

**W G JOHANNES
W A PRETORIUS**

**ELEKTROCHEMIES-GEPRODUSEERDE
METAALKOAGULANTE VIR DIE
SUIWERING VAN BESOEDELDE
WATER**

**Verslag aan die
WATERNAVORSINGSKOMMISSIE
deur die
DEPARTEMENT CHEMIESE INGENIEURSWESE
UNIVERSITEIT VAN PRETORIA**

ELEKTROCHEMIES-GEPRODUSEERDE METAALKOAGULANTE

VIR DIE SUIWERING VAN BESOEDELDE WATER

deur

W G JOHANNES & W A PRETORIUS

VERSLAG AAN DIE WATERNAVORSINGSKOMMISSIE

deur die

DEPARTEMENT CHEMIESE INGENIEURSWESE

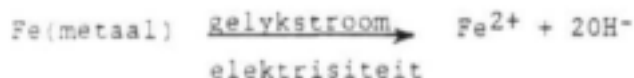
UNIVERSITEIT VAN PRETORIA

WNK Verslag No. 210/1/90
ISBN 0 947447 85 7

OPSOMMING

Die proses van watersuiwering behels gewoonlik die verwydering van ongewenste besoedelingstowwe. Hierdie ongewenste besoedelingstowwe kan opgelos en/of kolloïdaal van geaardheid wees, soos byvoorbeeld fosfate en kolloïdale-deeltjies in oppervlakte- en rioolwater onderskeidelik. Genoemde besoedelingstowwe kan of chemies of biologies verander word sodat dit fisies deur een of ander bekende eenheidsproses verwyder kan word. Een van hierdie prosesse is die chemiese flokkulasie van onsuierhede deur die gebruik van di- en trivalente metaalione. Oor die algemeen word hierdie metaalione in die vorm van chloried- of sulfaatsoute bygevoeg, soos byvoorbeeld ferrichloried en aluminiumsulfaat. Die katioon (metaalkaation) word in die water gehidroliseer tot die ooreenkomstige hidroksied terwyl die anioon as die ooreenkomstige sterk mineraalsuur deur die alkaliniteit van die water (of deur bygevoegde alkaliniteit) tot die ooreenkomstige sout geneutraliseer word. Hoewel die grootste gedeelte van die toegevoegde katioon saam met die onsuierheid verwyder word, bly die anioon of soutgedeelte egter agter. In hierdie opsig word die water wel verhelder dog die prys wat daarvoor betaal word, is 'n verscuting van die water, wat dikwels die hergebruik van sulke gesuiwerde water beperk.

Deur die proses van elektrochemiese produksie van metaalflokkulante word metaalione in situ in die water deur 'n proses van geïnduseerde korrosie vrygestel. Hier word 'n metaal, soos byvoorbeeld yster, as anode gebruik en deur dan gelykstroom elektrisiteit daardeur te stuur, los die yster in water volgens die volgende reaksie op:



Omdat geen suur gevorm word nie, word die natuurlike alkaliniteit van die water nie verbruik nie. 'n Verdere voordeel van die elektrochemiese proses is dat die metaalione in die water doseer kan word sonder om 'n anioniese- of soutresidu in die water na te laat.

Dit sal dus meebring dat die water deur die verwydering van fosfate deur middel van die elektrochemiese proses ontsout of ten minste nie verder versout word nie.

Die doel van hierdie studie was:

- (a) Om die kinetika van die elektrochemiese produksie van metaalkoagulant te bepaal. Faktore wat in aanmerking geneem is, is die geleidingsvermoë van die water, die vorm en chemiese samestelling van die elektrodes, die stroomdigtheid, die konfigurasie van die elektrodes en die spasiëring van die elektrodes.
- (b) Om die optimale benutting van hierdie elektrochemiese beginsel vir die suiwering van riool- en ander besoedelde water te ondersoek.

Hoewel die beginsel van galvaniese korrosie redelik bekend is, is die meeste werk op hierdie gebied gedoen op die voorkoming van korrosie.

Die literatuurstudie, wat vir hierdie navorsing gedoen is, het ook aangetoon dat daar nie voldoende inligting beskikbaar is om die energiebehoefte van die elektrochemiese proses te bepaal nie. Gevolglik is daar meer aandag aan die kinetiese studie gegee, omdat hierdie inligting benodig word om die koste-effektiwiteit van die elektrochemiese proses te bepaal. Hierdie inligting is dan gebruik om die elektrochemiese proses met konvensionele chemiese dosering te vergelyk ten opsigte van die doeltreffendheid om fosfate uit water te verwyder, die chemiese suurstofbehoefte (CSB) van rioolwater te verminder en die koste van die twee prosesse.

Ten einde die energiebehoefte van die elektrochemiese proses te bepaal is daar modelle opgestel vir vier verskillende selkonfigurasies, naamlik, die enkel-sel, monopolêre selle in serie geskakel, monopolêre selle in parallel geskakel en bipolêre selle in serie geskakel. Die modelle is eksperimenteel getoets en die bevinding was dat die spanning wat benodig word $\pm 10\%$ minder is as wat die model voorspel indien die elektrodes afgeskerm word om werwelstrome te beperk.

Dit blyk asof die bipolêre selkonfigurasie die mees praktiese stelsel sal wees, maar eksperimentele bevindinge het getoon dat die hoeveelheid metaal wat deur hierdie konfigurasie in die water opgelos word $\pm 25\%$ minder is as wat deur Faraday se Wet voorspel word. Hierdie aspek moet egter in verdere navorsing ge-optimiseer word.

Ten opsigte van fosfaatverwydering en die vermindering van die CSB van rioolwater word daar bevind dat die konvensionele chemiese dosering 5 tot 10% doeltreffender is ten opsigte van die hoeveelheid fosfaat en CSB wat onderskeidelik per eenheid yster doseer uit rioolwater verwyder is.

Die studie het verder getoon dat die kostes van die elektrochemiese proses blyk om van dieselfde orde te wees as konvensionele chemiese dosering. Daar word tot die gevolgtrekking gekom dat verdere navorsing in hierdie veld geregverdig is om sodoende moontlik 'n beter proses vir die suiwing van rioolwater daar te stel.

Aangesien al hierdie navorsing onder laboratoriumtoestande uitgevoer is, kan hierdie proses nog nie direk in die praktyk toegepas word nie. Daar word aanbeveel dat die volgende aspekte verdere navorsing regverdig, om die toepassing van hierdie proses in die praktyk moontlik te bewerkstellig:

- (a) Die model wat in hierdie navorsing opgestel is moet onder loodsskaal-toestande verfyn word en die effektiwiteitsfaktore moet onder loodsskaal-toestande bepaal word.
- (b) Verdere navorsing word benodig om die optimale toestande vir die werking van die elektrochemiese proses te bepaal. Faktore wat in hierdie verband in ag geneem moet word is onder andere die pH en die konsentrasie van die opgeloste suurstof in die water omdat hierdie faktore die werking van die stelsel direk beïnvloed.
- (c) Die elektrochemiese proses moet verder ondersoek word ten opsigte van 'n praktiese opstelling van die stelsel. Hierdie opstelling moet praktiese invloede soos optimale elektrodegrootte, bevulling en verstopping van die

elektrodes, selkonfigurasie, werwelstrome, die posisie waar die stelsel in bestaande en nuwe suiweringsaanlegte aangebring moet word en beroepsveiligheid in ag neem.

- (d) 'n Akkurate ontleding van die koste moet op 'n loodsskaalse stelsel gedoen word ten einde die ekonomiese lewensvatbaarheid van die stelsel te bepaal, veral as in ag geneem word dat baie aspekte in die kostevergelyking in hierdie studie nie in ag geneem is nie.
- (e) Ontwerpriglyne moet vir die praktyk opgestel word sodat die tegnologie, ook toepassing in die water- en rioolwatersuiweringsbedryf kan vind.

DANKBETUIGINGS

Die navorsing wat in hierdie verslag gerapporteer word, spruit voort uit navorsing wat deur die Waternavorsingskommissie (WVK) gefinansier is.

Die Loodskomitee wat vir die projek verantwoordelik was, het uit die volgende persone bestaan:

Mnr J E McGlashan - Waternavorsingskommissie (Voorsitter).

Prof W A Pretorius - Universiteit van Pretoria.

Mnr W G Johannes - Universiteit van Pretoria.

Mnr P W Weideman - Waternavorsingskommissie (Komitee Sekretaris).

- * Die finansiering deur die WVK word met dank erken.
- * Die Universiteit van Pretoria, in besonder die Departement Chemiese Ingenieurswese vir die beskikbaarstelling van die geriewe en laboratorium apparaat vir die navorsing.
- * Die firma Van der Merwe & Louw Ing vir die beskikbaarstelling van Mnr W Johannes vir hierdie navorsing en die finansiële steun aan die projek.
- * Prof R Böhmer van die Departement Chemie van die Universiteit van Pretoria, vir sy hulp, ondersteuning en belangstelling in hierdie projek.

INHOUDSOPGAWE

Bladsy

HOOFSTUK 1: EUTROFISERING EN METODES VIR DIE VERWYDERING VAN FOSFAAT

1.1	Eutrofisering	1.1
1.2	Metodes om fosfaat te verwyder	1.3
1.2.1.	Fisies/chemiese prosesse - konvensioneel	1.3
1.2.2.	Biologiese prosesse - konvensioneel	1.4
1.3	Bespreking	1.5
1.3.1.	Eutrofisering	1.5
1.3.2.	Bestaande suiweringsprosesse	1.5
1.4	Alternatiewe metodes	1.6
1.4.1.	Biologiese prosesse	1.6
1.4.2.	Chemiese prosesse	1.6
1.4.3.	Kristallisering in korrelbedreaktore	1.7
1.4.4.	Elektrochemiese prosesse	1.7

HOOFSTUK 2: DIE GEBRUIK VAN ELEKTROCHEMIESE PROSESSE IN WATERSUIWERING - 'n LITERATUURSTUDIE

2.1	Inleiding	2.1
2.2	Die elektrochemiese ontsmetting van rioolwater	2.1
2.3	Elektrochemiese flokkulantproduksie	2.2
2.3.1.	Die direkte elektrochemiese produksie van metaalflokkulante	2.2
2.3.2.	Die indirekte elektrochemiese produksie van metaalflokkulante	2.5
2.4	Elektroflotteringsprosesse	2.6

2.5	Gevolgtrekking	2.7
HOOFSTUK 3: TEORETIESE AGTERGROND EN DIE ONTWIKKELING VAN 'N PRAKTIESE MODEL VIR DIE VOORSPELLING VAN DIE ENERGIEBEHOEFTE		
3.1	Inleiding	3.1
3.2	Elektrochemiese selle	3.1
3.3	Spanningsvereistes	3.3
3.3.1.	Die ewewigspotensiaal	3.4
3.3.2.	Die oorpotensiaal	3.4
3.3.3.	Die spanning wat nodig is om die weerstand van die sel te oorbrug	3.6
3.3.4.	Saamgestelde vergelyking om die spanning tydens elektrolise te voorspel	3.19
3.4	Kwantifisering van die hoeveelheid produkte wat tydens elektrolise gevorm word	3.21
3.5	Energievereistes vir elektrolise	3.22
3.6	Gevolgtrekking	3.23
HOOFSTUK 4: EVALUERING VAN DIE TEORETIESE MODELLE MET DIE OOG OP PRAKTIESE TOEPASSING		
4.1	Inleiding	4.1
4.2	Eksperimente	4.2
4.2.1.	Eksperiment 1	4.3
4.2.2.	Eksperiment 2	4.6
4.2.3.	Eksperiment 3	4.8
4.2.4.	Eksperiment 4	4.16
4.2.5.	Eksperiment 5	4.18
4.3	Samevatting van die bevindinge	4.22

HOOFSTUK 5: EKONOMIESE VERGELYKING TUSSEN DIE ELEKTROCHEMIESE
PROSES EN DIE KONVENZIONELE CHEMIESE DOSERING

5.1	Inleiding	5.1
5.2	Koste van die elektrochemiese proses	5.1
5.3	Koste van chemiese dosering	5.3
5.4	Gevolgtrekking	5.3
5.5	Aanbevelings	5.4
VERWYSINGS		V.1

LYS VAN SIMBOLE

A	=	oppervlakte van elektrodes (m^2)
a	=	Tafelkonstante (volt)
B	=	breedte van die elektrode (m)
b	=	Tafelkonstante (volt $\cdot m^2$ /ampere)
E_e	=	ewewigspotensiaal (volt)
E_0	=	selfpotensiaal wat 'n konstante van die redokstelsel is (volt)
F	=	Faraday se konstante (96487 coulomb)
f	=	faktor om vir dwaalstrome te voorsien
I	=	elektriese stroom (ampere)
i	=	stroombigtheid (ampere/ m^2)
i_y	=	stroombigtheid oor 'n element van die elektrode (ampere/ m^2)
h	=	koördinaat loodreg op die vlak van die elektrodes
k	=	spesifieke elektriese geleiding van die elektroliet (mho/m)
L	=	Diepte van elektrode in die elektroliet (m)
M	=	molmassa (gram)
N	=	getal selle in konfigurasie
n	=	oorpotensiaal (volt)
n_a	=	oorpotensiaal op die anode (volt)
n_c	=	oorpotensiaal op die katode (volt)
P	=	elektriese krag (Watt)
p	=	atmosferiese druk (kPa)
Q	=	vloeitempo van die elektroliet tussen elektrodes (m^3/s)
R	=	gaskonstante (8,314 kJ/(mol $\cdot$ $^{\circ}$ K))
S	=	afstand tussen elektrodes
T	=	absolute temperatuur ($^{\circ}$ K)
t	=	tyd (sekondes)
V	=	selfspanning (volt)
V_n	=	potensiaal as gevolg van die oorspanning (volt)
V_{ohm}	=	spanning benodig om die weerstand van die sel te oorbrug (volt)
x	=	koördinaat in die elektroliet
y	=	koördinaat in die elektroliet
z	=	koördinaat in die elektroliet
z	=	getal elektrone wat by die reaksie betrokke is
z_a	=	elektronoordragstyd by die anode
z_c	=	elektronoordragstyd by die katode
ϕ_s	=	potensiaal van 'n arbitrêre punt in die elektroliet (volt)
ϕ_{sa}	=	potensiaal op anode (volt)
ϕ_{sc}	=	potensiaal op katode (volt)

ELEKTROCHEMIES GEPRODUSEERDE METAALKOAGULANTE VIR DIE VERWYDERING VAN

FOSFAAT UIT RIOOLWATER

HOOFSTUK 1

EUTROFISERING EN METODES VIR DIE VERWYDERING VAN FOSFAAT

Die Republiek van Suid-Afrika is 'n betreklik droë land sonder noemenswaardige natuurlike damme of mere. Die hoeveelheid water tot sy beskikking is dus beperk en alle beskikbare waterbronne sal na verwagting teen die jaar 2020 ten volle benut wees (Slim, 1987).

Ten einde voldoende water vir die land se behoeftes te voorsien, moet water kunsmatig opgegaar word, waardeur die ewewig in die natuur in die omgewing van die dam versteur word. Anorganiese soute word uit die bodem van die dam geloog totdat die ewewigstoestand bereik word. Die verdamping van die water uit die dam lei verder daartoe dat die konsentrasie van soute in die dam styg.

As gevolg van die beperkte hoeveelheid water wat beskikbaar is, moet die beskikbare water so doeltreffend moontlik gebruik en hergebruik word. Dit veroorsaak 'n stelselmatige opbou van anorganiese en organiese besoedelingstowwe in die water, waarvan die opbou van plantnutriënte seker die duidelikste teken is. 'n Oormaat konsentrasie van plantnutriënte veroorsaak 'n sekondêre probleem wat as eutrofisering bekend staan.

1.1. Eutrofisering

Eutrofisering is uiteraard die ongewenste verryking van water met plantnutriënte, wat tot 'n oormatige groei van plante in die water aanleiding gee (Müller et al. 1974). 'n Dam word as eutrofies beskou indien dit in staat is om 'n oormatige groei van ongewenste waterplante en mikro-organismes aan die gang te sit en in stand te hou, wat daartoe sal lei dat die water minder geskik vir gebruik word (Pretorius, 1983).

Die probleme wat deur die eutrofisering van damme veroorsaak word, is kortliks soos volg (Best, 1982):

- 'n Verhoogte koste vir die suiwing van water vir huishoudelike gebruik.
- 'n Gesondheidsrisiko vir mens en dier deurdat gifstowwe deur sommige alge geproduseer word.
- 'n Verswakking van die ontspanningswaarde van die water.
- 'n Verswakking van die gehalte van die water, wat dit minder geskik vir die landbou maak.
- Estetiese probleme wat uit slegte reuke by die damme en 'n slegte smaak van die water blyk.
- Oewerontwikkeling kan deur die eutrofisering van die damme belemmer word, wat tot groot finansiële verliese vir die betrokke eienaars kan lei.

Die elemente wat vir lewe nodig is, is waterstof (H), suurstof (O), koolstof (C), stikstof (N), fosfor (P), swael (S) en 'n menigte van mikro-elemente (WNK, 1984). Hierdie elemente is in 'n bepaalde verhouding tot mekaar vir biologiese groei nodig. Indien die konsentrasie van een van hierdie stowwe buite verhouding tot die ander verlaag word, verminder die potensiële groei van plante ooreenkomstig die konsentrasie van hierdie beperkende element. Dit is dan ook hierdie beginsel wat as basis gebruik is in die formulering van wetgewing ten einde die eutrofisering van die waterbronne te beperk (Best, 1986).

Navorsing deur Toerien en medewerkers (Toerien, 1975; Toerien et al., 1975) het aangetoon dat fosfaat in meerendeel van die Suid-Afrikaanse waterbronne, die belangrikste groeibeperkende nutriënt ten opsigte van eutrofisering is. Hierdie navorsingsgegewens lê ten grondslag van 'n wysiging van die Waterwet, Wet No. 54 van 1956, ten opsigte van die fosfaatkonsentrasie van water wat in sekere geïdentifiseerde sensitiewe gebiede in openbare strome en riviëre gestort mag word.

1.2. Metodes om fosfaat te verwyder.

Tans word daar in Suid-Afrika veral van twee metodes gebruik gemaak om fosfaat uit rioolwater te verwyder, naamlik fisies/chemiese en biologiese prosesse.

1.2.1 Fisies/chemiese prosesse - konvensioneel.

Die fisies/chemiese prosesse van watersuiwering behels die prosesse waar daar van chemikalieë gebruik gemaak word om die besoedelingstowwe sodanig chemies te verander dat die veranderde produk maklik deur die een of ander fisiese metode soos byvoorbeeld besinking of flottering, uit die water verwyder kan word.

By die chemiese presipitering van fosfaat moet die fosfaat chemies met 'n metaalioon verbind word om 'n verbinding te verkry wat uit die water presipiteer en deur besinking of flottering uit die water verwyder word. In Suid-Afrika word daar veral van ystersoute (ferrichloried of ferrisulfaat) of aluminiumsoute (aluminiumsulfaat) gebruik gemaak om die fosfaat te presipiteer (Slim, 1987). Ander chemikalieë wat ook gebruik kan word, is kalk (Ca(OH)_2) of ferrosulfaat. In hierdie prosesse vind daar hoofsaaklik 'n uitruiling van anione plaas. Chloried-, hidroksied- of sulfaatione word deur fosfaatione uitgeruil.

Ten einde die fosfaatkonsentrasie tot dié binne die neergelegte standarde te verlaag, word 'n oormaat anorganiese sout in die water gedoseer (Wiechers, 1987), wat tot gevolg het dat die soutgehalte van die water styg in dié gevalle waar chloried- of sulfaatsoute gebruik word. Indien kalk gebruik word om fosfaat te presipiteer, is die resultaat daarvan dat die pH van die water verhoog word, wat weer daartoe lei dat die een of ander suur by die water gevoeg moet word om die pH weer binne die neergelegte standarde te bring. Die toevoeging van metaalsoute (uitgesonderd kalk) in die water lei verder daartoe dat van die alkaliniteit in die water vernietig word. Indien daar nie voldoende alkaliniteit in die water beskikbaar is nie, sal die toevoeging van metaalchloried- of sulfaatsoute daartoe lei dat die pH van die water daal en moet kalk gevolglik in die water doseer word om die pH van die water weer reg te stel (Metcalf & Eddy, 1979).

1.2.2 Biologiese prosesse - konvensioneel

Tydens biologiese nutriëntverwydering word die fosfate biologies uit die rioolwater verwyder deur mikro-organismes wat die fosfaat vir hulle groei nodig het en deur die manipulerings van mikro-organismes in 'n biologiese reaktor wat daartoe lei dat die organismes meer fosfaat opneem as wat hulle vir hulle normale groei nodig het ("luxury uptake") (Barnard, 1983). Aangesien die biologiese fosfaatverwyderingsprosesse betreklik onlangs ontwikkel is (Barnard, 1975), is meerendeel van die land se rioolwater-suiweringswerke nie vir biologiese fosfaatverwydering ontwerp nie. Gevolglik moet fosfaat in ouer werke ten volle chemies verwyder word om aan die neergelegde standaarde te voldoen.

Die biologiese prosesse hou dié nadeel in dat hulle energie-intensief is (Owen, 1982) en dat hulle doeltreffendheid om nutriënte te verwyder, onder andere van die temperatuur en die samestelling van die inkomende riool afhanklik is (WNK, 1984). Die biologiese stelsels is ook uit die aard van die stelsels redelik kwesbaar teen gifstowwe wat in die riool gestort mag word. Die betroubaarheid van hierdie prosesse is in hierdie stadium nog baie wisselvallig, en daar word deur die Departement van Waterwese aanbeveel dat daar by hierdie prosesse van chemiese bystandstelsels gebruik gemaak word ten einde aan die neergelegte standaarde te kan voldoen (Best, 1986). Hier word veral yster- of aluminiumsoute (gewoonlik in chloried- of sulfaatvorm) vir fosfaatpresipitasie doseer (Wiechers, 1987). Die byvoeging van hierdie chemikalieë laat egter altyd 'n chemiese residu agter by wyse van chloried- en sulfaationen, waardeur die soutgehalte van die water verhoog word. Verder blyk dit ook dat uitdyende slyk in biologiese nutriëntverwyderingsaanlegte redelik algemeen in Suid-Afrika voorkom (Slim, 1987; Blackbeard en Ekama, 1984). Die slykuitdying kan moontlik verminder word deur chloorgas tot die reaktor toe te voeg (Blackbeard en Ekama, 1984), wat weer 'n styging in die hoeveelheid opgeloste soute in die water tot gevolg het. Uitdyende slyk kan ook deur die toevoeging van osoon tot die reaktor verminder word (Van Leeuwen en Pretorius, 1988). Osoon word egter nog nie algemeen vir hierdie aanwending gebruik nie.

1.3. Bespreking

1.3.1 Eutrofisering

In Suid-Afrika word daar gepoog om die eutrofisering van die land se waterbronne te bekamp deur die fosfaatkonsentrasie in water wat in riviere en openbare strome gestort word, te beperk. Die instansies wat uitvloeisels stort word deur die wet verplig om die fosfaatkonsentrasie wat in openbare strome of riviere in sekere geïdentifiseerde gebiede gestort word, tot onder 1,0 mg P/l te beperk.

Ten einde die instansies in staat te stel om aan die vereistes van die wetgewing te kan voldoen, is prosesse ontwikkel, of moet nog ontwikkel word, waarvolgens daar op die mees ekonomiese en voordeligste wyse aan die bepalinge van die wetgewing voldoen kan word.

1.3.2 Bestaande suiweringsprosesse

Die bestaande prosesse waarmee fosfaat uit rioolwater verwyder word, het almal tekortkominge wat soos volg saamgevat kan word:

(a) Fisies/chemiese prosesse

Deur die fisies/chemiese prosesse word die soutgehalte van die behandelde water verhoog deur die chemikalieë wat in die water gedoseer word en die alkaliniteit van die water word verlaag indien metaalsoute in die water gedoseer word. Gevolglik mag dit nodig wees om kalk in die water te doseer om die pH te stabiliseer.

(b) Biologiese prosesse

Die betroubaarheid van die biologiese prosesse is tans van so 'n aard, dat die doeltreffendheid van fosfaatverwydering nie altyd deur die prosesse gewaarborg word nie en dat daar soms van chemiese bystandstelsels gebruik gemaak moet word om aan die vereistes van die Waterwet te kan voldoen. Die biologiese stelsels is in die algemeen kwesbaar vir gifstowwe wat in die rioolwater kan voorkom.

Dit is dus nodig dat alternatiewe metodes voortdurend ondersoek en ontwikkel moet word om verbeterde metodes en prosesse daar te stel waarvol-

gens die fosfate in riooluitvloeiels beperk kan word.

1.4. Alternatiewe metodes

Daar is verskeie alternatiewe metodes om fosfaat uit rioolwater te verwyder, wat ook as biologiese en fisies/chemiese prosesse geklassifiseer kan word.

1.4.1 Biologiese prosesse

Fosfate kan byvoorbeeld ook biologies deur middel van assimilasië verwyder word. Dit blyk egter dat hierdie proses nie ekonomies is nie omdat alge slegs in lig, en dus gevolglik net sowat 12 uur per dag, kan groei. Verder, omdat die proses van lig afhanklik is, gee dit noodgedwonge daartoe aanleiding dat daar groot oppervlaktes vir hierdie proses nodig is, wat die proses beperk tot gebiede waar baie ruimte beskikbaar is en die prys van grond betreklik laag in verhouding tot die prys van energie is (Pretorius en Hensman, 1984).

1.4.2 Chemiese prosesse

'n Chemiese proses wat wel veel belofte inhou, is die gebruik van kalk soos in die sogenaamde LFB-proses wat deur die NIWN van die WNNR ontwikkel is (Van Vuuren en Wiechers, 1978; Van Vuuren et al., 1977). Hierdie proses maak gebruik van 'n hoë kalkbehandeling van die rourioolwater, wat deur 'n flotteringsproses gevolg word. Tydens die kalkbehandeling word die meerendeel van die fosfaat in 'n kalsiumfosfaatverbinding neergeslaan, wat dan in die flotteringsproses uit die rioolwater verwyder word. Die bedryfskoste van hierdie proses blyk egter betreklik hoog te wees as gevolg van die hoë kalkdosering wat toegepas word. Aangesien die hoë kalkdosering veroorsaak dat die pH van die water baie hoog is, moet die pH na die behandeling verlaag word. Dit kan maklik bewerkstellig word met die kool-suurgas wat in die anaërobiese verteerders geproduseer word.

1.4.3 Kristallisering in korrelbedreaktore

Die kristallisering van fosfaat in korrelbedreaktore is 'n redelik nuwe metode om fosfaat uit water te verwyder. Die water wat behandel moet word, word in hierdie proses ten opsigte van die kalsiumfosfaat oorversadig, sodat kristallisering in die korrelbedreaktor voorkom. Die oorversadiging van die water word bewerkstellig deur die pH van die water met behulp van 'n alkali soos NaOH of Ca(OH)_2 te verhoog. Kalsium hoef slegs in gevalle van baie sagte water gedoseer te word. Die korrelbedreaktor bestaan uit 'n vloeibedreaktor met sand as korrelmedium. Die kristallisering van die kalsiumfosfaat kom op die sandkorrels voor (Van Dijk en Braakensiek, 1984).

Die voordeel van hierdie proses lê daarin dat slyk nie gevorm word nie, maar dat die produk van die reaksie, naamlik kalsiumfosfaat, geskik vir die fosfaatnywerheid blyk te wees. Die hergebruik van fosfaat word dus deur hierdie proses bewerkstellig. Verder word die probleme ten opsigte van die slyk wat in konvensionele prosesse gevorm word, deur hierdie proses uitgeskakel.

Die interessante voordele wat hierdie proses blykbaar inhou, behoort verder ondersoek te word.

1.4.4 Elektrochemiese prosesse

'n Betreklik onbekende proses is die sogenaamde in situ produksie van metaalkatione deur die induktiewe korrosie van metale as gevolg van 'n elektriese gelykstroom wat deur metaalelektrodes in die water vloei.

Moontlike voordele van die elektries geproduseerde koagulante is kortliks die volgende:

- (a) Aangesien daar tydens die elektrolitiese produksie van metaalkoagulante metaalkatione in die water opgelos word, word die soutgehalte van die water nie deur die proses verhoog nie.
- (b) Tydens die produksie van die metaalkoagulant word hidroksiedione gevorm, wat tot gevolg het dat die alkaliniteit nie deur die proses vernietig word nie.

- (c) Dit wil voorkom asof hierdie elektrochemiese proses baie maklik met 'n biologiese proses soos geaktiveerde slyk gekombineer kan word, wat tot 'n betroubare chemies/biologiese fosfaatverwyderingstelsel kan lei.
- (d) Tydens bloot biologiese prosesse bly sekere van die biologies onafbreekbare kolloïdale en opgeloste stowwe oor wat nie besink nie. Deur die hergebruik van water word hierdie stowwe dus opgebou. Deur egter van die elektrochemiese proses as voorbehandeling gebruik te maak, word daar verwag dat die kolloïdale deeltjies wel in 'n groot mate verwyder sal word deurdat die kolloïdale stelsel deur die metaalkoagulant gedestabiliseer word.

Uit bogenoemde verwagte voordele wat die elektrochemiese proses bied, is dit duidelik dat die toepaslikheid van hierdie proses ten opsigte van rioolsuiwering in die algemeen en tot die verwydering van fosfaat in die besonder verder ondersoek moet word. Daar moet bepaal word of die proses ekonomies regverdigbaar is en of 'n beter totale rioolwatersuiweringstelsel met behulp van die elektrolitiese toediening van metaalkoagulante in water daargestel kan word ten einde die impak van die uitvloeisel van watersuiweringswerke op die omgewing tot die minimum te beperk. So kan daar moontlik voorkom word dat die land se beperkte waterbronne nie verder deur scoutbesoedeling en die ophoping van biologies onafbreekbare stowwe minder geskik vir hergebruik gemaak word nie.

Dit is dan die doel van hierdie studie om die proses van elektrochemies geproduseerde metaalkoagulante te evalueer ten opsigte van die energiebehoefte en die doeltreffendheid van die proses ten opsigte van die verwydering van fosfaat en die vermindering van die chemiese suurstof behoefte (CSB) uit rioolwater. Verder sal die proses ook met konvensionele chemiese dosering vergelyk word ten einde te bepaal of dit ekonomies geregverdig is om met navorsing in die elektrochemiese produksie van metaalkoagulante voort te gaan.

HOOFSTUK 2

DIE GEBRUIK VAN ELEKTROCHEMIESE PROSESSE IN WATERSUIWERING -

'n LITERATUURSTUDIE

2.1. Inleiding

Die toepassing van elektrolitiese beginsels in watersuiwering is nie nuut nie. Reeds in 1889 is 'n patent (U S Patent 398 101, 1889) in dié verband geregistreer. Sedertdien is heelwat navorsing gedoen en patente geregistreer waar elektrolitiese beginsels in watersuiwering toegepas is. Die patente en uitvindings kan min of meer in die volgende toepassingskategorieë geplaas word:

- Die elektrochemiese ontsmetting van rioolwater
- Elektrochemiese koagulantproduksie
- Elektroflotteringsprosesse

Hierdie indeling is nie 'n absolute indeling van die navorsing en geregistreerde patente nie omdat die kategorieë in die meeste gevalle oorvleuel.

2.2. Die elektrochemiese ontsmetting van rioolwater

Die elektrochemiese ontsmetting van rioolwater geskied deurdat die chloriedione wat in die rioolwater voorkom tot chloorgas geoksideer word. Die gevormde chloor tree dan as ontsmettingsmiddel op (U S Patent 398 101, 1889; U S Patent 1 079 377, 1913; Smith, 1972; Tunturi, 1976). Die reaksie vind plaas indien voldoende chloriedione in die water beskikbaar is en die elektrodepotensiaal groter as 1,36 volt is (Benefield et al., 1982). Hierdie waarde hang egter af van die konsentrasie van die chloriedione in die water, en dié invloed kan met behulp van die Nernst-vergelyking bereken word. Gewoonlik word daar van inerte elektrodes gebruik gemaak omdat die elektrodepotensiaal betreklik hoog is en die elektrode gevolglik voor die chloriedione ge-oksideer kan word indien die elektrode nie inert is nie.

Die eerste patent in hierdie verband is in 1889 deur William Webster geregistreer (U S Patent 398 101, 1889). Daar is gebruik gemaak van ysterelektrodes om die voordele van die gehidreerde ysteroksiede as koagulant te benut. Indien daar nie voldoende chloriedione vir die elektrolitiese vorming van chloorgas in die rioolwater beskikbaar was nie, is daar sout of seewater by die rioolwater gevoeg. 'n Aanleg is in Crossness, 'n voorstad van Londen, Engeland, gebou wat op dié patent gegrond was (Electrical World, 1899). Dit blyk egter onwaarskynlik te wees, dat chloor wel in hierdie proses gevorm is omdat die yster deur die elektrolitiese reaksie oksideer word voordat die chloried geoksideer word. Gevolglik sal die yster eers in oplossing gaan voordat chloorgas geproduseer word.

In 1913 registreer Swinburn 'n patent waarvolgens water deur middel van elektrolise gesuiwer word (U S Patent 1 079 377, 1913). Die beskrywing van hierdie patent blyk egter vaag te wees en dit blyk ook dat chloried by die water gevoeg moet word. Daar is vermoedelik nooit 'n suiweringsaanleg volgens hierdie patent gebou nie (Miller en Knipe, 1965) en daar kan dus nie met sekerheid gesê word wat die hoofbeginsel is waarvolgens water deur hierdie patent gesuiwer is nie.

2.3. Elektrochemiese koagulantproduksie

Metaalkoagulante kan elektrochemies op twee maniere geproduseer word, naamlik die direkte en die indirekte elektrochemiese produksie van metaalkoagulante.

(a) Die direkte elektrochemiese produksie van metaalkoagulante

Die direkte elektrochemiese produksie van metaalkoagulante word in die teoretiese agtergrond in Hoofstuk 3 in detail beskryf. Kortliks kom dit daarop neer dat 'n anode, wat van dié metaal gemaak is waarvan die ione in die water doseer moet word om die water te suiwer, elektrochemies korrodeer word om die ione in die water op te los.

Die gebruik van ysterelektrodes word deur William Webster in 1889 (U S Patent 398 101, 1889) aanbeveel en 'n aanleg word by Crossness, 'n voorstad van Londen, Engeland gebou (Electrical World, 1899).

Landreth (1914) voorsien 'n toetsaanleg by Elmhurst in die stad New York (U S Patent 1 090 893, 1914) wat van yster elektrodes voorsien is. In hierdie proses is die water egter met kalk voorbehandel om die elektriese geleiding en die pH van die rou water te verhoog. Daar word egter later bevind dat die elektrochemiese sel nie die bepalende proses is waarvolgens die water gesuiwer word nie, maar dat die suiwing meestal deur die kalkbehandeling geskied het. Dit het tot gevolg gehad dat alle elektrochemiese aanlegte wat op hierdie patente geskoei was, in onbruik geraak het.

Aluminium word deur verskeie navorsers vir elektrodes aanbeveel (Dobolyi, 1978; Vik et al, 1984; Pandit en Mayadeo, 1985 (a), (b); Grøterud en Smoczynski, 1986 (a), (b), (c)). Dobolyi (1978) bevind dat elektrolities geproduseerde aluminiumione doeltreffender is om fosfaat uit rioolwater te verwyder as wat die geval is met ione wat in soutvorm in die water gedoseer word. Hy skryf hierdie waarneming toe aan die hipotese dat elektrolities geproduseerde aluminiumione nog nie in komplekse met water verbind is nie en dus so te sê in die nassente vorm in die rioolwater gedoseer word.

Vik et al (1984) ondersoek die gebruik van elektrokoagulering vir die suiwing van drinkwater. Hulle bevind dat aluminiumelektrodes volgens Faraday se wet oplos en hulle bereken gevolglik in al hulle opvolgende navorsing die hoeveelheid aluminium wat opgelos word volgens hierdie wet. Hulle kom verder tot die gevolgtrekking dat die elektrolitiese behandeling van drinkwater slegs 'n potensiële aanwending in klein watersuiweringsaanlegte in afgeleë gebiede en in ontwikkelende lande het. Die volume chemikalieë wat vervoer moet word is by benadering 10% van die konvensionele volume, minder slyk word gevorm, en die onderhoud van die stelsel blyk makliker te wees as dié van konvensionele suiweringswerke.

Pandit en Mayadeo (1985 (a), (b)) doen navorsing oor die gebruik van aluminiumelektrodes om rioolwater mee te suiwer. Hulle kom onder andere tot die volgende gevolgtrekkings:

- Die elektrochemiese behandeling van rioolwater kan aangepas word om 'n eenvoudige en betroubare proses, wat veral vir kleiner werke geskik blyk te wees, daar te stel.

- Die CSB en biologiese suurstofbehoefte (BSB), asook die konsentrasie fosfaat en nitraat kan deur die elektrochemiese behandeling van rioolwater verminder word.
- Die grootte van die elektrochemiese reaktor by groot suiweringswerke word as 'n moontlike beperking van die elektrochemiese prosesse gesien.

Grøterud en Smoczynski (1986 (a)) ondersoek die verskil in die doeltreffendheid van yster- en aluminiumelektrodes vir die elektrolitiese verwydering van fosfaat. Hulle bevind dat aluminiumelektrodes bykans 13 keer minder energie gebruik as ysterelektrodes vergeleke met die hoeveelheid fosfaat wat deur die twee stelsels verwyder word en spits gevolglik hulle verdere navorsing op die gebruik van aluminium as elektrodes toe. Hulle meld dat die spanning vir die elektrolise van ysterelektrodes bykans 2 keer hoër was as in die geval van aluminiumelektrodes en skryf hierdie waarneming toe aan die verskil in elektrodepotensiaal tussen die twee metale. Hierdie motivering strook egter nie met die teoretiese elektrochemie nie, aangesien die elektrodepotensiaal 'n komponent van die "chemiese deel" van die spanning is en gevolglik nie so 'n groot verskil in die spanning kan bewerkstellig nie. 'n Beter verduideliking vir die groot verskil in die spanning wat in hulle eksperimente verkry is lê in die feit dat die stroom in die geval van die ysterelektrolise 5 keer groter was as in die elektrolise van die aluminium. Volgens Ohm se Wet is die spanning wat nodig is eweredig aan die stroom wat vloei en die weerstand van die sel. Indien daar dus 'n groter stroom vloei, moet 'n groter spanning noodgedwonge aangewend word indien die weerstand konstant bly.

Grøterud en Smoczynski (1986 (b)) konsentreer verdere navorsing op die gebruik van aluminiumelektrodes en bevind verder dat die polariteit van die elektrodes met 'n frekwensie van 0,0039 Hz gewissel moet word om bevuiling van die elektrodes te voorkom. In opvolgende navorsing bevind hulle (Grøterud en Smoczynski, 1986 (c)) dat fosfaat heeltemal deur elektrolise met aluminiumelektrodes verwyder kan word indien die pH van die elektroliet tot 6,0 met soutsuur verlaag word.

In 1909 registreer Harris 'n patent waar hy yster- en aluminiumelektrodes vir vlokvorming laat korrodeer, terwyl koperelektrodes vir die ontsmetting van die rioolwater voorsien word (U. S. Patent 937 210, 1909). Hierdie

stelsel was uniek in dié sin dat daar van verskeie metale as elektrodes gebruik gemaak is. Daar is ook beweer dat die mengsel van die metale 'n beter vlok en helderder water gee.

Miller en Knipe (1965) het moontlikhede ondersoek om besoedelingstowwe deur middel van elektrochemiese reaktore uit munisipale rioolwater te verwyder. Hulle kom onder andere tot die volgende gevolgtrekkings:

- Die lae geleidingsvermoë van munisipale rioolwater noodsaak dat die elektrodes baie naby aanmekaar gespasieer moet word om die verbruik van elektrisiteit te beperk. Hierdeur word die gebruik van membrane en diafragmas tussen die elektrodes uitgesluit.
- Die gebruik van korroderende ysterelektrodes blyk 'n doeltreffende metode te wees om ysterione in die water te doseer sonder dat anione gedoseer moet word.
- Hulle bevind dat die CSB tot 73%, die totale vaste stof tot 56%, chloried tot 51% en alkielbensiensulfaat (ABS) tot 88% verminder word deur die gebruik van ysterelektrodes.
- Indien daar van inerte anodes gebruik gemaak word, kan die hoeveelheid bakterieë in die uitvloeisel effektief verminder word deur die chloor wat uit die chloriedione gevorm word.
- Yster, lood, magnesium, aluminium, grafiët en koper vorm elektrodes wat oplos indien hulle as anodes gebruik word, terwyl looddioksied-, platinum- en platinumgeplateerde titaniumelektrodes as anodes inert is.
- Die koste vir elektrolitiese suiwing van die sekondêre uitvloeisel beloop \$0,24 tot \$0,67 per kiloliter in 1965 (R 0,67 tot R 1,87 teen die huidige Dollar-Rand wisselkoers).

(b) Die indirekte elektrochemiese produksie van metaalkoagulante

Die indirekte produksie van metaalkoagulante is 'n proses waarby daar van inerte elektrodes gebruik gemaak word om waterstof elektrolities te

reduseer. Sodoende word die pH van die water verhoog deur die oortollige hidroksiedione wat gevolglik ontstaan. Die verhoogte pH veroorsaak dat daar metaalhidroksiedes in die water vorm deurdat die metaalione, wat in die water is, met die oormaat hidroksiedione verbind. Die metaalhidroksiedes vorm dan vlokke wat besink (of flotter kan word) en die onsuiverhede in die water verwyder. Indien daar chloriedione in die water is, word hulle geoksideer na chloorgas wat bydra tot die ontsmetting van die water. Die konsentrasie van die metaalione, en wel die konsentrasie van magnesiumione, en die konsentrasie van die chloriedione kan verhoog word deur die byvoeging van seewater tot die water wat gesuiwer moet word (Poon en Brueckner, 1975; Föyn, 1964). Sodoende word die elektriese geleiding van die water wat behandel word verhoog, wat die weerstand van die elektrolitiesesel verlaag en dus die energiekoste van die proses verlaag.

Poon en Brueckner (1975) en Föyn (1964) maak gebruik van grafietaanodes en ysterkatodes in hulle navorsing en bevind dat fosfaat herhaaldelik tot 98% verwyder word by 'n pH van tussen 10 en 11. Ammoniak word tot 85% verwyder deur oksidasie met die chloorgas wat in die proses gevorm word (Poon en Brueckner, 1975).

Hierdie proses lyk baie belowend en behoort ook verder ondersoek te word vir moontlike toepassing by kusbordjies waar gedeeltelikgesuiwerde rioolwater in die see gestort word. Deur die rioolwater op land tot 'n hoër standaard te suiwer word besoedeling van die see verminder. Seewater kan maklik uit die see onttrek word en op land met die rioolwater gemeng word. Die hoë soutkonsentrasie van die seewater sal die elektriese geleiding van die rioolwater verhoog waardeur die energiekoste van die proses verlaag word. Weens die hoë konsentrasie van potensiële koagulant wat in seewater opgelos is, blyk dit asof daar geen eksterne chemikalieë aangekoop hoef te word nie indien hierdie proses gevolg word. Daar word verder verwag dat geen biologiese prosesse nodig sal wees om die rioolwater te behandel nie vanweë die effektiwiteit van die elektrochemiese proses. Daar word dus verwag dat hierdie proses wel ekonomies regverdigbaar is in hierdie spesifieke toepassing.

2.4. Elektroflotteringsprosesse

Tydens die elektrolise van yster- of aluminiumanodes ontstaan waterstofgas op die katode deur die reduksie van waterstofione. In die

elektroflotteringsproses word daar van hierdie gas gebruik gemaak om die besoedelingstowwe in die elektroliet te flotteer (Smith, 1972; Tunturi, 1976; Matis, 1980).

Tunturi (1976) het vergelykende eksperimente met aluminiumsulfaat en ferrichloried gedoen en bevind dat die elektrolitiese proses altyd beter resultate op lewer. Verder bevind hy dat die verwydering van die CSB ook beter is in die elektrolitiese proses as in die konvensionele dosering van chemikalieë. Die gebruik van ysteranodes lei daartoe dat die water 'n bruin kleur kry, wat deur die opgeloste ferroïene veroorsaak word. Ysteranodes blyk, volgens Tunturi (1976), meer ekonomies te wees as aluminiumanodes as gevolg van die verskil in koste van die metale. Hierdie bevinding is teenstrydig met die bevindinge deur Grøterud en Smoczynski (1986 (a)), wat beweer dat die gebruik van aluminiumelektrodes meer ekonomies as ysterelektrodes is, omdat daar, volgens die bewering, minder energie deur die aluminiumelektrodes gebruik word. Die bevindinge deur Grøterud en Smoczynski (1986 (a)) word egter bevraagteken (kyk bladsy 2.4) en gevolglik word die bewering deur Tunturi (1976) as die meer korrekte weergawe aanvaar.

Matis (1980) bepaal dat elektroflottering gebruik kan word om emulsies te breek. Matis beweer dat die emulsie veral deur die waterstof gebreek word en dat die suurstof nie beduidend tot die proses bydra nie. Seewater kan by die elektroliet gevoeg word om die geleidingsvermoë van die elektroliet te verbeter. Sodoende kan die energiekoste verlaag word.

Smith (1972) ondersoek die gebruik van die elektroflotteringsproses geïntegreerd in 'n fisies/elektrochemiese suiweringsaanleg. Hy beweer dat die bedryfskoste van die stelsel in 'n groter mate gevoelig is vir die koste van die elektrodes as vir die energiekoste. Die kapitale koste vergelyk goed met die koste van 'n konvensionele behandelingsproses, maar is beslis goedkoper indien 'n tersiêre behandelingstap ook ingesluit moet word. Verder beslaan die stelsel 'n baie kleiner ruimte vergeleke met konvensionele suiweringswerke.

Die metode wat Smith gebruik om die spanning te bepaal, is baie kru en kan nie vir algemene gebruik of ontwerp aanbeveel word nie. Dit is nie duidelik uit die publikasie hoe voorsiening vir die weerstand van die sel gemaak word nie. Verder lyk dit asof Smith aanvaar dat yster in die

trivalente vorm opgelos word, terwyl die elektrodepotensiaal vir die bivalente vorm -0,44 volt (Benefield et al., 1982) is, wat laer is as die 0,771 volt wat Smith aanvaar en dus die meer waarskynlike elektrodepotensiaal vir die reaksie sal wees. Die waarde van die omskakeling van yster in die bivalente vorm na yster in die trivalente vorm is 0,771 volt (Benefield et al., 1982).

2.5. Gevolgtrekking

Die literatuurstudie dui daarop dat navorsing op elektrolitiese metodes vir die suiwing van water wêreldwyd gedoen word en dat daar veral nou weer groot belangstelling op hierdie gebied ondervind word. Hoewel die elektrolitiese behandeling van water 'n betreklik ou tegniek is, kon daar geen aanduiding gekry word dat ondersoek al in Suid-Afrika gedoen is om te bepaal of dit nie moontlik ekonomies hier aangewend kan word in die verwydering van fosfate uit rioolwater nie.

Uit die literatuurstudie word die volgende opgemerk:

- (a) Die elektrochemiese behandeling van rioolwater is wel moontlik en blyk ekonomies lewensvatbaar te wees indien die suiwing van rioolwater globaal beskou word, met ander woorde, indien die eenheidsprosesse nie direk met mekaar vergelyk word nie (Smith, 1972).
- (b) Fosfaat kan doeltreffend deur die elektrolities geproduseerde metaalkoagulante yster en aluminium verwyder word en die chemiese suurstofbehoefte van die rioolwater word ook noemenswaardig verminder (Miller en Knipe, 1965; Smith, 1972; Tunturi, 1976; Dobol*et al.*, 1978; Vik et al., 1984; Pandit en Mayadeo, 1985(a) en (b); Grøterud en Smoczyński, 1985, 1986(a) en (b)).
- (c) Daar bestaan twee meganismes waarvolgens flokkulering elektrolities bewerkstellig kan word, en wel soos volg:
 - Indirek deur die pH van die water deur middel van elektrolise te verhoog, vorm die metale in die water metaalhidroksiede wat flokkuleer (Poon en Brueckner, 1975).

- Direk deur metaalkoagulante deur middel van elektrolise in die water op te los deur van korroderende elektrodes soos yster en aluminium gebruik te maak (Harris, 1909; Miller en Knipe, 1965; Smith, 1975; Dobolyi, 1978; Vik et al., 1984; Pandit en Mayadeo, 1985(a) en (b); Grøterud en Smoczynski, 1985, 1986(a) en (b))
- (d) Die hoeveelheid metaal wat elektrolities opgelos word, kan met behulp van Faraday se wet bereken word (Vik et al., 1984).
- (e) Die gasse wat tydens elektrolise gevorm word, bevoordeel die flottering van die geflokkuleerde stowwe (Poon en Brueckner, 1975; Tunturi, 1976; Matis, 1980).
- (f) Navorsing word tans gedoen op die gebruik van veral aluminium as korroderende elektrodes (Dobolyi, 1978; Vik et al., 1984; Pandit en Mayadeo, 1985(a) en (b); Grøterud en Smoczynski, 1986 (a), (b), (c))
- (g) Die ontsmetting van rioolwater kan doeltreffend deur elektrolise gedoen word indien inerte elektrodes gebruik word en die chloriedkonsentrasie in die water voldoende is of indien seewater by die rioolwater gevoeg word om die chloriedkonsentrasie aan te vul (Smith, 1972; Poon en Brueckner, 1975). Hierdie gebruik kan toepassing vind by die ontsmetting van rioolwater wat in die see gestort word.
- (h) Indien seewater gevoeg word by die rioolwater, wat gesuiwer moet word, word die elektriese geleidingsvermoë van die rioolwater verhoog en neem die weerstand van die elektroliet gevolglik af. Dit lei tot 'n afname in die energiegebruik van die stelsel (Poon en Brueckner, 1975)

Die literatuurstudie dui daarop dat die elektrochemiese behandeling van rioolwater wel moontlik is, en in hierdie stadium is nog navorsing nodig om die proses te optimiseer. 'n Groot voordeel wat die elektrochemiese behandeling van rioolwater inhou, is dat oplosbare soute nie tot die water gevoeg hoef te word nie. Deur dus van 'n elektrochemiese proses gebruik te maak om byvoorbeeld fosfaat te verwyder, in teenstelling met ander chemiese prosesse, word daar verhoed dat die water tydens die suiweringsproses verder versout.

In die literatuurstudie is daar feitlik geen inligting gevind wat oor die gebruik van verskillende selkonfigurasies handel soos wat dit in Hoofstuk 3 bespreek word nie. Feitlik alle onlangse navorsing is blykbaar op die gebruik van monopoolere selle wat in parallel geskakel is, gerig, terwyl dit uit die suiwer elektrochemiese ingenieursliteratuur blyk dat bipolere elektrodes wel gebruik kan word en die gebruik van hierdie konfigurasie word deur navorsers in die ingenieurselektrochemie aangemoedig (Pickett, 1979; Rousar et al., 1986; Plechter, 1981). Dit is dus belangrik dat hierdie aspek ondersoek word om die optimale stelsel te vind.

Daar word min melding in die literatuur gemaak van die energiebehoefte van die elektrochemiese produksie van metaalkoagulante. Hierdie aspek is egter baie belangrik en het 'n groot uitwerking op die ekonomiese lewensvatbaarheid van die proses. Dit is derhalwe noodsaaklik dat hierdie aspek ondersoek moet word ten einde die lewensvatbaarheid van die proses te bepaal.

Dit is verder ook belangrik dat daar inligting deur navorsing bepaal en beskikbaar gestel word waarvolgens daar aanlegte in die praktyk ontwerp en gebou kan word. Die beskikbare inligting in hierdie verband is tans beperk, en daar word deur hierdie navorsing beoog om 'n bydrae in hierdie verband te maak.

Die omstandighede in Suid-Afrika verskil wesenlik van lande soos Finland, Noorweë, Indië, ens. waar die meeste navorsing tans op hierdie gebied gedoen word. In dié lande is water geredelik beskikbaar en water word nie in dieselfde mate as in Suid-Afrika hergebruik nie. Dit is dus belangrik dat die elektrochemiese behandeling van water onder Suid-Afrikaanse toestande ondersoek word, waar die grondstof yster, en ook energie, redelik goedkoop beskikbaar is in vergelyke met dié van ander Westerse lande. Sodoende kan daar moontlik 'n beter proses vir die verwydering van fosfate uit rioolwater ontwikkel word, spesifiek aangepas vir Suid-Afrikaanse toestande.

HOOFSTUK 3

TEORETIESE AGTERGROND EN DIE ONTWIKKELING VAN 'N PRAKTIESE MODEL

VIR DIE VOORSPELLING VAN DIE ENERGIEBEHOEFTES

3.1 Inleiding

Die ontdekking deur Alessandro Volta in 1796 dat chemiese reaksies elektrisiteit kan genereer, kan as die begin van die elektrochemie beskou word (Brescia et al., 1970). Verskeie wetenskaplikes soos Faraday in 1834, Le Blanc (aan die begin van hierdie eeu), Tafel in 1905, Butler in 1924 en Volmer in 1930 het sedertdien op hierdie gebied gewerk om elektrochemie tot dié fyn wetenskap te ontwikkel wat vandag vrylik gebruik kan word (Bockris en Reddy, 1973).

Uit die literatuur blyk dit dat die elektrochemie veral op drie gebiede aangewend word, naamlik:

- Metaalherwinning en platering
- Energie-opberging in batterye
- Die studie en bekamping van korrosie.

Die gebruik van elektrochemiese metodes om metale as metaalkoagulante in water te produseer vir watersuiweringsdoeleindes, tel tans nie onder een van die gebruike van elektrochemie nie.

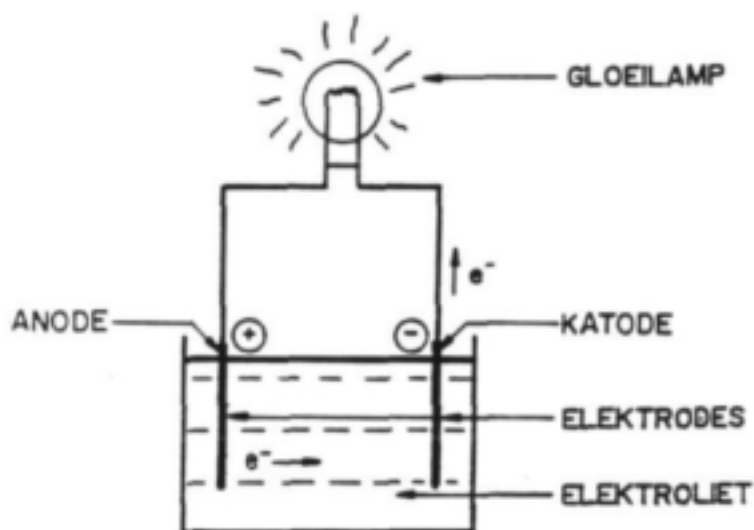
Ten einde elektrochemie in die praktyk te kan toepas, is dit wenslik dat daar duidelikheid oor sekere grondbegrippe in elektrochemie verkry moet word.

3.2. Elektrochemiese selle

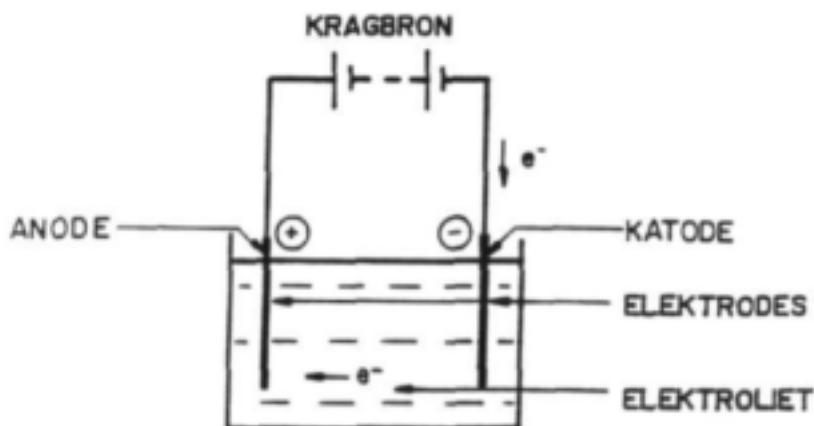
'n Elektrochemiese reaksie is 'n elektronuitruilings-, oksiderings- of reduksiereaksie, wat op 'n **elektrode** plaasvind (Charlot et al., 1962). Die elektrodes word in **selle** gerangskik en aan 'n stroombaan gekoppel sodat die elektrone deur die stroombaan kan vloei om die uitruilingsreaksies op die elektrodes te laat plaasvind. Die vloeistof waarin die elektrodes

geplaas word om die stroombaan te kan voltooi, is die **elektroliet**. Hierdie opstelling staan as 'n elektrochemiese of 'n galvaniese sel bekend (Bockris en Reddy, 1973).

Galvaniese selle bestaan uit twee groepe, naamlik **voltaiese** en **elektrolitiese selle**. Voltaiese selle is selle wat spontaan 'n spanning en 'n stroom kan oplewer en tree dus as 'n energiebron op. Elektrolitiese selle, daarenteen, is gedrewe selle wat elektriese energie verbruik om 'n reaksie, wat gewoonlik nie spontaan sou plaasvind nie, te laat plaasvind (Bockris en Reddy, 1973). 'n Voorbeeld van elk van 'n voltaiese en 'n elektrolitiese sel word skematies in Figure 1 en 2 weergegee.



Figuur 1: 'n Voltaiese sel



Figuur 2: 'n Elektrolitiese sel

Die name van die elektrodes is afhanklik van die reaksie wat op hulle plaasvind. Die elektrode waar daar **elektronering** (elektronopname) of ioonreduksie plaasvind, staan as die **katode** bekend, terwyl die elektrode waar daar **delektronering** (elektronskenking) of oksidering voorkom, as die **anode** bekend staan.

Die loodsuurbattery is 'n bekende voorbeeld van 'n galvaniese sel wat voltaïes en elektrolities kan funksioneer. Tydens die laaiproses van die battery tree dit as 'n elektrolitiese sel op, terwyl die battery as 'n voltaïese sel gebruik word as elektriese krag van die battery onttrek word en die sel ontlai. Die reaksies wat in die battery voorkom is die volgende:

(a) Die voltaïese sel (spontane reaksie)



(b) Die elektrolitiese sel (nie-spontane reaksie)



'n Verdere voorbeeld van 'n elektrolitiese sel is die katodiese beskerming van staalpype teen korrosie. In hierdie geval word die staalpyp as katode gebruik en word daar òf van elektrodes gebruik gemaak wat toegelaat word om ten koste van die staalpyp te korrodeer, òf 'n gelykstroom met 'n vasgestelde spanning word aan die pyp gekoppel sodat die pyp as katode kan dien.

Die selle wat in hierdie studie gebruik is, was elektrolities van aard, en daar is van ysterelektrodes as anodes gebruik gemaak sodat die yster opgelos kan word. Dit is dus die teenoorgestelde van wat by die katodiese beskerming van staalpype gebeur.

3.3. Spanningsvereistes

Die spanning wat vir 'n elektrolitiese reaksie nodig is, bestaan uit drie komponente, naamlik

- die ewewigspotensiaal

- die oorpotensiaal
- die spanning wat nodig is om die weerstand van die sel te oorbrug.

3.3.1 Die ewewigspotensiaal

Elektrolise kan voorkom indien die toegepaste spanning hoog genoeg is om die normale neiging tot voltaïese elektronevloei teen te werk (Charlot et al., 1962). Hierdie spanning is afhanklik van die konsentrasie van die stowwe in die elektroliet wat by die reaksie betrokke is, en die ewewigspotensiaal kan dus soos volg uit die Nernst vergelyking bereken word (Charlot et al., 1962):

$$E_e = E_0 - \frac{R}{z} \frac{T}{F} \ln \frac{[\text{reduseermiddel}]}{[\text{oksideermiddel}]}$$

waar: E_e = die ewewigspotensiaal (volt)
 E_0 = die selpotensiaal wat 'n konstante van die redokstelsel is (volt)
 R = die gaskonstante (8,314 kJ/(mol*°K))
 T = die absolute temperatuur (°K)
 z = die getal elektrone wat by die reaksie betrokke is
 F = Faraday se konstante (96487 coulombs)
[oksideermiddel] = die effektiewe konsentrasie van die oksideermiddel
[reduseermiddel] = die effektiewe konsentrasie van die reduseermiddel

3.3.2 Die oorpotensiaal

By die elektrodes tree daar kinetiese en konsentrasieverskynsels op wat veroorsaak dat bykomende spanning by die sel se ewewigspotensiaal gevoeg moet word sodat die elektrodereaksies teen 'n bepaalde tempo kan plaasvind. Hierdie bykomende spanning staan as oorspanning of oorpotensiaal vir 'n enkele elektrode bekend.

Die oorpotensiaal op 'n elektrode ontstaan as gevolg van twee verskillende verskynsels, naamlik konsentrasie-oorpotensiaal en aktiveringsoorpotensiaal (Pickett, 1979).

(a) Konsentrasie-oorpotensiaal

Tydens elektroliese is daar 'n oordrag van ladings tussen die elektrode en die elektroliet en vind daar gevolglik chemiese reaksies in die onmiddellike omgewing van die elektrode plaas. Indien die tempo waarteen die ladings oorgedra word groter is as die tempo waarteen die produkte van die reaksies weggevoer kan word, ontstaan daar 'n konsentrasiegradiënt van die reagent wat tot die konsentrasie-oorpotensiaal aanleiding gee (Bockris en Reddy, 1973).

Die elektro-aktiewe spesies word deur migrasie onder die invloed van die elektriese veld tussen die elektrodes, deur konveksie as gevolg van meganiese vermenging van die elektroliet, deur diffusie, of deur 'n kombinasie van hierdie drie faktore vervoer (Pletcher, 1981). Die konsentrasie-oorpotensiaal is dus van die massa-oordrag van die elektro-aktiewe spesie in die elektroliet afhanklik.

(b) Aktiveringsoorpotensiaal

Soos wat chemiese reaksies 'n bepaalde hoeveelheid aktiveringsenergie nodig het, is dit ook die geval met elektrodereaksies. Elektrochemiese reaksies vind in 'n reeks tussenreaksies plaas, en die tempo waarteen die reeks van reaksies voltooi word, word deur die tempo waarteen die stadigste tussenreaksie geskied, bepaal. Hierdie reaksie word die tempobepalende reaksiestap genoem en bepaal ook die aktiveringsenergie wat nodig is om die reaksie te laat plaasvind. Sodra die stelsel voldoende energie ontvang het om die tempobepalende stap te laat plaasvind, word die reaksie tot in die finale stadium deurgevoer. Die verskil tussen die aanvanklike energietoestand van die sisteem en die energietoestand wat nodig is om die tempobepalende stap te laat plaasvind, word die aktiveringsenergie genoem (Pickett, 1979).

Elektrochemies word daar tussen twee tipes reaksies onderskei, en wel tussen die vinnige en die stadige reaksies. Vinnige reaksies is reaksies wat deur die massa-oordrag beheer word, terwyl stadige reaksies deur die aktiveringsoorpotensiaal beheer word (Pickett, 1979). Indien vinnige reaksies egter onder baie lae stroomdigthede bedryf word, neem die uitwerking van die massa-oordrag af, sodat dit nie meer die dominante oorpotensiaal word nie (Pickett, 1979).

'n Vergelyking waarmee die oorpotensiaal bereken kan word is, staan as die Butler-Volmer-vergelyking bekend. Die vereenvoudigde vorm van hierdie vergelyking lei tot die Tafel-vergelyking, wat 'n empiriese vergelyking is en gevolglik vir elke toepassing bepaal moet word. Die Tafel-vergelyking sien soos volg daar uit:

$$\eta = a + b \log i$$

waar: η = oorpotensiaal (volt)
 a = Tafelkonstante (volt)
 b = Tafelkonstante (volt*m²/amp)
 i = stroomdigtheid (amp/m²)

Die konstantes a en b word gewoonlik empiries bepaal omdat die oorpotensiaal onder andere van die fisiese toestand van die elektrodes afhanglik is. Getabuleerde waardes is egter ook beskikbaar, wat vir die berekening van die oorpotensiaal aanvaar kan word (Pickett, 1979). Tipiese waardes is $a = -0,06$ volt en $b = -0,118$ volt vir die waterstof reaksie by die katode (Pickett, 1979) en $a = 0,06$ en $b = 0,08$ (Skinner, 1987) vir die oplossing van yster by die anode.

3.3.3 Die spanning wat nodig is om die weerstand van die sel te oorbrug

Die derde komponent wat in aanmerking geneem moet word by die berekening van die spanning wat vir 'n elektrolitiese reaksie nodig is, is die spanning wat nodig is om die weerstand van die sel te oorkom. Hierdie komponent het die grootste uitwerking op die bepaling van die spanning wat vir elektrolise nodig is, en dit is dus belangrik dat die spanning so akkuraat moontlik bepaal word. Die ontleding is baie ingewikkeld en is onder andere van die volgende faktore afhanglik:

- Die tipe reaktor
- Die konfigurasie van die selle
- Die geometrie van die elektrodes
- Die afstand tussen die elektrodes
- Die elektriese geleidingsvermoë van die elektroliet
- Die vloeitoestande tussen die elektrodes
- Die temperatuur van die elektroliet en die elektrodes.
- Die reaksiesisteem

Hierdie faktore is ook nog onderling van mekaar afhanklik, wat dus tot die ingewikkeldheid van die ontleding bydra. Indien die spanning vir 'n bepaalde toepassing bereken moet word, moet die faktore wat die spanning beïnvloed puntsgewys geëvalueer word ten einde die stelsel so akkuraat moontlik te simuleer.

(a) Die tipe reaktor

Drie tipes reaktore word onderskei, naamlik lotreaktore, propvloeireaktore en volledig vermengde reaktore. Hierdie reaktore het onderling unieke eienskappe wat reaksies, wat in dié reaktore plaasvind, beïnvloed. Gevolglik word die spanning vir die elektrochemiese reaksies, wat in die reaktor moet plaasvind, ook beïnvloed.

(i) Die lotreaktor

Die lotreaktor is 'n enkelladingreaktor. Dié reaktor word met die reagentse gelaai en die reaksie word aan die gang gesit. Soos wat die reaksie in die reaktor plaasvind, neem die konsentrasie van die reagentse af en neem die konsentrasie van die produkte toe. Die reaksietempo neem dus af namate die reaksie plaasvind omdat die konsentrasie van die reagentse afneem. Wanneer die reaksie tot die verlangde stadium gevorder het, word die inhoud van die reaktor verwyder, waarna die reaktor vir die volgende siklus met nuwe reagentse gelaai word.

(ii) Die propvloeireaktor

Die propvloeireaktor is 'n kontinuevloei-reaktor, waar die reagentse kontinu in die reaktor gevoer word. Die inhoud van die reaktor word nie vermeng nie en die reagentse vloei dus in 'n "prop" deur die reaktor. Die konsentrasie van die reagentse en die reaksietempo neem dus af namate die reagentse deur die reaktor vloei en die reaksies plaasvind.

(iii) Die volledig vermengde reaktor

Die volledig vermengde reaktor is ook 'n kontinuevloei-reaktor. Hierdie reaktor bestaan uit 'n bak waarin die reaksie plaasvind en waarin die reagentse volledig vermeng word. Namate die reagentse in die reaktor gevoer word, word hulle deur die inhoud van die reaktor verdun. Die konsentrasie van die reagentse en die produk in die uitvloeisel van die reaktor is dus

dieselfde as dié in die reaktor.

Soos daar uit die beskrywing van die reaktortipes gesien kan word, verskil die tipes onder andere ten opsigte van die konsentrasie van die reagense en produkte in die reaktore. Dit het tot gevolg dat die modelle vir die berekening van die spanning ten opsigte van elke reaktor tipe sal verskil.

Vir die suiwering van rioolwater word die lotreaktor as onprakties beskou omdat rioolwater wat gesuiwer word in 'n kontinue stroom na die suiweringswerke vloei. Hierdie reaktortipe word dus nie verder by dié navorsing in ag geneem nie.

In die geval van 'n stadige reaksiestelsel is daar slegs 'n geringe verskil tussen die propvloei- en die volledig vermengde reaktor, volgens Pickett (Pickett, 1979) en kan die benadering wat by die ontwerp van die propvloeireaktor gevolg word ook by die ontwerp van die volledig vermengde reaktor gevolg word.

(b) Die konfigurasie van die selle.

Indien meer as een elektrochemiese sel in 'n reaktor gebruik word, kan die selle volgens verskillende metodes onderling met mekaar gekoppel word om verskillende konfigurasies van selle te vorm. Die konfigurasies wat aldus gevorm kan word, is die volgende:

- Die enkelsel
- Monopolêre selle wat in serie geskakel is
- Monopolêre selle wat in parallel geskakel is
- Bipolêre selle wat in serie geskakel is.

Die konfigurasie waarin die selle met mekaar gekoppel word, beïnvloed die elektriese skakeling van die selle, wat tot gevolg het dat die elektriese weerstand van die stelsel en gevolglik ook die spanning en die wyse waarop die stroom deur die selle vloei regstreeks hierdeur beïnvloed word. Hierdie komponent van die spanning het dus die grootste uitwerking op die proses.

Die verskillende konfigurasies hou almal voor- en nadele vir die toepassings in die verskillende fasette van die elektrochemie in en word derhalwe hieronder in meer besonderhede bespreek.

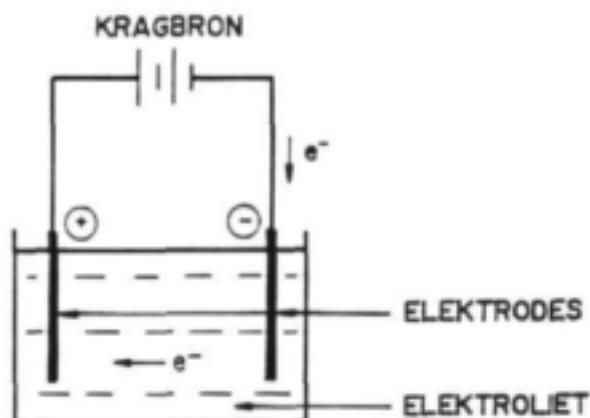
(i) Die enkelsel

Die enkelsel is die eenvoudigste elektrochemiese sel. Dit bestaan uit slegs twee elektrodes, naamlik 'n anode en 'n katode, wat in die elektroliet gedompel is. Die elektrodes is dan of aan 'n eksterne kragbron of aan 'n stroombaan wat die sel van elektriese energie moet voorsien, gekoppel, wat daarvan afhang of die sel elektrolities of voltaies van aard is. Skematies lyk die sel soos dit in Figuur 3a getoon word. Die ekwivalente elektriese diagram van die sel word in Figuur 3b gegee.

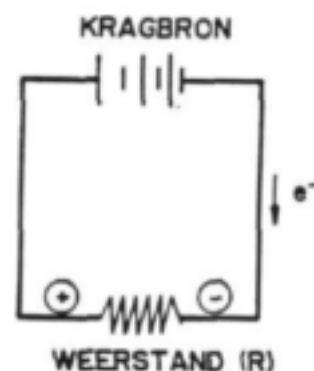
By die enkelsel is die elektrodes monopolêr, dws die polariteit van die elektrodes is konstant oor elke elektrode.

Die voordele wat die enkelsel bied, is dat dit 'n eenvoudige sel is wat maklik ontleed kan word. Die enkelsel kan as die basiese elektrochemiese sel beskou word.

Die nadele van die enkelsel is eerder prakties van aard. Die oppervlak van die elektrodes word onprakties groot by die ontwerp van 'n praktiese elektrochemiese reaktor. Die hele stroom vloei verder deur die elektrodes, wat tot gevolg het dat die geleiers na die elektrodes onder praktiese toestande baie dik en groot moet wees om die weerstand in die geleiers te beperk. Hierdeur word die koste van die sel verhoog, en dit is dus beter om van die ander konfigurasies gebruik te maak.



Figuur 3a: Die enkelsel



Figuur 3b: Elektriese diagram
van 'n enkelsel

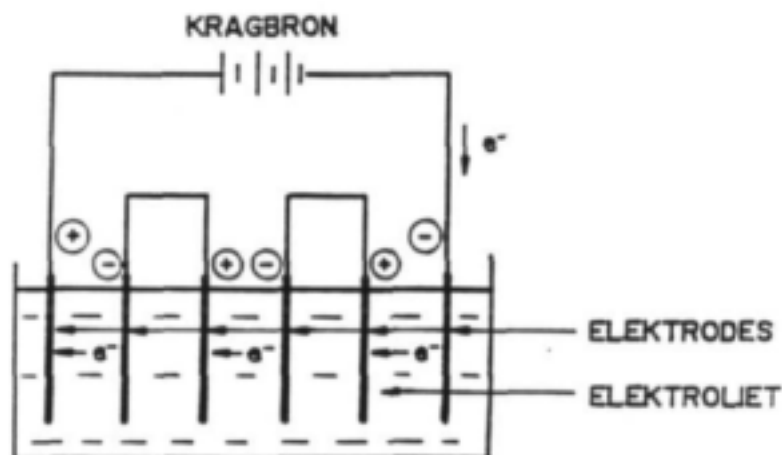
(ii) Monopolêre selle wat in serie geskakel is

Uit die enkelsel is die monopolêre selle wat in serie geskakel is, ontwikkel. Hierdie konfigurasie bestaan uit 'n aantal enkelselle wat in serie met mekaar geskakel is soos in Figuur 4a aangetoon. Die ekwivalente elektriese diagram word in Figuur 4b weergegee.

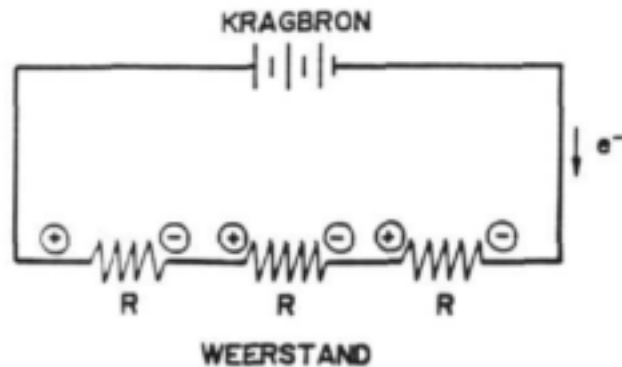
Soos in Figuur 4a gesien kan word, vloei die hele stroom teoreties deur al die selle in die konfigurasie. Hierdeur word die stroom wat vir die elektrolise nodig is vergeleke met dié van die enkelsel verminder, omdat die stroom deur 'n aantal selle vloei om die gewenste reaksies uit te voer. Dit het egter tot gevolg dat die weerstand van die stelsel vergroot word, wat daartoe lei dat die spanning volgens Ohm se wet vergroot moet word.

Die verlaagde stroom gee daartoe aanleiding dat die fisiese grootte van die elektrodes verklein kan word, hoewel meer elektrodes in hierdie stelsel voorsien word. Die stelsel is verder daarvan afhanklik dat alle selle gekoppel moet wees om die stroom te kan laat vloei. Hierdie stelsel is dus meer kwesbaar waar defekte in die selle voorkom.

Nog 'n nadeel van hierdie stelsel is die verlies aan die doeltreffendheid van die sel wat 'n gevolg is van dwaalstrome wat nie deur al die selle vloei nie. Hierdie probleem kan egter verminder word deur die kante van die elektrodes af te skerm of deur die selle fisies van mekaar te skei deur hulle byvoorbeeld in verskillende kompartemente te plaas, soos daar in loodsuurbatterye gedoen word. Indien 'n groot reaktor egter gebou word, kan hierdie skeidings praktiese probleme oplewer, wat hierdie konfigurasie ongeskik vir die spesifieke aanwending maak.



Figuur 4a: Monopolêre selle wat in serie geskakel is



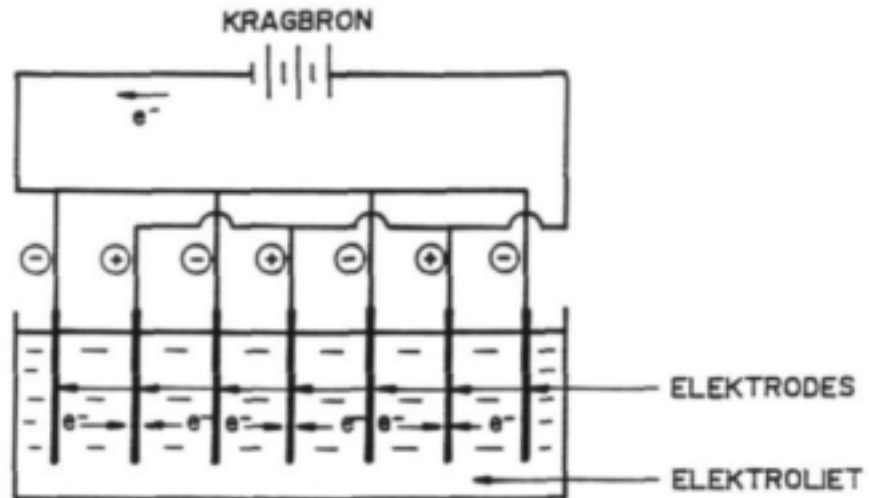
Figuur 4b: Elektriese diagram vir monopolêre selle

(iii) Monopolêre selle wat in parallel geskakel is

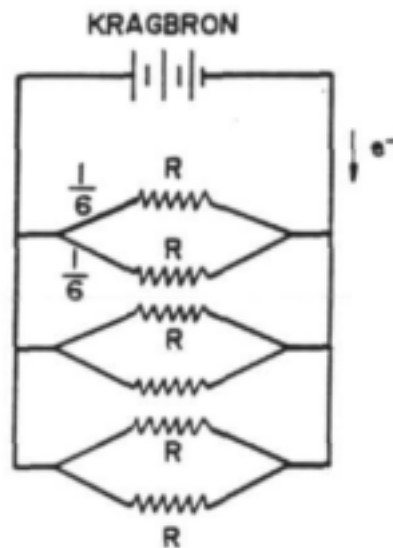
In hierdie konfigurasie word al die anodes onderling en die katodes onderling elektries met mekaar gekoppel soos in Figuur 5a aangetoon. Dit het tot gevolg dat die spanning oor die hele konfigurasie gelyk is aan die spanning oor een sel. Die stroom word egter tussen die verskillende selle verdeel, met die gevolg dat die stroom deur 'n enkelsel wel klein is, maar dat die stroom wat van die kragbron af na die konfigurasie vloei, gelyk is aan die som van die stroom deur alle selle, en gevolglik groot sal wees.

Die voordeel wat hierdie stelsel inhou, is dat verliese as gevolg van elektriese dwaalstrome blykbaar nie groot is nie.

Die nadele van hierdie stelsel is egter dat elke elektrode afsonderlik gekoppel moet word, wat die stelsel ietwat lomp maak. Verder is daar in groot stelsels, vanweë die groot strome wat vloei, groot geleiers van die kragbron af na die selkonfigurasie nodig om die energieverliese in die geleiers te beperk. Die opwekking van groot elektriese strome by 'n lae spanning blyk ook moeilik en daarom baie duur te wees.



Figuur 5a: Monopolêre selle wat in parallel geskakel is



Figuur 5b: Elektriese Diagram van monopolêre selle wat in parallel geskakel is

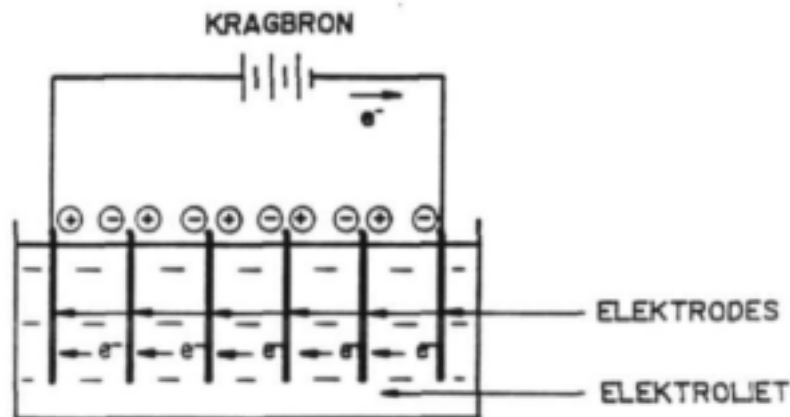
(iv) Bipolêre elektrodes wat in serie geskakel is

In hierdie konfigurasie is die polariteit van die elektrodes nie konstant oor die elektrodes nie, maar is die een kant van die elektrodes anodies terwyl die ander kant van die elektrodes katodies is. Dit word bewerkstellig deur die kragtoevoer slegs aan die buitenste elektrodes te koppel. Die stroom wat dan deur die selle vloei, induseer 'n anode aan die een

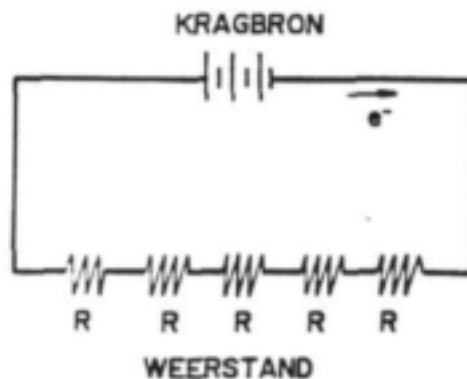
kant van die elektrode, terwyl dit aan die ander kant van die elektrode 'n katode induseer soos in Figuur 6a aangetoon.

Die voordeel van hierdie konfigurasie is dat die opstelling baie eenvoudig is. Die instandhouding van die elektrodes is verder baie eenvoudig omdat elektriese koppelings slegs aan die buitenste elektrodes voorkom. Verder vloei die hele stroom teoreties ook deur al die selle waardeur die geleiers en die kragbron meer ekonomies word.

Die nadeel van hierdie stelsel is die verlies aan doeltreffendheid wat veroorsaak word deur die voorkoms van dwaalstrome wat nie deur die elektrodes beweeg nie. Die uitwerking van die dwaalstrome kan moontlik beperk word deur die elektrodes by die ente af te skerm. Die werklike uitwerking van die dwaalstrome moet egter eksperimenteel bepaal en gekwantifiseer word.



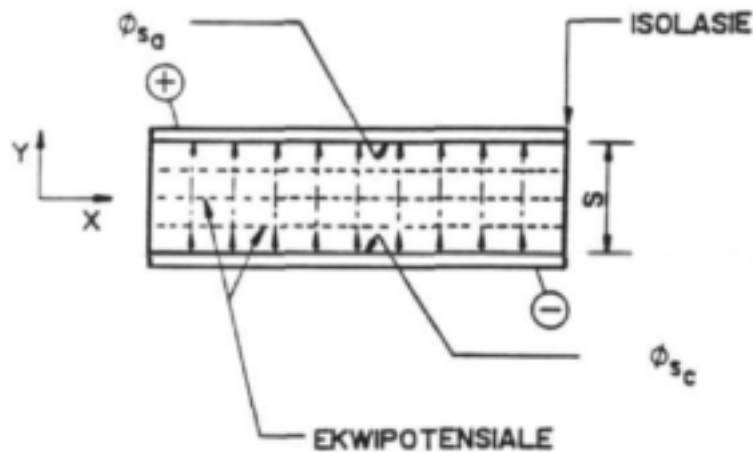
Figuur 6a: Bipolêre elektrodes wat in serie geskakel is



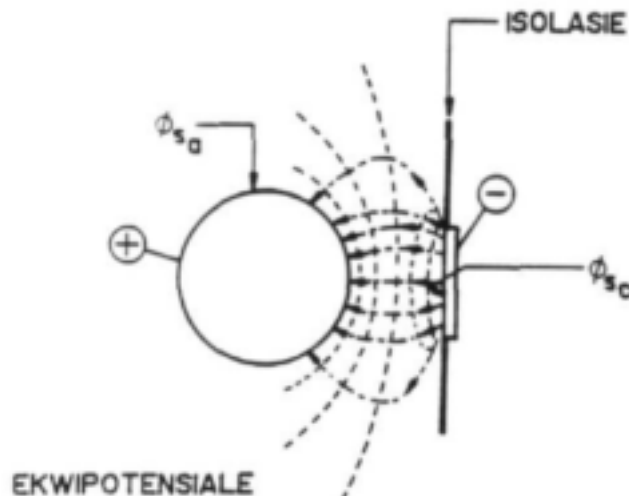
Figuur 6b: Elektriese diagram vir bipolêre elektrodes
wat in serie geskakel is

(c) Die geometrie van die elektrodes

Die geometrie van die elektrodes het 'n uitwerking op die verspreiding van die stroomlyne tussen die elektrodes waardeur die weerstand van die sel beïnvloed word. Beskou die volgende twee elektrochemiese reaktore in Figure 7a en 7b. Figuur 7a toon 'n tweedimensionele skets van 'n eenvoudige reaktor wat uit twee parallelle plate met dieselfde afmetings bestaan. Die plate is op 'n afstand s uit mekaar en die z -rigting is loodreg op die vlak van die bladsy. Figuur 7b toon 'n reaktor met elektrodes van enige arbitrêre vorm en oppervlak aan. Indien 'n spanning $V = E_e + V_n + V_{ohm}$, waar E_e die ewewigspotensiaal van die sel, V_n die potensiaal benodig deur die oorspanning en V_{ohm} die spanning wat benodig word om die elektriese weerstand van die sel te oorbrug is, oor die elektrodes in Figuur 7a aangelê word, sal die potensiaal op die elektrodes gelyk wees aan die ewilibrumpotensiale van die elektrodes, en die potensiaal van die oplossing naby die elektrodes sal konstant en onderskeidelik gelyk aan ϕ_{sa} en ϕ_{sc} wees. $V_{ohm} = \phi_{sa} - \phi_{sc}$.



Figuur 7a: Paralleleplaatreaktor



Figuur 7b: Arbitrêre elektrodes

Indien die spanning V verhoog word, sal daar 'n groter stroom vloei en sal V_{ohm} styg. Die verband tussen die stroom en die spanningsval staan as Ohm se wet bekend, wat as volg geskryf kan word:

$$i = -k \frac{(\delta \phi_s)}{\delta h} \dots \dots \dots (a) \quad h=0$$

waar i = stroomdigtheid
 k = spesifieke konduktiwiteit van die oplossing
 h = koördinaat loodreg op die vlak van die elektrodes.
 ϕ_s = potensiaal op 'n koördinaat in die elektroliet (volt)

In die reaktor van Figuur 7a kan die stroom slegs in die y -rigting tussen die elektrodes vloei en is die potensiaalgradiënt dus eendimensioneel. Hieruit volg dit dat die stroomdigtheid i konstant is en dat die stroom dus eweredig oor die elektrodes versprei is met $V_{ohm} = iS/k$.

In die reaktor in Figuur 7b is die elektrode-oppervlakke met die konstante potensiaal in die x - en y -rigtings versprei en sal die ekwipotensiale gevolglik ook so versprei wees. Die verspreiding van die stroomlyne dui die stroomdigtheid aan - hoe nader die stroomlyne aanmekaar gespasieer is, des te groter is die stroomdigtheid. Hoewel vergelyking (a) hierbo nog steeds die grootte en rigting van die stroomdigtheid op enige punt op die elektrode-oppervlak weerspieël, word die potensiaal in die oplossing deur die driedimensionele algemene vergelyking

$$\frac{\delta^2 \phi_s}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \phi_s}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \phi_s}{\delta z^2} = 0$$

beskryf. Hierdie vergelyking staan as Laplace se vergelyking bekend en moet ten opsigte van sekere randvoorwaardes opgelos word. Die oplossing vir die reaktor in Figuur 7a is in werklikheid die oplossing vir die eendimensionele vorm van Laplace se vergelyking.

(d) Die afstand tussen die elektrodes

Die afstand tussen die elektrodes beïnvloed die weerstand van die elektrochemiese sel. Hoe groter die afstand tussen die selle, des te groter is die weerstand van die sel en des te groter is die spanning wat nodig is om die stroom volgens Ohm se wet deur die sel te laat vloei (Pickett, 1979).

(e) Die geleidingsvermoë van die elektroliet

Die geleidingsvermoë van die elektroliet beïnvloed ook die weerstand van die elektrochemiese sel. Hoe groter die geleidingsvermoë van die elektroliet, des te kleiner word die weerstand van die sel, en volgens Ohm se wet sal die spanning wat nodig is om 'n bepaalde stroom deur die sel te laat vloei, dan ook afneem (Pickett, 1979).

(f) Die vloeitoestande tussen die elektrodes

In die algemeen word daar tussen twee vloeitoestande wat tussen die elektrodes kan voorkom, onderskei, naamlik laminêre en turbulente vloei. Tydens laminêre vloei is daar feitlik geen vermenging van die vloeistof tussen die elektrodes nie, terwyl dit wel by turbulente vloei voorkom. Turbulente vloei verbeter dus die migrasie van die elektro-aktiewe ione na die elektrodes, waardeur die grenslaag op die elektrodes verlaag word, wat voordelig is vir reaksies wat deur massa-oordrag beperk word (Plechter, 1981).

(g) Die temperatuur van die elektroliet en die elektrodes

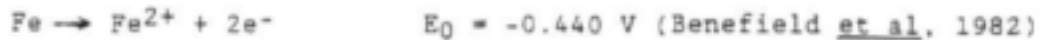
Die temperatuur van die elektroliet en die elektrodes beïnvloed die geleidingsvermoë van die elektroliet en die elektrodes. Die geleidingsvermoë van metaalgeleiers neem gewoonlik met 'n toename in temperatuur af, terwyl die geleidingsvermoë van die elektroliet met 'n toename in die temperatuur toeneem (Charlot et al., 1962).

(h) Die reaksiesisteen

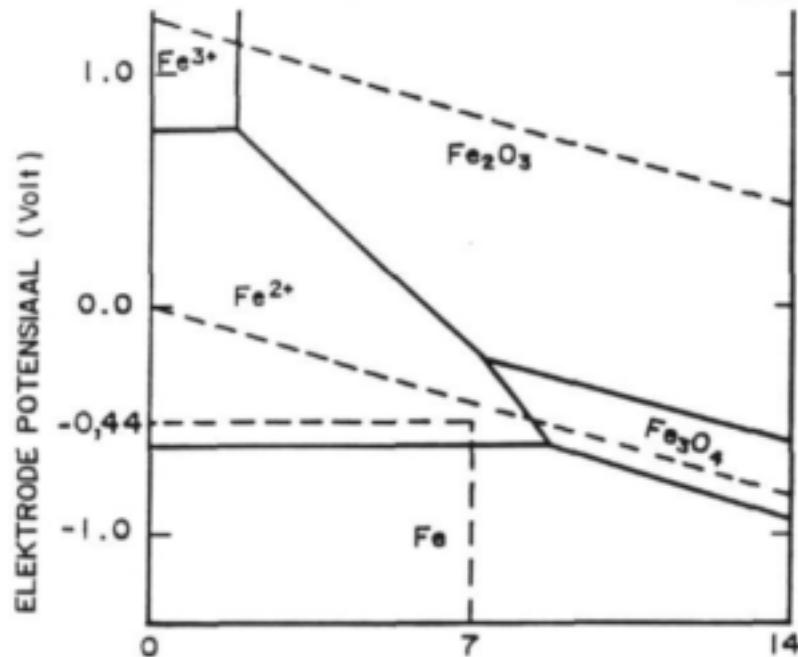
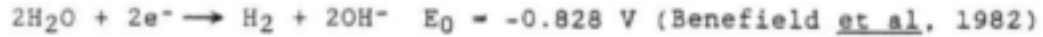
Die reaksiesisteen waarvolgens die elektroliese van yster in die watersuiwering plaasvind word deur die aktiveringsenergie beheer omdat die konsentrasie van yster in die elektroliet laag is. Massa-oordrag kan dus nie die beperkende stap wees nie en gevolglik is die model van die stadige reaksiesisteen van toepassing.

Die reaksies wat tydens die elektrolietiese oplossing van yster voorkom, is volgens die Pourbaix-diagram in Figuur 8 (Brubaker en Phipps, 1979) die volgende:

Reaksie by die anode



Reaksie by die katode



Figuur 8: Pourbaix-diagram vir die Fe-Fe²⁺-Fe³⁺-Fe₂O₃-Fe₃O₄-sisteem

Pickett (1979) het oplosings vir die Laplace-vergelykings afgelei vir reaksies waar gas by die elektrodes ontstaan en waar gas nie by die elektrodes ontstaan nie. Die vergelykings deur Pickett afgelei, is soos volg:

Sonder gasvorming

$$V_{\text{ohm}} = \frac{I \cdot S}{B \cdot L \cdot k} \dots \dots \dots (a)$$

waar V_{ohm} = spanning benodig om die weerstand van die sel te oorbrug (volt)

- I = stroom wat deur sel vloei (amp)
- S = afstand tussen elektrodes (m)
- B = breedte van elektrodes (m)
- L = lengte van elektrodes (m)
- k = spesifieke elektriese geleiding van die elektroliet (mho/m).

In hierdie vergelyking kan alle parameters aan die regterkant van die vergelyking maklik deur meting bepaal word en die vergelyking kan dus maklik opgelos word.

Met gasvorming

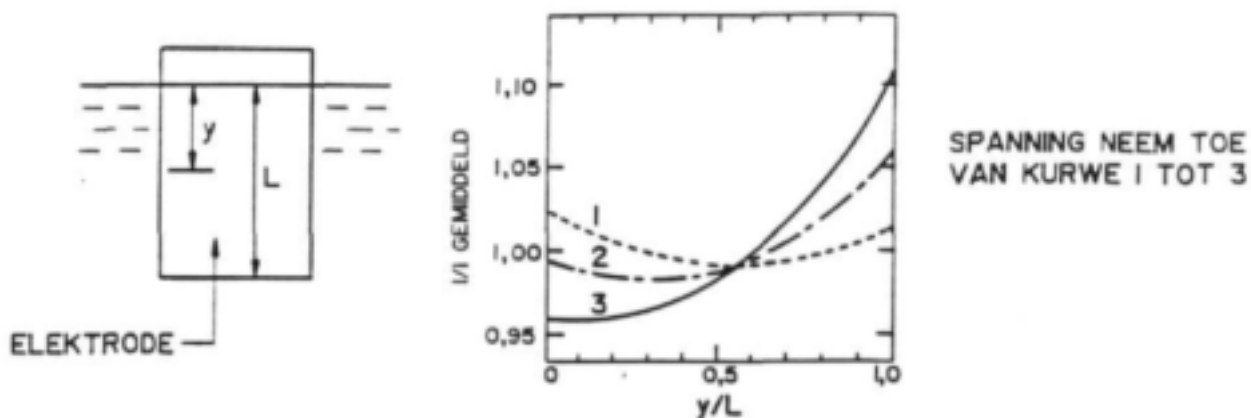
In hierdie geval moet twee vergelykings gelyktydig opgelos word, naamlik

$$I = B \int_0^L i_y dy \text{ en}$$

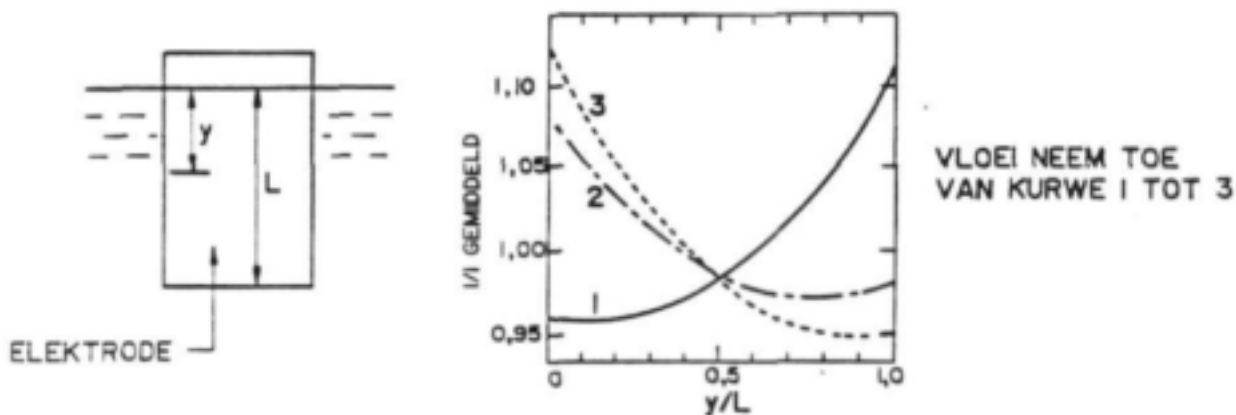
$$V_{ohm} = \frac{i_y S}{K} \left(1 + \frac{RT}{QpF} \left(\frac{1}{z_a} + \frac{1}{z_c} \right) \right)^{3/2} \left(I - B \int_0^y i_y dy \right) \dots \dots \dots (b)$$

- waar i_y = stroomdigtheid oor 'n element van die elektrode (amp/m²)
 R = universele gaskonstante (8,314 kJ/(mol °K))
 T = absolute temperatuur (°K)
 Q = vloeitempo van die elektroliet tussen die elektrodes (m³/s)
 p = atmosferiese druk (kPa)
 F = Faraday se konstante (96487 Coulomb)
 z_a = elektronoordragsyfer by die anode
 z_c = elektronoordragsyfer by die katode
 B = afmeting van die elektrode in die vloeirigting van die elektroliet (m)
 y = koördinaat in die vloediepte van die elektroliet (m)
 L = vloediepte van die elektroliet (m)

Ten einde vergelyking (b) hierbo op te los, is dit nodig dat die verspreiding van die stroomdigtheid oor die elektrode bekend is sodat die integraal bereken kan word. Die verspreiding van die stroomdigtheid oor die elektrodes kan bereken word deur die oplossing van 'n Laplace transformasie wat egter ondermeer afhanklik is van aanames ten opsigte van die elektrode-oppervlak (Pickett, 1979). Volgens Rousar et al (1986) is die verspreiding van die stroomdigtheid oor die elektrode egter ook afhanklik van die spanning wat aangewend word, die gasvorming op een van die elektrodes en die vloeisnelheid waarteen die elektroliet by die elektrodes verby vloei soos daar in Figure 9 en 10 aangetoon word. Hierdeur word die gebruik van die formule redelik lomp en onprakties en vergelyking (a) word gewoonlik vir die berekening van die spanning gebruik (Paul, 1987).



Figuur 9: Die uitwerking van die spanning op die verspreiding van die stroomdigtheid op die elektrodes



Figuur 10: Die uitwerking van die vloeitempo van die elektroliet tussen die elektrodes op die verspreiding van die stroomdigtheid op die elektrodes

3.3.4 Saamgestelde vergelyking om die spanning tydens elektrolise te voorspel

Uit die voorafgaande drie afdelings 3.3.1 tot 3.3.3 kan daar as volg 'n model saamgestel word waarvolgens die spanning vir elektrolise voorspel kan word, naamlik

$$V = E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm}$$

waar: V = Spanning benodig deur die sel (volt)
 E_e = Ewewigspotensiaal van die sel (volt)
 n_a = Oorspanning by die anode (volt)
 n_c = Oorspanning by die katode (volt)
 V_{ohm} = Spanning benodig as gevolg van die weerstand van
die sel (volt)

Die eerste term aan die regterkant voorsien vir die ewewigspotensiale van die betrokke reaksies, en die tweede term tussen hakies voorsien vir die kinetika om die reaksies te laat plaasvind. Terwyl die eerste twee terme met die chemiese eienskappe van die sel te doen het, voorsien die derde term vir die fisiese eienskappe van die sel en is dit dus van die konfigurasie van die selle afhanklik.

Indien hierdie model in die praktyk toegepas word, moet die volgende parameters deur fisiese meting bepaal word:

- Die temperatuur van die elektroliet
- Die pH van die elektroliet
- Die konsentrasie yster in die elektroliet
- Die elektriesestroom
- Die elektrode oppervlakte
- Die afstand tussen die elektrodes
- Die spesifieke geleiding van die elektroliet

Die volgende vergelykings kan vir die verskillende konfigurasies van selle opgestel word om die spanning vir die konfigurasies te bereken. Daar word in die vergelykings veronderstel dat alle selle gelyk is en dus gelyke elektriese en chemiese eienskappe het.

- Die enkelsel

$$V = E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm}$$

- Monopolêre selle wat in serie geskakel is

$$V = N (E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm})$$

N = getal selle wat in serie geskakel is

- Bipolêre selle wat in serie geskakel is

$$V = N (E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm})$$

N = getal selle wat in serie geskakel is

- Monopolêre selle wat in parallel geskakel is

$$V = E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm}$$

3.4. Kwantifisering van die hoeveelheid produkte wat tydens elektrolise gevorm word

Die wet wat die verwantskap tussen die hoeveelheid produkte wat tydens elektrolise gevorm word en die hoeveelheid elektrisiteit wat vloei, is in 1834 deur Faraday ontdek (Bockris en Reddy, 1973). Dit kan soos volg saamgevat word:

Een gramekwivalent produkte word by 'n elektrode gevorm indien 96487 coulomb elektrisiteit deur die elektrodes vloei (Pickett, 1979).

Wiskundig kan hierdie wet soos volg omskryf word:

$$w = \frac{I t M}{z F}$$

waar w = hoeveelheid produk wat gevorm is (gram)
 I = stroom wat deur die elektrode vloei (ampère = Coulomb/sekonde)
 t = tyd (sekondes)
 M = molmassa van die produk (gram)
 z = getal elektrone wat by die reaksie betrokke is
 F = Faraday se konstante (96487 coulomb).

Volgens hierdie wet is die hoeveelheid metaal wat dus in 'n elektrolitiese reaksie opgelos word regstreeks eweredig aan die stroom wat vloei en die tydsduur wat die stroom vloei.

Verder veronderstel Faraday se wet dat die hoeveelheid metaal wat opgelos word omgekeerd eweredig is aan die getal elektrone wat stoichiometries aan die reaksie deelneem. Dit beteken dat daar meer metaalione vrygestel word

indien die valensie van die metaal laag is. Gevolglik sal daar dus meer ysterione met 'n valensie van 2 vrygestel word as wat daar byvoorbeeld aluminiumione met 'n valensie van 3 vrygestel sal word indien dieselfde stroom deur albei elektrodes vloei.

Soos daar in afdeling 3.3.3 (b) gemeld is, het die konfigurasies waarin die selle met mekaar gekoppel is, 'n uitwerking op die stroom wat vir die elektrolise nodig is. Vergelykings vir die verskillende konfigurasies kan dus afgelei word waarmee die benodigde stroom bereken kan word om 'n sekere hoeveelheid metaal op te los.

- Die enkelsel en monopolêreselle in parallel geskakel

$$I = \frac{w z F}{t M}$$

By monopolêre selle wat in parallel geskakel is, sal die stroom wat deur die individuele selle vloei, gelyk aan die hele stroom wees, wat deur bostaande formule bereken kan word, gedeel deur die getal selle wat voorsien word.

- Monopolêre en bipolêre selle wat in serie geskakel is

$$I = \frac{w z F f}{N t M}$$

N = getal selle

f = faktor vir die voorsiening vir dwaalstrome

3.5. Energievereistes vir elektrolise

Dit is ten slotte belangrik dat die energievereistes vir elektrolise bepaal moet word om die energie koste te kan bepaal wat in die evaluering van die stelsel in berekening gebring moet word.

Volgens die klassieke elektrotegniek is die elektriese krag die produk van die stroom en die spanning, met ander woorde $P = I V$. Die energie is weer die produk van die krag en die tydsduur wat die krag aangewend word, met ander woorde $\text{energie} = P t$. Die eenheid vir elektriese energie is kilowatt-uur (kWh) en die eenheid vir elektriese krag is kilowatt (kW) (Hughes, 1973).

Die krag- en energievereistes vir elektroliese kan dus maklik met behulp van die vergelykings wat in afdelings 3.2.3 en 3.2.4 afgelei is, bepaal word, en dit is dus moontlik om 'n vooruitskatting van die kostes vir die proses te kan maak.

3.6. Gevolgtrekking

Elektrochemie is 'n gevorderde wetenskap wat veral toepassing in die metaalherwinning en platering, energie-opberging in batterye, en die studie en bekamping van korrosie vind.

Van die teoretiese agtergrond kan die volgende gevolgtrekkings gemaak word, wat dan ook in hierdie studie verder ondersoek word:

- (a) Ten einde 'n vooruitskatting van die energiebehoeftes van die proses te kan maak, is dit nodig dat die stroom en die spanning wat deur die proses benodig word, bereken word.
- (b) Die stroom kan deur Faraday se wet bereken word, en dit is dus nodig dat die toepaslikheid van hierdie wet eksperimenteel bepaal word vir -
 - (i) die enkelsel as algemene model
 - (ii) verskillende selkonfigurasies.
- (c) 'n Model waarvolgens die spanning bereken kan word, word in die bespreking voorgestel. Die toepaslikheid van hierdie model, veral ten opsigte van die verskillende selkonfigurasies, moet eksperimenteel bepaal word ten einde die betroubaarheid van die model te kan aantoon.

HOOFSTUK 4

EVALUERING VAN DIE TEORETIESE MODELLE MET DIE OOG OP PRAKTIESE TOEPASSING

4.1. Inleiding

Uit die voorgaande twee hoofstukke oor die teoretiese agtergrond en die literatuurstudie kan die volgende aspekte uitgelig word vir verdere ondersoek:

- (a) Die toepaslikheid van Faraday se wet vir die bepaling van die elektriese stroom wat nodig is om 'n bepaalde hoeveelheid metaal, onder verskillende selkonfigurasies, in water op te los .
- (b) Die toepaslikheid van die volgende afgeleide modelle om die spanning wat vir die reaksie nodig is, te bepaal:

Die enkelsel

$$V = E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm}$$

Monopolêre selle wat in serie geskakel is

$$V = N (E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm})$$

Bipolêre selle wat in serie geskakel is

$$V = N (E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm})$$

Monopolêre selle wat in parallel geskakel is

$$V = E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm}$$

- waar:
- V = Spanning benodig deur die sel (volt)
 - E_e = Ewewigspotensiaal van die sel (volt)
 - n_a = Oorspanning by die anode (volt)
 - n_c = Oorspanning by die katode (volt)
 - V_{ohm} = Spanning benodig as gevolg van die weerstand van die sel (volt)
 - N = getal selle wat in serie geskakel is

$$E_e = E_0 - \frac{R T}{z F} \ln \frac{[\text{reduseermiddel}]}{[\text{oksideermiddel}]}$$

E_e = die ewewigpotensiaal (volt)

E_0 = die selpotensiaal wat 'n konstante van die redokstelsel is (volt)

R = die gaskonstante (8,314 kJ/(mol °K))

T = die absolute temperatuur (°K)

z = die getal elektrone wat by die reaksie betrokke is

F = Faraday se konstante (96487 coulombs)

[oksideermiddel] = die effektiewe konsentrasie van die oksideermiddel

[reduseermiddel] = die effektiewe konsentrasie van die reduseermiddel

$$n = a + b \log i$$

n = oorpotensiaal (volt)

a = Tafelkonstante (volt)

b = Tafelkonstante (volt m²/amp)

i = stroomdigtheid (amp/m²)

a = -0,06 volt en b = -0,118 volt vir die waterstofreaksie en

a = 0,06 volt en b = 0,08 volt vir die oplossing van yster

$$V_{ohm} = \frac{I S}{B L k}$$

I = stroom wat deur sel vloei (amp)

S = afstand tussen elektrodes (m)

B = breedte van elektrodes (m)

L = lengte van elektrodes (m)

k = spesifieke elektriese geleiding van elektroliet (mho/m).

(c) Die doeltreffendheid van die gevormde flokkulante ten opsigte van die verwydering van fosfaat en die vermindering van die chemiese suurstofbehoefte.

(d) 'n Vergelyking tussen die elektrochemiese en konvensionele chemiese prosesse.

4.2. Eksperimente

Die volgende eksperimente is gedoen om bostaande aspekte te ondersoek:

4.2.1. Eksperiment 1

Die doel van Eksperiment 1 is om te bepaal of die hoeveelheid metaal wat tydens elektrolise opgelos word, eweredig is aan die elektriese stroom wat deur die metaalelektrodes vloei.

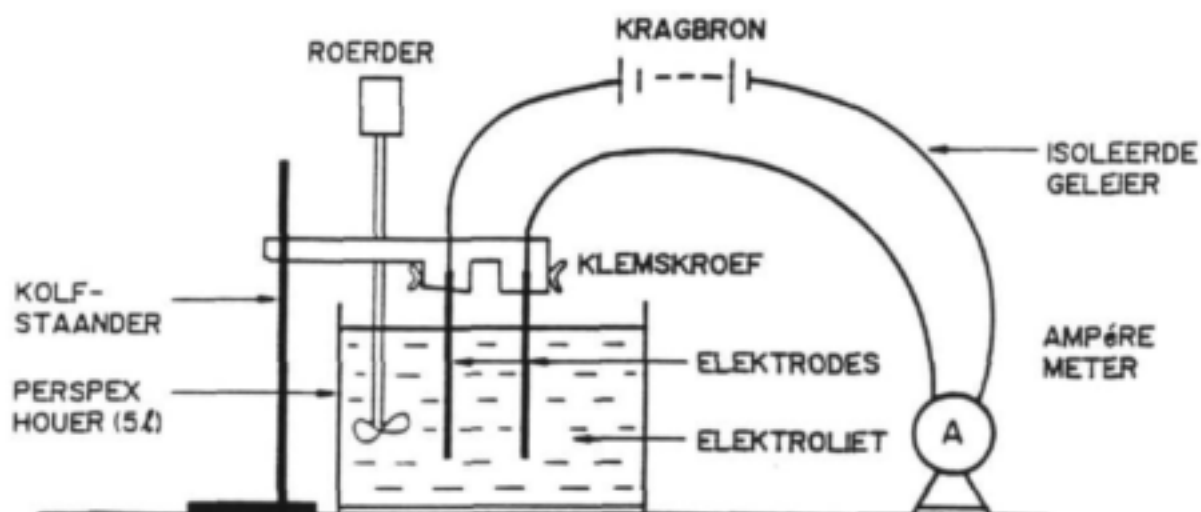
(a) Apparaat

Die apparaat wat in hierdie reeks eksperimente gebruik is, is as volg:

- Kragbron: Hewlett Packard HP 6002A DC Power Supply
- Stroommeter: Fluke 8050A Digital Multimeter
- Roerder: Heidolph RZR O/4
- Elektrodemateriaal: Sagtestaalplaatjies, 100 x 50 x 3 mm
- Geleidingsmeter: Radiometer CDM 2e
- Weegskaal: Elektronies.

(b) Eksperimentele opstelling

Die opstelling van die eksperimentele apparaat word skematies in Figuur 4.1 weergegee. Kraanwater, waarvan die geleiding met natriumchloried tot ± 100 mS/m verhoog is, is deurgaans in die eksperiment gebruik.



Figuur 4.1 : Eksperimentele opstelling

(c) Eksperimentele metode

- Twee sagtestaalplaatjies (wat vrylik in die handel beskikbaar is) met afmetings 100 x 50 x 3 mm is as elektrodes gebruik.
- Die elektrodes is met gekonsentreerde soutsuur geëts en met 'n elektriese staalborsel skoon geskuur om alle walsskaal en roes van die oppervlakke te verwyder (ASTM-metode G1).
- Die elektrodes is met asetoon ontvet (ASTM metode G1).
- Die elektrodes is 'n uur lank in 'n oond by 105°C gedroog en in 'n desikkator tot kamertemperatuur laat afkoel.
- Die massa van elke elektrode is op 'n elektroniese weegskaal bepaal.
- Die elektrodes is in die elektrodehouer geplaas en aan die kragbron gekoppel.
- Die elektrodes is daarna in die lotreaktor met die water geplaas.
- Die kragbron is aangeskakel.
- Die stroom is elke 5 minute genoteer om afwykings in die stroom in berekening te kan neem by die berekening van die massa yster wat in die proses in die water opgelos is, en na presies 30 minute is die stroom afgeskakel.
- Die elektrodes is uit die elektroliet verwyder en met kraanwater en 'n plastiekborsel skoongemaak.
- Die elektrodes is 'n uur lank in 'n oond by 105°C gedroog en in 'n desikkator tot kamertemperatuur laat afkoel.
- Die massa van elke elektrode is op 'n elektroniese weegskaal bepaal.
- Die hele prosedure is ten opsigte van verskillende stroominstellings herhaal.

(d) Resultate

Die resultate wat in die eksperiment verkry is, word in Tabel 4.1 weergegee.

Die beste kromme wat in kolom 3 van Tabel 4.1 gegee word, is deur middel van 'n lineêre regressiefunksie op 'n Hewlett Packard-71B rekenaar tussen kolomme 1 en 2 van die tabel bepaal. Die korrelasie tussen hierdie twee kolomme was 0,9999 en is ook deur middel van 'n funksie op dié rekenaar bepaal.

Die persentasieverskil wat in kolom 6 van die tabel gegee word, is bereken deur die waarde in kolom 5 deur die waarde in kolom 4 van die tabel te deel en dan as 'n persentasie uit te druk.

Tabel 4.1: Vergelyking tussen eksperimentele en berekende waardes vir Eksperiment 1

1	2	3	4	5	6
Stroom	Massa metaal elektro-lities opgelos in 30 min.	Beste passing	Massa metaal bereken mbv Faraday se wet vir Fe^{2+}	Verskil tussens kolom 3 en 4	Persentasie verskil
mA	mg	mg	mg	mg	%
199,88	108,9	110,52	104,13	6,39	6,14
399,95	216,0	215,63	208,35	7,28	3,49
600,62	319,7	321,05	312,89	8,16	2,61
802,22	421,8	426,96	417,92	9,04	2,16
999,98	529,2	530,85	520,94	9,91	1,90
1199,87	640,9	635,86	625,07	10,79	1,73
1400,73	746,6	741,38	729,71	11,67	1,60
1601,05	851,7	846,62	834,07	12,55	1,50
1800,33	948,8	951,31	937,88	13,43	1,43
1995,48	1060,1	1053,83	1039,55	14,28	1,37
2200,00	1158,5	1161,27	1146,09	15,18	1,32
2400,00	1259,4	1266,34	1250,28	16,06	1,28

(e) Gevolgtrekking

'n Korrelasiekoeffisiënt van 0,99 tussen die berekende en die werklike hoeveelhede yster opgelos dui daarop dat Faraday se wet van toepassing is. Hierdie goeie korrelasie dui verder daarop dat yster in die

ferro-vorm (Fe^{2+}) gevorm word en nie in die ferri-vorm (Fe^{3+}) soos Smith (1972) aanvaar het nie.

'n Swakker passing word by laer elektriese strome ondervind.

4.2.2. Eksperiment 2

Die doel van Eksperiment 2 is om te bepaal of die hoeveelheid metaal wat tydens elektrolise in die elektroliet opgelos word, eweredig is aan die tydsduur wat die stroom vloei.

(a) Apparaat

Die apparaat wat in hierdie eksperiment gebruik is, is dieselfde apparaat as dié wat in Eksperiment 1 gebruik is.

(b) Eksperimentele opstelling

Die eksperimentele opstelling vir hierdie eksperiment is dieselfde as dié wat in Eksperiment 1 gebruik is.

(c) Eksperimentele metode

Die eksperimentele metode vir hierdie eksperiment is soortgelyk aan die metode wat in eksperiment 1 gevolg is met die volgende veranderinge:

- In plaas daarvan om die elektriese stroom vir elke herhaling te verander, is die stroom in hierdie eksperiment konstant op 200 mA gehou, wat 'n stroomdigtheid van 40 A/m² gee. Dit val in die verwagte grense van 25 tot 75 A/m² waarbinne die verdere eksperimentele werk uitgevoer is.
- Die tydsduur wat die stroom deur die elektrodes gevloei het, is in hierdie eksperiment vir elke herhaling gewissel.

(d) Resultate

Die resultate wat in hierdie eksperiment verkry is, word in Tabel 4.2 weergegee.

Die beste kromme wat in kolom 3 van die tabel gegee word, is deur middel van 'n lineêre regressiefunksie op 'n Hewlett Packard-71B rekenaar tussen kolomme 1 en 2 van die tabel bepaal. Die korrelasie tussen hierdie twee kolomme was 0,9999 en is ook deur middel van 'n funksie op dié rekenaar bepaal.

Die persentasieverskil, wat in kolom 6 van die tabel gegee word, is bereken deur die waarde in kolom 5 deur die waarde in kolom 4 van die tabel te deel en dan as 'n persentasie uit te druk.

Tabel 4.2: Vergelyking tussen eksperimentele en berekende waardes vir Eksperiment 2

1	2	3	4	5	6
Tydsduur wat stroom vloei	Massa metaal elektro- lities opgelos teen 200 mA	Beste passing	Massa metaal opgelos volgens Faraday se wet vir Fe^{2+}	Verskil tussen kolom 3 en 4	Persen- tasie verskil
minute	mg	mg	mg	mg	%
10	37,2	37,37	34,73	2,64	7,60
20	73,3	72,95	69,46	3,49	5,02
30	108,9	108,53	104,19	4,34	4,17
40	147,0	146,96	141,92	5,04	3,43
60	229,2	229,85	220,94	8,91	3,90
80	340,9	335,86	325,07	10,79	3,17
100	446,6	441,38	429,71	11,67	2,60

(e) Opmerkings

Tydens die uitvoer van die eksperiment is opgemerk dat daar 'n neerslag op die elektrodes vorm en dat dit blyk asof die konsentrasie van die yster in die elektroliet as gevolg van die neerslag nie konstant bly nie.

(f) Gevolgtrekking

Die korrelasiekoëffisiënt van 0,99 tussen die berekende en die werklike hoeveelhede yster geproduseer, wat in hierdie eksperiment verkry is, dui daarop dat die massaverlies van die elektrodes wel eweredig is aan die tydsduur wat 'n elektriese stroom deur die elektrodes vloei en dat

hierdie massa verlies bevredigend deur Faraday se wet beskryf word indien daar aanvaar word dat yster in die ferro-vorm (Fe^{2+}) opgelos word.

'n Swakker passing word by die korter tydperke ondervind.

Die neerslag wat tydens die eksperiment op die elektrodes gevorm het verg verdere ondersoek, veral ten opsigte van 'n moontlike afname in die doeltreffendheid van die beskikbaarstelling van die gevormde metaal-flokkulant.

Die resultate wat in Eksperimente 1 en 2 verkry is, toon aan dat Faraday se wet wel van toepassing is op die bepaling van die massa yster wat in die water gedoseer word en hierdie wet word dus in die verdere eksperimente, met soortgelyke opstellings, gebruik om die hoeveelheid yster wat opgelos word, te bepaal.

Die resultate toon verder dat yster in die ferro-vorm (Fe^{2+}) deur elektroliese geproduseer word in teenstelling met die aanname deur Smith (1972), dat yster in die ferri-vorm (Fe^{3+}) elektrolities opgelos word.

4.2 3. Eksperiment 3

Die bepaling van die spanning wat vir verskillende selkonfigurasies nodig is en die uitwerking van die afmetings van plaatelektrodes op die spanning.

(a) Apparaat

Die apparaat wat in hierdie reeks eksperimente gebruik is, is die volgende:

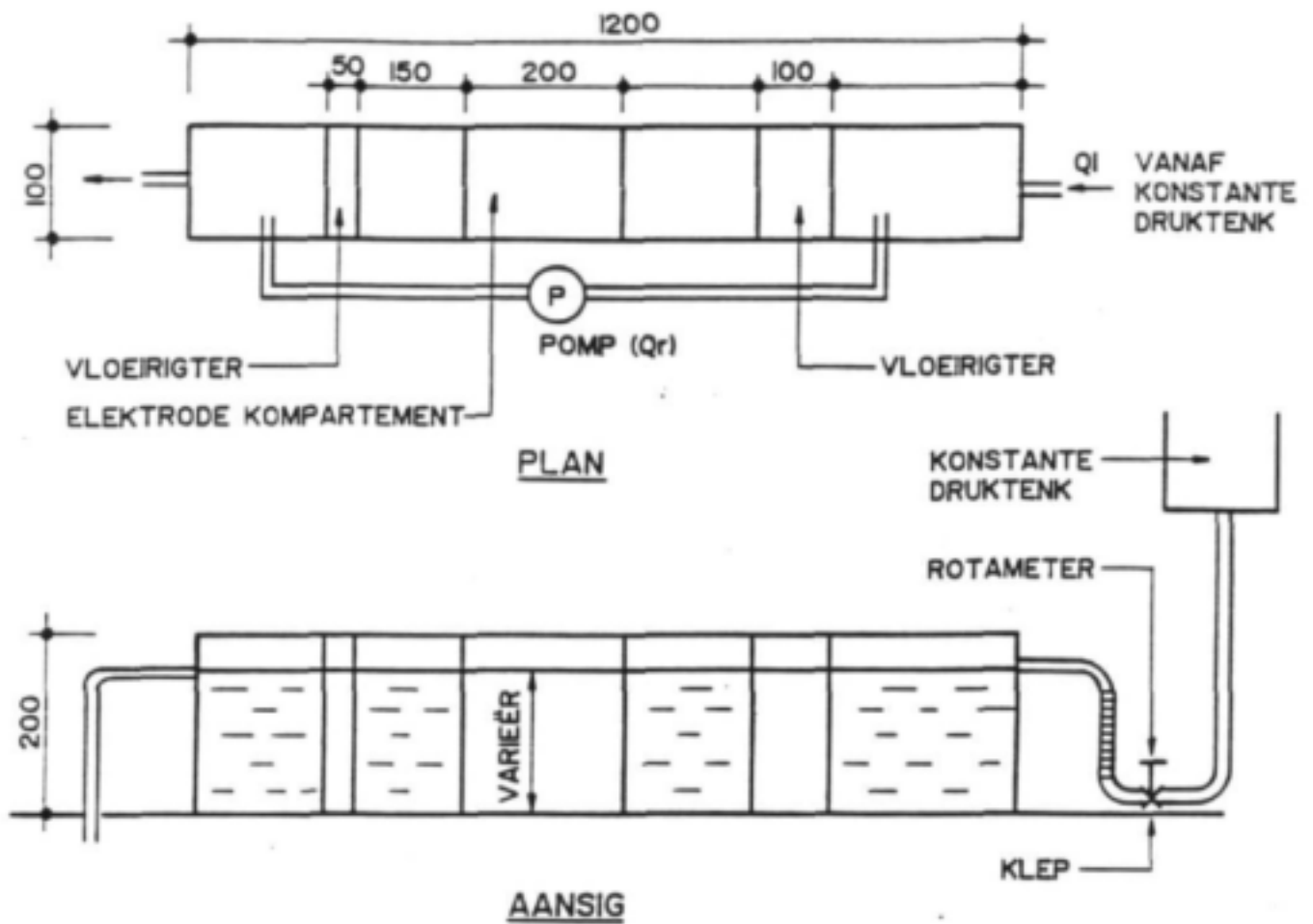
- Kragbron:	Hewlett Packard HP 6002A DC Power Supply
- Stroommeter:	Fluke 8050A Digital Multimeter
- Pomp:	840 l/uur
- Elektrodemateriaal:	Sagtetaalplaatjies 200 x 100 x 1,5 mm
- Geleidingsmeter:	Radiometer CDM 2e
- Weegskaal:	Elektronies.

(b) Eksperimentele opstelling

Die opstelling van die apparaat vir die eksperiment word skematies in Figuur 4.3 weergegee. Kraanwater, waarvan die geleiding met natrium-chloried tot ± 100 mS/m verhoog is, is deurgaans in die eksperiment gebruik.

(c) Eksperimentele metode

- Die elektrodes is skoongemaak soos in Eksperiment 1 aangetoon (4.2.1 (c)).
- Die elektrodes is in die elektrodehouer in die reaktor geplaas en volgens die betrokke selkonfigurasie wat getoets is, aan die kragbron gekoppel.
- Die vloeï van water (Q_i op Figuur 4.3) deur die reaktor was 27 liter per uur.
- Die water in die reaktor is oor die elektrodekompartement teen 'n vloeï van 840 liter per uur hersirkuleer (Q_r op Figuur 4.3) om die vloeï oor dié kompartement te vergroot.
- Die kragbron is aangeskakel en die verlangde stroom is ingestel.
- Lesings van die stroom en die spanning is elke 2 minute geneem en die stroom is na 4 minute afgeskakel.
- Die prosedure is ten opsigte van verskillende stroominstellings en selkonfigurasies met 'n nuwe stel elektrodes herhaal.
- Die lengte-tot-breedte-verhouding van die elektrodes is verander deur die diepte van die elektroliet in die water te verander. Plastiekkleefband is op die skeidingsvlak geplak om die elektrodegrootte presies te definieer.



Alle afmetings in mm

Figuur 4.3 : Eksperimentele opstelling

(d) Resultate

Die resultate wat in hierdie eksperiment gekry is, word in Tabele 4.3 (a) tot (d) weergegee.

Die persentasieverskil wat in die vyfde kolom van Tabele 4.3 (a) tot (d) gegee word, is die verskil tussen die berekende en die gemete spanning as 'n persentasie van die berekende spanning.

Tabel 4.3 (a): Enkelsel

Lengte-tot-breedte-verhouding van elektrodes	Stroomdigtheid (A/m ²)	Spanning gemeet (V)	Spanning bereken volgens voorgestelde model (V)	Persentasie-verskil tussen berekende en gemete spanning (%)
0,50	25	2,93	2,93	0,0
0,50	50	4,91	5,19	5,4
0,50	75	7,38	7,86	6,1
1,00	25	2,76	2,85	3,3
1,00	50	4,96	5,19	4,4
1,00	75	6,80	7,64	11,0
1,50	25	2,93	2,84	-3,0
1,50	50	4,62	5,31	13,0
1,50	75	6,59	7,71	14,5

Tabel 4.3 (b): Twee monopolêre selle in serie geskakel

Lengte-tot-breedte-verhouding van elektrodes	Stroomdigtheid (A/m ²)	Spanning gemeet (V)	Spanning bereken volgens voorgestelde model (V)	Persentasie-verskil tussen berekende en gemete spanning (%)
0,50	25	5,43	5,93	8,4
0,50	50	9,49	10,93	13,1
0,50	75	13,92	15,99	13,0
1,00	25	5,21	5,80	10,1
1,00	50	9,42	10,82	12,9
1,00	75	12,87	15,43	16,6
1,50	25	5,55	5,82	4,7
1,50	50	9,05	10,80	16,2
1,50	75	13,02	15,83	17,8

Tabel 4.3 (c): Twee parallelle selle

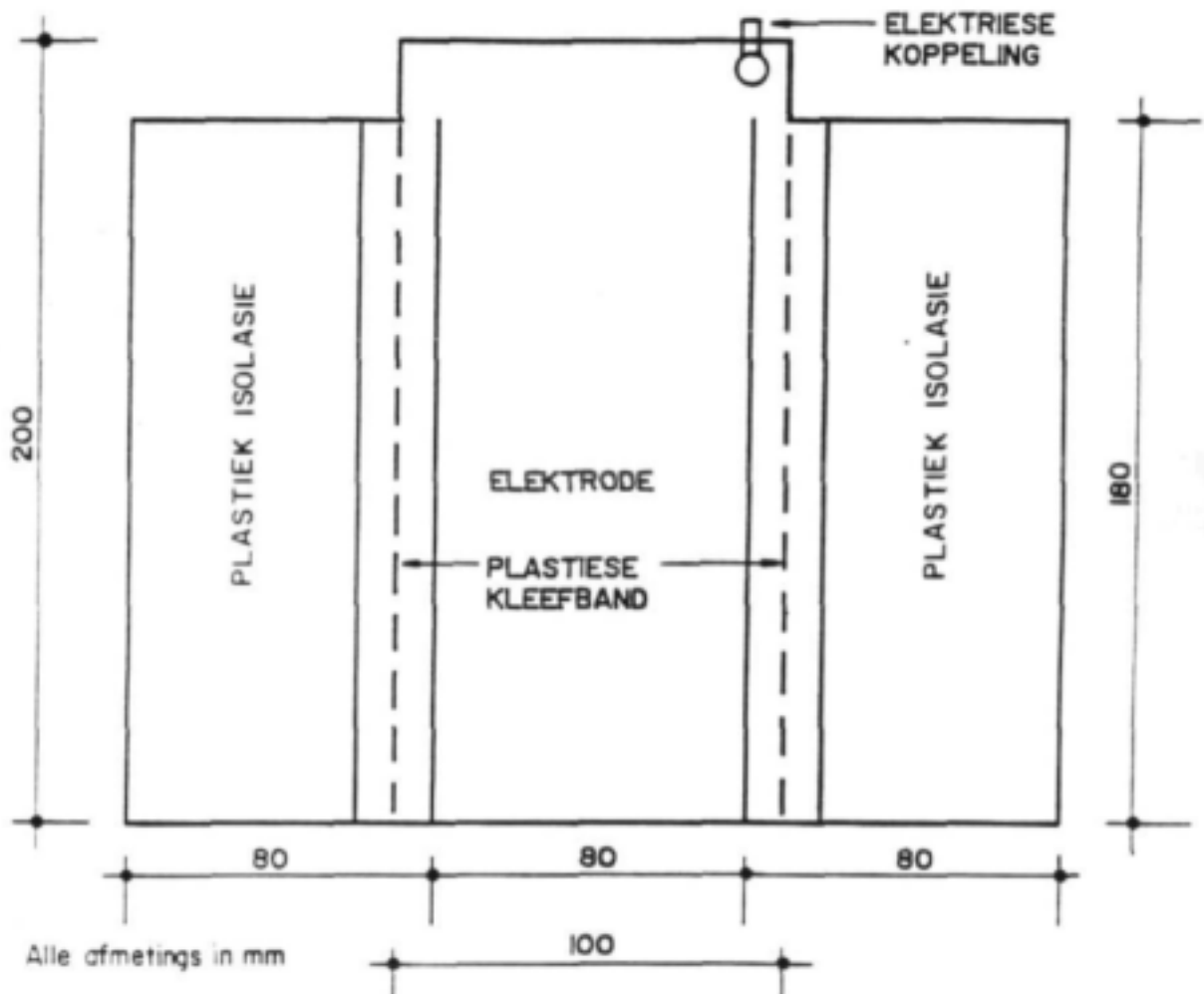
Lengte-tot-breedte-verhouding van elektrodes	Stroomdigtheid (A/m ²)	Spanning gemeet (V)	Spanning bereken volgens voorgestelde model (V)	Persentasie-verskil tussen berekende en gemete spanning (%)
0,50	25	2,62	2,83	7,6
0,50	50	4,86	5,27	7,8
0,50	75	6,80	7,76	12,4
1,00	25	2,76	2,85	3,1
1,00	50	4,89	5,33	8,2
1,00	75	6,92	7,75	10,7
1,50	25	2,83	2,85	0,8
1,50	50	4,94	5,33	7,2
1,50	75	7,01	7,77	9,8

Tabel 4.3 (d): Twee bipolêre selle in serie geskakel

Lengte-tot-breedte-verhouding van elektrodes	Stroomdigtheid (A/m ²)	Spanning gemeet (V)	Spanning bereken volgens voorgestelde model (V)	Persentasie-verskil tussen berekende en gemete spanning (%)
0,50	25	5,30	5,97	11,3
0,50	50	9,20	11,17	17,6
0,50	75	13,20	15,99	16,9
1,00	25	4,96	5,89	15,8
1,00	50	8,79	10,73	18,1
1,00	75	12,37	15,69	21,2
1,50	25	5,01	5,82	13,9
1,50	50	8,73	10,89	19,9
1,50	75	11,92	15,83	24,7

(e) Bespreking

Bostaande resultate toon aan dat die fout wat by die berekening van die spanning gemaak word toeneem namate die stroomdigtheid op die elektrode toeneem. Hierdie probleem blyk groter vir die bipolarêre en die serie-geskakelde monopolêre selle te wees as in die geval van die enkelsel en die selle in parallelle skakeling. Die eksperiment is derhalwe herhaal met elektrodes wat met plastiekplate aan die kante afgeskerm is soos dit in Figuur 4.4 aangetoon word, omdat die bipolarêre skakeling as die mees praktiese konfigurasie beskou word. Die resultate van hierdie eksperiment word in Tabela 4.4 (a) tot (d) weergegee.



Figuur 4.4: Aansig van afgeskermde elektrode

Tabel 4.4 (a): Enkelsel (afgeskerm)

Lengte-tot-breedte-verhouding van elektrodes	Stroomdigtheid (A/m ²)	Spanning gemeet (V)	Spanning bereken volgens voorgestelde model (V)	Persentasie-verskil tussen berekende en gemete spanning (%)
0,50	25	2,90	2,79	-3,9
0,50	50	5,03	5,12	1,7
0,50	75	7,20	7,43	3,0
1,00	25	3,04	2,91	-4,4
1,00	50	5,20	5,39	3,5
1,00	75	7,34	7,88	6,9
1,50	25	2,77	2,91	4,7
1,50	50	4,80	5,42	11,5
1,50	75	7,25	7,99	9,2

Tabel 4.4 (b): Twee monopolêre selle in serie geskakel (afgeskerm)

Lengte-tot-breedte-verhouding van elektrodes	Stroomdigtheid (A/m ²)	Spanning gemeet (V)	Spanning bereken volgens voorgestelde model (V)	Persentasie-verskil tussen berekende en gemete spanning (%)
0,50	25	5,85	5,66	-3,3
0,50	50	10,00	10,39	3,8
0,50	75	13,93	15,07	7,5
1,00	25	6,20	5,80	-7,0
1,00	50	10,47	10,73	2,4
1,00	75	14,18	15,68	9,6
1,50	25	5,71	5,77	1,0
1,50	50	9,92	10,75	7,7
1,50	75	14,16	15,83	10,6

Tabel 4.4 (c): Twee Parallelle Selle (afgeskerm)

Lengte-tot-breedte-verhouding van elektrodes	Stroomdigtheid (A/m ²)	Spanning gemeet (V)	Spanning bereken volgens voorgestelde model (V)	Persentasie-verskil tussen berekende en gemete spanning (%)
0,50	25	2,78	2,96	6,1
0,50	50	4,80	5,48	12,5
0,50	75	6,77	8,02	15,6
1,00	25	2,83	2,85	0,6
1,00	50	4,94	5,33	7,3
1,00	75	6,98	7,77	10,2
1,50	25	2,94	2,85	-3,1
1,50	50	4,96	5,31	6,6
1,50	75	6,69	7,76	13,8

Tabel 4.4 (d): Twee bipolêre selle in serie geskakel (afgeskerm)

Lengte-tot-breedte-verhouding van elektrodes	Stroomdigtheid (A/m ²)	Spanning gemeet (V)	Spanning bereken volgens voorgestelde model (V)	Persentasie-verskil tussen berekende en gemete spanning (%)
0,50	25	5,45	5,67	3,9
0,50	50	9,36	10,39	9,9
0,50	75	13,27	15,22	12,8
1,00	25	5,66	5,59	-1,3
1,00	50	9,73	10,31	5,6
1,00	75	13,94	15,06	7,4
1,50	25	5,51	5,81	5,2
1,50	50	9,48	10,85	12,6
1,50	75	13,64	15,83	13,8

Die resultate van die proefneming met die afgeskermde elektrodes toon aan dat die afskerming die akkuraatheid van die model verbeter het. Dit is egter nodig om die afskerming wat nodig is te optimaliseer voordat 'n praktiese stelsel ontwerp kan word.

Uit die verbetering in betroubaarheid wat deur die afskerming bewerkstellig is, kan daar afgelei word dat werwelstrome 'n belangrike rol veral by die bipolêre stelsel speel. Hierdie aspek moet ondersoek word omdat dit die doeltreffendheid van die stelsel raak.

Dit blyk uit die resultate van die afgeskermde elektrodes dat vierkantige elektrodes die beste resultate lewer.

4.2.4. Eksperiment 4

Die bepaling van die hoeveelheid yster wat deur die elektriese stroom, wat deur 'n stel bipolêre elektrodes vloei, opgelos word.

(a) Apparaat

Dieselfde apparaat van Eksperiment 3 is in hierdie eksperiment gebruik.

(b) Eksperimentele opstelling

Dieselfde eksperimentele opstelling van Eksperiment 3 is in hierdie eksperiment gebruik.

(c) Eksperimentele metode

Die eksperimentele metode van Eksperiment 3 is in hierdie eksperiment gevolg behalwe vir die volgende veranderinge:

- Die afmetings van die elektrodes was 100 x 50 x 3 mm.
- Die stroomdigtheid is konstant op ongeveer 50 A/m² gehou.
- Die stroom is vir 'n tydskuur van 20 minute deur die selle laat vloei.
- Die massaverlies van die elektrodes oor die tydskuur is gemeet.

(d) Resultate

Die resultate van hierdie eksperiment word in Tabel 4.5 (a) weergegee.

Tabel 4.5 (a): Vergelyking tussen die gemete en berekende waardes vir
Eksperiment 4 (oop elektrodes)

Elektrode	Gemete massa- verlies (mg)	Berekende massa- verlies volgens Faraday se wet (mg)	Persentasie- verskil tussen die berekende en die gemete waardes (%)
Katode	3,3	0,0	-
Elektrode 1 (bipolêr)	34,3	70,3	51,2
Elektrode 2 (bipolêr)	35,0	70,3	50,2
Elektrode 3 (bipolêr)	38,6	70,3	45,1
Anode	68,4	70,3	2,7

(e) Bespreking

Die resultate van hierdie eksperiment toon dat die massaverlies van die anode wel volgens Faraday se wet plaasvind, maar dat die bipolêre elektrodes se massaverlies baie swakker is as wat deur Faraday se wet voorspel word. Hierdie verskynsel dui dus daarop dat die stroom nie volledig deur die bipolêre elektrodes vloei nie, en dat daar moontlik 'n gedeelte van die stroom die elektrodes kortsluit.

Die eksperiment is gevolglik met afgeskermde elektrodes, soos in Eksperiment 3, herhaal en die resultate word in Tabel 4.5 (b) weergegee. Die stroom is egter vir 'n tydspan van 120 minute laat vloei en die afgeskermde elektrodes van Eksperiment 3 is in hierdie eksperiment gebruik.

Tabel 4.5 (b): Vergelyking tussen die gemete en berekende waardes vir
Eksperiment 4 (afgeskermde elektrodes)

Elektrode	Gemete massa- verlies (mg)	Berekende massa- verlies volgens Faraday se wet (mg)	Persentasie- verskil tussen die berekende en die gemete waardes (%)
Katode	30	0	-
Elektrode 1 (bipolêr)	720	964	25,3
Anode	830	964	13,9

Alhoewel die massaverlies van die bipolêre elektrode verbeter is deur afskerming het die massaverlies op die anode verswak. Die verswakking van die massaverlies kan toegeskryf word aan 'n eksperimentele fout wat onder andere teweeggebring kon gewees het deur 'n minder akkurate weegskaal wat gebruik moes word weens die swaarder elektrodes. Hierdie aspek moet in opvolgende navorsing deeglik ondersoek word.

4.2.5. Eksperiment 5

'n Vergelyking tussen die doeltreffendheid van elektrochemies geproduseerde metaalflokkulante en chemies gedoseerde metaalflokkulante ten opsigte van die verwydering van fosfaat en die vermindering van die chemiese suurstofbehoefte van rioolwater.

Die toets is op drie verskillende tipes rioolwater gedoen, naamlik:

- Biofilteruitvloei
- Anaërobiese besinkte rioolwater
- Aërobiese besinkte rioolwater.

Alle rioolwatermonsters is van die Daspootwerke by Pretoria verkry.

(a) Apparaat

Die apparaat wat in hierdie reeks eksperimente gebruik is, is die volgende:

- Kragbron: Hewlett Packard HP 6002A DC Power Supply
- Stroommeter: Fluke 8050A Digital Multimeter
- Roerder: Heidolph RZR O/4
- Elektrodemateriaal: Sagtestaalplaatjies 100 x 50 x 3 mm
- Geleidingsmeter: Radiometer CDM 2e
- Weegskaal: Elektronies
- Plastiekbekers 5 liter
- Spektrofotometer: Ultraspec II

(b) Eksperimentele opstelling

Die opstelling van die apparaat vir die eksperiment is dieselfde as wat in Eksperimente 1 en 2 gebruik is.

(c) Eksperimentele metode

(i) Elektrolitiese dosering van yster

- Twee sagtestaalplaatjies, wat vrylik in die handel beskikbaar is en met afmetings 100 x 50 x 3 mm, is as elektrodes gebruik.
- Die elektrodes is, soos daar in Eksperiment 1 beskryf is, volgens ASTM-metode G1 skoongemaak.
- 'n 4-liter-monster is in die 5 liter plastiekbeker geplaas, en die elektrodes is met behulp van klampe in die monster geplaas.
- Die hoeveelheid yster wat gedoseer is, is met behulp van Faraday se wet bepaal. Die yster is oor 'n tydskuur van 15 minute in die water gedoseer.
- Die monster is met behulp van 'n hoëspoed elektriese roerder geroer terwyl die yster in die water gedoseer is. Die monster is nog 5 minute lank, nadat die dosering van yster gestaak is, geroer om die yster in die monster heeltemal te vermeng.

- Nadat die monster geroer is, is 3 monsters van 1 liter elk in glasbekers geplaas en 10 minute lank in 'n roerapparaat geplaas om te kan flokkuleer. Die omwentelingspoed van die roerders was 30 rpm.
 - Die monster is 30 minute lank gelaat om te besink.
 - 'n 200-m ℓ -monster is daarna uit elke beker onttrek en deur Whatman no 4-filterpapier gefiltreer. Die eerste 100 m ℓ van die gefiltreerde monster is weggedoen, terwyl die monster vir die fosfaat en CSB-bepalings uit die oorblywende monster geneem is.
 - Die CSB-bepalings is volgens die Reflux-metode deur 'n kommersiële laboratorium, Waterlab, gedoen.
 - Die fosfaatontledings is volgens die askorbiensuurmetode in die laboratorium gedoen.
- (ii) Chemiese dosering van yster
- Hierdie deel van die eksperiment is onder dieselfde omstandighede as die elektrochemiese dosering van yster, soos dit hierbo beskryf is, gedoen. Die enigste verskil tussen die twee eksperimente is die dosering van yster.
 - Yster is as kommersiële ferrichloried (43%-konsentrasie), wat na 'n konsentrasie van 1 m ℓ FeCl₃ = 1 mg Fe verdun is, toegedien.
 - Die dosering is oor 15 minute versprei deur elke 5 minute 'n derde van die ferrichloried te doseer.

Die chemiese suurstofbehoefte en die fosfaatkonsentrasie van die monsters is voor die eksperiment bepaal. Daarna is die eksperiment uitgevoer met die verskillende doserings van yster, waarvan die eerste deel behels het dat geen yster in die monsters doseer is. Sodoende is die invloed van die eksperimentele proses op die CSB en die fosfaatkonsentrasie bepaal.

(d) Resultate

Die resultate wat in hierdie eksperiment verkry is, word in tabel 4.6 (a)

tot (c) weergegee.

Tabel 4.6 (a): Biofilteruitvloei

Yster- dosering (mg Fe/l)	Chemiese suurstofbehoefte		Fosfaatkonsentrasie	
	Elektro- chemies (mg O ₂ /l)	Chemies (mg O ₂ /l)	Elektro- chemies (mg P/l)	Chemies (mg P/l)
Rou	99	-	3,1	3,1
0	98	-	3,0	*
10	87	109	2,1	*
20	85	97	1,1	*
30	86	64	0,9	*

* = geen ontledings is gedoen nie omdat die fosfaatkonsentrasie te laag was.

Tabel 4.6 (b): Anaërobiese besinkte rioolwater

Yster- dosering (mg Fe/l)	Chemiese suurstofbehoefte		Fosfaatkonsentrasie	
	Elektro- chemies (mg O ₂ /l)	Chemies (mg O ₂ /l)	Elektro- chemies (mg P/l)	Chemies (mg P/l)
Rou	372	-	9,6	-
0	368	-	9,0	-
10	337	258	7,0	4,9
20	248	186	3,5	1,9
30	220	172	0,8	0,5

Tabel 4.6 (c): Aërobiese besinkte rioolwater

Yster- dosering (mg Fe/l)	Chemiese suurstofbehoefte		Fosfaatkonsentrasie	
	Elektro- chemies (mg O ₂ /l)	Chemies (mg O ₂ /l)	Elektro- chemies (mg P/l)	Chemies (mg P/l)
Rou	350	-	8,5	-
0	340	-	8,1	-
10	174	168	4,5	4,4
20	175	146	1,9	1,4
30	146	124	0,6	0,3

Tabel 4.6 (d): Verhoudings tussen dosering en verwydering van CSB en fosfaat vir aërobiese besinkte rioolwater

Yster-dosering (mg Fe/l)	Chemiese suurstofbehoefte		Fosfaatverwydering	
	Elektro-chemies (mg CSB/mg Fe)	Chemies (mg CSB/mg Fe)	Elektro-chemies (mg P/mg Fe)	Chemies (mg P/mg Fe)
Rou	0	-	0,0	-
0	0	-	0,0	-
10	16,6 (-3,5)*	17,2	0,36(-2,7)*	0,37
20	8,3(-14,4)*	9,7	0,31(-6,1)*	0,33
30	6,5 (-9,7)*	7,2	0,25(-3,8)*	0,26

* Die waardes in hakies in Tabel 4.6 (d) is die persentasie verskil tussen die mg CSB/mg Fe en mg P/mg Fe onderskeidelik verwyder deur die chemiese en die elektrochemiese proses ten opsigte van die chemiese proses

(e) Gevolgtrekking

Die CSB en die fosfaat van al drie tipes rioolwater is redelik doeltreffend deur die elektrochemies geproduseerde yster verminder. Tabel 4.6 (d) toon egter dat die konvensionele chemiese dosering ongeveer 10% meer CSB/mg Fe verwyder as die elektrochemiese proses. Ten opsigte van fosfaatverwydering word daar ongeveer 5% meer fosfaat deur die konvensionele chemiese proses as deur die elektrochemiese proses verwyder.

Dit blyk dus uit hierdie eksperiment dat die konvensionele chemiese dosering marginaal beter resultate lewer as die elektrochemiese proses. Hierdie marginale voordeel van die konvensionele proses moet egter globaal gesien word, veral wanneer faktore soos die versouting van die waterbronne deur die herhaaldelike hergebruik van die water in ag geneem word.

4.3. Samevatting van die bevindinge

Hierdie eksperimente het die volgende aangetoon:

(a) Faraday se wet is van toepassing om die hoeveelheid metaal wat tydens elektrolise in die elektroliet opgelos word in die geval van

die enkelsel te bepaal.

- (b) Die spanning wat nodig is, kan geredelik met die voorgestelde model bepaal word. Meer navorsing is egter nodig om die model te verfyn en om die akkuraatheid van die model te verbeter.
- (c) Die hoeveelheid yster wat in die bipolêre konfigurasie deur die elektriese stroom in die water opgelos word, kan nie sondermeer deur Faraday se wet bereken word nie. Meer navorsing is in hierdie verband nodig om dié konfigurasie te optimiseer, omdat hierdie die mees praktiese konfigurasie blyk te wees.
- (d) Die chemiese suurstofbehoefte word doeltreffend deur die elektrochemies geproduseerde yster verminder, alhoewel die konvensionele chemiese dosering ietwat beter resultate blyk te gee.
- (e) Fosfaat word doeltreffend deur die elektrochemies geproduseerde yster uit die water verwyder. Die konvensionele chemiese dosering lewer egter ook in hierdie geval ietwat beter resultate.

HOOFSTUK 5

EKONOMIESE VERGELYKING TUSSEN DIE ELEKTROCHEMIESE PROSES EN DIE

KONVENSIONELE CHEMIESE DOSERING

5.1 INLEIDING

Die doel van die vergelykende studie tussen die elektrochemiese proses en die "konvensionele" chemiese dosering van metaalsoute is om in breë trekke die ekonomiese lewensvatbaarheid van die elektrochemiese proses te bepaal. Die resultaat van dié vergelykende studie behoort te bepaal of dit sinvol is om met hierdie navorsing voort te gaan al dan nie.

Die vergelyking tussen die twee prosesse word gedoen op 'n hipotetiese aanleg met 'n vermoë van 10 M ℓ /d waar daar 20 mg Fe/ ℓ as yster gedoseer moet word om die verlangde hoeveelheid fosfaat te verwyder.

Die kostes van die toerusting word in hierdie vergelyking nie in aanmerking geneem nie omdat dit van aanleg tot aanleg sal verskil om by die plaaslike toestande te kan aanpas. Dit blyk egter of die koste vir die toerusting wat vir die elektrochemiese proses benodig word, van dieselfde orde sal wees as die koste van die toerusting wat vir die konvensionele chemiese dosering benodig sal word. Gevolglik sal hierdie aspek van die kosteraming geen invloed op die vergelyking van die kostes vir die twee prosesse hê nie.

Alle kostes, wat in die koste-vergelyking gebruik word, is op 1988 pryse gebaseer.

5.2 KOSTE VAN DIE ELEKTROCHEMIESE PROSES

Die koste van die elektrochemiese proses word bereken op grond van die model wat in hierdie navorsing afgelei is. Die verlies aan energie weens die weerstand van die geleiers word nie in aanmerking geneem nie omdat dit afhanklik is van die grootte en die lengte van die geleier, wat 'n veranderlike van elke aanleg sal wees. Hierdie verlies word deur die ontwerpkode beperk wat tot gevolg het dat dit as weglaatbaar beskou kan word.

Die volgende aannames is aanvaar vir hierdie studie:

- Karakteristieke van die rioolwater

Elektriese geleiding : 100 mS/m
pH : 7.5
Temperatuur van rioolwater : 20°C

- Spasieëring van elektrodes

Afstand tussen elektrodes : 20 mm

- Materiaalkoste

Sagtestaalprys : R 1 100,00 per ton

- Energiekoste

Kragaanvraag : R 12 per kW per maand
Energiekoste : R 0,03 per kWh

Die vergelykende waardes vir die konfigurasie van die bipolêre serie- en die monopolêre parallelle selle word in Tabelle 5.1 en 5.2 weergegee. By die konfigurasie van die bipolêre serieselle is daar vir die verlies in die hoeveelheid metaal, wat in die water opgelos word as gevolg van werwelstrome, voorsiening gemaak deur 25% meer selle te voorsien in ooreenstemming met die resultate van Eksperiment 4 (kyk Tabel 4.5 (b)).

Tabel 5.1: Vergelykende koste vir bipolêre selle wat in serie geskakel is

STROOM (A)	ELEKTRO- DE AREA (m ²)	AANTAL SELLE	SPANNING (V)	KRAG (kW)	ENERGIE (kWh)	KOSTE VIR		
						ENERGIE (R/d)	METAAL (R/d)	TOTAAL (R/d)
10	0.40	1006	5205	52.05	1249	58.30	220.00	278.30
10	0.20	1006	9513	95.13	2283	106.55	220.00	326.55
10	0.13	1006	13292	132.92	3190	148.87	220.00	368.87

Tabel 5.2: Vergelykende koste vir monopolêre selle wat in parallel geskakel is

STROOM (A)	ELEKTRO- DE AREA (m ²)	AANTAL SELLE	SPANNING (V)	KRAG (kW)	ENERGIE (kWh)	KOSTE VIR		
						ENERGIE (R/d)	METAAL (R/d)	TOTAAL (R/d)
8050	0.40	805	5.44	43.83	1051	49.09	220.00	269.09
8050	0.20	805	10.50	84.56	2030	94.71	220.00	314.71
8050	0.13	805	15.54	125.10	3002	140.11	220.00	360.11

Uit die bostaande tabelle blyk dit dat die spanning in die bipolêre serieselkonfigurasie onprakties hoog is. Hierdie probleem kan egter opgelos word deur van parallel-serie skakelings van selle gebruik te maak. Sodoende word die weerstand van die "selle" verminder en daar word gevolglik teen laer en meer praktiese spannings gewerk. Dieselfde beginsel is ook van toepassing by die parallelle skakeling waar die stroom geweldig hoog is. Deur die stroom te verlaag, word die energieverlies in die geleiers ook verminder.

Uit Tabelle 5.1 en 5.2 kan daar ook gesien word dat die energiekoste van hierdie proses slegs ongeveer 20% tot 40% van die totale daaglikse koste uitmaak, terwyl die res van die koste uit die koste van die metaal bestaan. Indien daar dus van 'n goedkoper bron van die metaal gebruik gemaak kan word, sal die totale daaglikse koste van hierdie stelsel noemenswaardig daal.

Die koste van die elektrochemiese proses ten opsigte van die hoeveelheid water wat behandel is, word in Tabel 5.3 weergegee.

Tabel 5.3: Koste van behandelde water

ELEKTRO- DE-AREA (m ²)	BIPOLÆRE SELLE		PARALELLE MONOPOLÆRE SELLE	
	TOTALE KOSTE (R/d)	KOSTE VAN WATER (c/kℓ)	TOTALE KOSTE (R/d)	KOSTE VAN WATER (c/kℓ)
0.40	278.30	2.78	269.09	2.69
0.20	326.55	3.27	314.71	3.15
0.13	368.87	3.69	360.11	3.60

5.3 KOSTE VAN CHEMIESE DOSERING

Die koste van die chemiese dosering wat in hierdie studie gegee word sluit slegs die koste van die chemikalieë in en maak nie voorsiening vir die doseertoerusting of die energie wat deur hierdie toerusting gebruik word nie. Die daaglikse dosering is bereken op die basis dat die ekwivalente massa yster in die water doseer word as wat daar in die elektrochemiese proses in die water opgelos word. Daar is ook nie voorsiening gemaak vir die addisionele kalk wat streng gesproke saam met die metaalsout gedoseer moet word om die alkaliniteit van die water te herstel nie. Die volgende pryse vir die chemikalieë is in die berekening aanvaar:

- Ferrichloried : R 257,00 per ton oplossing
- Ferrisulfaat : R 190,00 per ton oplossing

Die daaglikse koste word op die volgende geraam:

- Ferrichloried : R 347,30 (of 3.47 c/kℓ)
- Ferrisulfaat : R 380,00 (of 3.80 c/kℓ)

5.4 GEVOLGTREKKING

Die bostaande kosteanalise toon dat die elektrochemiese proses blyk om in dieselfde ekonomiese orde te wees as die chemiese dosering van ferrichloried en ferrisulfaat. Indien daar van 'n goedkoper bron van die metaal gebruik gemaak word, sal die elektrochemiese proses meer ekonomies wees as die dosering van chemikalieë. Die verwydering van die chloried- en sulfaationen, wat nie in die bostaande kosteanalise in berekening gebring is nie, sal die elektrochemiese proses ook nog bevoordeel, met die gevolg dat dié proses baie meer ekonomies sal wees as chemiese dosering.

Dit is dus geregverdig dat die elektrochemiese proses verder ondersoek moet word.

5.5 AANBEVELING

Dit word aanbeveel dat die volgende aspekte verdere navorsing regverdig:

- (a) Die model wat in hierdie navorsing opgestel is moet onder loodsskaaltoestande verfyn word en die effektiwiteitsfaktore moet onder loodsskaaltoestande bepaal word.
- (b) Verdere navorsing word benodig om die optimale toestande vir die werking van die elektrochemiese proses te bepaal. Faktore wat in hierdie verband in ag geneem moet word is onder andere die pH en die konsentrasie van die opgeloste suurstof in die water omdat hierdie faktore die werking van die stelsel direk beïnvloed.
- (c) Die elektrochemiese proses moet verder ondersoek word ten opsigte van 'n praktiese opstelling van die stelsel. Hierdie opstelling moet die invloede van die praktyk soos optimale elektrodegrootte, bevulling en verstoping van die elektrodes, selkonfigurasie, werwelstrome, die posisie waar die stelsel in bestaande en nuwe suiweringsaanlegte aangebring moet word en beroepsveiligheid in ag neem.

- (d) 'n Akkurate ontleding van die koste moet op 'n loodsskaalse stelsel gedoen word ten einde die ekonomiese lewensvatbaarheid van die stelsel te bepaal, veral as in ag geneem word dat baie aspekte in die kostevergelyking in hierdie studie nie in ag geneem is nie.
- (e) Ontwerpriglyne moet vir die praktyk opgestel word sodat die tegnologie, indien dit as ekonomies regverdigbaar bevind word, ook toepassing in die water- en rioolwatersuiweringsbedryf kan vind.

VERWYSINGS

- BARNARD J L. 1975. Biological nutrient removal without the addition of chemicals. Water Research, 9, 485.
- BARNARD J L. 1983. Background to biological phosphorus removal. Water Science and Technology 15, (3/4),1.
- BENEFIELD L D, JUCKINS J F en WEAND B L. 1982. Process chemistry for water and wastewater treatment. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- BEST H J. 1982. The need for chemical phosphate removal. Referaat by die ope dag te Vlakplaatswaterbesoedelingsbeheerwerke, Boksburg.
- BEST H J. 1986. The Department of Water Affairs' approach to a phosphate management strategy for the Republic of South Africa. Lesing aangebied by die Kongres van die Munisipale Ingenieurs, Randburg, 12 tot 15 Mei 1986.
- BLACKBEARD J en EKAMA G. 1984. Survey of activated sludge bulking and foaming in South Africa. IMIESA, 9, (3), 20.
- BOCKRIS J O'M en REDDY A K N. 1973. Modern electrochemistry - an introduction to an interdisciplinary area. Plenum Press, New York.
- BRESCIA F, ARENTS J, MEISLICH H en TURK A. 1970. Fundamentals of chemistry: a modern introduction, 2nd ed. Academic Press, New York.
- BRUBAKER G R en PHIPPS P B P. 1979. Corrosion chemistry. ACS Symposium Series 89, Washington D C, ISBN 0-8412-0471-3.
- CHARLOT G, BADOZ-LAMBLING J en TREMILLON B. 1962. Electrochemical reactions. Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
- DOBOLYI E. 1978. Experiments aimed at the removal of phosphate by electrochemical methods. Water Research, Vol 12, 1113 - 1116.

- Electrical World, 1899. In MILLER H C en KNIPE W. 1965. Electrochemical treatment of municipal waste water. Public Health Service Publication No. 999-WP-19, U.S. Department of Health, Education and Welfare.
- FÖYN E. 1964. Removal of sewage nutrients by electrolytic treatment. Verh. Intl. Ver. Limnol. (Duits). XV, 569.
- GRØTERUD O en SMOCZYNSKI L. 1986 (a). Phosphorus removal from water by means of electrolysis. Water Research, 20, 5, 667-669.
- GRØTERUD O en SMOCZYNSKI L. 1986 (b). Phosphorus removal from wastewaters by electrolysis. Vatten, 42, 1, 33-35.
- GRØTERUD O en SMOCZYNSKI L. 1986 (c). Removal of phosphorus and residual aluminium by recirculating electrolysis of wastewater. Vatten, 42, 4, 293-296.
- HUGHES E. 1973. Electrical Technology (Fourth Edition, Fourth Impression). Longman Group Limited, London.
- MATIS K A. 1980. Treatment of industrial liquid wastes by electroflotation. Water Pollution Control (London), 79, 1, 136-142.
- METCALF & EDDY. 1979. Wastewater engineering: treatment disposal reuse, 2de uitgawe. McGraw-Hill Book Company, Boston.
- MILLER H C en KNIPE W. 1965. Electrochemical treatment of municipal waste water. Public Health Service Publication No. 999-WP-19, U.S. Department of Health, Education and Welfare.
- MÖLLER W, BERGER D, DOSE M, ELSASSER, KRATSCHEMER C en MANG D. 1974. Duden Fremdwörterbuch Band 5. Bibliographisches Institut, Mannheim.
- OWEN W F. 1982. Energy in wastewater treatment. Prentice-Hall, Inc.
- PANDIT R K en MAYADEO M S. 1985 (a). Electrochemical treatment of wastewater. Journal of the Electrochemical Society, India, 34, 1.

- PANDIT R K en MAYADEO M S. 1985 (b). Investigative studies in electro-flocculation. Journal of the International Water Works Association, XVII, 3.
- PAUL R. 1987. Mintek. Persoonlike kommunikasie, 1987.
- PICKETT D J. 1979. Electrochemical reactor design (2de Uitgawe). Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- PLECHTER D. 1981. Industrial electrochemistry. Chapman and Hall, London.
- POON C P C en BRUECKNER T G. 1975. Physico-chemical treatment of waste-water-seawater mixture by electrolysis. Journal of the Water Pollution Control Federation, Vol 47, No 1.
- PRETORIUS W A. 1983. Should the phosphate concentration in sewage effluents be restricted? IMIESA, Vol 8, No 9.
- PRETORIUS W A en HENSMAN L C. 1984. The selective cultivation of harvestable algae using crossflow-microscreening. Water Science Technology, 19, 1003 - 1011.
- ROUSAR I, MICKA K en KIMLA A. 1986. Electrochemical engineering. Elsevier Science Publishing Company, Inc., New York.
- SKINNER W. 1987. Universiteit van Pretoria. Persoonlike kommunikasie.
- SLIM J A. 1987. Some developments in the water industry in South Africa. Water Pollution Control, 86, (2), 262.
- SMITH C E. 1972. Waste Water Treatment through Electrochemistry. Progress in Water Technology, Volume I, Applications of new Concepts of Physical-Chemical Wastewater Treatment. Pergamon Press, Inc.
- Standard methods for the examination of water and wastewater (15e Uitgawe). 1980. APHA- AWWA- WPCF.
- TOERIEN D F. 1975. South African eutrofication problems - a perspective. Water Pollution Control, 74, (2).

- TOERIEEN D F, HYMAN K L en BRUWER M J. 1975. A preliminary trophic status classification of some South African impoundments. Water S A, 1.
- TUNTURI P J. 1976. Electrochemical treatment of process waste water containing colloidal particles. International Chemical Engineering, Vol 16, No 2.
- U. S. PATENT 398 101. 1889. In MILLER H C en KNIPE W. 1965. Electrochemical treatment of municipal waste water. Public Health Service Publication No. 999-WP-19, U.S. Department of Health, Education and Welfare.
- U. S. PATENT 937 210. 1909. In MILLER H C en KNIPE W. 1965. Electrochemical treatment of municipal waste water. Public Health Service Publication No. 999-WP-19, U.S. Department of Health, Education and Welfare.
- U. S. PATENT 1 079 377. 1913. In MILLER H C en KNIPE W. 1965. Electrochemical treatment of municipal waste water. Public Health Service Publication No. 999-WP-19, U.S. Department of Health, Education and Welfare.
- U. S. PATENT 1 090 893. 1914. In MILLER H C en KNIPE W. 1965. Electrochemical treatment of municipal waste water. Public Health Service Publication No. 999-WP-19, U.S. Department of Health, Education and Welfare.
- VAN DIJK J C en BRAAKENSIEK H. 1984. Phosphate removal by crystallisation in a fluidized bed. Water Science Technology, 17, (2/3), 133 - 142.
- VAN LEEUWEN J en PRETORIUS W A. 1988. Sludge bulking control with ozone. J. Inst. Water and Environmental Management, 2, (2), 223 - 227.
- VAN VUUREN L R J, ROSS W R en PRINSLOO J. 1977. The integration of wastewater treatment with water reclamation. Progress in Water Technology, 9, (2), 455.
- VAN VUUREN L R F en WIECHERS S G. 1978. Nitrification and denitrification of lime-treated wastewaters. Progress in Water Technology, 10, (1/2), 185.
- VIK E A, CARLSON D A, EIKUM A S en GJESSING E T. 1984. Electrocoagulation of potable water. Water Research (Oxford UK), 18, 11, 1355-1360.

- WATERNAVORSINGSKOMMISSIE (WNK). 1984. Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes. Waternavorsingskommissie ISBN 0 908356 13 7.

- WIECHERS H N S. 1987. Guidelines for chemical phosphate removal from municipal waste waters. Waternavorsingskommissie, ISBN 0 908 356 53 6.