

FOSFAATVERWYDERING UIT MUNISIPALE UITVLOEISELS

DEUR MIDDEL VAN

ELEKTROCHEMIESE KOAGULANTPRODUKSIE

deur

G G LEMPert & W A PRETORIUS

VERSLAG AAN DIE WATERNAVORSINGSKOMMISSIE

deur die

DEPARTEMENT CHEMIESE INGENIEURSWESE

UNIVERSITEIT VAN PRETORIA

Wnk Verslag No. 287/1/90
ISBN 0 947447 86 5

SINOPSIS

Vanweë probleme wat met biologiese fosfaatverwyderingsprosesse ondervind word om deurentyd aan die uitvloeiselstandaard vir fosfaat te voldoen, word daar by die meeste rioolsuiweringswerke addisioneel chemiese fosfaatverwydering toegepas. Tans word metaalsoute vir hierdie doel gebruik. Dit veroorsaak egter dat die opgeloste soutkonsentrasie van die uitvloeisel verhoog word, omdat slegs die metaalkatïoon gebruik word vir fosfaatverwydering, terwyl die anïoon (die sout) in die water vrygestel word. By water wat hergebruik word, soos byvoorbeeld die Vaalrivierbarrage, lei hierdie praktyk tot 'n stelselmatige versouting van die water.

In hierdie studie is daar na 'n alternatiewe proses gekyk waar slegs die katïoon wat benodig word as koagulant, tot die uitvloeisel toegevoeg kan word. 'n Elektrochemiese proses met bipolêre selkonfigurasie en ysterelektrodes is gekies vir die eksperimente.

Laboratoriumondersoeke het getoon dat stroomdigtheid die enkele parameter is wat die grootste invloed op die seleffektiwiteit uitoefen. 'n Liniêre verband kon gevind word tussen stroomdigtheid en seleffektiwiteit wat, tesame met Faraday se "wet", gebruik kan word om die hoeveelheid yster te bepaal wat sal oplos vir 'n bepaalde stroom wat deur die selle vloei.

Die elektrolitiese sel is in 'n geaktiveerdeslykloodsaanleg, wat as biologiese fosfaat- en/of stikstofverwyderingsproses bedryf kon word, getoets. Goeie fosfaatverwydering kon verkry word met die mees effektiewe opstelling - een waar yster tot die uitvloeisel, na sekondêre besinking, toegevoeg is. Dit vereis bykomstige tersiêre behandeling en lewer 'n hoë kwaliteit uitvloeisel met orto-fosfaatkonsentrasies laer as 0,3 mg/l (as P). Ook die ander kwaliteitsparameters van belang by uitvloeielsuiwering, CSB, TKN, kleur en troebelheid, het met hierdie opstelling verbeter.

(ii)

Probleme is ondervind met lae seleffektiwiteite (54%) onder kontinue bedryf wat veroorsaak word deur aanpaksels op die elektrodeplate.

Die eksperimentele resultate is in 'n ekonomiese gangbaarheidsstudie gebruik om elektrochemiese- met konvensionele chemiese fosfaatverwydering te vergelyk. Daar is gevind dat chemiese koagulantproduksie goedkoper as elektrochemiese koagulantproduksie is, maar dat die verskil in produksiekostes, veral by groot aanlegte, gering is.

Daar word tot die gevolgtrekking gekom dat die elektrochemiese proses nie net lewensvatbaar kan wees nie, maar noodsaaklik is ten einde die las wat chemiese fosfaatverwydering op die omgewing plaas, te verlig. 'n Volskaal ondersoek waar die proses in 'n geaktiveerdeslykaanleg onder normale bedryfstoestande getoets word, word aanbeveel.

DANKBETUIGINGS

Graag betuig ek my dank aan:

Prof. W A Pretorius vir sy ondersteuning (wat baie verder as net hierdie projek gestrek het), leiding, entoesiasme en bereidwilligheid om te help.

Oom Jan Scheepers van die WNNR se eksperimentele gronde te Daspoort wat my met die loodsaanleg gehelp het en altyd vir my tyd gehad het as daar probleme was.

Die Stadsraad van Pretoria, waar ek die monsters kon laat analiseer. 'n Spesiale woord van dank gaan hier aan die assistent-hoofskeikundige by Daspoort, mnr G Saayman, en personeel van hul onderskeie laboratoria wat die analyses vir my gedoen het, mevv. L Saayman, D Heymans, A Du Preez, I Böhme en mnr D de Waal.

Die WNNR se Departement Watertegnologie wat toestemming verleen het dat ek hul eksperimentele gronde en geaktiveerde slykloodsaanleg te Daspoort vir my loodsskaalstudie kon gebruik.

Die Departement Elektriese Ingenieurswese van die Universiteit van Pretoria vir hul vriendelike hulp en verskaffing van elektriese apparaat vir die projek.

Die Waternavorsingskommissie vir die fondse wat hulle vir hierdie projek bewillig het.

Mnr W G Johannes, op wie se aanvanklike studie my navorsingswerk gebaseer is.

Mnr H Johannes vir sy hulp met die polariteitswissellaar en bystand t.o.v. die elektriese- en elektroniese toerusting wat vir 'n grootskaalse aanleg benodig word.

Die Departement van Waterwese, Namibia, wat studieverlof aan my toegestaan het vir die duur van hierdie studie.

INHOUDSOPGAWE

Bladsy

HOOFSTUK 1: EUTROFIKASIE EN FOSFAATVERWYDERING UIT UITVLOEISELS

1.1	Inleiding	1.1
1.2	Eutrofikasie	1.2
1.3	Uitvloeiselbehandeling vir fosfaatverwydering	1.3
1.3.1	Chemiese prosesse	1.3
1.3.2	Biologiese prosesse	1.4
1.3.3	Alternatiewe metodes	1.5
1.4	Uitleg van verslag	1.6

HOOFSTUK 2: LITERATUURSTUDIE: FOSFAATVERWYDERING EN TOEPASSING VAN ELEKTROCHEMIE IN WATERSUIWERING

2.1	Inleiding	2.1
2.2	Interaksie van ortofosfate met metaalhidroksiedes	2.1
2.2.1	Vorming van Fe(III)-polimere	2.1
2.2.2	Fosfaatverwydering	2.3
2.2.3	Resultate	2.4
2.3	Gebruik van elektrochemie in watersuiwering	2.6
2.3.1	Elektrochemiese ontsmetting	2.6
2.3.2	Elektrochemiese flokkulantproduksie	2.7
2.3.3	Elektroflottering	2.8
2.4	Elektrolise - basiese begrippe	2.9
2.4.1	Spanningsvereistes	2.10
2.4.2	Kwantitatiewe aspekte van elektrolise	2.15
2.4.3	Energieverbruik	2.16
2.4.4	Selkonfigurasie	2.18
2.4.5	Elektrochemiese metaalflokkulantproduksie	2.21
2.5	Projekmotivering	2.24
2.5.1	Selondersoek	2.24
2.5.2	Loodsskaalstudie	2.25
2.5.3	Gangbaarheidstudie	2.26

HOOFSTUK 3: EKSPERIMENTELE WERK: LABORATORIUMONDERSOEKE

3.1	Inleiding	3.1
3.1.1	Reaksiesisteem	3.2
3.1.2	Selkonfigurasie	3.4

3.1.3	Stroom- en spanningsvereistes	3.5
3.1.4	Eksperimentele ondersoeke	3.7
3.2	Eksperimentele apparaat	3.9
3.3	Karakteristieke van die elektrolitiese sel	3.11
3.3.1	Eksperimentele metodes en verwerking van data	3.11
3.3.2	Resultate en gevolgtrekkings	3.14
3.4	Bespreking en aanbevelings	3.26
3.5	Gevolgtrekking	3.30

HOOFSTUK 4: DIE ELEKTROLITIESE SEL ONDER BEDRYFSTOESTANDE

4.1	Inleiding	4.1
4.2	Selopstelling	4.1
4.3	Die elektrolietoplossing	4.9
4.4	Elektrolitiese sel ontwerp	4.9
4.5	Samevatting	4.12

HOOFSTUK 5: EKSPERIMENTELE WERK: LOODSSKAALSTUDIE

5.1	Inleiding	5.1
5.2	Prosesbeskrywing	5.1
5.3	Aanlegbedryf	5.1
5.4	Analitiese metodes	5.3
5.4.1	Monsterneming	5.3
5.4.2	Chemiese en fisiese analyses	5.3
5.4.3	Mikrobiologiese waarnemings	5.4
5.5	Resultate en bespreking	5.4
5.5.1	Fosfaatverwydering sonder ystertoevoeging	5.4
5.5.2	Effek van posisie van ysterbyvoeging op fosfaat= verwydering	5.4
5.5.3	Optimum dosering	5.5
5.5.4	Uitwerking van die ystertoevoegingspunt op ander analitiese parameters	5.6
5.6	Opsomming en gevolgtrekkings	5.8
5.7	Ysterdosering op biologies voorafgesuiwerde uitvloeisels	5.8
5.8	Resultate en bespreking	5.9

HOOFSTUK 6: EKONOMIESE GANGBAARHEIDSTUDIE

6.1	Inleiding	6.1
6.1.1	Fosfaat voorkoms	6.1
6.1.2	Ysteraanvraag	6.2
6.1.3	Ystertoevoeging	6.2
6.2	Kostes	6.4
6.2.1	Lopende koste van yster as koagulant	6.4
6.2.2	Doseertoerusting	6.6
6.3	Vergelykende eenheidskostes vir fosfaatverwydering	6.7
6.4	Samevatting en bespreking	6.8

HOOFSTUK 7: AANBEVELINGS

7.1	Inleiding	7.1
7.2	Elektrolitiese sel	7.1
7.3	Mikrobiologiese stelsel	7.3
7.4	Samevatting	7.4

VERWYSINGS	i
------------	---

AANHANGSEL A: FOTO'S

AANHANGSEL B: LABORATORIUMONDERSOEK - EKSPERIMENTELE DATA

AANHANGSEL C: LOODSSKAALSTUDIE - EKSPERIMENTELE DATA, GRAFIEKE

LYS VAN SIMBOLE

a	=	eerste Tafelkonstante (volt, V)
A_o, A_i, A_{ii}	=	oppervlakarea van elektrodeplaat (m^2) met voetskrif wat verwys na verskillende areas
b	=	tweede tafelkonstante ($V.m^2/A$)
B	=	breedte van elektrode (m)
d	=	afstand tussen elektrodes (m)
E	=	elektriese energieverbruik (kW.h)
E_d	=	elektriese energieverbruik per gram per millimeter plaatspasiëring ($W.h/(g.mm)$)
E_w	=	werklike elektriese energieverbruik per gram metaal opgelos ($W.h/g$)
E_o, E_e, E_{sel}	=	potensiaalverskil (volt) met voetskrifte o, e en sel wat onderskeidelik verwys na ewewigspotensiaal, redoksselpotensiaal en selpotensiaal oor die plate
f	=	effektiwiteit van die selsisteem
F	=	Faraday se konstante (96487 coulomb)
i, i_y	=	stroomdigtheid ($ampère/m^2$) met voetskrif y wat verwys na die komponent in die y-rigting (vloedidiepte)
I	=	elektriese stroom (ampère, A)
K	=	spesifieke geleiding van die elektroliet (siemens per meter, S/m)
L	=	vloedidiepte van die elektroliet (m)
M_r	=	molekulêre massa (gram per mol, g/mol)
N	=	aantal selle in selsisteem
n, n_a, n_c	=	oorpotensiaal (volt) met voetskrifte a en c wat verwys na die anode en katode onderskeidelik
p	=	atmosferiese druk (kilopascal, kPa)
P	=	drywing (kilowatt, kW)
Q	=	volumetriese vloeitempo (m^3/s)
R	=	Universele gaskonstante (8,314 kJ/mol.K)

t	=	tyd (sekondes, s)
T	=	absolute temperatuur (kelvin, K)
V, V_{ohm}	=	selspanning (volt, V) met V_{ohm} die spanning benodig om die selweerstand te oorbrug
w, w_t, w_p	=	massa metaal elektrolities opgelos (gram, g) met voetskrifte t en p vir die teoretiese- en praktiese hoeveelheid metaal wat oplos onderskeidelik.
W, W_p	=	koagulant produksietempo (mgFe/kVA) met onderskrif p die hoeveelheid yster werklik opgelos by 'n bepaalde stroom en spanning aangelê (mgFe/kVA)
y	=	koördinaat in die vloeirigting van die elektroliet
z, z_a, z_c	=	aantal elektrone by die reaksie betrokke, met voetskrifte a en c wat onderskeidelik verwys na die anode en katode

HOOFSTUK 1

EUTROFIKASIE EN FOSFAATVERWYDERING UIT UITVLOEISELS

1.1 Inleiding

Die aarde is, met uitsondering van energie, 'n geslote stelsel van water, lug en land wat vergelyk kan word met 'n ruimteskip (Schalekamp, 1986) wat geïsoleerd deur die heelal beweeg. Alles wat in die ruimteskip gestort word bly daar lê en hoop op totdat dit in so 'n groot probleem ontaard, dat daar dringend iets aan gedoen moet word.

Dit is die situasie waarin die wêreld hom tans bevind met betrekking tot besoedeling. Veral ons natuurlike waterbronne ly sterk onder hierdie besoedelingslas en bestaan daar vandag in die wêreld geen waterbron meer wat nie in 'n meerdere of mindere mate besoedel is nie (Murray, 1987).

In Suid-Afrika is hierdie situasie nog veel erger omdat dit 'n betreklik droë land is sonder noemenswaardige natuurlike damme of mere, wat sy water kunsmatig moet opgaar en hergebruik om aan die land se behoeftes te voorsien (Johannes, 1989). Dit veroorsaak dat daar 'n stelselmatige opbou van organiese- en anorganiese besoedelingstowwe plaasvind, wat hoofsaaklik gekenmerk word deur 'n geleidelike verhoging van die konsentrasie opgeloste soute en plantnutriënte in alle opgaardamme.

Alhoewel die algemene publiek sowel as besoedelingsbeheerpersoneel dit eens is dat die kwaliteit van oppervlaktewaters oor die afgelope jare geweldig agteruitgegaan het, hoofsaaklik as gevolg van verstedeliking en ontwikkeling, kon daar nog weinig aan die situasie gedoen word. Die kostes vir sommige van hierdie waters om dit te suiwer vir menslike gebruik het ook aansienlik gestyg,

in sommige gevalle soveel, dat dit nie meer ekonomies is om die water te gebruik nie (Murray, 1987).

Suid-Afrika met sy beperkte waterbronne kan dit nie bekostig dat die kwaliteit van sy oppervlaktewaters so agteruitgaan dat dit nie meer vir menslike gebruik geskik is nie. Om 'n waterbron waar oormatige plantegroei plaasvind te regenerereer is moeilik en dit neem jare om die ekosisteem daarvan te herstel (Van Leeuwen, 1986). 'n Beter proposisie is derhalwe om te verhoed dat ons oppervlaktewaters in die eerste plek besoedel raak.

1.2 Eutrofikasie

Elemente wat noodsaaklik is vir biologiese selsintese sluit in die makro elemente, koolstof (C), waterstof (H), stikstof (N), suurstof (O), fosfor (P) en swawel (S), asook 'n menigte mikro- of spoorelemente (Van Leeuwen, 1986). Indien daar 'n oorfloed aan plantnutriënte in 'n waterbron teenwoordig is, lei dit tot 'n oormatige groei van waterplante met 'n gevolglike afname in waterkwaliteit, wat eutrofikasie genoem word. 'n Dam word as eutrofies beskou indien dit in staat is om 'n oormatige groei van ongewenste waterplante aan die gang te sit en in stand te hou (Pretorius, 1983).

Eutrofikasie kan verhoed word deur die konsentrasie van 'n bepaalde element wat noodsaaklik is vir selsintese in die waterbron so te verlaag, dat dit die groeibeperkende element word. Toerien en medewerkers (Toerien, 1975; Toerien et al, 1975) het aangetoon dat, vir Suid-Afrikaanse waterbronne, fosfor (as ortofosfaatverbinding) die belangrikste element ten opsigte van eutrofikasie is wat as groeibeperkende nutriënt optree. Hierop is die Waterwet, Wet Nr 54 van 1956, gewysig en mag fosfaatkonsentrasies in uitvloeisels sedert 1 Augustus 1985 nie 1 mg/l oorskry vir ses sensitiewe opvanggebiede in Suid-Afrika nie.

1.3 Uitvloeiselbehandeling vir fosfaatverwydering

In Suid-Afrika is navorsing toegespits op hoofsaaklik biologiese fosfaatverwydering in teenstelling met oorsese lande wat chemiese fosfaatverwydering verkies, omdat dit talle voordele inhou, naamlik:

- Geen addisionele chemikalieë word benodig nie, wat die bedryf van die rioolsuiweringswerke vergemaklik.
- Bedryfskoste is laer omdat aluminium- of ystersoute, wat betreklik duur is, nie bygevoeg hoef te word nie.
- Die opgeloste soutkonsentrasie van die uitvloeisel word nie deur die anioon van die metaalsout, wat tydens die watersuiweringsproses vrygestel word, verhoog nie.

Ontwikkelde lande oorsee besit feitlik almal lopende riviere met lae opgeloste soutkonsentrasies wat in die see mond en speel dit dus geen rol as die opgeloste soutkonsentrasie in hul riviere effens verhoog word as gevolg van die chemiese watersuiweringsproses nie.

In Suid-Afrika word fosfaat uit munisipale uitvloeiels in rioolwerke egter nog verwyder deur van beide prosesse (chemiese en biologiese), gebruik te maak. 'n Kombinasie van hierdie twee prosesse word ook by talle rioolwerke toegepas ten einde 'n bevredigende uitvloeisel te kan lewer wat te alle tye voldoen aan die fosfaatstandaard. Verskeie alternatiewe metodes vir fosfaatverwydering is moontlik, wat hier kortliks bespreek sal word.

1.3.1 Chemiese prosesse

a) Proses: Tydens hierdie prosesse word die rioolwater gesuiwer deur van chemikalieë gebruik te maak om koagulasie en flokkulasie

van die kolloïdale partikels te kry. Die vlokke word dan fisiese uit die water verwyder, byvoorbeeld deur besinking, flottasie of filtrasie.

Fosfaatverwydering word bewerkstellig deur chemiese presipitering van fosfate met 'n metaalioon. In Suid-Afrika word veral ystersoute (ferrichloried, ferrisulfaat of ferrosulfaat), aluminiumsulfaat en tot 'n mindere mate, kalk (kalsiumhidroksied) vir die doel gebruik (Slim, 1987).

b) Nadele: - By die gebruik van metaalsoute word slegs die metaalkatïoon wat met die fosfaat verbind om 'n presipitaat te vorm uit die water verwyder terwyl die anioon, wat 'n anorganiese sout is, in die uitvloeisel agterbly wat tot gevolg het dat die soutgehalte van die water styg. 'n Verdere nadeel is dat die alkaliniteit in die water deur metaalsoute verlaag word, wat addisionele kalkdosering sal vereis indien die pH van die water te laag daal (Metcalf & Eddy, 1979).

- Indien kalk (Ca(OH)_2) vir fosfaatpresipitasie gebruik word, styg die pH van die water en moet dit weer met 'n suur afgebring word om binne die neergelegde uitvloeiselstandaard te val.

1.3.2 Biologiese prosesse

a) Proses: Mikro-organismes, wat fosfaat vir selsintese benodig, word, deur bepaalde groeitoestande in hierdie prosesse te handhaaf, so gemanipuleer dat hulle meer fosfaat opneem as wat vir normale groei benodig word ("luxury uptake") (Barnard, 1983).

b) Nadele: - Hierdie prosesse kan slegs optimaal funksioneer indien die bedryfstoeistande in die reaktore konstant gehou word. Die samestelling en temperatuur van riool varieër egter aansienlik gedurende 'n 24-uur periode en kan moeilik ekonomies konstant gehou word.

- Aangesien nutriëntverwydering slegs deur mikro-organismes geskied, is hierdie stelsels ook redelik kwesbaar vir gifstowwe wat in die riool gestort mag word en vereis 'n aansienlike hersteltyd indien die mikrobiologiese ewewig versteur word.

- Biologiese fosfaatverwyderingsprosesse is ook meer energie-intensief as chemiese prosesse (Owen, 1982).

- Ten einde 'n uitvloeisel te kan verseker wat te alle tye aan die standaard voldoen is 'n chemiese bystandstelsel vir noodsituasies by alle biologiese aanlegte noodsaaklik en word deur die Departement van Waterwese aanbeveel (Best, 1982).

1.3.3 Alternatiewe metodes

Die alternatiewe metodes om fosfate uit uitvloeiels te verwyder is almal biologiese-, chemiese- of elektrochemiese prosesse wat nog nie op grootskaal toegepas word nie.

a) Biologiese prosesse: Twee verskillende biologiese prosesse wat tans op eksperimentele basis beproef word is fosfaatverwydering deur assimilasie met groen alge en rietbeddings. Beide metodes is onekonomies indien groot volumes uitvloeiselwater behandel moet word omdat groot oppervlaktes benodig word om die alge of riete te kweek (Wrigley en Toerien, 1988). Die alge benodig ook lig om te groei, wat die groeiperiode beperk tot ongeveer 12 uur per dag en groot oppervlaktes noodsaak wat aan sonlig blootgestel is (Hensman, 1985). By rietbeddings dra die tipe grond wat gebruik word om die riete in te plant ook by tot die hoeveelheid fosfaatverwydering wat in die praktyk verkry word (Wrigley en Toerien, 1988). Beide prosesse word dus beperk tot gebiede waar die prys van grond laag is in verhouding tot die prys van energie.

b) Chemiese prosesse: Hier is dit veral een redelik nuwe metode waarmee tans nog geëksperimenteer word, maar wat belofte inhou, naamlik kristallisering van fosfaat in korrelbedreaktore. Tydens hierdie proses word die pH van die uitvloeisel verhoog ten einde 'n oorversadiging van kalsiumfosfaat te kry. In 'n reaktor wat gevul is met sandkorrels en waarvan die bed vervloei word, vind kristallisasie van die kalsiumfosfaat dan op die sandkorrels plaas wat maklik verwyder kan word (Van Dijk en Braakensiek, 1984). Geen slyk word gevorm nie en die produk, kalsiumfosfaat, kom in die vorm van korrels voor wat deur die fosfaatnywerheid hergebruik kan word, wat hierdie proses baie aantreklik vir watersuiweringsdoeleindes maak (Coetzee, 1989).

c) Elektrochemiese prosesse: Alhoewel daar al navorsing op hierdie gebied gedoen is, word elektrochemiese watersuiwering nog nie op groot skaal toegepas nie en kon daar in die literatuur nie bewys gevind word dat die elektrochemiese proses saam met biologiese watersuiwering gebruik word nie. Tot dusver is die elektrolitiese proses slegs gebruik om uitvloeiels te suiwer wat hoog in kolloïdale partikels is, soos byvoorbeeld uitvloeiels van die papier-en-pulp nywerheid, plateringsnywerheid, leerlooierye, inmaakfabrieke, slagplase, verfvervaardiging en uitvloeiels wat chroom, lood en kwik bevat (Plechter, 1981). Tydens watersuiwering word die metaalkatione, wat as flokkulant benodig word, elektrochemies geproduseer deur metaalelektrodes in die water te oksideer met behulp van 'n gelykstroom wat deur die plate gestuur word.

1.4 Uitleg van verslag

Ten einde elektrochemiese fosfaatverwydering te verstaan, sal die meganisme waarvolgens fosfaat uit water verwyder word, asook die teoretiese agtergrond tot elektrochemie, in die volgende hoofstuk (HOOFSTUK 2) bespreek word. 'n Literatuurstudie, waartydens ontwikkeling op die elektrochemiese gebied tot op hede weergegee

word, die projekmotivering en navorsingsprogram, word daarby ingesluit.

In HOOFSTUK 3 en 4 word daar na die elektrolitiese sel gekyk. Terwyl daar in HOOFSTUK 3 veral op seleffektieweite en eienskappe van die gevormde vlok (soos verkry tydens 'n laboratoriumstudie) gekonsentreer is, word die probleme wat opgeduik het met die sel onder bedryfstoeestande en ontwikkeling daarvan vir kontinue gebruik, in HOOFSTUK 4 bespreek.

'n Aanleg waarmee fosfaatverwydering uit munisipale uitvloeisels met elektrochemiese flokkulantproduksie op 'n loodsskaal ondersoek is, is bedryf om te toets of die proses prakties aangewend kan word (HOOFSTUK 5). Die resultate wat met hierdie aanleg verkry is, is dan gebruik in 'n gangbaarheidstudie waar elektrochemiese- met chemiese fosfaatverwydering vergelyk is (HOOFSTUK 6).

Die studie het getoon watter probleme met elektrochemiese fosfaatverwydering verwag kan word indien die proses op volskaal aangewend word en waar verdere navorsing vereis word, wat in HOOFSTUK 7 saamgevat word.

HOOFSTUK 2

LITERATUURSTUDIE: FOFAATVERWYDERING EN TOEPASSING VAN ELEKTROCHEMIE IN WATERSUIWERING

2.1 Inleiding

Vanweë hul belangrikheid as flokkulant in sowel watersuiwering asook fosfaatverwydering was daar altyd 'n spesiale belangstelling onder chemici wat met omgewingsbewaring gemoeid is oor die meganisme waarop yster- en aluminiumsoute koagulasie bewerkstellig (Lijklema, 1980) . Baie eksperimente is al gedoen om die proses te verklaar en skemas gepostuleer om die meganisme te beskryf (sien 2.2), maar tans heers daar nog onsekerheid oor hoe hierdie proses presies plaasvind (Hong-Xiao en Stumm, 1987 (a)).

Ook op die gebied van elektrolitiese watersuiwering is daar al heelwat geëksperimenteer en is die eerste patent in hierdie veld reeds in 1889 in Amerika (US Patent 398 101, 1889) uitgeneem. Tog word hierdie proses tans nog nie op groot skaal in watersuiweringswerke gebruik nie, wat seker gedeeltelik daaraan toegeskryf kan word dat daar met twee gespesialiseerde gebiede gewerk word, naamlik in die chemiese- sowel as elektriese veld (Vik et al, 1984).

2.2 Interaksie van ortofosfate met metaalhidroksiedes

Indien gebruik as konvensionele koaguleermiddel, is die gedrag van yster(III)- en aluminiumsoute tydens hidrolise-presipitasie baie dieselfde (Hong-Xiao en Stumm, 1987 (a)). Alle reaksies en voorbeelde in hierdie afdeling sal met yster as metaalkatoom aangetoon word, omdat die eksperimente met hierdie metaal gedoen is.

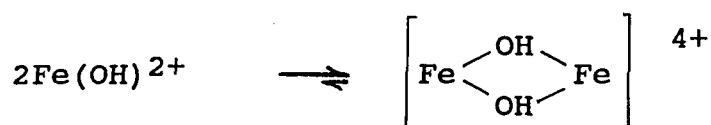
2.2.1 Vorming van Fe(III)-polimere

Navorsers het eers betreklik onlangs uitgevind dat koagulasie met yster(III) berus op die tydelike vorming van 'n intermediêre hidroliseproduk wat bestaan uit polinukleêre hidroksie-komplekse van die metaal (Hong-Xiao en Stumm, 1987 (a)). In 1956 postuleer Biederman die bestaan van die tri-hidroksiekompleks $\text{Fe}_3(\text{OH})_4^{5+}$ en daarna identifiseer Hedström (Baes en Mesmer, 1976) ander hidroksie-komplekse, naamlik FeOH^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ en $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$ en bepaal hul hidrolise-ewewigskonstantes. Die eerste model wat Fe(III) hidrolise-presipitasie bevredigend kon verklaar is deur Dousma en de Bruin (1976) opgestel en word as volg gegee:

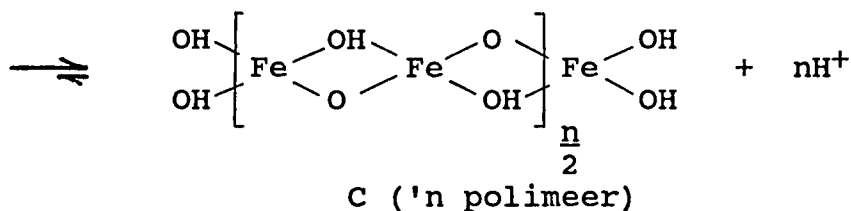
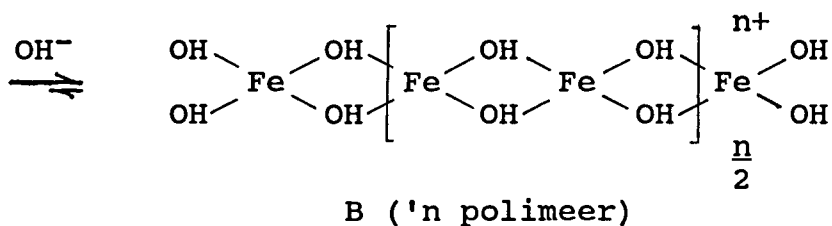
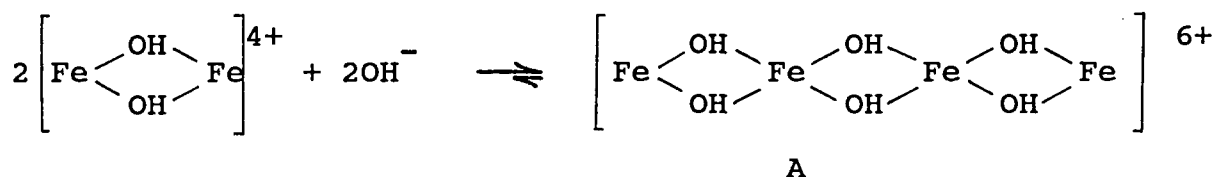
Stap 1:



Stap 2:



Stap 3:

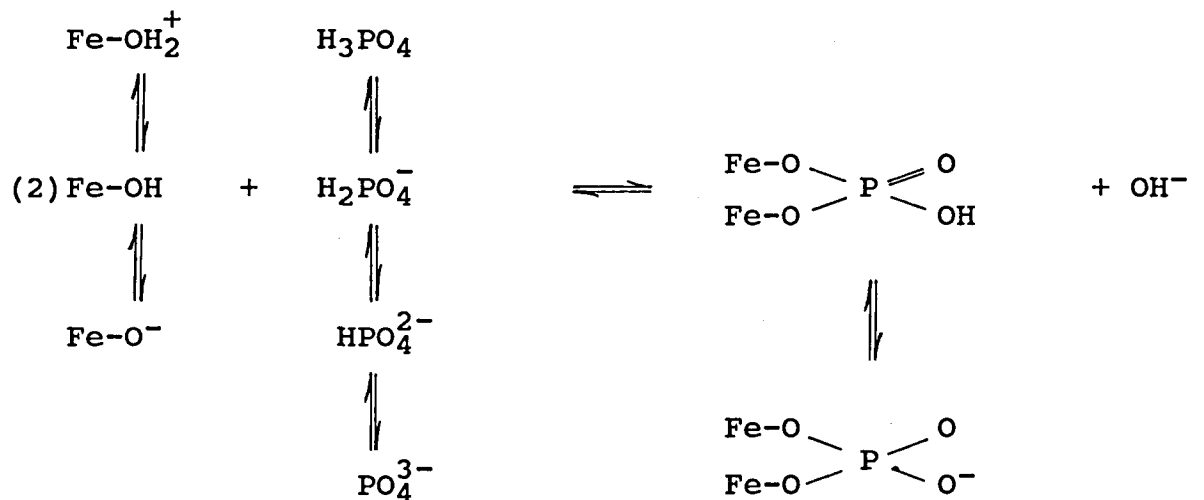


Struktuur C verteenwoordig die lang polimeer wat stadig vorm vanuit struktuur B en wat kan lei tot die vorming van goethiet (α -FeOOH) en hematiet (α -Fe₂O₃), 'n kristallyne presipitaat.

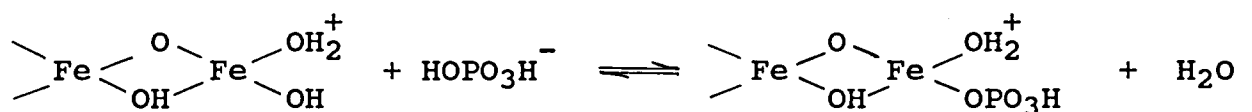
2.2.2 Fosfaatverwydering

Fosfaatverwydering vind plaas deur middel van adsorpsie en substitusie van die ortofosfaat op die gevormde ysterpolimere. Die produk wat gevorm word hang af van hoe vêr die yster(III)-polimerisasie gevorder het.

a) Die dimeer wat in stap 1 en 2 van bogenoemde skema gevorm het reageer as volg met die ortofosfate (ladings nie gebalanseer nie):



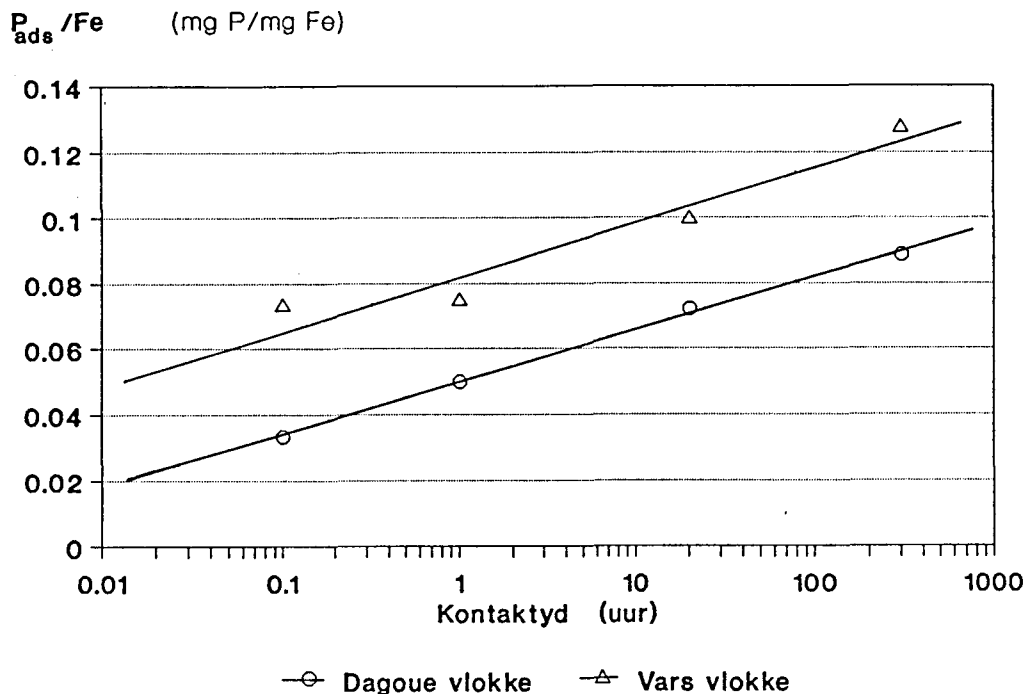
b) Met die polimeer, C, word 'n hidrokso-polimeer gevorm wat optree as koagulant (Hong-Xiao en Stumm, 1987 (b)):



2.2.3 Resultate

Resultate wat betrekking het op fosfaatverwydering met ystersoute kan ook van toepassing wees op die elektrolitiese proses, veral wat betref die interaksie van ortofosfate met ysterhidroksiedes. Belangrike resultate, soos uit die literatuur verkry, sal hier kortliks weergegee word.

a) Vlokouderdom: Volgens Lijklema (1980) hang die hoeveelheid fosfaat geadsorbeer deur yster(III)hidroksied vlokke af van beide die ouderdom van die ysterhidroksied-vlokke sowel as die kontaktyd van die fosfaat met die vlokke. FIGUUR 1 (Lijklema, 1980) toon dat fosfaatadsorpsie op vars gevormde vlokke beter is as op 'n dagoue presipitaat en dat die hoeveelheid geabsorbeer toeneem met tyd.



FIGUUR 1: Fosfaatadsorpsie deur yster(III)hidroksiedes as 'n funksie van tyd (Lijklema, 1980)

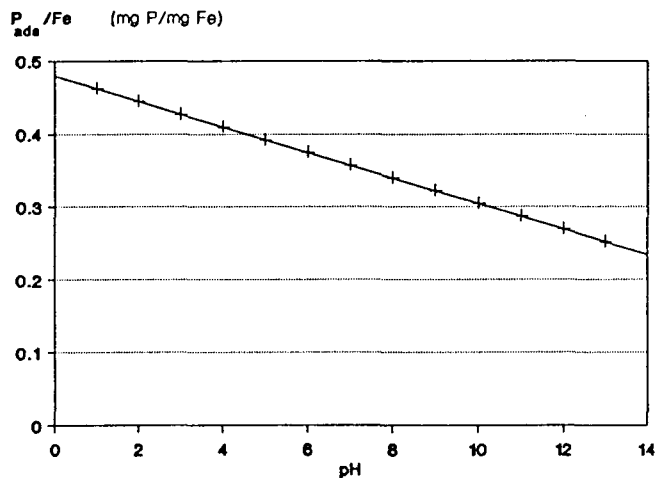
Die tendens om meer fosfaat met verloop van tyd te bind kan verklaar word deur na die polimerisasie van ysterhidroksied te kyk

(sien 2.2.1, Stap 3). Met verloop van tyd vind daar 'n verskuiwing van die struktuur van die gevormde hidrokso-polimeer, C, na die hidroksie-polimere, eers B dan A, plaas waartydens meer aktiewe punte vir fosfaatadsorbsie beskikbaar gestel word.

b) Mengintensiteit: Tydens tersiêre uitvloeiselbehandeling in rioolwerke hang fosfaatverwydering deur yster(III)-soute baie af van die wyse waarop aanvanklike vermenging plaasvind. 'n Hoë mengintensiteit lewer beter fosfaatverwydering (Lijklema, 1980).

c) Ioniese vorm van yster: Leckie en Stumm (Lijklema, 1980) neem waar dat homogene presipitasie van fosfate meer effektief plaasvind indien yster(III) in situ vorm deur oksidasie van yster(II), as direkte dosering van yster(III)-soute. Hierdie is 'n belangrike bevinding vir die elektrochemiese koagulantproduksie, aangesien yster(II) eerder as yster(III) tydens die elektrochemiese proses gevorm word (Johannes, 1989).

d) pH. Die pH speel 'n belangrike rol tydens fosfaatadsorbsie, soos gesien kan word uit FIGUUR 2.



FIGUUR 2: Fosfaatadsorbsie-isoterm soos gegee deur Lijklema (1980)
gestip vir 'n ortofosfaatkonsentrasie van 8 mgP/l

Lijklema (1980) het 'n fosfaat/ysteradsorbsie-isoterm opgestel, naamlik:

$$\frac{P_{ads}}{Fe} = 0.298 - 0.0316pH + 0.201[PO_4-P]^{\frac{1}{2}}$$

FIGUUR 2 (volgens die isoterm) toon die effek van pH op die adsorbsie van ortofosfaat op yster by 'n ortofosfaat konsentrasie van 8 mgP/l, wat ongeveer ooreenstem met die invloeikonsentrasie van die loodsaanleg te Daspoort.

2.3 Gebruik van elektrochemie in watersuiwering

Navorsing wat daarop gemik is om elektrolitiese beginsels in watersuiwering toe te pas kan, alhoewel die kategorieë oorvleuel, in breë trekke as volg geklassifiseer word:

a) Ontsmetting: Hierdie proses word veral vir die ontsmetting van rioolwater gebruik.

b) Flokkulantproduksie: Elektrolitiese flokkulantproduksie word aangewend tydens drinkwatersuiwering om kolloidale partikels uit die water te verwyder, terwyl dit gebruik word vir fosfaatverwydering tydens munisipale uitvloeiselsuiwering.

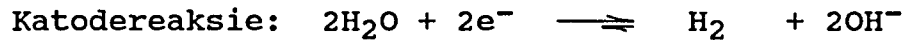
c) Flottering: Spesifieke nywerhede (sien 2.3.3) gebruik elektroflottering om hul uitvloeiselkwaliteit te verbeter alvorens dit in die munisipale uitvloeisel gestort word.

2.3.1 Elektrochemiese ontsmetting

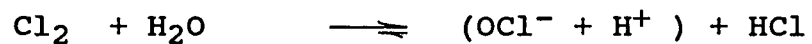
Tydens hierdie proses word chloorgas in situ geproduseer deur oksidasie van chloriedione met behulp van inerte elektrodes. Die proses lyk veral belowend vir industriële aanwending waar uitvloeisels met 'n hoë chloriedkonsentrasie behandel moet word, byvoorbeeld vir ontsmetting van verkoelingswater vir

kragssentrales. Indien daar nie voldoende chloriedione in die uitvloeisel teenwoordig is nie, kan die soutkonsentrasie kunsmatig verhoog word deur soutwater met die uitvloeisel te meng of die chloorgas apart in 'n kunsmatige soutoplossing te vervaardig.

Die volgende reaksies beskryf hierdie proses:



Die gevormde chloorgas tree dan as ontsmetmiddel as volg op:



Verskeie patente wat hierdie beginsel gebruik is al geregistreer (Tunturi, 1976), die eerste reeds in 1889 deur William Webster (US Patent 398 101, 1889). 'n Aanleg, wat seewater met rioolwater meng en die water ontsmet deur elektrolitiese vorming van chloorgas, is in Crossness, London, gebou (Electrical World, 1899). Daar bestaan egter twyfel of ontsmetting wêl verkry is, omdat ysterelektrodes in hierdie aanleg gebruik is. Yster word voor chloried geoksideer, wat beteken dat yster eers in oplossing sal gaan voordat chloorgas geproduseer word (Johannes, 1989).

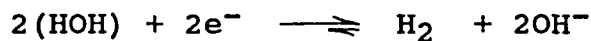
2.3.2 Elektrochemiese flokkulantproduksie

Flokkulante wat in watersuiwering gebruik word kan elektrochemies op twee maniere geproduseer word, naamlik direk deur oksidasie van metaalelektrodes wat opgeoffer word of indirek met behulp van inerte elektrodes.

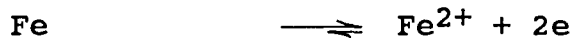
a) Direkte flokkulantproduksie: Die kolloïdale partikels teenwoordig in die water word direk gedestabiliseer deur 'n metaalelektrode (aluminium of yster) te oksideer. Die hidrosiedione wat tydens die proses gevorm word verbind met die metaalkatïoon om 'n vlok te vorm, wat verwyder kan word. Die

eganisme, veral ook ten opsigte van fosfaatverwydering met yster, sal later meer breedvoerig beskryf word. Die anode-, katode- en vlokformingsreaksie is as volg:

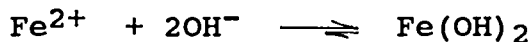
Katodereaksie (reduksie van water):



Anodereaksie (oksidasie van yster):



Vlokforming:



b) Indirekte flokkulantproduksie: In teenstelling met direkte flokkulantproduksie, word hier van inerte elektrodes gebruik gemaak. Die katodereaksie is nog dieselfde as tevore, maar by die anode word 'n anioon geoksideer. In die meeste gevalle sal dit chloriedione wees wat na chloorgas geoksideer word, met ander woorde die anodereaksie is dieselfde as tydens elektrochemiese ontsmetting. Die gevormde hidroksiedione verbind met die metaalione wat in die water teenwoordig is (meesal magnesiumione) om onoplosbare metaalhidroksiedes te vorm, wat verwyder kan word.

Hierdie proses is 'n kombinasie van elektrochemiese ontsmetting en flokkulantproduksie, wat egter slegs gebruik kan word indien die opgeloste soutkonsentrasie in die water hoog is. By kusdorpe kan hierdie proses toegepas word deur die rioolwater met seewater te vermeng (Poon en Brueckner, 1975).

2.3.3 Elektroflottering

Elektroflottering word gebruik om gesuspendeerde vastestowwe uit 'n oplossing te verwyder. Die fyn gedispergeerde waterstof- en suurstofborrels, wat op die inerte elektrodes tydens elektrolise gevorm word, adsorbeer aan die vaste partikels en styg na die oppervlakte, waar dit maklik afgeskep kan word.

Sowat 20 elektroflotteringsaanlegte wat industriële uitvloeisels behandel, was in 1980 in Brittanje in bedryf (Matis, 1980). Die prosesse word veral gebruik om die BSB en SS van uitvloeisels te verlaag, vir slykverdikking en om emulsies in die olie- en verfnywerheid te breek. Matis (1980) beweer dat die emulsie veral deur die waterstof gebreek word en dat die suurstof nie beduidend tot die proses bydra nie.

Ook met hierdie proses kan ontsmetting van rioolwater gelyktydig met elektroflottering verkry word. Die elektroliet moet chloriedione bevat en sy pH moet bo 6,7, die pH waar die oksidasiepotensiaal van water laer is as die van chloriedione (Musquere, 1983), gehou word.

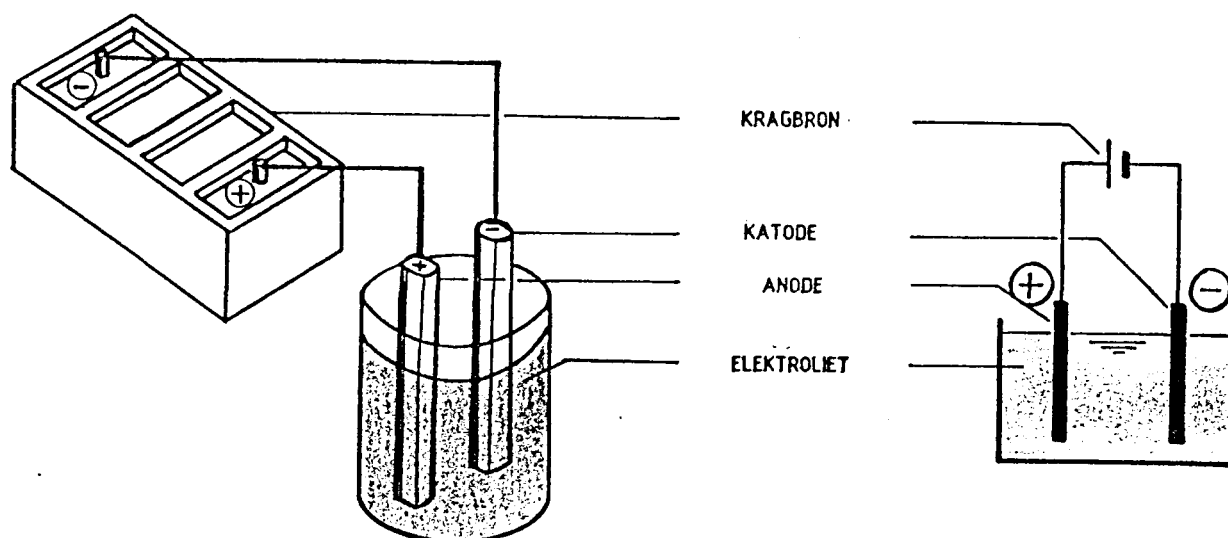
2.4 Elektrolise - basiese begrippe

Elektrochemie is gemoeid met die chemiese transformasies wat plaasvind as 'n elektriese stroom vloei en, vice versa, die opwekking van elektrisiteit deur middel van chemiese reaksies (Ouelette et al, 1978). Die begin van hierdie studieveld kan as Alessandro Volta se ontdekking in 1796, naamlik dat chemiese reaksies elektrisiteit kan genereer, gesien word (Brescia et al, 1970).

Alle chemiese reaksies wat tydens elektrolise plaasvind is oksidasie-reduksiereaksies, kort redoksreaksies genoem, waartydens ladingsverandering plaasvind deur elektrone wat verloor of gewen word (sien 3.2). Vir elke spesie (atoom of molekule) wat 'n elektron verloor moet daar 'n spesie wees wat die elektron kan opneem vir 'n redoksreaksie om te kan plaasvind.

In 'n elektrolitiese sel word daar nie-spontane redoksreaksies teweeggebring deur elektriese energie tot die sisteem toe te voeg. Dit kan in vereenvoudigde vorm voorgestel word soos getoon in FIGUUR 3.

Die gelykstroom kragbron dien as "elektronpomp" wat elektrone aan die katode verskaf, terwyl dit terselfdertyd elektrone van die anode verwyder. By die **anode** vind **oksidasie** plaas, dit wil sê daar word elektrone deur 'n ioon of molekule aan die kragbron afgegee, terwyl daar by die **katode reduksie** plaasvind, wat beteken dat elektrone van die kragbron aan 'n ander ioon of molekule verskaf word.

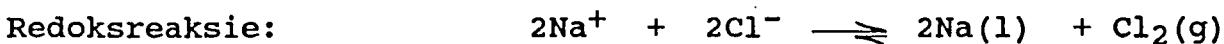
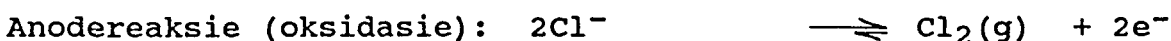
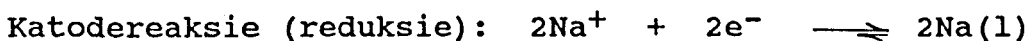


a) Praktiese opstelling

b) Skematiese voorstelling

FIGUUR 3: Elektrolitiese sel

Elektrolise van gesmelte tafelsout (NaCl) met inerte elektrodes sal byvoorbeeld as volg daar uitsien (Masterton et al, 1985):



2.4.1 Spanningsvereistes

Alvorens enige elektrolitiese reaksie sal plaasvind, moet daar 'n minimum spanning oor die sisteem aangelê word, wat uit drie komponente bestaan, naamlik die ewewigspotensiaal, oorpotensiaal en spanning nodig om die weerstand van die sel te oorbrug. Die verskillende komponente word deur die volgende vergelyking gegee:

$$V = E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm} \quad \dots(1)$$

met:

- E_e = ewewigspotensiaal van die sel (V)
- n_a = oorspanning by die anode (V)
- $|n_c|$ = oorspanning by die katode (V)
- V = spanning benodig deur die sel (V)
- V_{ohm} = spanning benodig as gevolg van die selweerstand (V)

Hierdie drie spanningskomponente word breedvoerig deur Johannes (1989) beskryf en word hier ter verduideliking kortliks weergegee:

a) Die ewewigspotensiaal: Elektrolise kan eers plaasvind indien die spanning wat oor die selle aangelê word hoog genoeg is om die natuurlike elektronevloei in 'n sisteem teen te werk. Hierdie spanning is afhanklik van die konsentrasie van die stowwe in die elektroliet wat by die reaksie betrokke is. Die ewewigspotensiaal kan dus soos volg uit die Nernst vergelyking bereken word (Charlot et al., 1962):

$$E_e = E_o - \frac{R.T}{z.F} \ln \frac{[\text{reduseermiddel}]}{[\text{oksideermiddel}]} \quad \dots(2)$$

met:

- E_e = ewewigspotensiaal (V)
- E_o = selpotensiaal wat 'n konstante van die stelsel is (V)
- R = gaskonstante ($R = 8,314 \text{ kJ/mol} \cdot ^\circ\text{K}$)
- T = absolute temperatuur ($^\circ\text{K}$)
- z = getal elektrone betrokke by die reaksie

F = Faraday se konstante ($F = 96487 \text{ C}$)

[] = konsentrasie (mol/dm^3)

b) Die oorpotensiaal: Kinetiese en konsentrasieverskynsels wat optree by die elektrodes veroorsaak dat 'n bykomende spanning by die sel se ewewigspotensiaal gevoeg moet word sodat die elektrodereaksies teen 'n bepaalde tempo kan plaasvind, wat as oorspanning of oorpotensiaal bekend staan. Die oorpotensiaal word opgebou uit twee komponente, naamlik konsentrasie- en aktiveringsoorpotensiaal (Pickett, 1979), wat kortliks bespreek sal word.

Die konsentrasie-oorpotensiaal word veroorsaak deur 'n konsentrasiegradiënt van die reagent wat ontstaan indien die tempo van ladingsoordrag van die elektrode na die elektroliet vinniger plaasvind as die tempo waarteen die gevormde produkte van die elektrodes weggevoer kan word (Bockris en Reddy, 1973). Die elektro-aktiewe spesies word vervoer deur migrasie onder die invloed van die elektriese veld, deur konveksie as gevolg van meganiese vermenging van die elektroliet, deur diffusie of deur 'n kombinasie van hierdie drie faktore (Pletcher, 1981).

Aktiveringsoorpotensiaal is die minimum spanning wat benodig word om 'n elektrochemiese reaksie aan die gang te sit, dus soortgelyk aan die aktiveringsenergie wat die meeste chemiese reaksies benodig om aan die gang te kom. Elektrochemies word daar tussen twee tipes reaksies onderskei, naamlik vinnige reaksies wat deur massa-oordrag beheer word en stadige reaksies wat 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, staan as die Butler-Volmer-vergelyking bekend. Die Tafel-vergelyking, wat 'n vereenvoudigde vorm van die Butler-Volmer-vergelyking is, word gebruik om die oorpotensiaal empiries te bepaal en lyk as volg:

$$n = a + b \cdot \log i \quad \dots(3)$$

waar:

$$i = I/A \quad \dots(4)$$

met:

- a = eerste Tafelkonstante (V)
- b = tweede Tafelkonstante (V.m²/A)
- i = stroomdigtheid (A/m²)
- n = oorpotensiaal (V)
- A = area van plaat (m²)
- I = stroom (A)

Konstantes a en b word gewoonlik empiries bepaal omdat die oorpotensiaal onder andere van die fisiese toestand van die elektrodes afhanklik is. Benaderde waardes is egter ook beskikbaar wat vir benaderde berekenings gebruik kan word (Pickett, 1979).

c) Spanning benodig om die weerstand van die sel te oorbrug: Die grootste komponent wat in berekening gebring moet word by die bepaling van die spanning wat vir elektrolise nodig is, is dié om die weerstand van die sel self te oorbrug. Baie faktore, wat ook weer onderling van mekaar afhang, dra tot hierdie weerstand by en maak dit moeilik om vooraf 'n noukeurige skatting te doen. Faktore wat hiertoe bydra sluit in:

- Die tipe reaktor. Reaktore sluit in enkelladingsreaktore, propvloeireaktore en volledig vermengde reaktore.
- Selkonfigurasie. Deur selle onderling op verskillende wyses te koppel kan een van die volgende konfigurasie gevorm word, 'n enkelsel, monopolêre selle in serie, monopolêre selle in parallel of bipolarêre selle in serie. Hierdie konfigurasies sal later meer volledig bespreek word.

- Geometrie van die elektrodes. Die vorm en rangskikking van die elektrodes het 'n uitwerking op die verspreiding van die stroomlyne tussen die elektrodes wat die weerstand van die sel beïnvloed.
- Afstand tussen die elektrodes. Hoe groter die afstand tussen die elektrodes, hoe groter is die weerstand van die sel. Hierdie verband sal meer volledig met Ohm se wet aangetoon word.
- Eienskappe van die elektroliet. Fisiese eienskappe van die medium wat dien as elektroliet soos pH, temperatuur en elektriese geleiding sowel as die vloeitoestande tussen die elektrodes, het 'n aansienlike invloed op die weerstand van die selle.

Pickett (1979) lei 'n verband met behulp van Laplace-vergelykings af om die spanning te bereken wat nodig is om die weerstand van die sel te oorbrug en vind dat twee vergelykings van toepassing is. Die eerste geld indien geen gasse gevorm word by die elektrodes nie, terwyl die tweede geld as gasvorming plaasvind.

Sonder gasvorming:

$$V_{ohm} = \frac{i \cdot d}{K} \quad \dots (5)$$

Met gasvorming:

$$V_{ohm} = \frac{i_y \cdot d}{K} \left\{ 1 + \frac{R \cdot T}{Q \cdot p \cdot F} \left(\frac{1}{z_a} + \frac{1}{z_c} \right) \right\}^{3/2} B \left(\int_0^L i_y dy - \int_0^Y i_y dy \right) \quad \dots (6)$$

met:

- A = Area van elektrode (L.B) (m²)
- B = afmeting van elektrode in die vloeirigting van die elektroliet (breedte van elektrode) (m)

- d = afstand tussen elektrodes (m)
F = Faraday se konstante (96487 Coulomb)
I = stroom wat deur sel vloei (A)
i = stroomdigtheid (A/m^2)
K = spesifieke geleiding van die elektroliet ($10^6 \mu S/m$)
L = vloediepte van elektroliet (lengte van elektrode) (m)
p = atmosferiese druk (kPa)
Q = vloeitemp van die elektroliet (m^3/s)
R = universele gaskonstante ($8,314 \text{ kJ/mol} \cdot ^\circ K$)
T = absolute temperatuur ($^\circ K$)
 V_{ohm} = spanning benodig om die weerstand van die sel te oorbrug (V)
y = koördinaat in vloediepte van die elektroliet (m)
 z_a = elektronoordragsyfer by die anode
 z_b = elektronoordragsyfer by die katode

Vergelyking (5) kan maklik bepaal word omdat alle parameters aan die regterkant van die vergelyking deur meting verkry kan word. Om vergelyking (6) te bereken is moeilik en onprakties omdat die verspreiding van die stroomdigtheid oor die elektrodes bekend moet wees voordat die integrale bereken kan word. Rousar *et al.* (1986) toon aan dat die verspreiding van die stroomdigtheid oor die elektrode ook afhanklik is van die spanning wat aangewend word, die gasvorming op een van die elektrodes en die vloeisnelheid van die elektroliet verby die elektrodes. Indien al hierdie faktore in berekening gebring word, word vergelyking (6) lomp en onprakties en word derhalwe meesal vergelyking (5) vir spanningsberekeninge gebruik (Paul, 1987).

2.4.2 Kwantitatiewe aspekte van elektrolise

Daar bestaan 'n eenvoudige verwantskap tussen die hoeveelheid elektriese stroom wat deur die selle vloei en produkte gevorm tydens elektrolise (Masterton *et al.*, 1985). Hierdie verwantskap is in 1834 deur Michael Faraday ontdek en word ook Faraday se "wet" genoem wat as volg saamgevat kan word:

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

In wiskundige terme lyk dit as volg:

$$w = \frac{I \cdot t \cdot Mr}{z \cdot F} \quad \dots (7)$$

met:

F = Faraday se konstante (F=96487 C/mol)

I = stroom wat deur die elektrode vloei (A=C/s)

Mr= molekulêre massa van die gevormde produk (g/mol)

t = tydsduur (s)

w = hoeveelheid produk gevorm (g)

z = aantal elektrone betrokke by die reaksie

Faraday se "wet" veronderstel dus dat, indien 'n nie-inerte metaalanode gebruik word, die hoeveelheid metaal wat sal oplos direk eweredig is aan die tydsduur wat die stroom vloei, terwyl dit omgekeerd eweredig is aan die getal elektrone wat stoïgiometries aan die reaksie deelneem.

Die toepaslikheid van hierdie "wet" vir verskillende selkonfigurasies is deur Johannes (1989) ondersoek, wat hierdie verband bevestig. (Die bevindinge word in AFDELING 2.4.5 c) weergegee).

2.4.3 Energieverbruik

Alvorens enige stelsel ten opsigte van ekonomiese lewensvatbaarheid geëvalueer kan word, is dit nodig om die energiekostes te bepaal.

Die energieverbruik vir 'n elektrolitiese sel kan maklik volgens die klassieke vergelykings van drywing bepaal word, deur slegs die stroom en spanning oor die selle te meet:

$$\text{Drywing, } P = V.I \quad \dots(8)$$

en

$$\text{Energieverbruik, } E = P.t \quad \dots(9)$$

met:

E = elektriese energie (kW.h)

I = stroom (A)

P = drywing (kW)

t = tydsduur (uur)

V = spanning (V)

Uit bogenoemde twee vergelykings kan aangetoon word dat die stroom wat deur die elektrolitiese selle vloei, die vernaamste invloed op die energieverbruik van die stelsel het. Dit kan as volg gedoen word:

Vanaf 2.4.1 c) maak die spanning benodig om die weerstand van die sel te oorbrug die grootste komponent van die totale spanning uit en word gegee deur vgl. (1),

$$V = \frac{i.d}{K} = \frac{I.d}{A.K} \quad \dots(10)$$

en daaruit volg dan dat:

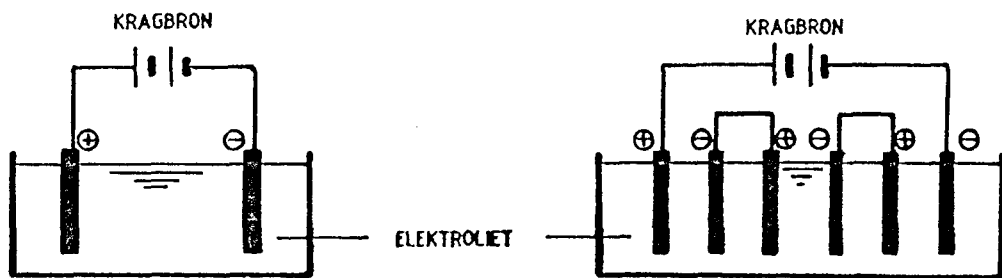
$$P = V .I = \frac{I.d}{A.K} I = \frac{d}{A.K} I^2 \quad \text{en} \quad E = \frac{d.t}{A.K} I^2 \quad \dots(11)$$

'n Verandering in stroom sal dus, omdat dit gekwadreer word, 'n groot invloed op die energieverbruik hê.

2.4.4 Selkonfigurاسies

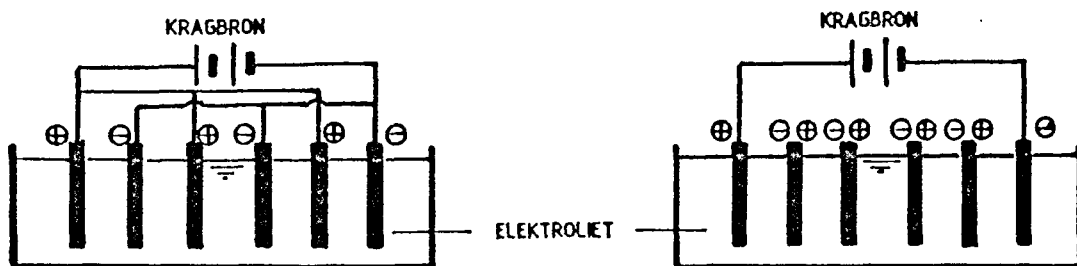
Indien meer as een elektrochemiese sel in 'n reaktor gebruik word, kan die selle volgens verskillende metodes onderling met mekaar gekoppel word om verskillende konfigurasie van selle te vorm (Johannes, 1989). Moontlike konfigurasies is die volgende (sien ook FIGUUR 4):

- Die enkelsel (FIGUUR 4a),
- Monopolêre selle in serie geskakel (FIGUUR 4b),
- Monopolêre selle in parallel geskakel (FIGUUR 4c) en
- Bipolêre selle in serie geskakel (FIGUUR 4d).



a) Enkelsel

b) Monopolêre selle in series



c) Monopolêre selle in parallel

d) Bipolêre selle in series

FIGUUR 4: Verskillende elektrolitiese selkonfigurasies

Onderlinge koppeling van die selle beïnvloed die elektriese skakeling van die selle, wat weer die weerstand van die stelsel,

spanning oor die selle en die wyse waarop die stroom deur die sisteem vloei, beïnvloed (Johannes, 1989). Die vergelykings vir stroom en spanning vir die onderskeie selkonfigurasies lyk as volg:

- Enkelsel en monopolêre selle in parallel;

$$V = E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm} \quad \text{en} \quad I = \frac{w.z.F}{t.Mr} \quad \dots(12)$$

- Monopolêre- en bipolêre selle, beide in serie geskakel;

$$V = N.(E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm}) \quad \text{en} \quad I = \frac{w.z.F}{N.t.Mr} f \quad \dots(13)$$

met eenhede soos vantevore en

N = aantal selle

f = effektiwiteitsfaktor vir die sel

Die verskillende konfigurasies met hul voor- en nadele soos beskryf deur Johannes (1989) is kortliks die volgende:

- Enkelsel (FIGUUR 4a). Dit is die eenvoudigste elektrochemiese sel wat slegs uit 'n anode en katode, gedompel in die elektrolietiese oplossing, bestaan. 'n Voordeel van die enkelsel is dat die elektrodes monopolêr is en derhalwe maklik ontleed kan word. Die nadele is eerder prakties van aard en sluit in; groot oppervlaktes vir die elektrodes word benodig indien groot hoeveelhede metaal opgelos moet word; omdat die hele stroom deur slegs twee elektrodes vloei, moet die dwarsdeursnee van die geleiers na die elektrodes groot wees om die weerstand in die geleiers te beperk.

- Monopolêre selle in series (FIGUUR 4b). Hierdie konfigurasie is uit die enkelsel ontwikkel en bestaan uit 'n

aantal enkelselle in serie geskakel. Die stroom deur al die selle is dieselfde, wat beteken dat 'n laer stroom nodig word om dieselfde hoeveelheid metaal op te los. Die weerstand van die stelsel is groter as met 'n enkelsel. Na aanleiding van Ohm se wet ($V=I.R$), moet die spanning dus verhoog word om die stroom te lewer. 'n Voordeel is dat die fisiese grootte van die enkele elektrodes kleiner is, maar daar moet meer elektrodes wat onderling aanmekaar gekoppel is, voorsien word. So 'n stelsel is onderhewig aan aansienlike verliese as gevolg van dwaalstrome en 'n lae doeltreffendheid word in die praktyk gekry. Die probleem kan voorkom word deur die verskillende selle vanmekaar te skei en die kante af te skerm soos in 'n lood-suurbattery, wat egter onprakties vir groot stelsels sal wees.

- Monopolêre selle in parallel geskakel (FIGUUR 4c). In hierdie stelsel word al die katodes onderling aanmekaar gekoppel en, op dieselfde wyse, al die anodes. Die spanning oor die plate is dus laag, naamlik slegs die van 'n enkele sel, maar die stroom wat in die stelsel vloei is die som van die strome in elke sel, wat in die praktyk groot sal wees omdat daar met baie selle gewerk word. Hier moet dus groot strome by 'n lae spanning opgewek word, wat in die praktyk moeilik en duur is. Nog 'n nadeel is dat groot geleiers vereis word vanweë die hoë stroom en dat elke elektrode afsonderlik gekoppel moet word, wat dit lomp maak vir die aanwending in groot stelsels.

- Bipolêre elektrodes in serie geskakel (FIGUUR 4d). Deur die kragtoevoer slegs aan die buitenste van 'n reeks elektrodes te koppel word daar 'n anode aan die een kant van die elektrode geïnduseer en 'n katode aan die ander kant (behalwe in die elektrodes wat aan die toevoer gekoppel is wat òf katode òf anode is). Hierdie konfigurasie se opstelling is dus baie eenvoudig en kan maklik in die praktyk aangewend word. Omdat die stroom deur al die selle vloei,

word hier laer strome vereis wat die stelsel meer ekonomies maak. Dwaalstrome sorg hier egter ook vir aansienlike verliese, maar kan beperk word deur die kante van die selle af te skerm.

2.4.5 Elektrochemiese flokkulantproduksie

Navorsing op hierdie gebied sal hier kortliks weergegee word en belangrike punte wat van toepassing is op flokkulantproduksie met ysterelektrodes bespreek of uitgewys word.

a) Elektrodemateriaal: Die meeste navorsers wat elektrochemiese flokkulantproduksie met opofferende metaalelektrodes ondersoek het (Dobolyi, 1978; Grøterud en Smoczynski, 1986 (a); Pandit en Mayadeo, 1985; Tunturi, 1976; Vik et al., 1984), het aluminiumelektrodes in hul navorsing gebruik. Slegs twee hiervan (Grøterud en Smoczynski, 1986 (a); Pandit en Mayadeo, 1985) motiveer waarom hulle aluminium en nie yster as elektrodemateriaal gebruik het nie.

Grøterud en Smoczynski (1986 (a)) vind dat aluminiumelektrodes bykans 13 keer minder energie gebruik as ysterelektrodes om dieselfde hoeveelheid fosfaat te verwyder en doen derhalwe alle verdere navorsing met aluminiumelektrodes. Die spanning waarby hulle werk vir die elektrolise van yster is bykans twee keer hoër as met aluminiumelektrodes, wat hulle toeskryf aan die verskil in elektrodepotensiaal van die twee metale. Volgens elektrochemiese beginsels is die elektrodepotensiaal egter 'n komponent van die "chemiese deel" van die spanning en sal dit gevolglik nie so 'n groot verskil in die spanning kan veroorsaak nie. Johannes (1989) bring die hoë spanning wat die navorsers opgemerk het eerder in verband met die stroom wat hulle vir die onderskeie eksperimente gebruik het. Tydens die eksperiment met ysterelektrodes was die stroom vyf keer hoër as tydens elektrolise met aluminiumelektrodes. Volgens Ohm se wet ($V=I.R$) sal die spanning oor die selle dus outomaties hoër wees indien 'n hoër stroom vloei

mits die weerstand van die stelsel konstant bly. Die skrywer dink self ook dat die energieverbruik nie vergelyk kan word indien die stroom deur die selle, wat bepalend is vir die hoeveelheid elektrodemateriaal wat opgelos word (volgens Faraday se "wet"), van beide stelsels nie dieselfde is nie. Soos in latere eksperimente aangetoon sal word, hang die effektiwiteitsgraad van elektrolitiese selle ook baie af van die stroom wat deur die selle vloei.

Pandit en Mayadeo (1985) regverdig hul navorsing met aluminium elektrodes eenvoudig deur te sê dat dat aluminium goedkoper en makliker bekombaar as yster in hul land (Indië) is.

b) Verwydering van besoedelingstowwe: Die bevindinge van navorsers wat die elektrochemiese proses gebruik het om munisipale rioolwater te suiwer, sal hier kortliks weergegee word.

- Dobolyi (1978) vind dat fosfaatverwydering uit rioolwater met elektrolities geproduseerde aluminiumione doeltreffender is as met aluminiumsoute. Hy skryf dit toe aan die vorming van nasente aluminium wat tydens die elektrolitiese proses geproduseer word en direk tot die rioolwater toegevoeg word, terwyl die aluminiumsoute eers komplekse vorm. Met ysterelektrodes kry hy 'n maksimum fosfaatverwydering van ongeveer 80% en vind hy dat 30-67 mg/l yster benodig om fosfaatkonsentrasies van 31-39 mg/l na 6,4 mg/l af te bring. Met aluminiumelektrodes het Dobolyi beter fosfaatverwydering met die elektrochemiese proses as met aluminiumsoute gekry indien die verhouding van aluminium tot fosfaat groter as 1,6 was.

- Grøterud en Smoczynski (1986 (c)) kry volledige fosfaatverwydering in rioolwater met aluminiumelektrodes by 'n pH van 6, wat hulle kunsmatig met soutsuur bereik.

- Johannes (1989) stel vas dat die chemiese suurstofbehoefte (CSB) en fosfate in rioolwater wél doeltreffend elektrochemies met yster verwyder kan word, maar dat ietwat beter resultate met konvensionele chemiese dosering verkry word.

- Miller en Knipe (1965) vind dat, omdat die geleidingsvermoë van rioolwater laag is, die elektrodes na aanmekaar gespaseer moet word om elektrisiteitsverbruik laag te hou; deur korroderende ysterelektrodes te gebruik kan ysterione tot die uitvloeisel gevoeg word, sonder dat anione ook toegevoeg word; met ysterelektrodes kan die CSB in die water tot soveel as 73%, die totale vastestowwe tot 56%, chloriede tot 51% en alkielbenseensulfonate tot 88% verwyder word. Met die gebruik van inerte elektrodes kan die bakterieë in die uitvloeisel effektief verminder word omdat chloor by die elektrodes vorm deur oksidasie van die chloriedione in die water; yster, lood, magnesium, aluminium en koper los op indien dit as anode gebruik word; looddioksied-, platinum- en platinumgeplateerde titaan-elektrodes is inert.

- Pandit en Mayadeo (1985) bevestig dat die elektrochemiese proses met aluminiumelektrodes gebruik kan word om die CSB, biologiese suurstofbehoefte (BSB), fosfaat- en nitraat-konsentrasies in rioolwater te verlaag.

c) Effektiwiteit: Die effektiwiteitsgraad wat met elektrolitiese stelsels behaal kan word hang baie nou saam met die rangskikking van die elektrodes, fisiese en chemiese eienskappe van die elektroliet en stroom wat deur die selle vloei. Bydraes gelewer deur ander navorsers ten opsigte van hierdie aspekte sal kortliks weergegee word en, waar nodig, bespreek word.

- Dobolyi (1978) vind dat 10-20% meer elektrodemateriaal (aluminium) oplos as Faraday se "wet" voorspel by 'n stroom van 1A. Geen moontlike verklaring word hiervoor gegee nie.

Hierdie waarneming is ook deur die skrywer bevestig aan hand van eksperimente wat met ysterelektrodes uitgevoer is (sien EKSPERIMENT 1).

- Grøterud en Smoczynski (1986 (a)) stel vas dat bevuiling van aluminiumelektrodes voorkom kan word terwyl die stelsel sy effektiwiteit behou, indien die polariteit van die elektrodes met 'n frekwensie van 0,0039Hz (elke 256 sekondes) gewissel word. Hulle vind ook dat fosfaatverwydering 'n funksie van die vloeitempo van die rioolwater oor die plate is en optimale fosfaatverwydering vir aluminiumelektrodes plaasvind as die vloeitempo van die elektroliet oor die plate 61,2 m/h is.

- Johannes (1989) ondersoek verskillende selkonfigurasies, veral ook om te sien of Faraday se "wet" daarop van toepassing is. Hy vind dat, vir 'n enkelsel, die "wet" wél van toepassing is maar nie vir bipolêre selle nie en beveel aan dat meer navorsing gedoen moet word om die bipolêre selkonfigurasie te optimiseer omdat dit die mees praktiese konfigurasie vir groot aanlegte blyk te wees.

2.5 Projekmotivering

In die literatuur word daar min melding van die energiebehoefte en produksiekoste van elektrochemies geproduseerde metaalflokkulante gemaak. Hierdie is egter die belangrikste vrae wat beantwoord moet word om die ekonomiese lewensvatbaarheid van so 'n stelsel te bepaal. Die navorsingsprogram, wat opgestel was om antwoorde op hierdie vrae te vind, het bestaan uit 'n selondersoek, loodsskaalstudie, en 'n gangbaarheidstudie.

2.5.1 Selondersoek

Die faktore wat 'n invloed het op die effektiwiteit van die elektrolitiese selle is eers in die laboratorium ondersoek

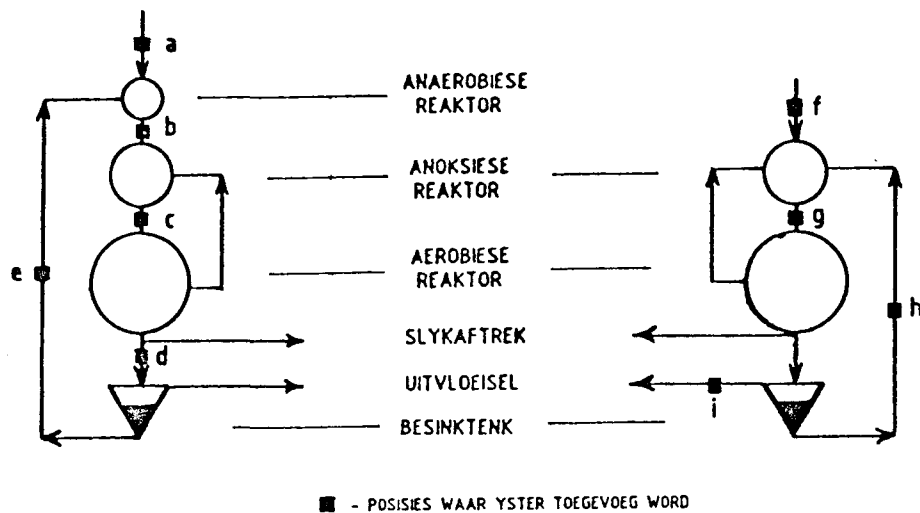
(HOOFSTUK 3) omdat dit uiteindelik sal bepaal hoe ekonomies die stelsel bedryf kan word. Twee aspekte is hiertydens ondersoek, naamlik:

a) Selkarakteristieke. Die invloed wat faktore soos die aantal plate waaruit die sel opgebou is, afstand tussen die plate, konfigurasie van die plate en die stroomdigtheid op die selsisteem uitoefen, is hier ondersoek.

b) Vlokvorming. Die beste oksidasietoestande (aerobies of anaerobies) in die selreaktor vir vlokvorming is ondersoek asook die vermoë van 'n geproduseerde ferrihidroksiedvlok om fosfaat te verwyder na 'n bepaalde tyd indien dit gestoor word.

Baie probleme is met die aanvanklike elektrolitiese selopstelling onder bedryfstoeestande ondervind. 'n Stelsel vir praktiese gebruik is ontwikkel en word in HOOFSTUK 4 bespreek.

2.5.2 Loodsskaalstudie



a) Biol. fosfaatverwydering

b) Biol. stikstofverwydering

FIGUUR 5: Skematiese voorstelling van die biologiese prosesse waarmee daar op loodsskaal geëksperimenteer is

'n Geaktiveerde slyk loodsaanleg is met munisipale rioolwater bedryf op die WNNR se eksperimentele terrein te Daspoort, Pretoria. Die aanleg is teen 'n invloeitempo van $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ met twee verskillende opstellings bedryf, naamlik die Phoredox-proses vir biologiese fosfaatverwydering (FIGUUR 5a) en die gemodifiseerde Ludzack-Ettinger-proses vir biologiese stikstofverwydering (FIGUUR 5b). Ten einde die posisie te vind waar fosfaatverwydering die effektiiefste plaasvind, is yster op verskillende posisies tot die prosesse toegevoeg, soos getoon op FIGUUR 5).

2.5.3 Gangbaarheidstudie

Na afloop van die eksperimente is elektrochemiese- met chemiese fosfaatverwydering vergelyk (HOOFSTUK 5) vir geaktiveerdeslyk=aanaanlegte met kapasiteite tot 10 Ml/dag . Kapitaalkostes is by die gangbaarheidstudie ingesluit en 'n aanbeveling oor die moontlike toekomstige toepassing van die elektrochemiese proses vir fosfaatverwydering word gemaak.

'n Geaktiveerde slyk loodsaanleg is met munisipale rioolwater bedryf op die WNNR se eksperimentele terrein te Daspoort, Pretoria. Die aanleg is teen 'n invloeitempo van $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ met twee verskillende opstellings bedryf, naamlik die Phoredox-proses vir biologiese fosfaatverwydering (FIGUUR 5a) en die gemodifiseerde Ludzack-Ettinger-proses vir biologiese stikstofverwydering (FIGUUR 5b). Ten einde die posisie te vind waar fosfaatverwydering die effektiëfste plaasvind, is yster op verskillende posisies tot die prosesse toegevoeg, soos getoon op FIGUUR 5).

2.5.3 Gangbaarheidstudie

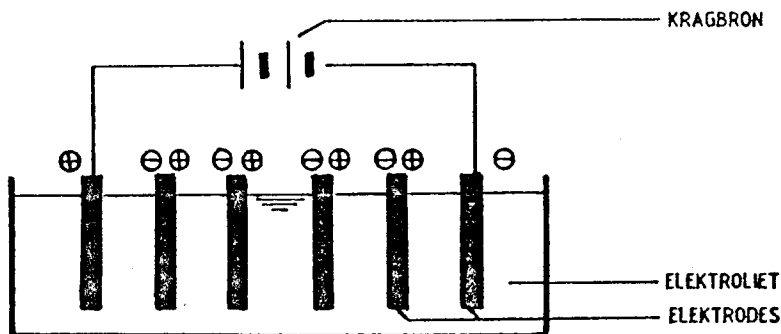
Na afloop van die eksperimente is elektrochemiese- met chemiese fosfaatverwydering vergelyk (HOOFSTUK 5) vir geaktiveerdeslyk=aanaanlegte met kapasiteite tot 10 Ml/dag . Kapitaalkostes is by die gangbaarheidstudie ingesluit en 'n aanbeveling oor die moontlike toekomstige toepassing van die elektrochemiese proses vir fosfaatverwydering word gemaak.

HOOFSTUK 3

EKSPERIMENTELE WERK: LABORATORIUMONDERSOEKE

3.1 Inleiding

Tydens die laboratoriumondersoek is die elektrolitiese stelsel met die selle in 'n bipolêre rangskikking (sien FIGUUR 6) vir koagulantproduksie ondersoek, nie soseer om die mees effektiewe stelsel te vind nie, maar eerder om te bepaal watter faktore die effektiwiteit van die stelsel beïnvloed. Daar is veral klem gelê op bedryfstoestande soos dit by geaktiveerde slykaanlegte aangetref word, met die oog op moontlike toepassing van hierdie proses aldaar.



FIGUUR 6: Bipolêre selle in series

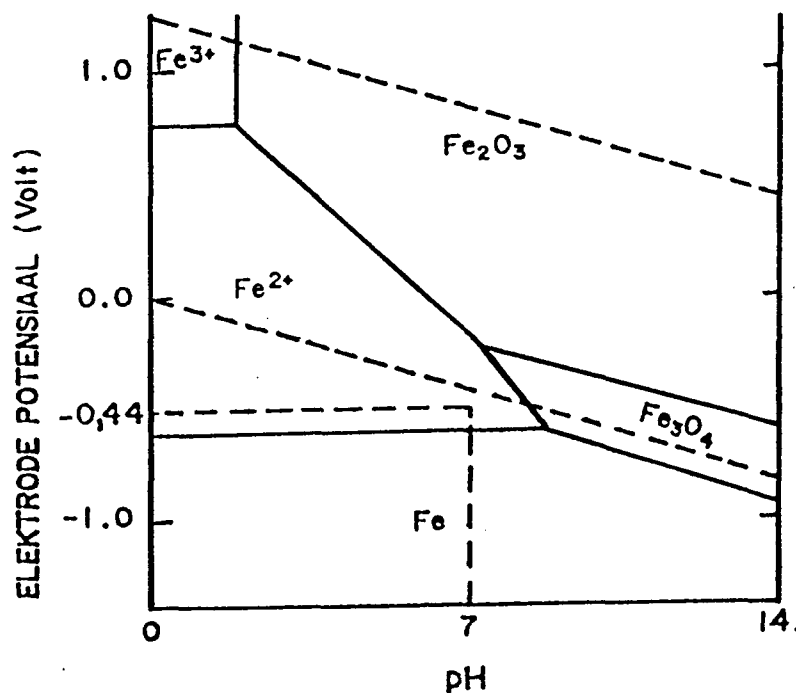
Voordat die elektrolitiese stelsel by die loodsaanleg te Daspoort getoets is, is daar eers laboratoriumeksperimente gedoen om te bepaal wat die gebied van minimum en maksimum stroom en spanning waarmee daar met die kragbron, 'n gelykstroomsweismasjien wat die stroom en spanning benodig vir elektrolise sou lewer, geëksperimenteer kon word.

Om te bepaal watter faktore 'n rol speel om die elektrolitiese proses so ekonomies as moontlik te kan bedryf moes daar eers na

die reaksiesisteem vir die elektrolitiese oplos van yster in water, eienskappe van die bipolêre selkonfigurasie en die stroom- en spanningsvereistes vir die selle gekyk word.

3.1.1 Reaksiesisteem

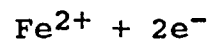
Die reaksies wat plaasvind as yster elektrolities in water oplos, word beskryf deur die Pourbaix-diagram (Brubaker en Phipps, 1979) vir die Fe-H₂O-sisteem soos gegee in FIGUUR 7.



FIGUUR 7: Pourbaix-diagram vir die Fe-H₂O elektrolitiese sisteem

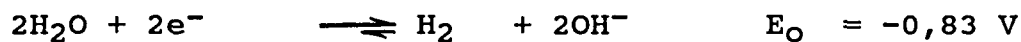
Die anode- en katodereaksies met hul onderskeie elektrodepotensiale, E_0 , (met betrekking tot die elektrodepotensiaal van die standaard waterstofelektrode wat as nul geneem word) is as volg:

Anodereaksie (oksidasie):

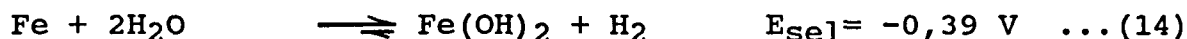


$$E_0 = +0,44 \text{ V}$$

Katodereaksie (reduksie):

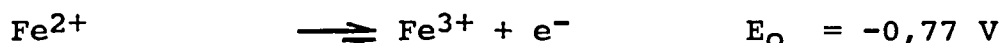


Redoksreaksie (totaal in sel):

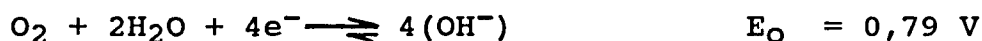


In die teenwoordigheid van opgeloste suurstof word Fe(II), wat by die anode gevorm het, spontaan na Fe(III) volgens die volgende oksidasie-reduksie reaksies geoksideer:

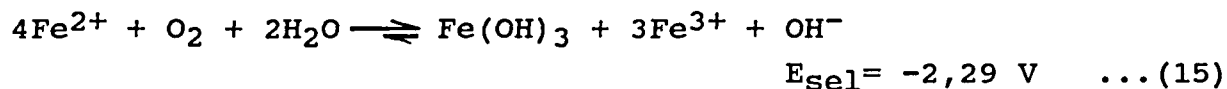
Oksidasie van Fe(II):



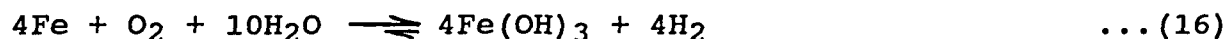
Reduksie in teenwoordigheid van suurstof:



Redoksreaksie (gebalanseer):



Die totale stoïgiometriese vergelyking vir die elektrolitiese oplos van ystermetaal om yster(III)-hidroksied te vorm, lyk as volg:



Indien die elektrolitiese stelsel dus onder aerobiese toestande bedryf word, word yster(III)-hidroksied (volgens vergelyking (15)) gevorm, terwyl yster(II)-hidroksied (vergeljking (14)) gevorm word as anaerobiese toestande in die selle heers.

3.1.2 Selkonfigurasie

Die bipolêre selkonfigurasie (soos beskryf onder 2.4.4) waarmee alle eksperimente gedoen is, is gekies omdat dit vir grootskaalse gebruik die mees praktiese opstelling blyk te wees om die volgende redes:

- Eenvoudige opstelling en bedryf: Omdat slegs die buitenste twee elektrodes aan die stroombaan gekoppel word, kan elektrodes onderling nie verkeerd opgekoppel word nie en kan daar onder bedryfstoestande geen foute opduik wat betrekking het op 'n onderbreekte stroombaan in die selle nie.
- Maklike uitbreiding van die stelsel: Indien dit nodig sou wees om meer elektrodes in die elektrolitiese sel in te skakel, kan dit gedoen word sonder om enige veranderinge aan die stroombaan en onderlinge koppeling van die selle aan te bring.
- Ongekompliseerde instandhouding: Enkele elektrodes kan maklik skoongemaak en vervang word in 'n minimum van tyd omdat die elektrodes nie onderling aanmekaar gekoppel is nie. Onderbreking van die stroombaan vir onderhoudswerk is dus ook baie kort.
- Meer ekonomies: Die hele stroom wat deur die kragbron opgewek word, vloei deur al die elektrodes. Energieverliese in elektriese stelsels neem toe met verhogings in stroom en spanning. Omdat die bipolêre sel by laer strome bedryf kan word, kan 'n kleiner kragbron en geleiers gebruik word en kan die stelsel meer ekonomies bedryf word as ander selrangskikkings. Die hoeveelheid yster wat opgelos word kan verhoog word terwyl die stroom wat deur die stelsel vloei nog dieselfde gehou word, deur slegs die aantal elektrodes in die sel te verhoog.

3.1.3 Stroom- en spanningsvereistes.

Ten einde te bepaal watter parameters 'n invloed op die stelsel het, is daar eers na die vergelykings waarmee stroom en spanning vir elektrolitiese stelsels teoreties bereken word, gekyk.

a) Spanningsvereiste. Die totale spanning benodig vir elektrolise in 'n bipolêre sel is, na aanleiding van Vgl's 1 tot 6, as volg:

$$V = N \cdot \{E_e + (n_a + |n_c|) + V_{ohm}\} \quad \dots(1)$$

met:

$$E_e = E_o - \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \ln \frac{[\text{reduseermiddel}]}{[\text{oksideermiddel}]} \quad \dots(2)$$

$$n = a + b \cdot \log i \quad \left(i = \frac{I}{A}\right) \quad \dots(3 \text{ en } 4)$$

$$V_{ohm} = \frac{i \cdot d}{K} \quad \text{sonder gasvorming} \quad \text{en} \quad \dots(5)$$

$$V_{ohm} = \frac{i_y \cdot d}{K} \left\{1 + \frac{R \cdot T}{Q \cdot p \cdot F} \left(\frac{1}{z_a} + \frac{1}{z_c}\right)\right\}^{3/2} \cdot B \left(\int_0^L i_y \cdot dy - \int_0^Y i_y \cdot dy \right) \\ \text{met gasvorming} \quad \dots(6)$$

Weens die lompheid van Vgl (6) word V_{ohm} vir alle praktiese doeleindes volgens Vgl (5) bereken, wat bevredigende antwoorde gee (Paul, 1987). Die totale selspanning soos gegee in Vgl (1) word in die praktyk hoofsaaklik deur V_{ohm} beïnvloed, met n_a en n_c wat slegs 'n klein deel tot die spanning bydra. So ook is E_e veral van die konsentrasie van die oksideer- en reduseermiddel afhanklik en is weglaatbaar klein in die gebied waarby die sel bedryf word. Vanaf Vgl's (2) en (3) kan gesien word dat die enigste paramaters wat eintlik 'n invloed op die effektiwiteit van die stelsel het, die volgende is:

- Stroomdigtheid, i. Hierdie parameter kom in beide Vgl's, (2) en (3), voor en het 'n aansienlike invloed op die totale spanning en energieverbruik per gram metaal opgelos.

- Afstand tussen plate, d, en die spesifieke geleiding, K. V_{ohm} , soos bereken deur Vgl (3), lewer die grootste bydrae tot die totale spanning in die stelsel en enige veranderlike in die vergelyking noodsaak dus nadere ondersoek. Die spesifieke geleiding van die elektroliet word in die praktyk bepaal deur die water wat deur die selle gestuur word, wat of kraanwater, of water van die prosesstroom in die geaktiveerde slykproses, sal wees. Om die geleiding daarvan kunsmatig te verhoog, sou addisionele toevoeging van 'n sout vereis waardeur die soutgehalte van die uitvloeisel sal verhoog. So 'n stap is onaanvaarbaar, omdat daar juis na elektrochemiese flokkulantproduksie gekyk word onder andere weens die feit dat die soutgehalte van die uitvloeisel nie verhoog word tydens die proses nie. Die invloed van die spesifieke geleiding van die elektroliet op die spanning oor die selle is dus nie verder ondersoek nie.

- Aantal en vorm van plate. Omdat die onderskeie komponente van die totale spanning vermenigvuldig word met die aantal selle, soos gesien kan word uit Vgl. (1), kan daar verwag word dat hierdie twee parameters 'n invloed op die effektiwiteit van die stelsel sal hê.

b) Stroomvereiste. Die stroom wat deur die selle gestuur moet word sal afhang van die hoeveelheid elektrodemateriaal wat in 'n spesifieke tyd moet oplos en word vir bipolêre selle gegee deur Vgl. (17):

$$I = \frac{w.z.F}{N.t.Mr} . f \quad \dots (17)$$

Aangesien die hoeveelheid elektrodemateriaal wat vir 'n bepaalde stroom sal oplos teoreties deur Faraday se "wet" bereken kan word, sal dit nuttig wees indien 'n verband gevind kan word tussen die teoretiese en werklike hoeveelheid metaal wat oplos. Hiervolgens sal die dosering dan maklik onder bedryfstoeestande ingestel kan word. Die verband tussen teoretiese- en werklike hoeveelheid metaal wat in oplossing gaan sal afhang van die effektiwiteit van die sel en moet daar dus 'n effektiwiteitsfaktor, f , vir die sel bepaal word. In die praktyk sal daar gepoog word om die effektiwiteitsfaktor so hoog as moontlik te kry om die energie per gram metaal opgelos so laag as moontlik te hou. Die enigste parameters in Vgl. (17) wat verander kan word en wat die praktiese werking van die stelsel sal beïnvloed is die aantal plate, N , en die stroom, I , wat deur die selle gestuur word. Hierdie twee parameters is egter weer onderling afhanklik van mekaar omdat dieselfde hoeveelheid metaal in 'n bepaalde tyd opgelos kan word deur bv. 'n hoë stroom deur min selle of 'n lae stroom deur baie selle te stuur. Watter van die twee opsies egter meer ekonomies is, moet eksperimenteel bepaal word.

3.1.4 Eksperimentele ondersoeke

Samevattend kan gesê word dat daar tydens die laboratoriumondersoek na veral twee aspekte van elektrolitiese flokkulantproduksie gekyk sal word, naamlik:

a) Karakteristieke van die elektrolitiese sel. Uit die vorige bespreking vir stroom- en spanningsvereistes kan gesien word dat die energieverbruik vir bipolêre selle hoofsaaklik afhang van die stroom wat deur die selle vloei, aantal selle in die sisteem en die effektiwiteitsgraad wat met die stelsel behaal kan word.

Ten einde 'n stelsel te ontwikkel wat prakties aangewend kan word in 'n loodsaanleg is daar tydens die laboratoriumstudie na die invloed wat die volgende faktore op die selsisteem uitoefen, veral ten opsigte van die kragverbruik (of energieverbruik), gekyk:

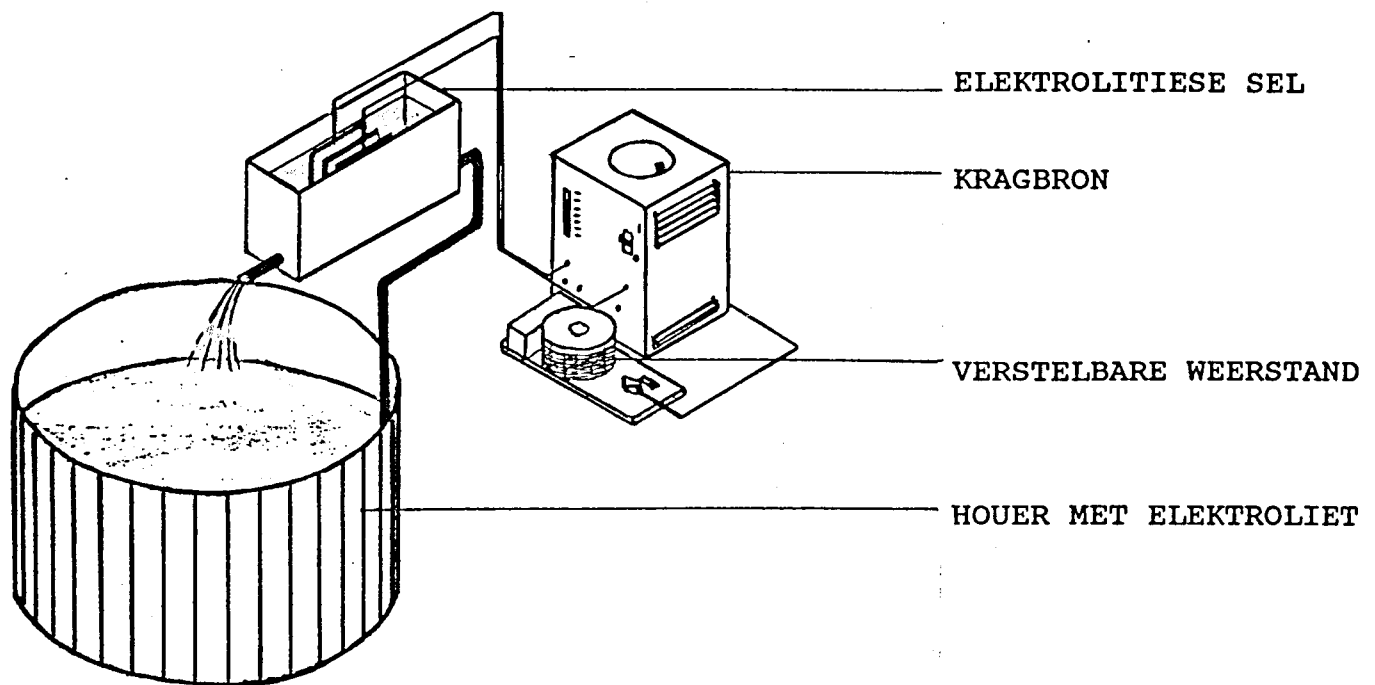
- hoeveelheid metaal opgelos by verskillende stroomdigthede (EKSPERIMENT 1),
- afstand tussen die plate (EKSPERIMENT 2),
- aantal plate (EKSPERIMENT 3),
- area van die elektrode (EKSPERIMENT 4), en
- verband tussen werklike- en teoretiese energieverbruik wat die bepaling van 'n effektiwiteitsfaktor, f , insluit.

b) Vlokeienskappe. 'n Probleem by biologiese suiweringswerke is dat die biomassa telkens nie in staat is om tydens piek ladings (van bv. CSB, TKN of fosfaat) 'n uitvloeiselkwaliteit te lewer wat voldoen aan die neergelegde standarde nie (Murray, 1987). Indien dit slegs nodig sou wees om vir hierdie periode yster te doseer, sou die suiweringsproses baie beter geoptimiseer kon word. Omdat die prys van elektrisiteit egter gedurende 'n 24 uur periode wissel (duurder tydens spitsverbruiktye), is dit miskien wenslik om die yster metaal met "goedkoop" elektrisiteit (buite spitsverbruik) op te los, die gevormde vlokke te stoor en dié dan te gebruik tydens spitsverbruiktye. 'n Ander vraag is, of dit nie goedkoper sal wees om Fe^{2+} - in plaas van Fe^{3+} -vlokke te produseer nie. Fe^{2+} -vlokke kan maklik geproduseer word deur slegs die toestande in die elektrolitiese sel anaerobies te hou. Hierdie twee aspekte is in EKSPERIMENTE 5 en 6 onderskeidelik ondersoek, nl:

- vlokouderdom (EKSPERIMENT 5), en
- toestande (aerobiese/anaerobiese toestande) in die selle (EKSPERIMENT 6).

3.2 Eksperimentele apparaat

EKSPERIMENTE 1 tot 6 is almal met dieselfde apparaat en nagenoeg dieselfde eksperimentele opstelling gedoen met enkele klein veranderings, afhangende van die parameter wat ondersoek is. FIGUUR 8 gee 'n skematiese voorstelling van die eksperimentele opstelling.



FIGUUR 8: Skematiese voorstelling van eksperimentele opstelling

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

- Kragbron. 'n Wisselstroom/gelykstroom sweismasjien (Miller Thunderbolt AC/DC, All Power (North)(PTY)LTD, Pretoria) is as transformator en gelykrichter gebruik om die nodige krag te voorsien. Die transformator se stroombereik is tussen 20 en 150 A met 'n maksimum oop stroombaanspanning van 72 V.
- Verstelbare weerstand. 'n Powerstat Variable Autotransformer, (Powerstat, Bristol (VK)) is gebruik as verstelbare weerstand. Die maksimum stroom in die elektrolitiese selle wat met hierdie weerstand in die stroombaan verkry kon word was 5 A.
- Hersirkulasiepomp. Die water wat geflokkuleer sou word, is met behulp van 'n dompelpomp (Little Giant 5-M SP,

Tecumseh Produkts Company, Oklahoma (VSA)) van die houer na die elektrolitiese selle gepomp.

- Multimeter. Die stroom, spanning en weerstand is gemeet met 'n Fluke 8050A digitale multimeter (Philtron, Pretoria).
- Geleidingsmeter. 'n Dionic Series 3 geleidingsmeter (Evershed and Vignoles LTD, London (VK)) is gebruik om elektriese geleiding van die oplossings te meet.
- pH Meter. 'n Schott CG 837 elektroniese pH-meter is gebruik om die temperatuur en pH van die elektroliet te bepaal.
- Weegskaal. Elektrodeplate is met 'n elektroniese skaal (Oertling OB152) geweeg.
- Elektrodemateriaal. Kommersieël beskikbare sagtestaal=plate, 3 mm dik, is as elektrodemateriaal gebruik. Afmetings van die plate was 200 mm x 200 mm, behalwe waar eksperimente met verskillende lengte-tot-breedteverhoudings gedoen is (sien TABEL 1).
- Reaktore. 'n Oop deurskynende plastiek ("Perspex") houer met afmetings 600 mm x 160 mm x 400 mm is gebruik om die elektrodeplate onder aerobiese toestande te huisves, terwyl anaerobe toestande verkry is deur die houer met 'n deksel af te sluit.

3.3 Karakteristieke van die elektrolitiese sel

Alhoewel die effektiwiteit van 'n elektrolitiese stelsel in 'n groot mate afhang van die karakteristieke van die elektriese apparaat (bv. weerstand, dikte van geleiers wat gebruik word, ens.), word dit tog beïnvloed deur verskeie parameters van die sel self. In hierdie afdeling sal daar na verskillende parameters

gekyk word ten einde 'n "gevoel" te kry hoe die seleffektiwiteit daardeur beïnvloed word.

3.3.1 Eksperimentele metodes en verwerking van data

Die volgende prosedures is gevolg:

a) Kwantifisering van massa flokkulant geproduseer. Die kwantifisering van geproduseerde flokkulante is gedoen deur die massaverlies van die elektrodes te bepaal. Ten einde herhaalbare resultate te kon behaal is die elektrodes as volg voor- en na elke eksperiment behandel:

- Die elektrodeplate is in gekonsentreerde soutsuur geëts en met 'n staalborsel skoongeborsel om alle walsskaal en roes van die oppervlakte te verwyder. FOTO 1 toon hoe 'n skoon plaat daar uitsien.
- Die plate is daarna met asetoon ontvet en vir 'n uur lank in 'n oond by 105°C gedroog.
- Nadat die plate in 'n dessikator tot kamertemperatuur afgekoel het, is die massa daarvan noukeurig bepaal.
- Die plate is in die reaktor geplaas met spasieëring tussen die plate soos in TABEL 1 aangetoon.
- Kraanwater, waarvan die geleiding tot 100 mS/m met NaCl verhoog is, is deur die elektriese sel as elektroliet gesirkuleer.
- Tensy anders vermeld, was die reaksietyd twee uur.
- Die elektrodes is met 'n plastiekborsel en kraanwater skoongemaak en daarna vir 'n uur lank by 105°C in 'n oond gedroog, afgekoel en die massa daarvan bepaal.

- Waar anaerobiese toestande verlang is (EKSPERIMENT 6) is die elektrodes in 'n houer geplaas wat lugdig afgesluit was en waar die plate net-net ingepas het. Wanneer die proses aan die gang gesit is, is anaerobe toestande feitlik onmiddellik verkry deurdat waterstof vrygestel word by die katode, wat alle opgeloste suurstof uit die water verplaas en verseker dat Fe^{2+} gevorm word. Die elektrodeplate vertoon blou-swart onder hierdie toestande (FOTO 2).

b) Statistiese verwerking van data. Alle data is statisties verwerk met behulp van die Sharp PC-1403 Pocket Computer se standaard dataverwerkingsprogram. Grafieke is gestip met behulp van 'n "Harvard Graphics" program.

c) Meet en berekening van energieverbruik. Die energie wat benodig word vir elektrolitiese flokkulantproduksie is uitgedruk as energieverbruik (W.h/g) of drywing (kVA/g) per gram yster opgelos. Die flokkulantproduksietempo is uitgedruk as mg Fe opgelos per kVA gebruik.

d) Bepaling van die seleffektiwiteit. Om die effektiwiteit van die selle te kry, is die massa yster, w_t , wat teoreties (volgens Faraday se "wet") moet oplos vir 'n bepaalde stroomsterkte en tydsduur van aanwending vergelyk met die massa yster, w_p , wat werklik opgelos het tydens die eksperiment. Die effektiwiteitsfaktor, f , is dus w_p/w_t . In die berekening vir die massa yster teoreties opgelos is aanvaar dat yster in die ferro-vorm (Fe^{2+}) in oplossing gaan. Hierdie aanname is gemaak op grond van die volgende:

- Volgens die redoksreaksies vir die vorming van ysterhidroksiedvlokke word 'n potensiaalverskil (E_{sel}) van -0,39 V benodig om $\text{Fe}(\text{OH})_2$ te produseer (Vgl 14), terwyl -2,29 V vereis word om $\text{Fe}(\text{OH})_3$ te vorm (Vgl 15). Fe sal dus as Fe^{2+} in oplossing gaan voordat Fe^{3+} gevorm word. By al die eksperimente wat by lae stroomdigthede ($<50 \text{ A/m}^2$) gedoen is,

was die potensiaalverskil oor enige twee plate kleiner as 2,29 V.

- Die plate vertoon blou-swart op die oppervlakte onder die rooi-bruin oksiedlaag (sien FOTO 3 bo, waar die oksiedlaag afgeborsel is), wat dui op Fe^{2+} -vorming tydens elektrolise.

- Johannes (1989) vergelyk die hoeveelheid metaal wat oplos vir 'n spesifieke stroom en tydsduur met die hoeveelheid wat teoreties moet oplos volgens Faraday se "wet" en vind dat die eksperimentele hoeveelheid ooreenstem met die teoretiese hoeveelheid metaal slegs indien Fe^{2+} gevorm word.

e) Parameters wat ondersoek is. TABEL 1 toon die parameters wat gedurende EKSPERIMENTE 1 tot 4 verander/konstant gehou is.

TABEL 1: Parameters geëvalueer tydens die laboratoriumondersoek

EKS= PERI= MENT	PARAMETER ONDERSOEK	STROOM= DIGTH, i (A/m^2)	AANTAL PLATE (N+1)	SPASIE= RING (mm)	LENGTE TOT BREEDTE
1	Stroomdigtheid	15-300	5	9	1
2	Plaatspas.	20-300	5	5,9,15,20	1
3	Aantal plate	20-70	3,5,7,9	9	1
4	Elektrode-area	20-300	5	9	1,1.5,3

f) Adsorpsie van fosfaat aan ysterhidroksiedvlokke. Die ysterhidroksiedvlokke is geproduseer soos in a) beskryf en die volgende prosedure gevolg:

- Twee 20 l houers is gevul met ysterhidroksiedvlokke sodat die konsentrasie in die water 20mg/l (as Fe) was.

- In die eerste houer is 'n fosfaatoplossing bygevoeg sodat 'n konsentrasie van 10mg/l $\text{PO}_4\text{-P}$ in die water gekry word.

- Die houer is vir 3 minute vinnig (ongeveer 90 o.p.m.) geroer en daarna vir 8 minute stadig geroer (ongeveer 40 o.p.m.). Die roerder is dan by sy laagste spoed (ongeveer 10 o.p.m.) vir die res van die eksperiment laat loop.
- 'n Monster is geneem (wat as tyd 0 genoteer is), 1 uur laat staan sodat die vlokke kon afsak, gefiltreer deur 'n Whatman No. 1 filtreerpapier en die fosfaatkonsentrasie daarvan bepaal (Standard Methods, 1983).
- Verdere monsters is dan na 6, 12, 24, 48 en 96 uur geneem en die fosfaatkonsentrasie in die filtraat bepaal soos hierbo beskryf.
- Dieselfde prosedure is vir die tweede houer gevolg, behalwe dat die ysterhidroksiedvlokke eers een dag (24 uur) laat staan is voordat die fosfaatoplossing bygevoeg is.
- Die eksperimentele data is gestip as mg P geadsorbeer per mg Fe teenoor die kontaktyd op 'n logaritmiese skaal, vir vars sowel as een dag oue presipitaat.

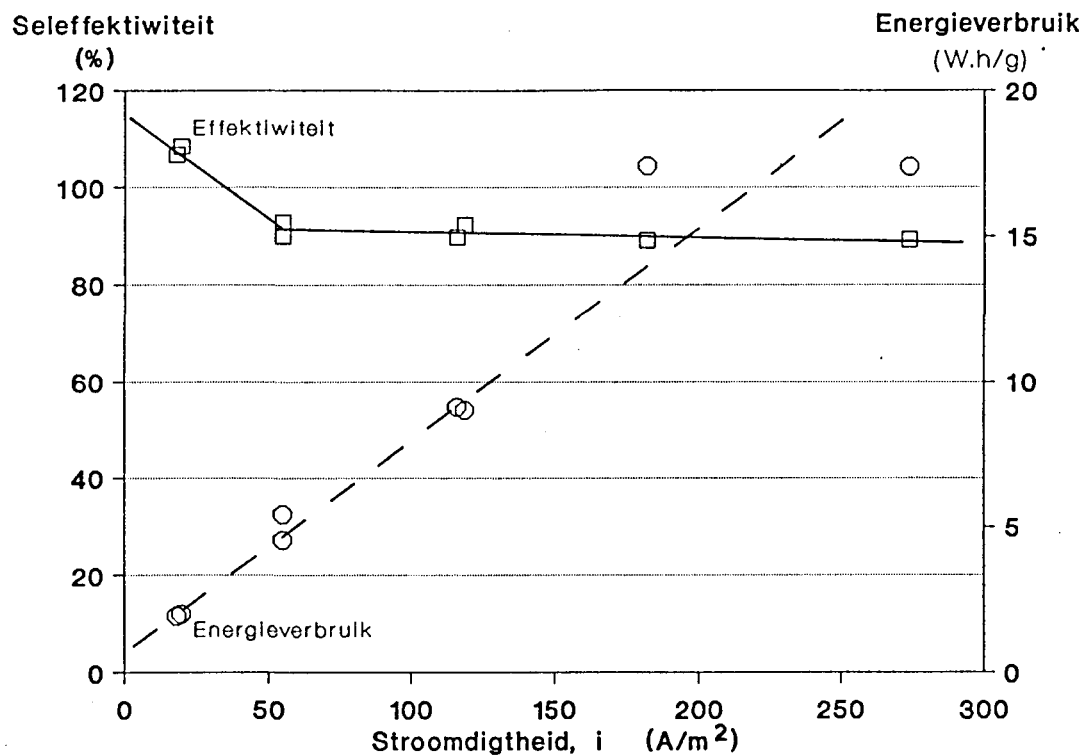
3.3.2 Resultate en gevolgtrekkings

Die volgende resultate is met die onderskeie eksperimente verkry:

a) EKSPERIMENT 1: Hoeveelheid metaal opgelos by verskillende stroomdigthede. FIGUUR 9 toon grafies stroomdigtheid, i, teenoor seleffektiwiteit op die linkerkantste- en energieverbruik op die regterkantste vertikale-as. Vanaf FIGUUR 9 kan die volgende afgelei word:

- Effektiwiteit van die sel. Die seleffektiwiteit toon aanvanklik 'n skerp afname met toenemende stroomdigtheid van ongeveer 115% na 90% (by 55 A/m²). Met 'n verdere verhoging in stroomdigtheid vind daar slegs 'n geleidelike daling in effektiwiteit plaas. Die hoeveelheid metaal wat oplos is

gelyk aan dië hoeveelheid soos bereken volgens Faraday se "wet" by 35 A/m^2 . By laer stroomdigthede word daar dus effektiwiteite van oor 100% behaal.



FIGUUR 9: Invloed van stroomdigtheid op die effektiwiteit van 'n elektrolitiese sel

Hierdie bevinding kan nie verklaar word in terme van onreinhede in die metaal nie. Die sagtestaalplate, wat as elektrodes gebruik is, bevat, behalwe yster, slegs ongeveer 0,1% koolstof. 'n Moontlike verklaring sou wees dat daar, by lae stroomsterktes ($<35 \text{ A/m}^2$), nie 'n uniforme stroomveld oor die plate gevestig word nie en addisionele pitkorrosie verkry word. Die oppervlakte van die plate vertoon ook skurf na 'n toetslopie, met 'n patroon soortgelyk aan dië van ystervysels wat in 'n magneetveld gestrooi word. By hoër stroomdigthede (bv. 100 A/m^2) kon hierdie patroon nie meer waargeneem word nie. Dië aspek vereis egter nog verdere eksperimentele ondersoek.

Die verband tussen stroomdigtheid en persentasie effektiwiteit wat gebruik kan word vir stroomdigthede hoër as 55 A/m^2 met hierdie spesifieke opstelling ($d=9\text{mm}$, $N=4$, $\text{Area}=0,0396\text{m}^2$) word gegee deur die vergelyking:

$$f = -0,01.i + 91,2 \quad \dots(18)$$

waar:

f = effektiwiteitsfaktor van die spesifieke sel (%)

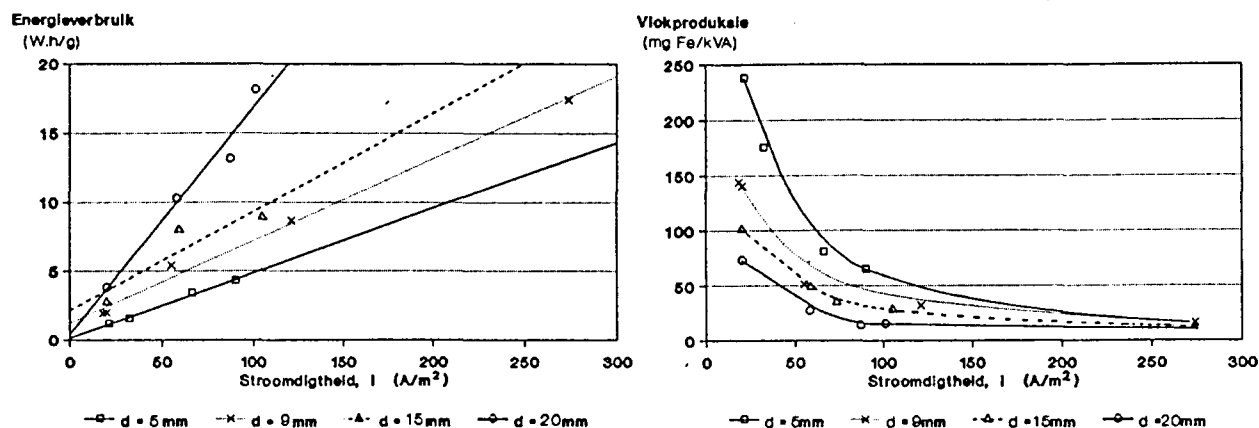
i = stroomsterkte (A/m^2) [$i \geq 55 \text{ A/m}^2$]

- Energieverbruik per gram yster opgelos. 'n Goeie reglynige verband is gekry tussen die stroomdigtheid, i (A/m^2), en energieverbruik per gram yster opgelos, E_w (W.h/g), wat gegee kan word deur die vergelyking:

$$E_w = 0,0761.i + 0,5 \quad \dots(19)$$

Daarvolgens neem die energieverbruik per gram yster opgelos toe met toenemende stroomdigtheid. Dit kan verklaar word in terme van groter verliese wat by hoër strome voorkom as gevolg van werwel- of dwaalstrome. In plaas daarvan dat die stroom deur elke elektrodeplaat gaan, word dit deur die elektroliet na die buitenste elektrodes "gedra". Van die elektrone wat deur die kragbron gelewer word en by die katode vrygestel word, word deur die elektroliet dadelik na die anode "gedra", sonder dat hulle aan 'n elektrochemiese reaksie deelneem. Johannes (1989) het soortgelyke verliese teëgekom maar kon geen verklaring daarvoor gee nie. Hy vind egter dat afskerming van die plate die effektiwiteit aansienlik verbeter het.

b) EKSPERIMENT 2: Afstand tussen die plate. Die resultate wat tydens hierdie eksperiment gekry is, is verwerk en word getoon op FIGUUR 10.



a) Energieverbruik

b) Produkstietempo

FIGUUR 10: Kragverbruik om yster op te los by verskillende plaat=spasiërings

Goeie korrelasies is gekry tussen stroomdigtheid (A/m^2) en energieverbruik (W.h/g Fe) vir die onderskeie plaatspasiërings (FIGUUR 10a). Die laagste korrelasiekoëffisient was 0.98 by 'n plaatspasiëring van 15mm. Vanaf hierdie grafiek kan verder afgelei word dat:

- die energieverbruik per gram yster opgelos toeneem by hoër stroomdigthede, ongeag die plaatspasieëring. Hierdie resultaat bevestig 'n soortgelyke waarneming wat met die vorige eksperiment behaal is.
- die energieverbruik per gram yster opgelos by 'n bepaalde stroomdigtheid afneem soos die plaatspasiëring afneem. Hierdie waarneming kan ook toegeskryf word aan dwaalstrome.

Met klein spasiërings is die kanse vir 'n ioon om deur die elektroliet na 'n ander plaat as die een naaste aan homself gedra te word baie geringer as met groot spasiërings.

- Die energieverbruik per gram yster opgelos baie meer toeneem as die plaatspasiëring vanaf 15mm na 20mm verhoog word, in vergelyking met 'n verhoging vanaf 5mm na 9mm en 9mm na 15mm. Dit kan in terme van dwaalstrome verklaar word wat toeneem hoe verder die plate vanmekaar geplaas word.

In FIGUUR 10b kan gesien word dat die hoeveelheid yster wat oplos per kVA vinnig daal met verhoging in stroomdigtheid vir die onderskeie plaatspasiërings tot ongeveer 50 A/m^2 waarna die kurwes begin afplat tot by 100 A/m^2 . Vir stroomdigthede groter as 100 A/m^2 is slegs 'n geleidelike afname in yster wat oplos per kVA. Dit lyk verder asof alle kurwes na 'n minimum vlokproduksie per kVA neig, ongeag die afstand tussen die plate of stroomdigtheid. Hierdie minimum was vir die eksperimentele opstelling ongeveer by 15mg yster wat oplos per kVA (sien FIGUUR 10b). So 'n afleiding is van groot waarde vir ontwerpdoeleindes omdat daaruit die maksimum krag benodig om 'n sekere hoeveelheid metaal elektrolieties op te los, bepaal kan word.

Die goeie korrelasies wat in FIGUUR 10a verkry is en enerses tendense wat die kurwes in FIGUUR 10b getoon het dui op 'n verband tussen energieverbruik per gram metaal opgelos per mm plaatspasiëring en stroomdigtheid, wat in FIGUUR 11 gestip is. Hiervan kan afgelei word dat:

- Datapunte vir stroomdigthede tot ongeveer 100 A/m^2 'n reguitlyn pas wat gegee word deur die vergelyking

$$E_d = 0,0076.i + 0,05 \quad \dots (20)$$

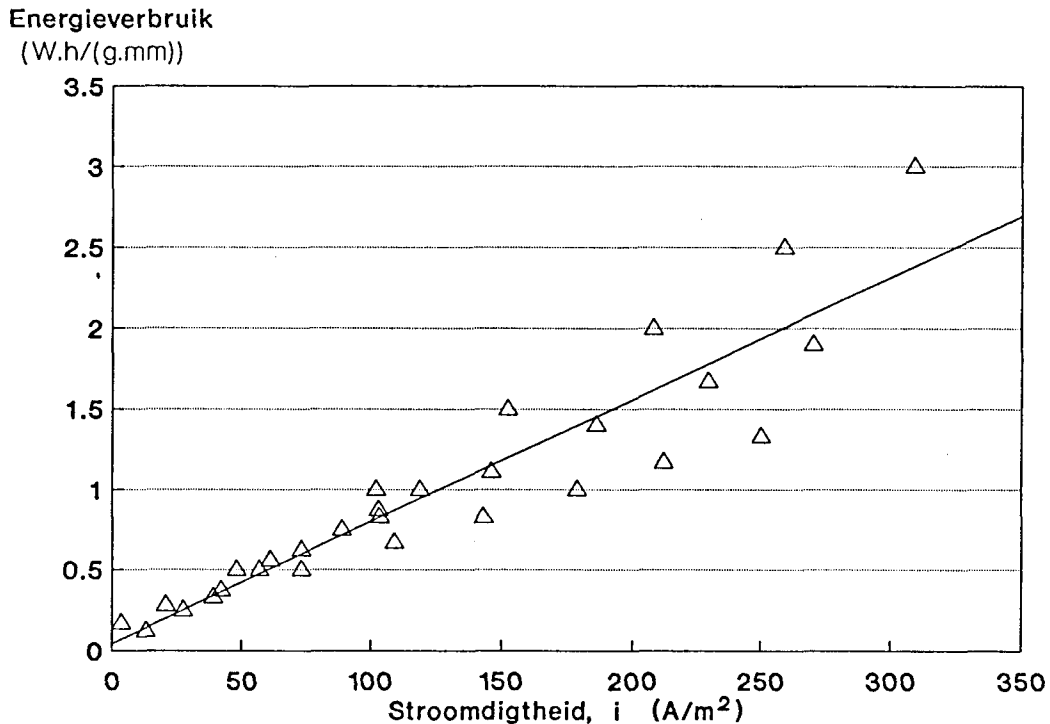
waar:

E_d = Energieverbruik per gram yster opgelos per mm plaat=

spasiëring (W.h/g.mm)

- By hoër stroomdigthede raak die datapunte verspreid, waarskynlik omdat verliese toeneem soos die stroom in die sel verhoog word.

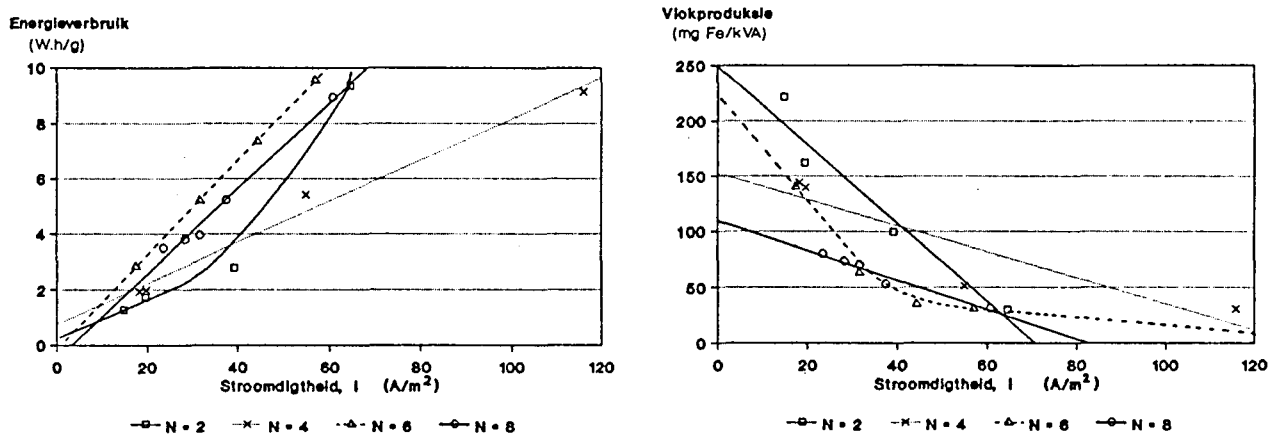
- Hieruit kan, vir ontwerpdoeleindes, bepaal word wat die maksimum afstand tussen die plate mag wees by 'n bepaalde stroomdigtheid indien slegs 'n beperkte hoeveelheid energie beskikbaar sou wees. Dit kan ook gebruik word om 'n optimum plaatspasiëring te kies.



FIGUUR 11: Verband tussen energieverbruik per mm plaatspasiëring en stroomdigtheid

c) EKSPERIMENT 3: Aantal plate. Resultate wat met hierdie eksperiment verkry is, word grafies in FIGUUR 12 getoon. Oor die

algemeen is swak korrelasies vir die data met hierdie eksperiment behaal met uitsondering van stroomdigtheid teenoor energieverbruik (FIGUUR 12a) waar daar met sewe plate (N=6) geëksperimenteer is en produksietempo teenoor stroomdigtheid FIGUUR 12b vir nege plate (N=8).



a) Energieverbruik

b) Produksietempo

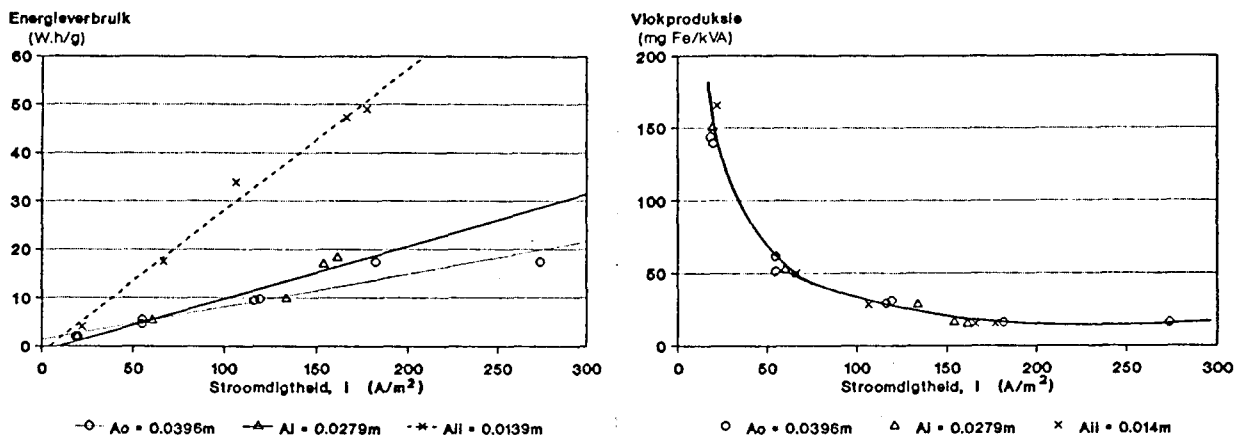
FIGUUR 12: Invloed van die hoeveelheid plate (selle) op die energieverbruik by verskillende stroomdigthede

Die volgende afleidings kan nogtans gemaak word:

- Vir 'n selsisteem met 'n bepaalde aantal selle neem die energieverbruik per gram yster opgelos toe met toenemende stroomdigthede, wat strook met vorige bevindinge (sien EKSPERIMENTE 1 en 2).
- Behalwe waar daar met drie plate geëksperimenteer is, kan daar tog 'n reglynige verband tussen energieverbruik per gram yster opgelos en stroomdigtheid (FIGUUR 12a) opgemerk word.

d) EKSPERIMENT 4: Area van die plate. FIGUUR 13 is 'n grafiese daarstelling van data wat verkry is toe die oppervlakarea van die elektrodes gewissel is, deur die lengte-tot-breedteverhouding (L/B) van die plate te wissel. Die L/B -verhouding is as volg verander:

- vierkantige plate ($L/B=1$), $A_o = 0,0396\text{m}^2$;
- $L/B=1,5$, $A_i = 0,0279\text{m}^2$;
- $L/B=3$, $A_{ii} = 0,0139\text{m}^2$.



a) Kragverbruik

b) Produkstietempo

FIGUUR 13: Energieverbruik per gram yster opgelos by verskillende lengte-tot-breedteverhoudings

Vanaf FIGUUR 13a) kan afgelei word dat:

- die elektriese krag wat benodig word per gram yster opgelos laer is vir vierkantige plate,
- hoe groter die area van die plate, hoe laer is die elektriese krag wat verskaf moet word om 'n gram yster op te los, en

- die elektriese krag nodig nie verband hou met die plaatgrootte nie, m.a.w. daar sal nie dubbeld soveel krag nodig word indien die plaatoppervlak verdubbel word nie.

Op FIGUUR 13b) is die hoeveelheid yster wat oplos per kVA teenoor stroomdigtheid gestip vir die onderskeie plaatgroottes (L:B-verhoudings). Daaruit kan afgelei word dat:

- by lae stroomdigthede ($<100\text{A/m}^2$) meer metaal opgelos word per kVA as by hoë stroomdigthede. 'n Logaritmiese afname in hoeveelheid metaal wat oplos teenoor stroomdigtheid word gekry, wat gegee word deur die vergelyking

$$W_p = 148 \cdot \log i + 340 \quad \dots(21)$$

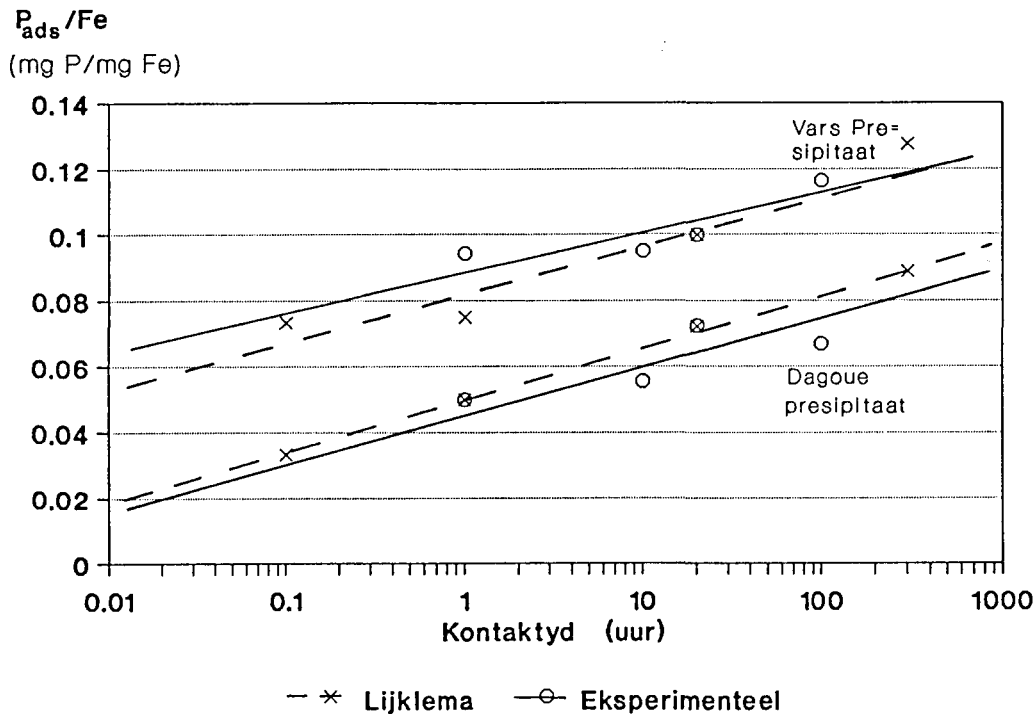
- ook hier 'n minimum hoeveelheid metaal gekry word wat oplos per kVA aangewend, analoog aan die bevindinge in EKSPERIMENT 2 (sien FIGUUR 10b). Die minimum hoeveelheid was 15mg yster per kVA vir die eksperimentele opstelling, wat dieselfde is as verkry in EKSPERIMENT 2 met die verskillende plaatspasiërings.

e) EKSPERIMENT 5: Vlokkouderdome. Op FIGUUR 14 word aangetoon hoe die adsorbsievermoë van yster om fosfaat te adsorbeer na 24 uur afgeneem het. Die resultate wat Lijklema (1980) met 'n soortgelyke eksperiment behaal het word op dieselfde grafiek as stippellyne getoon. Vanaf FIGUUR 14 kan gesien word dat:

- alhoewel fosfaatadsorbsie met 'n dagoue ysterhidroksied-presipitaat wel nog verkry word is dit heelwat swakker as met vars presipitaat, veral waar die kontaktyd kort was;
- hierdie eksperimentele waardes stem goed ooreen met die waardes soos verkry deur Lijklema (1980). Die afwyking tussen die skrywer en Lijklema se data wat met vars

presipitaat verkry is vir kort kontaktye (sien FIGUUR 14), kan verklaar word deur aanvanklike vermenging of agitاسie wat waarskynlik beter was met eersgenoemde se opstelling.

- meer fosfaat met verloop van tyd deur yster geabsorbeer word.

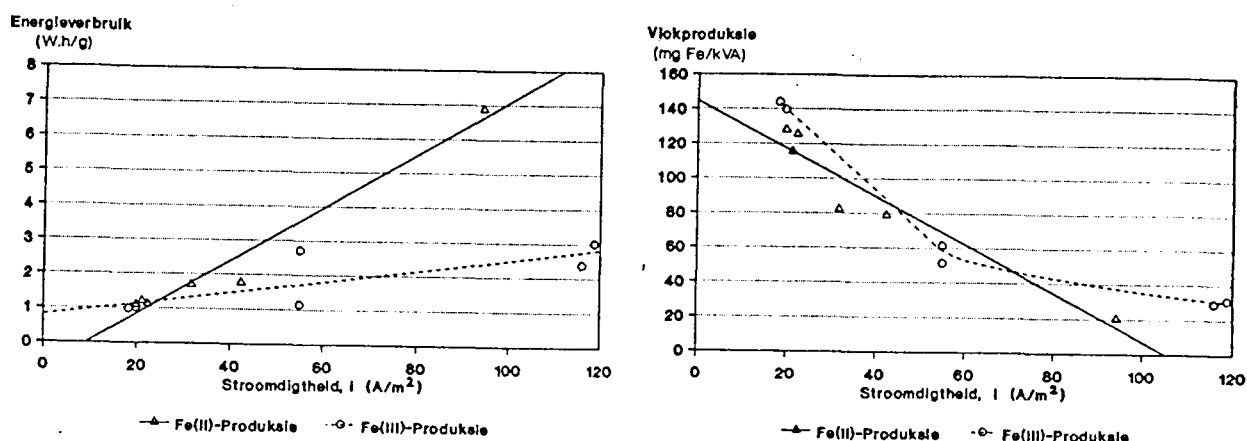


FIGUUR 14: Fosfaatadsorpsie deur vars en 24 uur oue yster(III)-hidroksiedvlokke

Hierdie eksperimentele resultate kan nie vir praktyktoepassing gebruik word om die hoeveelheid yster te bepaal wat bygevoeg moet word om 'n bepaalde hoeveelheid fosfaat uit rioolwater te verwyder nie, omdat verskeie ander faktore bydra tot fosfaatadsorpsie, waarvan pH die belangrikste enkele faktor is (sien FIGUUR 2). Ander faktore wat ook 'n rol speel is onder andere die aanvanklike

ortofosfaatkonsentrasie in die water, temperatuur, agitاسie en vermenging. Volgens Lötter (1989) word goeie chemiese fosfaatverwydering in rioolsuiweringswerke behaal met 'n massaverhouding Fe:P van 2:1, wat, volgens Lijklema (1980) se isotherm soos gestip op FIGUUR 3, slegs by baie lae pH's verkry sal word. Biologiese suiweringsprosesse sal egter nie by so 'n lae pH funksioneer nie en FIGUUR 14 moet dus nie gebruik word as 'n 'n kwantitatiewe aanduiding van fosfaatverwydering per milligram yster bygevoeg nie.

f) EKSPERIMENT 6: Toestande in die selreaktor. Na gelang toestande in die selreaktor aerobies of anaerobies gehou word, word yster(III)- of yster(II)-hidroksied onderskeidelik in die reaktor gevorm. Alhoewel daar algemeen gesê word dat yster(II) onder anaerobiese toestande gevorm word, terwyl yster(III) onder aerobiese toestande gevorm word is dit nie heeltemal waar nie. Yster gaan tydens elektrolise as Fe^{2+} (sien Vgl 14) in oplossing, maar onder aerobiese toestande vind oksidasie na Fe^{3+} (sien Vgl 15) feitlik oombliklik plaas, terwyl yster in die divalente vorm onder anaerobiese toestande bly. FIGUUR 15 toon die energie wat benodig word om Fe(II)- en Fe(III)hidroksiedvlokke te produseer.



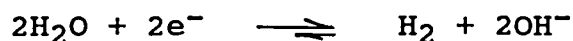
a) Energieverbruik

b) Produkstietempo

FIGUUR 15: Energieverbruik by aerobiese- en anaerobiese toestande in die elektrolitiese sel

Waarnemings en afleidings wat hieruit gemaak kan word is die volgende:

- terwyl toestande in die reaktor aerobies was, is daar rooibruin ferrihidroksiedvlokke verkry (sien FOTO 4);
- onder anaerobiese toestande het daar 'n donker, blou-groen vlok gevorm, wat 'n ferrohidroksiedvlok is (sien FOTO 4);
- die Fe(II)-vlokke word baie vinnig spontaan geoksideer na rooibruin Fe(III)-vlokke as dit met suurstof in aanraking kom (FOTO 5);
- die elektrodeplate waarop Fe(II)-vlokke gevorm het kon makliker skoongemaak word as die rooibruin neerslag op die plate waarop Fe(III)-vlokke gevorm het;
- die pH van die elektroliet het tydens anaerobiese toestande gestyg (by pH's van ongeveer 8 tot soveel as 0,55 eenhede) terwyl dit onder aerobiese toestande feitlik konstant gebly het. Tussen die plate is, onder anaerobiese toestande, pH's van tot so hoog as 10,85 gemeet. Dit bevestig die katodereaksie soos gegee in AFDELING 3.1.1, naamlik:



- energie benodig om Fe^{2+} te produseer is hoër as vir Fe^{3+} (FIGUUR 15a en 15b);
- beide grafieke in FIGUUR 15 toon weereens dat dit voordeliger is om by lae stroomdigthede te werk, omdat die energieverbruik per gram metaal opgelos dan laer is.

3.4 Bespreking en aanbevelings

Die laboratoriumondersoek het 'n goeie aanduiding gegee van probleme en faktore waarmee rekening gehou sal moet word tydens

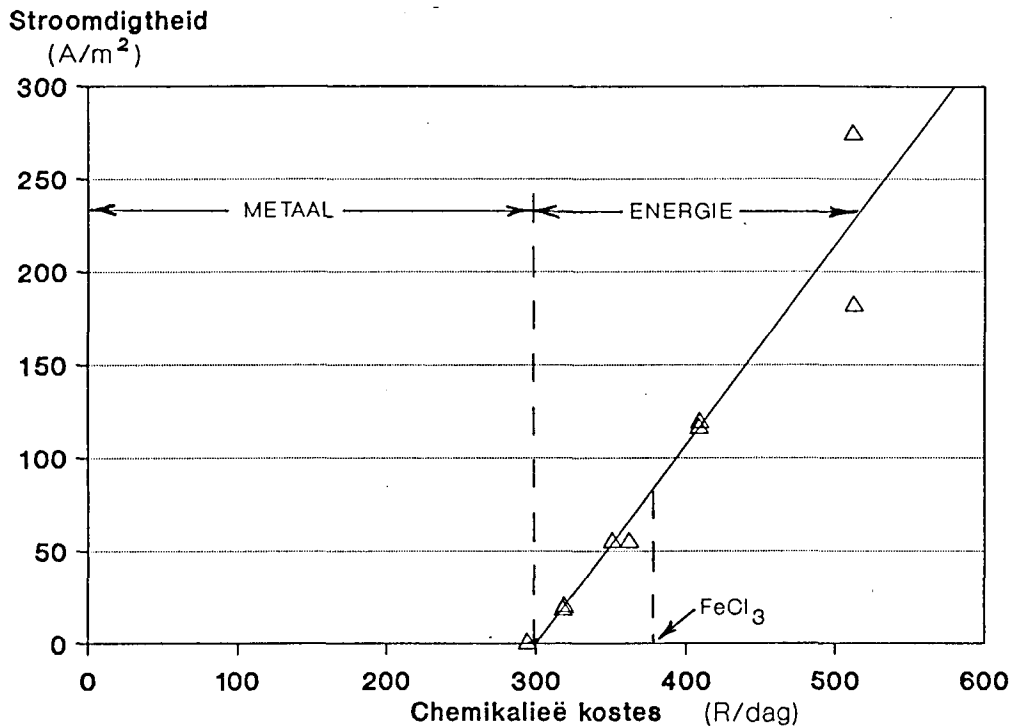
elektrolitiese koagulantproduksie. Eksperimentele resultate is saamgevat in TABEL 2.

TABEL 2: Opsomming van eksperimentele resultate

EKSPE- RIMENT	PARAMETER GEVARIEËR	VERWERKTE PARAMETER (gestip as)	SIMBOOL/ (eenhede)	GESTIP TEENoor	GETOON OP GRAFIEK	BEVINDING/VERBAND
1	Stroomdigtheid	% Effektiwiteit	f (%)	Stroomdigtheid	FIGUUR 10	$f = -0,01.i + 91,2$
		Energie-inset	Ew (W.h/g)	Stroomdigtheid	FIGUUR 10	$Ew = 0,0761.i + 0,5$
2	Plaatspasiering	Energie-inset per mm	Ed (W.h/g.mm)	Stroomdigtheid	FIGUUR 12	$Ed = 0,00761.i + 0,05$
3	Aantal plate	Energie-inset	Ew (W.h/g)	Stroomdigtheid	FIGUUR 13a	Geen duidelike verband nie
		Produksietempo	Wp (mgFe/kVA)	Stroomdigtheid	FIGUUR 13b	Geen duidelike verband nie
4	L:B-Verhouding (Plaatoppervl.)	Energie-inset	Ew (W.h/g)	Stroomdigtheid	FIGUUR 14a	Toename, nie proporsioneel
		Produksietempo	Wp (mgFe/kVA)	Stroomdigtheid	FIGUUR 14b	$Wp = 148.\log i + 340$

Die parameter wat seker die grootste rol speel ten opsigte van die effektiwiteit van die sel en wat duidelik na vore getree het in al die eksperimente was die stroomdigtheid. Daar is gevind dat, hoe laer die stroomdigtheid, hoe hoër is die effektiwiteit wat met die selsisteem behaal kan word. Vir ontwerpdoeleindes moet daar egter in gedagte gehou word dat die aantal plate toeneem met 'n afname in stroomdigtheid en die elektrolitiese selsisteem onprakties groot sal word as daar vir baie klein strome ontwerp word.

Alvorens 'n loodsaanleg in bedryf gestel word, sou dit interessant wees om te sien of die elektrolitiese proses ooit kostegewys kan kompeteer met chemiese dosering. Op FIGUUR 16 is die kostes om yster elektolities op te los teenoor stroomdigtheid gestip vir 'n hipotetiese aanleg van 10Ml/dag wat 'n dosering van 20mg/l (as Fe) moet handhaaf.



FIGUUR 16: Koagulantproduksiekostes by verskillende stroomdigthede vir 'n 10Ml/dag vloei en 10mg/l P invloeikonsentrasie

Vanaf hierdie figuur kan gesien word dat die elektrolitiese proses met gelyke doserings wél kan kompeteer met chemiese doserings. Die kostes is egter afhanklik van die stroomdigtheid waarby gewerk word en toon 'n gelykbreekpunt by ongeveer 88A/m². Vir ontwerpdoeleindes word aanbeveel dat daar by stroomdigthede tussen 35 en 100A/m² gewerk word. 35A/m² verteenwoordig 'n stroomdigtheid waarby ongeveer 100% van die metaal oplos (sien EKSPERIMENT 1) soos bereken met Faraday se "wet", terwyl die verliese by 'n stroomdigtheid bo 100 A/m² so groot word, dat daar nie meer met chemiese dosering (met FeCl₃) gekompeteer kan word nie.

Indien die ander voordele van elektrochemiese dosering bò chemiese dosering egter ook ekonomies oorweeg sou word, sou elektrochemiese dosering die beste opsie tussen die twee wees omdat:

- geen soute addisioneel by die water gevoeg word nie, en
- geen vernietiging van alkaliniteit, wat kalkdosering mag vereis, plaasvind nie.

EKSPERIMENT 5 het getoon dat yster(III)-hidroksiedvlokke wél gestoor kan word, maar dat 'n vars presipitaat beter fosfaatverwydering sal gee. Vir elke aanleg sal daar met sy bepaalde uitvloeisel eksperimenteel bepaal moet wat die fosfaatverwydering per massa yster bygevoeg is vir verskillende presipitaatouderdomme en dan bereken word of dit lonend sal wees om ysterhidroksiedvlokke te vervaardig met "goedkoop" elektrisiteit en dit dan te stoor. Die skrywer twyfel egter sterk dat dit sal loon, omdat elektrisiteit slegs 'n klein deel (ongeveer 10% - sien HOOFSTUK 6) van die totale produksiekostes vir elektrolitiese koagulantvervaardiging uitmaak.

In teenstelling met wat verwag word, is daar in EKSPERIMENT 6 gesien, dat die kragverbruik per gram yster opgelos hoër vir yster(II)- as vir yster(III)hidroksied-produksie is. Volgens elektrochemiese beginsels word Fe^{2+} voor Fe^{3+} gevorm omdat E_{sel} vir eersgenoemde redoksreaksie $-0,39\text{V}$ (sien AFDELING 4.2.1) is, terwyl daar vir die tweede reaksie om elektrolities te verloop $-2,29\text{V}$ (sien AFDELING 4.2.1) vereis word. Die energieverbruik per gram yster opgelos behoort dus hoër vir die produksie van yster(III)hidroksied te wees. Dat die omgekeerde die geval was, toon dat Fe^{3+} nie elektrolities nie maar slegs deur outo-oksidasie in teenwoordigheid van suurstof gevorm word. Die hoër energieverbruik om yster(II)-vlokke te vorm (soos verkry in FIGUUR 18) toon dus dat ander faktore die energieverbruik beïnvloed, wat niks te doen het met die ioon wat gevorm word as yster elektrolities oplos nie.

'n Faktor wat wél 'n rol speel by die energieverbruik is die konsentrasie van die ione wat gevorm word, soos gesien kan word uit die Nernst-vergelyking (Vgl 2) vir die redoksreaksie as yster(II) gevorm word (sien ook Vgl 14):

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{sel}} - \frac{R.T}{z.F} \ln [\text{Fe}^{2+}].[OH^{-}]^2$$

Omdat die hidroksielioonkonsentrasie gekwadreer word in bostaande vergelyking, sal die pH, baie meer as die Fe^{2+} -konsentrasie, die potensiaalverskil oor die plate (en dus ook die energieverbruik) beïnvloed. Vir bostaande vergelyking is gevind dat E_{tot} per sel nie beduidend (tot twee desimale) verander indien die Fe^{2+} -konsentrasie verhoog word van 5mg/l na 200mg/l nie, maar dat E_{sel} verhoog van 1,33V na 1,34V indien die pH verhoog word van 7 na 9. Onder aerobiese toestande bly die pH van die elektroliet tussen die plate ongeveer konstant omdat die auto-oksidasiereaksie vinnig plaasvind en die hidroksielione nie kans kry om op te hoop nie. Dieselfde geld egter nie tydens anaerobiese toestande nie en is daar gevind dat die pH van die elektroliet gedurende die eksperiment gestyg het (sien AFDELING 4.4.2) en hidroksielione tussen die plate ophoop sodat 'n hoë pH hier gekry word. Afhangend hoeveel plate die elektrolitiese selsisteem het, kan die toename in spanning (E_{sel}) beduidend word wat tot 'n hoër energieverbruik in die sel sal lei.

3.5 Gevolgtrekking

Inligting is tydens hierdie studie ingewin oor veral die faktore wat die seleffektiwiteit beïnvloed en 'n aanvoeling vir elektrolitiese koagulantproduksie kon verkry word.

Die toestande waaronder die eksperimente uitgevoer is was egter redelik kunsmatig. Kraanwater, waarvan die geleiding aangepas is, is byvoorbeeld as elektroliet gebruik. Op 'n werklike aanleg sal 'n prosesstroom, waarvan die samestelling veral t.o.v. totale opgeloste stowwe aansienlik verskil, as elektroliet gebruik word. In die volgende hoofstuk is gekyk hoe die elektrolitiese sel onder bedryfstoeistande in 'n geaktiveerdeslykaanleg funksioneer.

HOOFSTUK 4

DIE ELEKTROLITIESE SEL ONDER BEDRYFSTOESTANDE

4.1 Inleiding

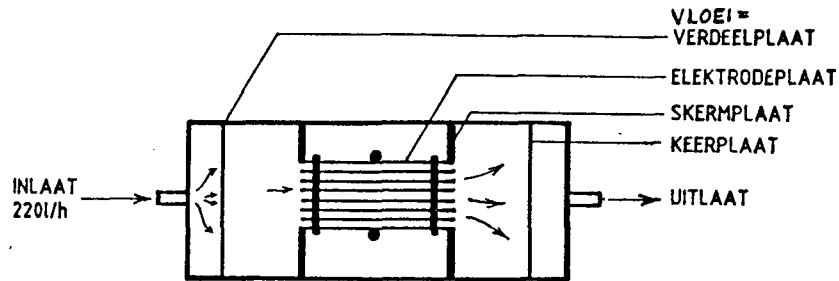
Aanvaarding van die elektrolitiese proses vir koagulantproduksie as alternatief tot chemiese dosering by geaktiveerde slykaanlegte sal, benewens die ekonomiese aspekte, ook baie daarvan afhang of ysterkoagulantproduksie met die elektrolitiese sel maklik en effektief opgestel, beheer en gekontroleer kan word. Terwyl navorsing op chemiese dosering al lank aan die gang is en die proses ook algemeen aangewend word, bestaan daar min inligting in die literatuur oor aanwending van elektrolitiese koagulantproduksie om munisipale uitvloeisels te suiwer. Navorsing wat wêl gedoen is, is slegs op laboratoriumskaal, meesal met aluminium as offerelektrode, gedoen met lotbehandelingsprosedures waar rou- of besinkte riool direk gebruik is en nie aanvullend tot geaktiveerdeslykprosesse nie. In hierdie studie moes daar dus van meet af begin word, net om 'n stelsel in werking te stel wat maklik bedryf en beheer kon word, alvorens daar probeer kon word om dit te optimiseer. Heelwat probleme is ondervind om 'n stelsel daar te stel wat kontinu bedryf kon word en kon daar nie veel tyd gespandeer word om die proses te optimiseer nie.

4.2 Selopstelling

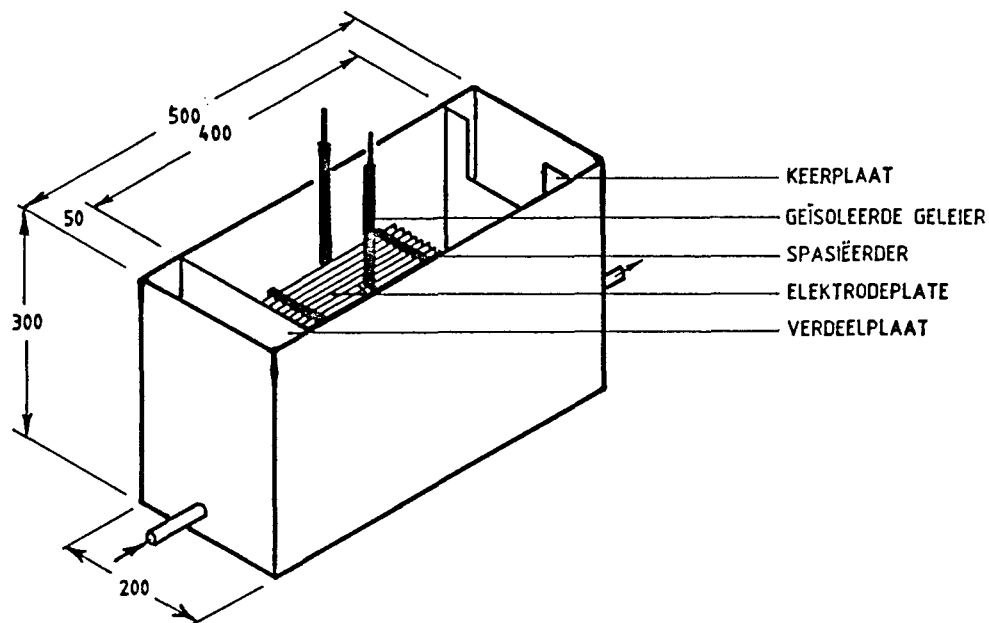
Ten einde 'n elektrolitiese sel op te bou wat maklik bedryf kon word, is die volgende rangskikkings ondersoek:

a) Horisontale vloei. 'n Reghoekige houer soos getoon in FIGUUR 17 is gebruik waarin die plate horisontaal laat staan is, ewewydig aan die vloeirigting. Die plate was dieselfde as gebruik tydens die laboratoriumondersoek, met afmetings 200mm x 200mm x 3mm. Water is konstant teen 220 l/uur deur die houer gepomp en vloei

oor die plate het gewissel tussen $0,010\text{m/s}$ (met vier elektrodeplate) en $0,004\text{m/s}$ (met nege plate).



a) Bo-aansig



b) Isometries

FIGUUR 17: Horisontale-vloei elektrode houer

Aanvanklik is geen vloei-verdeelplaat vir eweredige verspreiding by die inlaat geplaas nie en is gevind dat die buitenste plate vinnig aanpak omdat vloei oor dië plate te stadig is. FOTO's 6 en 7 toon

duidelik hoe die plate na slegs drie dae in bedryf aangepak het. By die katode word 'n wit neerslag (sien FOTO 6) gekry, wat as kalsiumkarbonaat geanaliseer is, terwyl daar op die anodeplaat rooibruin blasies (sien FOTO 7) gevorm het. Hierdie blasies is bros en, indien dit afgevee word, verskyn daar blink metaal waar die blasie gesit het, terwyl die res van die plaat blou-swart vertoon (FOTO 8). Op FOTO 8 kan ook gesien word hoe onegalig die plate weggevreet en pitkorrosie verkry word.

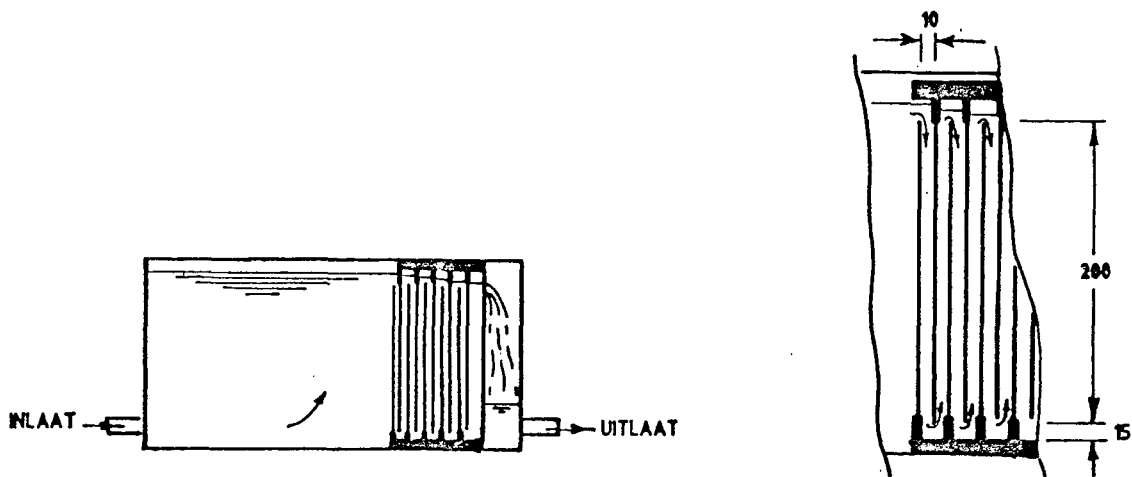
'n Vloeiverdeelplaat ("diffusion wall") om die invloei egalig te versprei is geïnstalleer en pitkorrosie het drasties verminder, alhoewel dit nie heeltemal gestop kon word nie. Probleme is egter nog ondervind met ysterhidroksiedvlokke wat nie vinnig genoeg weggeneem word nie. Veral voor die agterste oorvloeikeerplaat ("overflow baffle") en tussen die plate het vlokke afgesak en aanhegting van die vlokke aan die plate het algemeen voorgekom. 'n Verhoging in vloeitempo van die elektroliet oor die plate het hierdie probleme verminder, maar alle stagnante areas kon nie uitgeskakel word nie en aanhegting van vlokke aan die plate het nog algemeen voorgekom. Die plate moes eenmaal per dag skoongemaak word.

Tydens pitkorrosie en ook met vlokopbouing in die reaktor is daar gevind dat die stroomsterkte geleidelik toeneem indien die elektrodeplate nie skoongemaak word nie. Binne drie dae het die stroom byvoorbeeld van 1,2A tot 5A (die hoogste wat die elektrolietiese stroombaan kon hanteer voordat die sekering deurgebrand het) gestyg. Die spanning oor die sel het nagenoeg konstant gebly gedurende hierdie tyd. Foster et al. (1985), wat navorsing op seewater ontsouting deur middel van elektrodialise gedoen het, het 'n soortgelyke waarneming gemaak met kalsium- en magnesiumsoute en hulle verklaar dit in terme van die effektiwe elektrode area wat afneem. Met veral magnesiumhidroksied, wat 'n taai ("sticky") presipitaat vorm, het hulle gevind dat die vlokke aan die elektrodes vasheg en daardeur die effektiwe elektrodearea verminder. Omdat die stroom deur die sel egter konstant bly, moet

die stroomdigtheid (stroom per eenheid area) in 'n bepaalde gebied van die plaat toeneem en ontstaan daar 'n onegalige stroomverspreiding oor die plaat. Areas met hoë stroomdigthede ontstaan op die plate wat hulle "current hot spots" noem en wat lei tot faling van die elektrode. In die eksperimentele opstelling het hierdie "current hot spots" gelei tot 'n algehele toename in stroom van die elektrolitiese stroombaan tot ongeveer 5A, waar die sekering dan gesmelt het.

Die elektrodeplate wat vars uit die elektrolitiese sel gehaal is, vertoon blou-swart (sien FOTO 3) waar die bros rooi-bruin neerslag afgeborsel is en geen pitkorrosie voorgekom het nie. Dit dui daarop dat yster wél as Fe^{2+} in oplossing gaan en nie as Fe^{3+} nie. In lug oksideer hierdie blou-swart lagie weer vinnig tot 'n rooi-bruin lagie soos gesien kan word op FOTO 5.

b) Vertikale oor- en ondervloei keerplate. Ten einde 'n elektrolitiese sel te ontwikkel wat minder onderhoud as die horisontale-vloeisisteen vereis, is daar na 'n vertikale oor- en ondervloei-sisteen met die elektrodes as keerplate ("over-and-under baffle system") gekyk (FIGUUR 18). Vloei oor die plate was 0,3 m/s.



a) Sy-aansig

b) Keerplate vergroot

FIGUUR 18: Vertikale oor- en ondervloei keerplaat selsisteen

Minder probleme is ondervind met vlokke wat aan die elektrodes aanpak en geen pitkorrosie kon waargeneem word met hierdie stelsel nie. Die stroom het egter nog steeds geleidelik gestyg hoe langer die selle in bedryf was, wat getoon het dat die plate geleidelik aanpak. Dit was nodig om die plate elke tweede tot derde dag uit te haal en skoon te maak. Omdat die plate aan die kante afgeseël word om verbystroming van water tussen die plate en wand van die tenk te verhoed, is dit problematies om die plate te verwyder en weer terug te plaas. Daar is besef dat hierdie konfigurasie nie prakties toegepas kan word nie en 'n vertikale deurvloeistelsel is probeer.

c) Vertikale deurvloeistelsel. Om ophoping en aanpakking van vlokke te verhoed, is probeer om 'n stelsel daar te stel waar die elektrodeplate nie in kontak is met die wande of bodem van die houer nie. 'n Tregtervormige plastiekhouer waarin die plate vertikaal staan is toe geneem en die elektroliet het van bo na onder deur die houer gevloei teen 220 l/h (FIGUUR 19a). Van die plate het egter vinnig aangepak omdat eweredige vloei-verdeling nie verkry kon word nie en 'n roerder is aangebring met lemme bokant die plate, waarmee terselfdertyd agitاسie van die elektroliet verkry kon word (sien FIGUUR 19b). 'n Meer kompakte, kleiner vlok het nou gevorm en die stelsel kon vir die eerste keer bedryf word sonder om daaglik skoonmaak te word. Die elektrodeplate het egter nog stadig aangepak en is elke tweede dag met 'n glaswareborsel, sonder om die plate uit die houer te haal, afgeborsel.

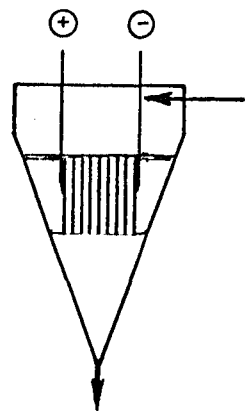
Alhoewel hierdie opstelling maklik en gerieflik was om te bedryf, was die ysterkonsentrasie in die uitlaat laer as volgens Faraday se "wet" voorspel, vir die stroom wat deur die sel gevloei het. Die effektiwiteitsgraad met skoon elektrodes was slegs ongeveer 55% en na twee dae in bedryf het dit gedaal tot ongeveer 37%. Die daling in effektiwiteit met bedryfstyd was as gevolg van aanpaksels op die elektrodeplate, maar die aanvanklike lae effektiwiteitsgraad kon nie verklaar word nie. Daar is vermoed

dat dit toegeskryf kan word aan dwaalstrome (soos reeds opgemerk en bespreek tydens die laboratoriumeksperimente) en maatreëls is geneem om hierdie strome sover as moontlik uit te skakel. "Perspex" plate is aan die oop sye van die elektrodes geplaas en die watervlak in die houer is verlaag sodat die elektrodes net-net bedek was. Daarvoor moes die roerder so geplaas word dat sy lemme onder die elektrodes was en is die water nou vertikaal deur die plate gesuig (sien FIGUUR 19c). Hierdie nuwe opstelling het die effektiwiteitsgraad verhoog vanaf ongeveer 55% na 64% met skoon elektrodes. Na twee dae in bedryf het die effektiwiteitsgraad gedaal tot slegs ongeveer 50%. Aanpaksels op die elektrodeplate was ook hier verantwoordelik vir die skerp daling in effektiwiteitsgraad.

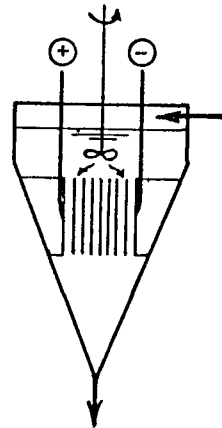
Ten einde bevuiling van die elektrodes te verminder is besluit om die polariteit van die gelykstroombaan in die elektrolitiese sel periodiek om te keer. 'n Skakelaar is bekom waarvan die periode van omskakeling tussen 0 en 9999 sekondes ingestel kon word. Heelwat navorsing op die gebied van polariteitsomkering is deur Foster et al. (1985) en Grøterud en Smoczynski (1986 (a)) gedoen. Eersgenoemdes het veral eksperimente gedoen om seewater te ontsout d.m.v. elektrodialise met inerte elektrodes en bevind dat presipitasie op die plate wél afneem met polariteitsomkering, maar nie geëlimineer word nie. Periodieke wassing van die plate met suur was steeds nodig om die presipitaat te verwyder. Grøterud en Smoczynski (1986 (c)), wat polariteitsomkering met aluminium- en ysterelektrodes ondersoek het om te bepaal of dit enige effek op die hoeveelheid fosfaat het wat verwyder word, vind dat die periode van omskakeling ten minste 256 sekondes moet wees om maksimum fosfaatverwydering (93%) te kry.

Met die finale eksperimentele opstelling soos skematies getoon in FIGUUR 19d) is gevind dat polariteitsomkering die werking van die elektrolitiese sel heelwat verbeter en bedryf vergemaklik. Aanvanklik is lang periodes gebruik (9000 sekondes), maar aanpakking was steeds 'n probleem. Die periode is geleidelik

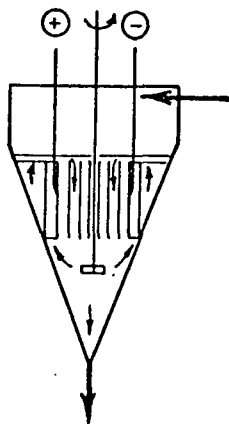
verminder en 'n toename in effektiwiteitsgraad is verkry. Met 'n polariteitswisseling elke 900 sekondes is gevind dat aanpakking toeneem omdat die onderskeie lae presipitaat wat gevorm word (tydens anode- en katodewerking van die plate) nie meer afskilfer nie, maar opbou. Die periode van stroomomkering is weer verhoog na 1200 sekondes wat die beste effektiwiteit en werking gegee het.



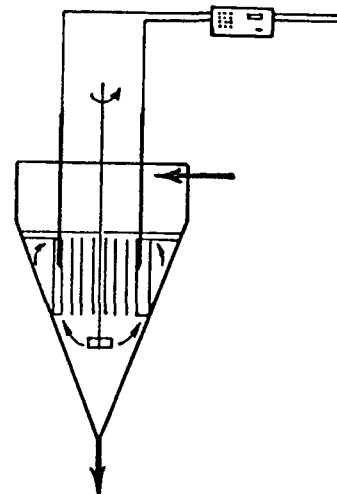
a) VERTIKALE DEURVLOEI
SELREAKTOR



b) MET ROERING
BO SELLE



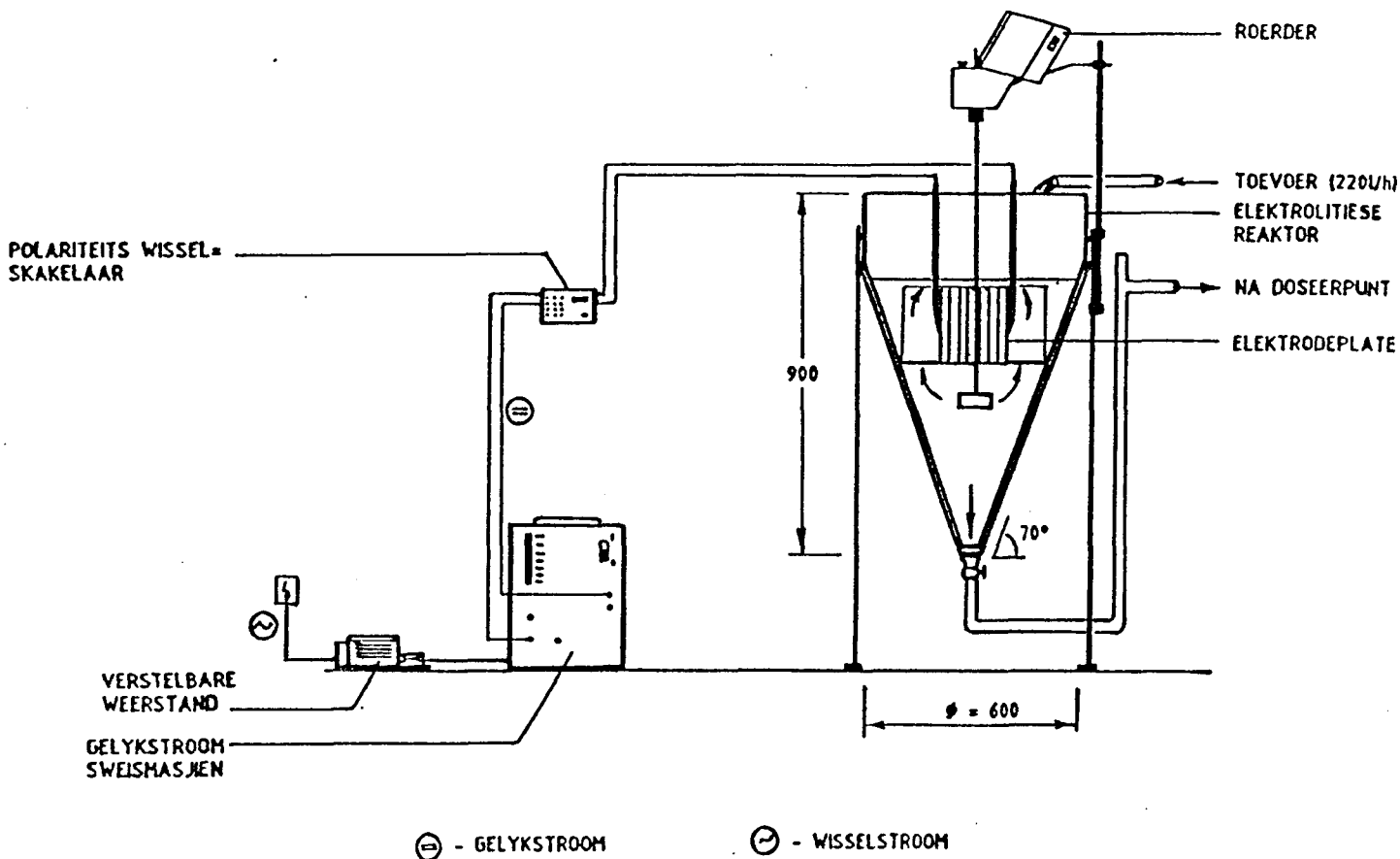
c) ROERING ONDER SELLE
EN AFSKERMING



d) MET STROOM WISSEL=
SKAKELAAR

FIGUUR 19: Ontwikkeling van die elektrolitiese sel vir praktiese gebruik onder bedryfstoestande

Die finale opstelling het 'n konstante effektiwiteit (na twee dae en langer kontinue bedryf) van 54% gelewer en word getoon in FIGUUR 20 en FOTO's 9 en 10. Hierdie opstelling lewer, alhoewel dit die mees praktiese opstelling was, 'n lae effektiwiteitsgraad t.o.v. yster opgelos in vergelyking met die teoretiese hoeveelheid soos bereken met Faraday se "wet".



FIGUUR 20: Elektrolitiese stroombaan en finale opstelling

Die skrywer is oortuig dat die effektiwiteit van die selle nog beduidend verbeter kan word. Heelwat navorsing op hierdie gebied is nodig en daar word aanbeveel dat daar meer spesifiek na die elektrolitiese sel gekyk word en metodes gesoek moet word om plaatbevuilding te reduseer.

4.3 Die elektrolietoplossing

Verskillende geaktiveerde slykprosesstrome wat kan dien as elektroliet in die selle is ondersoek, t.w. die inlaatstroom na die proses, die helder bowater van die mengslyk uit die anaerobiese- en anoksiese reaktore na besinking en die finale uitvloeisel van die geaktiveerde slykproses. Met uitsondering van die finale uitvloeisel is daar gevind dat die ander prosesstrome te veel vesels en gesuspendeerde vastestowwe bevat wat aan die plate aanpak en die seleffektiwiteit vinnig laat afneem. Daar word ook 'n skuimlaag op die oppervlakte gevorm omdat van die gesuspendeerde stowwe, deur die waterstof gas wat by die katodes vorm, geflotteer word. Die finale uitvloeisel het bevredigende resultate gegee wat betref aanpakking, met feitlik geen skuim wat op die oppervlak gedryf het nie.

4.4 Elektrolitiese sel ontwerp

In hierdie afdeling sal daar aangetoon word hoe 'n sel ontwerp kan word vir elektrolitiese koagulantproduksie in rioolsuiweringswerke. Eksperimentele resultate soos met die loodsaanleg verkry sal hiervoor gebruik word, byvoorbeeld die effektiwiteitsgraad, geleiding van die elektroliet, ens. Hierdie waardes hang egter grotendeels van die elektriese apparaat en opstelling asook samestelling van die uitvloeisel af en kan vir 'n ander stelsel heelwat verskil. Desnieteenstaande kan daar uit hierdie ontwerp 'n goeie aanduiding en "gevoel" vir so 'n stelsel vir praktiese toepassings verkry word.

Parameters wat vryelik gevarieër kan word binne sekere grense sluit die volgende in:

- Stroomdigtheid. Alhoewel die stroomdigtheid gevarieër kan word, moet daar in gedagte gehou word dat die energiekostes proporsioneel toeneem soos die stroomdigtheid toeneem (sien FIGUUR 16). Met die eksperimentele opstelling is gevind dat

dit nie lonend is om by stroomdigthede hoër as 100 A/m^2 te werk nie. Hoe laer die stroomdigtheid egter, hoe meer elektrodeplate van 'n spesifieke area word benodig en raak die sel later groot en lomp.

- Vorm, aantal en area van elektrodeplate. Laboratoriumeksperimente het getoon (sien EKSPERIMENT 5) dat kragverbruik per gram yster opgelos die laagste is vir vierkantige plate en dat die kragverbruik toeneem met 'n toename in aantal plate by 'n spesifieke stroomdigtheid (EKSPERIMENT 4). Vir ontwerpdoeleindes word 'n maksimum van 200 plate aanbeveel.

TABEL 3 toon die invloed van stroomdigtheid op energie- en totale kostes (Februarie 1990) vir koagulantproduksie.

TABEL 3: Effek van stroomdigtheid op energie en totale kostes

Fe DO- SERING (mg/l)	i (A/m ²)	A (m ²)	I (A)	N	E (V)	KOSTES		TOTALE KOSTES	
						ENERGIE (R/dag)	METAAL (R/dag)	(R/dag)	(c/m ³)
10	35	1	35	211	123.10	6.46	147.00	153.46	1.53
10	50	1	50	148	123.10	9.23	147.00	156.23	1.56
10	75	1	75	98	123.10	13.84	147.00	160.84	1.61
10	100	1	100	74	123.10	18.45	147.00	165.45	1.65

Vir 'n 10Ml/d aanleg wat voorsiening moet maak vir dosering in 'n 2:1-massaverhouding Fe:P en waar die maksimum ortofosfaat-konsentrasie van die invloei na die aanleg 15 mg/l (as P) is, lyk die ontwerp van die elektrolitiese sel as volg:

Maksimum hoeveelheid Fe benodig, $w = 300 \text{ kg/dag}$
Maksimum stroomdigtheid, $i = 100 \text{ A/m}^2$
Area van plaat, $A = 1.44 \text{ m}^2 \quad (1.2\text{m} \times 1.2\text{m})$
Stroom deur plate (vanaf Vgl 4), $I = 144 \text{ A} = 144 \text{ C/s}$
Afstand tussen plate, $d = 10 \text{ mm}$

Die parameter wat die grootste invloed op die ekonomie van die proses naas die koste van die metaal het, is die effektiwiteit wat met die elektrolitiese sel behaal kan word. Omdat die aantal elektrodeplate wat benodig word direk eweredig is aan die effektiwiteit van die elektrolitiese sel, beïnvloed dit ook die algehele grootte van die elektrolitiese sel (sien TABEL 4).

TABEL 4: Invloed van effektiwiteitsgraad op energiekostes (Februarie 1990) en oppervlakarea van die elektrolitiese sel

EFFEK=	PLAAT	STROOM	AANTAL	SPAN=	T O T A L E K O S T E S				OPPERVL
TIWIT.	AREA		PLATE	NING	ENERGIE	METAAL	TOTAAL	AREA	
(%)	(m ²)	(A)	N	(V)	(R/dag)	(R/dag)	(R/dag)	(c/m ³)	(m ²)
50	1	100	160	266	39.86	294.00	333.86	3.34	2.06
60	1	100	133	222	33.22	294.00	327.22	3.27	1.72
70	1	100	114	190	28.47	294.00	322.47	3.22	1.47
80	1	100	100	166	24.91	294.00	318.91	3.19	1.29
90	1	100	89	148	22.14	294.00	316.14	3.16	1.14
95	1	100	84	140	20.98	294.00	314.98	3.15	1.08

Parameters gebruik vir berekeninge:

Dosering = 20mg/l; Vloeitempo = 10Ml/dag

Spes. Geleiding = 0.6; Lengte v. plaat = 1m

Vir die loodsaanleg kon slegs 'n 54% effektiwiteit onder kontinue bedryfstoeestande verkry word. Daarmee is die aantal plate wat benodig word (vanaf Vgl 13):

$$N = \frac{3 \times 10^5 \text{g/d} \cdot 96487 \text{C} \cdot 2 / \text{mol}}{144 \text{C/s} \cdot (24 \text{h/d} \cdot 3600 \text{s/h}) \cdot 0.56 \text{g/mol} \cdot 0.54}$$

$$= 154 \text{ plate}$$

Die totale spanning oor die plate, E, sal afhang van die spesifieke geleiding (10³ mS/m) van die elektroliet. Die geleidingsvermoë van die elektroliet in die eksperimentele

opstelling het gewissel tussen 550mS/m en 650mS/m en sal as 600mS/m vir die berekening geneem word (volgens Vgl 5):

$$E_{sel} = \frac{100A/m^2 \cdot 0,01m}{0,60} * 154plate$$

$$= 257 V$$

4.5 Samevatting

Ekonomiese lewensvatbaarheid van die elektrolitiese proses is bepaal deur eksperimentele waardes, soos verkry met dieloodsaanleg, te gebruik. Die skrywer is oortuig dat die elektrolitiese proses nog aansienlik geoptimeer kan word en maak aanbevelings in 'n latere hoofstuk (HOOFSTUK 7) ten opsigte van navorsing wat hiervoor gedoen moet word. Die verbeterings in seleffektiwiteite wat wêl gedurende die eksperimentele periode behaal kon word, is opgesom in TABEL 5.

TABEL 5: Opsomming van verbeterings wat met die elektrolitiese opstelling verkry is

STELSEL	VERBETERING	WERKING
Horisontale vloei	geen keerplate	swak a.g.v. korrosie en aanpakking swak a.g.v. aanpakking
Vertikale oor- en ondervloei keerplaat	geen	swak a.g.v. aanpakking
		PERSENTASIE SELEFFEKTIWITEIT
		dadelik na 48 uur
Vertikale deurvloei	geen roering bo selle roering en afskerming polariteitswisseling	geen konstante werking 55 37 64 50 64 54

In die volgende hoofstuk sal daar gekyk word of die elektrolities geproduseerde ysterflokkulant effektief in 'n biologiese riool=suiweringsstelsel gebruik kan word. Klem sal veral op fosfaatverwydering gelê word, maar daar sal ook na die ander kwaliteitsparameters van uitvloeisels gekyk word om te sien of daar enige verbeterings behaal kan word met die elektrochemies geproduseerde ysterhidroksiedvlokke.

HOOFSTUK 5

EKSPERIMENTELE WERK: LOODSSKAALSTUDIE

5.1 Inleiding

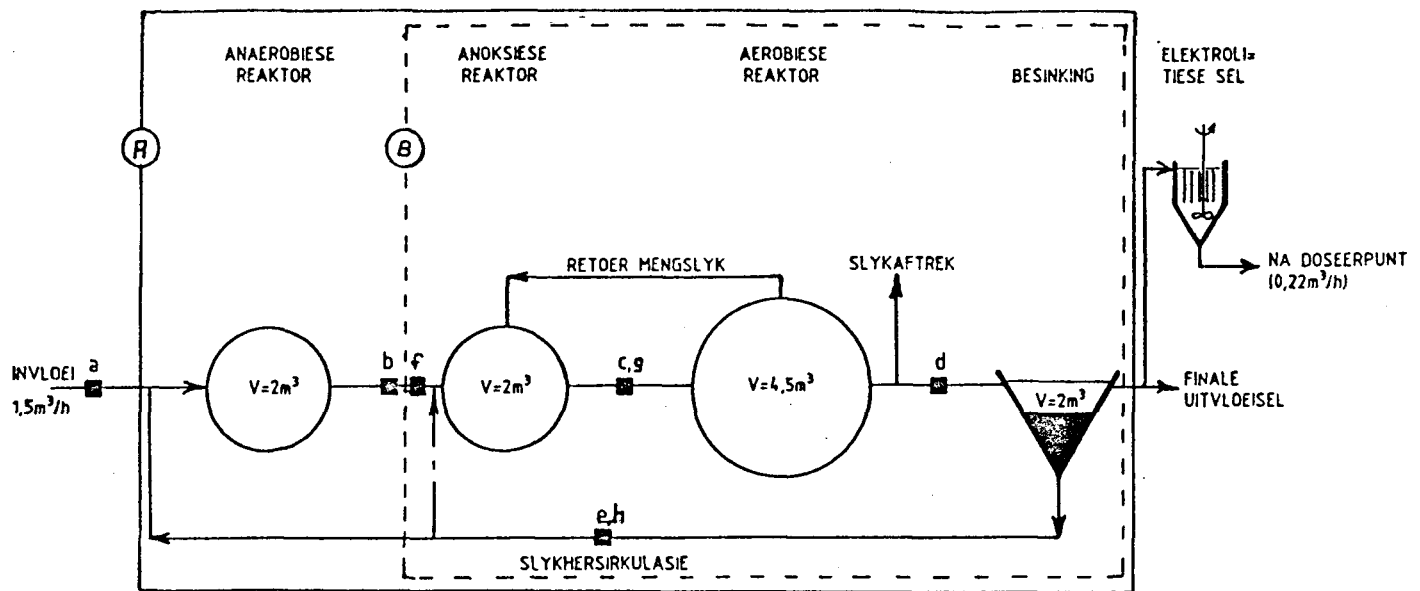
Die geaktiveerdeslyk loodsaanleg te Daspoort is opgestel en bedryf om elektrolitiese ystertoevoeging by twee verskillende biologiese prosesse te ondersoek, naamlik biologiese fosfaat- en stikstofverwydering (nitrifikasie/denitrifikasie). Dieselfde eksperimente is met beide opstellings gedoen om die twee prosesse met betrekking tot elektrolitiese toevoeging van yster te kan vergelyk. Alhoewel die loodsaanleg goed gefunksioneer het, is daar nie probeer om die aanleg optimaal in te stel nie, omdat die algehele uitwerking van elektrochemies toegevoegde yster tot die proses ondersoek wou word. Klem is gelê op fosfaatverwydering, maar ander fisiese-, chemiese- en biologiese parameters van belang is ook gemonitor. Die aanleg is bedryf om naas elektrochemies geproduseerde ystervlok geen addisionele chemikalië tot die proses toe te voeg nie.

5.2 Prosesbeskrywing

Vir biologiese fosfaatverwydering is die aanleg opgestel volgens die drie stadium Phoredox-proses, terwyl 'n gemodifiseerde Ludzack-Ettinger-proses gebruik is vir biologiese stikstofverwydering. Reaktorgroottes, prosesvloeytempo en hersirkulasiestrome soos met die eksperimentele opstelling gebruik, word in FIGUUR 21 getoon.

5.3 Aanlegbedryf

Rou rioolwater is as invloeiende gebruik. Slykouderdome, gebaseer op die volume van die aerobiese tenk, is op 20 dae vir biologiese fosfaatverwydering en op 12 dae vir biologiese stikstofverwydering onderskeidelik, gehou.



- - Posisies waar yster toegevoeg is
- A - Phoredox-proses vir biologiese fosfaatverwydering
- B - Gemodifiseerde Ludzack-Ettinger-proses vir biologiese stikstofverwydering

FIGUUR 21: Skematiese voorstelling van die eksperimentele opstelling vir biologiese fosfaatverwydering te Daspoort

Posisies waar yster tot die proses toegevoeg is, word in TABEL 6 vir die onderskeie opstellings weergegee.

TABEL 6: Posisies waar yster toegevoeg is

YSTER DOSEERPUNT	BIOL. VERWYDERINGSPROSES	
	FOSFAAT	STIKSTOF
Invloei na aanleg	a	-
Voor anoksiese reaktor	b	f
Voor aerobiese reaktor	c	g
Voor besinktenk	d	-
In die slykher sirkulasiestroom	e	h

Die elektrolitiese sel soos beskryf in HOOFSTUK 4 is vir ysterkoagulantproduksie gebruik. Eksperimenteel is gevind dat 'n ysterdosering gelykstaande aan die invloed ortofosfaatkonsentrasie ($\text{Fe:P} = 1:1$ op 'n massabasis) met die biologiese fosfaatverwyderingsproses nodig was om die ortofosfaatkonsentrasie in die uitvloeisel onder 1mg/l (as P) te hou. Met die biologiese stikstofverwyderingsproses moes die ysterdosering verdubbel word ($\text{Fe:P} = 2:1$), om dieselfde uitvloeiselkwaliteit te verkry. Hierdie doserings is deurentyd toegedien om die aanlegwerking te ondersoek.

Voordat die ystertoevoegingspunt verander is, is die aanleg eers vir ten minste drie dae sonder ystertoevoeging bedryf. So ook is aanvaar dat stabiele toestande vir ysterdosering by 'n bepaalde posisie ingetree het, indien die ortofosfaatkonsentrasie in die uitvloeisel drie dae agtereenvolgens nagenoeg konstant was.

5.4 Analitiese metodes

5.4.1 Monsterneming

'n Samegestelde monster van die in- sowel as uitvloeisel is daaglik geneem. Analises word getoon en grafies voorgestel vir elke maand afsonderlik in AANHANGSEL C (TABEL 1 tot 5 en FIGUUR 1 tot 16).

5.4.2 Chemiese en fisiese analises

Die monsters is chemies geanaliseer (Standard methods, 1980) vir:

- totale fosfate (P) volgens metode 424C (III),
- ortofosfaat (O-PO_4) volgens metode 424E,
- chemiese suurstof behoefte (CSB) volgens metode 508A, en
- totale Kjeldahlstikstof (TKN) volgens metode 420B.

Addisioneel tot die chemiese analyses is die volgende fisiese parameters bepaal:

- kleur (Heligo Colour Meter),
- troebelheid (Hach Turbidimeter, model 2100A),
- pH (Schott CG 837).

5.4.3 Mikrobiologiese waarnemings

Vanweë die lang slykouderdome waarmee die loodsaanleg bedryf is (12 en 20 dae onderskeidelik), kan daar nie betekenisvolle mikrobiologiese waarnemings gegee word nie. Die loodsaanleg is nooit vir langer as drie dae by 'n bepaalde doseringspunt, nadat dit gestabiliseer het, bedryf nie.

5.5 Resultate en bespreking

5.5.1 Fosfaatverwydering sonder yster toevoeging

Vir die rou rioolinvloei was die ortofosfaatkonsentrasies (as P) deurgaans hoër as 85% van die totale fosfate (as P) in die invloei. Die gemiddelde totale fosfaatkonsentrasie was 9,42 mg/l (as P).

Met beide biologiese nutriëntverwyderingsprosesse is fosfaatverwydering, sonder toevoeging van yster, gekry. Die gemiddelde ortofosfaatkonsentrasie in die uitvloei met biologiese fosfaatverwydering sonder ystertoevoeging was 1,39 mg/l, terwyl dit 3,28 mg/l was tydens bedryf as gemodifiseerde Ludzack-Ettinger proses.

5.5.2 Effek van posisie van ystertoevoeging op fosfaatverwydering

Rabinowitz en Marais (1980) vind dat die punt waar chemikalieë tot die proses toegevoeg word, nie krities vir fosfaatverwydering is

nie. Dieselfde is hier vir fosfaatverwydering waargeneem, soos in Tabel 7 getoon.

TABEL 7: Fosfaatverwydering by die onderskeie doseringspunte met elektrolitiese ystertoevoeging

PUNT VAN YSTERTOEOVOEGING		FOSFAATVERW.	STIKSTOFVERW.
Beskrywing	Punt*	% tot P verw.	% tot P verw.
In invloeiisel	a/f	82	84
Voor anoksiese reaktor	b/f	82	83
Voor aerobiese reaktor	c/g	86	86
In slykfersirkulasie	e/h	80	76

* Afhangende van die biologiese verwyderingsproses

Alhoewel effens beter fosfaatverwydering verkry is waar yster voor die aerobiese reaktor toegevoeg is, was dit so gering, dat dit maklik aan ander faktore soos byvoorbeeld beter vermenging toegeskryf kan word.

'n Ander verduideliking hiervoor kan ook wees dat daar as gevolg van die opgeloste suurstof meer yster in die ferri vorm beskikbaar was om fosfaat te presipiteer. Stoïgiometries gesien is dit voordeliger om yster(III) vir fosfaatverwydering te hê, omdat die verhouding Fe:P vir Fe^{3+} 1,8:1 is, terwyl dit vir Fe^{2+} , 2,7:1 is.

Vir die ander kwaliteitsparameters het die punt van addisie wêl 'n rol gespeel (sien 5.5.4).

5.5.3 Optimum dosering

Met die biologiese fosfaatverwyderingsproses is gevind dat, om 'n uitvloeisel met ortofosfaatkonsentrasie laer as 1mg/l (as P) te kry, 'n ysterdosering gelykstaande aan die inlaat ortofosfaatkonsentrasie benodig word. Met ystertoevoeging tot die

biologiese stikstofverwyderingsproses was daar egter 'n (Fe:P)-verhouding van 2:1, gebaseer op die invloed van ortofosfaatkonsentrasie, nodig.

5.5.4 Uitwerking van die ystertoevoegingspunt op ander analitiese parameters

Die gemiddelde persentasie verwydering t.o.v. CSB, TKN, troebelheid en kleur vir die verskillende punte waar yster elektrolities toegevoeg is, word in Tabel 8 getoon .

TABEL 8: Invloed van ystertoevoeging op verskillende kwaliteitsparameters by die onderskeie doseringspunte

Doseerpunt	CSB	Persentasie TKN	verwydering Troebelh.	Kleur
Biologiese fosfaatverwydering:				
geen	64	59	62	45
a	74	63	87	57
b	66	58	70	59
c	73	80	81	>50*
d	72	60	73	>50*
e	50	75	67	39
Biologiese stikstofverwydering:				
geen	48	33	72	64
f	35	58	57	47
g	64	23	71	67
h	72	35	53	76

* kan nie presies bereken word nie omdat inlaat kleur dikwels hoër was as maksimum waarde (200) wat gelees is.

- Biologiese fosfaatverwyderingstelsel. Vanaf hierdie tabel blyk dit dat elektrolitiese ystertoevoeging oor die algemeen 'n kwaliteitsverbetering van die uitvloeisel tot gevolg gehad het. Die enigste uitsondering was waar dosering in die retoerslyk (punt e) gedoseer is. Dosering by hierdie punt

het 'n groter verwydering in TKN, troebelheid en kleur meegebring, in vergelyking met die proses sonder ystertoevoeging terwyl die CSB in die uitvloeisel egter gestyg het. Ongeveer dieselfde resultate is behaal waar yster by die ander posisies gedoseer was.

- Biologiese stikstofverwyderingstelsel. Hier is gevind dat dosering by punt f (invloei) 'n verlaging in uitvloeiselkwaliteit ten opsigte van alle parameters behalwe vir die TKN verwydering tot gevolg gehad het. Die TKN verwydering het van 33% na 58% toegeneem. Dit was die hoogste gemiddelde persentasie TKN-verwydering wat met hierdie opstelling behaal kon word. Ystertoevoeging voor die aerobiese reaktor (punt g) het die persentasie CSB-verwydering verhoog, maar TKN-verwydering is verlaag, terwyl kleur- en troebelheidsverwydering nagenoeg dieselfde gebly het. Die beste resultate met hierdie opstelling is behaal met dosering in die slykfersirkulasiestroom (punt h). CSB-verwydering kon verhoog word van 48% na 72% en 'n verlaging in kleur is ook verkry. Hier is slegs 'n verswakking in troebelheid (wat waarskynlik maklik verbeter kan word deur spesifieke bedryfsparameters van die aanleg aan te pas) van die uitvloeisel verkry. Die persentasie TKN-verwydering het nagenoeg konstant gebly.

Swakker algehele besoedelingstofverwydering is met die opstelling vir biologiese stikstofverwydering sonder ystertoevoeging verkry, as met die ooreenkomstige biologiese fosfaatverwyderingsproses. So het CSB-verwydering byvoorbeeld gedaal van 64% met biologiese fosfaatverwydering na 48% vir biologiese stikstofverwydering en TKN-verwydering van 59% na 33% (vgl. TABEL 8). Vir die fisiese parameters, troebelheid en kleur, was die teenoorgestelde egter waar. Die persentasie troebelheid wat verwyder is, het gestyg van 62% tydens biologiese fosfaatverwydering na 72% vir biologiese stikstofverwydering en die kleurverwydering van 45% na 64%.

5.6 Opsomming en Gevolgtrekkings

Eksperimentele resultate behaal met ystertoevoeging tot die onderskeie biologiese suiweringsprosesse het getoon dat:

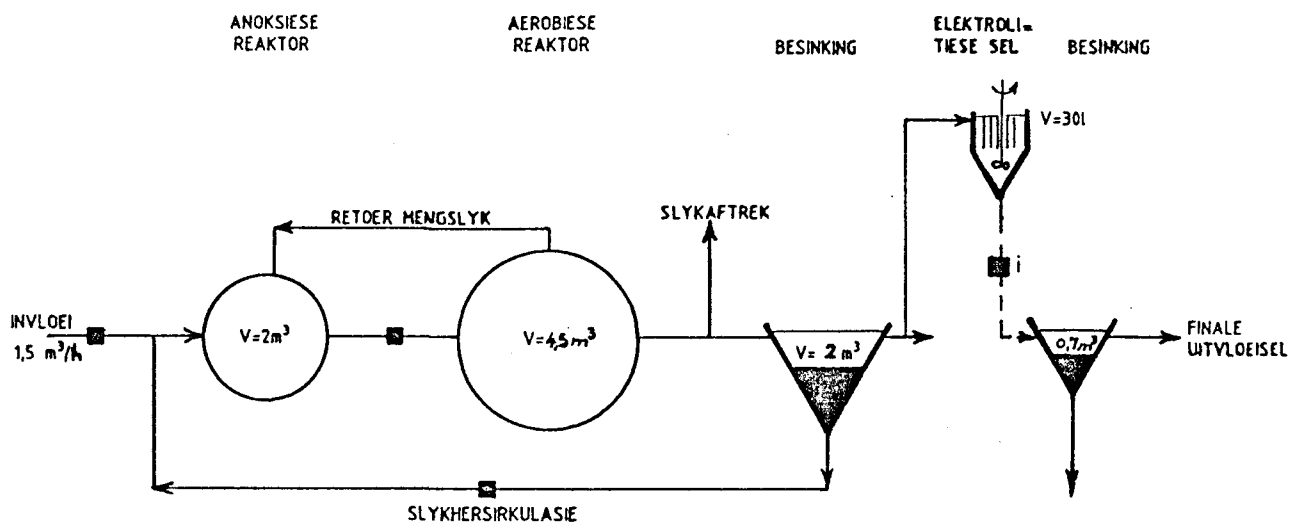
- Die posisie waar yster tot die proses toegevoeg word, het geen betekenisvolle invloed op die effektiwiteit van fosfaatverwydering gehad nie, maar het wel 'n invloed op ander kwaliteitsparameters van die uitvloeisel gehad.
- Ortofosfaatkonsentrasies in die uitvloeisel kon onder 1 mg/l (as P) gehou word met 'n ysterdosering gelykstaande aan 'n 1:1 (Fe:P) ysterdosering (massabasis) met die biologiese fosfaatverwydering opstelling. Vir biologiese stikstofverwydering was 'n Fe:P-verhouding van ongeveer 2:1 nodig. Hierdie verhoudings is gebaseer op die ortofosfaat-konsentrasies van die invloei.
- Waar dit die ander kwaliteitsparameters betref het dit, behalwe vir die retoerslykstroom, nie saak gemaak by watter punt yster gedoseer is nie. Vir biologiese stikstofverwydering is die beste resultate egter behaal waar yster in die slyktersirkulasiestroom gedoseer is.

5.7 Ysterdosering op biologies voorafgesuiwerde uitvloeiels

Met die opstelling vir biologiese stikstofverwydering is daar gevind dat die stelsel sonder ysterbyvoeging ook fosfate verwyder, alhoewel nie so effektief soos die biologiese fosfaatverwyderingstelsel nie. Daar is dus besluit om die effektiwiteit van ysterdosering slegs op die uitvloeisel van die biologiese stikstofverwyderingsproses te ondersoek.

Dieselfde opstelling soos vir biologiese stikstofverwydering is gebruik (FIGUUR 23). Yster is tot 'n gedeelte (0,22 m³/h) van die finale uitvloeisel toegevoeg (by punt i op FIGUUR 23) en geflokkuleer. Die tenk waarin die elektrolitiese sel was (sien

FIGUUR 20), is as kitsmenger gebruik met die roerder wat teen ongeveer 100 o.p.m. gedraai het. Die sekondêre besinktenk is bedryf met 'n middelste kompartement waar flokkulasie deur middel van 'n vlokkombers verkry is. Die opvloeisnelheid in die besinktenk was 1 m/h en die hidrouliese retensietyd ongeveer drie uur.



FIGUUR 23: Skematiese voorstelling van eksperimentele opstelling met sekondêre besinking

5.8 Resultate en bespreking

Met die addisionele behandeling van die uitvloeisel is gevind dat 'n 2:1 (Fe:P) dosering, gebaseer op die uitvloeisel ortofosfaat-konsentrasie 'n goeie finale uitvloeisel gee. Ortofosfaat-konsentrasies na sekondêre besinking was deurentyd onder $0,5 \text{ mg/l}$ (as P), terwyl die ander kwaliteitsparameters ook lae vlakke bereik het. Tabel 9 toon gemiddelde in- en uitlaatwaardes, asook die persentasie verwydering behaal, wat met sekondêre besinking onder gestadigde toestande verkry is. Die persentasie verwydering wat met hierdie opstelling verkry is, was meer as met enige van die ander opstellings (vergelyk met TABEL 8) verkry kon word vir al die kwaliteitsparameters.

TABEL 9: In- en uitvloeiseldata met sekondêre besinking

Parameter	Monster		Persentasie Verwydering
	Rouwater	Finale uitl.	
CSB (mg/l as O)	440	30	93
TKN (mg/l as N)	29	8	72
Troebelheid (NTE)	121	0.9	99
Kleur	180	8	96

Omdat die biologiese proses die fosfaat egter tot gemiddeld 3,48 mg/l (as P) afgebring het, was slegs 6,5 mg/l yster nodig om 'n uitvloeisel van hoë kwaliteit te lewer.

Die enigste nadeel is dat die water addisioneel geflokkuleer moet word en die vlokke in 'n tersiêre besinktenk verwyder moet word. Vir bestaande biologiese stikstofverwyderingsaanlegte sal so 'n verandering heelwat kos. Biologiese fosfaatverwyderingsaanlegte kan omgeskakel word na 'n proses wat ontwerp is om slegs stikstof te verwyder, wat die anaerobiese reaktor oortollig sal maak, maar daar sal nog addisioneel voorsiening gemaak moet word vir sekondêre behandeling. In die gangbaarheidstudie is daar meer in detail na die ekonomiese aspekte van hierdie veranderings gekyk.

HOOFSTUK 6

EKONOMIESE GANGBAARHEIDSTUDIE

6.1 Inleiding

6.1.1 Fosfaat voorkoms

Die totale fosfaatkonsentrasie van munisipale uitvloeisels bestaan hoofsaaklik uit twee fraksies, nl. oplosbare ortofosfate (PO_4^{3-}) en organies gebonde fosfate wat oplosbaar of onoplosbaar kan wees (Ekama et al., 1984). Hiervan maak die ortofosfate tussen 70 en 90 persent van die totale fosfate uit (Ekama et al., 1984). Vir die rou riool waarmee die loodsaanleg bedryf is, was die ortofosfaatfraksie ongeveer 85% van die totale fosfate.

In die finale uitvloeisel wat verkry word na biologiese behandeling van rioolwater kom die totale fosfaat feitlik uitsluitlik as ortofosfaat voor. TABEL 10 toon die fosfaatkonsentrasies van die onderskeie geaktiveerde slykprosesse vir Suid-Afrikaanse uitvloeisels.

TABEL 10: Fosfaatkonsentrasies van algemene Suid-Afrikaanse munisipale uitvloeisels (Ekama et al., 1984)

UITVLOEISEL	TOTALE FOSFAAT (mgP/l)	ORTOFOSFAAT (mgP/l)
Rou riool	8 - 18	6 - 16
Na biol. fosfaatverwydering	< 3	< 3
Na biol. stikstofverwydering	6 - 14	6 - 14

6.1.2 Ysteraanvraag

Om onoplosbare ysterfosfaat met die ferri-ioon te vorm, word 'n teoretiese massaverhouding Fe:P van 1,8:1 benodig, terwyl dit 2,7:1 (Fe:P) vir die ferro-ioon, is.

Vir biologiese suiweringswerke onder normale bedryfstoestande is gevind (Lötter, 1989; Louw et al., 1988) dat 'n 2:1-verhouding (Fe:P) bevredigende fosfaatverwydering gee vir al die verskillende ystersoute wat as koagulant gebruik is. Lötter (1989) vind dat, selfs met ferrosulfaat (FeSO_4) (waar 'n stoïgiometriese verhouding van 2,7:1 (Fe:P) vereis word), 'n 2:1-massaverhouding voldoende is vir fosfaatverwydering. Sy skryf dit toe aan outo-oksidasie van die ferro-ioon na die ferri vorm voordat die yster met die fosfaat reageer.

6.1.3 Ystertoevoeging

6.1.3.1 Posisies vir ystertoevoeging. Die moontlike posisies waar yster vir fosfaatverwydering in geaktiveerde slykprosesse gedoseer kan word is die volgende:

- in die invloei na die proses. Dosering in die toevoer vereis hoër ysterdoserings (as die stoïgiometriese hoeveelheid) omdat die ysterione ook aan ander chemiese reaksies deelneem (bv. TKN-verwydering) (Pandit en Mayadeo, 1985) en sodoende verlore is vir fosfaatverwydering. Lötter (1989) vind ook dat biologiese stelsels, indien yster kontinu gedoseer word, hul vermoë om fosfaat te verwyder verloor, wat 'n 2:1-dosering (Fe:P - gebaseer op die totale fosfate in die invloei), vereis.

- in die stelsel. Met die eksperimentele aanleg is gevind dat die posisie waar yster tot die stelsel toegevoeg word, nie 'n invloed op die hoeveelheid fosfaatverwydering het nie. Biologiese fosfaatverwydering sal egter ook in hierdie geval

afneem met kontinue ystertoevoeging en word 'n 2:1-dosering (Fe:P) vereis, gebaseer op die totale fosfate in die invloei.

- in die finale uitvloeisel. Vir die loodsaanleg is gevind dat 'n 2:1-dosering (Fe:P), gebaseer op die ortofosfaat-konsentrasie in die finale uitvloeisel na biologiese suiwing, benodig word vir fosfaatverwydering. Daar moet egter voorsiening vir sekondêre besinking gemaak word.

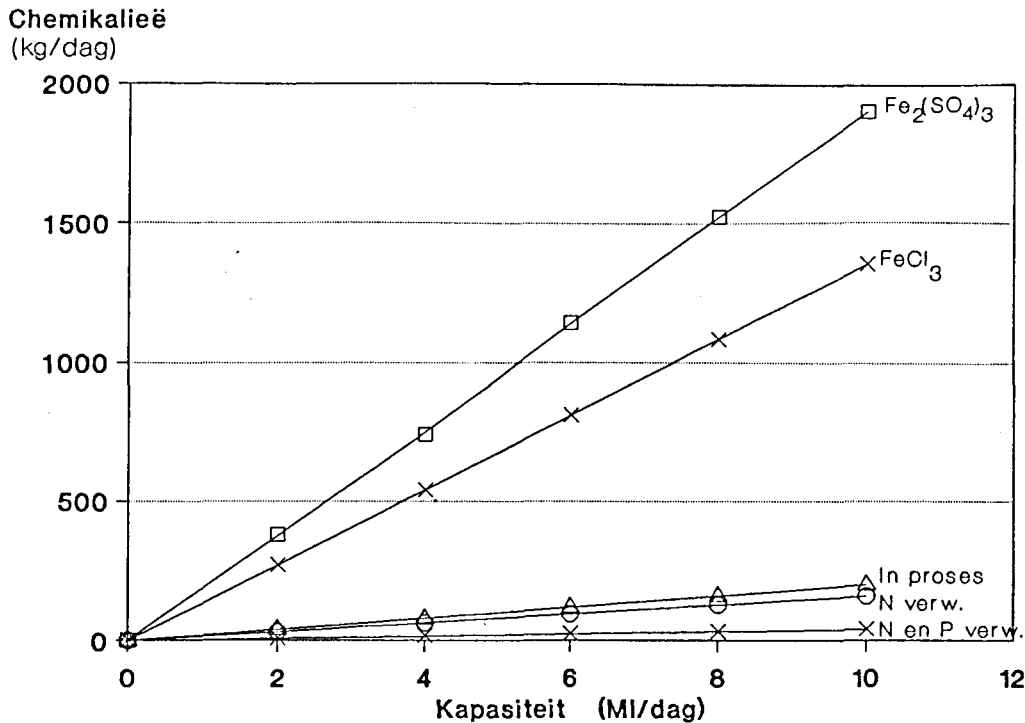
6.1.3.2 Stelsels wat in hierdie studie vergelyk sal word. 'n Kostevergelyking met ystertoevoeging tot biologiese stikstof-verwyderingsaanlegte in die rouwater, die prosesreaktore en in die helder uitvloeisel, sal gemaak word. Vir die biologiese fosfaat-verwyderingsproses sal daar slegs na dosering in die helder uitvloeisel gekyk word, omdat hierdie stelsel sy vermoë om fosfaat biologies te verwyder verloor, indien yster tot 'n prosesstroom toegevoeg word (Lötter,1989).

TABEL 11 gee die verskillende ysterdoserings wat vir die onderskeie prosesse en chemikalieë onder bedryfstoestande benodig word om fosfaat effektief uit rioolwater te verwyder.

TABEL 11: Ystertoevoeging vir fosfaatverwydering uit rioolwater

YSTERDOSERING:	TOT P (mg/l)	Fe:P-ver= houding	DOSERING (mg/l Fe)
Chemies met:			
Fe ₂ (SO ₄) ₃	10	2:1	20
FeCl ₃	10	2:1	20
Elektrochemies in:			
rou riool	10	2:1	20
proses (biol. stikstofverwyd.)	10	2:1	20
Elektrochemies in uitvl. van:			
biol. stikstofverwydering	8	2:1	16
biol. fosfaatverwydering	2	2:1	4

Daaglikse ysterverbruik vir geaktiveerde slykaanlegte wat tot tien Ml rioolwater per dag met aanvullende ystertoevoeging suiwer, word in FIGUUR 24 getoon.



FIGUUR 24: Daaglikse ysterverbruik vir verskillende geaktiveerde slykprosesse met aanvullende ysterdosering

6.2 Kostes

6.2.1 Lopende koste van yster as koagulant

Chemikaliëkostes vir die verskillende komersiële beskikbare ystersoute wat as koagulant gebruik word, sowel as elektrochemiese koagulantproduksiekostes, word in TABEL 12 getoon. Om 'n kostevergelyking te kan doen, word die produksiekoste as Rand per ton koagulant (as Fe) uitgedruk. Heersende pryse vir die chemikalië in die PWV-gebied gedurende Maart 1990 is gebruik, terwyl energiekostes gebaseer is op die tariewe van die Pretoriase Munisipaliteit in Februarie 1990.

TABEL 12: Vergelykende kostes* vir chemiese- en elektrochemiese koagulantproduksie

CHEMIESE KOAGULASIE				EENHEIDS=KOSTES
Naam	Samestelling	Prys (R/ton)	Inhoud Fe (%)	(R/ton Fe)
Ferrichloried	FeCl_3	260	14,8	1757
Ferrisulfaat	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	170	10,5	1619
Ferrosulfaat	FeSO_4	91	6,5	1400
ELEKTROCHEMIESE KOAGULASIE:				
Koagulantproduksie by:	Effektiewiteit	Yster (R/ton)	Krag (R/ton)	
Lae seleffektiew.	54 %	1470	185	1655
Hoë seleffektiew.	90 %	1470	111	1581

* Kostes:

- gebaseer op Februarie 1990 pryse
- krag = R16,46 per kVA per maand + 3,96 c per kW.h

6.2.1.1 Kommersieel beskikbare ystersoute. Vanaf TABEL 12 blyk dit dat ferrosulfaat teen R1400 per ton yster die goedkoopste ysterkoagulant tans op die mark is. Slegs enkele aanlegte in Suid-Afrika gebruik egter ferrosulfaat omdat dit net as oplossing beskikbaar is en die vervoerkostes hiervan na aanlegte verder as die PWV-gebied dit onekonomies maak om hierdie koagulant te gebruik. Dit sou dus meer toepaslik wees om elektrolitiese koagulantvervaardiging te vergelyk met 'n chemiese koagulant wat as vastestof beskikbaar is en sal verdere kostevergelykings met ferrisulfaat as goedkoopste ysterkoagulant (teen R1619 per ton Fe) gemaak word.

6.2.1.1 Elektrochemies geproduseerde ysterkoagulant. Op TABEL 12 word die kostes vir elektrochemiese koagulantproduksie by twee verskillende seleffektiwiteite gegee. Met 'n seleffektiwiteit van 54 persent, wat met die loodsaanleg onder kontinue bedryfstoe=stande behaal is, werk elektrochemiese koagulantproduksie effens duurder uit as ferrisulfaat (R1655/ton Fe teenoor R1619/ton Fe), maar nog goedkoper as ferrichloried (R1757/ton Fe). Die skrywer is oortuig dat hoër seleffektiwiteite (tot hoër as 90%) met die elektrochemiese proses behaal kan word (dit vereis egter nog heelwat navorsing) en gee derhalwe produksiekostes indien die effektiwiteit tot 90% verhoog word.

Elektrochemiese koagulantproduksie is bereken met die groothan=delsprys van hoë kwaliteit sagte staal. Indien skrootyster gebruik word, of die proses algemene toepassing vind in die watersuiweringsveld sodat 'n laer kwaliteit yster daarvoor gebruik kan word, behoort die metaalkostes, wat ongeveer 90% van die totale produksiekostes uitmaak, aansienlik te daal.

6.2.2 Doseertoerusting

Kostes (Februarie 1990) van addisionele chemiese- sowel as elektrochemiese doseertoerusting vir geaktiveerde slykaanlegte wat tot 10 Ml/dag rioolwater kan suiwer, is in aanmerking geneem.

TABEL 13: Toerusting benodig vir koagulantproduksie

PROSES	GROOTTE (Ml/dag)	TOERUSTING= KOSTE (R)
Chemiese koagulantproduksie	< 4	13 000
Chemiese koagulantproduksie	4 - 10	19 000
Elektrochemiese koagulantproduksie	< 4	30 000
Elektrochemiese koagulantproduksie	4 - 10	46 000

6.3 Vergelykende eenheidskoste vir fosfaatverwydering

Vergelykende kostes vir die onderskeie prosesse (opsies) en chemikalieë wat gebruik kan word in geaktiveerde slykprosesse om te verseker dat 'n uitvloeisel met ortofosfaatkonsentrasie laer as 1 mg/l gehandhaaf kan word, word in TABEL 14 getoon. Hierdie kostes sluit amortisasie van die doseertoerusting in, wat bereken is teen 'n rentekoers van 20% per jaar oor 'n tien jaar periode. Seleffektiwiteite van 54% vir die elektrolitiese proses is gebruik vir die berekeninge.

TABEL 14: Eenheidskoste vir fosfaatverwydering aanvullend tot geaktiveerde slykprosesse.

FOSFAATVERWYDERINGS= PROSES	EENHEIDSKOSTES VIR FOSFAATVERWYDERING (c/m ³) VIR AANLEGKAPASITEIT (Ml/dag):				
	2	4	6	8	10
In situ dosering:					
a) Chemies					
Fe ₂ (SO ₄) ₃	3,66	3,45	3,45	3,39	3,36
FeCl ₃	3,94	3,73	3,72	3,67	3,64
b) Elektrochemies	4,12	3,62	3,63	3,50	3,42
Sekondêre besinking:					
a) Chemies					
Fe ₂ (SO ₄) ₃	1,07	0,86	0,85	0,80	0,77
FeCl ₃	1,13	0,92	0,91	0,86	0,83
b) Elektrochemies en					
Biol. fosfaatv.	1,62	1,12	1,13	1,00	0,93
Biol. stikstofv.	3,49	2,99	3,00	2,88	2,80

Vanaf hierdie tabel blyk dat ystertoevoeging (met chemies geproduseerde ysterkoagulante) tot die uitvloeisel van geaktiveerde slykprosesse met gevolglike sekondêre besinking van die water, die

mees ekonomiese proposisie is. Sekondêre besinking word egter vereis.

Met ysterdosering word 'n ysterfosfaatpresipitaat gevorm wat baie onoplosbaar in water is. Dit is dus onnodig om gesofistikeerde verheldering van die uitvloeisel na flokkulering te bewerkstellig en word daar voorgestel dat die water eenvoudig in 'n gronddam gelei word, waar die vlokke kan besink. Die dam kan ook dien as verouderingsdam, soortgelyk aan die sekondêre damme van fakultatiewe stabilisasie, met 'n kapasiteit van vyf keer die daaglikse uitvloeiselvolumen.

Elektrochemiese ystertoevoeging addisioneel tot biologiese fosfaatverwydering, alhoewel duurder, vergelyk goed met chemiese ystertoevoeging. Vir aanlegte met 'n kapasiteit van 10 Ml/dag is elektrochemiese koagulantproduksie met byvoorbeeld ferrichloried slegs 0,10 c/m³ (= R10 per dag) duurder as chemiese koagulantproduksie.

Waar yster tot die biologiese proses toegevoeg word, is elektrochemies geproduseerde ysterkoagulant goedkoper as dosering met ferrichloried vir aanlegte groter as 2 Ml/dag, maar duurder as dosering met ferrisulfaat.

6.3 Samevatting en bespreking

Uit die ekonomiese gangbaarheidstudie het geblyk dat:

- die mees ekonomiese fosfaatverwydering met 'n geaktiveerdeslykaanleg word verkry deur chemies geproduseerde ysterkoagulant tot die biologies gesuiwerde uitvloeisel van geaktiveerde slykaanlegte toe te voeg met sekondêre besinking van die uitvloeisel.

- elektrochemiese koagulantproduksie goedkoper is as chemiese koagulantproduksie met ferrichloried, waar yster tot die geaktiveerde slykproses toegevoeg word.

Alhoewel hier slegs na direkte kostes gekyk is, moet die ander voordele en indirekte kostebesparing wat elektrochemiese koagulantproduksie sal meebring maar nie direk bepaal kan word nie, nie uit die oog verloor word nie. Hieronder tel veral dat geen soute addisioneel tot die uitvloeisel toegevoeg word wat later verwyder moet word of wat ophoop in die opgaardamme wat hierdie uitvloeisel ontvang nie. Elektrochemiese koagulantproduksie sal dus die besoedelingslas van oppervlaktebronne van veral geslote opvanggebiede aansienlik verlig en word daar aanbeveel dat hierdie proses op 'n grootskaalse aanleg getoets word.

Elektrochemiese koagulantproduksie vir rioolwatersuiwering is 'n nuwe veld waarop nog baie min navorsing gedoen is. In die volgende hoofstuk sal daar aangetoon word waarop klem gelê moet word by verdere navorsing op hierdie gebied.

HOOFSTUK 7

AANBEVELINGS

7.1 Inleiding

Elektrochemiese fosfaatverwydering uit munisipale uitvloeisels is in hierdie studie op loodsskaal ondersoek en daaruit het geblyk dat dit 'n ekonomiese alternatief tot chemiese dosering mag wees. Die volgende stap sal dus wees om die proses op 'n een-tot-een skaal in 'n werklike aanleg onder kontinue bedryfstoestande te toets.

Daar is egter sekere aspekte waar daar meer in diepte na gekyk moet word indien hierdie proses op grootskaal getoets word, soos die elektrolitiese sel en verandering van die mikrobiologiese kultuur tydens konstante ysterdosering. In hierdie hoofstuk sal daar aanbevelings gemaak word ten opsigte van die aspekte waaraan daar veral aandag gegee en dieper ondersoek moet word tydens 'n volskaalstudie.

7.2 Elektrolitiese sel

Om die proses meer ekonomies te maak word daar nog navorsing op die gebied van die elektrolitiese sel onder bedryfstoestande vereis. TABEL 3 en 4 toon byvoorbeeld hoe 'n verhoging in effektiwiteit van die sel of laer stroomdigthede die produksiekostes verlaag. Faktore waarna daar gekyk sal moet word ten einde die proses meer ekonomies te maak sluit in:

- Aanpakking van die plate. Hoe meer die plate aanpak, hoe laer is die effektiwiteit van die elektrolitiese stelsel. 'n Meganisme sal dus gevind moet word om aanpakking van die plate so laag as moontlik te hou. Metodes waarna gekyk kan word sluit in: periodieke meganiese skoonmaak; behandeling met suur; oormatige verhoging van die stroom/spanning vir

kort tydperke; periode van polariteitswisseling en sirkulasie van die elektroliet deur die plate.

- Opgeloste suurstofkonsentrasie in die elektroliet. Omdat outoksidasie van Fe^{2+} (wat tydens elektrolise gevorm word; AFDELING 3.1.1) na Fe^{3+} in teenwoordigheid van opgeloste suurstof in die elektrolietiese sel plaasvind, moet die invloed daarvan op die seleffektiwiteit meer in diepte ondersoek word.

- Elektrodemateriaal. Eksperimente met ander elektrodemateriaal as hoë kwaliteit sagtestaalplate moet gedoen word, byvoorbeeld met ronde stawe, roosters of selfs growwe ystervysels. Daar kan ook gekyk word of daar nie 'n goedkoop bron van yster gevind kan word nie, waarmee daar terselfdertyd hoë effektiwiteitsgrade behaal kan word.

- Rangskikking van die elektrodes. Indien byvoorbeeld ronde stawe gebruik word, sal daar gekyk moet word watter rangskikking 'n optimale is.

- Verhoging van die geleidingsvermoë van die elektroliet. Aanlegte wat naby die see geleë is, kan daaraan dink om die rioolwater te meng met seewater en sodoende die geleiding van die elektroliet te verhoog. Aangesien die spanning in die sel omgekeerd eweredig is aan die spesifieke geleiding van die elektroliet (sien VERGELYKING 10), sal dit 'n invloed op die ekonomie van die proses hê. Dit is onwaarskynlik dat, soos daar byvoorbeeld in Electrical World (1889) beweer word, chloorgas as byproduk gevorm sal word wat as ontsmetmiddel gebruik kan word. Indien so 'n reaksie wêl plaasvind, mag dosering nie in die biologiese reaktore plaasvind nie omdat chloorgas die mikro-organismes sal doodmaak. Tersiere behandeling van die uitvloeisel sal egter hiervoor ideaal wees omdat ontsmetting van die finale uitvloeisel dan terselfdertyd verkry word.

Addisionele sout byvoeging net om die geleidingsvermoë van die elektroliet te verhoog, by aanlegte wat vër van die see af is, moet nie eens oorweeg word nie.

Die skrywer is van mening dat 'n konstante effektiwiteit van ten minste 85% met die elektrolitiese sel behaal kan word, maar, om dit te bereik, word nog heelwat navorsing vereis.

7.3 Mikrobiologiese stelsel

Die gedagte agter chemiese- of elektrochemiese fosfaatverwydering was slegs om die proses te gebruik aanvullend tot biologiese fosfaatverwydering vir piek invloed fosfaatkonsentrasies wat die mikro-organismes nie meer kan hanteer nie. Dit blyk egter dat die mikro-organismes deur kontinue byvoeging van yster "vergiftig" word en hul vermoë om fosfaat te verwyder verloor (of uitsterf) wat hoër en hoër doserings vereis (Lötter, 1989). 'n Indiepte ondersoek na die werking van die biologiese stelsel wat die volgende aspekte behoort in te sluit word derhalwe ten sterkste aanbeveel:

- Karakterisering van die biologiese kultuur. 'n Metode om die biologiese samestelling in die onderskeie reaktore (anoksiese-, anaerobiese- en aerobiese reaktore) presies te bepaal sal ontwikkel moet word. Dit sluit nie net identifisering van die mikro-organismes in nie, maar vereis ook kwantifisering van die onderskeie spesies teenwoordig om te kan bepaal teen watter tempo byvoorbeeld die organismes verantwoordelik vir fosfaatverwydering uitgewas ("vergiftig") word as yster toegevoeg word. In die literatuur kon geen metode gevind word waarmee kwantitatief bepaal kan word wat die samestelling van die biologiese kultuur in geaktiveerde slykreaktore is nie. Pionierswerk word dus op hierdie gebied vereis.

- Slykkarakterisering. Veranderings in die samestelling en fisiese parameters van die slyk (besinkbaarheid, weerstand teen filtrasie, ens.) met byvoeging van yster moet noukeurig gemonitor word.

7.4 Samevatting

Die loodsskaalondersoek het getoon dat die elektolitiese proses lewensvatbaar kan wees en, veral in Suid-Afrika wat verskeie geslote opvanggebiede het, sterk as alternatief vir die suiwering van munisipale uitvloeisels oorweeg moet word. 'n Volskaalse ondersoek om te bepaal of die resultate wat met die loodsaanleg behaal is ook in groot suiweringswerke onder kontinue bedryf verkry word, word aanbeveel.

In die ondersoek het probleme wat met hierdie proses ondervind (kan) word duidelik na vore getree en kon daar aangetoon word op watter gebied verdere eksperimentele werk gedoen moet word. Die studie het dus verdere velde vir navorsing geopen.

VERWYSINGS

1. Baes, C.F. and Mesmer, R.E. Soos in Hong-Xiao, T. and Stumm, W. 1987 (a). The coagulating behaviors of Fe(III) polymeric species - I. Water Research, vol.21, no.1, p.115.
2. Barnard, J.L. 1983. Background to biological phosphorus removal. Water Science and Technology, vol.15, no.3/4, p.1-12.
3. Best, H.J. 1982. The need for chemical phosphate removal. Referaat te Vlakplaatswaterbesoedelingsbeheerwerke, Boksburg, op 26 Mei 1982.
4. Bockris, J.O.M. and Reddy, A.K.N. 1973. Modern electrochemistry - an introduction to an interdisciplinary area. New York: Plenum Press.
5. Brescia, F., Arents, J., Meislich, H. and Turk, A. 1970. Fundamentals of chemistry: a modern introduction. 2nd ed. New York: Academic Press.
6. Brubaker, G.R. and Phipps, P.B.P. 1979. Corrosion chemistry. Washington DC: ACS Symposium Series 89. (ISBN 0 8412 0471 3).
7. Charlot, G., Badoz-Lambling, J. and Tremillin, B. 1962. Electrochemical reactions. Amsterdam: Elsevier Publishing Company.
8. Coetzee, M. 1990. Kristallisasie van kalsiumfosfaat in 'n tweebedreaktor. M.Sc.-verhandeling. Universiteit van Pretoria.

9. Departement van Waterwese. 1986. Bestuur van die waterhulpbronne van die Republiek van Suid-Afrika. Kaapstad: CTP Boekdrukkers.
10. Dobolyi, E. 1978. Experiments aimed at the removal of phosphate by electrochemical methods. Water Research, vol.12, p.1113-1116.
11. Dousma, J. and de Bruyn, P.L. 1979. Soos in Lijklema, L. 1980. Interaction of orthophosphate with iron(III) and aluminum hydroxides. American Chemical Society, vol.14, no.5, p.538.
12. Ekama, G.A., Marais, G.v.R., and Siebritz, I.P. 1984. Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes. Water Research Commission. Pretoria: Water Research Commission. (ISBN 0 908356 13 7).
13. Electrical World. 1899. Soos in Miller, H.C. and Knipe, W. 1965. Electrochemical treatment of municipal waste water. Washington D.C.: U.S. Department of Health, Education and Welfare, Public Health Service Publication no. 999-WP-19.
14. Foster, P.A., Rowe, M.J. and Farrar, J.B. 1985. Ed: Polarity reversal or not? Proceedings. London: International Water Conference 85-31.
15. Grøterud, O. en Smoczyński, L. 1986 (a). Phosphorus removal from water by means of electrolysis. Water Research, vol.20, no.5, p.667-669.
16. Grøterud, O. en Smoczyński, L. 1986 (b). Phosphorus removal from wastewaters by electrolysis. Vatten, vol.42, no.1, p.33-35.

17. Grøterud, O. en Smoczyński, L. 1986 (c). Removal of phosphorus and residual aluminium by recirculating electrolysis of wastewater. Vatten, vol.42, no.4, p.293-296.
18. Hensman, L. C. 1985. The use of algae for the removal of phosphorus from secondary wastewater effluents. D.Eng thesis. University of Pretoria.
19. Hong-Xiao, T. and Stumm, W. 1987 (a). The coagulating behaviors of Fe(III) polymeric species - I. Water Research, vol.21, no.1, p.115-121.
20. Hong-Xiao, T. and Stumm, W. 1987 (b). The coagulating behaviors of Fe(III) polymeric species - II. Water Research, vol.21, no.1, p.123-128.
21. Johannes, H. 1990. Persoonlike kommunikasie.
22. Johannes, W.G. 1989. Elektrochemies-geproduseerde metaalkoagulante vir die verwydering van fosfaat uit rioolwater. M.Eng-verhandeling. Universiteit van Pretoria.
23. Lijklema, L. 1980. Interaction of orthophosphate with iron(III) and aluminum hydroxides. American Chemical Society, vol.14, no.5, p.537-541.
24. Lötter, L.H. 1989. Combined chemical and biological removal of phosphate in activated sludge plants. Minutes of the inaugural meeting of the steering committee for research on chemical augmentation of biological phosphate removal held in Johannesburg on 5 September 1988. Document 2/89. Pretoria: Water Research Commission.
25. Louw, A.S., Basson, H.J. and Alexander, W.V. 1988. Evaluation and optimisation of full-scale chemical phosphate

- removal in biological sewage treatment processes. Pretoria: Water Research Commission. (ISBN 0 947447 12 1).
26. Masterton, W.L., Slowinski, E.J. and Stanitski, C.L. 1985. Chemical principles. 6th ed. Tokio: Saunders College Publishing.
 27. Matis, K.A. 1980. Treatment of industrial liquid wastes by electroflotation. Water Pollution Control, vol.79, no.1, p136-142.
 28. Metcalf and Eddy. 1979. Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse. 2nd ed. Boston: McGraw-Hill Book Company.
 29. Miller, H.C. and Knipe, W. 1965. Electrochemical treatment of municipal waste water. Washington D.C.: U.S. Department of Health, Education and Welfare, Public Health Service Publication no. 999-WP-19.
 30. Murray, K.A. 1987. Wastewater treatment and pollution control. Pretoria: Heer Printing Co (Bophuthatswana) (Pty) Ltd. (ISBN 0 908356 55 2).
 31. Musquere, P. 1983. Electrotechnics in drinking and waste water. Proceedings. Sandefjord (Norway): The VIIth Scandinavian Symposium on Surface Chemistry.
 32. Ouelette, R.P., King, J.A. and Cheremisinoff, P.N. 1978. Electrotechnology. Volume 1: Wastewater treatment and separation methods. Michigan: Ann Arbor Science Publishers Inc.
 33. Owen, W.F. 1982. Energy in wastewater treatment. New York: Prentice-Hall Inc.

34. Pandit, R.K. and Mayadeo, M.S. 1985. Electrochemical treatment of wastewater. Journal of the Electrochemical Society, India, vol.34, no.1, p.70-73.
35. Paul. Soos in Johannes, W.G. 1989. Elektrochemies-geproduseerde metaalkoagulante vir die verwydering van fosfaat uit rioolwater. M.Ing-verhandeling. Universiteit van Pretoria.
36. Pickett, D.J. 1979. Electrochemical reactor design, 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
37. Plechter, D. 1981. Industrial electrochemistry. London: Chapman and Hall.
38. Poon, C.P.C. and Brueckner, T.G. 1975. Physicochemical treatment of wastewater-seawater mixture by electrolysis. Journal of the Water Pollution Control Federation, vol.47, no.1, p66-78.
39. Pretorius, W.A. 1983. Should the phosphate concentration in sewage effluents be restricted? IMIESA, vol.8, no.9.
40. Rabinowitz and Marais. 1989. Soos in Lötter, L.H. 1989. Combined chemical and biological removal of phosphate in activated sludge plants. Minutes of the inaugural meeting of the steering kommittee for research on chemical augmentation of biological phosphate removal held in Johannesburg on 5 September 1988. Document 2/89. Pretoria: Water Research Commission.
41. Rousar, I., Micka, K. and Kimla, A. 1986. Electrochemical engineering. New York: Elsevier Sience Publishing Company, Inc.

42. Schalekamp. Soos in Van Leeuwen, J. 1986. Waterbeplanning 5CW7 kernaantekeninge. Pretoria: Departement van Chemiese Ingenieurswese, Universiteit van Pretoria.
43. Slim, J.A. 1987. Some developments in the water industry in South Africa. Water Pollution Control, vol.86, no.2, p.262.
44. Standard methods for the examination of water and wastewater., edited by M.A.H. Franson. 15th ed. Washington, DC: American Public Health Association.
45. Toerien, D.F. 1975. South African eutrofication problems - a perspective. Water Pollution Control, vol.74, no.2. p.28-35.
46. Toerien, D.F., Hyman, K.L. and Bruwer, M.J. 1975. A preliminary trophic status classification of some South African impoundments. Water SA, vol.1, p.5-8.
47. Tunturi, P.J. 1976. Electrochemical treatment of process waste water containing colloidal particles. International Chemical Engineering, vol.16, no.2, p.222-228.
48. U.S. Patent 398 101. 1889. Soos in Miller, H.C. and Knipe, W. 1965. Electrochemical treatment of municipal waste water. Washington D.C.: U.S. Department of Health, Education and Welfare, Public Health Service Publication no. 999-WP-19.
49. Van Dijk, J.C. and Braakensiek, H. 1984. Phosphate removal by crystallisation in a fluidized bed. Water Science Technology, vol.17, no.2/3, p.133-142.
50. Van Leeuwen, J. 1986. Waterbeplanning 5CW7 kernaantekeninge. Pretoria: Departement van Chemiese Ingenieurswese. Universiteit van Pretoria.

51. Vik, E.A., Carlson, D.A., Eikum, A.S. and Gjessing, E.T. 1984. Electrocoagulation of potable water. Water Research (Oxford,UK), vol.18, no.11, p.1355-1360.
52. Wrigley, T.J. and Toerien. D.F. 1988. The ability of an artificially established wetland to meet water quality criteria. Water SA, vol.14, no.4, p.38-46.

AANHANGSEL B:
LABORATORIUMONDERSOEK

EKSPERIMENTELE DATA

TABEL B-1: SELEFFEKTIVITEIT EN ENERGIEVERBRUIK BY VERSKILLENDE STROOMDICHTEDE

AANTAL PLATE = 5 (N = 4) ;
AFSTAND TUSSEN PLATE = 9mm

VERANDERLIKE : i

I (A)	i (A/m ²)	Esel (V)	Mp (g)	Et (V)	Mt (g)	Esel/Et (%)	Wp/Wt (%)	TYD (min)	Ep	Pg
0.72	18.18	8.61	6.42	6.55	6.02	131.45	106.64	120.00	144	1.93
0.78	19.70	8.96	7.02	7.88	6.48	113.71	108.33	120.00	140	1.99
2.17	54.80	20.99	16.83	19.73	18.13	106.39	92.83	120.00	51	5.41
2.17	54.80	17.02	32.63	19.73	36.27	86.26	89.96	240.00	61	4.53
4.59	115.91	34.18	66.01	41.73	76.71	81.91	86.05	240.00	30	9.51
4.70	118.69	34.70	54.36	47.47	58.91	73.10	92.28	180.00	31	9.00
7.20	181.82	64.65	93.72	65.45	105.29	98.78	89.01	210.00	16	17.38
10.85	273.99	64.70	80.88	93.94	90.68	68.87	89.19	120.00	16	17.36

TABEL B-2: ENERGIEVERBRUIK EN PRODUKSJETEMPO BY TOENEMENDE STROOMDICHTEID

AANTAL PLATE = 5 (N = 4) ;

VERANDERLIKE : d vir verskillende i-waardes (hoog, medium, laag)

I (A)	i (A/m ²)	Esel (V)	Wp (g)	TYD (min)	PRODUKSIE (mgFe/kVA)	ENERGIE (W.h/g)
d = 5mm :						
0.82	21	5.92	8.25	120	237.49	1.17
1.26	32	7.01	11.15	120	175.45	1.58
2.51	66	12.04	17.45	120	80.20	3.46
3.45	90	16.12	25.79	120	64.50	4.31
d = 9mm:						
0.72	18	8.61	6.42	120	143.84	1.93
0.78	20	8.97	7.02	120	140.33	1.98
2.17	55	20.99	16.83	120	51.32	5.41
4.78	121	34.80	38.41	120	32.10	8.65
10.85	274	64.80	80.88	120	15.98	17.39
d =15mm:						
0.74	20	10.86	5.84	120	100.93	2.75
0.78	21	11.98	5.56	120	83.21	3.34
2.22	59	28.22	15.62	120	34.71	8.00
d =20mm:						
0.75	20	13.71	5.36	120	72.91	3.81
2.22	58	31.80	17.16	150	27.01	10.28
3.86	101	59.13	25.15	120	15.31	18.15

TABEL B-4: ENERGIEVERBRUIK EN PRODUKSIETEMPO VIR VERSKILLENDE PLAATOPPERVLAKTES

VERANDERLIKE : $A_o = 0.0396\text{m}^2$
 $A_i = 0.02786\text{m}^2$
 $A_{ii} = 0.01393\text{m}^2$

AFSTAND TUSSEN PLATE = 9mm
AANTAL PLATE = 5 (N = 4) ;

Ip (A)	i (A/m ²)	Vp (V)	Wp (g)	Tyd (min)	KOAGULANTPRODUKSIE			ENERGIEVERBRUIK		
					Ao	Ai (mgFe/kVA)	Aii	Ao	Ai (W.h/g)	Aii
0.72	18.18	8.61	6.42	120.00	143.84			1.93		
0.78	19.70	8.96	7.02	120.00	139.51			1.99		
2.17	54.80	17.02	32.63	240.00	61.35			4.53		
2.17	54.80	20.99	16.83	120.00	51.32			5.41		
4.59	115.91	34.18	66.01	240.00	29.22			9.51		
4.70	118.69	34.70	54.36	180.00	30.86			9.00		
7.20	181.82	64.65	93.72	210.00	15.98			17.38		
10.85	273.99	64.70	80.88	120.00	16.00			17.36		

0.54	19.38	8.06	4.71	120.00		150.30			1.85	
1.68	60.12	19.47	19.56	190.00		52.46			5.30	
3.72	133.35	29.95	22.82	120.00		28.45			9.76	
4.29	153.80	65.45	33.10	120.00		16.37			16.97	
4.50	161.34	65.40	48.57	180.00		15.28			18.18	

0.30	21.54	9.07	3.24	120.00			165.38			3.99
0.93	66.40	21.20	11.20	190.00			49.83			17.46
1.48	106.25	30.84	9.30	120.00			28.30			33.82
2.31	165.83	65.50	24.34	180.00			14.90			47.21
2.47	176.96	65.90	13.39	90.00			15.23			48.96

TABEL B-3: ENERGIEVERBRUIK EN PRODUKSIETEMPO INDIEN DIE AANTAL PLATE GEWISSEL WORD

AFSTAND TUSSEN PLATE ;
VERANDERLIKE : i

AANTAL PLATE WISSEL: N = 2, 4, 6, en 8

I (A)	i (A/m ²)	Esel (V)	Wp (g)	TYD (MIN)	KOAGULANTPRODUKSIE				ENERGIEVERBRUIK			
					N=2	N=4	N=6	N=8	N=2	N=4	N=6	N=8
					(mgFe/kVA)				(W.h/g)			
0.58	14.65	3.21	2.96	120	220.81				1.26			
0.77	19.44	4.24	3.80	120	161.66				1.72			
1.55	39.14	6.05	6.74	120	99.83				2.78			
2.55	64.39	19.33	10.55	120	29.73				9.34			
0.72	18.18	8.61	6.42	120		143.84				1.93		
0.78	19.70	8.96	7.02	120		139.51				1.99		
2.17	54.80	20.99	16.83	120		51.32				5.41		
4.59	115.91	34.18	68.82	240		30.46				9.12		
0.69	17.42	12.22	8.48	120			139.68				2.84	
1.25	31.57	26.63	15.20	120			63.42				5.19	
1.75	44.19	47.56	21.06	120			35.14				7.34	
2.25	56.82	53.88	26.80	120			30.70				9.54	
0.93	23.48	28.48	15.22	120				79.81				3.48
1.12	28.28	30.40	17.97	120				73.30				3.79
1.25	31.57	31.30	19.84	120				70.43				3.94
1.48	37.37	39.70	22.51	120				53.21				5.22
2.40	60.61	63.24	34.08	120				31.19				8.91

TABEL B-5: ENERGIEVERBRUIK EN PRODUKSIE TEMPO OM Fe(II) EN Fe(III) ONDERSKEIDELIK

AANTAL PLATE = 5 (N = 4) ;
AFSTAND TUSSEN PLATE = 9mm

VERANDERLIKE : i
AREA PER PLAAT = 0.0396m²

I (A)	i (A/m ²)	Vsel (V)	Wp (g)	TYD (min)	KOAGULANTPRODUKSIE		ENERGIEVERBRUIK	
					Fe(II) (mgFe/kVA)	Fe(III) (mgFe/kVA)	Fe(II) (W.h/g)	Fe(III) (W.h/g)
0.72	18.18	8.61	6.42	120.00		143.84		1.93
0.78	19.70	8.96	7.02	120.00		139.51		1.99
2.17	54.80	17.02	32.63	240.00		61.35		4.53
2.17	54.80	20.99	16.83	120.00		51.32		5.41
4.59	115.91	34.18	66.01	240.00		29.22		9.51
4.70	118.69	34.70	54.36	180.00		30.86		9.00
0.79	19.82	9.03	6.53	120.00	127.94		2.17	
0.80	21.14	9.58	6.32	120.00	115.31		2.41	
0.88	22.22	8.63	6.86	120.00	125.46		2.21	
1.14	31.69	12.98	8.71	120.00	82.15		3.38	
1.68	42.30	11.53	10.99	120.00	79.07		3.51	
3.73	94.19	35.89	19.47	120.00	20.20		13.75	

TABEL B-6: PRODUKSIEKOSTES OM YSTER ELEKTROLITIES OP TE LOS

AANTAL PLATE = 5 (N = 4) ;
AFSTAND TUSSEN PLATE = 9mm ;

VERANDERLIKE : i
AREA PER PLAAT = 0,0396m²

I (A)	i (A/m ²)	Esel (V)	Wp (g)	TYD (min)	Ew (W.h/g)	KOSTES (R/dag)
0.72	18.18	8.61	6.42	120.00	1.93	318.13
0.78	19.70	8.96	7.02	120.00	1.99	318.87
2.17	54.80	20.99	16.83	120.00	5.41	361.62
2.17	54.80	17.02	32.63	240.00	4.53	350.56
4.59	115.91	34.18	66.01	240.00	9.51	412.76
4.70	118.69	34.70	54.36	180.00	9.00	406.44
7.20	181.82	64.65	93.72	210.00	17.38	511.16
10.85	273.99	64.70	80.88	120.00	17.36	510.85

TABEL B-6: PRODUKSIEKOSTES OM YSTER ELEKTROLITIES OP TE LOS

AANTAL PLATE = 5 (N = 4) ;
AFSTAND TUSSEN PLATE = 9mm ;

VERANDERLIKE : i
AREA PER PLAAT = 0,0396m²

AANHANGSEL C:

LOODSSKAALSTUDIE

EKSPERIMENTELE DATA
GRAFIEKE

TABEL C-1: ANALISE VAN RIOOLWATER - DAAGLIKSE GEMIDDELTES

MAAND: AUGUSTUS

DATUM	C S B (mg/l as O)		T K N (mg/l as N)		O - PO ₄ (mg/l as P)		Troebelheid (NTE)		KLEUR		p H		Fe-dosering	
	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	(mg/l as Fe)	dos. punt*
1	588	152	41.16	13.64	6.28	1.45	38	7.2	>200	125	7.84	7.60	-	1)
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8	450	132	29.12	9.80	6.53	1.48	60	17.0	>200	125	7.57	7.73	-	
9	340	48	25.76	7.84	7.90	0.92	45	3.4	>200	150	7.89	8.06	8.0	c
10	296	178	19.60	5.32	11.38	0.28	26	19.0	150	100	7.92	7.99	16.5	
11	250	110	21.84	3.08	8.53	0.57	29	16.0	120	100	7.84	7.99	10.5	
12					11.33	0.66							10.5	
13					6.22	0.93							12.0	
14	409	96	26.64	7.00	7.33	0.94	47	8.5	>200	125	7.70	7.95	7.0	
15	462	88	28.65	6.72	6.94	0.86	40	5.0	>200	100	7.88	7.94	7.0	
16	328	24	37.24	4.90	7.42	0.57	49	1.7	>200	75	8.00	8.09	10.5	
17	484	140	31.36	2.80	11.02	0.62	58	2.0	>200	100	7.80	7.70	10.5	
18	364	224	25.75	3.92	7.98	3.05	55	20.0	>200	75	7.51	8.05	-	2)
19					9.66	10.69							-	
20					9.24	9.17							-	
21	420	144	28.56	16.66	8.02	2.29	52	22.0	175	100	7.59	8.04	-	
22	474	104	27.72	14.42	9.56	1.24	42	5.4	>200	75	7.63	7.90	8.5	d
23	494	112	28.00	7.70	9.64	0.61	52	7.8	>200	50	7.43	7.72	10.0	
24	510	122	31.92	12.88	8.09	1.85	47	12.0	>200	100	7.48	7.75	-	3)
25	408	92	29.12	12.87	8.61	1.14	53	11.0	175	125	7.53	7.80	8.0	
26					9.89	9.92							-	4)
27					9.24	3.26							-	
28	396	216	27.16	16.88	8.88	2.35	62	31.0	>200	125	7.46	7.82	-	
29	442	202	31.11	16.52	8.63	2.56	58	32.0	>200	100	7.55	7.88	-	
30	448	192	29.44	12.88	7.66	0.98	56	28.0	>200	125	7.66	7.93	8.5	d
31	510	130	35.56	14.56	8.14	0.78	60	20.0	>200	100	7.54	7.93	9.5	

OPMERKINGS:

- * Vergelyk FIGUUR 21
- 1) Laat aanleg stabiliseer
- 2) Aanleg staan vir ongeveer 6 ure
- 3) Dosering vir een dag tussenin onderbreek
- 4) Aanleg staan vir ongeveer 8 ure

TABEL C-2: ANALISE VAN RIOOLWATER - DAAGLIKSE GEMIDDELDEN

MAAND: SEPTEMBER

DATUM	C S B (mg/l as O)		T K N (mg/l as N)		O - PO4 (mg/l as P)		Troebelheid (NTE)		KLEUR		p H		Fe-dosering	
	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	(mg/l as Fe)	dos. punt*
1	379	112	36.41	15.40	7.43	0.68	56	19.0	150	100	7.60	7.92	9.0	d
2					8.89	0.68							10.0	
3					8.58	0.71							9.0	
4	398	132	29.40	7.98	7.65	0.62	120	29.0	175	100	7.55	7.77	9.0	
5	434	216	29.68	11.06	5.74	3.03	98	28.0	>200	125	7.78	7.85	-	1)
6	478	152	29.62	14.00	6.20	2.46	112	17.0	175	75	7.68	7.86	-	
7	540	128	34.44	15.12	7.46	2.86	108	12.0	175	125	7.66	7.83	-	
8	382	124	28.70	12.04	7.72	1.28	106	14.0	175	125	7.50	7.81	9.0	d
9					9.23	0.98							9.0	
10					9.19	0.96							9.0	
11	420	140	34.44	13.13	9.56	2.02	96	17.0	>200	75	7.80	7.80	-	2)
12	488	138	35.84	12.88	9.19	1.55	130	23.0	140	70	7.55	7.66	-	
13	474	160	31.92	12.04	7.41	1.29	98	27.0	150	35	7.60	7.77	-	
14	454	124	33.04	11.06	7.72	1.31	103	25.0	>200	80	7.53	7.79	-	
15	422	102	37.52	14.56	8.61	1.33	100	17.0	150	50	7.53	7.71	-	
16					8.71	1.28							-	
17					8.18	1.41							-	
18	348	84	42.56	14.56	7.17	0.63	87	8.2	120	50	7.89	7.87	10.0	a
19	453	109	31.81	14.44	8.12	0.77	96	11.0	150	55	7.77	7.88	9.0	
20	382	110	33.04	14.14	7.94	0.85	89	8.0	160	50	7.63	7.80	8.0	
21	468	102	33.32	11.76	8.48	0.63	98	7.6	160	60	7.54	7.78	10.0	
22	548	156	57.96	13.58	8.87	0.76	130	28.0	200	125	7.59	7.76	10.0	
23					8.89	0.94							8.5	
24					8.42	0.96							8.5	
25	360	248	32.48	7.00	7.51	0.58	83	7.4	180	140	7.76	7.11	13.0	
26	534	170	34.44	7.42	10.28	0.91	90	27.0	180	40	7.56	7.70	10.0	e
27	452	180	27.44	6.30	7.53	0.63	92	14.0	200	125	7.60	7.69	12.0	
28	448	202	38.08	8.12	8.53	0.52	100	42.0	150	100	7.52	7.71	14.0	
29	416	262	43.68	8.96	8.28	0.50	82	17.0	200	100	7.60	7.72	14.0	
30					9.17	0.87							8.0	

OPMERKINGS:

- * Vergelyk FIGUUR 21
- 1) Sekering van elektrolitiese stroombaan brand deur
- 2) Laat aanleg herstel om ystertoevoegingspunt te verander

TABEL C-3: ANALISE VAN RIOOLWATER - DAAGLIKSE GEMIDDELDDES

MAAND: OKTOBER

DATUM	C S B (mg/l as O)		T K N (mg/l as N)		O - PO ₄ (mg/l as P)		Troebelheid (NTE)		KLEUR		p H		Fe-dosering (mg/l as Fe) dos. punt*	
	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit		
1					6.83	0.87							7.0	e
2	344	252	29.68	8.92	6.89	0.50	89	52	200	150	7.63	7.82	8.0	
3	470	192	35.28	12.60	9.30	0.58	96	46	200	150	7.52	7.64	10.0	
4	496	144	34.16	22.12	7.82	9.97	100	48	140	50	7.57	7.69	-	1)
5	640	160	21.84	12.88	8.23	6.62	98	52	125	75	7.49	7.57	-	
6	422	137	28.00	14.14	8.35	2.16	91	44	100	75	7.57	7.70	-	
7					7.29	1.46							-	
8					7.45	1.44							-	
9	362	252	30.52	9.24	7.38	1.47	99	48	125	100	7.62	7.83	-	
10	466	190	27.11	10.14	9.54	0.66	112	22	>200	100	7.18	7.33	10.0	b
11	342	118	29.68	11.90	7.82	0.68	96	19	120	60	7.87	7.62	8.0	
12	466	138	31.36	12.32	8.05	2.71	102	23	150	64	7.51	7.82	-	2)
13	560	140	31.38	17.22	9.25	1.43	110	31	110	60	7.48	7.88	10.0	
14					9.79	0.94							9.5	
15					8.45	0.96							8.0	
16	368	132	26.32	15.96	8.16	0.73	98	45	140	45	7.41	7.70	9.0	
17	484	160	29.12	13.44	8.12	0.68	114	33	140	40	7.44	7.81	9.0	
18	554	212	24.64	9.24	8.63	0.55	110	42	140	40	7.36	7.39	12.0	
19	458	142	26.32	6.72	8.64	0.59	100	34	140	60	7.29	7.97	12.0	
20	544	380	28.84	13.72	9.23	3.32	102	19	180	50	7.29	7.97	-	3)
21													-	
22													-	
23													-	
24													-	
25													-	
26													-	
27													-	
28													-	
29													-	
30													-	
31	518	180	33.74	21.24	13.01	3.56	110	17	200	75	7.65	7.83	-	

OPMERKINGS:

* Vergelyk met FIGUUR 21

1) Slyktersirkulasie blokkeer

2) Polariteitswisselaar brand vas

3) Aanleg stabiliseer met opstelling vir biologiese stikstofverwydering

TABEL C-4: ANALISE VAN RIOOLWATER - DAAGLIKSE GEMIDDELDDES

MAAND: NOVEMBER

DATUM	C S B (mg/l as O)		T K N (mg/l as N)		O - PO ₄ (mg/l as P)		Troebelheid (NTE)		KLEUR		p H		Fe-dosering	
	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	(mg/l as Fe)	dos. punt*
1	442	244	30.52	14.28	8.49	1.82	110	37.0	140	40	7.47	7.57	8.0	f
2	440	224	39.76	20.16	8.41	1.46	98	44.0	160	100	7.41	7.75	10.0	
3	394	236	34.44	15.68	6.88	0.58	94	62.0	160	100	7.35	7.59	15.0	
4					6.62	0.87							15.0	
5					7.42	0.56							15.0	
6	338	306	26.32	7.84	7.82	1.75	92	28.0	180	100	7.46	7.58	8.0	
7	294	224	18.48	5.32	8.69	2.28	92	40.0	180	75	7.43	7.51	4.0	
8	378	254	27.44	13.72	7.10	3.26	91	35.0	160	75	7.49	7.58	-	1)
9													-	
10													-	
11													-	
12													-	
13													-	
14													-	
15	416	216	27.44	21.84	7.51	3.04	85	31.0	160	40	7.45	7.79	-	
16	388	108	29.12	21.82	7.18	1.55	94	38.0	180	50	7.43	7.85	4.0	g
17	380	104	25.76	24.36	7.52	1.73	96	32.0	160	40	7.47	7.73	6.0	
18					7.60	1.88							8.0	
19					7.54	1.60							8.0	
20	336	156	26.88	20.79	7.06	1.67	97	12.0	100	75	7.44	7.93	8.0	
21	410	116	34.16	21.00	8.67	0.65	93	21.0	160	40	7.44	7.87	16.0	
22	410	144	28.00	22.96	8.14	0.68	92	27.0	150	40	7.38	7.85	16.0	
23	384	124	26.88	17.08	8.31	0.97	93	52.0	180	40	7.41	7.78	16.0	
24	512	174	24.64	15.68	8.85	0.97	110	48.0	200	50	7.67	7.82	16.0	
25					8.12	1.33							10.0	h
26					8.05	1.68							8.0	
27	392	96	20.72	15.12	7.97	1.75	102	46.0	160	30	7.56	7.84	8.0	
28	484	94	28.56	17.36	8.75	2.37	97	42.0	140	40	7.30	7.75	4.0	2)
29	456	158	29.68	22.96	7.72	3.24	94	40.0	180	40	7.08	7.34	-	
30	408	248	28.56	19.60	7.54	3.06	89	35.0	180	60	7.27	7.69	-	

OPMERKINGS:

* Vergelyk met FIGUUR 21

1) Slyktersirkulasie af - aanleg herstel

2) Laat aanleg herstel (sonder ysterdosering)

TABEL C-5: ANALISE VAN RIOOLWATER - DAAGLIJKE GEMIDDELDDES

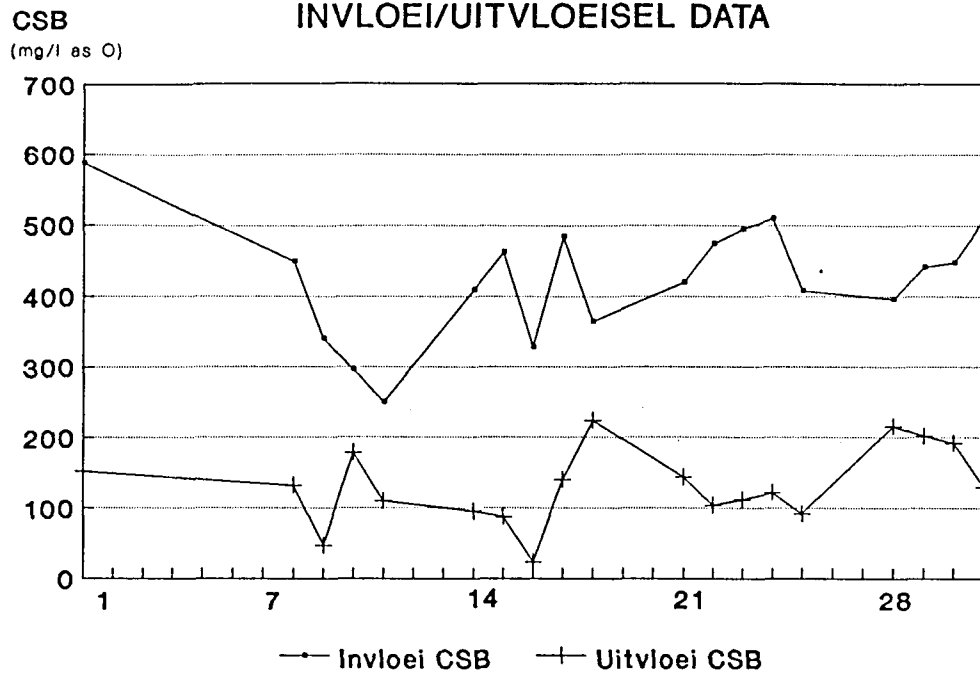
MAAND: DESEMBER

DATUM	C S B (mg/l as O)		T K N (mg/l as N)		O - PO4 (mg/l as P)		Troebelheid (NTE)		KLEUR		p H		Fe-dosering	
	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	In	Uit	(mg/l as Fe)	dos. punt*
1	220	38	22.96	8.32	4.8	0.47	48	0.9	60	5	7.51	7.54	6.5	1
2					3.45	0.38							6.5	
3					3.22	0.44							6.5	
4	230	26	21.76	9.52	3.51	0.48	22	0.9	75	10	7.68	7.6	6.5	
5	202	28	17.08	7.62	3.44	0.39	28	0.8	80	10	7.84	7.51	6.5	
6	264	26	19.46	7.77	3.56	0.42	36	0.8	75	5	7.75	7.7	6.5	

OPMERKINGS:

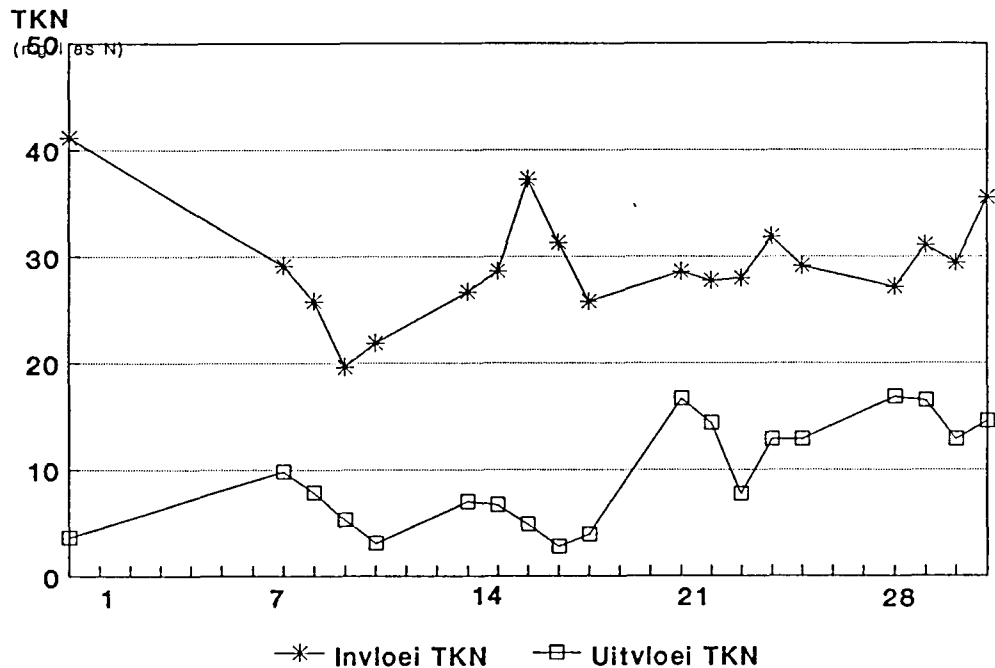
* Vergelyk FIGUUR 21

ANALISES VIR AUGUSTUS INVLOEI/UITVLOEISEL DATA



AUGUSTUS

FIGUUR C-1: Daaglikse gemiddelde CSB-waardes vir Augustus 1989

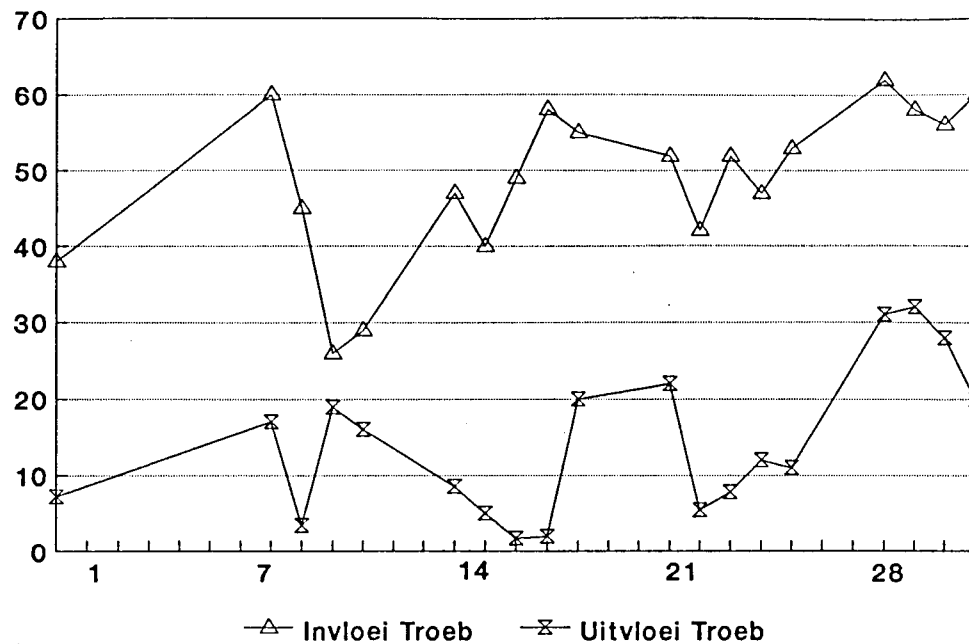


AUGUSTUS

FIGUUR C-2: Daaglikse gemiddelde TKN-waardes vir Augustus 1989

TROEBELHEID

(NTE)

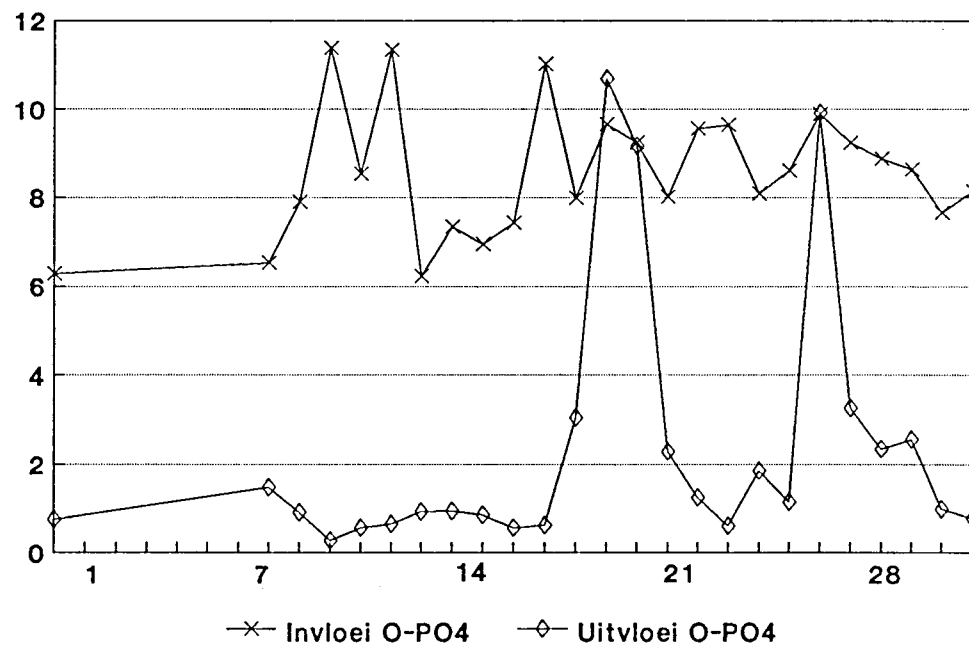


AUGUSTUS

FIGUUR C-3: Daaglikse gemiddelde troebelheid vir Augustus 1989

O-PO₄

(mg/l as P)

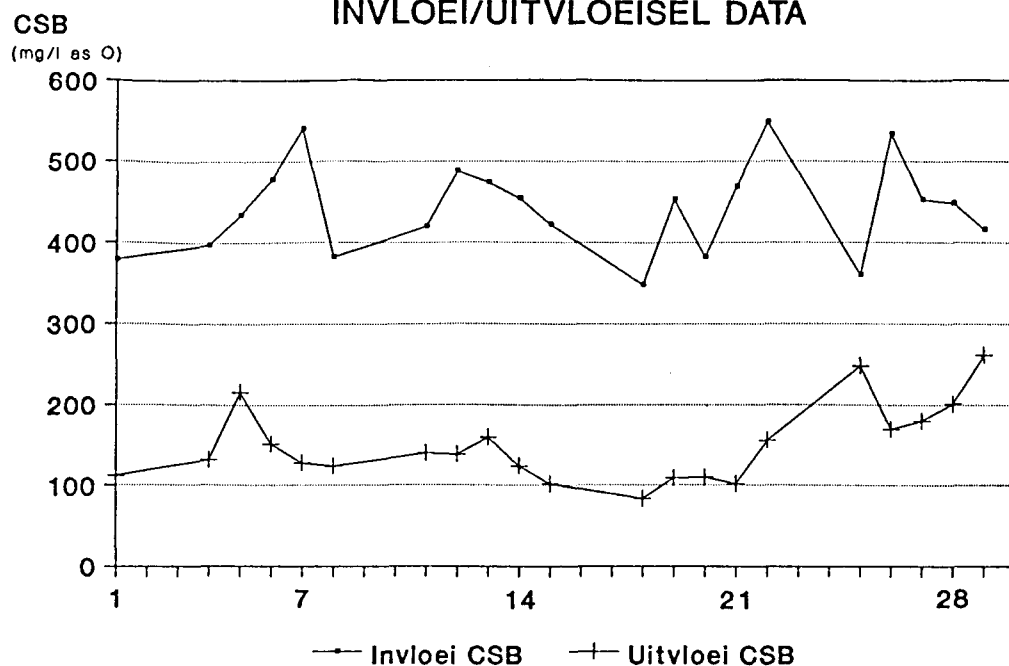


AUGUSTUS

FIGUUR C-4: Daaglikse gemiddelde ortofosfaatkonsentrasies vir Augustus 1989

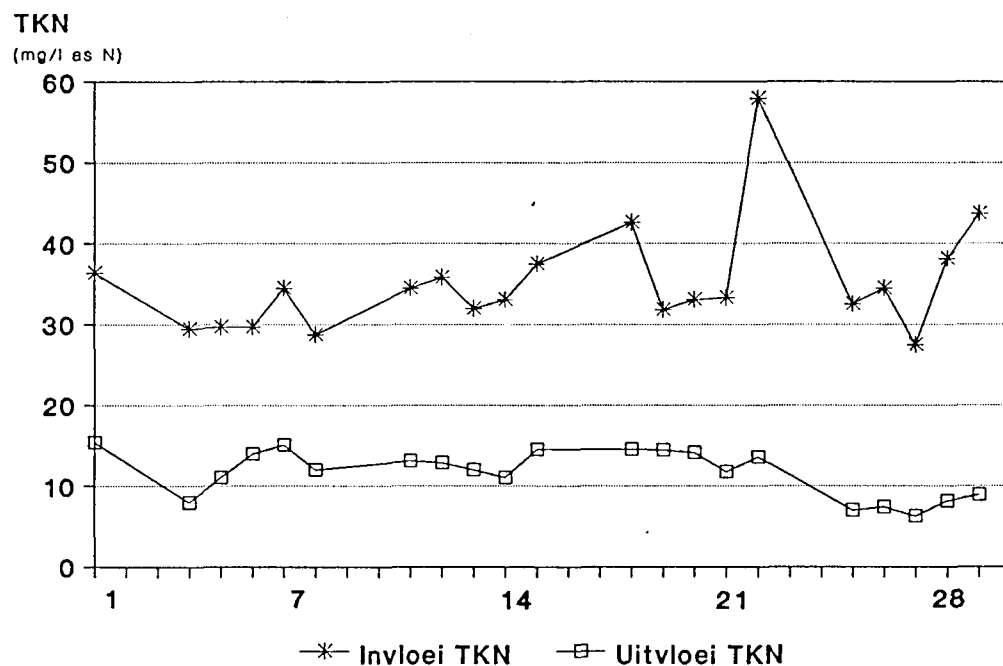
LAB ANALISES VIR SEPTEMBER

INVLOEI/UITVLOEISEL DATA



SEPTEMBER

FIGUUR C-5: Daaglikse gemiddelde CSB-waardes vir September 1989

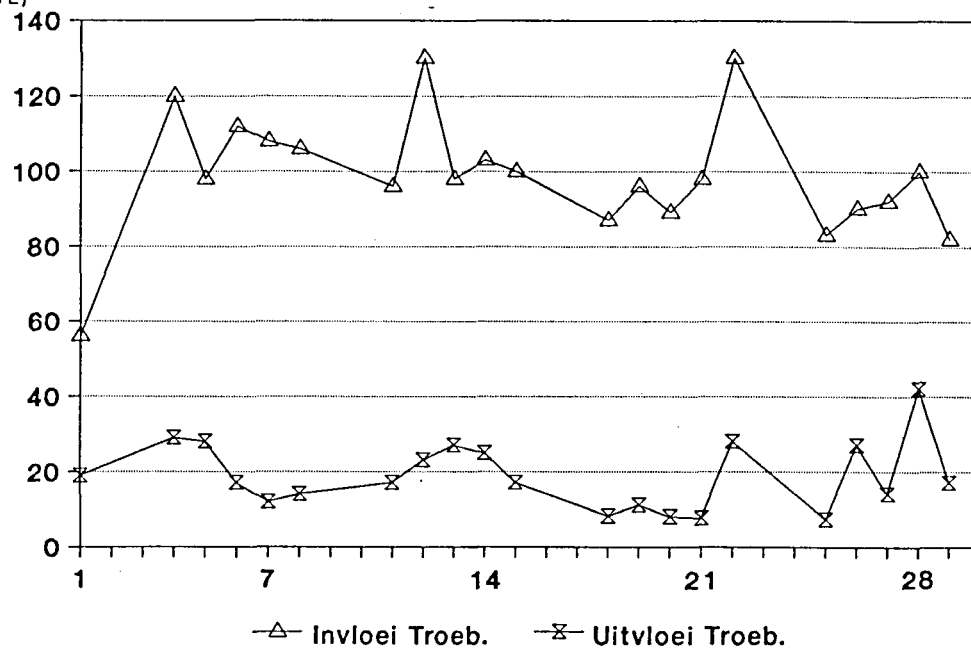


SEPTEMBER

FIGUUR C-6: Daaglikse gemiddelde TKN-waardes vir September 1989

TROEBELHEID

(NTE)

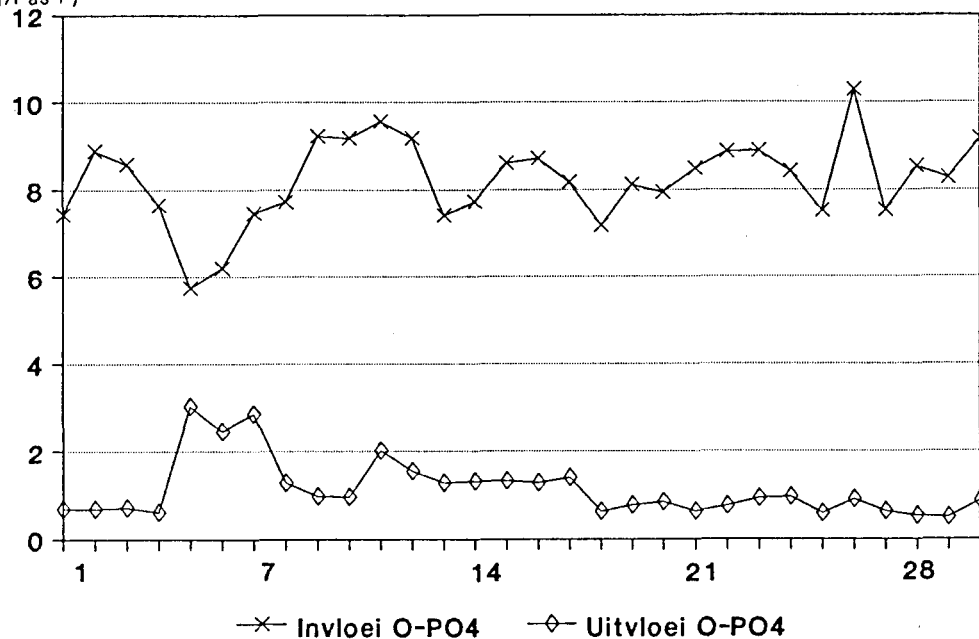


SEPTEMBER

FIGUUR C-7: Daaglikse gemiddelde troebelheid vir September 1989

O-PO₄

(mg/l as P)

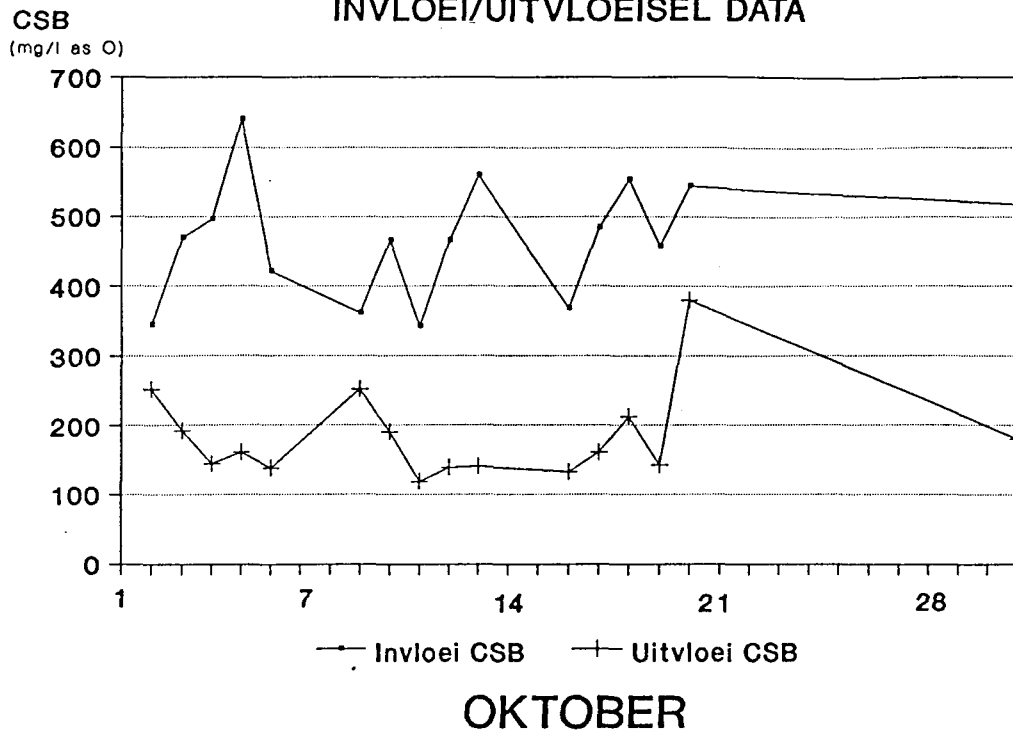


SEPTEMBER

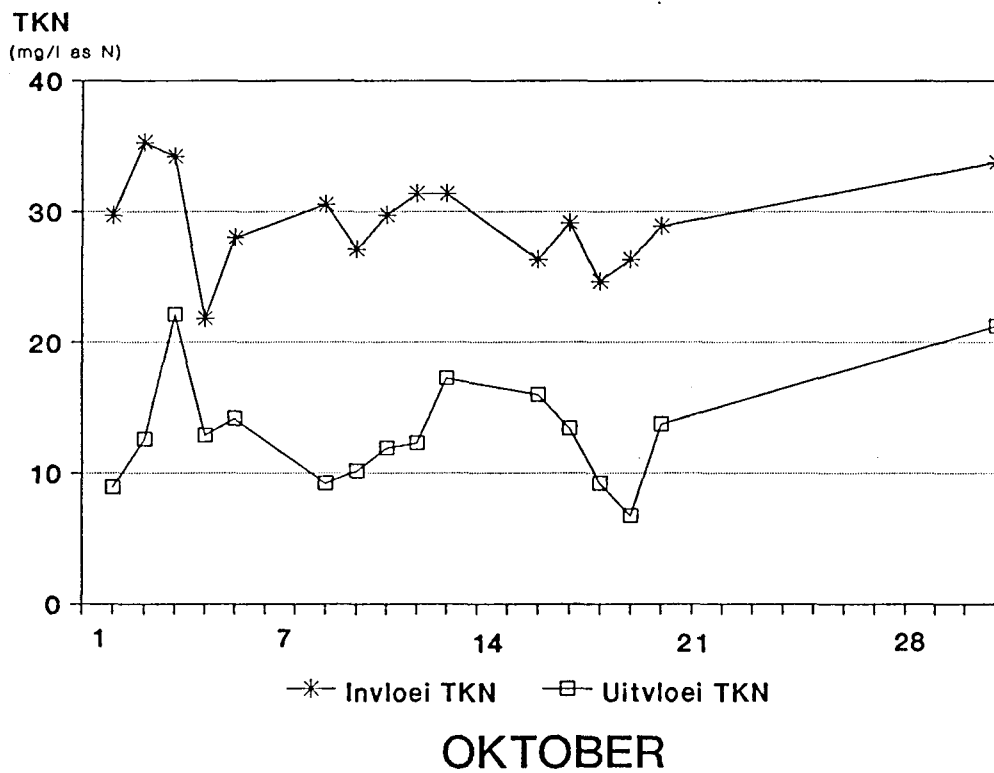
FIGUUR C-8: Daaglikse gemiddelde ortofosfaatkonsentrasies vir September 1989

LAB ANALISES VIR OKTOBER

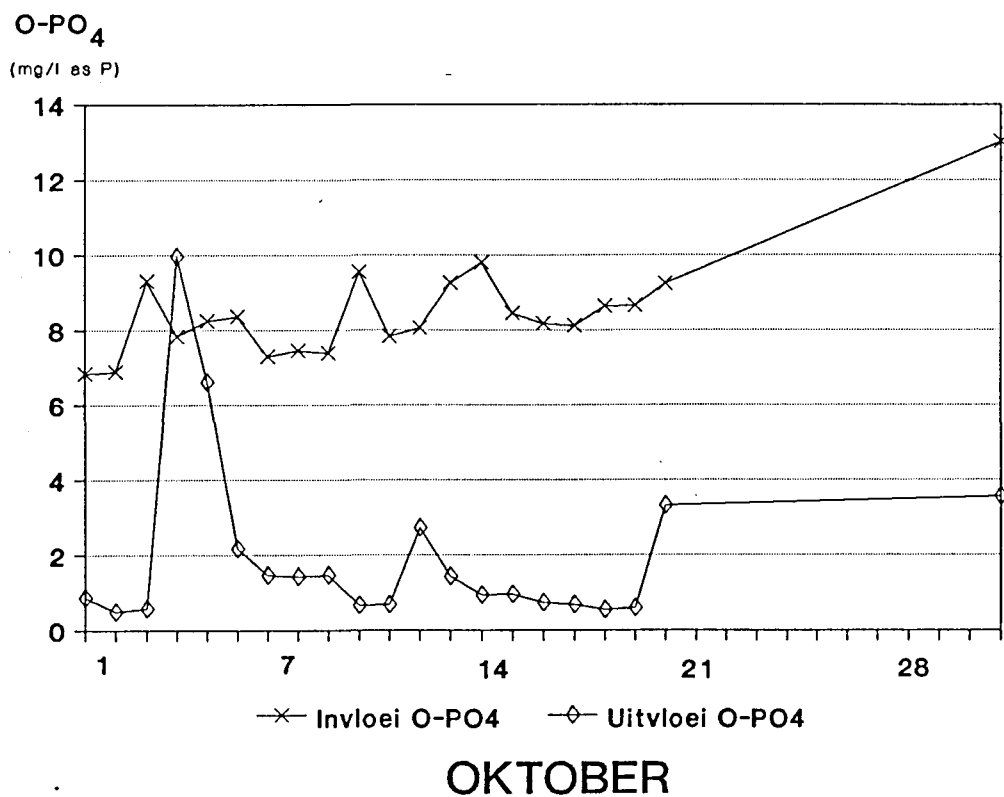
INVLOEI/UITVLOEISEL DATA



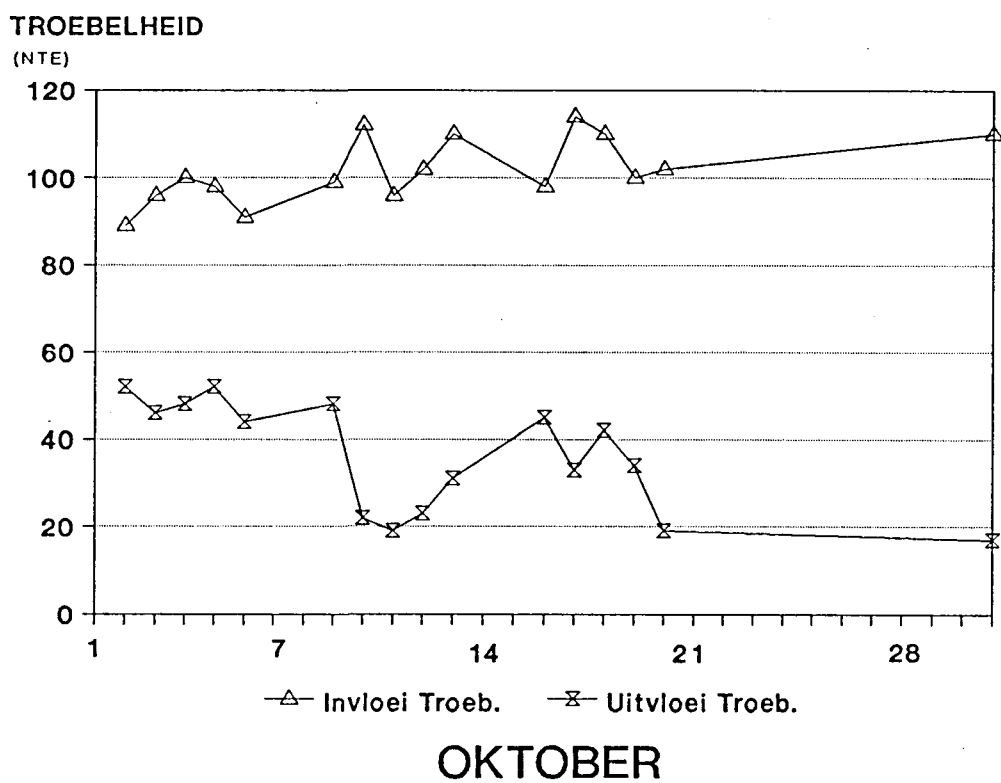
FIGUUR C-9: Daaglikse gemiddelde CSB-waardes vir Oktober 1989



FIGUUR C-10: Daaglikse gemiddelde TKN-waardes vir Oktober 1989



FIGUUR C-11: Daaglikse gemiddelde ortofosfaatkonsentrasies vir Oktober 1989

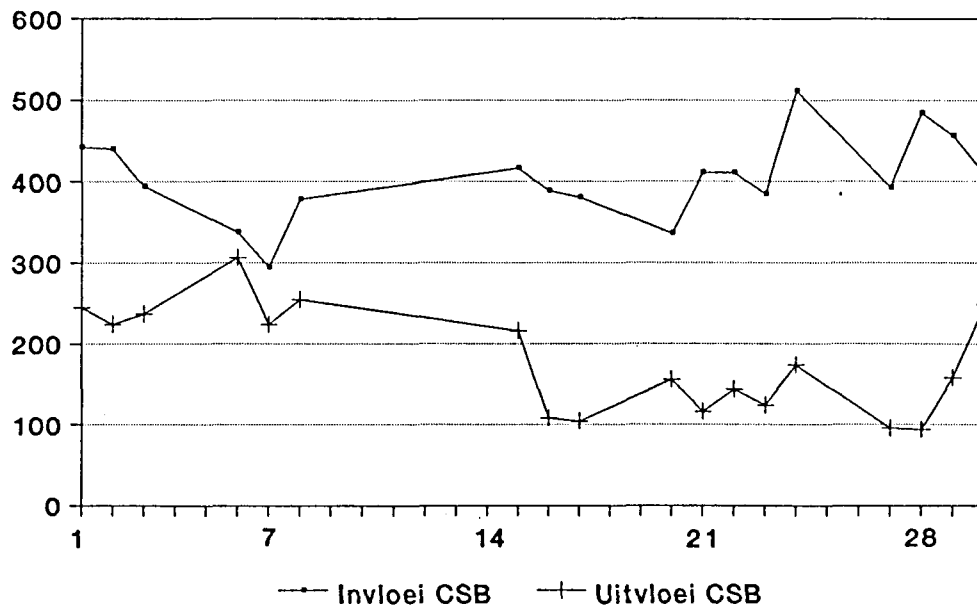


FIGUUR C-12: Daaglikse gemiddelde troebelheid vir Oktober 1989

LAB ANALISES VIR NOVEMBER

INVLOEI/UITVLOEISEL DATA

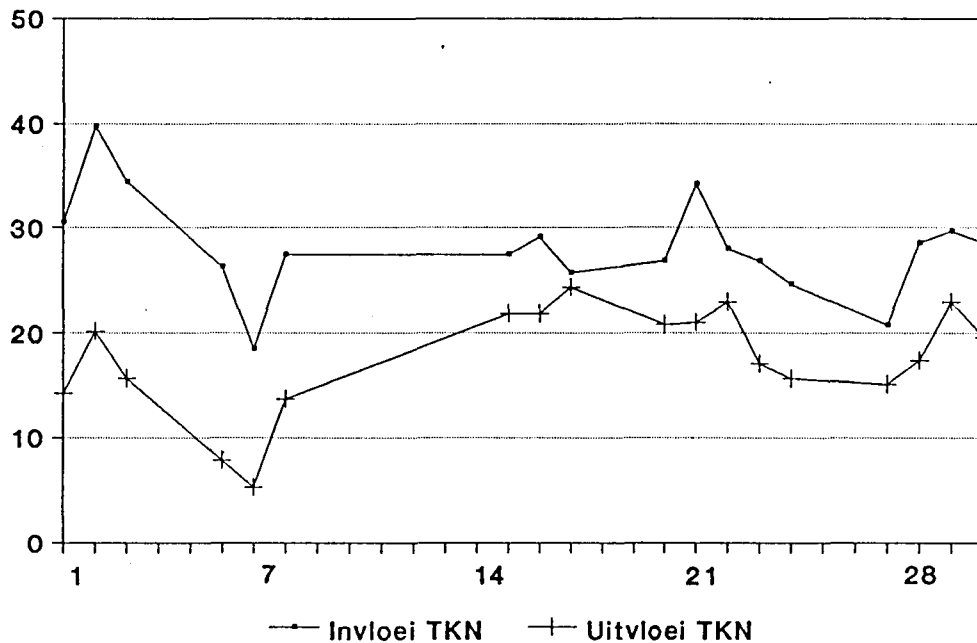
CSB
(mg/l as O)



NOVEMBER

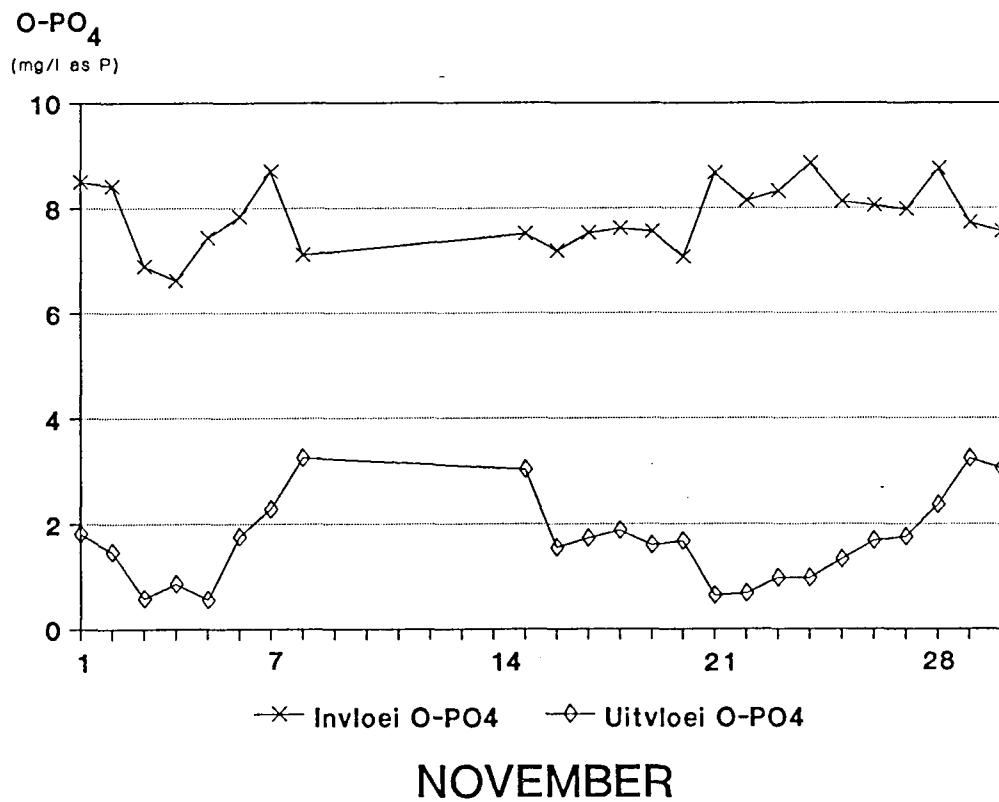
FIGUUR C-13: Daaglikse gemiddelde CSB-waardes vir November 1989

TKN
(mg/l as N)

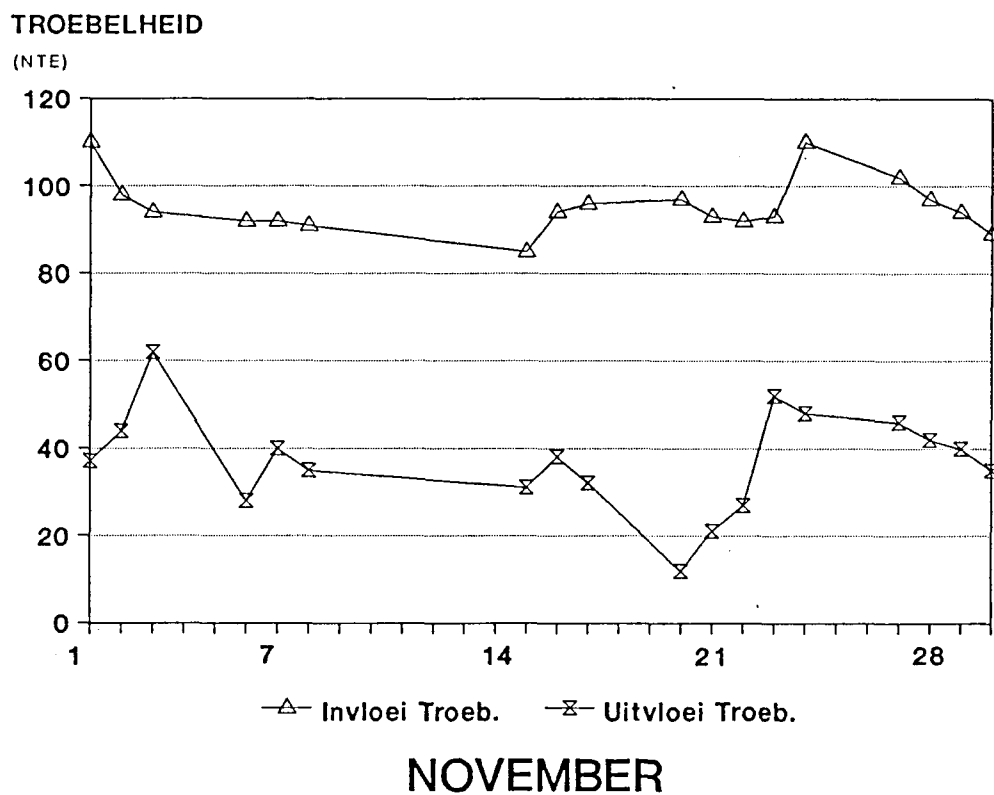


NOVEMBER

FIGUUR C-14: Daaglikse gemiddelde TKN-waardes vir November 1989



FIGUUR C-15: Daaglikse gemiddelde ortofosfaatkonsentrasies vir November 1989



FIGUUR C-16: Daaglikse gemiddelde troebelheid vir November 1989