as a Pretreatment for Ultrafiltration of a Natural Water", *Environmental Engineering Science*, (2002), vol.19, nr.6, p.531.
- [29] LEE, H., AMY, G., CHO, J., YOON, Y., MOON, S-H., KIM, I., S., "Cleaning strategies for flux recovery of an ultrafiltration membrane fouled by natural organic matter", *Water Research*, (2001), vol. 35, nr. 14, p. 3301-3308.
- [30] LEE, S., MOON, J., YIM, S.K., MOON, S.H., CHO, J., "The relationship between flux decline of NF membranes witht NOM transport characteristics: convection vs. diffusion", *Desalination*, (2002), nr.147, p.237-241.
- [31] LEE, S., SHIM, Y., KIM, I.S. SOHN, J., YIM, S.K., CHO, J., "Determination of mass transport characteristics for natural organic matter (NOM) in ultrafiltration (UF) and nanofiltrtration (NF) membranes, *Water science and Technology*, (2002), vol.2, nr.2, p.151-160.
- [32] Li, Q. , ELIMELECH, M., "Natural organic matter fouling and chemical cleaning of nanofiltration membranes".
- [33] LI, Q., ELIMELECH, M., "Organic Fouling and Chemical Cleaning of Nanofiltration Membranes: Measurements and Mechanisms", *Environmental Science and Technology*, (2004), vol.38, nr.17, p.4683-4693.
- [34] LIKANE, R., YLI-KUIVILE, J., LAUKKANEN, R., "Efficiency of various chemical

- cleanings for NF membrane fouled by conventionally-treated surface water", *Journal of Membrane Science*, (2002), nr.195, p.265-276.
- [35] LIU, C., CAOTHIEN, S., HAYES, J., CAOTHUY, T., "Membrane chemical cleaning : From art to science".
- [36] MARHABA, T., F., VAN, D., LIPPINCOTT, R., L., "effects of ozonation vs chlorination water treatment operations on natural organic matter fractions", 16 pagina's.
- [37] MATTARAJ, S., KILDUFF, J.E., "Crossflow membrane filtration for removing natural organic matter: factors affecting flux reduction", *Department of Environmental and Energy Engineering*, p.373-383.
- [38] MATTARAJ, S., KILDUFF, J.E., "Crossflow membrane filtration for removing natural organic matter: factors affecting flux reduction", p.373-383.
- [39] MATTARAJ, S., SENSIBAUGH, J.E., PIERACCI, J.P., BELFORT, G., KILDUFF, J.E., "Effects of natural organic matter on nanofiltration membrane fouling and mitigation by membrane surface modification", niet gepubliceerd, "4th topical conference on separations science and technology", 1999, 31 oktober tot 5 november, Dallas Texas
- [40] NG, H., Y., ELIMELECH, M., "Influence of colloidal fouling on rejection of trace organic contaminants by reverse osmosis", *Journal of membrane science*, (2004), nr. 224, p. 215-226
- [41] ORECKI, A., TOMASZEWSKA, M., KARAKULSKI, K., MORAWSKI, A.W., "Surface water treatment by nanofiltration method", *Desalination*, (2004), nr.162, p.47-54.
- [42] ROUDMAN, A., R., DIGIANO, F., A., "Surface energy of experimental and commercial nanofiltration membranes : effects of wetting and natural organic matter fouling", *Journal of Membrane Science*, (2000), nr. 175, p. 61-73
- [43] SCHÄFER, A.I., FANE, A.G., WAITE, T.D., "Fouling effects on rejection in the membrane filtration of natural waters", *Desalination*, (2000), October, vol.1, p.411-420.
- [44] SCHÄFER, A.I., FANE, A.G., WAITE, T.D., "Nanofiltration of natural organic matter: Removal, fouling and the influence of multivalent ions", *Desalination*, (1998), nr.188 p.109-122.
- [45] SEIDEL, A., ELIMELECH, M., "Coupling between chemical and physical interactions in natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes: implications for fouling control", *Journal of Membrane Science*, (2002), nr.203 p.245-255.
- [46] SHALAN, H. F., "Development of fouling control strategies pertinent to nanofiltration membranes", *Desalination*, (2002), nr.153, p.125-131.
- [47] Shim, Y., Lee, H.J., Lee, S., MOON, S-H., CHO, J., "Effects of natural organic matter and ionic species on membrane surface charge", *Environmental Science and Technology*, (2002), nr.36, p.3864-3871.
- [48] SONG, W., RAVINDRAN, V., KOEL, B.E., PIRBAZARI, M., "Nanofiltration of natural organic matter with H₂O₂/UV pre-treatment: fouling mitigation and membrane surface characterization", *Journal of Membrane Science*, (2004), nr.241, p. 143-160
- [49] STEDMON, C.A., MARKAGER, S., BRO, R., Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy, *Marine Chemistry*, (2003), vol. 82, p. 239-254.
- [50] THORSEN, T., "Membrane filtration of humic substances – State of the art", *Water Science and Technology*, (1999), vol.40, nr. 9, p.105-112.
- [51] VAN DER BRUGGEN, B., BRAEKEN, L., VANDECASTEELE, C., "Evaluation of parameters describing flux decline in nanofiltration of aqueous solutions containing organic compounds", *Desalination*, (2002), nr.147, p.281-288.
- [52] VAN DER BRUGGEN, B., VERBERK, J.Q.J.C., VERHACK, J., "comparison of pressure-driven membrane processes and traditional processes for drinking water production in Europe on specific impact criteria", *Water SA*, (2004), July, vol.30, nr.3, p.413-419
- [53] WEND, C.F., STEWART, P.S., JONES, W., CAMPER, A.K., "Pretreatment for membrane water treatment systems: laboratory study", *Water research*, (2003), nr.37, p.3367-3378.

- [54] WENDLER, B., GOERS, B., WOZNY, G., "Nanofiltration of solutions containing surfactants - prediction of flux decline and modelling of mass transfer", *Desalination*, (2002), nr.147, p.217-221.
- [55] YOON, Y., AMY, G., CHO, J., HER, N., "Effects of retained natural organic matter (NOM) on NOM rejection and membrane flux decline with nanofiltration and ultrafiltration", *Desalination*, (2004), nr.1xx, p.000-000.
- [56] ZHAO, Y., TAYLOR, J., HONG, S., NORBERG, D., "Influence of membrane surface properties and feed water qualities on RO/NF mass transfer", *American Water Works Association, Annual conference*, (2004).

Boeken

- [57] AWWA Research foundation, "Polar NOM: characterization, DBP's, treatment, AWWA research foundation and American water works association, (2001).
- [58] CORNELISSEN, E., "Membrane fouling in waste water filtration: causes, consequences and prevention", *proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor aan de universiteit Twente*, 171 pagina's
- [59] MOEL, P., J., VERBERK, J., Q., J., C., VAN DIJK, J., C., "Drinkwater – principes en praktijk", *Sdu uitgevers bv. Den Haag*, (2004), 366 pagina's
- [60] MULDER, M., *Basic principles of membrane technology*, second edition, *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, 1996, 555 pagina's
- [61] SCHÄFER, A.-I., FANE A.-G., WAITE, T.-D., *Nanofiltration-Principles and applications*, *Elsevier Advanced Technology*, Oxford, 2005, 560 pagina's.

Andere

- [62] FEARING, D., A., "Process options for the treatment of humic rich waters", (Ph. D. thesis, Cranfield University, School of water sciences), april 2004, 204 pagina's
- [63] HUBER, S., "LC-OCD (Liquid Chromatography – organic carbon detection), information brochure", (2004), 7 pagina's.
- [64] LIERS, S., *Eenheidsbewerkingen*, academiejaar 2004-2005, code CHE 2.12.07
- [65] PAON, M., "Membrane fouling due to the presence of natural organic matter, first attempt to show fouling of nanofiltration membranes on bench scale", *KIWA NV, Water Research*, augustus 2004, 86 pagina's
- [66] Resultaat van conferentie: Natural Organic Material Research: Innovations and Applications for Drinking Water, Whaler's Inn, Victor Harbor, Zuid-Australië, 2-5 maart 2004.
- [67] Berlijn 2001, Resultaat van CRCWQT, AwwaRF en Vivendi Water workshop: Relating NOM Characteristics to Improvements in Water Treatment Process Selection and Performance, conferentie Berlijn 12 oktober 2001, "Utilization of NOM characteristics to improve process selection and performance".
- [68] SIEGERS, W., "Overzicht van de korrelreactoren in Nederland", *KIWA NV, Water Research*, februari 2003, 204 pagina's
- [69] SIEGERS, W., G., BRINKMANN, T., ABBT-BRAUN, G., FRIMMEL, F., H., IJPELAAR, G., F., "Characterisation of NOM in water: impacts of oxidation with respect to biological activated carbon filtration, 12 pagina's

- [70] SIEGERS, W., PAON, M., BOURIGH, A., "NOM characterisation methods for water treatment, an overview based on literature and internet sources", *KIWA NV, Water Research*, december 2004, 29 pagina's
- [71] WOODWARD, R.P., "Contact angle measurements using the drop shape method", *First Ten Angstroms*, 8 pagina's
- [72] Zeta-Meter, inc., "Everything you want to know about coagulation & flocculation", vierde editie, april 1993, 41 pagina's.

Internet sites

- [73] <http://www.gewater.com>
- [74] <http://www.hydracell.com>
- [75] <http://www.kiwa.nl>
- [76] <http://www.vito.be>
- [77] <http://www.trisep.com>
- [78] <http://www.humintech.com>
- [79] <http://www.lenntech.com>
- [80] <http://scholar.google.com>
- [81] <http://membranes.nist.gov>
- [82] <http://www.doc-labor.de>
- [83] <http://firsttenangstroms.com/>

10 Bijlagen

Bijlage I : Pellet ontharding

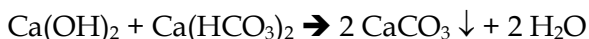
Praktische uitvoering

Afhankelijk van de hoeveelheid calcium in het water en de hoeveelheid water, zal de ontharding gebeuren via één of twee korrelreactoren, gevuld met fijne zandkorrels. Deze zandkorrels worden in beweging gebracht door de opwaartse snelheid van het water doorheen de reactor. De dosering van natronloog (NaOH) in combinatie met het grote contactoppervlak tussen de zandkorrels en het water, zorgt ervoor dat het calciumcarbonaat afgezet wordt op de korrels. De aangegroeide zandkorrels (pellets) komen door hun gewicht onderaan in de reactor terecht, waar ze afgetapt worden. Bovenaan wordt de reactor met zand bijgevuld, ter vervanging van de afgetapte pellets. Vaak zal de uitgaande stroom van de pelletreactor een te hoge pH hebben. Daarom zal men na ontharding vaak CO₂ of een zuur toevoegen.

Deze pellets worden vervolgens afgevoerd en kunnen gebruikt worden in de landbouw (als landbouwkalk) of in de cementindustrie.

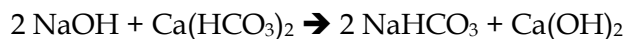
Werkingsprincipe

Ontharding wordt verkregen door toevoeging van kalkmelk (Ca(OH)₂) aan water. De kalkmelk zal dan met calciumbicarbonaat (Ca(HCO₃)₂) reageren om vast Calciumcarbonaat (CaCO₃) te vormen..



De kalkmelk kan zuiver worden toegevoegd of kan ter plekke gevormd worden door toevoeging van natronloog of ongebluste kalk:

- Door natronloog (NaOH) aan het water toe te voegen vindt volgende reactie plaats:

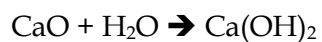


De totale reactie wordt dan :

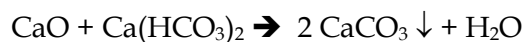


Hier vindt er een uitwisseling plaats tussen natrium en calcium. Waters met hoge hardheid verbruiken veel natronloog, waardoor het water na behandeling natrium kan bevatten. Dit blijven aanzienlijk kleine concentraties, maar het kan vermeden worden indien er gebruik wordt gemaakt van ongebluste kalk (CaO).

- Ongebluste kalk reageert meteen met het water om kalkmelk te vormen



De totale reactie wordt dan :



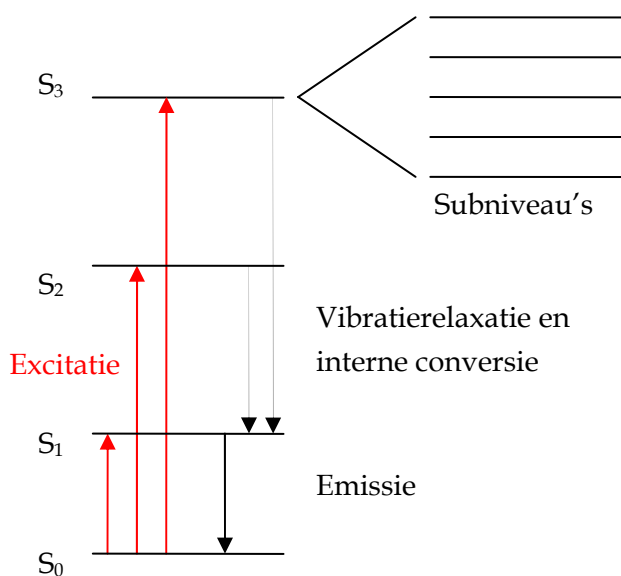
Pellet ontharding is niet geschikt voor verwijdering van magnesium. Het aanwezige magnesium zal in de vorm van Mg(OH)_2 neerslag vormen. Deze neerslag heeft een vervuilende werking op de pelletreactor vanwege haar lossere structuur. Indien er gekozen wordt voor ontharding van Mg(OH)_2 , zal er een andere methode aangewend moeten worden.

Calcium vertoont reeds goede neerslag bij pH-waarden tussen 9,5 en 10,5. Neerslag van Mg(OH)_2 bekomt men echter alleen maar vanaf pH 10,5. Indien men magnesium zal willen verwijderen zal een hogere dosering nodig zijn.

Bijlage II : Excitatie-emissie fluorescentie

De EEM metingen zijn uitgevoerd met gebruik van een lamp en een excitatie spectograaf, die verticaal worden gericht op de vloeistof. De EEM meting wordt gestart bij een excitatie van 200 nm, telkens met verhoging van 5 nm. De emissie wordt opgemeten vanaf 280 nm tot 500 nm, dit per 2 nm stijging. De metingen worden vijf maal herhaald bij een constante temperatuur van 20°C.

Wanneer een molecuule straling absorbeert (energie), wordt er een elektron geëxciteerd naar een onbezet orbitaal, dat opgebouwd is uit meerdere subniveau's. Het energieverschil tussen de grondtoestand S_0 en de geëxciteerde toestanden (S_1 , S_2 of hoger) bepaalt de golflengte waarbij het licht wordt geabsorbeerd.



Figuur 8.4-1: voorstelling van de energie niveau's met subniveau's

Emissie wordt gevolgd door niet-radioactieve relaxatie naar het laagste subniveau van de S_1 toestand, door vibratierelaxatie en interne conversie. Interne conversie en fluorescentie zorgen voor de relaxatie tot de grondtoestand S_0 . De golflengte van de fluorescentie emissie wordt bepaald door het energieverschil tussen de verschillende niveau's en S_0 . [STEDMON, 2003]

Bijlage III : LC-OCD

Algemeen

LC-OCD maakt een eerste scheiding van de verschillende componenten door vloeistofchromatografie, om daarna de verschillende componenten te kwantificeren met OCD.

Liquid Chromatography (LC)

Vloeistofchromatografie of size exclusion chromatography (SEC) is een fysische scheidingstechniek waarbij een vloeistof doorheen een lange capillaire kolom wordt voortgeduwd. Deze kolom is aan de binnenzijde gepakt met poreuze korrels waarin kleine moleculen makkelijk diffunderen. Dit noemt men de stationaire fase. De mobiele fase is de te scheiden stroom. De snelheid waarmee de componenten van de mobiele fase de kolom zullen verlaten hangt af van de haar affiniteit voor de stationaire fase.

Kleine moleculen diffunderen gemakkelijk in de stationaire fase. Bijgevolg zullen grotere moleculen sneller doorheen de kolom bewegen dan kleine. De affiniteit van een component voor de stationaire fase is niet alleen afhankelijk van de molecuulengrootte, maar ook van ion-interacties en hydrofobe interacties met de stationaire fase. Deze drie interacties maken de interpretatie van de resultaten complex, maar door vele studies is men erin geslaagd om de juiste fracties eruit te kunnen halen.

Het gevolg van deze scheiding is dat alle componenten een voor een de uitgang zullen bereiken naargelang hun affiniteit met de stationaire fase. De verblijftijd in de kolom wordt de retentietijd genoemd.

Organic Carbon Detection (OCD)

Nadat de componenten een voor een uit de kolom stromen, wordt de hoeveelheid van elke fractie bepaald met een OCD. Hiervoor werd een Graentzel thin film reactor gebruikt. In deze reactor worden de koolstofatomen van de verschillende organische stoffen omgezet naar CO₂. Deze omzetting gebeurt onder invloed van zuurstofradicalen. Deze worden aangemaakt met behulp van een sterke 185nm lage druk kwiklamp. Door de sterke UV-bestraling van water verkrijgt men de nodige zuurstofradicalen. Het vrijgekomen CO₂ wordt gemeten met behulp van infrarood spectroscopie.

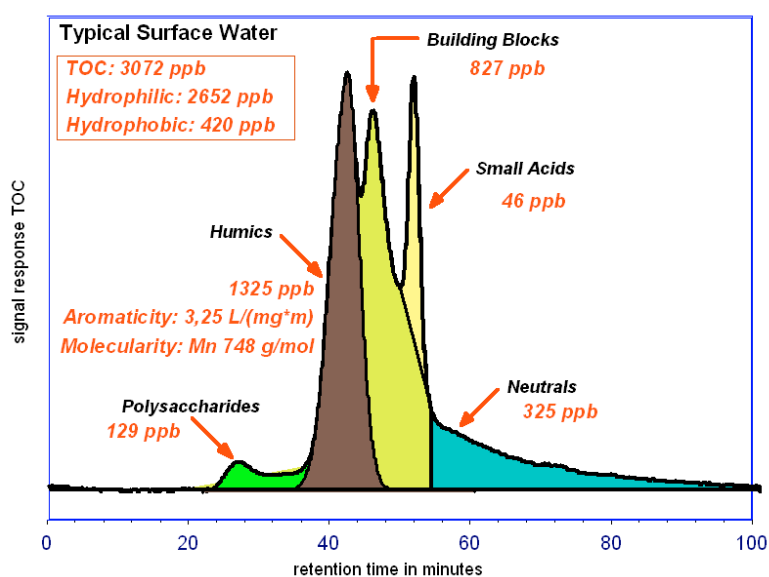
Combinatie van de kwalitatieve waarden van LC en de kwantitatieve waarden van OCD geeft resultaten een chromatogram waarbij de reactie van de OCD grafisch wordt uitgezet ten opzichte van de tijd.

SUVA

In de resultaten van het DOC-labor worden zowel de SUVA van het TOC als van het humus gemeten. De SUVA van de humusfractie is een goede indicator voor de aromaticiteit van het humus.

Interpretatie

Sinds 1997 gebruikt DOC-Labor een zelf ontwikkelde software (FIFFIKUS) voor de definitie van de grenzen van de verschillende fracties. Dit geeft een chromatogram (Figuur 8.4-2) waarin elk begrensd gebied een bepaalde fractie voorstelt. Door oppervlakte-integratie kunnen deze vlakken gekwantificeerd worden tot werkelijke meetwaarden.



Figuur 8.4-2 Bepaling van de verschillende fracties

Bijlage IV : Fluxverlopen

Weesp voor ozonisatie (A)

A	tijd min	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	EGV F μS/cm	EGV C μS/cm	EGV P μS/cm	Kw m/(s.bar)	R %
NF	80	2,51	2,5	27,2	27	0,18	698	699	36	1,72E-06	96,4%
	100	2,5	2,5	27,2	27	0,18	687	694	36	1,72E-06	96,4%
F	50	2,55	2,53	26,86	26,74	0,12	647	645	25	1,13E-06	97,5%
	100	2,55	2,52	27,2	27,1	0,129	652	650	23	1,22E-06	97,8%

tijd uur	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	R -	J L/m ² .h	pHf	pHc	pHp	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Gp μS/cm
1,5	15,00	14,9	27,2		1,185	4,36%	89,74	7,890	7,857	6,472	557	585	62,9	
20,0	15,20		30,3		0,885	2,92%	67,02							15
24,0	15,27		29,6		0,87	2,94%	65,88							15
44,5	15,09		27,5		0,81	2,94%	61,34							16
50,1	15,11		26,5		0,78	2,94%	59,07							16
68,0	15,13		25,2		0,735	2,92%	55,66							16
71,5	15,02		25,2		0,735	2,92%	55,66							16
139,1	15,10		26,5		0,615	2,32%	46,57							19
143,3	15,10		26,5		0,615	2,32%	46,57	8,567	8,560	8,430	556	571	71,3	18
163,3	15,10		26,9		0,6	2,23%	45,44							18

Weesp voor ozonisatie bij 16,2 bar (A')

tijd uur	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	R -	J L/m ² .h	pHf	pHc	pHp	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Gp μS/cm
2,0	16,2	16,19	27,2	25,8	1,36	5,00%	103	7,787	7,836	7,100	548	566	43	39
18,0	16,18	16,17	26,9	25,8	1,02	3,80%	77,2	8,353	8,354	8,159	545	555	39	31
20,0	16,2	17,19	27,2	26,2	1	3,70%	75,7	8,380	8,380	8,311	537	552	34,4	31
22,0	16,2	16,19	27,2	26,2	0,98	3,60%	74,2					552	31	31
23,0	16,2	16,19	27,2	26,2	0,96	3,50%	72,7	8,426	8,460	8,194	538	552	34,9	31
24,0	16,2	16,19	27,2	26,2	0,96	3,50%	72,7	8,445	8,460	8,349	538	554	34,6	31
44,0	16,4		26,5		0,78	2,90%	59,1							28,1
46,0	16,63		24,5		0,72	2,90%	54,5							28,4

Weesp tussen ozonisatie en ontharding (B)

B	tijd min	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	EGV F μS/cm	EGV C μS/cm	EGV P μS/cm	Kw m/(s.bar)	R %
NF	80	2,49	2,47	27,2	27,044	0,156	614	614	42	1,50E-06	95,0%
	120	2,51	2,49	27,2	27,032	0,168	614	617	36	1,61E-06	95,8%
F	75	2,48	2,46	27,2		0,084	607	597	56	8,15E-07	92,9%
	105	2,5	2,48	27,2		0,084	600	604	54	8,11E-07	93,1%

tijd uur	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	R -	J L/m ² .h	pHf	pHc	pHp	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Gp μS/cm
1,5	15	14,98	27,2	26,13	1,073	3,94%	81,25	7,888	7,860	6,655	531	551	31,7	29
3,3	15,06	15,04	27,2	26,09	1,11	4,08%	84,06	8,013	8,030	6,700	531	552	26,2	25
4,8	15,08	15,06	27,2	26,1	1,1	4,04%	83,30	8,073	8,121	6,596	530	554	25,1	24
26,5	15,57	15,55	27,2	26,27	0,93	3,42%	70,43							
28,5	15,08	15,06	27,2	26,42	0,78	2,87%	59,07							
145,1	15,06	15,04	27,2	26,76	0,44	1,62%	33,32	8,573	8,568	7,757	584	596	30,6	28
155,6	14,7	14,68	27,2	26,78	0,42	1,54%	31,81	8,556	8,578	7,720	582	597	28,2	27

Weesp tussen ozonisatie en ontharding (B')

B'	tijd min	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	EGV F μS/cm	EGV C μS/cm	EGV P μS/cm	Kw m/(s.bar)	R %
NF	100	2,5	2,48	27,2	27	0,2	704	683	47	1,86E-06	95,2%
	150	2,49	2,47	27,2	27	0,2	680	675	47	1,88E-06	95,0%
F	50	2,55	2,53	27,2	27,13	0,07	668	673	34	7,04E-07	96,5%
	90	2,56	2,54	27,2	27,12	0,08	653	657	30	7,31E-07	96,9%
	110	2,58	2,56	27,2	27,12	0,08	664	657	28	7,56E-07	97,2%

tijd uur	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	R -	J L/m ² .h	pHf	pHc	pHp	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Gp μS/cm
1,0	15	14,98	27,2		1,23	4,52%	93,15	7,831	7,803	6,087	544	568	38,5	29
2,0	15	14,98	27,2		1,245	4,58%	94,28	7,967	7,919	6,925	544	566	34	26
3,0	14,97	14,95	27,2		1,23	4,52%	93,15	7,998	8,006	6,928	544	567	31,7	26
22,0	15,02	15	27,2		1,05	3,86%	79,52							22
27,3	15,07	15,05	27,2		1,01	3,71%	76,49							22
48,3	15,06	15,04	27,2		0,986	3,63%	74,67							20
50,5	15,13	15,11	27,2		0,96	3,53%	72,70							19
69,5	14,9	14,88	27,2		0,876	3,22%	66,34							19
72,7	15	14,98	27,2		0,852	3,13%	64,52							19
141,7	15,02	15	27,2		0,72	2,65%	54,52							28

Weesp na ontharding (C)

C	tijd min	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	EGV F μS/cm	EGV C μS/cm	EGV P μS/cm	Kw m/(s.bar)	R %
NF	85	2,5	2,49	27,2	27,035	0,165	708	708	141	1,58E-06	83,7%
	130	2,51	2,5	27,2	27,03	0,17	724	726	141	1,63E-06	84,1%
F	60	2,53	2,5	27,2	27	0,153	682	702	10,1	1,45E-06	99,5%
	100	2,49	2,47	27,4	28	0,156	691	700	9,8	1,51E-06	99,5%

tijd uur	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	R -	J L/m ² .h	pHf	pHc	pHp	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Gp μS/cm
1,2	15,16	15,15	27,2	26,03	1,173	4,31%	88,83	7,927	7,868	6,478	502	521	38	34,7
2,4	15,04	15,03	27,2	26,02	1,185	4,36%	89,74	7,881	7,872	6,530	500	520	34,5	29,7
2,7	15,06	15,02	27,2	26,01	1,187	4,36%	89,89	7,955	8,050	6,515	501	523	27,5	25,6
3,7	14,94	14,92	27,2	26,03	1,17	4,30%	88,6							
21,3	14,98	14,96	27,6	26,51	1,095	3,97%	82,92	8,465	8,449	7,220	498	515	18,6	16,3
22,9	15,06	15,04	27,2	26,11	1,095	4,03%	82,92	8,360	8,357	7,190	499	518	18,3	16,5
25,4	15,02	15	27,2	26,11	1,093	4,02%	82,77	8,501	8,415	7,370	503	519	18,5	16,6
25,7	15,00	14,98	26,8	25,71	1,087	4,06%	82,33							16,6
26,9	15,06	15,04	26,8	26	1,08	4,03%	81,79	8,424	8,397	7,203	501	520	18,8	16,5
45,4	15,00		27,2	26,18	1,022	3,76%	77,39							16,9
50,2	15,05		27,2		1,043	3,83%	78,99							17,1
70,5	14,98		27,2		0,975	3,58%	73,84							18,1
74,0	15,00		27,2		0,975	3,58%	73,84							18
94,7	14,96		27,2		0,958	3,52%	72,55							18,8
99,0	14,97		27,2		0,93	3,42%	70,43							18,9
188,7	14,99	14,97	27,2	26,5	0,837	3,08%	63,39	8,739	8,703	9,908	529	542	64,7	19,9
190,4	15,00	14,98	27,2	27	0,834	3,07%	63,16	8,800	8,380		530	539	68,6	19,9

Spannenburg voor behandeling (D)

D	tijd min	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Kw m/(s.bar)	R %
NF	95	2,51	2,49	27,2	27,042	0,158	665	643	18,4	1,52E-06	98,4%
	110	2,52	2,5	27,2	27,041	0,159	667	647	18,1	1,52E-06	98,5%

tijd uur	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	R -	J L/m ² .h	pHf	pHc	pHp	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Gp μS/cm
1,3	15,00	15,49	27,2	26,2	1,035	3,81%	78,38	7,203	7,158		663	690	55,5	33,4
19,3	15,01	15	27,2	27,0	0,21	0,77%	15,90	8,073	8,110	7,105	645	649	44,3	30,7
20,8	15,04	15,03	27,2	27,0	0,18	0,66%	13,63							
44,8	14,93	14,92	27,2	27,2	0,03	0,11%	2,27							79,3
48,2	14,87	14,86	27,2	27,2	0,024	0,09%	1,82							86,4
68,4	15,12	15,11	27,2	27,2	0,018	0,07%	1,36							16,9
71,8	15,20	15,19	27,2	27,2	0,015	0,06%	1,14							20,4
91,8	15,80	15,79	27,2	27,2	0,017	0,06%	1,27							70,4
95,8	16,53	16,52	27,2	27,2	0,016	0,06%	1,21							126,2

Spannenburg voor ontharding met voorfilter (E)

E	tijd min	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Kw m/(s.bar)	R %
NF	125	2,5	2,48	27,2	27,02	0,18	668	651	70	1,87E-06	91,9%
	185	2,52	2,5	27,2	27,01	0,19	648	658	68	1,95E-06	91,9%
F	45	2,52	2,5	27,2	27,1025	0,0975	597	610	91	9,34E-07	87,6%
	120	2,5	2,48	27,2	27,095	0,105	608	610	89	1,01E-06	88,2%

tijd uur	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	R -	J L/m ² .h	pHf	pHc	pHp	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Gp μS/cm
1,6	14,97	14,95	27,2		1,23	4,52%	93,15	8,233	8,223	6,966	626	655	54	39
3,4	15,12	15,1	27,2		1,067	3,92%	80,78	8,099	8,055	6,604	600	622	34	30
4,8	15,22	15,2	27,2		0,99	3,64%	74,97	8,130	8,106	7,232	585	600	38	27
22,6	15,05	15,03	27,2		0,557	2,05%	42,19	8,220	8,233	7,983	475	476	42	16
25,9	15,02	15	27,2		0,555	2,04%	42,03	8,249	8,252	8,826	456	465	35	15
28,3	15,10	15,03	27,2		0,525	1,93%	39,76	8,277	8,264	8,953	451	456	28	15
46,5	15,03	15,01	27,2		0,51	1,88%	38,62	8,366	8,400	8,818	411	415	26	14
49,7	15,03	15,01	27,2		0,51	1,88%	38,62	8,410	8,411	9,060	407	404	26	15
52,0	15,08	15,06	27,2		0,51	1,88%	38,62	8,421	8,404	8,968	396	410	23	15
69,7	15,09	15,07	27,2		0,51	1,88%	38,62	8,464	9,136	9,136	397	398	22	15
73,3	15,01	14,99	27,2		0,51	1,88%	38,62	8,475	9,235	9,235	391	396	23	15
76,1	15,02	15	27,2		0,51	1,88%	38,62	8,486	9,137	9,137	390	395	23	14
143,7	14,96	14,94	27,2		0,443	1,63%	33,51	8,548	8,558	8,650	395	399	21	12
145,2	15,04	15,02	27,2		0,45	1,65%	34,08	8,542	8,555	8,785	385	393	23	12

Spannenburg voor ontharding zonder voorfilter (E')

E'	tijd min	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Kw m/(s.bar)	R %
NF	70	2,5	2,48	27,2	27,014	0,186	688	693	32	1,79E-06	96,9%
	110	2,5	2,48	27,2	27,008	0,192	691	703	29	1,85E-06	97,2%

tijd uur	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	R -	J L/m ² .h	pHf	pHc	pHp	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Gp μS/cm
0,3	15,02	15	27,2	25,5	1,725	6,34%	130,63							
1,0	15,12	15,1	27,2	26,1	1,111	4,08%	84,13	7,620	7,640	6,293	668	693	32,1	28,6
2,3	15,04	15,02	27,2	25,9	1,26	4,63%	95,42	7,778	7,824	6,222	668	705	27,8	25,6
3,3	15,00	14,98	27,2	25,9	1,275	4,69%	96,55	7,885	7,900	6,558	670	701	24,7	24,5
4,3	15,32	15,12	27,2	26,0	1,25	4,60%	94,66	7,977	7,980	6,793	670	696	24,3	23,6
5,6	15,10	15,08	27,2	26,0	1,2	4,41%	90,87	8,051	8,033		668	693	23,3	23,0
26,6	15,01	14,99	27,2	27,2	0,007	0,03%	0,53							236
31,2	15,03	15,01	27,2	27,2	0,007	0,03%	0,53							232
48,4	15,01	14,99	27,2	27,2	0,007	0,03%	0,51							189
54,2	15,04	15,02	27,2	27,2	0,007	0,02%	0,50							190
72,0	15,04	15,02	27,2	27,2	0,004	0,02%	0,33							183
76,9	15,01	14,99	27,2	27,2	0,004	0,02%	0,33							182

Spannenburg na ontharding (F)

F	tijd min	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Kw m/(s.bar)	R %
NF	80	2,57	2,55	27,2	26,98	0,22	686	691	42	1,92E-06	95,6%
	150	2,57	2,55	27,2	26,975	0,225	689	698	41	1,94E-06	95,8%
F	60	2,57	2,55	27,2	27,1175	0,0825	671	676	24	7,59E-07	97,8%
	180	2,55	2,53	27,2	27,095	0,105	676	676	23	9,34E-07	97,9%

tijd uur	Pf bar	Pc bar	Qf l/h	Qc l/h	Qp l/h	R -	J L/m ² .h	pHf	pHc	pHp	Gf μS/cm	Gc μS/cm	Gp μS/cm	Gp μS/cm
1,0	15,12	15,1	27,2	26,0	1,23	4,52%	93,15							30
1,8	15,02	15	27,2	25,9	1,35	4,96%	102,23	7,959	7,966		509	535	31,6	27
4,0	15,02	15	27,2	25,9	1,35	4,96%	102,23	8,050	8,071	6,870	513	543	29,3	24
5,0	15,04	15,02	27,2	25,9	1,275	4,69%	96,55	8,122	8,120	7,252	504	528	27,6	22
6,0	15,02	15	27,2	25,9	1,26	4,63%	95,42	8,125	8,135	7,030	508	541	29,2	24
24,5	14,95	14,93	27,2	26,5	0,705	2,59%	53,39							26
28,8	15,03	15,01	27,2	26,5	0,675	2,48%	51,12							25
48,2	15,01	14,99	27,2	26,7	0,5	1,84%	37,86							29
54,4	14,97	14,95	27,2	26,7	0,49	1,80%	37,11							27
71,9	15,02	15	27,2	26,8	0,45	1,65%	34,08							26
76,7	15,04	15,02	27,2	26,7	0,495	1,82%	37,49							30
147,1	15,05	15,03	27,2	26,9	0,34	1,25%	25,75	8,788	8,781		506	505		28
147,5	15,08	15,06	27,2	26,9	0,345	1,27%	26,13	8,782	8,788		506	505		27

Bijlage V : Resultaten DOC

Weesp voor ozonisatie (A)

	TOC	DOC	POC	HOC	CDOC	PS	Humus	Aromat.	MM	BB	N/A	OZ	Anorg	SUVA
	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	SAC/DOC	g/mol	ppb	ppb	ppb	SAC	
	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	L/(mg*m)		%TOC	%TOC	%TOC	1/m	L/(mg*m)
feed 1	5594	5433	160	181	5252	76	2258	2,52	665	1765	1103	51	0,16	1,73
	100	97,1	2,9	3,2	93,9	1,4	40,4	--	--	31,5	19,7	0,9	--	
Conc 1	5729	5380	350	54	5326	86	2442	2,49	675	1890	833	75	0,03	1,91
	100	93,9	6,1	0,9	93	1,5	42,6	--	--	33	14,5	1,3	--	
Perm 1	379	339	40	134	205	21	59	1,7	688	64	61	0	0,07	1,08
	100	89,6	10,4	35,5	54,1	5,5	15,5	--	--	16,9	16,2	0	--	
Feed 2	5276	5134	142	44	5090	71	2349	2,5	675	1811	791	68	0,02	1,92
	100	97,3	2,7	0,8	96,5	1,3	44,5	--	--	34,3	15	1,3	--	
Conc 2	5604	5230	374	62	5168	69	2389	2,5	675	1820	823	66	0	1,93
	100	93,3	6,7	1,1	92,2	1,2	42,6	--	--	32,5	14,7	1,2	--	
Perm 2	149	133	16	45	88	31	n.n.	--	n.n.	20	33	4	0,04	0,72
	100	89,4	10,6	30	59,4	21,1	--	--	--	13,4	22,4	2,5	--	

Weesp tussen ozonisatie en ontharding (B)

	TOC	DOC	POC	HOC	CDOC	PS	Humics	Aromat.	MM	BB	N/A	OZ	Anorg	SUVA
	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	SAC/DOC	g/mol	ppb	ppb	ppb	SAC	
	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	L/(mg*m)		%TOC	%TOC	%TOC	1/m	L/(mg*m)
feed 1	5006	4926	80	82	4844	80	1813	3,08	686	1847	938	166	0,01	1,52
	100	98,4	1,6	1,6	96,8	1,6	36,2	--	--	36,9	18,7	3,3	--	
Conc 1	5270	5065	204	92	4973	79	1884	3,02	691	1872	970	170	0	1,5
	100	96,1	3,9	1,7	94,4	1,5	35,7	--	--	35,5	18,4	3,2	--	
Perm 1	236	221	15	99	122	7	35	2,41	596	23	43	14	0,03	0,59
	100	93,5	6,5	41,8	51,7	2,9	14,7	--	--	10	18,1	6,1	--	
Feed 2	6209	5678	530	179	5499	74	2058	3,05	684	2077	1103	188	0	1,37
	100	91,5	8,5	2,9	88,6	1,2	33,1	--	--	33,5	17,8	3	--	
Conc 2	5983	5504	479	43	5461	72	2094	3,03	687	2062	1048	185	0	1,4
	100	92	8	0,7	91,3	1,2	35	--	--	34,5	17,5	3,1	--	
Perm 2	191	190	1	72	118	7	28	1,84	553	13	70	0	0,02	0,21
	100	99,7	0,3	37,6	62,1	3,7	14,7	--	--	6,9	36,6	0,2	--	

Weesp na ontharding (C)

	TOC	DOC	POC	HOC	CDOC	PS	Humics	Aromat.	MM	BB	N/A	OZ	Anorg	SUVA
	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	SAC/DOC	g/mol	ppb	ppb	ppb	SAC	
	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	L/(mg*m)		%TOC	%TOC	%TOC	1/m	L/(mg*m)
feed 1	4861	4615	246	177	4438	76	1669	2,12	671	1793	811	89	0,01	1,63
	100	94,9	5,1	3,6	91,3	1,6	34,3	--	--	36,9	16,7	1,8	--	
Conc 1	5020	4754	266	119	4635	80	1773	2,11	667	1847	844	92	0,01	1,6
	100	94,7	5,3	2,4	92,3	1,6	35,3	--	--	36,8	16,8	1,8	--	
Perm 1	173	171	2	77	94	25	n.n.	--	n.n.	28	36	5	0,04	0,76
	100	98,6	1,4	44,4	54,2	14,3	--	--	--	15,9	20,9	3	--	
Feed 2	4671	4569	102	163	4406	41	1719	2,12	670	1784	792	70	0	1,71
	100	97,8	2,2	3,5	94,3	0,9	36,8	--	--	38,2	17	1,5	--	
Conc 2	5027	4620	406	190	4430	42	1748	2,06	664	1807	750	82	n.n.	1,67
	100	91,9	8,1	3,8	88,1	0,8	34,8	--	--	35,9	14,9	1,6	--	
Perm 2	86	86	0	45	41	8	n.n.	--	n.n.	12	17	4	0,02	0,47
	100	99,9	0,1	52,7	47,2	8,9	--	--	--	14,4	19,7	4,2	--	

Spannenburg voor ontharding met filter (E)

	TOC	DOC	POC	HOC	CDOC	PS	Humics	Aromat.	MM	BB	N/A	OZ	Anorg	SUVA
	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	SAC/DOC	g/mol	ppb	ppb	ppb	SAC	
	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	L/(mg*m)		%TOC	%TOC	%TOC	1/m	L/(mg*m)
feed 1	7224	6802	421	26	6776	5	2700	3,18	685	2560	1395	116	0	2,52
	100	94,2	5,8	0,4	93,8	0,1	37,4	--	--	35,4	19,3	1,6	--	
Conc 1	8024	7172	851	174	6999	4	2860	3,18	689	2635	1386	114	0	2,53
	100	89,4	10,6	2,2	87,2	0,1	35,6	--	--	32,8	17,3	1,4	--	
Perm 1	232	224	8	75	148	6	49	2,69	575	23	70	0	0,02	1,45
	100	96,5	3,5	32,5	64	2,5	21,3	--	--	9,9	30,1	0,2	--	
Feed 2	7561	6860	702	54	6806	4	2722	3,22	682	2648	1301	131	0,02	2,43
	100	90,7	9,3	0,7	90	0,1	36	--	--	35	17,2	1,7	--	
Conc 2	7957	7074	883	295	6779	10	2758	3,25	683	2615	1282	114	0,01	2,53
	100	88,9	11,1	3,7	85,2	0,1	34,7	--	--	32,9	16,1	1,4	--	
Perm 2	111	103	8	42	62	5	20	1,58	564	10	27	0	0,02	0,87
	100	93,1	6,9	37,6	55,5	4,5	17,6	--	--	8,8	24,6	0	--	

Spannenburg voor ontharding zonder filter (E')

	TOC	DOC	POC	HOC	CDOC	PS	Humics	Aromat.	MM	BB	N/A	OZ	Anorg	SUVA
	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	SAC/DOC	g/mol	ppb	ppb	ppb	SAC	
	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	L/(mg*m)		%TOC	%TOC	%TOC	1/m	L/(mg*m)
	7449	7215	234	174	7041	9	3053	3,24	769	2336	1504	139	0,01	2,47
feed 1	100	96,9	3,1	2,3	94,5	0,1	41	--	--	31,4	20,2	1,9	--	
	8040	7659	381	513	7146	3	3244	3,22	752	2380	1399	120	0,03	2,44
Conc 1	100	95,3	4,7	6,4	88,9	0	40,4	--	--	29,6	17,4	1,5	--	
	138	135	2	43	92	4	32	2,1	723	20	36	0	0,03	1,55
Perm 1	100	98,2	1,8	31,1	67,1	3	23,5	--	--	14,8	25,9	0	--	

Spannenburg na ontharding (F)

	TOC	DOC	POC	HOC	CDOC	PS	Humics	Aromat.	MM	BB	N/A	OZ	Anorg	SUVA
	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	SAC/DOC	g/mol	ppb	ppb	ppb	SAC	
	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	%TOC	L/(mg*m)		%TOC	%TOC	%TOC	1/m	L/(mg*m)
feed 1	7222	6951	272	303	6648	11	2841	3,22	751	2366	1317	113	0,16	2,74
	100	96,2	3,8	4,2	92	0,2	39,3	--	--	32,8	18,2	1,6	--	
Conc 1	7934	7653	280	650	7004	8	3042	3,16	752	2466	1362	126	0,27	2,73
	100	96,5	3,5	8,2	88,3	0,1	38,3	--	--	31,1	17,2	1,6	--	
Perm 1	155	149	6	67	82	3	29	2,03	726	19	29	3	0,06	1,08
	100	96,2	3,8	43,1	53,1	1,6	18,9	--	--	12	18,6	2	--	
Feed 2	7557	6924	633	290	6634	4	2919	3,25	761	2321	1256	134	0,12	2,47
	100	91,6	8,4	3,8	87,8	0	38,6	--	--	30,7	16,6	1,8	--	
Conc 2	7936	7288	648	543	6745	5	3014	3,16	749	2346	1254	127	0,17	2,44
	100	91,8	8,2	6,8	85	0,1	38	--	--	29,6	15,8	1,6	--	
Perm 2	139	135	4	63	71	4	21	1,45	748	12	34	0	0,04	0,89
	100	97,1	2,9	45,7	51,5	2,9	15,4	--	--	8,6	24,6	0	--	

Bijlage VI : SUVA-metingen

SUVA (l/(mg*m))		non-fouling				fouling			
		voeding	conc	perm	verschil	voeding	conc	perm	verschil
type	A	1,73	1,91	1,08	0,74	1,92	1,93	0,72	1,21
	B	1,52	1,50	0,59	0,92	1,37	1,40	0,21	1,18
	C	1,63	1,60	0,76	0,86	1,71	1,67	0,47	1,22
	E	2,52	2,53	1,45	1,08	2,43	2,53	0,79	1,69
	E'	2,47	2,44	1,55	0,91	-	-	-	-
	F	2,47	2,44	0,89	1,57	2,74	2,73	1,08	1,66

Bijlage VII : Eigenschappen van de humusfracties

SAC/DOC

SAC/DOC (l/(mg*m))		non-fouling				fouling			
		voeding	conc	perm	verschil	voeding	conc	perm	verschil
type	A	2,52	2,49	1,7	0,81	2,5	2,5	-	-
	B	3,08	3,02	2,41	0,64	3,05	3,03	1,84	1,20
	C	2,12	2,11	-		2,12	2,06	-	-
	E	3,18	3,18	2,69	0,49	3,22	3,25	1,58	1,66
	E'	3,24	3,22	2,10	1,13	-	-	-	-
	F	3,25	3,16	1,45	1,76	3,22	3,16	2,03	1,16

MM

MM g/mol		non-fouling				fouling			
		voeding	conc	perm	verschil	voeding	conc	perm	verschil
type	A	665	675	688	18	675	675	-	-
	B	686	691	596	-93	684	687	553	-133
	C	671	667	-	-	670	664	-	-
	E	685	689	575	-112	682	683	564	-119
	E'	769	752	723	-38	-	-	-	-
	F	761	749	748	-7	751	752	726	-26

Bijlage VIII : Resultaten Fluorescentie

Weesperkarspel voor ozon

Voeding non-fouling	Concentraat non-fouling	Permeaat non-fouling
Voeding fouling	Concentraat fouling	Permeaat fouling
N.G.	N.G.	N.G.

Weesperkarspel na ozon en voor ontharding

Voeding non-fouling	Concentraat non-fouling	Permeaat non-fouling
Voeding fouling	Concentraat fouling	Permeaat fouling

Weesperkarspel na ontharding

Voeding non-fouling	Concentraat non-fouling	Permeaat non-fouling
Voeding fouling	Concentraat fouling	Permeaat fouling

Spannenburg voor ontharding

Voeding non-fouling	Concentraat non-fouling	Permeaat non-fouling
Voeding fouling	Concentraat fouling	Permeaat fouling
N.G.	N.G.	N.G.

Spannenburg voor ontharding na voorfiltratie

Voeding non-fouling	Concentraat non-fouling	Permeaat non-fouling
Voeding fouling	Concentraat fouling	Permeaat fouling

Spannenburg na ontharding

Voeding non-fouling	Concentraat non-fouling	Permeaat non-fouling
Voeding fouling	Concentraat fouling	Permeaat fouling

Bijlage IX : Intensiteiten opgemeten bij fluorescentie

		Intensiteit		Intensiteit		Intensiteit
NF A	Voeding	146,2	Concentraat	157,1	Permeaat	90
NF B		169		178,1		100
NF C		73,5		74,7		100
NF E		341,7		363,1		120
NF E'		346,4		358		130
NF F		334,6		344		220
F A	Voeding	144	Concentraat	144,6	Permeaat	0
F B		183,6		191,9		200
F C		75,4		82,6		10
F E		349,4		361		130
F F		328,6		332,4		100

Bijlage X : Contacthoekmetingen

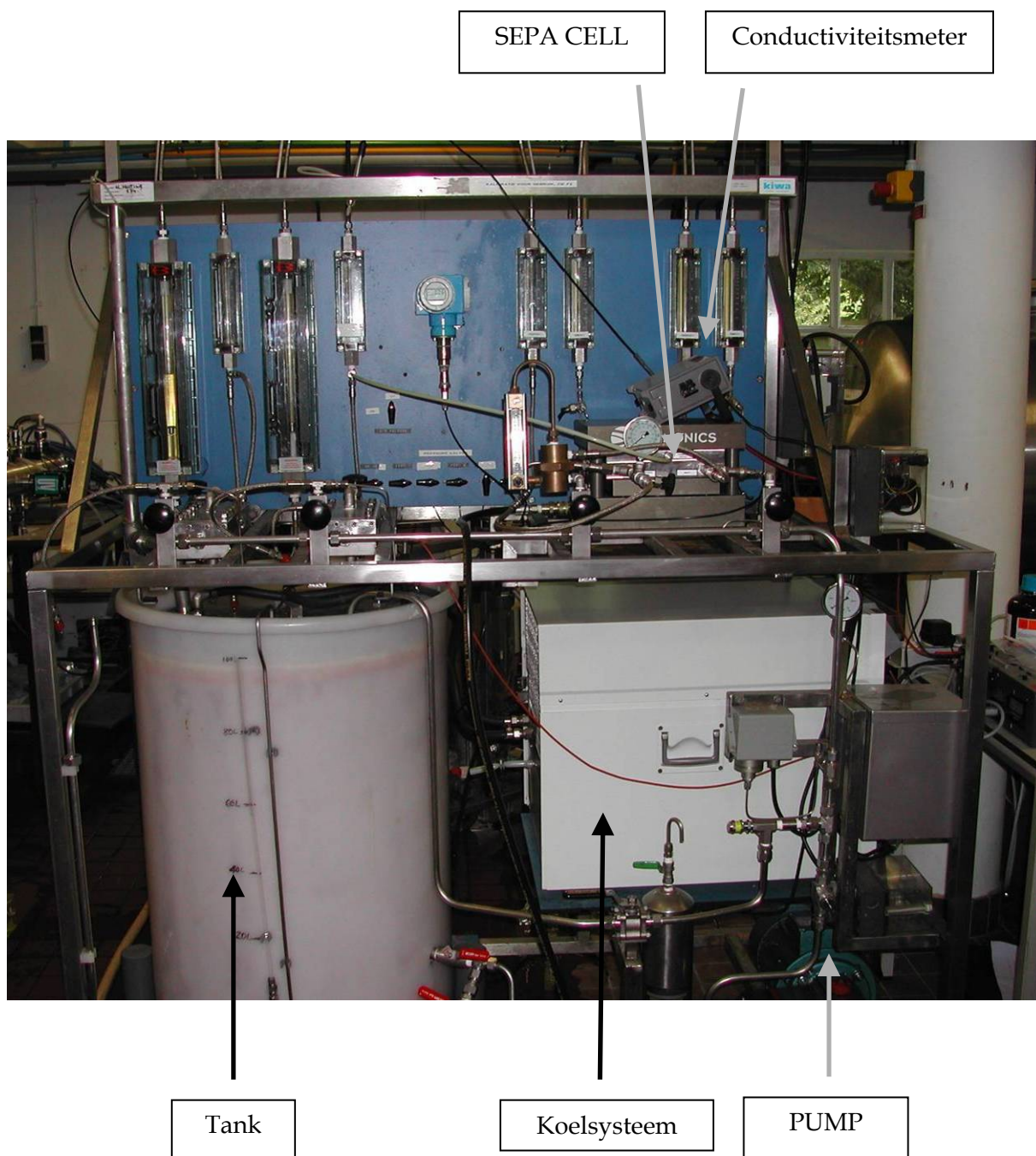
Sessile drop

membraan	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b	Contacthoek
X	26	29	32	34	35	41	43	52	39	39	37,0±5,8
Y	26	32	26	31	26	29	21	24	39	42	29,6±5,1
A	52	50	60	50	45	53	55	54	47	63	52,9±4,1
A'	102	98	87	89	90	80	88	91	80	81	88,6±5,4
B	89	90	81	76	99	94	95	102	94	80	90,0±6,8
C	84	83	92	92	97	92	93	87	89	90	89,9±3,3

Captive bubble

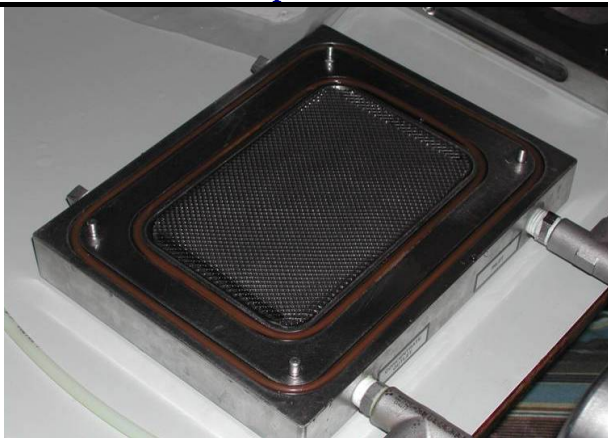
membraan	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b	contacthoek
X	130	130	135	130	135	140	135	135	135	145	135,0±3,0
A	115	115	120	120	120	115	135	130	115	120	120,5±4,8
A'	115	120	120	115	115	110	115	120	120	115	116,5±4,8
B	127	121	121	120	137	122	128	127	134	135	127,2±5,0
B'	120	122	127	132	128	132	142	139	128	124	129,4±5,5
C	119	122	120	122	124	118	124	128	110	105	119,2±5,0
D	127	129	124	135	128	130	143	125	129	129	129,9±3,7
E	119	111	116	119	126	118	121	120	121	128	119,9±3,3
E'	150	141	142	136	149	152	151	148	136	131	143,6±6,4
F	124	137	148	142	150	146	132	129	138	131	137,7±7,1

Bijlage XI : MTA

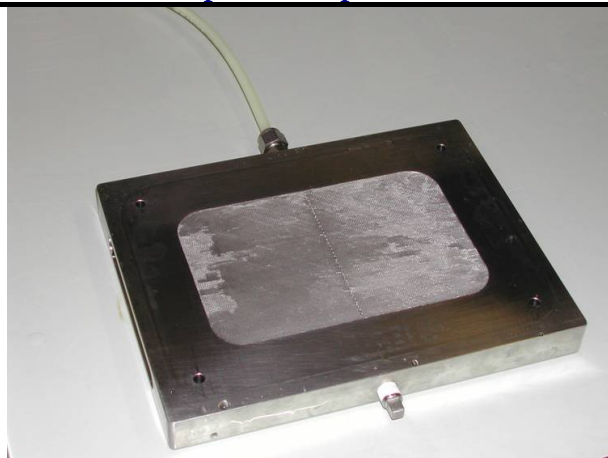


Bijlage XII : SEPA cell

SEPA cell met feedspacer



SEPA cell met permeaatspacer



SEPA cell met membraan



SEPA cell in houder op het MTA



Gesloten SEPA cell met drukmeter



Complete SEPA cell met membraan



parameter	symbool	waarde	eenheid
breedte van de cel	b	0,035	m
lengte van de cel	l	0,146	m
hoogte van de voedingszijde	h	0,001	m
totaal oppervlak membraan	$A_{\text{tot,SEPA}}$	0,027	m ²
actief oppervlak membraan	$A_{\text{eff,SEPA}}$	0,0132	m ²
lengte van het voedingskanaal	l_v	0,082	m
breedte van het voedingskanaal	b_v	0,005	m
dikte permeaatspacer	$d_{\text{sp,SEPA}}$	$0,35 \cdot 10^{-3}$	m
hoogte voedingsspacer	h_{vs}	$0,75 \cdot 10^{-3}$	m
porositeit voedingsspacer	ε_{vs}	0,91	-
lengte voedings- en concentraatkanaal	l_k	$82,20 \cdot 10^{-3}$	m
breedte voedings- en concentraatkanaal	b_k	$4,35 \cdot 10^{-3}$	m

Bijlage XIII : Membraan Trisep 4040-TS80-TSA



PRODUCT SPECIFICATION

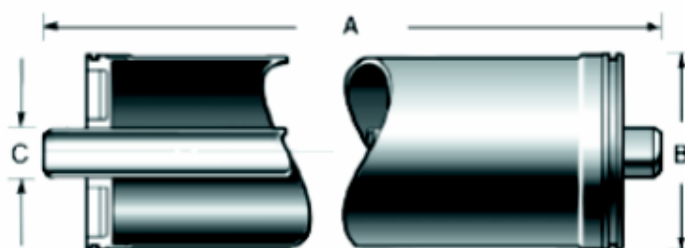
4" TS80 Nanofiltration Element Series

Model	Permeate flow GPD (m3/day)*	Average Salt Rejection (%)	Minimum Salt Rejection (%)
4040-TS80-TSF	2,000 (7.6)	99.00	97.00

Performance is based on the following test conditions: 2000ppm MgSO₄, 110psi, 25°C, 15% recovery, pH8, 30 minutes operation

OPERATIONAL AND DESIGN DATA

Membrane Type.....	ANM Aromatic Polyamide Advanced Nanofiltration Membrane
Configuration.....	Spiral Wound, Fiberglass Outer Wrap
Active Membrane Area.....	81 ft ² (7.5 m ²)
Recommended Applied Pressure.....	40 - 200 psi (3 - 14 bar)
Maximum Applied Pressure.....	600 psi (41 bar)
Recommended Operating Temperature.....	35 - 113°F (2 - 45°C)
Feedwater pH Range.....	4 - 11 continuous
Chlorine Tolerance.....	<0.1 ppm
Maximum Feed Flow.....	20 GPM (4.5 m3/hr)
Minimum Brine Flow / Permeate Flow Ratio...	5:1
Maximum SDI (15 minutes)	5.0
Maximum Turbidity.....	1 NTU



Element Weight:	15 (7)	Diameter (B) :	4.0(102)
Length (A):	40.00 (1016)	Permeate Tube (C) :	0.75 (19.1)

Units in pounds and inches, units in paranthesis in kilograms and millimetres.

Mechanical Configuration: Filmtec Style Core Tube

Feed Spacer: 0.031" thick diamond spacer

* Permeate flow is clean water flux at standard conditions above. Not applicable for all feedwater conditions. Individual element's permeate flow may vary +/- 15%.