

**E M RYKAART
J HAARHOFF**

**DIE VERFYNING VAN INSPUITNOSSELS VIR
OPGELOSTELUGFLOTTASIE**

**Verslag aan die
WATERNAVORSINGSKOMMISSIE
deur die
RANDSE AFRIKAANSE UNIVERSITEIT**

WNK Verslag No 448/1/95

Disclaimer

This report emanates from a project financed by the Water Research Commission (WRC) and is approved for publication. Approval does not signify that the contents necessarily reflects the views and policies of the WRC or the members of the project-steering committee.

Vrywaring

Hierdie verslag spruit voort uit 'n navorsingsprojek wat deur die Waternavorsingskommissie (WVK) gefinansier is en goedgekeur is vir publikasie. Goedkeuring beteken nie noodwendig dat die inhoud die siening en beleid van die WVK of die lede van die projek-loodskomitee weerspieël nie.

DIE VERFYNING VAN INSPUITNOSSELS VIR OPGELOSTELUGFLOTTASIE

Verslag aan die Waternavorsingskommissie

**Ewoud Maritz Rykaart
RANDSE AFRIKAANSE UNIVERSITEIT**

**Johannes Haarhoff
RANDSE AFRIKAANSE UNIVERSITEIT**

**WNK Projek No K5/448
ISBN 1 86845 168 2**

1995

BEDANKINGS

Die navorsing in hierdie verslag is moontlik gemaak as gevolg van 'n projek wat gefinansier is deur die Waternavorsingskommissie en uitgevoer deur die Randse Afrikaanse Universiteit, getiteld:

"Die Verfyning van Inspuitnossels vir Opgelostelugflottasie"

Die Loodskomitee verantwoordelik vir die projek, wie se insette van groot waarde was, het bestaan uit die volgende persone:

Mnr. G. Offringa	Waternavorsingskommissie (Voorsitter)
Mnr. D.S. van Vuuren	WNNR (Enertek)
Dr. M.C. van Dijken	AEK (Flosep)

Die projek was suksesvol voltooi as gevolg van belangrike bydraes deur verskeie individue. Die outeurs wil hulle opregte dank uitspreek teenoor **MINTEK**, in besonder Mev. Jean Mostert wat gehelp het om die beeldverwerkingseenheid in werking te stel, sodat die borrels akkuraat getel en gemeet kon word vanaf die fotos.

BESTUURSOPSOMMING

PROJEKDOELSTELLINGS

Opgelostelugflottasie word al hoe meer gebruik by die suiwering van drinkwater, veral aangesien die proses uiters geskik is vir hoogs eutrofe water, soos algemeen in Suid-Afrika voorkom.

Suksesvolle flottasie is afhanklik van 'n aantal belangrike fisiese en bedryfsbeperkinge. Een van die belangrikste redes vir die faling van opgelostelugflottasie is onbevredigende borrelvorming.

Die mikroborels word gevorm wanneer oorversadigde water afkomstig van die versadiger, teen 'n druk van tussen 200 en 500 kPa, vrygelaat word deur 'n nossel na atmosferiese druk. Onder druk los lug op in water, en sodra die druk verlig word, presipiteer die lug uit in die vorm van klein mikroborels.

Dit word algemeen aanvaar dat 'n relatief homogene borrelwolk, met 'n mediaan borrelgrootte van 100 μm , verlang word. Indien groot borels tussen die kleiner boreltjies voorkom, sal hulle te vinnig styg en die dryflaag versteur, met die gepaardgaande benadeling van die skeidingsproses. As die boreltjies egter te klein is, sal hulle stygspoed baie laag wees, en sal glad nie 'n dryflaag vorm nie.

Deur die fisiese geometrie van die nossel sowel as die bedryfstoestande te manipuleer kan dit moontlik word om borels van 'n gevraagde grootte en verspreiding te genereer.

Die vernaamste oogmerk van die navorsingsprojek was dus om die faktore te identifiseer wat borrelgrootte beïnvloed, en om daardeur die borrelgroottes te probeer manipuleer.

LITERATUURSTUDIE

'n Literatuurstudie het verskeie faktore geïdentifiseer wat die eienskappe van borels kan beïnvloed, naamlik:-

- water temperatuur
- drukverlies oor die nosselkanaal
- deursnit van die nosselkanaal

- lengte van die nosselkanaal
- vloeispoed waarmee die hersirkulasievloei die kanaal verlaat
- die teenwoordigheid van 'n afskermingsvlak voor die nosselkanaal
- die teenwoordigheid van 'n uitstroomtuit voor die nosselkanaal
- die teenwoordigheid van interne draaie in die nosselkanaal
- die teenwoordigheid van oppervlak aktiewe stowwe in die water
- die oppervlakteruheid van die nosselkanaal
- die versadigingsgraad van die flottasiewater

Hierdie faktore word almal in die literatuur genoem om 'n effek te hê op die grootte van mikroborrels, maar sommige van die bronne weerspreek mekaar.

EKSPERIMENTELE OPSTELLING

Uit die literatuurstudie het dit duidelik geword dat alhoewel baie navorsers borrelgrootte gemeet het, meeste van hulle klein mikronossels gebruik het, wat dit moeilik maak om hulle resultate te ekstrapoleer na omstandighede in die praktyk. Gevolglik is daar besluit om met volkskaalse nossels en werklike bedryfsparameters te werk, en die eksperimentele toerusting is derhalwe daarvoor ontwerp.

Die flottasietenk is modulêr ontwerp om toe te laat vir 'n verskeidenheid van reaktordieptes, maklike nosselverandering, sowel as om in staat te wees om volkskaal vloei te hanteer. Die versadiger is verbind aan die flottasiekolom met behulp van 'n afsluitklep, waarna die nossel ingeskroef is.

'n Fotografiese stelsel, tesame met 'n spesiaal ontwerpte modulêre eenheid, wat deel gevorm het van die flottasiekolom, is gebruik om die borrelgrootte te meet. Die fotos is geneem met behulp van 'n kamera wat deur 'n foto-oogstuk verbind is aan 'n stereo mikroskoop. Beligting is gedoen deur middel van 'n elektroniese flits van agter die kolom.

Die borrels is vanaf die ontwikkelde fotos getel en gemeet deur van 'n beeldverwerkingseenheid gebruik te maak, waarna die data ontleed is met behulp van 'n rekenaar. In die ontleding is besluit om die data te rapporteer aan die hand van die volgende parameters:-

- *mediaan borrelgrootte (D_{50})* - die mediaan van 'n relatief klein verspreiding is minder sensitief vir enkele groot borrels
- *uniformheidsindeks (U)* - die indeks word uitgedruk as 'n fraksie, en gee 'n aanduiding van die verspreiding van borrels
- *effektiewe luggebruik (eff)* - die volume lug vasgevang in borrels groter as $150\ \mu\text{m}$ word bereken as 'n persentasie van die totale volume van lug beskikbaar in die datastel, en gee 'n aanduiding van die onbruikbare volume lug
- *growwe borrel indeks (f)* - die aantal borrels vir 'n betrokke datastel wat groter is as $150\ \mu\text{m}$ word uitgedruk as 'n persentasie van die totale aantal borrels en gee 'n maatstaf van die aantal onverlangde borrels.

Nege verskillende eksperimentele toestande is getoets, bestaande uit bykans 95 individuele toetse, naamlik:-

- bepaling van die vernaamste veranderlikes, nl; druk, nossellengte, nosseldeursnit en die teenwoordigheid van 'n afskermingsvlak
- bepaling van die effek van die afstand wat 'n afskermingsvlak weg van die nosseluitgang is
- bepaling van die effek van die geometrie van die afskermingsvlak
- bepaling van die effek van 'n rigtingverandering in die nosselkanaal
- bepaling van die effek van 'n uitstroomtuit
- bepaling van die effek van die verwantskap tussen nossellengte en diameter
- bepaling van die effek van die diepte van die flottasiekolom

Meeste van die toetse was gedoen as drie- of vierrigting faktoriaalontwerpe. Die benadering maak dit moontlik om interaksies tussen die verskillende bedryfs en geometriese toestande wat vir elke eksperiment vergelyk is, te bepaal. Die resultate wys ook die mees prominente elemente uit wat die borrelgrootte affekteer.

BORRELGROEIMODEL

Die vernaamste resultaat van die navorsingsprojek was die ontwikkeling van 'n eenvoudige, konsepsuele borrelgroeimodel vir opgelostelugflottasie, naamlik;

Die eerste stap van borrelvorming begin onmiddellik nadat die drukverlies deur die nossel begin. Gedurende die eerste stap, groei borrels rondom 'n konstante aantal

nukleasie kerne as gevolg van die lug wat oorgedra word van die water. Nadat al die oortollige lug oorgedra is van die opgeloste na die gasfase, eindig die eerste stap, en die tweede stap begin. Gedurende die tweede stap bly die volume lug konstant, maar die borrels hou aan met groei weens borrelsamevoeging.

RESULTATE

Die resultate van die reeks eksperimente wat gedoen is kan kortliks soos volg opgesom word, en daar word ook gepoog om die resultate te verduidelik aan die hand van die voorgestelde borrelgroeimodel.

Versadigerdruk

Die versadigerdruk vir al die eksperimente is gewissel tussen 200 en 500 kPa. Daar word sonder uitsondering gevind dat die mediaan borrelgrootte afneem soos die druk verhoog word.

Dieselfde geld vir die persentasie growwe borrels, aangesien 'n hoër druk groter vloeiensnelhede tot gevolg het en gevolglik is die moontlikheid dat growwe borrels kan opbreek met die tref van 'n obstruksie groter.

Nossellengte

Die nossellengte het geen noemenswaardige effek op die mediaan by 'n hoë druk nie. Indien die druk egter verlaag word, word groter borrels gevorm as die nossellengte langer as 31 mm word.

As die nossel langer as 31 mm word, word gevind dat f marginaal kleiner word by hoër drukke en aansienlik groter by lae drukke. By korter nossels is daar geen merkbare effek te bespeur nie.

As gekyk word na die uniformheidsindeks, sien mens dat die marginale toename in U konsekwent is vir beide hoë en lae drukke, vir nossels korter as 31 mm. By langer nossels bly U konstant vir hoë drukke, maar neem drasties af vir lae drukke.

Die borrelgroeimodel maak nie voorsiening vir die hoeveelheid tyd wat die waterstraal

in die noseel beweeg nie, maar as ons aanvaar dat die drukverlaging plaasvind vandat die waterstraal by die nossel inkom, kan ons aanvaar dat in 'n lang nossel feitlik volkome borrelgroeiing kan plaasvind binne die nosselkanaal, as die druk aanvanklik laag genoeg is. Dit verduidelik die vergroting van die mediaan sowel as die toename in growwe borrels, aangesien daar dan in alle waarskynlikheid borrelsamevoeging in die kanaal sal plaasvind, weens die verlengde gedwonge kontak tussen die borrels.

Nosseldeursnit

Die eksperiment het getoon dat dat vir alle nossel diameters, behalwe kleiner as 1 mm, die invloed op median borrelgrootte nie betekenisvol was nie. 'n Diameter van 1 mm het egter 'n drastiese toename in die mediaan tot gevolg gehad.

Die aantal growwe borrels is meer by 'n hoër druk as by 'n lae druk, ongeag die nosseldiameter, maar daar blyk om 'n optimum punt te wees vir die tendens. By 'n lae druk moet die nosseldiameter 2,5 mm wees vir 'n minimum te wees, en by hoër drukke 2 mm.

Die uniformheidsindeks blyk nie geaffekteer te word deur die druk nie, maar neem af by deursnitte van minder as 2 mm.

Knak in die nosselkanaal

Die toevoeging van 'n knak in die nosselkanaal het tot gevolg gehad dat die aantal growwe borrels afneem, ongeag van die versadigerdruk, terwyl die mediaan het drasties afgeneem soos die versadigerdruk verhoog word. By 'n lae druk is die mediaan nie geaffekteer nie.

Volgens die model, kan dus geïnterpreteer word dat indien die knak op 'n afstand geplaas word waar volkome borrelvorming nog nie plaasgevind het nie, en die snelheid hoog genoeg is, sal die halfgevormde borrels teen die obstruksie bots en meer borrels vorm, wat noodgedwonge 'n kleiner mediaan sal hê.

Ongeag of die obstruksie voor volkome borrelvorming plaasvind of nie, sal die borrels wat daar is nogtans teen die obstruksie bots en kleiner borrels vorm, wat die laer growwe borrel indeks tot gevolg het.

Afskerming voor die nosselkanaal uitlaat

Die mediaan borrelgrootte het 'n noemenswaardige afname getoon indien die afskerming nader as 10 mm van die opening af geplaas is, ongeag die druk. By hoër drukke is ook gevind dat f drasties toeneem sodra die skerm verder as 10 mm beweeg word. Vir lae drukke is geen effek bespeur nie.

Soos met die knak in die nosselkanaal kan die resultaat aan die hand van die model verduidelik word. Indien die afskerming naby genoeg is sodat die waterstaal dit tref voordat volkome borrelvorming plaasvind, sal die halfgevormde borrels teen die obstruksie bots, en verder opbreek om meer borrels met 'n laer mediaan tot gevolg te hê.

As die borrelvorming egter reeds voltooi is waneer die obstruksie getrek word, en die vloeispoed is nog voldoende, sal die klaargevormde borrels opbreek om 'n kleiner growwe borrel indeks veroorsaak.

Uitstroombuit

Vir beide hoë en lae drukke het die toevoeging van 'n uitstroombuit voor die nosselopening tot gevolg dat die mediaan drasties afneem. By hoë drukke neem f ook verder drasties af.

Aan die hand van die model kan ons die resultaat verduidelik, deur gebruik te maak van die koppelvlak sone by die nossel uitgang. By die punt kom die snel vloeiende borrel in kontak met die stadig vloeiende water van die flottasiekolom. Werwelstrome ontstaan en het groot borrels tot gevolg. Die plasing van 'n uitstroombuit voor die nosselkanaal verseker dat die snelheidsoorgang kleiner is, met gevolg dat die werwelstrominge kleiner word, en gevolglik ontstaan daar minder growwe borrels.

VERDERE WERK

Die verslag word afgesluit met 'n opsomming van verdere werk wat gedoen kan word om tot 'n beter fundamentele begrip van borrelvorming te lei.

EXECUTIVE SUMMARY

PROJECT OBJECTIVES

Dissolved air flotation is being used more regularly for the purification of potable water, especially since the process is highly effective for eutrophic water, which is a common occurrence in South Africa.

Successful flotation is dependent on a number of important physical and operational parameters. One of the most important reasons leading to the failure of dissolved air flotation is unsatisfactory bubble formation.

The microbubbles are formed when supersaturated water coming from the saturator, at a pressure ranging between 200 and 500 kPa, is released via a nozzle to atmospheric pressure. Air is dissolved into water under pressure, and when this pressure is released, it precipitates in the form of small microbubbles

It is generally accepted that a relative homogeneous bubble cloud with a median bubble size of 100 μm is required for good dissolved air flotation. If there are too many large bubbles amongst the smaller bubbles, they will rise too fast and disturb the float layer. If on the other hand the bubbles are too small, the rate of rise will be reduced and a float layer will not be formed.

By manipulating the physical geometry of the nozzle as well as the operating conditions it becomes possible to generate bubbles of a specified size and distribution.

The principle aim of this research project was to determine the factors that influence bubble formation, to be able to manipulate bubble sizes.

LITERATURE SEARCH

A literature study identified various factors which could influence the characteristics of bubbles, eg:-

- water temperature
- pressure drop across the nozzle channel
- diameter of the nozzle channel

- length of the nozzle channel
- velocity at which the recycle flow exits the nozzle
- the presence of an impinging surface downstream of the nozzle exit
- the presence of a shroud downstream of the nozzle exit
- the presence of internal bends within the nozzle channel
- the presence of surfactants in the water
- the surface roughness of the nozzle channel
- the degree of saturation of the flotation water

These factors are all mentioned to have an affect on the size of microbubbles, but some of the references are contradictory.

EXPERIMENTAL SETUP

From the literature study it became apparent that although many other researchers measured bubble size, most of them used micronozzles, which makes extrapolating results to practical conditions extremely difficult. Therefore a decision was taken to work with full-scale nozzles and operating conditions. Experimental equipment was subsequently designed for this purpose.

The flotation column was designed modularly to allow for a selection of reactor depths, easy nozzle access as well as being able to cope with full-scale flows. The saturator was connected to the flotation column via a shut-off valve, after which the nozzle was fitted.

Bubble size was measured using a photographic system, comprising of a specially designed modular unit which formed part of the flotation column. Photographs were taken with a camera connected to a stereo microscope through a photo eyepiece. Backlighting was done by means of an electronic flash.

The bubbles were counted and measured from the developed photographs by means of an image analysis unit, after which the data was analyzed on a computer. The data is reported using the following parameters:-

- *median bubble size (D_{50})* - the median of a relative small distribution is less sensitive for single large bubbles

- *uniformity index (U)* - this index is expressed as a fraction, and gives an indication of the distribution of the bubbles
- *air efficiency (eff)* - the volume of air trapped in bubbles smaller than 150 μm is calculated as a percentage of the total volume of air available in the dataset. This gives an indication as to the useful air volume
- *macro bubble fraction (f)* - the number of bubbles for a particular data set, larger than 150 μm is expressed as a percentage of the total number of bubbles and gives an indication as to the number of undesirable bubbles.

Nine different experimental conditions were tested, comprising of almost 95 individual tests, eg:-

- determining the most important variables, eg; pressure, nozzle length, nozzle diameter and the presence of an impinging surface
- determining the effect of the distance of an impinging surface from the nozzle exit
- determining the effect of the geometry of the impinging surface
- determining the effect of a directional change in the nozzle channel
- determining the effect of a shroud
- determining the effect of the relationship between nozzle length and diameter
- determining the effect of the depth of the flotation column.

Most of the test were carried out as two- or three-way factorial designs. This approach makes it possible to determine various interactions between different operational and geometrical conditions tested for each experiment. The results show the most prominent elements which affect the bubble size.

BUBBLE GROWTH MODEL

The most important result of the research project was the development of a simple, conceptual bubble growth model for dissolved air flotation, namely:

The first step in bubble formation commences immediately after the pressure release through the nozzle has started. During this first step, bubbles grow around a fixed number of nucleation centres due to the air being transferred from the water. The first step ends as soon as all the excess air has been transferred from the dissolved to the gas phase, and the second step commences immediately.

During the second phase the volume of air remains constant, but the bubbles continue to grow due to bubble coalescence.

RESULTS

The results of the range of experiments that were done, can be summarised concisely as follows, together with an attempt as to explain the result in terms of the proposed bubble growth model.

Saturator pressure

The saturator pressure was alternated between 200 and 500 kPa for all the experiments. Without exception it was found that the median bubble size reduced as the pressure increased.

The macro bubble fraction also decreased at higher pressures, due to the fact that at higher pressures greater flow velocities is found which would lead to a breakup of macrobubbles as soon as an obstruction is hit.

Nozzle Length

The nozzle length showed to have no significant affect on the median at high pressures. However if the pressure is reduced, and the nozzle length exceeds 31 mm, larger bubbles are formed.

If the nozzle length exceeds 31 mm the macrobubble fraction becomes marginally smaller at higher pressures en significantly higher at low pressures. With shorter nozzles no noticeable effect is detected.

When looking at the uniformity index, one finds that the marginal increase in U is consistent for both high and low pressures for nozzles shorter than 31 mm. For longer nozzles U remains constant at high pressures, but reduces drastically for low pressures.

The bubble growth model does not provide for the amount of time that the jet of water remain in the nozzle channel, but if we assume that the pressure reduction starts as soon as the jet of water enters the nozzle, we can further assume that almost complete bubble

formation could occur in a long nozzle, provided that the initial pressure was low. This explains the larger median as well as the increase in macrobubbles, since in all probability bubble coalescence would take place due to increased forced contact within the nozzle channel.

Nozzle diameter

The experiment showed that for all nozzle diameters, except smaller than 1 mm, the influence on the median is not significant. However a diameter of 1 mm resulted in a drastic increase in the median.

There is a greater number of macro bubbles at higher pressures, no matter what the nozzle diameter is. However there seems to be an optimum point at for this tendency. At a low pressure this point lies at a diameter of 2,5 mm, while at a high point this lies at 2 mm.

The uniformity index does not seem to be affected by pressure, but reduces at nozzle diameters less than 2 mm.

Bend in the nozzle channel

The introduction of a bend in the nozzle channel causes a reduction of the macro bubble fraction, irrespective of what the saturator pressure is. The median however, drastically reduces as the saturator pressure is increased. At low pressures the median is not affected.

According to the model, it can be interpreted that if the bend is placed at a point where complete bubble formation have not occurred, and the velocity of the jet of water is high enough, the partly formed bubbles will collide with the obstruction and break up, resulting in more nucleation centres for the bubbles. This would inevitable lead to a reduction in the median.

Even if the obstruction is reached after complete bubble formation, the bubbles will break up resulting in a reduction of the macro bubble fraction, providing that the pressure is high enough to ensure a high jet velocity.

Impinging surface in front of the nozzle exit

The median bubble diameter shows a significant reduction when the impinging surface was placed closer than 10 mm from the nozzle exit, irrespective of the pressure. The macro bubble fraction is also found to increase drastically at high pressure if the impinging surface was more than 10 mm from the nozzle exit. No effect is noticed at low pressures.

As with the bend in the nozzle channel, the result can be explained using the bubble growth model. If the impinging surface is close enough, so that the jet collides with it before complete bubble formation has occurred, the partly formed bubbles will bounce against the obstruction and break up to form more nucleation centres and consequently a lower median.

However if the bubble formation is complete before the surface is reached, and the jet velocity is high enough, the formed bubbles will break up to reduce the macro bubble fraction.

Shroud

At both low and high pressures the placement of a shroud in front of the nozzle exit results in a drastic reduction of the median. At high pressures the macro bubble fraction also reduces significantly.

The result can be explained by means of the bubble growth model, by using the concept of an interface zone at the nozzle exit. At this point the high velocity bubble comes into contact with the slower velocity of the recycle flow. The resultant turbulence causes macro bubbles. By placing a shroud in front of the nozzle exit, this velocity transition is reduced, reducing the turbulence, and resulting in a lower macro bubble fraction.

FURTHER WORK

This report is concluded with a summary of further work that can be done to lead to a better fundamental grasp of bubble formation.

INHOUDSOPGAW

BEDANKINGS	iii
BESTUURSOPSOMMING	v
EXECUTIVE SUMMARY	xi
SIMBOLELYS	xxii
LYS VAN FIGURE	xxv
LYS VAN GRAFIEKE	xxvii
LYS VAN TABELLE	xxix
1. INLEIDING	1
1.1 DIE FLOTTASIEPROSES EN DIE ROL VAN INSPUITNOSSELS	1
1.2 DOELSTELLINGS VAN DIE PROJEK	2
1.3 INDELING VAN DIE VERSLAG	3
2. LITERATUURSTUDIE	5
2.1 EIENSKAPPE VAN BORRELS BY EWEWIG	5
2.1.1 Borrelgrootte	5
2.1.1.1 Kragtebalans op 'n enkele borrel	5
2.1.1.2 Druk as gevolg van oppervlakspanning	6
2.1.1.3 Druk as gevolg van atmosferiese druk	6
2.1.1.4 Druk as gevolg van hidrostatiese druk	7
2.1.1.5 Druk as gevolg van stikstof en suurstof	7
2.1.1.6 Druk as gevolg van dampdruk	8
2.1.1.7 Berekening van borrelgrootte	8
2.1.1.8 Minimum borrelgrootte by ewewig	9
2.1.2 Borrelvorm	10

2.1.3	Stygspoed	10
2.1.3.1	Stokes se wet	11
2.1.3.2	Invloed van temperatuur	13
2.1.4	Eienskappe van 'n borrelwolk	14
2.1.4.1	Tipiese lugdosering	14
2.1.4.2	Borrelverspreiding	15
2.1.4.3	Invloed van 'n borrelwolk	16
2.2	BORRELMEETTEGNIEKE	17
2.2.1	Fotografiese tegnieke	17
2.2.2	Meting met behulp van 'n kappilêre buis	19
2.2.3	Lasertegnieke	19
2.2.4	Indirekte tegnieke	20
2.3	DIE NEERSLAG VAN LUG UIT 'N OORVERSADIGDE OPLOSSING	21
2.3.1	Spontane neerslag van lug	21
2.3.2	Kernvorming	21
2.3.2.1	Stroomkerne	22
2.3.2.2	Oppervlaktekerne	22
2.3.3	Kavitasie	22
2.3.4	Gibbs vrye energie	23
2.3.5	Massa-oordrag na borrel	25
2.3.6	Borrelsamesmelting	27
2.4	PRAKTIESE FAKTORE WAT BORRELVORMING BEÏNVLOED ..	29
2.4.1	Druk	30
2.4.2	Temperatuur	30

2.4.3	Chemiese byvoegings	31
2.4.4	Geometrie van die nosselkanaal	33
2.4.5	Afskerming	34
2.4.6	Uitstroomtuit	35
2.4.7	Hoogte in kolom	36
2.4.8	Opvloeitempo in die kolom	36
2.4.9	Materiaal waaruit nossel vervaardig is	37
2.5	VOORBEELDE VAN PRAKTIESE INSPUITNOSSELS	37
2.5.1	WRc nossel	38
2.5.2	Saint Gobain	38
2.5.3	Shanghai-nossels	39
2.5.4	Goldfields-nossel	39
2.5.5	NIWN-nossel	40
2.5.6	Rictor-nossel	40
2.5.7	Verko-nossel	42
2.5.8	DWL/DZH-nossel	42
2.5.9	AKA-nossel	43
2.5.10	Bete-nossels	43
2.5.11	Ander vrylatingstoestelle	43
2.5.12	Vergelykende nosseltoetse	45
2.6	GEVOLGTREKKINGS UIT DIE LITERATUUR	46
2.6.1	Temperatuur	46
2.6.2	Drukverlies oor die nossel	46
2.6.3	Deursnit van die nosselkanaal	46
2.6.4	Lengte van die nosselkanaal	47
2.6.5	Vloespoed waarmee die hersirkulasievloei die kanaal verlaat	47
2.6.6	Die teenwoordigheid van 'n afskerming voor die nossel	47
2.6.7	Die teenwoordigheid van 'n uitstroomtuit voor die nossel	47
2.6.8	Die teenwoordigheid van interne draaie in die nossel	47

3.	EKSPERIMENTELE OPSTELLING EN PROSEDURES	49
3.1	INLEIDING	49
3.2	VERSADIGER	49
3.3	FLOTTASIEKOLOM	53
3.4	INSPUITSTELSEL	56
3.5	WAARNEMINGSKOLOM	56
3.6	FOTOGRAFIESE STELSEL	57
3.7	BORRELMEETTEGNIK	58
4.	EKSPERIMENTELE PROGRAM EN RESULTATE	59
4.1	DATA-AANBIEDING	59
4.2	EKSPERIMENTELE WATERTOEOVOER	59
4.3	STATISTIESE ONTLEDINGSTEGNIEKE	60
4.3.1	Statistiese beheerparameters	60
4.3.2	Aantal borrels per datastel	62
4.4	AKKURAATHEID VAN BORRELMEETTEGNIK	64
4.5	REPRODUSEERBAARHEID VAN EKSPERIMENTELE STELSEL	65
4.6	EKSPERIMENT 1 - IDENTIFIKASIE VAN VERNAAMSTE VERANDERLIKES	67
4.7	EKSPERIMENT 2 - DIE EFFEK VAN AFSKERMING	75

4.8	EKSPERIMENT 3 - OPTIMISERING VAN AFSKERMING	80
4.9	GEKOMBINEERDE EFFEKTE VAN EKSPERIMENTE 2 & 3	84
4.10	EKSPERIMENT 4 - DIE ROL VAN RIGTINGVERANDERING IN DIE NOSSEL	88
4.11	EKSPERIMENT 5 - DIE ROL VAN DIE UITSTROOMTUIT	94
4.12	EKSPERIMENT 9 - DIE EFFEK VAN BORRELSAMEVOEGING OP DIE BORRELS	101
5.	BESPREKING VAN RESULTATE	103
5.1	VOORGESTELDE BORREL GROEI MODEL	103
5.1.1	Verskillende stappe van die model	103
5.1.2	Aannames rakende die voorgestelde model	104
5.1.3	Voorspellings met behulp van die model	105
5.1.4	Meganismes wat borrelvorming beïnvloed	107
5.2	VERKLARING VAN RESULTATE IN TERME VAN DIE VOORGESTELDE MODEL	109
5.2.1	Versadigerdruk	109
5.2.3	Buig in nossel	110
5.2.4	Afskerming	111
5.2.5	Uitstroomtuit	111
6.	GEVOLGTREKKINGS	113
6.1	GEVOLGTREKKINGS	113
6.3	VERDERE ONDERSOEKE	115
	VERWYSINGSLYS	117

SIMBOLELYS

A	-	area van borrel [m^2]
A_g	-	oppervlak van die grensvlak [m^2]
a_1	-	hoeveelheid lug tot waterstroom toegevoeg voor borrelvorming [$mg.l^{-1}$ van hoofstroom]
b	-	helfte van borrelwolk breedte [m]
C_D	-	weerstandskoëfisiënt [-]
c_f	-	hoeveelheid lug voor borrelvorming [$mg.l^{-1}$ van hersirkulasiestroom]
c_{sp}	-	versadigingskonsentrasie by absolute versadigerdruk [$mg.l^{-1}$]
c_{so}	-	versadigingskonsentrasie by atmosferiese druk [$mg.l^{-1}$]
Δc	-	konsentrasie [$g.m^{-3}$]
D	-	diffusiekoëfisiënt [$m^2.s^{-1}$]
D_{50}	-	mediaan borrelgrootte [m]
d	-	borreldiameter [m]
eff	-	effektiewe luggebruik [%]
F_a	-	afwaartse krag [N]
F_o	-	opwaartse krag [N]
ΔF	-	vrye energie [N.m]
f	-	growwe borrel indeks [%]
f_s	-	versadigereffektiwiteit [-]
g	-	gravitasieversnelling [$m.s^{-2}$]
h	-	diepte van borrel onder water [m]
H	-	hoogte bo seespieël [m]
H_k	-	hoogte van kolom [m]
H_o	-	piësietriese waterdruk t.o.v. atmosferiese druk [m]
m'	-	gasoordrag [$g.mol.s^{-1}$]
n	-	aantal mol stikstof en suurstof [mol]
P_1	-	druk voor vernouing [kPa]
P_2	-	druk in vernouing [kPa]
P_A	-	opgeloste druk [$N.m^{-2}$]
P_a	-	druk a.g.v. die absolute atmosferiese druk op die wateroppervlak [kPa]
P_g	-	druk a.g.v. die stikstof en die suurstof wat deur die versadiger geabsorbeer word [kPa]
P_h	-	druk a.g.v. die addisionele hidrostatiese druk a.g.v. die onderdompeling [kPa]
P_s	-	druk a.g.v. die oppervlakspanning by die lug/water kontakvlak [kPa]

P_v	-	druk a.g.v. die dampdruk van die water [kPa]
Q_h	-	hersirkulasievloei [$m^3.s^{-1}$]
Q_r	-	rouwatervloei [$m^3.s^{-1}$]
q_o	-	beginvloei van water [$m.s^{-2}$]
R	-	universele gaskonstante [$8,313 m^3.kPa.K^{-1}.mol^{-1}$]
Re	-	Reynoldsgetal [-]
r_o	-	radius van borrel [m]
s	-	stygsnelheid [$m.s^{-1}$]
T	-	temperatuur [$^{\circ}C$]
T	-	temperatuur [K]
t_0	-	tydstip wat borrelvorming begin [ms]
t_{50}	-	tydstip waarop 50% presipitasie plaasgevind het [ms]
t_{100}	-	tydstip waarop 100% presipitasie plaasgevind het [ms]
Δt	-	grenslaagdikte [m]
U	-	uniformheidsindeks [-]
V	-	volume van borrel [m^3]
v_1	-	snelheid voor vernouing [$m.s^{-1}$]
v_2	-	snelheid in vernouing [$m.s^{-1}$]
x	-	afstand van borrelwolk van bron af [m]
α	-	koëffisiënt van vasvangings [mate van deursnee vergroting per meter styging]
	-	dinamiese viskositeit van water [$kg.m^{-1}.s^{-1}$]
ρ_b	-	borreldigtheid [$kg.m^{-3}$]
ρ_w	-	waterdigtheid [$kg.m^{-3}$]
σ	-	oppervlakspanning [$kg.s^{-2}$]
σ_s	-	standaardafwyking van borrelverspreiding [-]
$1/\lambda^2$	-	turbulente Schmidt getal [-]

LYS VAN FIGURE

- Figuur 2.3.4** Grafiek van die verandering in die vrye energie, Takahashi *et al.* (1979)
- Figuur 2.5.1** Die WRc-nossel is al sedert 1973 in gebruik. Die nossel is nie verstelbaar nie
- Figuur 2.5.5** Die NIWN-nossel is in Suid-Afrika ontwerp en in bedryf gestel sedert 1983. Die nossel kan verstelbaar gemaak word
- Figuur 2.5.6** Die Rictor-nossel is 'n nie-verstelbare nossel van Finse oorsprong
- Figuur 2.5.7** Die Verko-nossel is 'n verstelbare nossel van Finse oorsprong
- Figuur 2.5.8** Die DWL/DZH-nossel is 'n verstelbare nossel wat ontwikkel is in Nederland in 1980
- Figuur 2.5.9** Die AKA-nossel is 'n Nederlandse nossel, wat van 'n uitstroomtuit voorsien is, en ook verstelbaar is
- Figuur 2.5.10** Die Bete-nossels, van Nederlandse oorsprong, is bloot tuinsproeiers, wat van 'n uitstroomtuit voorsien is
- Figuur 3.1.1** Skematiese voorstelling van totale eksperimentele opstelling
- Figuur 3.2.1** Skematiese voorstelling van die laboratoriumversadiger
- Figuur 3.3.1** Skematiese voorstelling van die flottasiekolom
- Figuur 4.6.1** Skematiese voorstelling van primêre nossel
- Figuur 4.6.2** Tweerigtingtabel vir mediaan borrelgrootte data
- Figuur 4.6.3** Tweerigtingtabel vir growwe borrel indeks
- Figuur 4.6.4** Tweerigtingtabelle vir uniformiteitsindeks

Figuur 4.7.1	Skematiese voorstelling van eerste afskermings nossel
Figuur 4.8.1	Skematiese voorstelling van tweede afskermings nossel
Figuur 4.8.2	Tweerigtingtabel vir mediaan borrelgrootte
Figuur 4.8.3	Tweerigtingtabel van die uniformiteitsindeks
Figuur 4.10.1	Skematiese voorstelling van buig nossel
Figuur 4.10.2	Tweerigtingtabel van die growwe borrel indeks
Figuur 4.11.1	Skematiese voorstelling van nossel met uitstroomtuit
Figuur 4.11.2	Tweerigtingtabel vir mediaan borrelgrootte
Figuur 4.11.3	Tweerigtingtabel van die growwe borrel indeks
Figuur 4.11.4	Tweerigtingtabel van die uniformiteitsindeks
Figuur 5.1.1.1	Die voorgestelde borrelgroeï model
Figuur 5.1.3.1	Die skematiese voorstelling van die voorspellings omtrent die posisies van obstruksies
Figuur 5.1.4.1	Skematiese voorstelling van die vertraging van die waterstraal by die teenwoordigheid van 'n uitstroomtuit

LYS VAN GRAFIEKE

Grafiek 4.3.2.1	Grafiek wat verskillende groottes datastelle teen mekaar toon
Grafiek 4.4.1	Grafiek van MINTEK se meettegniek teenoor WITS se meettegniek
Grafiek 4.5.1	Grafiese voorstelling van die reproduseerbaarheidsdata
Grafiek 4.7.1(a)	Grafiek van afskermingsafstand teenoor mediaan
Grafiek 4.7.1(b)	Grafiek van afskermingsafstand teenoor growwe borrel indeks
Grafiek 4.7.1(c)	Grafiek van afskermingsafstand teenoor uniformiteitsindeks
Grafiek 4.9.1(a)	Grafiese voorstelling van die gekombineerde afskermingsdata m.b.t. die mediaan
Grafiek 4.9.1(b)	Grafiese voorstelling van die gekombineerde afskermingsdata m.b.t. die growwe borrel indeks
Grafiek 4.9.1(c)	Grafiese voorstelling van die gekombineerde afskermingsdata m.b.t. die uniformiteitsindeks
Grafiek 4.10.1(a)	Grafiese voorstelling van die buig resultate m.b.t. die mediaan
Grafiek 4.10.1(b)	Grafiese voorstelling van die buig resultate m.b.t. die growwe borrel indeks
Grafiek 4.10.1(c)	Grafiese voorstelling van die buig resultate m.b.t. die uniformiteitsindeks
Grafiek 4.11.1(a)	Grafiese voorstelling van die tuit resultate m.b.t. die mediaan
Grafiek 4.11.1(b)	Grafiese voorstelling van die tuit resultate m.b.t. die growwe borrel indeks
Grafiek 4.11.1(c)	Grafiese voorstelling van die tuit resultate m.b.t. die uniformiteitsindeks

LYS VAN TABELLE

Tabel 2.1.4.1	Aantal borrels van gegewe grootte in een liter van 'n vloeistof of gas
Tabel 2.3.5.1	Tyd nodig vir borrel om te groei (van r_0 tot by $5r_0$) in water by 20°C , met oppervlakspanning in ag geneem
Tabel 2.3.5.2	Tyd nodig vir borrel om te groei (van r_0 tot by $5r_0$) in water met $r_0 = 0,01$ mm en $f' = 1,50$
Tabel 4.2.1	Chemiese samestelling van water gebruik in laboratorium eksperimente
Tabel 4.3.2.1	Resultate van grootte van datastel toets
Tabel 4.4.1	Vergelykende data van MINTEK en WITS.
Tabel 4.5.1	Opsomming van reproduseerbaarheidsdata
Tabel 4.5.2	95% betroubaarheidsinterval vir borrelmetinge
Tabel 4.6.1	Minimum en maksimum waardes van beheerparameters
Tabel 4.6.2	Finale resultate van eerste faktoriaalontwerp eksperiment in die vorm geskik vir die YATES-algoritme
Tabel 4.7.1	Resultate van afskermingsafstand eksperimente
Tabel 4.8.1	Minimum en maksimum waardes van die beheerparameters
Tabel 4.8.2	Finale resultate van afskerming faktoriaalontwerp eksperiment in die vorm geskik vir die YATES-algoritme
Tabel 4.9.1	Eksperimentele veranderlikes van gekombineerde eksperiment

Tabel 4.9.2	Eksperimentele data van gekombineerde afskermingsdata
Tabel 4.10.1	Minimum en maksimum waardes van die beheerparameters
Tabel 4.10.2	Finale resultate van interne buig faktoriaalontwerp eksperiment in die vorm geskik vir die YATES-algoritme
Tabel 4.11.1	Minimum en maksimum waardes van die beheerparameters
Tabel 4.11.2	Finale resultate van eksterne tuit faktoriaalontwerp eksperiment in die vorm geskik vir die YATES-algoritme

HOOFSTUK 1

INLEIDING

1.1 DIE FLOTTASIEPROSES EN DIE ROL VAN INSPUITNOSSELS

Opgelostelugflottasie word toenemend vir drinkwatersuiwering in SA gebruik, omdat dit 'n praktiese manier bied om alge uit eutrofe oppervlaktewater te verwyder. Omdat in hierdie spesifieke toepassing van die proses met baie kleiner partikels gewerk as ander toepassings (soos wanneer ertspartikels byvoorbeeld in die mynbou geskei word, of slyk vanaf rioolsuiweringsaanlegte verdik word), is die borrelgroottes wat vorm wanneer die versadigde hersirkulasiestroom in die flottasiereaktor ingespuut word, van deurslaggewende belang. Hierdie projek het dit ten doel om meer lig te werp op hierdie kritiese aspek van opgelostelugflottasie, naamlik die inspuutnossels waardeur die hersirkulasiestroom ingespuut word.

In die praktyk word op die oomblik 'n groot verskeidenheid inspuutnossels gebruik. Hierdie nossels kan enige vorm aanneem, van eenvoudige naaldkleppe tot hoogs gedetailleerde en wêreldwyd gepatenteerde verstelbare nossels. Al die nossels wat tans gebruik word (insluitende kommersiële nossels) is ontwikkel volgens suiwer empiriese beginsels wat geformuleer is uit ondervinding van die afgelope drie dekades. Die resultaat hiervan is dat daar geen sistematiese proses is waarvolgens nossels gekies kan word om borrels van 'n gevraagde grootte te lewer nie.

Dit is egter krities dat die borrelgrootte beheer word, aangesien borrels wat te groot is te vinnig styg, en sodoende die dryflaag kan opbreek. Te klein borrels sal weer te stadig styg en sal tot gevolg hê dat die retensietyd in die flottasietenk onnodig lank is, of dat die lugborreltjies by die onderste inlaat ingesuiig word.

Die meeste kommersiële nosselontwerpe is uiteraard vertroulik en daar is weinig eksplisiete gepubliseerde inligting oor enigeen beskikbaar. Uit 'n breë literatuurstudie en 'n ontleding van 'n aantal kommersiële nossels, kan egter afgelei word dat die volgende faktore waarskynlik 'n rol speel in die eienskappe van die borrels wat gegenereer word:

- Die diameter van die nosselkanaal.
- Die lengte van die nosselkanaal.
- Die vloeisnelheid van die oorversadigde water deur die nosselkanaal (die snelheid is 'n funksie van die versadigerdruk).
- Die plasing en die konfigurasie van 'n afskerming voor die nosselkanaal.
- Die plasing en die konfigurasie van 'n uitstroomtuit voor die nosselkanaal.
- Rigtingsveranderings in die nosselkanaal.
- Eksterne faktore soos die watertemperatuur, waterkwaliteit en fisiese konfigurasie van die flottasietenk.

1.2 DOELSTELLINGS MET DIE PROJEK

Die uiteindelijke doelwit is om 'n ontwerpmetode vir inspuitsnossels te ontwikkel waarmee borrels met willekeurige grootte en klein variasie gegenereer kan word. Hierdie projek het die volgende doelstellings, wat as boustene van so 'n ontwerpmetode nodig is:

- Die definisie en keuse van parameters waarmee die eienskappe van 'n borrelgrootte-verspreiding uitgedruk kan word.
- Die bou en toets van 'n stelsel waarmee borrels onder praktykgetroue toestande op reproduceerbare manier gemeet kan word.
- Die toets van geometries eenvoudige nossels om die fundamentele effek van sekere veranderlikes te bepaal, soos onder meer die effekte van druk, 'n afskermingsvlak buite die nosselkanaal, 'n knak in die nosselkanaal en 'n uitstroomtuit.

Met hierdie inligting bekend, en 'n teoretiese grondslag waarvolgens die eenvoudige nossels werk, kan meer komplekse nosselvorms en prototipes uit die praktyk getoets word.

1.3 INDELING VAN DIE VERSLAG

Hoofstuk 2 is 'n breedvoerige literatuuroorsig wat begin by die fundamentele gedrag van borrels, en stelselmatig uitbrei tot by die meer praktiese sy van kommersiële

nosselontwerp. Daar word aan die hand van teoretiese voorbeelde getoon hoe fisiese parameters borrelvorming en grootte behoort te beïnvloed.

Hoofstuk 3 bevat al die inligting betreffende die eksperimentele opstelling en prosedures. Die eksperimentele versadiger en flottasiekolom word in detail bespreek en aan die hand van illustrasies en kleurfotos beskryf. Die meettegniek wat gebruik is om die borrelgrootte te bereken word bespreek, en die fotografiese toerusting word beskryf.

Die volledige eksperimentele werk word opgesom in hoofstuk 4. Die statistiese tegnieke wat gebruik is om die data te kan ontleed word volledig bespreek, waarna resultate getoon word om die reproduseerbaarheid van die eksperimentele tegniek aan te toon. Die eksperimente wat gedoen is word individueel bespreek en die verwerkte data word getabuleer en verder grafies voorgestel waar nodig.

In hoofstuk 5 word die versoenbaarheid van die empiriese data met die teorie en die werklike eksperimentele data gedoen. Moontlike teoretiese verduidelikings vir die resultate word gegee aan die hand van selfgestelde hipoteses. Aan die hand van die hipotesis word riglyne vir nosselontwerp voorgestel.

Hoofstuk 6 bied 'n globale opsomming van al die resultate en bied ook 'n opsomming van die vernaamste bevindinge. Die projek word geëvalueer aan die hand van die oorspronklike doelwitte en moontlike ruimtes vir verdere navorsing word genoem.

HOOFTUK 2

LITERATUURSTUDIE

2.1 EIENSKAPPE VAN BORRELS BY EWEWIG

2.1.1 Borrelgrootte

Die bestaan en grootte van 'n mikroborel is 'n funksie van al die kragte wat op die borel inwerk. In hierdie afdeling word gepoog om die verwantskap tussen die fisiese parameters soos, temperatuur, druk, onderdempeling, hoogte bo seespieël en viskositeit te gee. Die resultaat word dan aan die hand van voorbeelde aangetoon.

2.1.1.1 Kragtebalans op 'n enkele borel

'n Lugborel wat onderdemp is in water is onderworpe aan 'n verskeidenheid van kragte. Van hierdie kragte poog om die borel saam te pers terwyl ander kragte die borel sy vorm laat behou. Indien die kragte mekaar balanseer sal die borel kan voortbestaan.

Die drie druk komponente wat poog om die borel saam te druk, is as volg:

- P_s - druk a.g.v. die oppervlakspanning by die lug/water kontakvlak
- P_a - druk a.g.v. die absolute atmosferiese druk op die wateroppervlak
- P_h - druk a.g.v. die addisionele hidrostatiese druk weens die onderdempeling.

Hierdie druk word teengewerk deur die druk wat uitgeoefen word deur twee gaskomponente binne in die borel, naamlik:

- P_g - druk a.g.v. die stikstof en die suurstof wat deur die versadiger geabsorbeer word
- P_v - druk a.g.v. die dampdruk van die water.

Wiskundig kan die ewewigsverband soos volg saamgestel word:

$$P_s + P_a + P_h - P_g - P_v = 0 \dots\dots\dots (2.1)$$

Indien die bogenoemde kragtebalans gebruik word om die borrelgrootte te bereken, is dit eers nodig om al die verskillende komponente te definieer.

2.1.1.2 Druk as gevolg van die oppervlakspanning

Die druk wat uitgeoefen word by die lug/water kontakvlak kan op die volgende manier uitgedruk word:

$$P_s = \frac{4 \sigma}{d} \dots\dots\dots (2.2)$$

waar d = borreldiameter [m]
 σ = oppervlakspanning [kg.s⁻²]

Die oppervlakspanning is 'n funksie van temperatuur, en word empiries gegee deur Perry *et al* (1984) as:

$$\sigma = 7,5583 \cdot 10^{-2} - 1,3143 \cdot 10^{-4} \cdot T - 4,7616 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \dots\dots\dots (2.3)$$

waar T = temperatuur [°C]

2.1.1.3 Druk as gevolg van die atmosferiese druk

'n Empiriese uitdrukking wat absolute atmosferiese druk in verband bring met gemiddelde hoogte bo seespieël, is (Perry *et al*, 1984):

$$P_a = \left(\frac{44332 - H}{11881} \right)^{5,256} \cdot \frac{1}{10,13} \dots\dots\dots (2.4)$$

waar H = hoogte bo seespieël [m]

2.1.1.4 Druk as gevolg van hidrostatiese druk

Die hidrostatiese druk word gegee deur die volgende algemene vergelyking:

$$P_h = \rho_w g h \dots\dots\dots (2.5)$$

waar h = diepte van borrel onder water [m]
 ρ_w = waterdigtheid [kg.m^{-3}]
 g = gravitasieversnelling [m.s^{-2}]

Die digtheid van suiwer water is 'n funksie van temperatuur, en word empiries gegee deur Perry *et al* (1984) as:

$$\rho_w = \frac{999,84 + 16,945 \cdot T - 7,987 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 4,617 \cdot 10^{-5} \cdot T^3}{1 + 1,688 \cdot 10^{-2} \cdot T} \dots\dots (2.6)$$

2.1.1.5 Druk as gevolg van stikstof en suurstof

Die ideale gaswet beskryf die druk wat uitgeoefen word deur die stikstof en suurstof (die ander gasse is weglaatbaar) uit as (Perry *et al*, 1984):

$$P_g = \frac{n R T}{\pi d^3} \dots\dots\dots (2.7)$$

waar T = temperatuur [K]
 n = aantal mol stikstof en suurstof [mol]
 R = universele gaskonstante [$8,313 \text{ m}^3 \cdot \text{kPa} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$]

2.1.1.6 Druk as gevolg van dampdruk

Die dampdruk van water kan empiries in verband gebring word met die temperatuur (Perry *et al*, 1984):

$$P_v = e^{0,1333 \left(18,859 - \frac{4133}{T + 238,4} \right)} \dots\dots\dots (2.8)$$

2.1.1.7 Berekening van borrelgrootte

Van al die bogenoemde vergelykings is slegs P_s en P_g funksies van die borreldiameter. Substitusie van al die vergelykings in die ewewigsvergelyking, lewer die volgende

kubiese vergelyking:

$$d^3 + \left(\frac{4 \sigma}{P_s + P_h - P_v} \right) d^2 - \frac{6 n R (T + 273,2)}{\pi (P_s + P_h - P_v)} = 0 \dots\dots (2.9)$$

Uit die bogenoemde vergelyking kan die borreldiameter bereken word. Die effek van enige veranderlike op die borrelgrootte kan vervolgens ondersoek word. Die volgende twee voorbeelde in tabelvorm illustreer die effekte van die verskillende parameters.

Voorbeeld 2.1.1.7 (a)

Die invloed van temperatuur, onderdompeling en hoogte bo seespieël kan bereken word vir die geval waar daar 10^{13} molekules lug per borrel is.

H [m]	h [m]	T = 5°C	T = 15°C	T = 25°C
1000	0	150,1 μm	149,9 μm	148,9 μm
	1	31,2 μm	31,0 μm	30,8 μm
	2	24,8 μm	15,0 μm	14,9 μm
5000	0	179,3 μm	178,3 μm	177,2 μm
	1	31,2 μm	31,0 μm	30,8 μm
	2	24,8 μm	15,0 μm	14,9 μm

Voorbeeld 2.1.1.7 (b)

Vir die geval waar al die suurstof oplos in die water, kan daar $0,8 \times 10^{13}$ molekules per borrel is oorbly van die 10^{13} molekules in (a) hierbo.

H [m]	h [m]	T = 5°C	T = 15°C	T = 25°C
1000	0	150,1 μm	149,9 μm	148,9 μm
	1	31,2 μm	31,0 μm	30,8 μm
	2	24,8 μm	15,0 μm	14,9 μm
5000	0	179,3 μm	178,3 μm	177,2 μm
	1	31,2 μm	31,0 μm	30,8 μm
	2	24,8 μm	15,0 μm	14,9 μm

Travers & Lovett (1985) het die gebruik van koolstofdioksied of 'n 1:3 mengsel van koolstofdioksied en stikstof ondersoek as medium vir opgeloste lug flottasie. Tabel 2.1.3.1 gee die gemiddelde borrelgrootte vir verskillende lug mengsels by 'n versadigerdruk van 200 kPa.

Tabel 2.1.3.1 Diameters van borrels gevorm by verskillende gasse en gasmengsels.

Flottasie gas	Gas samestelling [%]			Borrel diameter [μm]
	N ₂	O ₂	CO ₂	
Lug	76,6	23,4	2,05	80
Stikstof	100,0	-	-	60
Suurstof	-	100,0	-	120
Koolstofdioksied	-	-	100,0	700
Gas mengsel	74,6	-	25,4	90

Uit die resultate is dit duidelik dat die koolstofdioksied borrels heeltemal te groot is vir suksesvolle flottasie. Die 1:3 mengsel vergelyk goed met die borrelgrootte gemaak deur gewone lug.

2.1.1.8 Minimum borrelgrootte

De Groot & van Breemen (1987) gee drie moontlikhede wat die minimum borreldiameter kan beïnvloed.

- (a) $P = 4\sigma/d$, dan is die borreldiameter gelyk aan die minimum diameter, $d_{\min}$, en die borrel is in ewewig.
- (b) $P < 4\sigma/d$, $d < d_{\min}$, die borrel sal krimp a.g.v. die oppervlakspanning, totdat die borrel heeltemal verdwyn.
- (c) $P > 4\sigma/d$, $d > d_{\min}$, aangesien die borreldruk groter is as die oppervlaktespanning kan die borrel groei.

Daar is dus 'n minimum borreldiameter, by 'n gegewe atmosferiese druk, hidrostatiese druk, gasdruk en dampdruk, wat die minimum grootte is, sodat borrels sal vorm.

$$d_{\min} = \frac{4 \sigma}{(P_g + P_v - P_a - P_b)} \dots\dots\dots (2.10)$$

2.1.2 Borrelvorm

In stilstaande vloeistowwe met 'n lae viskositeit sal baie klein borreltjies sferies wees en reglynig styg. As die borrels groter word is daar 'n kritiese grootte waar die borrel eerder 'n ossilatoriese pad aanneem. Die borrels in die sone het die vorm van 'n afgeplatte sfeer. Soos die borrels nog groter word beweeg hulle weer reglynig opwaarts, maar hulle het dan 'n sferiese bopunt met 'n algeheel misvormde onderpunt. Vir meer viskeuse vloeistowwe soos mineraal olies, word die borrel meer misvorm soos dit groter word, maar dit bly deurgaans reglynig beweeg. In 'n studie deur Hartunian & Sears (1957) is die kritiese punt bepaal waar die borrel nie meer sferies is nie.

2.1.3 Stygspoed

Die volume van 'n gasborrel wat styg in 'n onversadigde vloeistof verander as gevolg van kontrasterende invloede (LeBlond, 1969). Gas sal gedurig uit die borrel lek en oplos in die omliggende omgewing as die borrel sou stilstaan, totdat die borrel heeltemal verdwyn. As die borrel egter styg, sal die omliggende hidrostatiese druk afneem en sodoende ook die druk in die borrel; die borrel wil dus uitsit. Vir borrels wat 'n klein verhouding van volume tot oppervlakarea, en 'n hoë stygspoed het, sal die afname in hidrostatiese druk meer as genoeg kompenseer vir die verlies deur die kontakvlak en sal die borrel groei terwyl dit massa verloor. Vir kleiner borrels sal die uitvloei van gas domineer, aangesien hulle te stadig styg, en die borrels sal krimp. Hierdie situasie geld net vir borrelgroottes wat styg volgens Stokes se wet (sien volgende afdeling).

2.1.3.1 Stokes Se Wet

Die maksimum borrelgrootte waarvoor Stokes se wet gebruik kan word vir 'n borrel se stygspoed in water by volledige viskeuse vloei word deur Vrablik (1959) bereken as $130 \mu\text{m}$ met 'n kritiese Reynoldsgetal van 1,13. LeBlond (1969) stel hierdie grens op $154 \mu\text{m}$ in water ($260 \mu\text{m}$ in alkohol), vir 'n kritiese Reynoldsgetal van 1.

Ramirez (1979) het 'n grafiek geplot wat die stygspoed van 'n borrel plot teenoor die borrelgrootte, deur van Stokes se wet gebruik te maak. Tesame met die waardes het hy prakties gemete waardes geplot. Uit sy werk het dit duidelik geword dat borrels groter as $150 \mu\text{m}$ nie meer styg soos voorgestel deur Stokes se wet nie, en fotografiese tegnieke het bevestig dat die borrels begin om elipties te raak bo die grens.

Rovel (1976) stel voor dat die borrelgrense vir opgeloste lug flottasie tussen 20 en $80 \mu\text{m}$ moet wees. Treille (1972) stel hierdie grense egter nouer op 15 tot $50 \mu\text{m}$.

De Groot & van Breemen (1987) noem dat die stygsnelheid van 'n enkel borrel afhangklik is van die diameter en die vorm van die borrel. Vir opgeloste-lug flottasie word egter slegs na sferiese borrels gekyk. Aangesien daar 'n vaste waterfilm om die borrel is, wat bestendig is, kan die borreltjie beskou word as 'n vaste sfeer. Die opwaartse krag van die borrel word gegee deur:

$$F_o = (\rho_w - \rho_b) \cdot g \cdot V \dots\dots\dots (2.11)$$

en die afwaartse krag deur:

$$F_s = C_D \cdot \frac{\rho_w}{2} \cdot s^2 \cdot A \dots\dots\dots (2.12)$$

F_o	=	opwaartse krag [N]
F_s	=	afwaartse krag [N]
ρ_w	=	waterdigtheid [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
ρ_b	=	borreldigtheid [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
g	=	gravitasieversnelling [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
V	=	volume van borrel [m^3]
A	=	area van borrel [m^2]
s	=	stygnsnelheid [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
C_D	=	weerstandskoëfisiënt [-]

Vir ewewig om te geld moet die opwaartse krag gelyk wees aan die afwaartse krag. Deur die bogenoemde vergelykings gelyk te stel en die stygsnelheid die onderwerp te maak, word die volgende vergelyking verkry:

$$s = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d \cdot (\rho_w - \rho_b)}{3 \cdot C_D \cdot \rho_w}} \dots\dots\dots (2.13)$$

Die weerstandskoeffisiënt is afhanklik van die Reynoldsgetal:

$$Re = \frac{s \cdot d \cdot \rho_w}{\mu} \dots\dots\dots (2.14)$$

Re = Reynoldsgetal [-]

μ = dinamiese viskositeit van water [kg.m⁻¹.s⁻¹]

Vir laminêre stroming moet die Reynoldsgetal kleiner wees as 1 (LeBlond, 1969).

Vir die weerstandskoeffisiënt geld dan:

$$C_D = \frac{24}{Re} \dots\dots\dots (2.15)$$

Vervanging van die vergelyking in die van die stygsnelheid gee Stokes se vergelyking:

$$s = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_w - \rho_b)}{18 \cdot \mu} \dots\dots\dots (2.16)$$

en omdat $\rho_b \ll \rho_w$:

$$s = \frac{g \cdot d^2 \cdot \rho_w}{18 \cdot \mu} \dots\dots\dots (2.17)$$

By 10°C is die laminêre stygsnelheid van 'n tipiese borrel 9 mm.s⁻¹, wanneer die diameter 145 μ m is.

2.1.3.2 Invloed van temperatuur

In Stokes se vergelyking vir die stygspoed van 'n enkel borrel verskyn daar twee parameters wat funksies is van die temperatuur. Die empiriese vergelyking vir die digtheid van die water is reeds vroër in die hoofstuk gegee, en die empiriese vergelyking vir die dinamiese viskositeit lyk as volg (Perry *et al*, 1984):

$$\mu = 1,787 \cdot 10^{-3} - 5,857 \cdot 10^{-5} \cdot T + 1,195 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 1,115 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 \dots \quad (18)$$

waar T = temperatuur [$^{\circ}\text{C}$]

Voorbeeld 2.1.3.2 Die tabel dui aan hoe die stygspoed geaffekteer word as die temperatuur verander word [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$].

Borrelgrootte	$T = 5^{\circ}\text{C}$	$T = 15^{\circ}\text{C}$	$T = 25^{\circ}\text{C}$
30 μm	0,322	0,430	0,546
80 μm	2,291	3,058	3,884
120 μm	5,154	6,880	8,739

2.1.4 Eienskappe van 'n borrelwolk

2.1.4.1 Tipiese lugdosering

Die opgeloste lug in die hersirkulasiewater, word na vermenging met die hoofstroom opgeneem as (De Groot & van Breemen, 1987):

- (a) gepresipiteerde lug in die vorm van borrels,
- (b) opgeloste lug in die versadiger water by atmosferiese druk,
- (c) opgeloste lug wat in die hoofstroom vassit as gevolg van oorversadiging, en
- (d) opgeloste lug waarmee die totale waterstroom oorversadig word.

As borrelvorming optimaal plaasvind, kan 'n vergelyking geskryf word waarvolgens die beskikbare lug vir flottasie bereken kan word:

$$c_f = f \cdot c_{sp} - c_{so} \dots \dots \dots (2.19)$$

- c_f = hoeveelheid lug voor borrelvorming [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ van hersirkulasiestroom]
- c_{sp} = versadigingskonsentrasie by absolute versadigerdruk [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$]
- c_{so} = versadigingskonsentrasie by atmosferiese druk [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$]
- f = versadigereffektiwiteit [-]

Dit is gebruikelik om die hoeveelheid lug in $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ van die hoofstroom te kry. Dit word gedoen op die volgende wyse:

$$a_1 = \frac{Q_h c_f}{(Q_h + Q_r)} \dots\dots\dots (2.20)$$

- a_1 = hoeveelheid lug voor borrelvorming [mg.l^{-1} van hoofstroom]
 Q_h = hersirkulasievloei [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$]
 Q_r = rouwatervloei [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$]

Van Breemen (1978) het in sy eksperimente summier enige borrels groter as $150 \mu\text{m}$ weggegooi en nie geanaliseer nie. By die berekening van die hoeveelheid lug wat in die borrels vasgevang is, raak hierdie waarde egter krities. Hy het genoem dat die totale volume lug van die aantal borrels wat kleiner was as die mediaan, het slegs 10% van die totale hoeveelheid lug van die gemete borrels beslaan. As 'n mens egter in gedagte hou dat die volume van 'n lugborrel eweredig is aan die derde mag van die borrel se diameter besef 'n mens dat een borrel van meer as $1000 \mu\text{m}$ dieselfde volume beslaan as 1000 borrels van $100 \mu\text{m}$ diameter.

Die aantal borrels van 'n gegewe grootte wat kan voorkom in een liter van 'n gas of vloeistof word gegee in tabel 2.1.1.

Tabel 2.1.1 Aantal borrels van gegewe grootte in een liter van 'n vloeistof of gas.

Borreldiameter [μm]	Aantal borrels
1000	$1,91.10^6$
100	$1,91.10^9$
50	$1,53.10^{10}$
10	$1,91.10^{12}$
5	$1,53.10^{13}$

2.1.4.2 Borrelverspreiding

Tipiese waardes vir borrelverspreiding is deur Vrablik (1959) genoem om tussen 30 en $120 \mu\text{m}$ te lê.

Takahashi (1979) het verskillende nossels getoets en borrels gemeet tussen 30 en $180 \mu\text{m}$. Hy het gevind dat, alhoewel daar 'n verskil is in die gemiddelde

borrelgrootte sodra die borrel in die kolom styg, is daar feitlik geen verskil in die borrelverspreiding nie. Sy toetse is gedoen met 'n 4 mm lang nossel en 'n deursnit van 0,4 mm, by 'n versadigerdruk van 350 kPa.

2.1.4.3 Invloed van 'n borrelwolk

De Groot & van Breemen (1987) stel 'n vergelyking voor wat gebruik kan word om die stygsnelheid van 'n borrelwolk te bepaal. Die breedte van die borrelwolk is afhanklik van die standaardafwyking van die borrelverspreiding:

$$b = \sqrt{2} \cdot \sigma_s \dots\dots\dots (2.21)$$

Verder is die breedte ook afhanklik van die hoogte van die kolom:

$$b = \frac{6}{5} \cdot \alpha \cdot x \dots\dots\dots (2.22)$$

b	=	helfte van borrelwolk breedte [m]
σ_s	=	standaardafwyking van borrelverspreiding [-]
α	=	koëffisiënt van vasvanging [mate van deursnee vergroting per meter styging]
x	=	afstand van borrelwolk van bron af [m]

Die stygsnelheid in die middel van die borrelwolk word dan gegee deur:

$$s = \left(\frac{25 \cdot g \cdot q_o \cdot H_o \cdot (1 + \lambda^2)}{24 \cdot \alpha \cdot \pi \cdot (H_o + H_K)} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot x^{-\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (2.23)$$

s	=	stygsnelheid [m.s ⁻¹]
g	=	gravitasieversnelling [m.s ⁻²]
q _o	=	beginvloei van water [m.s ⁻²]
H _o	=	piësometriese waterdruk t.o.v. atmosferiese druk [m]
H _K	=	hoogte van kolom [m]
1/λ ²	=	turbulente Schmidt getal [-]

2.2 BORRELMEETTEGNIKE

2.2.1 Fotografiese tegnieke

Sutherland (1947) het 'n fotografiese en 'n kinamotografiese metode gebruik om na borrels te kyk. 'n Fotografiese tegniek is die eerste keer genoem om opgeloste-lug flottasie borrels te fotografeer deur Vrablik (1959). Hy het nie sy sisteem verder bespreek nie, maar borrelgroottes tussen 30 en 130 μm gemeet. Ziemiński *et al.* (1967) het 'n fotografiese tegniek ontwikkel, maar dit was egter gebruik vir dispersiewe-lug flottasie. Hulle het fotos van die borrelwolk geneem met 'n Polaroid kamera met 'n makrolens, deur 'n 50 mm dik flottasiesel. Die fotos is belig met 'n stroboskoop wat 'n 3 μs flits gelever het. Die resultante fotos is op 'n skerm geprojekteer en die 20 borrels wat die skerpste in fokus was is getel en gemeet met die hand. Die fotos is gekalibreer deur 'n draadjie met bekende diameter saam met die borrels te fotografeer. Die akkuraatheid van die stelsel is met bekende glas sfere getoets en die fout is gemeet as 2,3%.

'n Nuwe benadering tot die fotografering van borrels het in 1973 na vore gekom in die werk van Reay & Ratcliff (1973). Hulle het borrels gevorm deur dispersiewe-lug flottasie gefotografeer met 'n hoë-spoed HYCAM film kamera. Gevriesde enkel beelde van fotos is geneem deur die flits van lig teen 1/1250 sekondes. Die beligting is van agter gedoen, deur die baie dun (plat) flottasiekolom. Die metode is ook gebruik deur Kirkpatrick & Lockett (1974), maar hulle het deur 'n 60 mm vierkantige buis gefotografeer. Die metode is ook deur Tsuge & Hibino (1978) gebruik, maar die kolom was 120 mm vierkantig.

Die werklike pionierswerk op die veld van borrelfotografering, veral vir opgeloste-lug flottasie het in die artikel van Cassel *et al.* (1975) verskyn. Hulle het fotos met 'n Polaroid kamera geneem deur 'n mikroskoop met 60 keer vergroting. Die groot probleem van genoegsame lig is oorkom deur van 'n buis gevul met optiese vesels gebruik te maak, wat so gebuig is dat die punt daarvan direk na die bek van die mikroskoop kyk. 'n Elektroniese flits is dan van bo af geflits sodat die lig in die optiese vesels afbeweeg om die borrels van agter te belig. 'n Groen filter is gebruik om die kontras op die borrels te verhoog. Die borrels is getel en gemeet deur die fotos te analiseer met 'n partikel analiseerder. Slegs duidelik gedefinieerde borrels is gemeet. Die stelsel is gekalibreer deur 'n mikrometer skyfie in gedistilleerde water

af te neem. Die stelsel se reproduseerbaarheid is getoets en gevind om 100% te wees. Die fotos is direk teenaan die wand van die glas flottasiekolom geneem. Die metode is gebruik deur ander navorsers soos Melville & Matijević (1975) en Shannon & Buisson (1980). Laasgenoemde het die proses aangepas deur 'n 300 μm draadjie saam met die borrels af te neem vir kalibrasie, en die borrels is gemeet deur 'n mikroskoop met 'n gegradeerde oogstuk te gebruik. 'n Soortgelyke metode is gebruik deur Kitchener & Gochin (1981), maar hulle het van flitstye van 0,04 tot 0,1 millisekondes gebruik gemaak. Fotos met totale vergrotings van 17 keer is gemeet en getel en het 'n akkuraatheid van ongeveer 10 μm opgelewer. Jones & Hall (1981) het ook 'n fotomikroskopiese metode gebruik, maar niks word verder genoem nie.

Sada *et al.* (1978) het groot borrels deur 'n silindriese 50 mm perspex kolom gefotografeer. Om die distorsie van die borrels as gevolg van die silindriese wand te verhoed het hulle 'n vierkantige tenk om die buis geplaas wat hulle met water gevul het. Die SLR-kamera is opgestel met 'n kombinasie van spieëls om op een foto twee beelde van verskillende kante van die borrels vas te vang. Die fotos is gekalibreer deur bekende diameter staal balle af te neem.

Waarskynlik die bes gedokumenteerde fotografiese tegniek is die van Bennekom (1978). Fotos is geneem van die borrelwolk met 'n kamera deur 'n mikroskoop. Vergrotings van tot 20,74 keer is gebruik. Die beligting is gedoen deur 'n kontinue lamp en 'n elektroniese flits, met 'n sluiterspoed van 1/250 sekondes. Die borrelgroottes is gemeet met die hand nadat die foto op 'n skerm geprojekteer is, en alle sigbare borrels getel is (selfs die wat nie in skerp fokus was nie). Die akkuraatheid is beperk tot 7,6 μm . Reproduseerbaarheidstoetse het resultate van tussen 90 en 95% gelewer. 'n Minimum van 500 borrels is vir elke eksperiment getel. Alhoewel die flottasiekolom 'n binnedeursnit van 290 mm gehad het, is die borrels reg langs die wand gefotografeer.

Takahashi *et al.* (1979) het ook 'n fotografiese tegniek gebruik, maar hy brei nie verder uit nie. Franz *et al.* (1980) het 'n plat glas venster op 'n 140 mm diameter kolom geplaas en fotos geneem met 'n sluiterspoed van 1/1000 en 'n iris opening van 16 tot 22. Beligting is met 'n elektroniese flits van agter gedoen. Die borrelverspreiding is met 'n partikel analiseerder gemeet.

Lovett *et al.* (1984) het fotos geneem met 'n 35 mm kamera gekoppel aan 'n zoom mikroskoop, en beligting deur 'n elektroniese flits van agter af. Diameters is met die hand gemeet van fotos af. Direkte fotografering van mikroborrels (75 tot 655 μm) wat tussen 2 glas plate, 1 mm van mekaar, opgetrek is, is gedoen deur Ahmed & Jameson (1985). Mikrofotografie is ook deur Miller (1985) gebruik om enkel borrels af te neem.

Die mees onlangse fotografiese borrelmetings is gedoen deur Yianatos *et al.* (1988) en Yamamoto & Ishii (1987). Hulle het groot borrels fotografies gemeet met 'n kamera en geanaliseer met 'n partikel analiseerder.

2.2.2 Meting met behulp van 'n kapilêre buis

Randall *et al.* (1989) het 'n stelsel ontwikkel om borrelgrootte te meet in twee- en drie fase sisteme. Die lengte en snelheid van elke borrel word gemeet deur 'n paar optiese sensors in 'n koper blok wat 'n kapilêre buis omring. Die borrels word opgetrek in die buis opgetrek. Die data kan dan in 'n mikroprosseerder gestoor word. Die borrelvolume en die gemiddelde diameter van elke borrel word dan met behulp van empiriese vergelykings bereken. Die reproduseerbaarheid van die stelsel is besonder goed, in die orde van 0,6% afwyking, vir die standaardafwyking van die gemiddelde borrelgrootte. 'n Nadeel van die sisteem is egter dat dit nie goed werk in baie digte borrelwolke nie, en ook is die borrelgrootte waarvoor die sisteem die mees geskik is in die omgewing van 2000 μm .

2.2.3 Lasertegnieke

Semiat & Dukler (1981) het 'n literatuurstudie gedoen oor metodes om borrels te meet. By lae vloeie is borrels veral gemeet deur fotografie. Die metode is egter beperk tot verdunde stelsels waar die velddiepte opties gepenetreer kan word. Vir snelhede van klein borrels is gebruik gemaak van 'n verwysings straal laser snelheidsmeter. Die metode is egter afhanklik van die teenwoordigheid van die statistiese Mie verspreiding, wat die stelsel dan beperk tot borrels kleiner as 150 μm . Die bepaling van die borrelgrootte berus op die amplitude van die lig wat gereflekteer word van die borrel.

Plawsky & Hutton (1988) stel dat laser-dopler borrelmetinge veral geskik is tussen 10 en 100 μm . Vir borrels groter as dit is die metode nie meer so geskik nie. Die metode gebruik die frekwensie van die lig wat versprei word deur die interferensie patroon van die laser op die snelhede van die borrels te bepaal.

2.2.4 Indirekte tegnieke

Tsuge *et al.* (1981) het groot borrels (4 tot 10 mm in deursnit) gemeet deur van fotodiodes gebruik te maak. Deur die verandering in ligintensiteit a.g.v. die borrelvorming by die plaat waar te neem en te versterk met 'n fotodiode, kan die tyd bereken word vir die borrelvormings frekwensie. Deur dan te aanvaar dat al die borrels wat gevorm word ewe groot is, word die volume van 'n individuele borrel bereken deur die gasvloeiempo te deel deur die borrelvormings frekwensie.

Yasunishi *et al.* (1986) het borrelgrootte bepaal deur gebruik te maak van 'n dubbele elektroresistiwiteit sonde metode. Die metode is baie kompleks en nie geskik vir digte borrelwolke van mikroborrels nie.

Yamamoto & Ishii (1987) het die stygsnelheid van 'n borrel gemeet deur van twee fotodiodes gebruik te maak wat op verskillende hoogtes van die kolom gerig was. Sodra die borrel dan verby die fotodiode beweeg word 'n teller geaktiveer wat as die begintyd gerigistreer word. Sodra die borrel verby die tweede diode beweeg sal die teller gestop word en die gemiddelde stygspoed van die borrel kan bereken word. Hieruit kan die borreldiameter bereken word. Die metode werk net vir enkel borrels, en is nie geskik vir opgeloste-lug flottasie nie.

Dobby *et al.* (1988) het 'n metode ontwikkel om borreldiameters tussen 100 en 200 μm te meet. Die metode van "Drift-Flux" analise benodig nie gesofistikeerde apparaat nie. Dit behels die meting van die gas- en opvloeiempos, spesifieke gewig van die opvloeiroom, en die drukval oor die onderste gedeelte van die flottasiekolom. Die waardes word analities ontleed en die borrelgrootte word empiries bepaal. Die metode is egter meer geskik vir borrel-slyk mengsels gemaak deur dispersiewe flottasie, as wat dit geskik is vir opgeloste-lug flottasie.

2.3 DIE NEERSLAG VAN LUG UIT 'N OORVERSADIGDE OPLOSSING

2.3.1 Spontane neerslag van lug

Volgens Vrablik (1959) presipiteer gas in twee stadias: (a) die vorming van 'n kern en (b) die groei van die kern. As die aantal kerne beheer word, kan die borrelgrootte beheer word. Deur die tempo van gasvrylating te beheer, kan die turbulensie beheer word, wat die aantal kerne sal beheer.

Zieminski *et al.* (1967) het die tyd bereken wat 'n borrel neem om te groei van die begin van borrelvorming totdat die borrel sy maksimum grootte bereik het. Die berekening is gedoen vir borrels gevorm deur dispersie van lug deur 'n plaat. Vir groot borrels (1400 μm) is die tyd 45 millisekondes, en vir klein borrels (600 μm) is dit 9 millisekondes.

De Groot & van Breemen (1987) reken dit is onwaarskynlik dat die toevallige samevoeging van gas-molekules in water 'n groot genoeg stabiele kern kan vorm. Om die verdere groei van so 'n kern te bewerkstellig word 'n minimale borreldiameter vereis. As daar nie so 'n kern is nie sal die borrel krimp en verdwyn. Om hierdie minimale diameter te kan kry word ten minste 300 molekules lug benodig. By 'n verhouding van (mol lug: mol water) van 9×10^{-5} is die kans hiervoor baie klein.

2.3.2 Kernvorming

Volgens De Groot & van Breemen (1987) kan die vorming van gasborreltjies in oorversadigde water voorgestel word deur die diffusie van gas na die borrel en die groei van kerne in die water. Daar is twee tipes kerne naamlik: stroomkerne en oppervlaktekerne.

Bennett (1988) rapporteer dat die borrels sal nuklieër op enige beskikbare lae-energie bronne op soliede oppervlakte. As daar geen bronne beskikbaar is nie, sal die borrels homogeen nuklieër in die vloeistoffase. Die borrels sal dan groei totdat hulle deur diffusie beperk word. Hulle rapporteer verder die werk van ander navorsers wat teoretiese werk gedoen het oor borrelvorming. Die navorsers reken dat die oorversadigde oplossings van gasse baie stabiel is en dat eksterne agitatie nodig is om borrels te vorm. Hulle het 'n model ontwikkel wat toon dat die beskikbare

borrelkerne gevorm word in die middel van vry sleurstrome, en dat die aantal kerne toeneem met vloeisnelheid, en verminder met viskositeit, nosselgrootte en oppervlakspanning.

2.3.2.1 Stroomkerne

Stroomkerne word deur die water vervoer tot waar 'n gasborrel ontstaan (De Groot & van Breemen, 1987). Die kerne kan klein gasborreltjies wees, hidrofobiese deeltjies waaraan die gas absorbeer of gasborreltjies met 'n organiese omhulsel.

2.3.2.2 Oppervlaktekerne

Oppervlaktekerne is mikroskopiese klein skeurtjies en holtes in die wande van die struktuur (De Groot & van Breemen, 1987). Die onreëlmatighede veroorsaak drukverskille en dus spanning in die vloeistof. In die holtes kan klein konsentrasies van gas gevind word. Die gas kan slegs vassit in die holtes as die oppervlak van die plekke hidrofobies is, met ander woorde die gebied het 'n lae aantrekkingskrag vir water. Die groei van borreltjies op die plekke is slegs moontlik as die borreltjie die kritiese boreldiameter bereik het.

2.3.3 Kavitasie

Kavitasie is die groei van borrels deur drukverlaging, gevolg deur die inploffing van die ontstane borrels in kleiner borreltjies omdat die druk nie konstant is nie (De Groot & van Breemen, 1987). As ons kyk na die drukval oor 'n vernouing (tipies 'n nossel), geld vir Bernoulli se vergelyking:

$$P_1 + \frac{\rho_w v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_w v_2^2}{2} \dots\dots\dots (2.24)$$

en aangesien $v_2 \gg v_1$:

$$P_2 = P_1 - \frac{\rho_w v_2^2}{2} \dots\dots\dots (2.25)$$

- P_1 = druk voor vernouing [kPa]
- P_2 = druk in vernouing [kPa]
- v_1 = snelheid voor vernouing [m.s^{-1}]

$$\begin{aligned}v_2 &= \text{snelheid in vernouing [m.s}^{-1}\text{]} \\ \rho_w &= \text{waterdigtheid [kg.m}^{-3}\text{]}\end{aligned}$$

Die uitstroomstraal na die vernouing is in die vorm van 'n enkel straal water. Die buitekant van die straal water kom in aanraking met die stilstaande water, sodat groot werwels (turbulensie) ontstaan. Verder stroomaf word die stroom meer uitgesprei en die turbulensie intensiteit neem af. Kavitاسie bestaan ook op swak plekke waar daar onreëlmatighede op die wand is.

Kitchener & Gochin (1981) het opgemerk dat groot borrels gevorm word by nossels in opgeloste-lug flottasie. Hulle stel voor dat dit waarskynlik gevorm word a.g.v. die groei van borrels in hoeke of pype wat lei na die nossel waar die water nog gedeeltelik oorversadig is. Die effek was duidelik sigbaar toe hulle glas spuite gemaak het. Die stadig sirkulerende werwelstrominge naby die opening of die verlengde hidrofobiese opening is waargeneem. Om die effek te verhoed is gladde glas spuite in die vorm van venturi buise ondersoek. Die buise vorm mikroborels as water onder genoegsame druk daardeur vloei om kavitاسie in die keël te veroorsaak. Die kritiese druk stem ooreen met die generasie van nul druk by die keël, volgens Bernoulli se beginsel. As die kavitاسie plaasvind word 'n gebied van opaalagtige damp direk stroomaf van die keël waargeneem. Die mikroborels wat gevorm word by die kaviterende opening, begin waarskynlik as sub-mikroskopiese vakuole wat afgeskeur word van die ultrasoniese ossillerende dampholte. As die toevoerdruk verlaag word tot net voor die druk nodig vir sigbare kavitاسie word feitlik geen borrels gevorm nie. As die venturibuis se tuit stomp afgesny word, sal dit nie kaviteer nie, en mikroborels sal nie vorm nie omdat daar nie 'n dampholte is nie. Hulle kon nie met sekerheid vasstel of die groot borrels wat gevorm word is a.g.v. botsing en borelsamevoeging of diffusie nie.

2.3.4 Gibbs vrye energie

Takahashi *et al.* (1979) verklaar dat dit moontlik is om die teorie van kernvorming en kritiese diameter te verklaar met die beginsel van veranderende vrye energie by borrelvorming. Die verandering van vrye energie as gevolg van die vorming van borrels wanneer die druk verminder word na atmosferiese druk, word gegee deur die Gibbs vrye energie.

$$\Delta F = \left(P_a + \frac{4 \sigma}{d} \right) \cdot \frac{\pi d^3}{6} \cdot \ln \left(\frac{P_a + \frac{4 \sigma}{d}}{P_A} \right) + \frac{\pi d^2 \sigma}{3} \dots (2.26)$$

ΔF	=	vrye energie [N.m]
P_a	=	atmosferiese druk [N.m ⁻²]
P_A	=	opgeloste druk [N.m ⁻²]
σ	=	oppervlakspanning [N.m ⁻¹]
d	=	borreldiameter [m]

Vanuit die vergelyking kan figuur 2.3.4 geteken word, waar ΔF geplot word teen borreldiameter. Uit figuur 2.3.4 geld dit dat:

- (a) $d < d_c$, Geen groei is moontlik omdat die energie nie sommer kan toeneem nie,
- (b) $d > d_c$, Die borrel kan nie krimp nie en is geneig om te bly groei.

Die punt C in die figuur geld vir die geval $\partial \Delta F / \partial d = 0$, waar

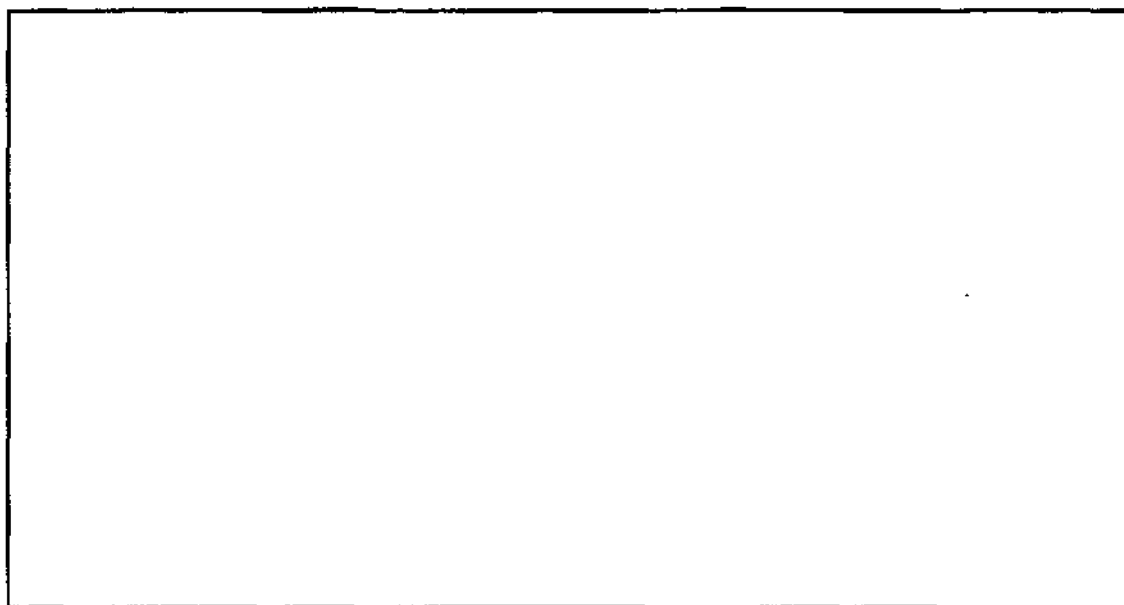
$$\Delta F = \frac{16 \pi \sigma^3}{3 (P_A - P_a)^2} = \frac{\pi \sigma d_c^2}{3} \dots \dots \dots (2.27)$$

sodat

$$d_c = \frac{4 \sigma}{P_A - P_a} \dots \dots \dots (2.28)$$

Onder hoë opgeloste druk sal die borrel dus makliker vorm, en sal die borreldiameter kleiner word.

Uit die bogenoemde kan die effek van oppervlakspanning en versadigerdruk op die borrelgrootte bepaal word. Die energie nodig om 'n borrel te vorm kan verlaag word deur die oppervlakspanning te verlaag of die versadigerdruk te verhoog. As dieselfde konsentrasie van opgeloste lug gehandhaaf word, sal 'n groter aantal kleiner borrels gegenereer word, want die energie benodig vir borrelvorming is dan minder. Die borrelgrootte is dus direk eweredig aan die oppervlakspanning en omgekeerd eweredig aan die versadigerdruk. Die effek van versadigerdruk is egter onseker aangesien druk



Figuur 2.3.4 Grafiek van die verandering in die vrye energie, Takahashi *et al.* (1979).

nie alleen die energie benodig vir borrelvorming affekteer nie, maar ook die ewililibrium konsentrasie van die opgeloste lug (Henry se wet).

2.3.5 Massa-oordrag na borrel

Die gasoordrag na die borrel tydens die groeiproses word gegee deur (De Groot & van Breemen, 1987):

$$m' = D \cdot A_g \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t} \dots\dots\dots (2.29)$$

m'	=	gasoordrag [g.mol.s ⁻¹]
D	=	diffusiekoëfisiënt [m ² .s ⁻¹]
A_g	=	oppervlak van die grensvlak [m ²]
Δt	=	grenslaagdikte [m]
Δc	=	konsentrasie [g.m ⁻³]

Soos die borrel groei word die borrelwand dunner. In 'n lewensduurte van een millisekonde groei 'n borrel van 5 tot 150 μm . As die borrel inmekaar val, breek dit op in 'n groot aantal klein borrels met diameters van sowat 30 μm . Kavitasie word reeds by drukverskille so laag as 1 tot 2 kPa waargeneem.

Wanneer die borrelvorming nie optimaal is nie, is dit moontlik dat 'n gedeelte van die opgeloste druk verlore gegaan het voor die vorming van borrels. Die gevolg hiervan is dat die hoofstroom oorversadig raak, en gasoordrag vind plaas na die borrels toe (Shima & Tsujinu, 1974). In tabelle 2.3.5.1 en 2.3.5.2 is hulle resultate met betrekking tot die tyd wat borrels neem om te groei.

Tabel 2.3.5.1 Tyd nodig vir borrel om te groei (van r_0 tot by $5r_0$) in water by 20°C, met oppervlakspanning in ag geneem.

$f' = c/c_s$	$r_0 = 0,01$ mm	$r_0 = 0,10$ mm	$r_0 = 1,00$ mm
1,10	-	0,321 ms	0,00305 ms
1,25	15,40 ms	0,119 ms	0,00117 ms
1,50	6,44 ms	0,056 ms	0,00056 ms
1,75	3,98 ms	0,036 ms	0,00036 ms
2,00	2,84 ms	0,026 ms	0,00026 ms
5,00	0,54 ms	0,005 ms	0,00005 ms

Tabel 2.3.5.2 Tyd nodig vir borrel om te groei (van r_0 tot by $5r_0$) in water met $r_0 = 0,01$ mm en $f' = 1,50$.

Temperatuur [°C]	0	20	40
Tyd [millisekondes]	8,36	6,44	4,86

Uit die tabelle is dit duidelik dat die groeisnelheid van die borrel toeneem namate:

- (a) die oorversadiging van die water groot is,
- (b) die oorspronklike borrel klein is, en
- (c) die temperatuur hoog is.

2.3.6 Borrelsamesmelting

Borrelsamesmelting gebeur in twee stappe (Jackson, 1964): (a) eerstens dreineer die vloeistof van die gebied waar die borrels moet saamvoeg, totdat die vloeistof verminder is tot 'n bepaalde kritieke dikte, (b) tweedens bars die kritieke filmdikte en die borrels voeg saam. Die snelheid van samevoeging hang af van: (a) die krag

waarteen die borrels na mekaar gestoot word, (b) die weerstand van die skeidingsfilm teen dreinerings en die kritiese dikte en sterkte van die finale film. Vir die borrels om te kan saamvoeg moet die borrels dus lank genoeg in mekaar se kontak wees. In 'n borrelwolk voeg borrels primêr saam as gevolg van die relatiewe beweging van die borrels van verskillende groottes. Groter borrels styg vinniger as kleiner borrels en groei steeds soos hulle saamvoeg met kleiner borrels in hulle pad. Borrelsamevoeging van borrels van gelyke grootte, blyk 'n ongewone verskynsel te wees.

Komplekse wiskundige modelle soos die van Marrucci (1969), kan opgestel word om die teorie van borrelsamevoeging beter te verduidelik, maar daar sal nie daarna gekyk word in die studie nie.

Bennekom (1978) noem drie meganismes waarvolgens borrels mekaar kan nader in 'n borrelwolk:

- (a) snelheidsgradiënt in die vloeistof ontstaan, veral as gevolg van die turbulensie by borrelvorming,
- (b) die een borrel kan in die warrelstroom van 'n ander beland, a.g.v. die verskillende stygsmaltes wat voorkom in 'n borrelwolk, en
- (c) borrels groter as $50\text{ }\mu\text{m}$ kan verskillende ladings besit waardeur aantrekking van die borrels 'n rol speel.

Verder stel Bennekom (1978) dat borrelsamevoeging veral optree in die turbulente gebied, direk na die nassel, waar die borrel vorm, en dat die res van die flottasieruimte weggelaat kan word, omdat:

- (a) die totale luggehalte van die borrelwolk laag is (maksimum van 1,2 l lug per 100 l water).
- (b) vir borrels kleiner as $50\text{ }\mu\text{m}$ geld Stokes se wet (die borrels volg dus die stroomlyne van die water en vorm eilande in die turbulente waterstroom, waarlangs die stroming laminêr is. Omdat die stroomlyne nie kruis nie kan die borrels nie bots nie).

Volgens Kirkpatrick & Lockett (1974) is borrelsamevoeging afhanklik van die borrelgrootte en die snelheid waarmee borrels mekaar nader. Die vormverandering van die borrel, sowel as die oppervlak waaroor die dreinerings van die vloeistoffilm

moet plaasvind speel elkeen 'n belangrike rol. By groot borrels is die kontakvlak a.g.v. deformasie groot, en moet die dreinerings oor 'n groot oppervlakte plaasvind. A.g.v. die borrel se inherente veerkrag is die kontaktyd by hoë botsings snelhede te kort om die vloeistoffilm te breek. Die filmdikte kan weer toeneem en die borrels voeg nie saam nie. As die botsings snelheid laag is, bly die kontakoppervlak klein, en die kontaktyd is groot genoeg (enkele millisekondes) om die kontakfilm te breek.

Kirkpatrick & Lockett (1974) het gemeet dat borrelsamevoeging gebeur sodra die filmdikte kleiner as $2,5 \cdot 10^{-7}$ mm word. Verder het hulle gevind dat die kans op borrelsamevoeging baie groot is by borrels kleiner as $250 \mu\text{m}$. Alhoewel die hoë snelhede in die turbulente sone van die nussel dus gunstig is vir borrelsamevoeging om nie te gebeur nie, is die borrels by opgeloste-lug flottasie kleiner as $250 \mu\text{m}$, en dit bevorder borrelsamevoeging.

Die toevoeging van oppervlak-aktiewe stowwe verlaag die moontlikheid van borrelsamevoeging. Die water is polêr en die borrels nie-polêr sodat die borrels elektries gelaai word, die borrels stoot dus mekaar af.

2.4 PRAKTIESE FAKTORE WAT BORRELVORMING BEINVLOED

By die vrylating van die lug uit die nussels word algemeen aanvaar dat die drukval plaasvind in een stap, maar Treille (1972) het beweer dat 'n stapsgewyse vermindering van die druk, die vorming van kleiner borreltjies bevoordeel.

2.4.1 Druk

Vrablik (1959) het gemeet dat die verhoging in versadigerdruk van 138 tot 345 kPa geen verskil gemaak het op die band van borrelgroottes wat gemeet is nie, maar die hoër druk het 'n skerper klassifikasie van die borrelgrootte gegee tesame met 'n meer uniforme borrelverspreiding.

Treille (1972) het gemeet dat by 600 kPa is die borrels kleiner as by 400 kPa, en die borrels is meer uniform. Hy het ook gevind dat die snelheid waarteen lug deur die nussel beweeg van groot belang is by borrelgrootte. Van Bennekom (1978) rapporteer namens 'n Duitse navorser, dat 'n verhoging in die stroomsnelheid deur die nussel veroorsaak dat die borrelgrootte sterk toeneem. Solank die snelheid onder $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

bly, is die invloed egter geringer. Dit word egter nie genoem hoe die snelheid by 'n konstante druk vermeerder word nie.

In 'n toets gedoen deur KIWA NV (van Bennekom, 1978), is gemeet dat Bete-nossels (sonder uitstroomtuit) 'n afname in borrelgrootte tot gevolg gehad het met die verhoging van die versadigerdruk. Die AKA-nossels (met uitstroomtuit) en WRC-nossels (met uitstroomtuit) het groter borrels by hoër druk tot gevolg. In alle gevalle is die borrelkonsentrasie by die hoër druk aansienlik meer.

In die Degrémont (1979) handboek verskyn twee fotos van mikroborels wat duidelik toon dat borels by 'n hoër druk kleiner is as by 'n laer druk. Die borrelverspreiding by die hoër druk is vanselfsprekend ook hoër.

Maddock (1976) stel dat, om soveel as moontlik boreltjies uit oplossing te kry dit nodig is dat die stroming direk na die nessel sterk turbulent moet wees. Dit is egter in teenstelling met wat Bratby & Marais (1975) gesê het, dat turbulensie na die nessel van geen belang is nie.

Van Bennekom (1978) rapporteer dat 'n Duitse navorser in 1975 gemeet het dat 'n hoër drukval oor die nessel lei tot die vorming van klein borels. Bokant 600 kPa neem die borrelgrootte egter nie verder af nie.

Takahashi (1979) het gemeet dat die borrelgrootte drasties afneem soos die druk verhoog word van 75 tot 350 kPa, veral as die borrel op 'n hoogte van 800 mm bokant die nessel gemeet word. Op 'n hoogte van 300 mm bokant die nessel is die verskil nie so merkbaar nie. Bokant 300 kPa is die effek wat die versadigerdruk het op die borels nie groot nie. Die boreldigtheid neem drasties toe soos die versadigerdruk verhoog word van 100 tot 500 kPa.

Ramirez (1979) het studies oor borelvorming gedoen tussen 345 en 415 kPa. Hy het gemeet dat groter borels gevorm word by hoër drukke.

Lovett *et al.* (1984) het in 'n ondersoek na slagpaal afvoerwater behandeling met opgeloste-lug flottasie gemeet dat die borrelgrootte byna konstant bly oor die drukgrense van 100 tot 500 kPa. In totaal was die gemiddelde borrelgrootte maar 20 μm meer by 500 kPa as by 100 kPa.

Lovett & Travers (1986) skryf die verskille in die resultate oor wat gebeur met borrelgrootte by verskillende versadigerdrukke toe aan die feit dat verskillende navorsers met verskillende nossels gewerk het.

McKay *et al.* (1988) het in hulle toetse gemeet dat die verhoging van die versadigerdruk van 200 tot 400 kPa vergroot die borrelgrootte met omtrent 1000 μm , en verdere verhoging van die versadigerdruk het feitlik geen invloed op die borrelgrootte nie. Verder het hulle waargeneem dat die vermeerdering van die uitstroomsnelheid van die waterstroom van 8,8 na 9,9 m.s^{-1} het tot gevolg dat die borrelgrootte vermeerder van 2200 μm na 3900 μm .

2.4.2 Temperatuur

Van Bennekom (1978) se eksperimente kon geen verandering in borrelgrootte waarneem as gevolg van 'n toename in temperatuur 5°C na 17°C nie.

Shannon & Buisson (1980) het gemeet dat by 'n konstante versadigerdruk van 210 kPa die verandering in temperatuur van 21°C na 50°C tot by 80°C nie enige invloed gehad het op die mediaan borrelgrootte nie (dit was 66 μm). By 'n verhoging in die versadigerdruk na 350 kPa teen dieselfde vloeitempo het die mediaan borrelgrootte by beide 50°C en 80°C afgekom na 42 μm . By 87°C en 350 kPa het die verlaging van vloeitempo deur die nossel tot gevolg gehad dat die mediaan borrelgrootte verhoog van 50 μm na 70 μm . Die stygspoed van die borrels is aansienlik hoër by hoër temperature aangesien die water se viskositeit aansienlik laer is.

McKay *et al.* (1988) het gemeet dat die watertemperatuur geen noemenswaardige effek het op die borrelgrootte wat gegenereer word nie.

O'Connor *et al.* (1988) het gemeet dat as die viskositeit van 'n vloeistof toeneem sal die borrelgrootte in daardie medium vergroot. Dit kan wees a.g.v. die vloeistof films wat vinniger vorm by borrelvorming soos die viskositeit verlaag, en sodoende minder lug in die borrel vasvang. 'n Toename in temperatuur is gevind om die borrelgrootte af te bring.

Malley Jr & Edzwald (1991) het borrel volume konsentrasies van 5900 d.p.m. by 4°C en 4600 d.p.m. by 20°C gemeet. Dit kan dan gesê word dat die borrels by laer temperature baie kleiner is as by hoër temperature.

2.4.3 Chemiese Byvoegings

Sutherland (1947) het gevind dat die byvoeging van denne-olie by die water kleiner borrels tot gevolg het. Toevoegings van 2,5, 5 en 10 mg/l het die gemiddelde borrelgroottes afgebring onderskeidelik na 960, 640 en 430 μm .

Zieminski *et al.* (1967) het baie navorsers aangehaal wat sê dat die toevoeging van organiese oplossings tot die water tot gevolg het dat die borrelgrootte afneem. Verder het hy self gemeet dat die borrelgrootte drasties afneem met toevoeging van organiese sure en alkohole by die water. Hy het verder gevind dat die toevoeging van organiese alkohole borrelsamevoeging beperk en meer uniforme borrels tot gevolg het.

Melville & Matijević (1976) het gemeet dat die toevoeging van verskillende katione die borrelgrootte laat afneem.

Cassel *et al.* (1974) het gemeet dat die verhoging van aluminium sulfates en 'n verlaging van die vloeistof se pH na 4,5 tot gevolg het dat die gemiddelde borreldiameter ietwat groter word. Toevoeging van 1 ml.l⁻¹ etanol tot die water by konstante pH het 'n drastiese afname in die borreldiameter van ongeveer 500 μm tot 50 μm tot gevolg gehad, terwyl die toevoeging van lauriensuur nie 'n baie merkbare effek het nie (veral onder 5 ml.l⁻¹).

Bratby & Marais (1974) het gevind dat dit moontlik is om die oppervlakspanning in die grensvlak van die lugborrel te verander m.b.v. kollekteerders. Die koagulasiemiddel het ook 'n invloed op die lading van die borrel.

Ramirez (1979) stel dat een van die dominerende parameters wat die borrelgrootte beïnvloed die oppervlakspanning van die water is. Die oppervlakspanning van die water, vir klein borrels om gevorm te word behoort onder 72 en verkieslik onder 65 mN.m⁻¹ by 25°C te wees. Toetse het getoon dat as die oppervlakspanning van die water afneem, neem die moontlikheid van die vloeistof om stabiele lug-vloeistof verbindings te vorm toe.

Van Bennekom (1978) kon geen merkbare verandering in borrelgrootte waarneem met die toevoeging van etanol tot die water nie.

Van Bennekom (1978) het namens 'n Duitse navorser gerapporteer dat 'n verhoging van die pH van die water tot gevolg het dat die borrelgrootte afneem tot by omtrent 'n pH van 6 waarna die borrelgrootte onveranderd bly.

De Groot & van Breemen (1987) het die volgende opmerkings gemaak. 'n Versamelaar bestaan uit 'n lang molekuul. Die deel is hidrofobies en chemies onaktief. Die hidrofiele deel keer terug na 'n vaste stof en die hidrofobe deel na 'n vloeistof, sodat die stelsel in geheel hidrofobies raak. Die kontakhoek word gunstig hierdeur beïnvloed. 'n Skuimmiddel werk ook op die manier, dit besit ook 'n hidrofobiese en 'n hidrofiliese deel. 'n Stabiele borrelwand bestaan, sodat kleiner borreltjies kan vorm en borrelsamevoeging verminder. Die borrels bars ook minder as dit by die oppervlak kom.

McKay *et al.* (1988) het toetse gedoen op borrelgrootte en gevind dat die toevoeging van slegs 12,5 d.p.m. van 'n oppervlakaktiewe reagens die borrelgrootte verlaag van omtrent 4000 μm na omtrent 400 μm . By groot nosseldiameters en hoë versadigerdrukke is hierdie verskille groter.

Tucker *et al.* (1990) het 'n gepatenteerde "Cominco Sparger" getoets, en die borrelgrootte daarvan bepaal. Hulle het gevind dat die toevoeging van 'n oppervlakaktiewe reagens Aerofroth 65, die borrelgrootte afgebring het van ongeveer 2950 μm na slegs 670 μm , by 10 d.p.m. Met die toevoeging van slegs 1 d.p.m. is die borrelgrootte reeds byna gehalveer gewees. Hulle het verder waargeneem dat die toevoeging van die reagens 'n stabiliserende uitwerking het op die borrels wat gevorm word. Sonder die reagens was daar 'n groot aantal growwe borrels sigbaar op die rand van die kolom terwyl die borrels baie egalig was met die reagens in die water.

O'Connor *et al.* (1988) het gemeet dat die toevoeging van oppervlak aktiewe reagentse 'n verlaging in borreldiameter tot gevolg het, en so ook die toename in die pH van die water.

2.4.4 Geometrie van die nosselkanaal

Treille (1972) het uit eksperimente gewys dat die vorm van die uitlaattoestel van belang is, en dat die hoeveelheid lug wat vrygelaat word, 'n funksie van die nosselvorm is.

Van Bennekom (1978) het gemeet dat die borrelkonsentrasie soms drasties afneem by klein deurstroomopeninge vir nossels. Die invloed op borrelgrootte was egter gering, behalwe by die WRC 2,2 mm-nossel, waar baie min en baie klein borreltjies gevorm het. Ongeveer helfte van die lug verdwyn in borrels wat groter is as 5 mm.

Treille (1972) beweer dat die vorming van klein uniforme borrels veroorsaak word deur die komplekse vrylatingssisteem wat hy gebruik het.

Takahashi (1979) het gemeet dat vir 'n nossel met 'n konstante deursnit van 0,25 mm die borrels aansienlik groei as die nossel verleng word van 12,5 mm na 50 mm (L/D neem toe van 50 na 200). Soos die druk verlaag word groei die borrels selfs nog verder. Vir 'n nossel met 'n deursnit van 0,2 mm het die borrelgrootte egter marginaal toegeneem soos die nossellengte vergroot is van 2 na 4 mm (L/D neem toe van 10 na 20). Die borrelgrootte gelewer deur die L/D verhouding van 20 en die van 50 is byna dieselfde.

Vosloo & Langenegger (1979) rapporteer dat 'n vorige navorser verskillende nosseldiameters getoets het teen 'n konstante versadigerdruk, en gevind het dat kleiner diameter borrels gevorm word by kleiner diameter nossels. 'n Praktiese limiet van nosselgrootte word egter gestel op 3 mm. Naaldkleppe werk goed as vrylatingstoestelle, waarskynlik a.g.v. die feit dat die opening beskou kan word as 'n baie nou lang opening wat 'n groot aantal klein openingkies simuleer.

De Wet (1980) rapporteer dat die gebruik van 'n diafragmaklep vir 'n vrylatingstoestel ongunstige resultate lewer, aangesien die geleidelike drukverlies deur die klep groot borrels veroorsaak. Die klep is vervang met naaldkleppe van onderskeidelik 1, 2 en 5 mm diameters. Aangesien die kontakarea tussen die naald en die rusplek 'n smal silindriese strook is, kan die drukval vinnig plaasvind. By hoë vloeitempos het die 5 mm naaldklep groot borrels gemaak, terwyl die 1 mm klep verstop het by lae vloeie. Vir sy eksperimente is gevind dat die beste resultate gelewer word met 'n

2 mm nossel.

McKay *et al.* (1988) het gevind dat die vergroting van die nosseldiameter van 0,25 mm tot 3,3 mm 'n vergroting in borrelgrootte tot gevolg gehad het van 3000 μm tot 5000 μm .

2.4.5 Afskerming

Uit 'n ondersoek het dit duidelik geword dat 'n afskerming voor die nossel direk na die opening geen noemenswaardige invloed het op die borrelgrootte nie (van Bennekom, 1978).

Vosloo & Langenegger (1979) stel dat meer volledige borrelvorming plaasvind as daar 'n afskerming voor die waterstraal geplaas word. Daar ontstaan egter 'n aantal groot borrels tussen die kleintjies wat onder die skerm uit ontsnap. Dit het gelei tot die gevolgtrekking dat onmiddellik stroomaf van die nossel, om die waterstraal, 'n lae druk sone ontstaan, met werwelstrome wat die borrels rondslinger in die beperkte sone. Die botsings lei tot vorming van groot borrels. Die probleem is oorkom deur 'n aantal klein gaatjies te boor in die omhulsel direk stroomaf van die nossel. Die lae druk sone om die waterstraal kon nou nie meer bestaan nie, aangesien 'n beperkte hoeveelheid water deur die gate opgesuig is.

'n Verdere funksie van die afskerming is om die turbulensie wat deur die waterstraal veroorsaak word, te lokaliseer en sodoende die vloeisnelheid af te bring. Die lengte van die skerm is van kritieke belang. As die skerm te kort is, kan die oorversadigde water te gou verdun sodat volledige borrelvorming nie kan plaasvind nie. In teendeel as die skerm te lank is, het die borrels meer kans om saam te voeg en groter borrels word gevorm. Vosloo & Langenegger (1979) stel dat die skerm nie langer moet wees as 2 mm nie, en dat dit vervaardig moet word uit elektro gepoleerde vlekvrige staal. Hulle beweer dat enige onreëlmatighede kan lei tot premature nukleasie en gepaardgaande groot borrels.

2.4.6 Uitstroomtuit

Kirkpatric & Lockett (1974) het gesê dat 'n uitstroomtuit die nadeel het dat groot borrels gevorm word omdat die kans op borrelsamevoeging groot is.

Met die toevoeging van 'n uitstroomtuit voor die nossel word die borreltjies kleiner, en baie meer. Dit word voorgestel dat die verbetering is as gevolg van die verhoging in turbulensie wat die borrelvorming versnel. In die uitstroomtuit spuit die water teen die wand van die tuit, wat die snelheid breek en die water omsit in turbulensie (van Bennekom, 1978). Om te bewys dat die verhoging in die turbulensie die borrelvorming tot voordeel strek, is die standaard tuit van die Bete-nossel vervang met een wat 'n plaatjie met 'n spleet op omtrent helfte van die keël se diameter het. Vir die standaard tuit waar die hersirkulasiestroom feitlik nie die rand van die tuit raak nie het beswaarlik borrels gevorm, terwyl by die tuit met die spleet het die water eers teen die plaat gebots en daarna deur die spleet uitbeweeg, en goeie borrels is gevorm. Aangesien die borrels in die tuit as't ware vasgekeer is, het die oorversadigde water meer tyd om in borrels omgesit te word.

Van Bennekom (1979) stel dat alle getoetsde nossels slegter werk sonder 'n uitstroomtuit. Uit sy ondersoek kon hy nie sê dat een tipe uitstroomtuit het beter gewerk as 'n ander nie. Hy stel dat die ideale vorm van die uitstroomtuit afhanklik is van die vloeipatroon van die water deur die nossel, en dus is dit altyd anders. Die borrelkonsentrasie is verhoog met die toevoeging van 'n tuit.

Van Bennekom (1979) stel dat die vorm van die uitstroomtuit so moet wees dat:

- Die liniêre stroomsnelheid van die water moet volledig in turbulensie omgesit word.
- Die snelheid waarteen die water die tuit verlaat moet konstant wees oor die hele uitstroomoppervlak.
- Die tyd wat die water in die tuit is moet kort genoeg wees dat die borrelsamevoeging tot 'n minimum beperk word.
- Die borrelverspreiding in die tuit moet klein wees, sodat dit borrelsamevoeging teenwerk.

2.4.7 Hoogte in kolom

Van Bennekom (1978) het gemeet dat die borrelgrootte toeneem van $30,5 \mu\text{m}$ tot $39,5 \mu\text{m}$, met 'n styging van 1140 mm in die kolom. Die groei van die borrel as gevolg van die drukafname is bereken met Boyle se wet. Hiervolgens moet die $30,5 \mu\text{m}$ borrel met $1,1 \mu\text{m}$ toeneem oor die hoogteverskil van 1140 mm, maar dit neem

werklik toe met $9,0 \mu\text{m}$. Dit word gespekuleer dat borrelsamevoeging of opname van lug uit die omringende water die borrelgroeï veroorsaak het.

Takahashi (1979) het die borrelgrootte wat deur 'n 2 mm lang by 0,4 mm deursnit nossel gemaak word, gemeet op hoogtes van tussen 300 en 1000 mm bokant die nossel. Soos die nossels hoër as 800 mm van die nossel af styg groei die borrels nie meer nie.

2.4.8 Opvloei tempo in die kolom

Van Bennekom (1978) het gevind dat die grootste invloed op die borrelgrootteverspreiding die opvloei spoed van die water in die kolom is. By die verlaging van die opvloei spoed word die mediaan borrelgrootte groter. Die toename word verklaar deur:

- (a) Borrelsamevoeging; by laer opvloei snelhede is die borrelkonsentrasie hoog, en omdat dit veral lank in die turbulente sone bly, is die kans op botsings groot.
- (b) Beter lugvrylating van hersirkulasiewater; die hersirkulasiewater se oormaat lug word nie volledig omgesit in lugborrels nie, en dus word die opvloei stroom ook in 'n mate oorversadig. By lae opvloei snelhede is die oorversadiging hoër as by hoë opvloei snelhede, wat veroorsaak dat die reeds gevormde borrel groter word.

Aangesien flottasie aanlegte gewoonlik bedryf word met hersirkulasiestrome van tussen 5 en 10%, en die verandering van opvloei snelhede wat hiermee gepaard gaan gering is, is hierdie aspek van minder belang.

Takahashi (1979) het gevind dat die borrelgrootte afneem soos die vloei tempo deur die nossel afneem. Die aantal borrels in die suspens neem toe soos die vloei tempo deur die nossel vervoeg.

2.4.9 Materiaal waaruit nossel vervaardig is

'n Bekende nosselmateriaal van die verlede is koper, aangesien dit 'n maklike materiaal is om mee te werk. Omdat die materiaal egter so sag is, erodeer die hoë

snelhede waarteen die water uit die nossel kom baie gou die kleppe. Vandag word meeste van hierdie nossels vervang met vlekvrystaal nossels. Selfs plastiek kan ook gebruik word om nossels mee te vervaardig. Van Bennekom (1978) het in sy studie die invloed van verskillende nosselmateriale op die borrelgrootte getoets. Hy het 'n Bete-WL-1-120-nossel getoets en vergelyk met die gewone een vervaardig van staal, en gevind dat daar geen noemenswaardige verskil in die borrelgrootte te bespeur was nie.

2.5 VOORBEELDE VAN PRAKTIESE INSPUITNOSSELS

Vrablok (1959) het opgemerk dat die grootte van die vrylatingstoestel van kardinale belang is, aangesien dit die grootte en aantal borrels bepaal. Op daardie tyd is gewoonlik van 'n gepatenteerde Saunders klep gebruik gemaak, behalwe waar daar 'n potensiële korrosiewe vloeistof was wat homself meer verleen het tot 'n gewone sluisklep.

Treille (1972) stel borrelgroottes van tussen 15 en 50 μm voor. Makroborrels van groter as 100 μm , en ondergrootte borrels is oneffektief.

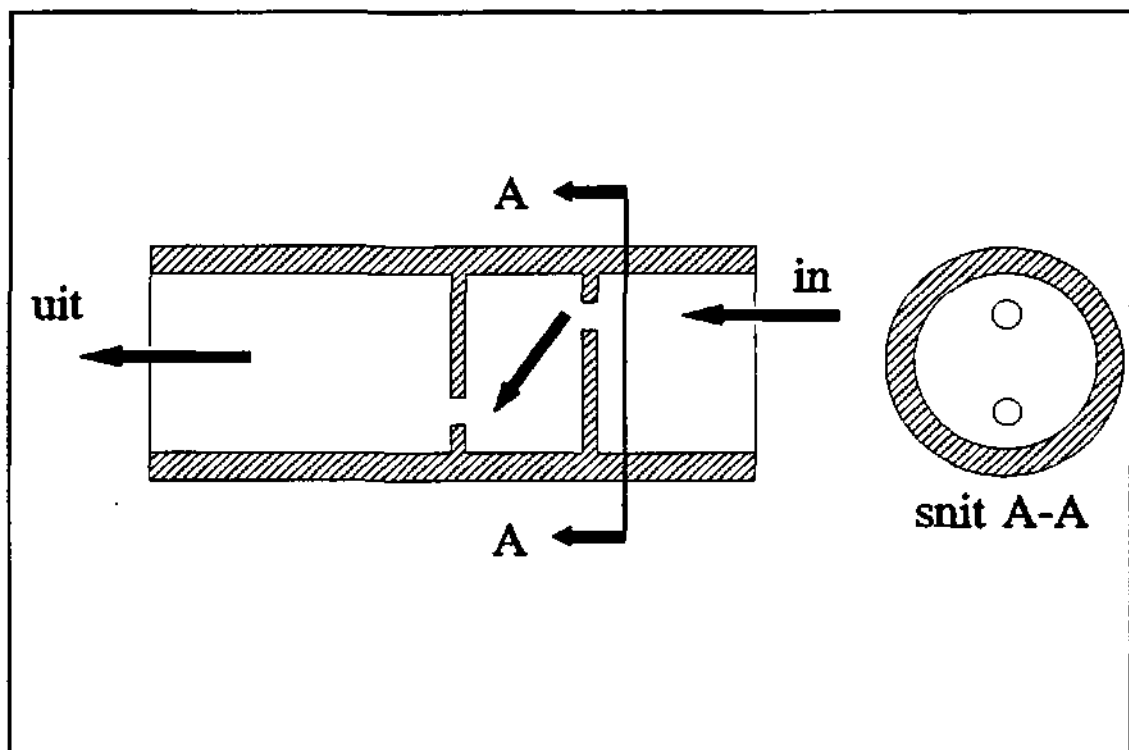
Van Bennekom (1978) gaan uit van die maatstaf dat die effektiwiteit van borrelvorming gemeet moet word aan vorming van klein borreltjies, en 'n gepaardgaande hoë borreldigtheid.

In die praktyk is daar 'n hele aantal nossels wat gebruik word, beide kommersieel gepatenteerde nossels, sowel as gewone sluis-kleppe. Vervolgens word 'n paar van die kommersieële nossels beskryf. Die inligting omtrent die nossels is dikwels baie onvolledig aangesien fyner details weens kommersieële redes doelbewus verswyg word.

2.5.1 WRC nossel

Hyde *et al.* (1973) het die WRC (Water Research Centre) nossel gepatenteer. Die nossel verskyn in figuur 2.5.1. Oorversadigde water vloei in by die inlaat van die 25,4 mm opening, waarna dit deur 'n 3,2 mm gaatjie aan die een kant van 'n dun plaatjie vloei. Die water spuit dan vas teen 'n dun plaat sowat 6,4 mm weg van die gat. Die water vloei weer uit die ruimte uit deur 'n gat op die tweede plaatjie op 'n

teenoorstaande kant as die eerste gaatjie. Die tweede gaatjie het 'n diameter van omtrent 6,4 mm. Die water vloei deur 'n uitstroomtuit tot buite die nossel. Die oorversadigde water word dus deur 'n klein gaatjie geforseer in 'n kamer in waar die gepaardgaande drukverlies tot gevolg het dat die borrels uit oplossing kom, ook as gevolg van die turbulensie in die water. Die water word geforseer om 'n rigtingverandering te ondergaan, waarna dit deur die tweede gat beweeg. Die laaste lug kom uit oplossing en die tuit verhoed dat die vlokke opgebreek word deur die snelheidsoorgang meer geleidelik te maak. Hierdie nosselafmetings is geskik vir nosselvloei van 360 tot meer as 680 l.h⁻¹.



Figuur 2.5.1 Die WRC-nossel is al sedert 1973 in gebruik. Die nossel is nie verstelbaar nie.

2.5.2 Saint Gobain

Gardner (1977) rapporteer die werking van loodskaalaanlegte in die Verenigde Koningryk. 'n Flottasiesistelsel gepatenteer deur die Franse maatskappy Sait Gobain Technique Nouvelles, het 'n vlekvrige staal nossel gebruik. Hulle het gestipuleer dat die nossel baie naby aan die versadiger moet wees, met die minimum aantal nukleasiepunte. Die suksesvolle werking van die aanleg is in die wiele gery, primêr

as gevolg van borrelgenerasie en nukleasie wat swak was.

2.5.3 Shanghai-nossels

Zhang (1985) rapporteer die eerste volskaal opgeloste-lug flottasie aanleg in China. Die aanleg in Shanghai City is ontwerp om afvalwater van 'n wolmeule te behandel. Die lug vrylatingstoestelle bestaan uit 'n hooftoevoerpyp met 24 vrylatingstoestelle en verstakkingspype. Die vrylatingstoestelle is deur twee Professors van Tongji Universiteit in Shanghai ontwerp en kan die drukvrylating baie vinnig laat plaasvind. 'n Hoë mate van turbulensie binne in die toestel bevoordeel borrelvorming. Die toestelle is getoets en gevind om beter te werk as gewone sluiskeppe. Die vrylatingstoestelle is bo-op, die vertakkingspype geplaas wat afsteek tot byna op die flottasietenk se vloer. Soos die vloeistof onder uit die takbuis vloei, word klein borreltjies gevorm.

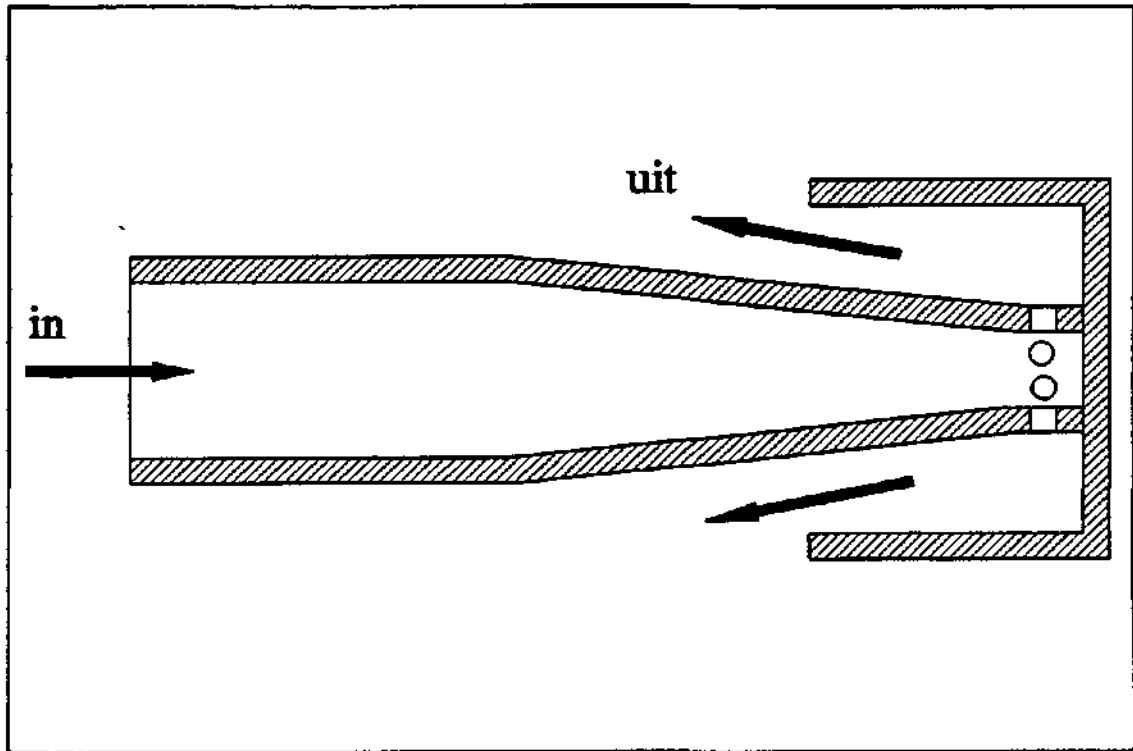
2.5.4 Goldfields-nossel

Leach *et al.* (1985) het opgeloste-lug flottasie gebruik om rioolwater te herwin vir gebruik in die goudmyne, ondergronds. Die nossel wat hulle gebruik het is nie in detail beskryf nie. Dit bestaan basies uit 'n sproeikop wat 45 gaatjies op ekwivalente afstande het, met 3,17 mm diameters.

2.5.5 NIWR-nossel

Van Vuuren & Prinsloo (1983) het in 1983 'n nossel gepatenteer wat hulle geag het om baie suksesvolle borrels vir opgeloste lug-flottasie te genereer. 'n Skematiese voorstelling van die nossel verskyn in figuur 2.5.5. Die nossel bestaan uit 'n pyp met 'n toe ent, en 'n koppie vasgeheg aan die ent. Klein gate is geboor in die ent van die pyp, binne die area van die koppie. As die nossel in bedryf is, word die oorversadigde water teen, sê 400 kPa deur die gaatjies geforseer teen 'n snelheid van 18 tot 25 m.s⁻¹. Die waterstrale spuit dan direk loodreg teen die rand van die koppie vas. Hierdie turbulensie bevoordeel dan die borrelvormings proses. Dit word aanvaar die sukses van die nossel berus op die feit dat die verlaging in druk baie vinning plaasvind (binne 0,01 sekondes). Geen drukverlies behoort plaas te vind voordat die water die koppie bereik nie, want dit sal premature borrelvorming tot gevolg hê, wat weer groot borrels tot gevolg het. Die vloeibeheer deur die nossel

moet dus eerder beheer word deur die aantal gaatjies in die nossel te varieer, of dan om 'n naaldklep in die nossel te inkorporeer (Williams *et al.*, 1985). Uit empiriese eksperimente het dit duidelik geblyk dat 2 mm gate die beste resultate lewer. Vir die gat diameter sal die deurstromingskoëffisiënt (C_d) ongeveer 0,8 wees.



Figuur 2.5.5 Die NIWR-nossel is Suid-Afrikaans ontwerp en in bedryf gestel sedert 1983. Die nossel kan verstelbaar gemaak word.

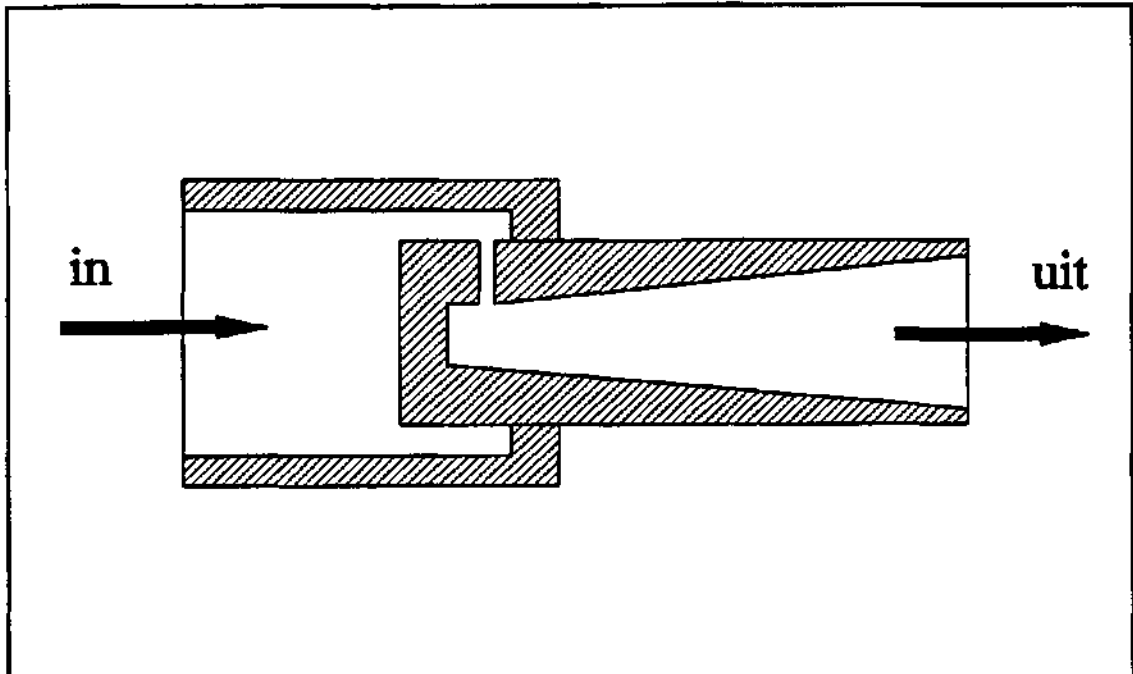
2.5.6 Rictor-nossel

Heinänen (1988) rapporteer die gebruik van 'n Finse nossel in flottasie aanlegte in Finland. 'n Skets van die Rictor-nossel word gegee in figuur 2.6.1. Die nossel bestaan uit 'n inkomende buis met 'n opening wat dit verbind aan 'n uitgaande buis wat die vorm van 'n uitstroombuis aanneem. Die grootte van die opening word gekies sodat die gevraagde vloeitempo deur die nossel verkry kan word. Die nossel is nie verstelbaar nie, en is getoets teenoor naaldkleppe en gevind om baie beter te werk.

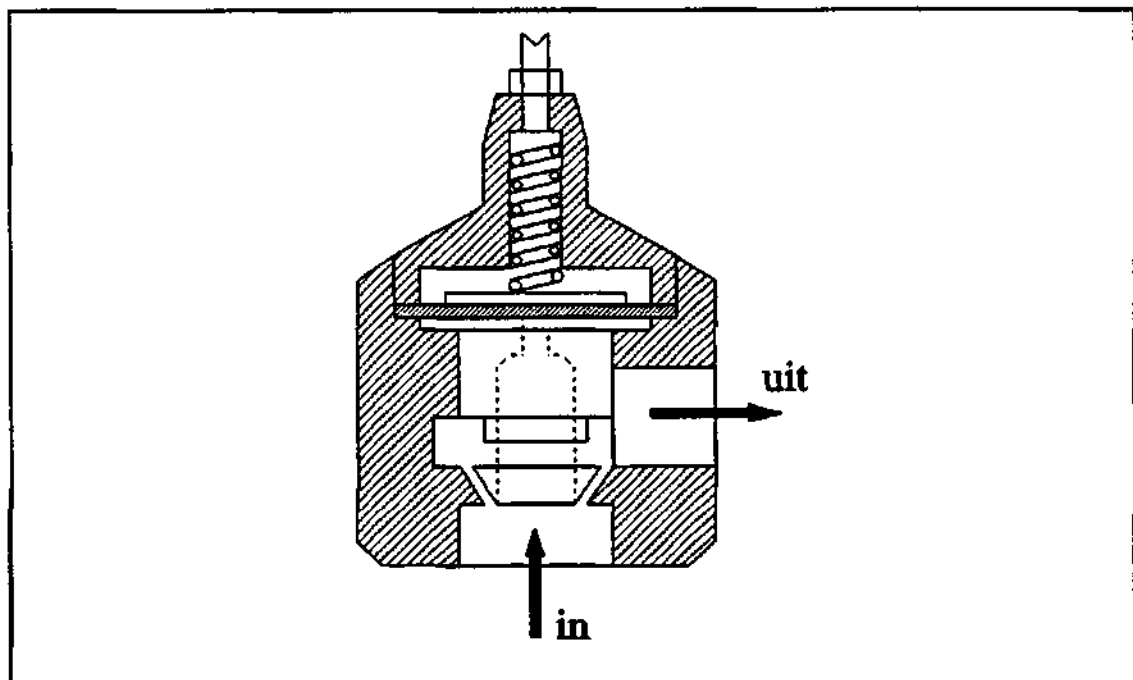
2.5.7 Verko-nossel

Nog 'n Finse nossel wat gebruik word is die sogenaamde Verko-nossel. Hierdie nossel verskyn in figuur 2.5.7. Die nossel is verstelbaar en borrels word gegenereer

deurdat die oorversadigde water 'n groot aantal rigtingveranderinge in die nossel moet ondergaan. Vanweë sy komplekse konstruksie is die nossel egter nie baie populêr nie, Heinänen (1988).



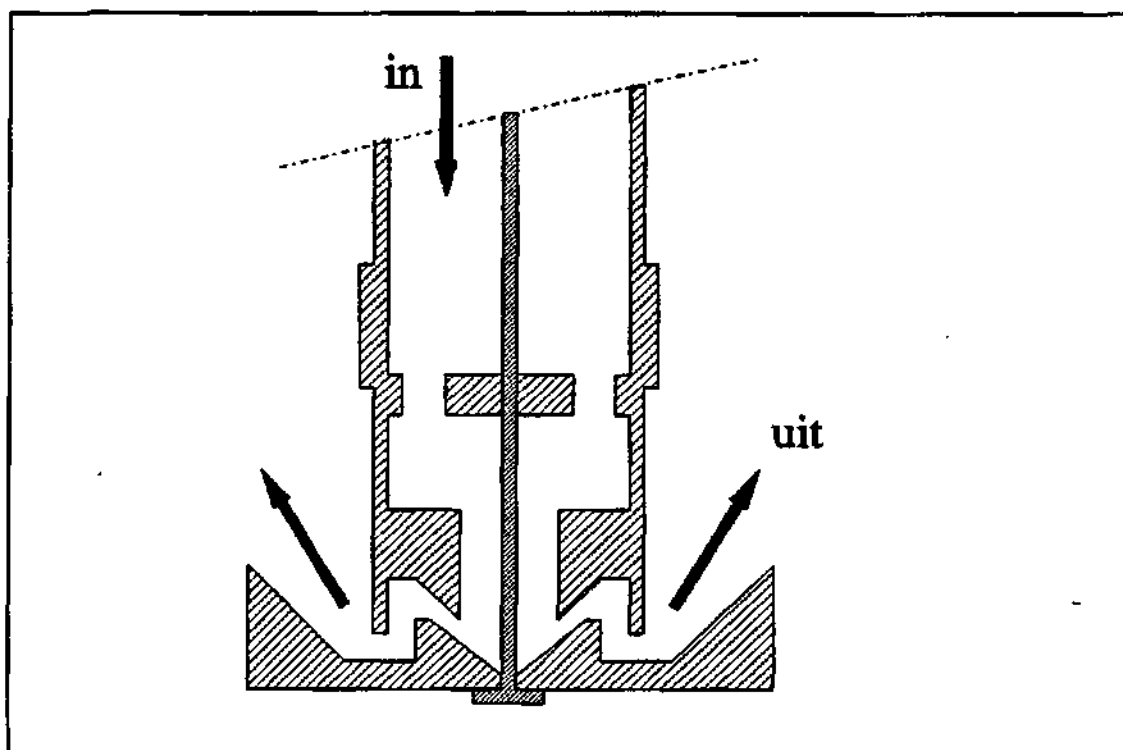
Figuur 2.5.6 Die Rictor-nossel is 'n nie verstelbare nossel van Finse oorsprong.



Figuur 2.5.7 Die Verko-nossel is 'n verstelbare nossel van Finse oorsprong.

2.5.8 DWL/DZH-nossel

Van Puffelen (1990) noem dat die nossel baie gebruik word in Nederland. Die nossel is in 1980 ontwikkel in die Leidsche Duinwater Maatschappij (LDM). Die nossels is verstelbaar met behulp van 'n lang verstelas. Die opening van die nossel vorm terselfdertyd 'n afskerming wat borrelvorming bevoordeel.



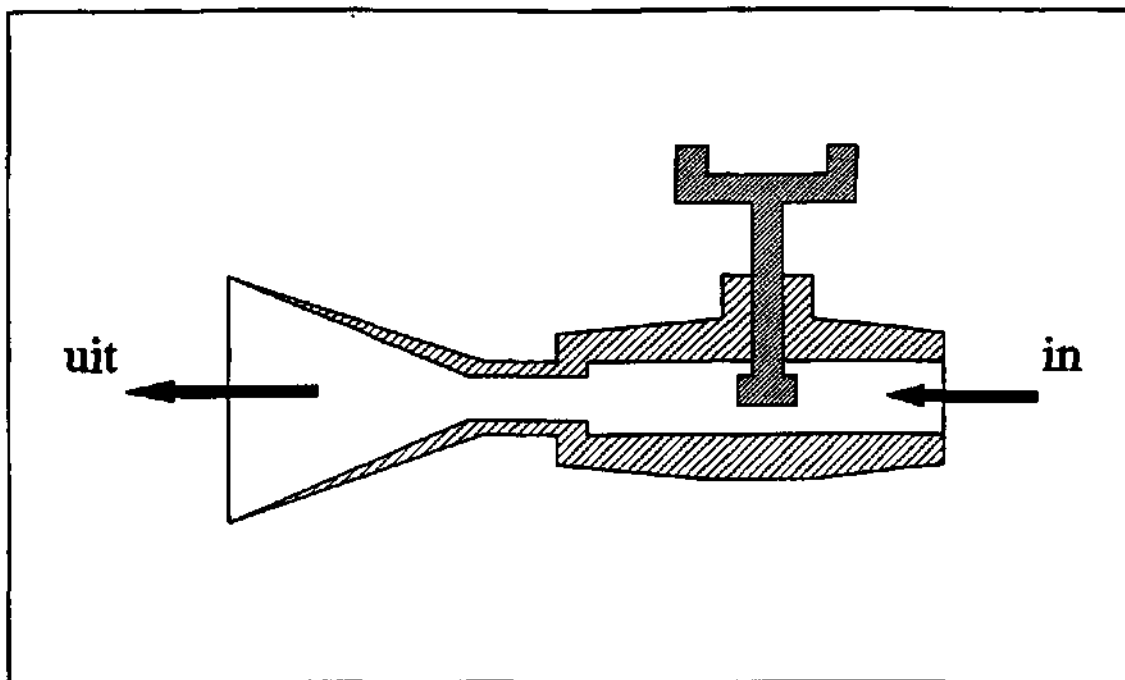
Figuur 2.5.8 Die DWL/DZH-nossel is 'n verstelbare nossel wat ontwikkel is in Nederland in 1980.

2.5.9 AKA-nossel

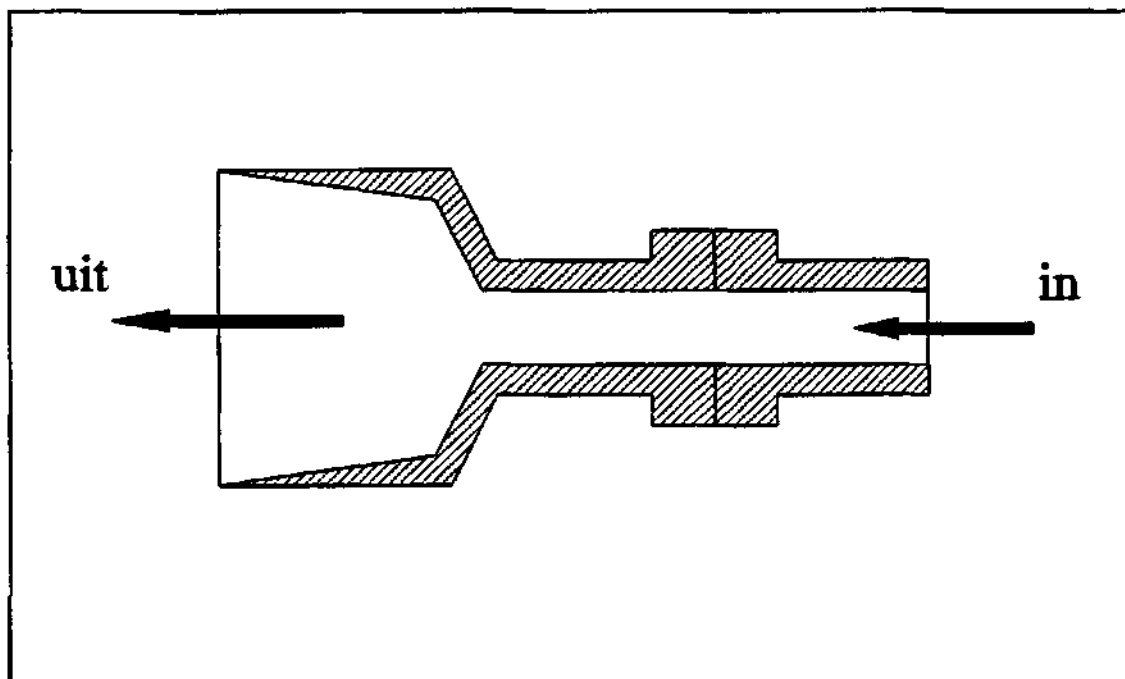
Van Puffelen (1990) noem dat die Sweedse nossel gebruik word in Nederlandse aanlegte. Die nossels is aangepaste naaldkleppe, wat toegerus is met 'n uitstroomtuit. Die kleppe is verstelbaar en vervaardig uit vlekvrystaal.

2.5.10 Bete-nossels

Van Puffelen (1990) noem die gedagte wat ontstaan het om gewone tuinsproeiers te gebruik vir nossels. 'n Tipe Bete-WL-120 en Bete-TF-FC is gebruik en gevind om goeie resultate te lewer.



Figuur 2.5.9 Die AKA-nossel is 'n Nederlandse nossel, wat van 'n uitstroomtuit voorsien is, en ook verstelbaar is.



Figuur 2.5.10 Die Bete-nossels, van Nederlandse oorsprong, is bloot tuinsproeiërs, wat van 'n uitstroomtuit voorsien is.

2.5.11 Ander vrylatingstoestelle

Zabel (1978) noem dat naaldkleppe deur 'n verskeidenheid firmas in die Verenigde Koningryk gebruik is vir hulle flottasie aanlegte, maar die kleppe was gedurig onderworpe aan kwaai erosie wat swak belugting tot gevolg gehad het. Gereelde verstellings was nodig om die korrekte vloei te verseker, en dit het groot probleme veroorsaak by die groot aanlegte.

Van Vuuren *et al.* (1982) het volskaal eksperimente op 'n aanleg in Empangeni (Mzingazi, Richardsbaai) gedoen, en gevind dat die grootste rede hoekom die aanleg nie werk nie is as gevolg van die nossels. Na baie eksperimentering met naalkleppe, sluiskleppe en sluiskleppe met afskermings, is finaal besluit dat die beste borrels gegenereer word met 'n algemene tuinsproeier. Daar is egter nie enige sketse of fotos beskikbaar sodat die presiese geometrie van die nossel vasgestel kan word nie.

2.5.12 Vergelykende nosseltoetse

Van Bennekom (1978) stel dat die AKA-nossel en die Bete WL 2 120-nossel met hulle keëlvormige uitstroomtuite lewer beter resultate as die WRC-nossel met sy silindriese uitstroomtuit. Die konsentrasie van groter borrels is dan ook meer by die WRC-nossel waarskynlik a.g.v. die opeenhoping van lug in dooie ruimtes in die uitstroomtuit. Alle ander nossels het soortgelyke antwoorde gegee, en almal was aanvaarbaar. Die Bete-nossels is so vervaardig dat hulle die hersirkulasiestroom versprei en sodoende verhoog die turbulensie wat borrelvorming bevoordeel. Die Bete TF-8-FC-nossel behoort 'n beter keuse te wees as die Bete WL-2-120-nossel aangesien dit eenvoudiger is en nie so maklik sal verstop nie.

Van Bennekom (1979) het na volskaal toetse van nossels op 'n aanleg gevind dat die AKA-nossel met sy uitstroomtuit die beste resultate lewer. Die prestasie van die Bete-nossel en die WRC-nossel (beide met uitstroomtuite) was minder goed. Die AKA-nossel met sy eie tuit het egter slegter gewerk as met die ander twee willekeurig gekose tuite. Vir die Bete WL-2-120 nossel is eenderse resultate gemeet met al drie die tuite.

In 'n studie oor die werkverrigting van 'n flottasie aanleg in Antwerpen, Nederland is die DWL-nossel getoets teen die WRC-nossel. Die resultate het getoon dat die

DWL-nossel die beste resultate gelever het (Janssens & Mus, 1988).

Longhurst & Graham (1987) rapporteer dat vergelykende toetse tussen die WRC-nossel en gewone naalkleppe toon dat beide die selfde eindresultaat lewer, en dus kon hulle nie een verkies bo 'n ander nie.

HOOFSTUK 3

EKSPERIMENTELE OPSTELLING EN PROSEDURES

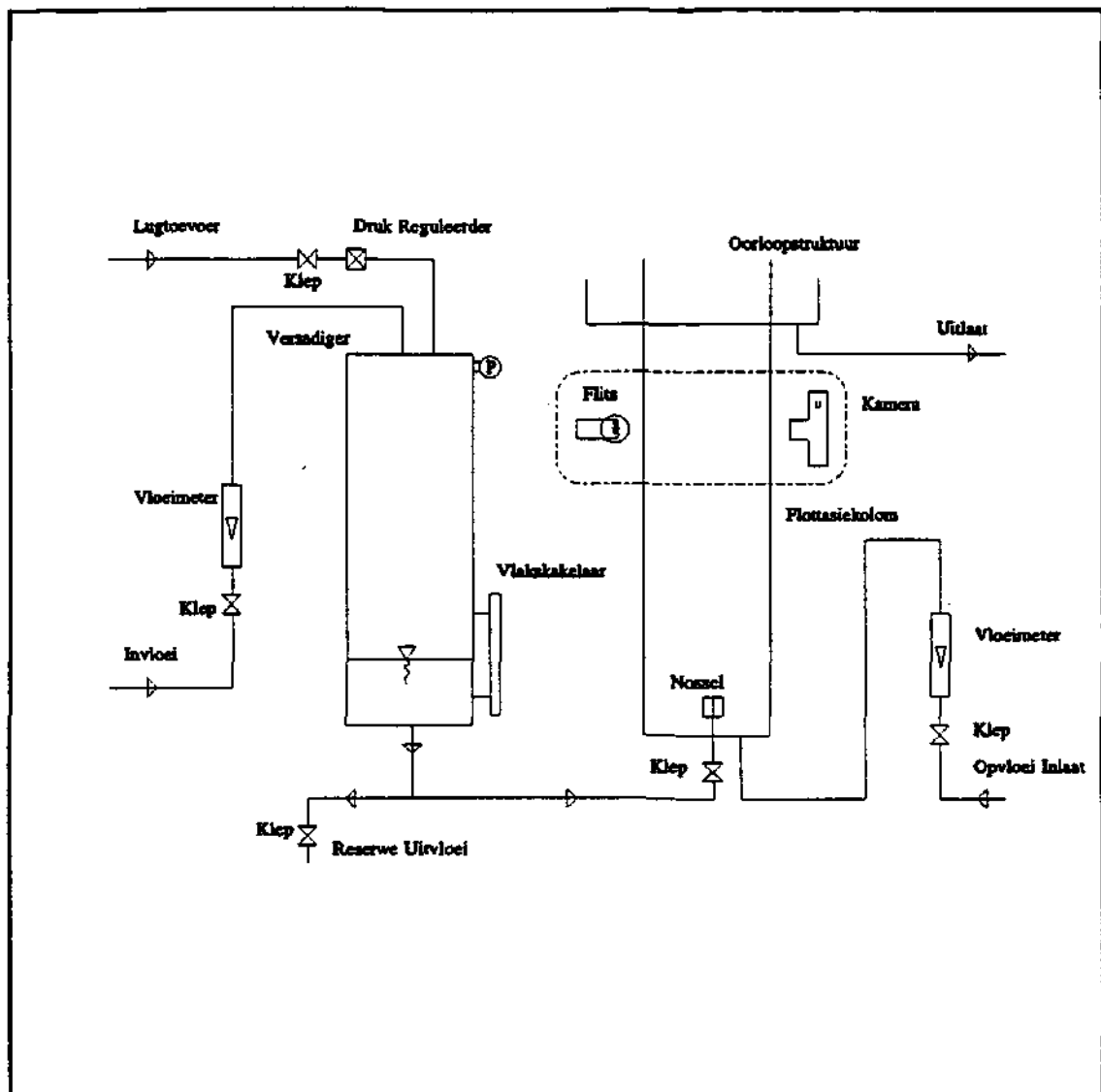
3.1 INLEIDING

Die eksperimentele opstelling is ontwerp en vervaardig sodat daar met volskaalse inspuitsnossels gewerk word, aangesien die afskaling van inspuitsnossels interpretasie van die resultate sal bemoeilik. Die bedryfsparameters is verder gekies sodat dit tipiese situasies in flottasietenks simuleer. Versadigingsgrade in die gepakte versadiger van 70% tot 80% word verkry by drukke tussen 200 en 500 kPa. Die drukgebied van 200 tot 500 kPa word algemeen vir lugversadigers gebruik. Die opvloeispoed in die flottasiekolom is beperk tot 10 m.h^{-1} . Die watertemperatuur is nie beheer nie, maar aangesien die totale natuurlike temperatuurwisseling oor die eksperimentele tydperk ongeveer 4°C was is die effek daarvan weglaatbaar. Die tipe water wat gebruik is in die flottasiekolom is nie gevarieer nie en het deurgaans bestaan uit munisipale kraanwater. Die versadiger is nie met 'n hersirkulasiestroom gevoer nie, maar met 'n individuele bron van dieselfde munisipale water. Die chemiese samestelling van die water word gegee in hoofstuk 4.

Alle eksperimentele werk vir die projek is in die laboratorium gedoen met behulp van die apparatuur wat saamgestel is soos getoon word in figuur 3.1.1. Die individuele komponente word vervolgens bespreek. 'n Stel verteenwoordigende fotos van die apparaat word aangeheg.

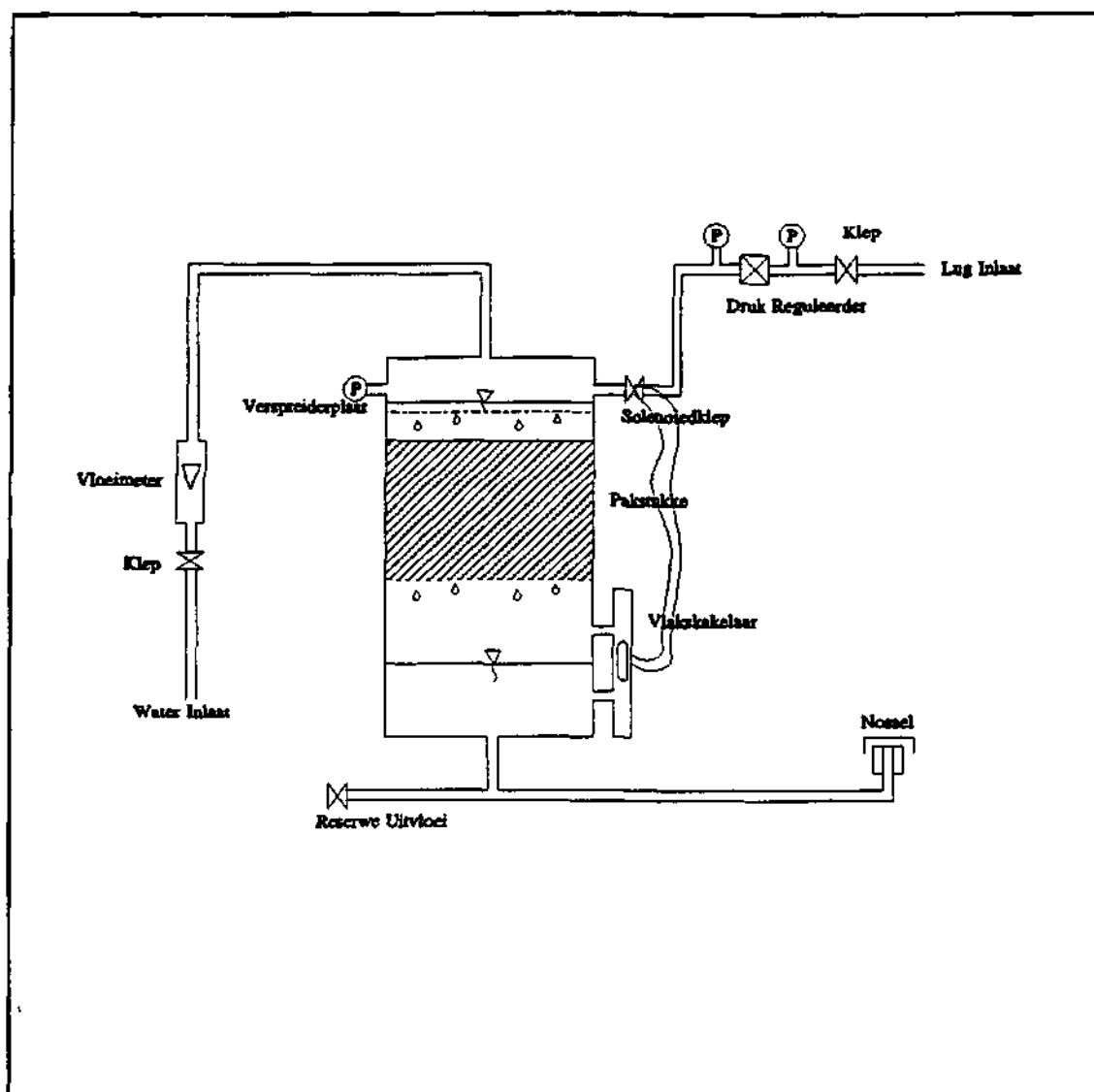
3.2 VERSADIGER

Om die oorversadigde water te produseer is dit nodig om 'n hoeveelheid water saam met lug onder hoë druk te plaas vir 'n sekere tyd. Die lug sal dan opgelos word in die water, totdat 'n ewewig toestand bereik word wat deur Henry se konstante beskryf word. Sodra die water wat onder hoë druk is, se druk skielik verlaag word, sal die oortollige lug uit oplossing wil kom, en dan in die vorm van mikrobobrels. Hierdie water word oorversadig genoem sodra die druk verlaag word en daar meer lug in die water is as wat in ewewig by daardie druk behoort te wees.



Figuur 3.1.1 Skematiese voorstelling van totale eksperimentele opstelling

'n Versadiger is 'n drukvat van staal, waar water en lug gelyktydig of met tussenposes ingespuut word. Die laboratoriumversadiger is vervaardig van gegalvaniseerde staal en is aansienlik kleiner as volskaal versadigers, maar aangesien die volume van oorversadigde water wat vir laboratoriumeksperimente gebruik word beperk is tot die belading wat deur 'n enkele nossel gaan ($100 - 1000 \text{ l.h}^{-1}$) is die versadiger voldoende. Die versadiger bestaan uit die volgende vyf integrale dele, wat skematies aangetoon word in figuur 3.2.1.



Figuur 3.2.1 Skematiese voorstelling van die laboratorium versadiger

Die vloei van die hersirkulasiewater na die versadiger word beheer deur 'n ASV DFM 350 vloeimeter met 'n helder PVC buis, PVDF vlot, met PVC koppel ente en 'n lengte van 300 mm (soos gelewer deur INCLEDONS Bpk. in Johannesburg). Die vloeimeter het 'n bereik van 100 - 1000 l.h⁻¹. Die vloei word gereguleer deur middel van 'n 32 mm diafragma klep. Hierdie klep dien ook as beheerklep vir die druk in die versadiger.

Sodra die water deur die inlaat beweeg dam dit op, op die *verspreiderplaat* wat voorsien is van 'n ongeveer 200 gaatjies met deursnitte van 4 mm elk wat 110 mm vanaf die bopunt van die deksel geplaas is. 'n Flenskoppeling en 'n rubberseël

verbind die deksel met die hoofsilinder van die versadiger.

'n BCB drukmeter (soos gelever deur CONTROL Instruments in Braamfontein) met 'n meetbereik van 0 tot 600 kPa is gemonteer op 'n hoogte van 40 mm onder die verspreiderplaat in die deksel. Die luginlaat word beheer met 'n ASCO 2-rigting solenoïedklep (8210) (soos gelever deur CONTROL Instruments in Braamfontein) wat geskakel word deur die watervlak onder in die versadiger. Voordat die lug by die solenoïedklep kom word dit beheer met 'n FAIRCHILD drukreguleerder (soos gelever deur CONTROL Instruments in Braamfontein). Die druk op die reguleerder word konstant gehou sodat die druk aan die leweringskant altyd konstant bly. Die luginlaat op die versadiger is ook 40 mm onder die verspreiderplaat in die deksel op 'n hoek van 90° met die drukmeter.

Die *hoofsilinder* het 'n binnediameter van 263 mm en 'n totale hoogte van 1430 mm. Die boonste gedeelte van die versadiger se hoofsilinder word gevul met kommersieel beskikbare pakstukke. Die rooster waarop die pakstukke lê is 800 mm vanaf die bopunt van die silinder. Die pakstukke wat vir hierdie eksperimentele werk gebruik is, is 25 mm PALL ringe. Die silindriese tipe pakking word gebruik om 'n groot kontakoppervlak tussen die lug en die water te veroorsaak. Die pakstukke is bloot in die toring gestrooi en nie volgens 'n bepaalde patroon gepak nie. Die maksimum pakstukke wat op 'n slag nodig is, is 0,0435 m³. Daar is dan ongeveer 2050, 25 mm polipropileen pakstukke in die tenk.

'n *Inspeksie-opening* is net onder die rooster geplaas en die opening se deksel is geseël met 'n rubberseël.

Die opdamningshoogte voordat van die pakstukke onder die water is, is 630 mm vanaf die onderpunt van die hoofsilinder. Die water word deur die verspreiderplaat geforseer om in die vorm van 'n egalige sproei oor die res van die hoofsilinder te val. Die sproei val dan op die pakstukke waarna die water deur die pakstukke vloei totdat dit die onderpunt van die pakstukke bereik. Op die stadium val die water verder in die hoofsilinder af totdat dit die oppervlakte van die opgedamde water bereik.

Die *voetstuk* wat onder die hoofsilinder geplaas is het 'n 70 mm uitlaat geplaas in die middel van die plaat. Die water sal opdam aangesien daar 'n drastiese afname in die diameter van die versadiger is. Die voetstuk en die silinder word aanmekaar verbind

met 'n flenskoppeling en 'n rubberseël. Hierdie 70 mm uitlaat vorm die laaste komponent van die versadiger naamlik die *uitlaatpyp*. Die vlakbeheer van die water onder in die hoofsilinder word beheer met 'n INTRA-AUTOMATIC vlakskakelaar met 'n 350 mm meetbereik (soos gelewer deur CONTROL Instruments in Braamfontein). Die vlakskakeling geskied deurdat relê's geskakel word met behulp van magnetiese REED-skakelaars (soos gelewer deur CONTROL Instruments in Braamfontein). Sodra die watervlak die boonste skakelaar bereik word die solenoïedklep wat die luginlaat beheer opgemaak en die lug word in die versadiger ingeblaas. Hierdie toevoeging van lug het tot gevolg dat die watervlak daal totdat die onderste skakelaar geaktiveer word (dit werk soos 'n lugkussing). Die solenoïedklep gaan dan toe en die lugvloei na die versadiger word gestop. Die water begin dan weer van nuuts af opdam in die versadiger sodat die hele proses weer herhaal word. Die rede waarom die watervlak beheer moet word, is sodat die pakstukke nooit sal versuip nie, aangesien dit 'n verlaging in die versadigingsgraad sal hê. Die maksimum wisseling in watervlak was 50 mm.

Die *uitlaatpyp* is horisontaal gemonteer en het twee 70 mm openinge op die ente en ses 13 mm aftappypies. Aan die een kant van die uitlaatpyp is die pyp se diameter afgebring na 12,7 mm, en deur middel van die inspuitsnossel aan die flottasiekolom gekoppel. Aan die ander kant van die uitlaatpyp is 'n 70 mm sluisklep geplaas om die oortollige water te laat uitvloeï indien daar 'n oormaat oorversadigde water is. Die water wat dus onder die pakstukke opgedam het vloei nou deur die uitlaatpyp waarna dit deur middel van die inspuitsnossel in die flottasiekolom vrygelaat word.

3.3 FLOTTASIEKOLOM

Die oorversadigde water wat in die versadiger gemaak word word deur middel van inspuitsnossels vrygelaat in 'n flottasietenk, waarin die rouwater vloei. Die mikroborels wat uit oplossing kom styg na bo in die kolom en in die proses word soliede onsuierhede saamgeneem na bo (in hierdie eksperimente is egter van skoon water gebruik gemaak). Die proses bring dan die verheldering van die water mee. Om die borrelgroottes te kon meet was dit nodig om so 'n flottasiekolom op te rig in die laboratorium wat gebruik kon word om die eksperimentele werk te doen. Soveel as moontlik van die beheerparameters in die eksperimentele werk, moet werklike parameters simuleer. Daarom is besluit om met 'n stygspoed van 10 m.h^{-1} te werk

in die flottasiekolom. Die kolom voldoen aan 'n aantal praktiese vereistes, naamlik;

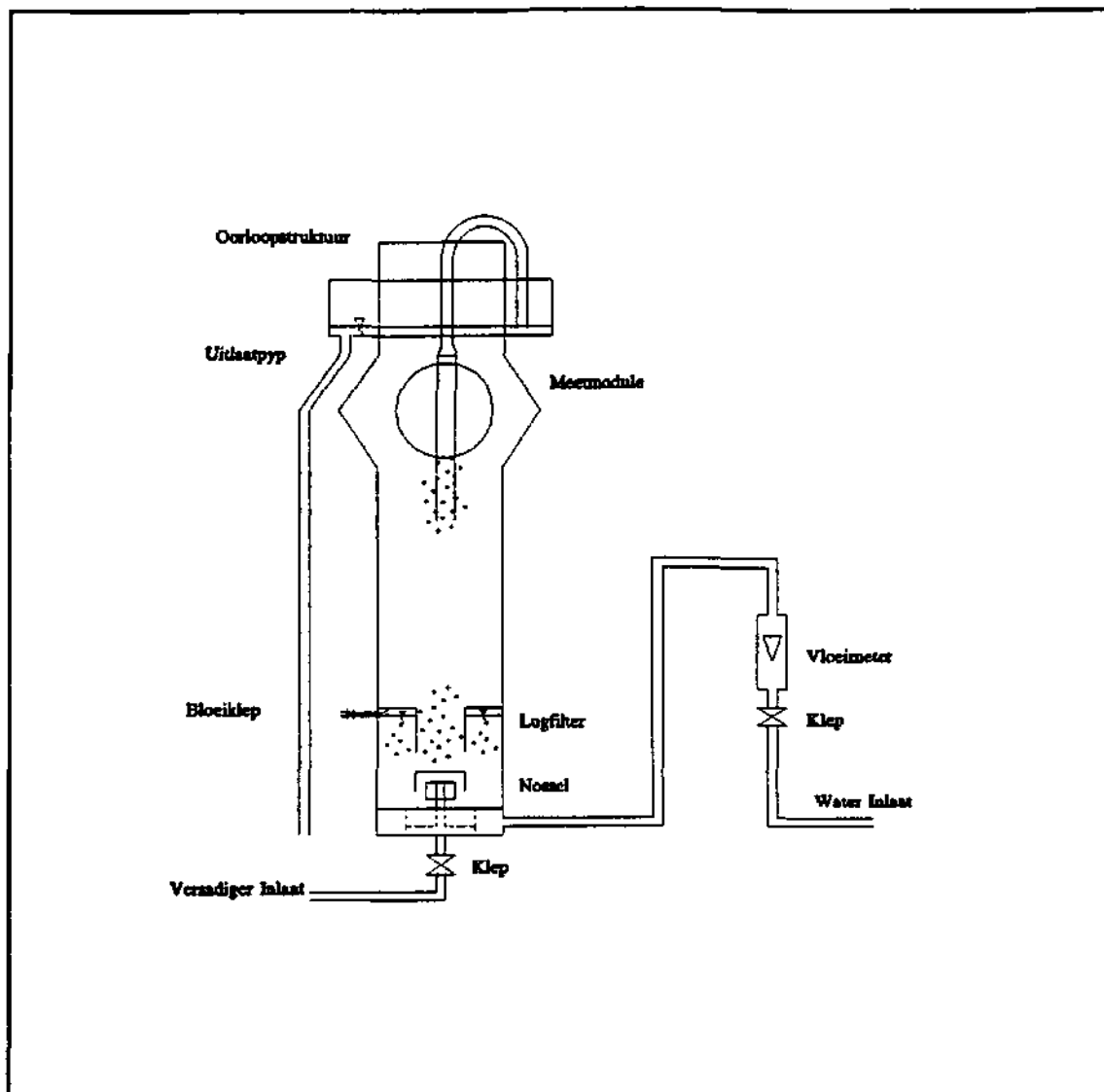
- die kolom is modulêr sodat die hoogte van die kolom gevarieer kon word,
- die kolom is deursigtig sodat die pad van die borrels met die oog gevolg kan word, en
- die nossels kan op 'n eenvoudige manier uit die kolom verwyder word.

'n Ronde kolom van 190 mm binnedeursnit en 'n 5 mm wanddikte is gebruik. Die flense van die onderskeie modules is vervaardig uit 8 mm dik PERSPEX en is aan mekaar gebout met 8 mm gegalvaniseerde vleuelmoere. Die modulêr ontwerpte kolom word skematies voorgestel in figuur 3.3.1.

Die eerste module is 'n *staander* vir die kolom. Die staander het 'n 500 x 500 mm staalblad en staan op vier verstelbare pote van 500 mm hoog. In die middel van die plaat is 'n 200 mm deursnit gat uitgesny waarop die kolom gemonteer word sodat die hersirkulasievloei afkomstig van die versadiger van onder af in die kolom kan inkom.

Die tweede module is die *opvloei-inlaatmodule*. Die module is van staal gemaak en is so ontwerp dat die opvloeiwater wat uit 'n 25,4 mm toevoerpypleyn kom se snelheid genoegsaam afgebring word sodat die hersirkulasiewater nie versteur word nie. Die vloei word beheer deur 'n ASV DFM 350 vloeimeter met 'n helder PVC buis, PVDF vlot, met PVC koppel ente en 'n lengte van 300 mm (soos gelewer deur INCLEDONS Bpk. in Johannesburg). Die vloeimeter het 'n bereik van 30 - 300 l.h⁻¹. Die vloeimeter meet die opvloeisnelheid van die water in die flottasiekolom.

Hierna volg 'n klein 200 mm hoë module wat bloot dien as *reaksiesone*. Dit is op hierdie punt dat die mikroborrels en die opvloeiwater meng om dan verder saam op te beweeg. Bo-op die module volg nog 'n 200 mm hoë module waarna 'n *lugfilter* module volg. Daar is drie modules, waarvan een op 'n slag gebruik word. Die modules het openinge van onderskeidelik 80, 50 en 30 mm. Die lugfilter se doel is om die borreldigtheid in die kolom af te bring aangesien 'n oormatige borreldigtheid tot gevolg het dat die meettegniek onsuksesvol is. Die water en lug wat nie deur die opening na die res van die kolom opgevoer word nie, word vasgevang onder die lugfilter en periodiek met behulp van 'n klein kleppie met die hand afgebloei.



Figuur 3.3.1 Skematiese voorstelling van die flottasiekolom

Na die lugfilter volg *standaardmodules*. Die module is 500 mm hoë pypseksies waarin die water wat opvloei vanuit die lugfilter en die borrels geleentheid kry om oor die hele diameter van die kolom uit te spreid.

Die *waarnemingsmodule* is doelgerig vervaardig vir die borrelmeetstelsel en sal verderaan in detail bespreek word.

Die *uitlaat* is so ontwerp dat daar 'n oorloop is wat 'n konstante druk in die kolom veroorsaak. Die oorloop is 300 mm hoog en val in 'n 200 mm hoë 400 x 400 mm vierkantige bak. Die water vloei uit die bak deur 'n gat in die een hoek. Indien die

uitlaatmodule dus op sy plek is sal daar altyd 'n konstante waterdruk op die inspuitsnossel uitgeoefen word, wat dan sal bepaal presies teen watter druk die oorversadigde water vrygelaat word.

3.4 INSPUITSTELSEL

Die mikroborels word gegenereer sodra die oortollige lug uit oplossing kom as gevolg van 'n skielike verlaging in druk. Hierdie skielike verlaging word gewoonlik veroorsaak deurdat die hersirkulasiewater deur 'n nossel van een of ander aard uitgelaat word in die flottasietenk. Die nossels word gewoonlik onder in die flottasietenk geplaas sodat die borels alle onsuiverhede in die water kan verwyder.

Die inspuitselsel bestaan uit 'n 100 mm diameter ronde koperskyf wat gemasjineer is en met skroefdraad in die bodem van die inlaatseksie van die flottasiekolom pas. Die hele stelsel kan uitgeskroef word om die nossel om te ruil, sonder om die res van die apparaat te versteur. Die nossels is almal met standaard skroefdraad vervaardig en word bo-op die koperseksie vasgeskroef. Die hele seksie word aan die versadigerlyn verbind met 'n 12,7 mm deursnit gegalvaniseerde pyp via twee koppelings.

3.5 WAARNEMINGSKOLOM

'n Direkte fotografiese tegniek is gebruik om die borelsgrootte te bepaal. Die kontras en resolusie wat die fotos bied is van genoegsame standaard om akkurate en herhaalbare borelmetings te maak.

Die kolom is so ontwerp dat die fotografiese apparaat direk op die kolom gemonteer kan word. Die module is vervaardig uit deursigtige PERSPEX van 5 mm dikte. Dit is verder nodig om fotos te neem van borels in die middel van die 190 mm kolom om sodoende die wandeffekte tot 'n minimum te beperk.

Om die monster in die middel van die kolom te kan isoleer, is dit nodig dat die kolom vernou word, maar die vloei in die kolom mag nie op enige manier versteur word, of die boreldigtheid gekonsentreer word nie. Daarom is die kolom ontwerp sodat 'n middelste seksie borels afgetap kan word terwyl die oortollige vloei bloot verbyvloei.

Daar is dan genoeg ruimte om die fotografiese apparaat te gebruik sonder versteuring van die borrelvloei.

Aangesien die borrels se stygspoed bestaan uit die relatiewe spoed tussen borrels en water, sowel as die water se opvloei spoed, is dit raadsaam om ten minste die opvloei spoed van die water te elimineer, sodat die borrels stadiger beweeg relatief tot die kamera. Dit word gedoen deur die seksie wat gemonster word nie te laat saamvloei met die oortollige water nie maar dit in 'n buigbare pyp op te trek waarvan die punt onder water is in die uitvloeibak. Dit het tot gevolg dat die water in die 40 x 40 mm waarnemingskolom stilstaan en die beweging van die borrels slegs veroorsaak word deur hulle eie stygspoed.

Die vierkantige waarnemingskolom is vervaardig met twee teenoorstaande 1 mm dik glaspanele, om krapmerke en enige ander distorsie te verhoed wat die fotos onbruikbaar sal maak.

Die waarnemingsmodule is gebou met dieselfde flense as die flottasiemodules en sodoende kan die module op enige hoogte vanaf die nossel geplaas word. Daaruit kan die verskil in borrelgrootte as gevolg van die verskil in waarnemingshoogte in die kolom bepaal word.

'n Staalklamp om die waarnemingskolom word gebruik om die fotografiese stelsel op te monteer. Die klamp kan saam met die kolom skuif om van posisie te verander. Die klamp huisves 'n verstelbare koppelstuk waaraan die fotografiese apparaat gemonteer kan word.

3.6 FOTOGRAFIESE STELSEL

Die fotografiese stelsel bestaan uit 'n OLYMPUS OM1 35 mm kamera wat op 'n OLYMPUS SZ11 Zoom Stereomikroskoop gemonteer is. Die stereoskoop se vergroting kan gevarieer word van 1,8x tot en met 11x. Die foto-oogstuk wat gebruik is het 'n 3,3x vergroting. Die totale vergroting van die foto is dan die stereoskoop vergroting vermenigvuldig met die foto-oogstuk vergroting. Die fotos van die borrels is geneem met 'n sluiterspoed van 1/60 sekondes. Die beligting is gedoen met behulp van 'n elektroniese NIKON SB-10 flits direk vanaf die agterkant van die vierkantige

meetmodule. Die flits en die sluiterspoed is in sinkronisasie met mekaar gebring. Die sluiterspoed was genoegsaam om die borrels in skerp fokus te verkry.

Die fotos is gekalibreer deur voor elke stel fotos, 'n foto te neem van 'n 100 μm diameter koperdraadjie wat in die waarnemingskolom gespan is. Die draadjie word dan verwyder en fotos word geneem met 5 sekonde tussenposes sodra die toestande in die kolom stabiliseer. 400 ASA kleur negatief film is deurgaans vir die eksperimentele werk gebruik.

3.7 BORRELMEETTEGNIEK

Om die grootte van die borrels te bepaal is die fotos wat van die borrels geneem is ontwikkel en gedruk op 9 x 12 cm fotografiese papier deur 'n professionele fotografiese ateljee.

Die deursnit en die aantal van al die borrels wat in fokus is bepaal uit die fotos. Die fotos is individueel bestudeer en al die borrels wat in fokus is is met 'n merkpen omlin waarna dit met behulp van die beeldverwerkingseenheid by MINTEK getel en gemeet is. Die resultate hiervan is ekwiwalente sirkel diameters vir elke borrel op die foto, sowel as die aantal borrels in die foto. Die borrelgrootte word aanvanklik gekalibreer deur die foto van die 100 μm draadjie te meet en die bepaalde skaalfaktor in die beeldverwerkingstelsel in te voer.

HOOFSUK 4

EKSPERIMENTELE PROGRAM EN RESULTATE

4.1 DATA-AANBIEDING

Vir al die eksperimente wat vervolgens bespreek word geld die volgende. Die statistiese ontledingstegnieke wat gebruik is om by die vergelykende parameters uit te kom word verduidelik en daarna word slegs van afkortings gebruik gemaak. Die beheerparameters en voorwaardes van elke eksperimentele opstelling word elke keer gegee waarna die verwerkte data se resultate gelys word. Die fotos van die eksperimente is te alle tye op dieselfde hoogte van 1,50 m bokant die nossel gemeet met 'n konstante waterdrukhoof van 2,00 m bo die nosselopening. Daarna volg 'n verduideliking van die data.

4.2 EKSPERIMENTELE WATERTOEOVOER

Die water wat vir al die eksperimente gebruik is, was deurgaans gewone munisipale kraanwater waarvan die chemiese analise gelys word in tabel 4.2.1. Daar is geen bymiddels by die water gevoeg vir enige van die eksperimente nie.

Die effek wat die watertemperatuur het op die borrels is nie eksperimenteel getoets nie. Aangesien al die eksperimentele werk oor 'n kort tyd gedoen is was die totale temperatuurgrens waaroor gewerk is sowat 19°C tot 23°C.

Tabel 4.2.1 Chemiese samestelling van water gebruik in laboratorium eksperimente

pH	8,00
pHs	7,94
Langelier Indeks by 25°C	0,06
Ryznar Indeks by 25°C	7,88
Neerslagpotensiaal [mg.l ⁻¹]	0,75
Totale opgeloste stowwe f=6,4 [mg.l ⁻¹]	131
Elektriese geleiding by 25°C [mS.m ⁻¹]	20,4
Totale alkaliniteit as CaCO ₃ [mg.l ⁻¹]	84
Totale hardheid as CaCO ₃ [mg.l ⁻¹]	85
Kalsiumhardheid as CaCO ₃ [mg.l ⁻¹]	70
Magnesiumhardheid as CaCO ₃ [mg.l ⁻¹]	15
Chloried as Cl [mg.l ⁻¹]	14
Sulfaat as SO ₄ [mg.l ⁻¹]	12
Nitraat as N [mg.l ⁻¹]	0,60
Fluoried as F [mg.l ⁻¹]	0,30
Opgeloste Organiese Koolstof [mg.l ⁻¹]	4,20
Natrium [mg.l ⁻¹]	10,2
Kalium [mg.l ⁻¹]	4,80

4.3 STATISTIESE ONTLEDINGSTEGNIEKE

4.3.1 Statistiese beheerparameters

Die lys van borreldiameters wat verkry word vanuit resultate van die beeldverwerkingseenheid word ingevoer in die sigblad program QUATTRO PRO 4. Hierdie lys van ekwivalente borreldiameters word dan gesorteer volgens toenemende grootte. Die oorspronklike aantal borrels word getel en al die borrels word dan gesorteer in klasse met 'n 5 μm bandwydte. Die klasse begin by 0 μm en eindig by 150 μm . Alle borrels wat dan in die klas groter as 150 μm val, word getel en van die

res van die oorspronklike aantal borrels se totaal afgetrek om die totale aantal borrels kleiner as $150\text{ }\mu\text{m}$ te gee.

Die persentasie growwe borrels (f) word nou bereken deur die aantal borrels wat groter is as $150\text{ }\mu\text{m}$ deur die oorspronklike aantal borrels in die datastel te deel. Die waarde word as 'n persentasie uitgedruk en genoteer. Hierdie waarde staan bekend as die *growwe borrel indeks*.

Vanweë die aard van die apparaat kan aanvaar word dat die borrels groter as $150\text{ }\mu\text{m}$ veroorsaak word deur veral fisiese obstruksies in die kolom, maar dat dit ook afkomstig is van die nossel af. Die totale datastel toon 'n goeie normaalverspreiding, met die uitsondering van die growwe borrels. Daarom is besluit om die afsnypunt by $150\text{ }\mu\text{m}$ te maak. Dit word algemeen aanvaar dat borrels groter as $150\text{ }\mu\text{m}$ nie geskik is vir suksesvolle flottasie nie, en dus word gesoek na 'n minimum growwe borrels. 'n Groot persentasie growwe borrels sal dus natuurlik ongewensd wees.

Die aantal borrels in elke $5\text{ }\mu\text{m}$ klas word deur die aantal oorblywende borrels gedeel en as 'n persentasie daarvan uitgedruk om 'n kumulatiewe kromme te kan trek van borrelgrootte. Hierna word die kumulatiewe persentasies in elke klas bereken en 'n kumulatiewe borrelgrootte - persentasie deurlatingsgrafiek word geplot.

Uit die grafiek kan die *mediaan* (D_{50}) bereken word wat 'n maatstaf is van die gemiddelde borreldiameter. Die mediaan is die borrelgrootte waar 50% van alle borrels kleiner is as daardie spesifieke borrelgrootte. Daar is besluit om met die mediaan te werk in plaas van die rekenkundige gemiddelde aangesien dit 'n meer stabiele waarde is by sulke relatief klein datastelle.

Vanuit dieselfde kumulatiewe grafiek kan die D_{10} en die D_{90} bereken word. Die standaardafwyking is 'n metode om te bereken hoe vër data van die rekenkundige gemiddelde afwyk, maar sodra die datastelle baie klein word, word die standaardafwyking 'n minder akkurate maatstaf. Vir hierdie ontledings word van 'n *uniformheidsindeks* (U) gebruik gemaak om die afwyking om die mediaan aan te toon. Die waarde is dimensieloos en word bereken deur die verskil tussen die D_{90} en die D_{10} deur die mediaan te deel. Die rede hoekom die 10% en die 90% grense gekies is eerder as die 20% en 80% grense, is dat die serte van die kumulatiewe kromme beter verteenwoordig word met die 10% en 90% grense. 'n Waarde van kleiner as 1 vir

die uniformheidsindeks het dus 'n relatief steil grafiek tot gevolg terwyl 'n waarde van groter as 1 'n meer geleidelike helling tot gevolg het. 'n Steil helling beteken 'n nou band van borrelgroottes, terwyl 'n geleidelike helling 'n wyer band van borrelgroottes beteken.

Die totale volume van al die borrels wat getel is word bereken, sowel as die volume van die borrels wat onderskeidelik groter en kleiner as $150\text{ }\mu\text{m}$ is. Die volume van al die borrels saam word dan deur die volume van die borrels kleiner as $150\text{ }\mu\text{m}$ gedeel en uitgedruk as 'n persentasie. Hierdie waarde word dan die *effektiewe luggebruik* (eff) genoem. Hierdie parameter gee 'n goeie aanduiding van die nadelige effek van growwe borrels. Een tot vyf borrels groter as $150\text{ }\mu\text{m}$ kan 'n volume bevat wat 10 keer meer is as die totale volume van 200 borrels wat kleiner is as $150\text{ }\mu\text{m}$, aangesien volume 'n kubiese verhouding met deursnit het.

Volledige datavelle wat die rekenkundige gemiddeld, die standaardafwyking, borrelgrootte histogram, kumulatiewe persentasie borrelgrootte kromme en nossel inligting soos uitlaatsnelhede en L/D verhoudings bevat, is beskikbaar in Rykaart, 1993.

Die drie parameters wat deurgaans gebruik sal word om die werkverrigting van die nossels te verduidelik sal die *mediaan*, *growwe borrel indeks* en die *uniformheidsindeks* wees. Die *effektiewe luggebruik* sal nie gebruik word om nossels met mekaar te vergelyk nie, aangesien die parameter baie fluktureer en data ontleding bemoeilik.

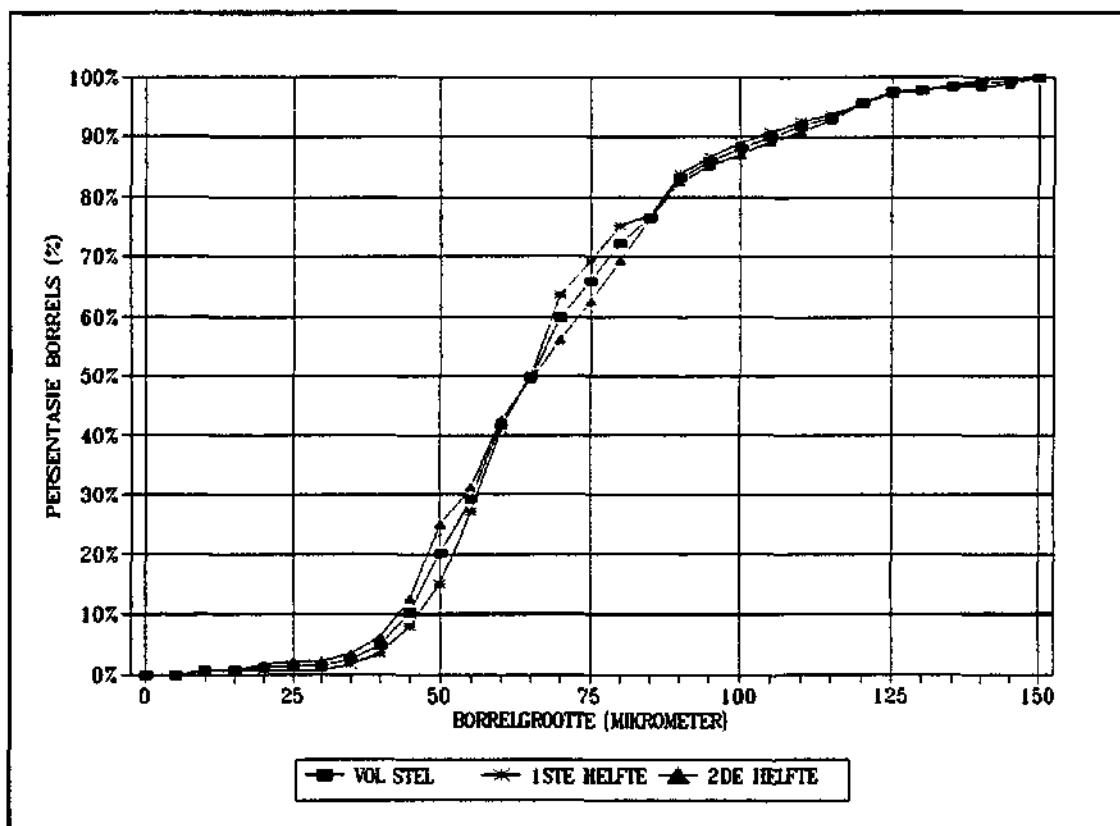
4.3.2 Aantal borrels per datastel

Die hoeveelheid borrels wat getel moet word om 'n statisties betekenisvolle resultaat te lewer is eerstens bepaal. 'n Willekeurige en verteenwoordigende datastel met 366 borrels (insluitende borrels groter as $150\text{ }\mu\text{m}$) is ontleed in sy totaliteit. Daarna is die datastel in twee gelyke dele gedeel sodat die eerste 183 borrels alleen geanaliseer kon word, en so ook die tweede helfte van 183 borrels. Die statistiese beheerparameters soos beskryf in die voorgaande afdeling is gebruik om die datastelle te vergelyk. Die resultate word grafies getoon in grafiek 4.3.2.1 en opgesom in tabel 4.3.2.1.

Die resultate toon aanvaarbare verskille tussen die volle datastel en die halwe datastelle. Dit word dus aanvaar dat 'n minimum van 150 borrels getel behoort te word, en dat nie meer as omtrent 350 borrels hoeftel te word nie. Op grond hiervan is besluit op 'n mikpunt van 200 borrels vir elke individuele eksperiment.

Tabel 4.3.2.1 Resultate van die grootte van datastel toets

	TOTALE DATASTEL	EERSTE HELFTE	TWEDE HELFTE
AANTAL BORRELS	349	173	176
D_{50} [μm]	65,1	64,8	65,4
f [%]	4,64	5,46	3,83
U	0,93	0,87	0,98
eff [%]	45,5	36,0	60,1



Grafiek 4.3.2.1 Grafiek wat verskillende groottes datastelle teen mekaar toon

4.4 AKKURAATHEID VAN BORRELMEETTEGNIK

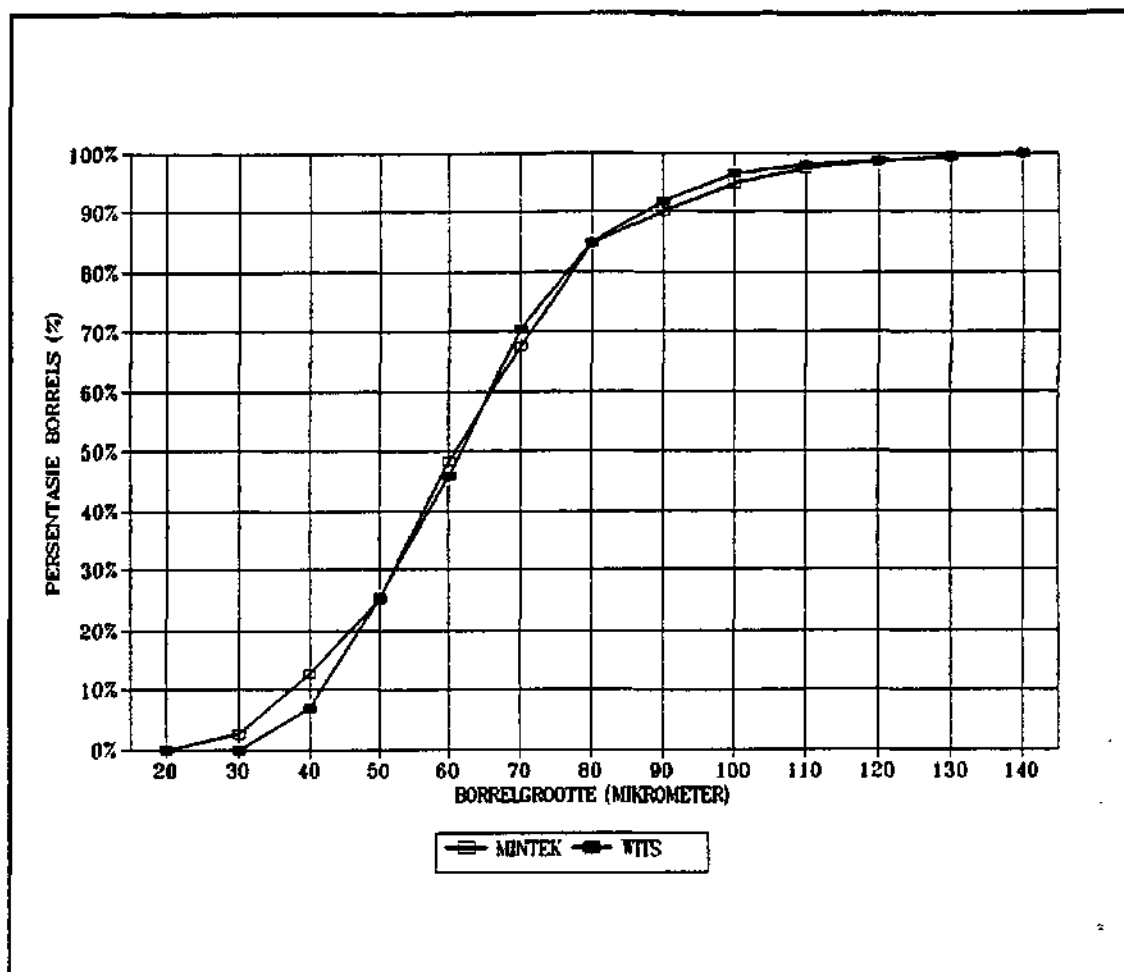
Om te bepaal hoe akkuraat die stelsel by MINTEK is, is besluit om 'n eenderse stel fotos by beide MINTEK en die Witwatersrand Universiteit (WITS) te laat ontleed. Die stelsel by WITS bestaan uit 'n kamera wat die fotos aftas, waarna die beeld met rekenaarmetodes verfyn word totdat slegs die borrels agterbly. Die borrels word ingekleur en die area daarvan word gemeet. Die ekwivalente sirkel diameter vir die area word bepaal en genoteer. Die resultaat van die toets word opgesom in grafiek 4.4.1 en in tabel 4.4.1.

Tabel 4.4.1 Vergelykende data van MINTEK en WITS

PARAMETER	WITS	MINTEK
AANTAL BORRELS	146	151
D_{50} [μm]	61,3	61,0
f [%]	0,00	0,00
U	0,71	0,86
eff [%]	100,0	100,0
D_{10} [μm]	41,1	37,5
D_{90} [μm]	84,6	89,8

Uit die eksperiment het dit duidelik geword dat beide stelsels nagenoeg dieselfde resultate gee, en dat MINTEK se metode dalk meer sensitief is in die laer orde van borrelgroottes. Slegs MINTEK se metode is verder aan gebruik.

Die borrelgrootte wat verkry word is dalk nie 100% akkuraat nie, maar aangesien enige fout deurgaans deur die projek voortgeplant word sal die *verskille* in borrelgrootte baie akkuraat gemeet kan word. Vir die doel van die projek is die verskille in borrelgrootte van meer belang as die werklike borrelgrootte.



Grafiek 4.4.1 Grafiek van MINTÉK se meettegniek teenoor WITS se meettegniek

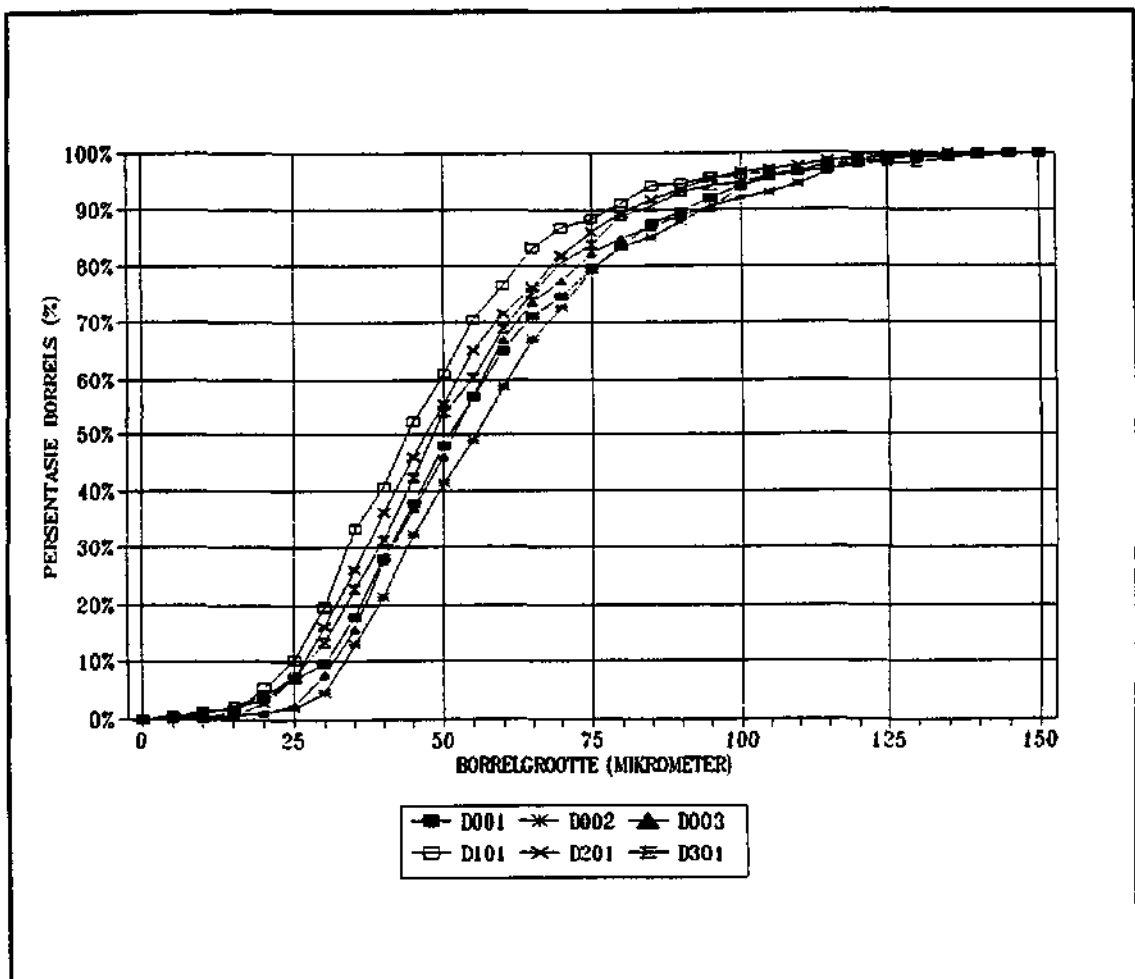
4.5 REPRODUSEERBAARHEID VAN EKSPERIMENTELE STELSEL

Om die reproduceerbaarheid van die meettegniek te toets is die volgende eksperiment gedoen. Die eksperimentele apparaat is opgestel sodat 'n goeie verteenwoordigende borrelwolk geproduseer kon word. Ses identiese toetse is gedoen, volgens bepaalde voorgeskrewe voorwaardes. Die eerste drie toetse is gedoen op dieselfde dag, direk na mekaar. Die laaste drie toetse is op drie opeenvolgende dae gedoen. Na elke enkele toets is die apparaat ten volle gestop en gedreineer en van voor af begin.

Die resultate van die toets word opgesom in tabel 4.5.1 en in grafiek 4.5.1.

Tabel 4.5.1 Opsomming van reproduceerbaarheidsdata

NO.	REP D001	REP D002	REP D003	REP D101	REP D201	REP D301
D_{94} [μm]	51,1	55,5	51,8	44,1	47,1	48,4
f [%]	0,25	1,13	1,01	1,82	0,20	0,60
U	1,19	1,09	1,21	1,21	1,16	1,16
eff [%]	95,9	43,9	85,6	68,2	86,1	90,3



Grafiek 4.5.1 Grafiese voorstelling van die reproduceerbaarheidsdata

Hierdie data is statisties ontleed om die gemiddelde en standaardafwyking van elkeen van die parameters in die tabel te vind. Dit is dan met behulp van die t-Statistiek (Statistics for Experimenters, 1978) geanaliseer om 'n 95% betroubaarheidsinterval vir elke parameter te bereken. Hierdie resultate word saamgevat in tabel 4.5.2.

Die foutgrens word bepaal deur van die volgende vergelyking gebruik te maak:

$$G = \bar{y} \pm t\sigma \dots\dots\dots (4.1)$$

Waar y die gemiddelde, σ die standaardafwyking en t die t-Statistiek vir die 95% betroubaarheidsinterval met 4 grade van vryheid is.

Hierdie resultate gee 'n maatstaf waarteen die eksperimentele fout in die eksperimentele werk gemeet kan word.

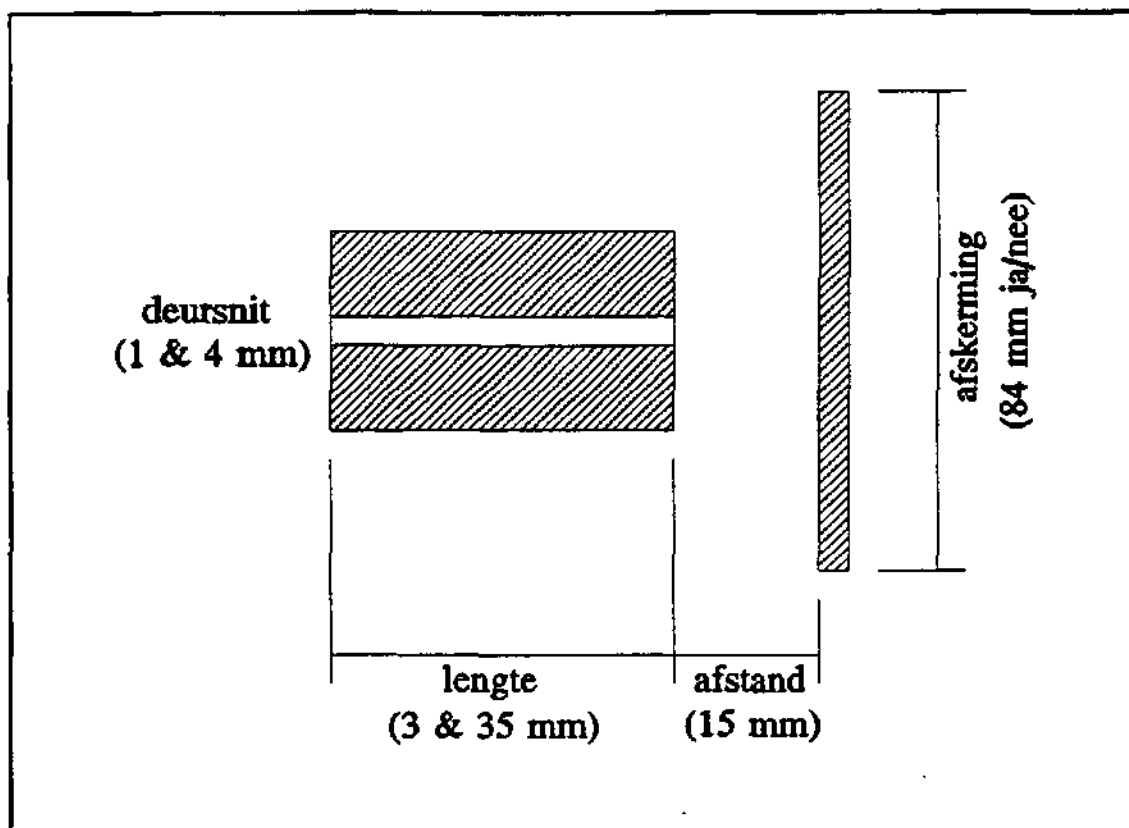
Tabel 4.5.2 95% betroubaarheidsinterval vir borrelmetinge

	D_{50} [μm]	f [%]	U	eff [%]
GEMIDDELD	49,7	1,17	0,84	78,3
STD AFWYKING	4,0	0,05	0,61	17,6
t-STATISTIEK	2,132	2,132	2,132	2,132
MINIMUM	41,1	1,06	-0,46	40,9
MAKSIMUM	58,2	1,28	2,14	115,8
FOUTGRENS	8,5	0,11	1,31	37,5

4.6 EKSPERIMENT 1 - IDENTIFIKASIE VAN VERNAAMSTE VERANDERLIKES

As beginpunt vir die eksperimentele werk is besluit om die effekte van die drukverlies oor die nosselkanaal, lengte van die nosselkanaal, die deursnit van die nosselkanaal en die teenwoordigheid van 'n afskerming voor die nosselkanaal te vergelyk. Die interaksies is dan met behulp van 'n 2^4 -faktoriaalontwerp getoets (Statistics for Experimenters, 1978). Die ontleding van die data sal dus die statisties betekenisvolle effekte uitwys. Figuur 4.6.1 toon die nossel skematies aan.

Die parameters en die minimum en maksimum waardes van elkeen van die opstellings word gelys in tabel 4.6.1.



Figuur 4.6.1 Skematiese voorstelling van primêre nossel

Tabel 4.6.1 Minimum en maksimum waardes van beheerparameters

PARAMETER	MINIMUM	MAKSIMUM
NOSSELLENGTE [mm]	3	35
NOSSELDEURSNIT [mm]	1	4
VERSADIGERDRUK [kPa]	200	500
AFSKERMING	NEE	JA

Die betekenisvolle effekte is bereken met die YATES-algoritme (Statistics for Experimenters, 1978). Tabel 4.6.2 toon die verwerkte data in die vorm soos nodig vir die YATES-algoritme. Die (+) beteken die maksimum waarde en die (-) beteken die minimum waarde soos in tabel 4.6.1 aangedui. Die YATES-algoritme is toegepas op die mediaan (D_{50}), growwe borrel indeks (f) en uniformheidsindeks (U) afsonderlik.

Tabel 4.6.2 Finale resultate van eerste faktoriaalontwerp eksperiment in die vorm geskik vir die YATES-algoritme

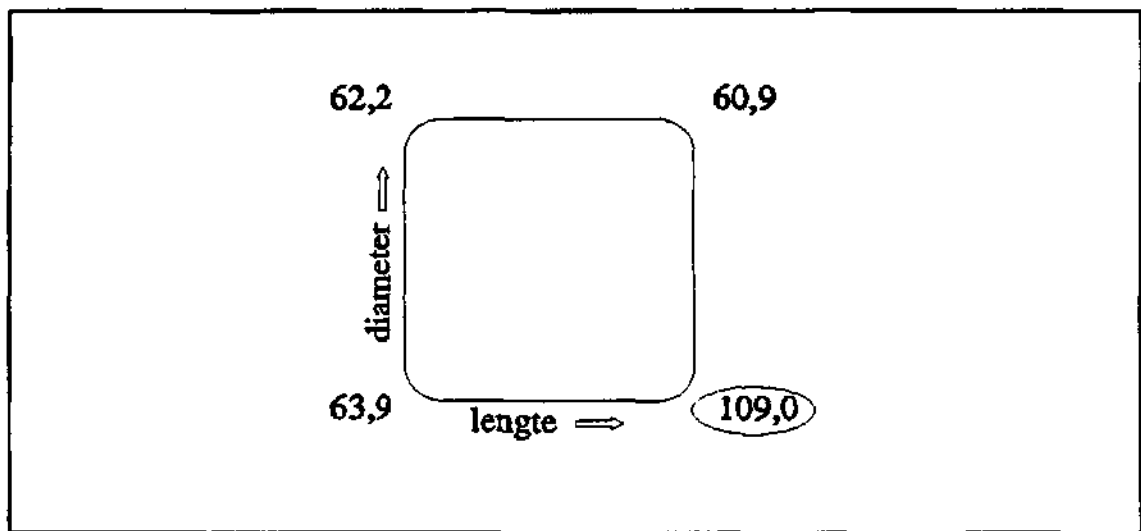
LENGTE	DEUR-SNIT	DRUK	SKER-MING	D ₅₀ [μm]	f [%]	U	eff [%]
-	-	-	-	70,7	0,00	0,73	100,0
+	-	-	-	100,1	2,27	0,39	91,5
-	+	-	-	73,5	13,71	0,74	22,1
+	+	-	-	67,7	10,47	0,90	26,2
-	-	+	-	59,0	0,95	0,96	53,5
+	-	+	-	117,5	10,75	0,39	71,0
-	+	+	-	50,4	6,72	0,79	0,0
+	+	+	-	56,7	11,48	0,75	8,5
-	-	-	+	70,8	0,00	0,58	100,0
+	-	-	+	113,3	0,00	0,32	100,0
-	+	-	+	69,8	4,47	0,82	52,1
+	+	-	+	65,1	4,64	0,93	45,5
-	-	+	+	54,9	0,28	0,96	85,9
+	-	+	+	105,0	8,62	0,54	72,7
-	+	+	+	55,2	2,73	0,75	48,1
+	+	+	+	54,0	3,23	0,86	28,1

Eksperiment 1 - mediaan

Uit die toepassing van die YATES-algoritme op die D₅₀ (op die 95% betroubaarheidsvlak) is die statisties betekenisvolle effekte die van (a) nossellengte, (b) nosseldeursnit, (c) druk en (d) die interaksie tussen nossellengte en nosseldeursnit:

- 'n Toename in die versadigerdruk van 200 tot 500 kPa laat die mediaan afneem met 9,79 μm, en die effek is konsekwent oor die vlakke van die ander parameters wat getoets is.

- Aangesien daar 'n duidelike interaksie tussen die nossellengte en die nosseldeursnit is, moet die effekte van die twee parameters gesamentlik bestudeer word. Die aard van die interaksie word getoon in die twee rigting tabel van figuur 4.6.2, wat verkry word deur die gemiddelde waardes van gelyke parameters te bereken. Die interaksie vind plaas omdat 'n toename in lengte by klein diameter nossels groter borrels tot gevolg het, terwyl toename in nossellengte by groot diameter nossels feitlik geen verandering in borrelgrootte teweegbring nie.



Figuur 4.6.2 Twee rigting tabel vir mediaan borrelgrootte data

Eksperiment 1 - growwe borrel indeks

Uit die toepassing van die YATES-algoritme op f (op die 95 % betroubaarheidsvlak) is die statisties betekenisvolle effekte die van (a) nossellengte, (b) nosseldeursnit, (c) afskerming, (d) die interaksie tussen nossellengte en nosseldeursnit, (e) die interaksie tussen nossellengte en druk, (f) die interaksie tussen nosseldeursnit en druk en (g) die interaksie tussen nosseldeursnit en afskerming:

- Aangesien daar 'n duidelike interaksie tussen die nossellengte en die nosseldeursnit is, moet die effekte van die twee parameters gesamentlik bestudeer word. Die aard van die interaksie word getoon in die twee rigting tabel van figuur 4.6.3 (a), wat verkry word deur die gemiddelde waardes van gelyke parameters te bereken. By 'n klein diameter en 'n kort nossellengte is

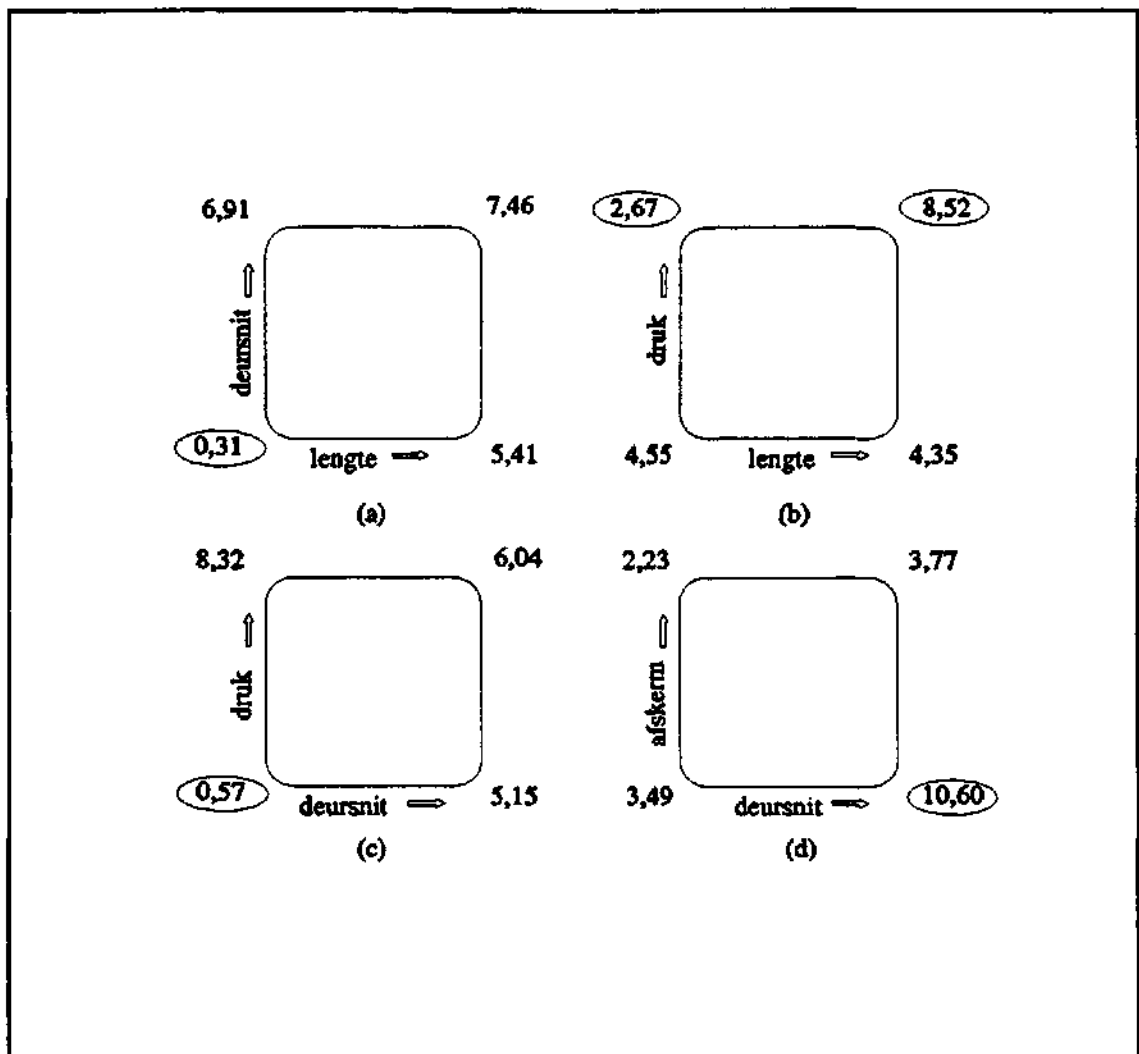
die persentasie growwe borrels die laagste, en by 'n lang nossel met 'n groot diameter gat is die aantal growwe borrels die meeste. Enige toename in lengte en deursnit bring dus meer growwe borrels.

- Die interaksie van die nossellengte en die versadigerdruk word getoon op die twee rigting tabel in figuur 4.6.3 (b). Vir 'n toename in lengte van die nosselkanaal teen 'n druk van 200 kPa bly die persentasie growwe borrels konstant maar, vir 'n toename in nossellengte by 'n druk van 500 kPa word die persentasie growwe borrels aansienlik meer. Vir 'n kort nosselkanaal sal daar minder growwe borrels wees by 'n hoë druk.
- Die interaksie tussen die nosseldeursnit en die versadigerdruk word getoon in figuur 4.6.3 (c). Indien die nosseldiameter vergroot word van 1 mm na 4 mm verhoog die persentasie growwe borrels, en sodra die druk van 200 kPa na 500 kPa verhoog die persentasie growwe borrels. As die druk verhoog word by 'n klein diameter nossel neem die persentasie growwe borrels toe, terwyl dit minder word by 'n groot diameter nossel.
- Figuur 4.6.3 (d) toon die twee rigting tabel vir die interaksie tussen die nosseldeursnit en die teenwoordigheid van 'n afskerming. Indien die nosseldeursnit vergroot word neem die persentasie growwe borrels toe, alhoewel baie min in die teenwoordigheid van 'n afskerming. Indien daar nie 'n afskerming voor die nossel geplaas is nie is die persentasie growwe borrels aansienlik groter.

Eksperiment 1 - uniformheidsindeks

Uit die toepassing van die YATES-algoritme op U (op die 95 % betroubaarheidsvlak) is die statisties betekenisvolle effekte die van (a)-nossellengte, (b) nosseldeursnit, (c) die interaksie tussen nossellengte en nosseldeursnit en (d) die interaksie tussen nosseldeursnit en druk:

- Aangesien daar 'n duidelike interaksie tussen die nossellengte en die nosseldeursnit is, moet die effekte van die twee parameters gesamentlik bestudeer word. Die aard van die interaksie word getoon in die twee rigting tabel van figuur 4.6.4 (a), wat verkry word deur die gemiddelde waardes van

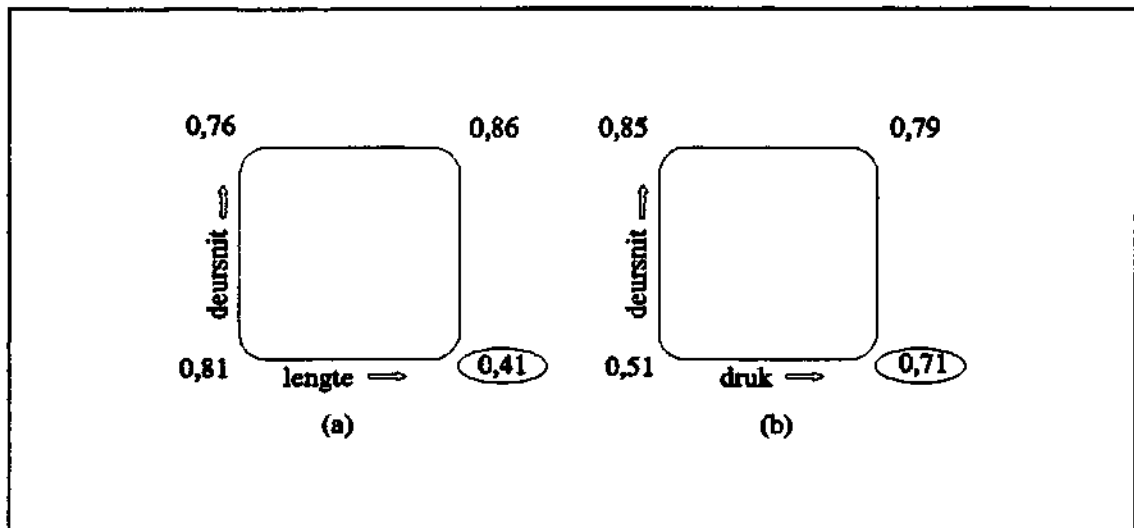


Figuur 4.6.3 Twee rigting tabel vir growwe borrel indeks

gelyke parameters te bereken. Vir 'n kort nossel neem die verhouding af soos die nosseldiameter vergroot, wat beteken dat die borrelverspreiding kleiner word. Vir 'n lang nossel neem die verhouding egter toe soos die nosseldiameter toeneem, sodat die borrelverspreiding vergroot. Vir 'n klein diameter nossel vergroot die borrelverspreiding soos die nossel langer word terwyl die borrelverspreiding afneem met 'n toename in lengte vir 'n groot diameter nossel.

- Vir die interaksie van die nosseldeursnit en die versadigerdruk kyk ons na die twee rigting tabel in figuur 4.6.4 (b). Die interaksie vind plaas deurdat vir 'n toename in deursnit van die nosselkanaal in alle gevalle 'n verkleining van die borrelverspreiding tot gevolg het. By 'n klein diameter nossel kry ons dat daar

'n vergroting van die borrelverspreiding is soos die versadigerdruk verhoog word. By 'n groot nosseldiameter vind ons egter 'n kleiner borrelverspreiding soos die druk toeneem.



Figuur 4.6.4 Twee rigting tabel vir die uniformheidsindeks

Eksperiment 1 - opsomming

Dit is dus duidelik uit die voorafgaande resultate, dat die verband tussen nossellengte en nosseldeursnit, sowel as die aspek van afskerming verder ondersoek moet word. In hierdie verslag word slegs die afskermingseksperimente bespreek. 'n Aantal eksperimente is gedoen om bloot die verband tussen die lengte en deursnit van reguit kanale sonder afskeriming te ondersoek, maar dit word nie hier gerapporteer nie omdat:

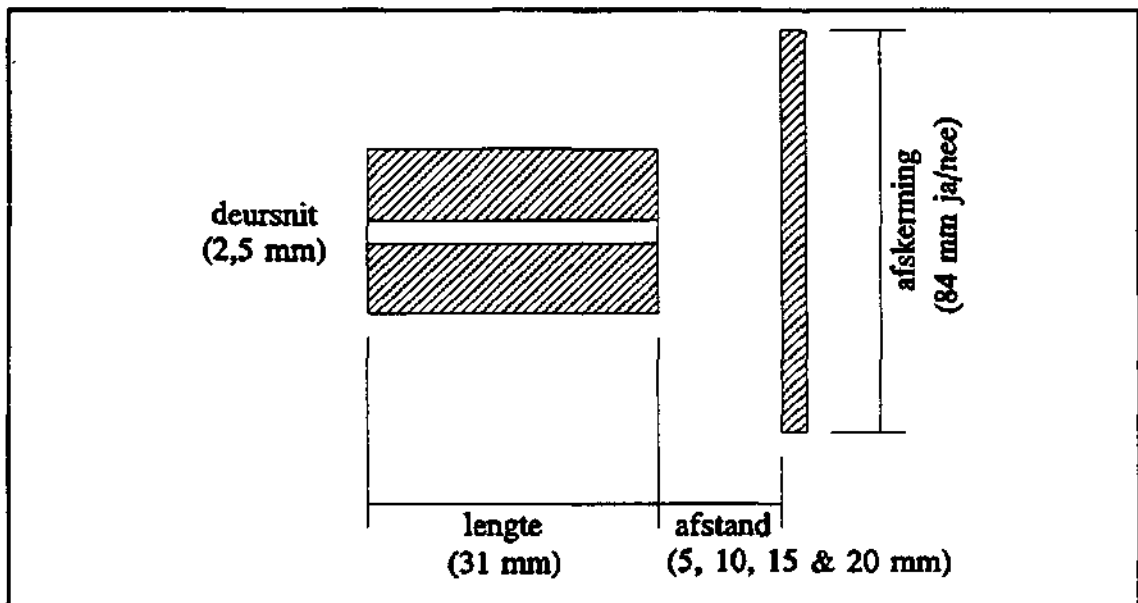
- In die meeste gevalle kon nie genoeg borrels getel word vir statisties betekenisvolle afleidings nie, en
- 'n Reguit kanaal sonder afskerming wou glad nie prakties toegepas nie.

4.7 EKSPERIMENT 2 - DIE EFFEK VAN AFSKERMING

Uit die eksperimentele data van die eerste faktoriaalontwerp is dit duidelik dat die toevoeging van 'n afskerming geen van die parameters beïnvloed behalwe f nie., Soos

die afskerming voor die nossel geplaas word, neem f aansienlik af. Hierdie resultaat het aanleiding gegee tot 'n stel eksperimente waar die afstand wat die afskerming van die nossel af is getoets is.

Daar is besluit om 'n afskerming van 84 mm diameter voor 'n nossel met 'n lengte van 31 mm en 'n deursnit van 2,5 mm te plaas op 'n verskeidenheid van afstande. Hierdie afstande is; 5mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm en oneindig (daar was geen afskerming nie). Die nossel word skematies voorgestel in figuur 4.7.1. Elke eksperiment is twee keer herhaal, een keer by 200 kPa en een keer by 500 kPa. Die resultate van die eksperiment word vervolgens opgesom in tabel 4.7.1.

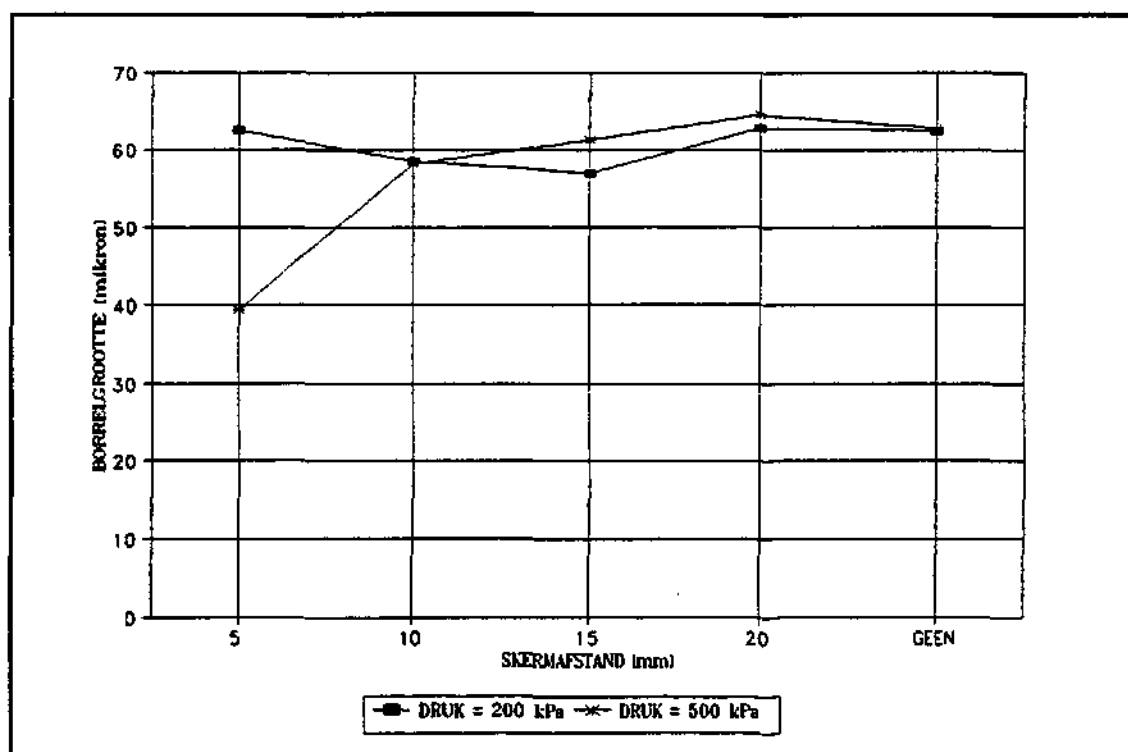


Figuur 4.7.1 Skematiese voorstelling van eerste afskermings nossel

Tabel 4.7.1 Resultate van afskermingsafstand eksperimente

AFSTAND [mm]	DRUK [kPa]	D_{50} [μm]	f [%]	U	eff [%]
GEEN	200	62,4	0,93	1,05	78,0
5	200	62,5	2,27	0,98	70,1
10	200	58,5	0,00	1,07	100,0
15	200	57,0	0,00	0,98	100,0
20	200	62,8	2,23	1,02	72,6
GEEN	500	62,7	8,85	0,96	13,2
5	500	39,4	0,00	1,05	100,0
10	500	58,1	4,35	1,08	14,9
15	500	61,3	3,33	0,95	37,4
20	500	64,6	7,86	0,99	15,7

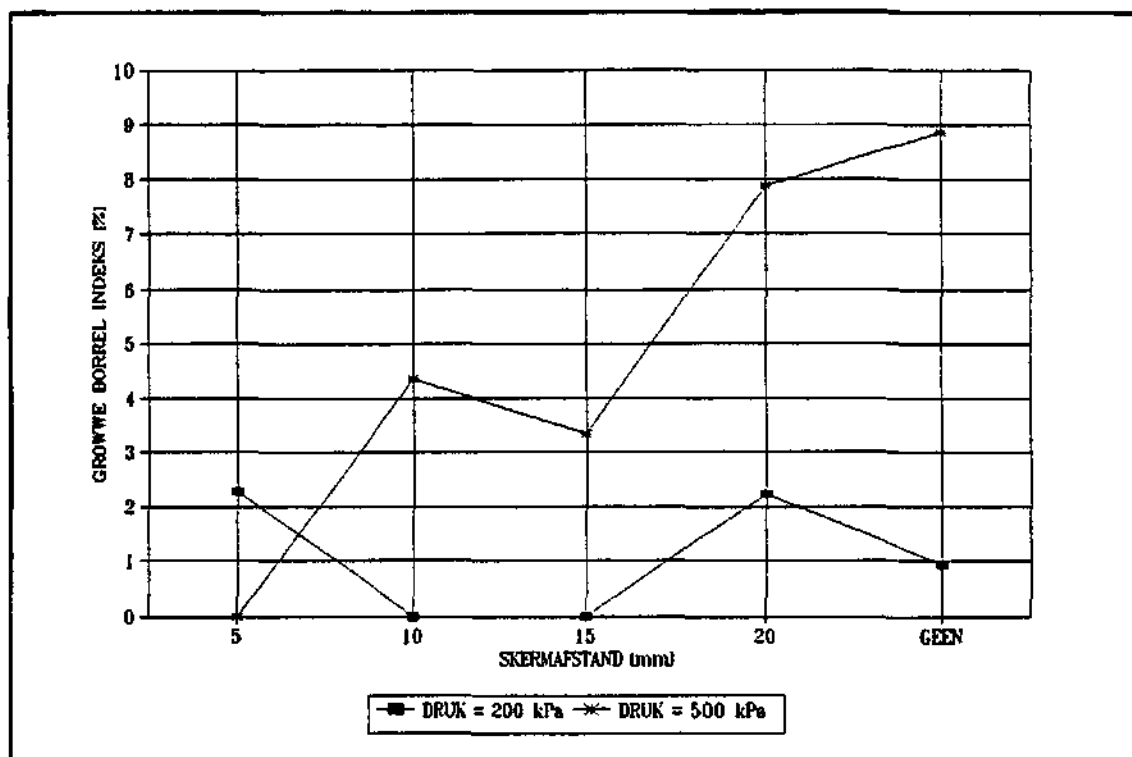
Die resultate word verder grafies voorgestel in grafieke 4.7.1 (a), (b) en (c).



Grafiek 4.7.1(a) Grafiek van afskermingsafstand teenoor mediaan

Eksperiment 2 - mediaan

In grafiek (a) word die afskermingsafstand teenoor D_{50} geplot. Dit is duidelik dat by 'n lae druk, die afstand wat die afskerming weg is van die nossel byna geen uitwerking op die borrelgrootte het nie. By 'n hoë druk egter is daar 'n drastiese afname in die borrelgrootte sodra die afskerming op 'n afstand kleiner as 10 mm geplaas word.



Grafiek 4.7.1(b) Grafiek van afskermingsafstand teenoor growwe borrel indeks

Eksperiment 2 - growwe borrel indeks

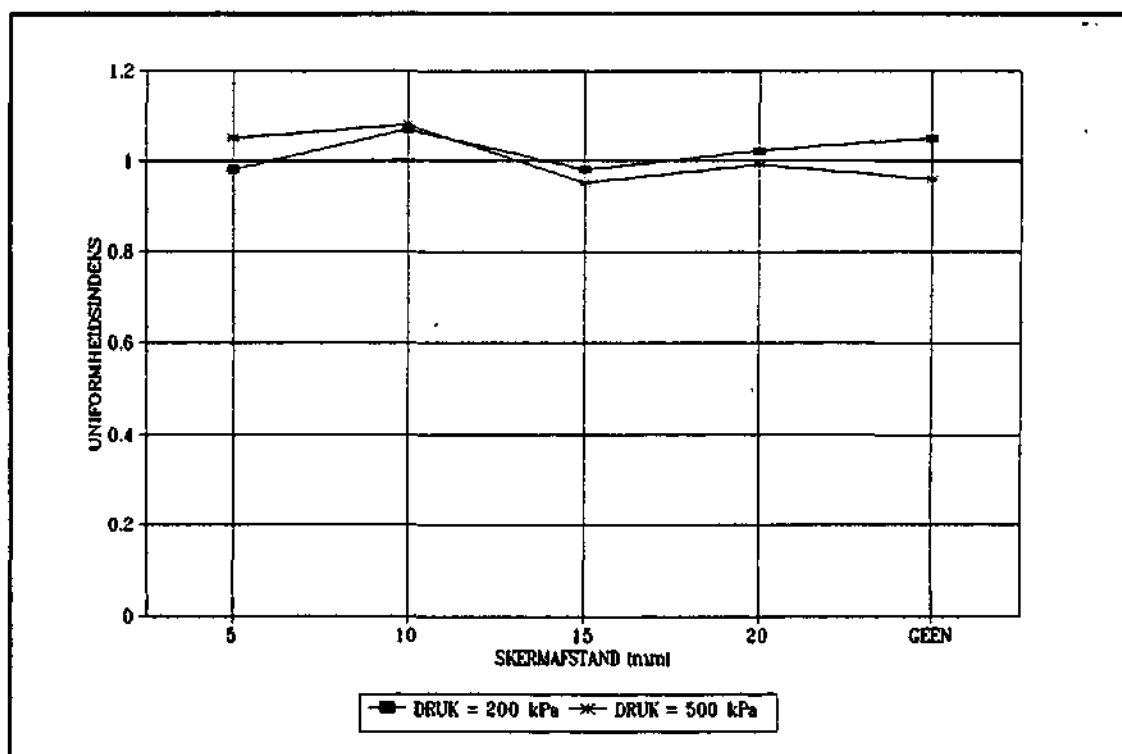
In grafiek (b) waar f teenoor die afskermingsafstand geplot word sien ons weereens dat indien die druk laag is, is daar feitlik geen verskil in die waarde nie. Sodra die druk egter toeneem neem die persentasie growwe borrels aansienlik toe soos die afstand tussen die skerm en die nossel toeneem. Die persentasie growwe borrels is aansienlik minder by 'n lae druk.

Eksperiment 2 - Uniformheidsindeks

Vir grafiek (c) wat die uniformheidsindeks voorstel lyk dit asof daar feitlik geen verskil is tussen die hoë en die lae druk situasie nie. Dit kan moontlik gesê word dat hoe verder weg die afskerming van die nossel is hoe groter die verskil tussen 'n hoë en 'n lae druk is, waar die lae druk eerder 'n kleiner borrelverspreiding tot gevolg het as die hoë druk. As egter in geheel gekyk word na die grafiek sien 'n mens dat die totale afwyking oor die uniformheidsindeks vir die grafiek in die orde van 0,15 is en in gedagte gehou word dat die 95 % foutgrens is 0,11 dan is die afwykings nie noemenswaardig nie.

Eksperiment 2 - Opsomming

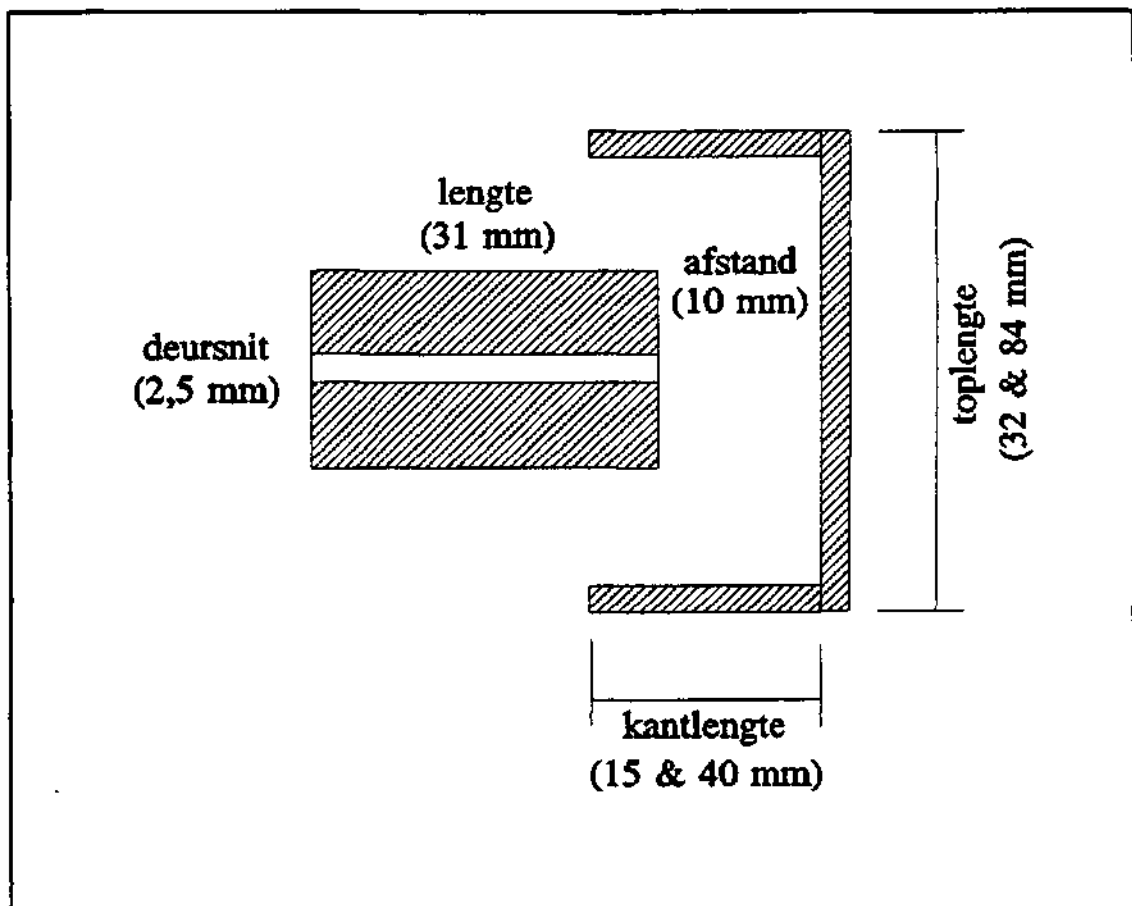
Die effek wat druk het op die borrelgrootte is weereens pertinent. Dit wil voorkom asof die afstand tussen die nossel en die skerm slegs kritiek is tot op 10 mm.



Grafiek 4.7.1(c) Grafiek van afskermingsafstand teenoor uniformheidsindeks

4.8 EKSPERIMENT 3 - OPTIMISERING VAN AFSKERMING

Die sogenaamde "koppie" effek word in die literatuur uitgewys om 'n besondere effek op die borrelgrootte te hê. Daar is besluit om die kritiese afmetings van 'n "koppie" te toets met behulp van 'n 2^3 -faktoriaalontwerp (Statistics for Experimenters, 1978). 'n Skets van die nossel en die afskerming se afmetings word gegee in figuur 4.8.1. Die drie parameters wat gewissel is in die faktoriaalontwerp is die toplengte, die kantlengte en die versadigerdruk. Die afstand wat die afskerming van die nosselkop af is, is konstant gehou op 10 mm. Dieselfde nossel as wat vir die vorige afskermingseksperimente gebruik is in afdeling 4.3.1 is hier gebruik, naamlik een met 'n kanaallengte van 31 mm en 'n nosseldeursnit van 2,5 mm. Die minimum en die maksimum waardes wat gebruik is vir die 2^3 -faktoriaalontwerp word gelys in tabel 4.8.1.



Figuur 4.8.1 Skematiese voorstelling van tweede afskermings nossel

Die betekenisvolle effekte is bereken met die YATES-algoritme (Statistics for Experimenters, 1978) (sien BYLAAG B). Tabel 4.8.2 toon die verwerkte data in die vorm soos nodig vir die YATES-algoritme. Die (+) beteken die maksimum waarde en die (-) beteken die minimum waarde soos in tabel 4.8.2 aangedui. Die YATES-algoritme is toegepas op die mediaan (D_{50}), growwe borrel indeks (f) en uniformheidsindeks (U) afsonderlik.

Tabel 4.8.1 Minimum en maksimum waardes van die beheerparameters

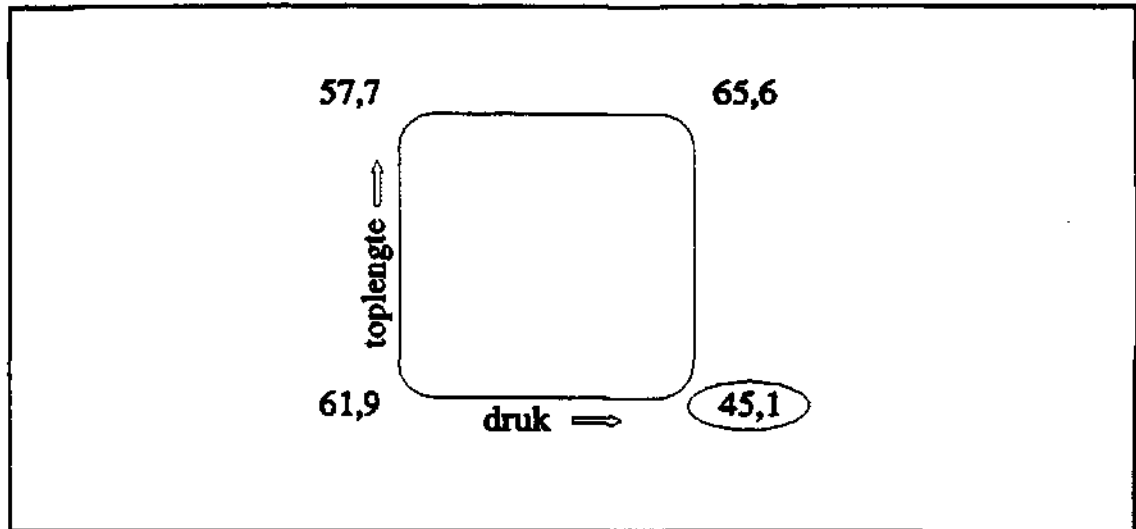
PARAMETER	MINIMUM	MAKSIMUM
VERSADIGERDRUK [kPa]	200	500
AFSKERMING TOPLENGTE [mm]	32	84
AFSKERMING KANTLENGTE [mm]	15	40

Tabel 4.8.2 Finale resultate van afskerming faktoriaalontwerp eksperiment in die vorm geskik vir die YATES-algoritme

DRUK [kPa]	TOP [mm]	KANT [mm]	D_{50} [μ m]	f [%]	U	eff [%]
-	-	-	66,5	1,95	0,82	51,5
+	-	-	45,3	0,46	1,07	77,0
-	+	-	60,0	0,47	0,86	90,5
+	+	-	57,2	0,00	1,08	100,0
-	-	+	57,3	0,48	1,00	94,0
+	-	+	44,8	1,76	0,99	62,9
-	+	+	55,4	0,47	1,05	95,0
+	+	+	73,9	1,35	0,92	91,8

Eksperiment 3 - mediaan

Uit die toepassing van die YATES-algoritme op die D_{50} (op die 95 % betroubaarheidsvlak) is die enigste statisties betekenisvolle effek die interaksie tussen die versadigerdruk en die toplengte van die afskerming:



Figuur 4.8.2 Twee rigting tabel vir mediaan borrelgrootte

- Die interaksie kan verduidelik word aan die hand van figuur 4.8.2. Die twee rigting tabel toon aan dat daar 'n drastiese afname in borrelgrootte gevind word sodra die druk verhoog word, maar die toplengte bly klein. Vir al die ander kombinasies is die verskil in borrelgrootte nie noemenswaardig nie.

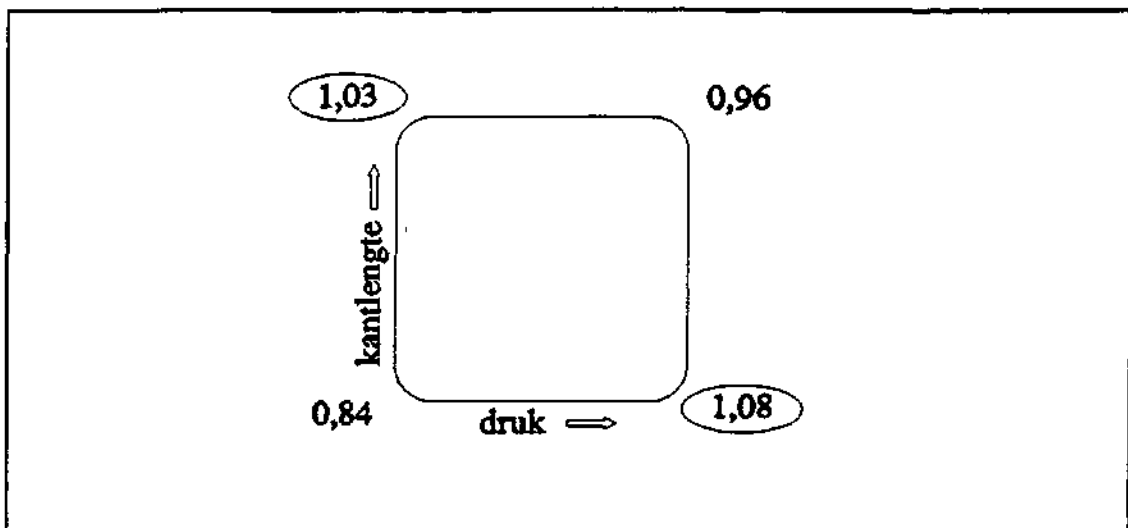
Eksperiment 3 - growwe borrel indeks

Vir f toon die YATES-algoritme geen statisties betekenisvolle effekte aan op die 95% betroubaarheidsinterval nie.

Eksperiment 3 - uniformheidsindeks

By U is daar 'n interaksie tussen die versadigerdruk en die afskerming kantlengte wat statisties betekenisvol is op die 95 % betroubaarheidsinterval:

- Die interaksie word in die twee rigting tabel van figuur 4.8.3 getoon. Die effek wat 'n toename in druk by 'n kort kantlengte het is dat die borrelverspreiding groter word. As die druk laag gehou word en die kantlengte word verleng word dieselfde gevind. 'n Verhoging in druk gelykstaande met 'n lang kantlengte het weer tot gevolg dat die borrelverspreiding nouer word.



Figuur 4.8.3 Twee rigting tabel vir die uniformheidsindeks

Eksperiment 3 - opsomming

Geoordeel op die data van Eksperiment 3, het daar baie min inligting na vore gekom om die effek van afskerming beter te verstaan.

4.9 GEKOMBINEERDE EFFEKTE VAN EKSPERIMENTE 2 & 3

Om groter lig te probeer werp op die effekte van afskermings, is die data van Eksperimente 2 en 3 gesamentlik ontleed. In tabel 4.9.1 word al die data getoon waar (a) die afstand tussen die nossel en die skerm 10 mm was en (b) die toplengte 84 mm.

Die nossels van albei die eksperimente was eenders. Die D_{50} , f , U en die effektiewe luggebruik is reeds bereken. Ter opsomming word dit ook saam gegroepeer in tabel 4.9.2.

Die resultate van die samevoeging van eksperimentele data kan grafies voorgestel word soos in grafieke 4.9.1 (a), (b) en (c).

Tabel 4.9.1 Eksperimentele veranderlikes van gekombineerde eksperiment

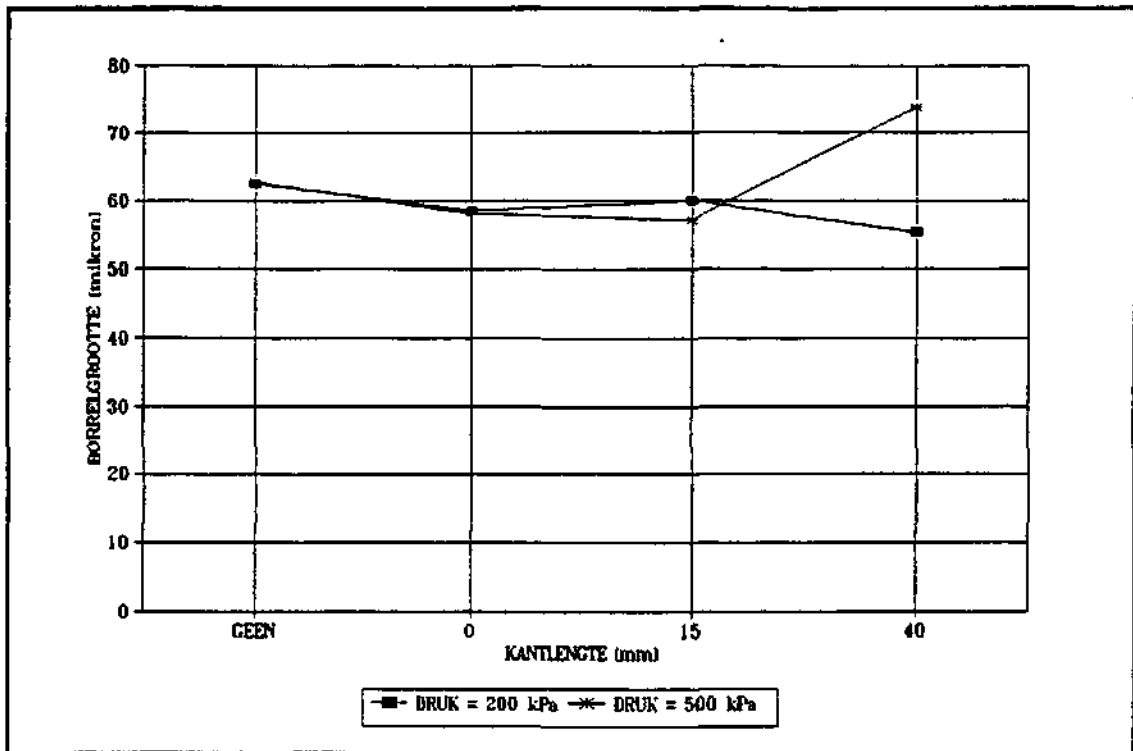
DRUK [kPa]	AFSKERMING	TOPLENGTE [mm]	KANTLENGTE [mm]
200	GEEN	n.v.t	n.v.t
200	JA	84	0
200	JA	84	15
200	JA	84	40
500	GEEN	n.v.t	n.v.t
500	JA	84	0
500	JA	84	15
500	JA	84	40

Tabel 4.9.2 Eksperimentele data van gekombineerde afskermingsdata

DRUK [kPa]	SKERM	KANT [mm]	D_{50} [μ m]	f [%]	U	eff [%]
200	GEEN	GEEN	62,4	0,93	1,05	78,0
200	JA	0	58,5	0,00	1,07	100,0
200	JA	15	60,0	0,47	0,86	90,5
200	JA	40	55,4	0,47	1,05	95,0
500	GEEN	GEEN	62,7	8,85	0,96	13,2
500	JA	0	58,1	4,35	1,08	14,9
500	JA	15	57,2	0,00	1,08	100,0
500	JA	40	73,9	1,35	0,92	91,8

Gekombineerde eksperiment 2 & 3 - mediaan

Die borrelgrootte bly byna konstant vir beide die hoë en die lae druk, maar sodra die kantlengte meer as 15 mm lank is neem die borrelgrootte by 'n hoë druk drasties toe.



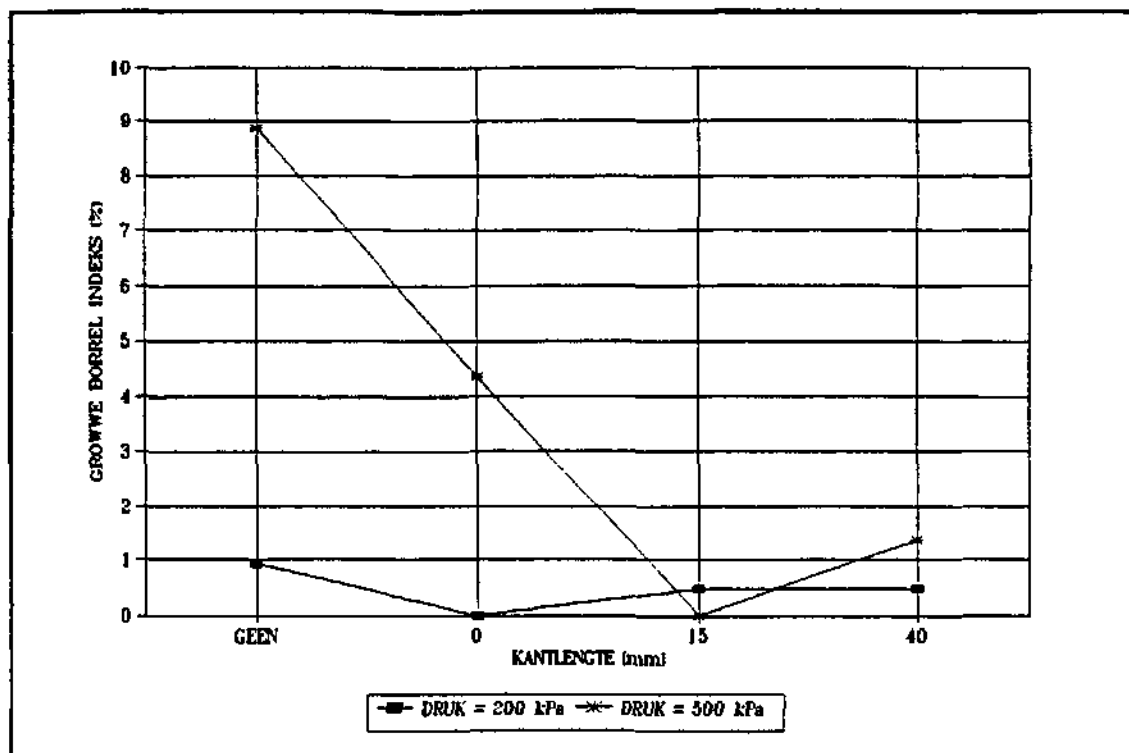
Grafiek 4.9.1(a) Grafiese voorstelling van die gekombineerde afskermingsdata m.b.t. die mediaan

Gekombineerde eksperiment 2 & 3 - growwe borrel indeks

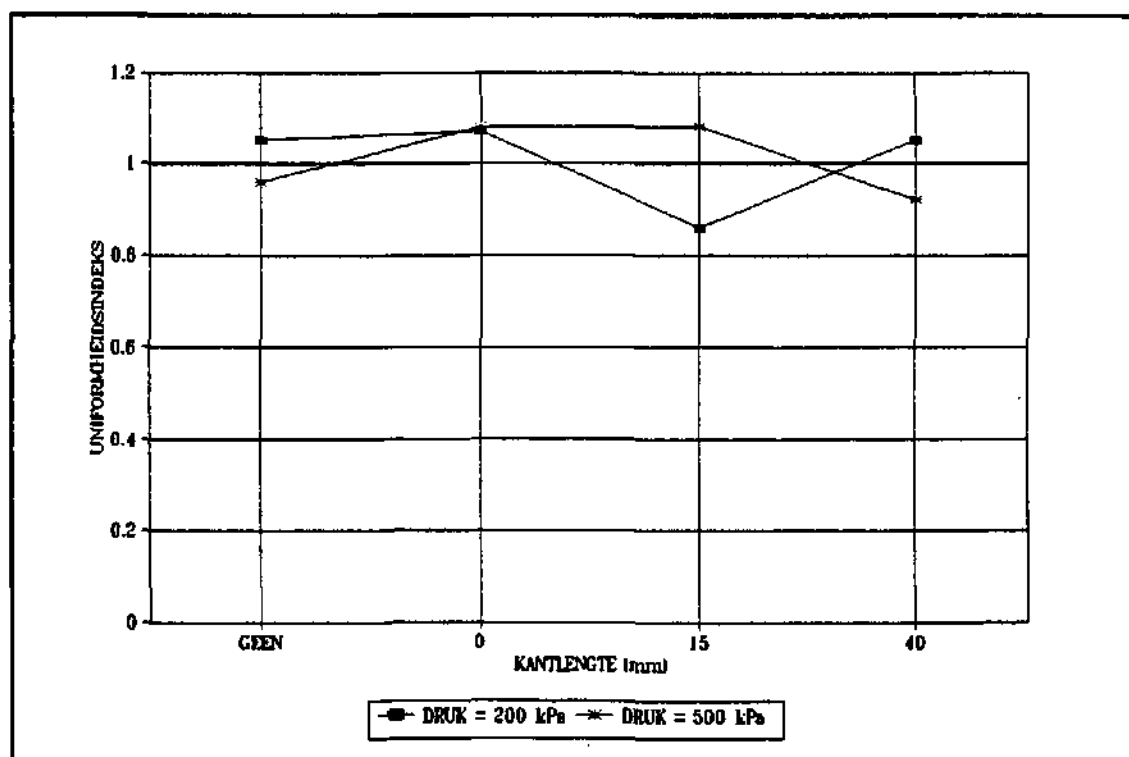
Die aantal growwe borrels is baie meer by 500 kPa en word al hoe meer hoe kleiner die kantlengte word. Vir die lae druk bly die persentasie growwe borrels so te sê konstant ongeag hoe lank die kantlengte is.

Gekombineerde eksperiment 2 & 3 - uniformheidsindeks

Die uniformheidsindeks bly konstant vir beide die hoë en die lae druk oor die hele spektrum van afskermingsafstande.



Grafiek 4.9.1(b) Grafiese voorstelling van die gekombineerde afskermingsdata m.b.t. die growwe borrel indeks



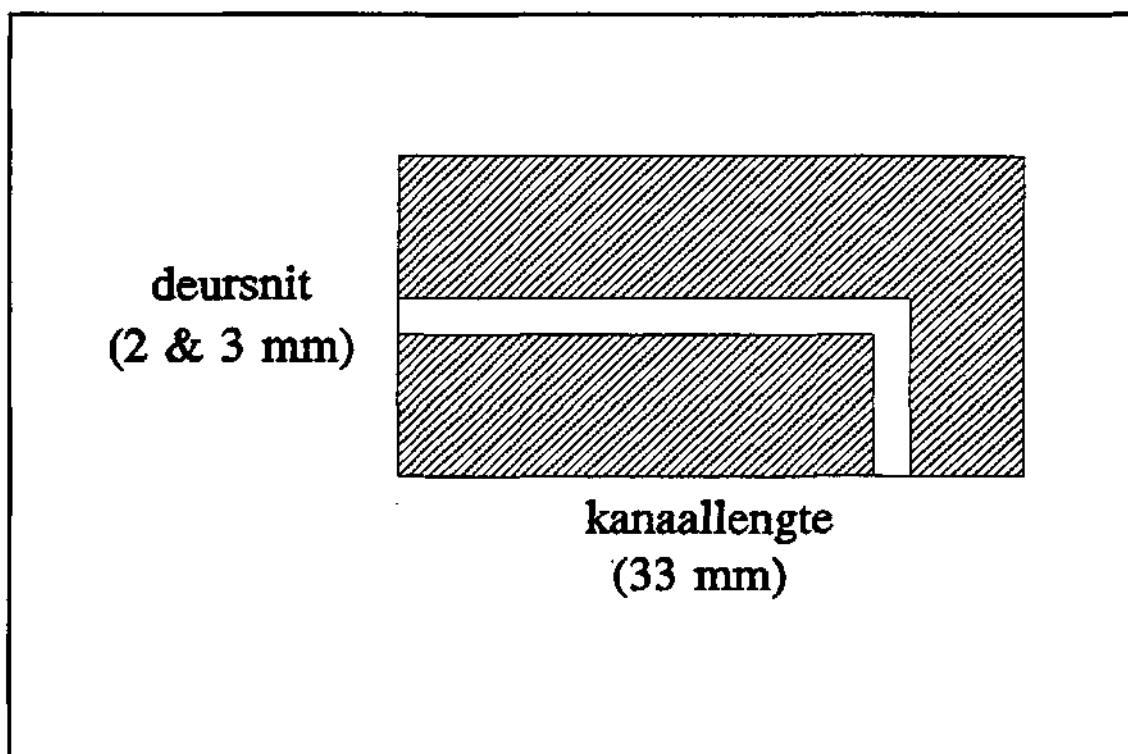
Grafiek 4.9.1(c) Grafiese voorstelling van die gekombineerde afskermingsdata m.b.t. die uniformiteitsindeks

Gekombineerde eksperiment 2 & 3 - opsomming

Uit die resultate van die gekombineerde data van Eksperimente 2 & 3 wil dit voorkom asof daar bitter min verskille uitgewys kan word.

4.10 EKSPERIMENT 4 - DIE ROL VAN RIGTINGVERANDERINGS IN DIE NOSSEL

Na aanleiding van die eksperimente wat gedoen is oor die effek van afskerming het die vraag ontstaan of daar enige verband is tussen 'n eksterne afskerming en 'n interne draai of buig in 'n nosselkanaal. Om die effek van so 'n interne buig in die nosselkanaal te verkry is weereens van 'n 2^3 -faktoriaalontwerp gebruik gemaak. 'n Skets van die nossel verskyn in figuur 4.10.1. Die parameters wat verander is gedurende hierdie eksperiment tesame met hulle onderskeie minimum en maksimum waardes is gelys in tabel 4.10.1. Die nossel wat gebruik is het deurgaans 'n totale lengte van 33 mm, dit is die som van die kanaallengte voor en na die knak.



Figuur 4.10.1 Skematiese voorstelling van buig nossel

Tabel 4.10.1 Minimum en maksimum waardes van die beheerparameters

PARAMETER	MINIMUM	MAKSIMUM
VERSADIGERDRUK [kPa]	200	500
NOSSEL DIAMETER [mm]	2	4
BUIG TEENWOORDIGHEID	GEEN	90°

Die betekenisvolle effekte is bereken met die YATES-algoritme (Statistics for Experimenters, 1978). Tabel 4.10.2 toon die verwerkte data in die vorm soos nodig vir die YATES-algoritme. Die (+) beteken die maksimum waarde en die (-) beteken die minimum waarde soos in tabel 4.10.1 aangedui. Die YATES-algoritme is toegepas op die mediaan (D_{50}), growwe borrel indeks (f) en uniformheidsindeks (U) afsonderlik.

Tabel 4.10.2 Finale resultate van interne buig faktoriaalontwerp eksperiment in die vorm geskik vir die YATES-algoritme

DRUK [kPa]	NOSSEL DIAM [mm]	BUIG	D_{50} [μ m]	f [%]	U	eff [%]
-	-	-	74,2	1,86	0,67	67,9
+	-	-	61,6	5,53	1,06	21,9
-	+	-	68,7	3,56	0,81	57,6
+	+	-	57,9	6,82	0,80	20,0
-	-	+	74,1	1,27	0,94	91,6
+	-	+	55,9	2,28	1,06	40,7
-	+	+	76,8	0,91	0,83	92,6
+	+	+	49,4	1,42	1,10	27,4

Eksperiment 4 - mediaan

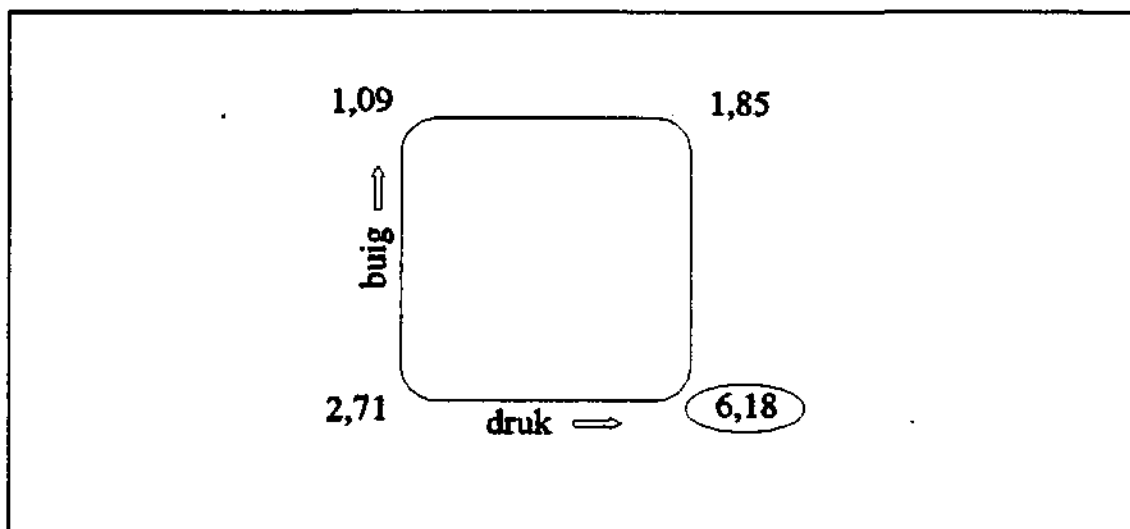
Uit die toepassing van die YATES-algoritme op D_{50} (op die 95 % betroubaarheidsvlak) is die enigste statisties betekenisvolle effek die versadigerdruk:

- Soos die versadigerdruk van 200 kPa tot 500 kPa toeneem, neem die borrelgrootte af.

Eksperiment 4 - growwe borrel indeks

Die statisties betekenisvolle effekte van f (op die 95 % betroubaarheidsvlak) is (a) die versadigerdruk, (b) die teenwoordigheid van 'n buig en (c) die interaksie tussen die versadigerdruk en die teenwoordigheid van die buig: (Figuur 4.10.2 toon die twee rigting tabel wat die interaksie verduidelik.)

- 'n Verhoging in druk gaan gepaard met 'n verhoging in die aantal growwe borrels. Indien daar egter nie 'n buig is nie is die aantal growwe borrels baie meer. Selfs by 'n lae druk het die toevoeging van 'n buig 'n afname in die growwe borrels tot gevolg.



Figuur 4.10.2 Twee rigting tabel van die growwe borrel indeks

Eksperiment 4 - uniformheidsindeks

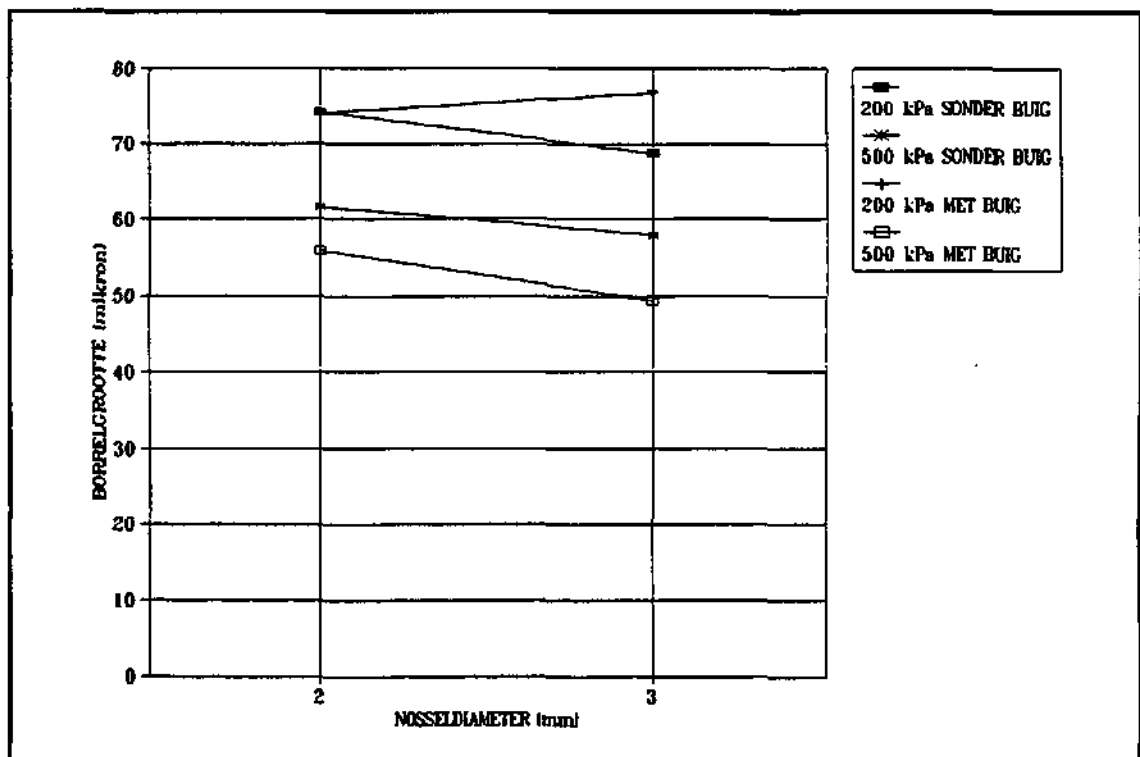
Die statisties betekenisvolle effekte van U (op die 95 % betroubaarheidsinterval) is (a) die versadigerdruk en (b) die teenwoordigheid van 'n buig:

- Indien die versadigerdruk van 200 tot 500 kPa toeneem word die borrelverspreiding groter. As daar 'n buig in die nossel teenwoordig is word die borrelverspreiding ook groter.

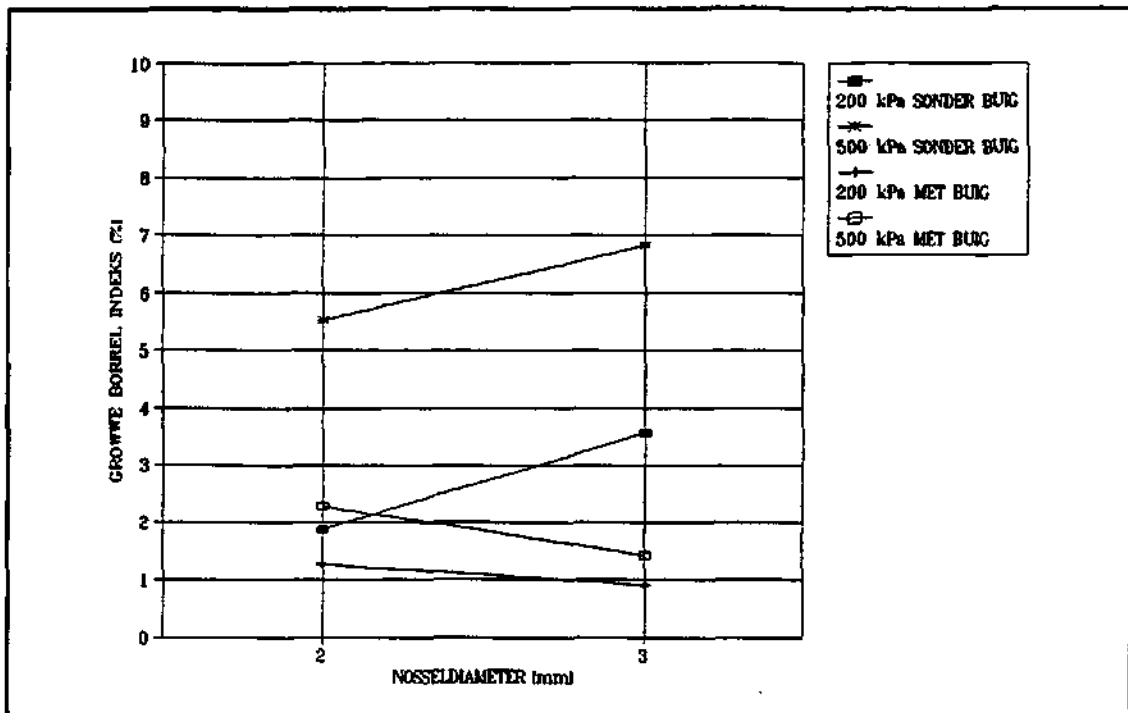
Eksperiment 4 - opsomming

Grafieke 4.10.1 (a), (b) en (c) toon die eksperimentele data verbande. Grafiek (a) toon aan dat die borrelgrootte aansienlik kleiner word sodra die druk toeneem van 200 na 500 kPa en ook as die nosseldiameter toeneem van 2 na 3 mm. By die druk van 200 kPa het die toevoeging van die buig egter geen verdere borrelverkleining tot gevolg nie maar by 500 kPa wel.

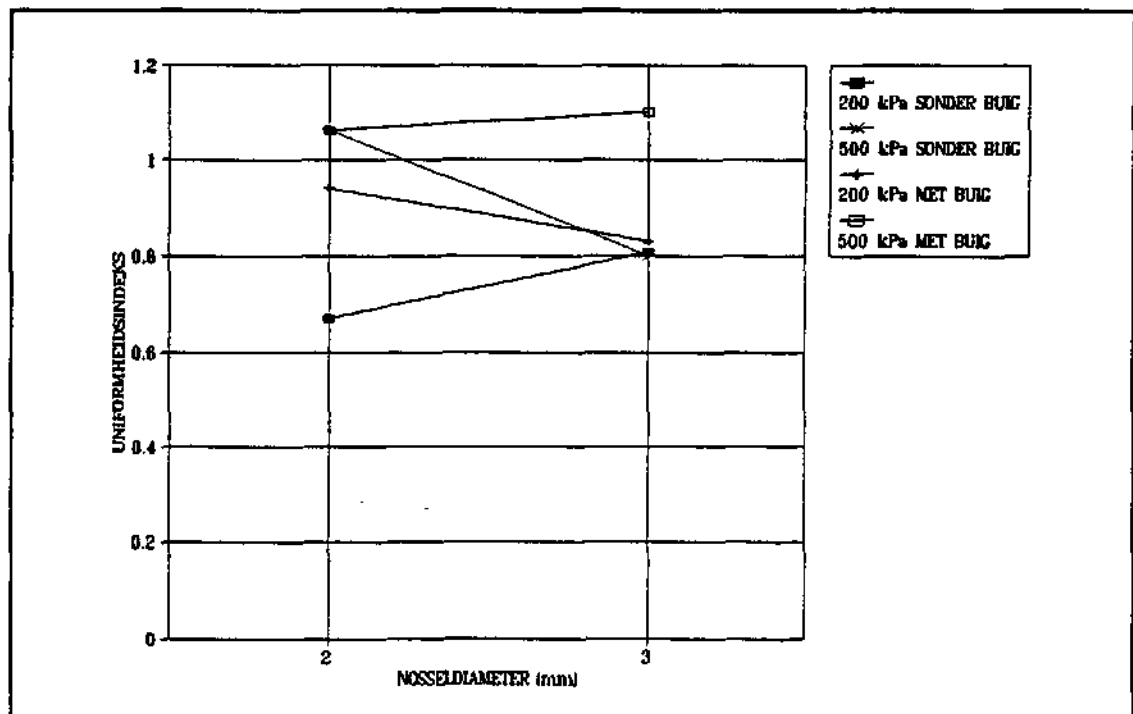
Die grafiek van f, grafiek (b), toon aan dat alhoewel hoër drukke en groter nosseldiameters baie groter borrels tot gevolg het sal die toevoeging van 'n knak in die nosselkanaal 'n aansienlike vermindering in f tot gevolg hê.



Grafiek 4.10.1(a) Grafiese voorstelling van die buig resultate m.b.t. die mediaan



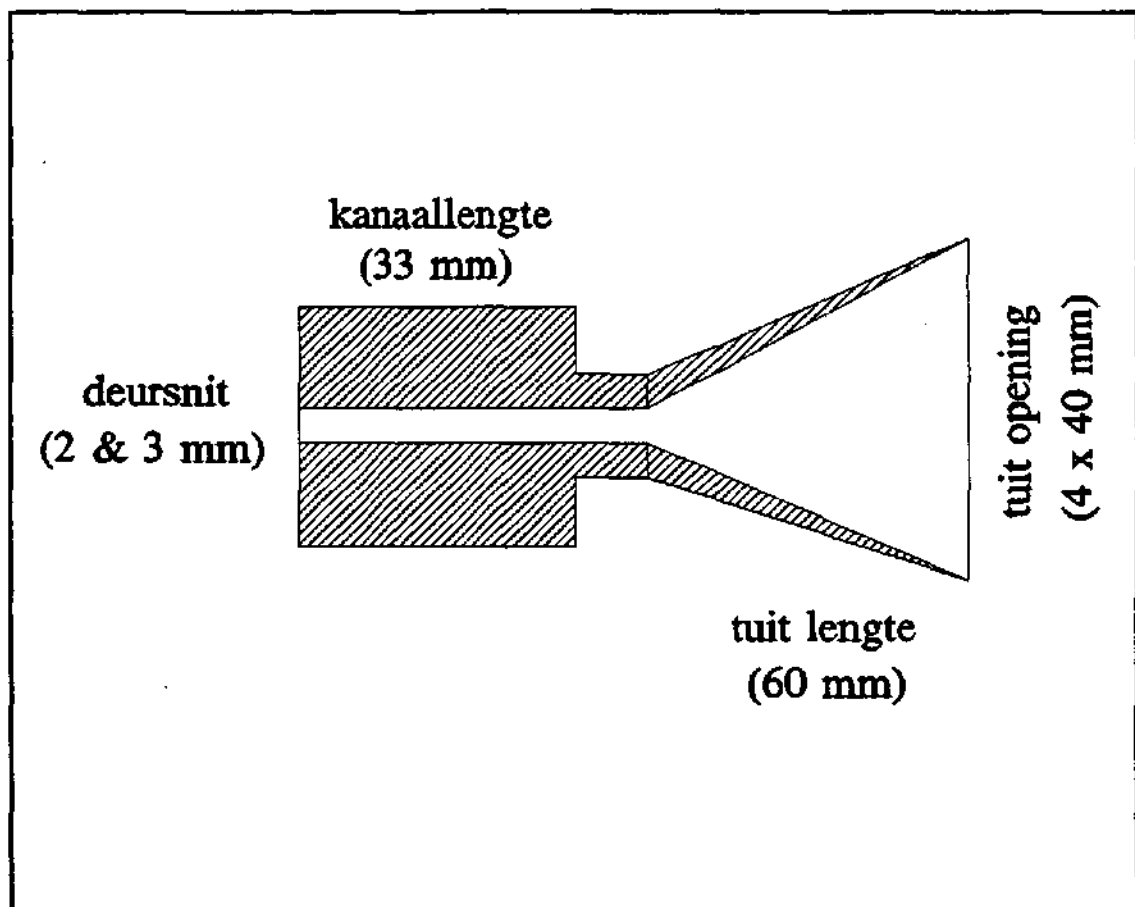
Grafiek 4.10.1(b) Grafiese voorstelling van die buig resultate m.b.t die growwe borrel indeks



Grafiek 4.10.1(c) Grafiese voorstelling van die buig resultate m.b.t die uniformheidsindeks

4.11 EKSPERIMENT 5 - DIE ROL VAN DIE UITSTROOMTUIT

'n Aspek wat verder voortbou op die afskermingsdata is die kwessie van 'n uitstroomtuit voor die nosselkanaal. Die literatuur verwys na sulke uitstroomtuite en dit word beweer dat sulke tuite die borrelgrootte drasties laat afneem. Om die effek van so 'n uitstroomtuit voor die nosselkanaal te verkry is weereens van 'n 2³-faktoriaalontwerp gebruik gemaak. Die parameters wat verander is gedurende hierdie eksperiment tesame met hulle onderskeie minimum en maksimum waardes is gelys in tabel 4.11.1. Die nossel wat gebruik is is deurgaans 33 mm lank. Die uitstroomtuit se afmetings kan verkry word uit die deursnitskets van figuur 4.11.1.



Figuur 4.11.1

Skematiese voorstelling van nossel met uitstroomtuit

Tabel 4.11.1 Minimum en maksimum waardes van die beheerparameters

PARAMETER	MINIMUM	MAKSIMUM
VERSADIGERDRUK [kPa]	200	500
NOSSEL DIAMETER [mm]	2	3
TUIT TEENWOORDIGHEID	GEEN	JA

Die betekenisvolle effekte is bereken met die YATES-algoritme (Statistics for Experimenters, 1978). Tabel 4.11.2 toon die verwerkte data in die vorm soos nodig vir die YATES-algoritme. Die (+) beteken die maksimum waarde en die (-) beteken die minimum waarde soos in tabel 4.11.1 aangedui. Die YATES-algoritme is toegepas op die mediaan (D_{50}), growwe borrel indeks (f) en uniformheidsindeks (U) afsonderlik.

Tabel 4.11.2 Finale resultate van eksterne tuit faktoriaalontwerp eksperiment in die vorm geskik vir die YATES-algoritme

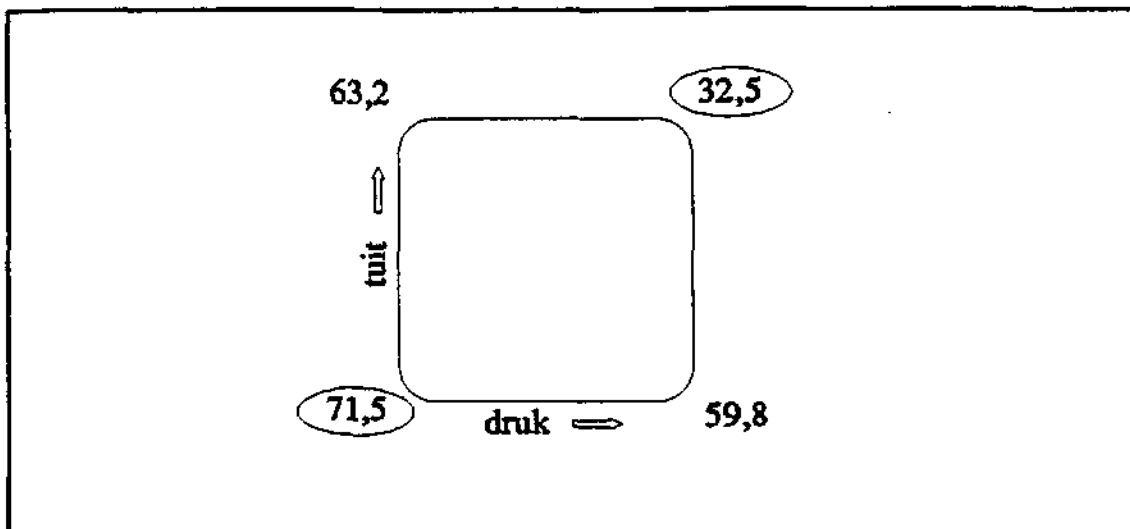
DRUK [kPa]	NOSSEL DIAM [mm]	TUIT	D_{50} [μ m]	f [%]	U	eff [%]
-	-	-	74,2	1,86	0,67	67,9
+	-	-	61,6	5,53	1,06	21,9
-	+	-	68,7	3,56	0,81	57,6
+	+	-	57,9	6,82	0,80	20,0
-	-	+	65,0	2,16	0,89	75,2
+	-	+	35,4	0,91	1,23	50,1
-	+	+	61,4	0,91	1,09	90,5
+	+	+	29,5	0,92	1,24	18,9

Eksperiment 5 - mediaan

Uit die toepassing van die YATES-algoritme op D_{50} (op die 95 % betroubaarheidsvlak) is die statisties betekenisvolle effekte (a) die versadigerdruk,

(b) die teenwoordigheid van 'n uitstroomtuit en (c) die interaksie tussen die versadigerdruk en die teenwoordigheid van die uitstroomtuit:

- Die interaksie kan aan die hand van die twee rigting diagram van figuur 4.11.2 verduidelik word. Die verhoging van die versadigerdruk het 'n afname in die borrelgrootte tot gevolg terwyl die toevoeging van 'n uitstroomtuit nog 'n verdere verlaging in die borrelgrootte tot gevolg het.

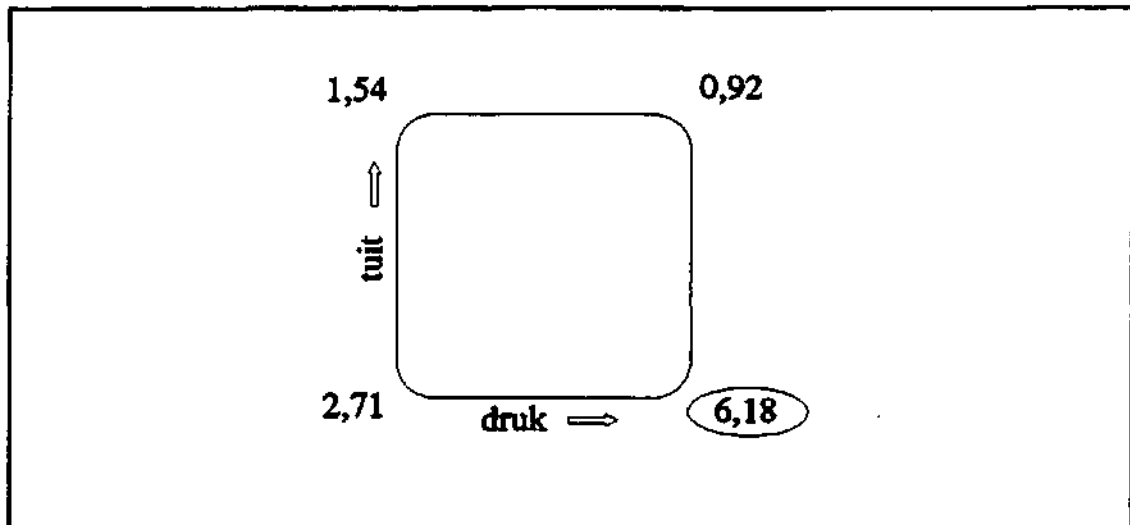


Figuur 4.11.2 Twee rigting tabel vir mediaan borrelgrootte

Eksperiment 5 - growwe borrel indeks

Die statisties betekenisvolle effekte van f (op die 95 % betroubaarheidsvlak) is (a) die versadigerdruk, (b) die teenwoordigheid van 'n uitstroomtuit en (c) die interaksie tussen die versadigerdruk en die teenwoordigheid van 'n uitstroomtuit:

- Figuur 4.11.3 toon die twee rigting tabel wat die interaksie verduidelik. Die toevoeging van 'n uitsroomtuit het 'n vermindering in die aantal growwe borrels tot gevolg, veral by 'n hoë druk.



Figuur 4.11.3 Twee rigting tabel van die growwe borrel indeks

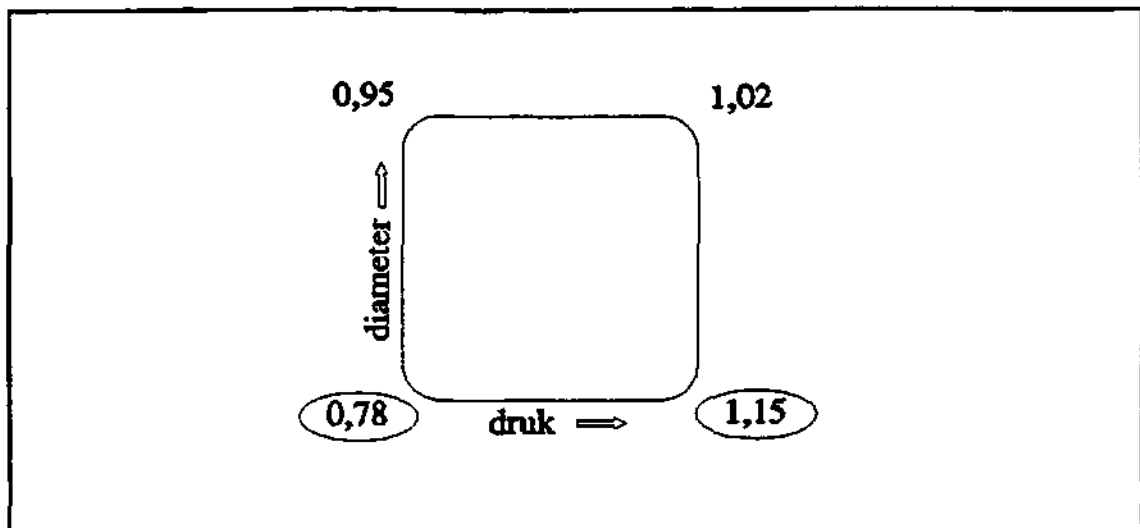
Eksperiment 5 - uniformheidsindeks

Die statisties betekenisvolle effekte van U (op die 95 % betroubaarheidsvlak) is (a) die versadigerdruk, (b) die teenwoordigheid van 'n uitstroomtuit en (c) die interaksie tussen die versadigerdruk en die nosseldiameter:

- Met die toevoeging van 'n uitstroomtuit voor die nosselkanaal word die borrelverspreiding groter met ongeveer 0,28. Figuur 4.11.4 toon die twee rigting tabel wat die interaksie verduidelik. Die verhoging van die druk het 'n verbreding van die borrelverspreiding tot gevolg. By 'n lae druk het die vergroting van die nosseldiameter 'n verbreding van die borrelverspreiding tot gevolg terwyl by 'n hoë druk gebeur die omgekeerde.

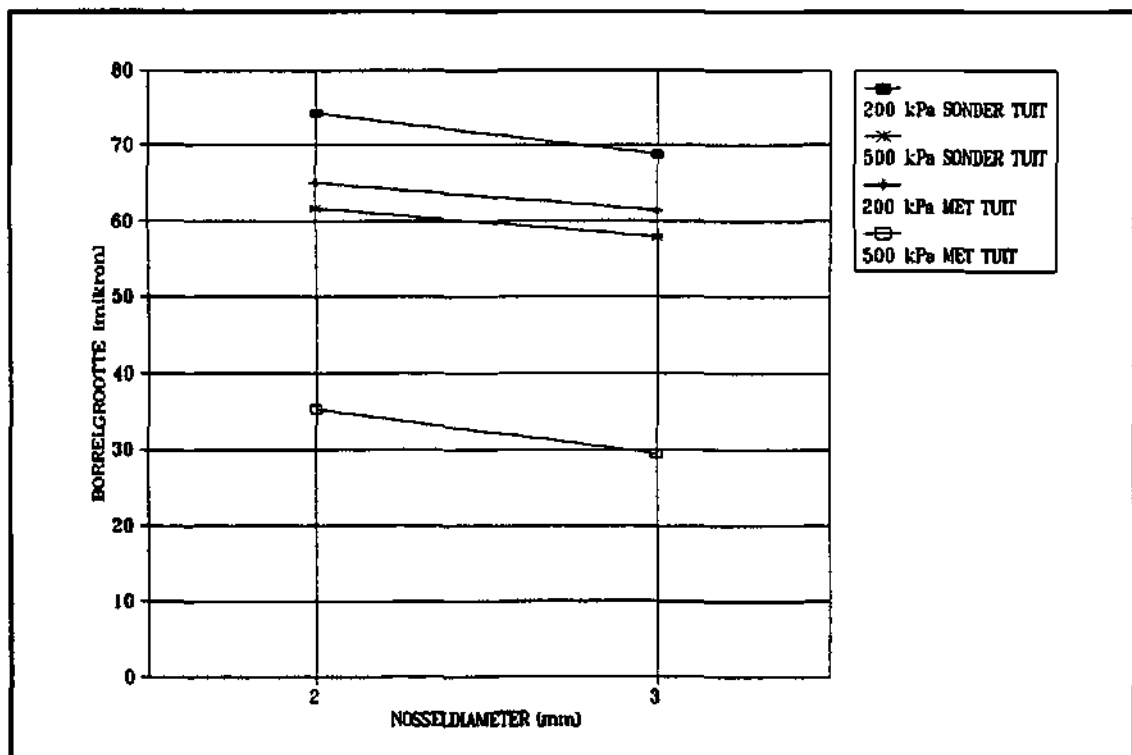
Eksperiment 5 - opsomming

Grafieke 4.11.1 (a), (b) en (c) toon verder die eksperimentele verbande. Grafiek (a) toon presies die interaksie tussen die versadigerdruk en die toevoeging van 'n uitstroomtuit aan met betrekking tot die mediaan borrelgrootte. Dit kan duidelik gesien word dat die toevoeging van 'n uitstroomtuit met 'n gepaardgaande verhoging in die versadigerdruk 'n drastiese afname in borrelgrootte tot gevolg het.

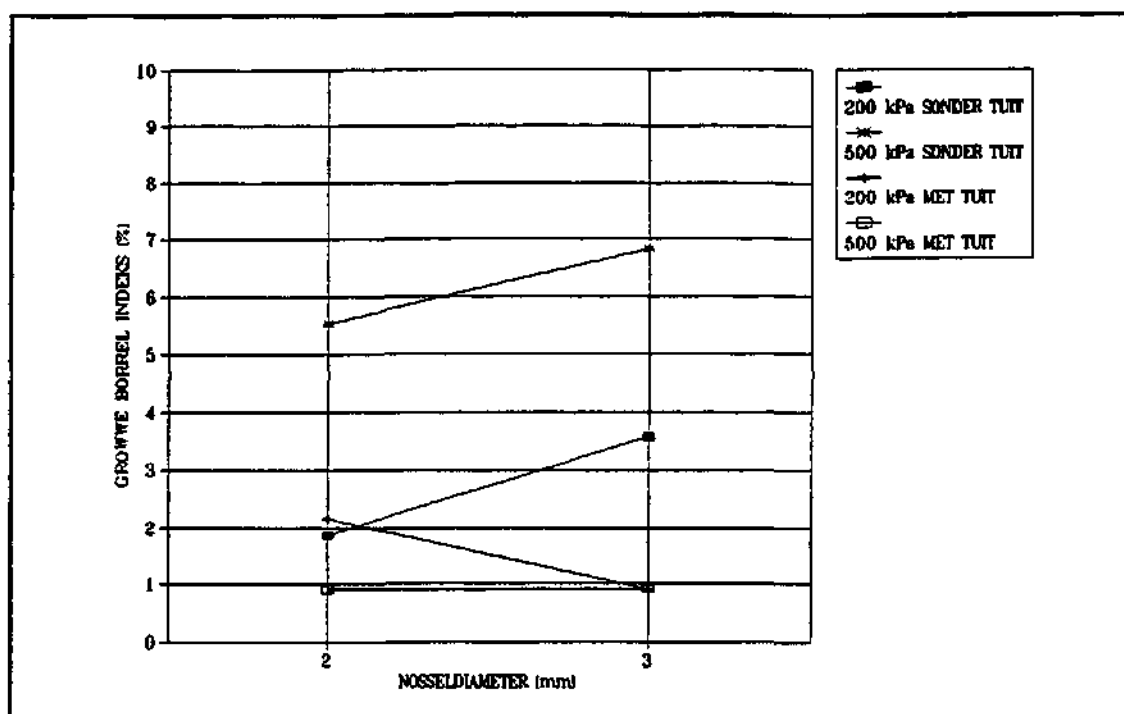


Figuur 4.11.4 Twee rigting tabel van die uniformheidsindeks

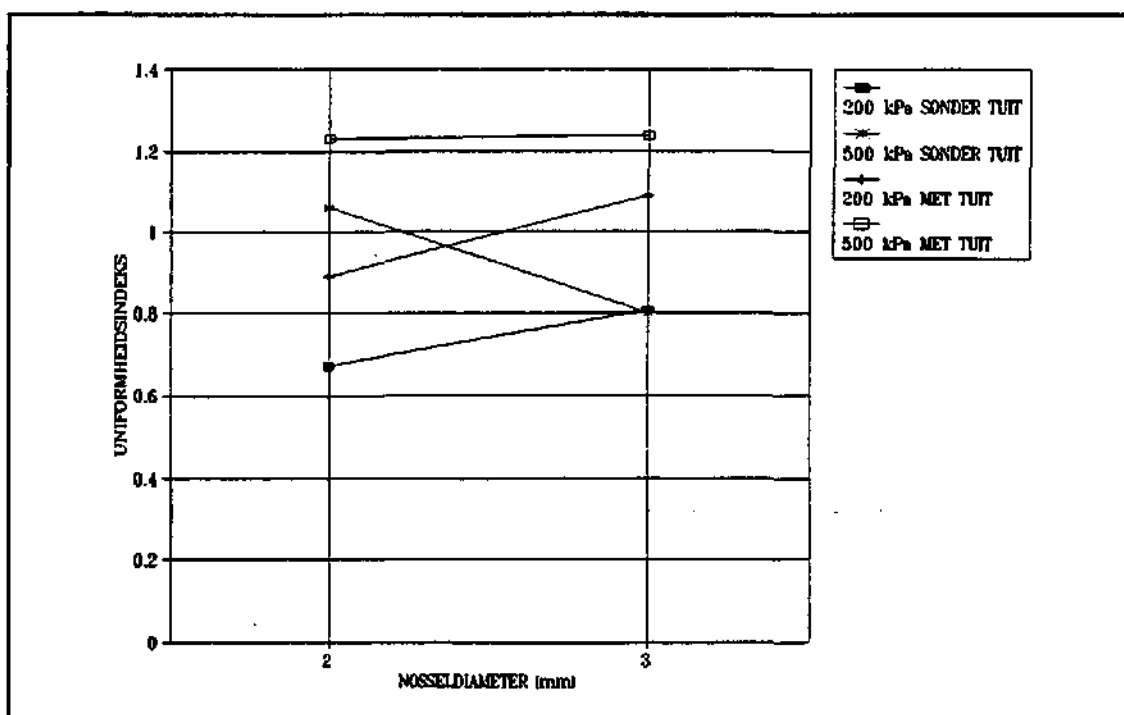
Die toevoeging van die uitstroomtuit tot die nossel bring die persentasie growwe borrels drasties af, soos gesien kan word in grafiek (b). Soos met die toevoeging van die buig is die invloed van die uitstroomtuit met betrekking tot die uniformheidsindeks nie noemenswaardig nie.



Grafiek 4.11.1(a) Grafiese voorstelling van die tuit resultate m.b.t die mediaan



Grafiek 4.11.1(b) Grafiese voorstelling van die tuit resultate m.b.t. die growwe borrel indeks



Grafiek 4.11.1(c) Grafiese voorstelling van die tuit resultate m.b.t. die uniformheidsindeks

4.12 EKSPERIMENT 9 - DIE EFFEK VAN BORRELSAMEVOEGING OP DIE BORRELS

Die laaste eksperiment wat gedoen is, is die effek wat die styging van borrels het op hulle grootte. Die eksperiment is gedoen deur die data te neem van die GFJ nossel eksperiment as die eerste punt en dan die flottasiekolom met 1,0 m te lig sodat fotos op 'n hoogte van 1,0 m hoër geneem kan word. Die eksperiment is weereens vir twee drukke herhaal. Die eksperiment het die vorm aangeneem van 'n 2^2 -faktoriaalontwerp (Statistics for Experimenters, 1978). Die minimum en die maksimum waardes wat gebruik is vir die veranderlike parameters word gegee in tabel 4.12.1.

Tabel 4.12.1 Minimum en maksimum waardes van die beheerparameters

PARAMETER	MINIMUM	MAKSIMUM
VERSADIGERDRUK [kPa]	200	500
HOOGTE VAN KOLOM	LAAG	HOOG

Die betekenisvolle effekte is bereken met die YATES-algoritme (Statistics for Experimenters, 1978). Tabel 4.12.2 toon die verwerkte data in die vorm soos nodig vir die YATES-algoritme. Die (+) beteken die maksimum waarde en die (-) beteken die minimum waarde soos in tabel 4.12.1 aangedui. Die YATES-algoritme is toegepas op die mediaan (D_{50}), growwe borrel indeks (f) en uniformheidsindeks (U) afsonderlik.

Tabel 4.12.2 Finale resultate van borrelsamevoeging faktoriaalontwerp eksperiment in die vorm geskik vir die YATES-algoritme

NOMMER	DRUK [kPa]	HOOGTE	D_{50} [μm]	f [%]	U	eff [%]
GFJ 0101	-	-	45,3	0,89	1,23	30,4
GFJ 0102	+	-	32,4	0,00	1,07	100,0
GFJ 0103	-	+	49,3	0,46	1,08	64,0
GFJ 0104	+	+	44,6	0,00	0,97	100,0

Eksperiment 9 - mediaan

Uit die toepassing van die YATES-algoritme op D_{50} (op die 95 % betroubaarheidsvlak) is die enigste statisties betekenisvolle effek die versadigerdruk:

- Indien die druk toeneem van 200 tot 500 kPa dan neem die borrelgrootte af met $8,8 \mu\text{m}$.

Eksperiment 9 - growwe borrel indeks

Vir f is daar geen statisties betekenisvolle effekte te bespeur nie (op die 95 % betroubaarheidsinterval)

Eksperiment 9 - uniformheidsindeks

By U is daar twee statisties betekenisvolle effekte te bespeur. Beide die versadigerdruk en die hoogte wat die borrels getoets is het tot gevolg dat die borrelverspreiding kleiner word.

4.13 OPSOMMING VAN DIE TYE BETROKKE BY DIE VERSKILLENDE EKSPERIMENTE

Die volgende tabelle is opsommings van al die eksperimente wat gedoen is en die tye wat die waterstraal in die nossels was. Die tyd t_{in} is die tyd wat die waterstraal in die nossel self was, of in die geval van die buignossel, die tyd totdat die knak getref word. Die tyd t_{uit} is die tyd vandat die nossel verlaat word, totdat 'n obstruksie getref word. In die geval van die knak nossel, is dit die tyd nadat die obstruksie getref is. Alle tye word gegee in millisekondes.

4.13.1 Eksperiment 1

DRUK [kPa]	SNELHEID [m/s]	t_{in} [ms]	t_{uit} [ms]
200	29,2	0,10	-
200	33,9	1,03	-
200	16,5	0,18	-
200	16,5	2,13	-
500	24,7	0,12	-
500	24,7	1,42	-
500	24,3	0,12	-
500	24,3	1,44	-
200	30,4	0,10	0,53
200	28,2	1,24	0,53
200	16,4	0,18	0,91
200	16,4	2,14	0,91
500	27,1	0,11	0,55
500	27,1	1,29	0,55
500	24,9	0,12	0,60
500	24,9	1,41	0,60

4.13.2 Eksperiment 2

DRUK [kPa]	SNELHEID [m/s]	t_{in} [ms]	t_{uit} [ms]
200	15,4	2,02	-
200	14,7	2,12	0,34
200	15,0	2,07	0,67
200	15,5	2,00	0,97
200	15,2	2,03	1,32
500	23,7	1,31	-
500	21,7	1,43	0,23
500	23,8	1,30	0,42
500	23,6	1,32	0,64
500	23,8	1,30	0,84

4.13.3 Eksperiment 3

DRUK [kPa]	SNELHEID [m/s]	t_{in} [ms]	t_{uit} [ms]
200	15,7	1,97	0,64
500	22,2	1,39	0,45
200	14,6	2,12	0,68
500	22,1	1,40	0,45
200	15,7	1,97	0,64
500	21,7	1,43	0,46
200	15,1	2,06	0,66
500	20,2	1,53	0,50

4.13.4 Eksperiment 4

DRUK [kPa]	SNELHEID [m/s]	t_{in} [ms]	t_{uit} [ms]
200	14,0	2,37	-
500	20,7	1,59	-
200	14,6	2,26	-
500	22,0	1,50	-
200	9,8	2,04	1,22
500	15,2	1,32	0,79
200	10,6	1,88	1,13
500	15,6	1,28	0,77

4.13.5 Eksperiment 5

DRUK [kPa]	SNELHEID [m/s]	t_{in} [ms]	t_{uit} [ms]
200	14,2	2,33	215,78
500	21,0	1,57	145,72
200	15,3	2,16	88,82
500	21,5	1,54	63,21

HOOFSTUK 5

BESPREKING VAN RESULTATE

5.1 VOORGESTELDE BORREL GROEI MODEL

Die eksperimentele resultate sal in hierdie hoofstuk bespreek word in terme van 'n borrelgroeimodel wat voorgestel word. Hierdie model word skematies voorgestel in figuur 5.1.1.1, en kan soos volg verduidelik word.

5.1.1 Verskillende stappe van die model

Stap (1): presipitasie van lug

Op hierdie stadium gebeur daar nie werklik enigiets nie, behalwe dat daar kerne gevind word wat kan gebruik word as nukleasiepunte vir potensiële borrels. Op tydstip t_0 sal daar dus kerne teenwoordig wees, maar geen presipitasie van lug sal plaasvind nie. Die enigste faktor wat van belang is, is die aantal van hierdie kerne wat teenwoordig is. Die getal sal bepaal hoeveel borreltjies later gevorm sal word.

Op tydstip t_{50} , halfpad deur die proses van borrelgroeï, sal die borreltjies 50% presipitasie ondervind, en groei teen 'n tempo wat bepaal word deur die aantal lug beskikbaar. Die oorspronklike aantal borrels soos op tyd t_0 , sal egter nog bestaan. Hierdie proses geld vir enige tyd $t_0 < t_x < t_{100}$.

Die borrels sal 100% presipitasie ondervind op die tydstip t_{100} , waarna die borrels hulle maksimum grootte sal bereik vir die hoeveelheid beskikbare lug. Die aantal borrels wat beskikbaar is, is nog steeds beperk tot die aanvanklike aantal kerne op tyd t_0 .

Stap (2): samevoeging van borrels

Op enige tydstip groter as t_{100} , sal daar nie meer presipitasie as 100% wees nie, en sal die borrels dus nie meer kan groei as gevolg van die eienskap nie. Die borrels sal egter wel nog groei, maar dit sal wees as gevolg van borrelsamevoeging. Die borrels sal groter wees as op tydstip t_{100} , maar daar sal minder borrels wees as wat daar op tydstip t_{100} was.

Die borrelsamevoeging vind plaas weens die botsings tussen borrels, as gevolg van onderlinge kontak. As die ruimte beperk word weens 'n afskerming, sal die waarskynlikheid dat borrels saamvoeg aansienlik groter wees, omdat die vry ruimte tussen borrels aansienlik kleiner sal word.

Stap (3): opbreek van borrels

Indien daar enige obstruksie is in die pad van die borrels, beide gedurende die proses van presipitasie (Stap 1) en nadat presipitasie nie meer plaasvind nie (Stap 2), sal die borrels opbreek, en dus sal die oorspronklike aantal borrels vermeerder. Dit is nie noodwendig nodig dat daar nuwe kerne moet wees vir meer borrels om te vorm op hierdie tydstip nie.

	$t = t_0$; 0% presipitasie
	$t = t_{50}$; 50% presipitasie
	$t = t_{100}$; 100% presipitasie
	$t > t_{100}$; 100 % presipitasie

Figuur 5.1.1.1 Die voorgestelde borrelgroei model

5.1.2 Aannames rakende die voorgestelde model

- Die kerne wat bestaan in stap 1, kan enige mikroskopiese partikel wees. Dit is selfs moontlik dat turbulensie in die water hierdie getal kerne verder kan vergroot. Moontlike kerne kan ook ruhede op die wand van die nosselkanaal wees.
- Stap 2 kan eers gebeur nadat stap 1 afgehandel is. Die borrels sal nie saamvoeg terwyl dit nog besig is om te presipiteer nie.

- Stap 3 kan gedurende stap 1 of 2 plaasvind, dit hang net af hoeveel tyd verloop na die begin van stap 1. As die tyd baie laag is sal die mediaan borrelgrootte geaffekteer word, aangesien die borrels opgebreek sal word voordat hulle ten volle gepresipiteer word.
- As stap 3 plaasvind terwyl stap 2 reeds begin het, word die borrels opgebreek, maar nie tot 'n grootte kleiner as wat aan die einde van stap 1 sou kon bestaan het nie.
- As stap 3 plaasvind terwyl stap 1 aan die gang is, word die groeiende borrels wel opgebreek, en kan baie kleiner borrels gevorm word, as wat by die einde van stap 1 sou gevorm het.

5.1.3 Voorspellings met behulp van die model

Die voorgestelde model wat hierbo beskryf is, kan nou gebruik word om voorspellings te maak omtrent die werkverrigting van die inspuitsnossels. Die voorspellings word ook grafies gegee in figuur 5.1.3.1.

Geen obstruksie in pad van nossel:

Stap 1 kan ten volle plaasvind en daar is ook niks om stap 2 te verhoed nie. Die gevolg hiervan sal 'n groot persentasie van growwe borrels wees. Aangesien daar baie growwe borrels sal vorm vanuit die aanvanklike klein borrels, sal die borreldigtheid ook afneem.

Obstruksie verder as t_{100} :

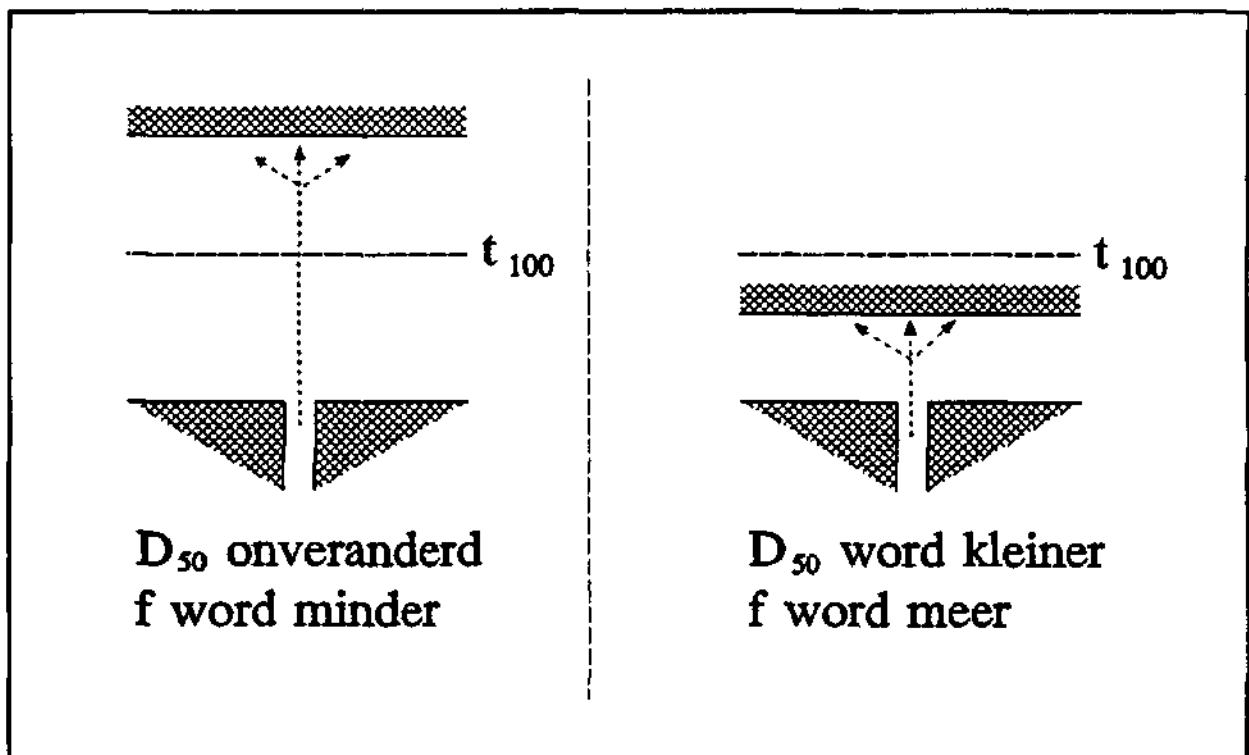
Stap 1 kan ten volle gebeur, en stap 2 word toegelaat om onversteurd te voltooi. Die mediaan borrelgrootte verander dus nie, maar die persentasie growwe borrels wat gevorm is in stap 2 word minder gemaak deurdat die borrels opgebreek word sodra hulle die obstruksie tref. Stap 3 word dus toegelaat om ten volle te ontwikkel.

Obstruksie nader as t_{100} :

Stap 1 kan nie voltooi word nie, en die mediaan borrelgrootte word kleiner aangesien stap 3 intree voordat die borrels ten volle gepresipiteer het. Die persentasie growwe borrels kan groter word, nie as gevolg van die verskynsel in stap 2 nie, maar as gevolg van die intieme kontak tussen die borrels onder die obstruksie.

Hoë druk teen lae druk:

Die hoë druk gaan gepaard met 'n hoër vloeisnelheid deur die nossel. Dit is dus moontlik dat 'n nossel wat by 'n lae druk verder as t_{100} van 'n obstruksie af is, by 'n hoë druk nader as t_{100} kan wees. Aangesien die botsingssnelheid soveel hoër is, sal die opbreekkrag ook soveel meer wees. Die vermoede bestaan dus dat die hoër druk sal veroorsaak dat die borrels kleiner word, maar dat die aantal growwe borrels kan toeneem.



Figuur 5.1.3.1 Die skematiese voorstelling van die voorspellings omtrent die posisie van obstruksies

5.1.4 Meganismes wat borrelvorming beïnvloed

Uit die model, sy aannames en die voorspellings wat tot dusver gemaak is, is dit duidelik dat daar 'n paar elemente in die model is, wat van kardinale belang is by die bepaling van die borrelgrootte en verspreiding. Die hoofelemente van die model kan as volg opgesom word:

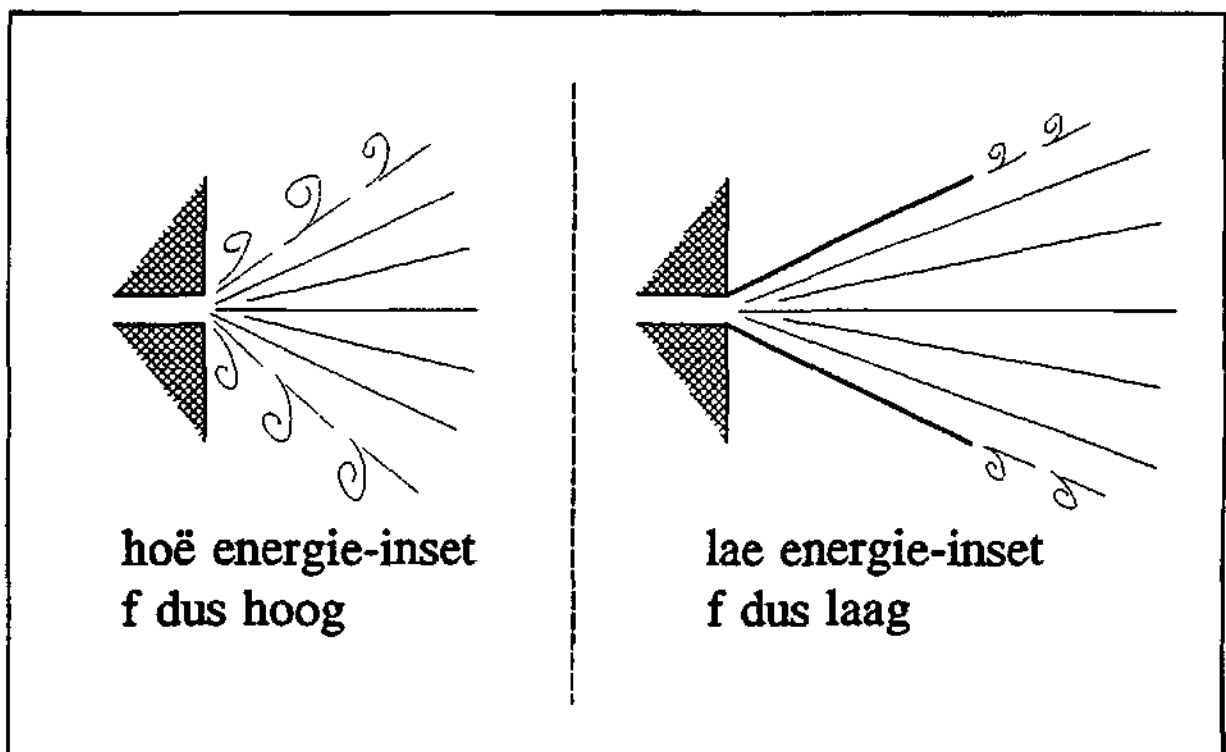
Die aantal presipitasie kerne

- Die presipitasie kerne is nie noodwendig 'n funksie van die nossel self nie, alhoewel dit moontlik is dat 'n ruwe nosselkanaal, holtes kan bevat wat die vloei van water kan belemmer. In die holtes kan dan lugborrels vassit en sodoende dien as kerne vir ander

borreltjies. Dit is nie bekend hoe om die hoeveelheid kerne te manipuleer nie, aangesien dit ook nie bekend is presies waaruit die kerne bestaan nie.

Die bevordering van borrelsamevoeging

- As die water na stap 1, in 'n klein ruimte gekonsentreer word (in 'n koppie wat naby aan die nossel geleë is), sal daar nie genoeg ruimte vir die borrels wees om hulle eie pad te volg nie. Hulle sal dan baie maklik kan saamvoeg omdat hulle onwillekeurig in kontak met mekaar is.
- Op die oorgangsones tussen die stabiele water en die kante van die vinnig bewegende straal, as gevolg van geïnduseerde werwels kan borrels saamvoeg. Sien figuur 5.1.4.1 vir die effek hiervan op nossels wat van 'n uitstroomtuit voorsien is.



Figuur 5.1.4.1 Skematiese voorstelling van die effek van die vertraging van die waterstraal by die teenwoordigheid van 'n uitstroomtuit

- Die uitstroomtuit, voor aan die nossel veroorsaak dat die waterstraal se snelheid meer egalig gebreek word, as dit in die flottasiekolom inspuit. Wanneer die straal oorversadigde water die nossel verlaat teen 'n snelheid van tussen 15 en 25 m.s⁻¹, vloei dit vir alle praktiese oorwegings vas in 'n kolom stilstaande water, aangesien die opvloeispoed van die flottasiekolom slegs 10 m.h⁻¹ is. Die gevolg hiervan is dat die straal water wat dadelik in aanraking kom met die flottasiewater, se snelheid baie

skielik verminder word. As gevolg hiervan is daar 'n hoë energie sone, waar daar werwelstrominge ontstaan, wat tot gevolg het dat daar baie growwe borrels ontwikkel.

- Die lengte en die vorm van die uitstroomtuit moet sodanig ontwerp wees, dat die waterstraal wel gebreek word. Die uitstroomtuit moet dus die vorm aanneem van die koniese verspreiding van die waterstraal.
- Aangesien die muur van stilstaande water dieselfde effek kan hê as 'n afskerming of knak, kan daar van dieselfde standpunt uitgegaan word betreffende die mediaan borrelgrootte. Indien die straal water die stilstaande water tref voor tyd t_{100} sal die mediaan borrelgrootte kleiner word, anders nie, en sal slegs die aantal growwe borels teenwoordig van belang wees.
- As daar 'n uitstroomtuit voor op die nosselopening geplaas word, en die uitstroomtuit se geometrie, die van die verspreidende waterstraal naboots, kan die snelheidsoorgang van die waterstraal so gemanipuleer word dat daar 'n baie lae energie-inset teenwoordig is, en daar sal dan feitlik geen sekondêre borrelvorming plaasvind nie. Slegs baie klein werwelstrominge sal dan vorm en die borrelgrootte sal beperk word tot die grootte wat dit bereik as gevolg van volle of gedeeltelike presipitasie.

Die opbreek van borrels deur obstruksies

- Die effek hiervan is reeds breedvoerig bespreek aan die hand van figuur 5.1.3.1. Wat wel van belang is, is die feit dat 'n knak of buig in die nosselkanaal dieselfde effek het op die borrelvorming, as 'n soliede obstruksie na die nosselopening.
- Die tydstip waarop die waterstraal die knak tref sal bepaal of die mediaan borrelgrootte sal verlaag, of nie. Die feit dat die waterstraal beperk is terwyl dit in die nosselkanaal beweeg, het tot gevolg dat daar nie verdere growwe borrels vorm as gevolg van werwelstrome by die oorgangsones nie. Die gevolg hiervan is dat die eindresultaat van 'n nossel met 'n knak, behoort beter resultate te lewer as 'n nossel met dieselfde konfigurasie, maar met 'n soliede obstruksie na die nosselopening.

5.2 VERKLARING VAN RESULTATE IN TERME VAN DIE VOORGESTELDE MODEL

In hierdie afdeling sal gepoog word om al die eksperimentele resultate te verduidelik aan die hand van die voorgestelde model. Die bespreking sal net hanteer word in terme van die mediaan borrelgrootte (D_{50}) en die growwe borrel indeks (f). Die voorgestelde model maak

nie voorsiening vir modelering van die uniformheidsindeks (U), of die effektiewe luggebruik (eff) nie.

5.2.1 Versadigerdruk

Vir al die eksperimente wat gedoen is, is die eksperiment herhaal vir twee verskillende versadigerdrukke van 200 en 500 kPa. In die praktyk word algemeen aanvaar dat 200 kPa die onderste grens is waarby opgelostelugflottasie suksesvol kan werk, en 500 kPa is gewoonlik die hoogste druk waarteen gewerk word.

In eksperiment 1 het die verhoging van die versadigerdruk tot gevolg gehad dat die mediaan afneem met $9,79 \mu\text{m}$. Dit was die algemene tendens, ongeag of die afskerming voor die nossel geplaas is of nie.

In eksperiment 2 was daar geen betekenisvolle effek van die druk alleen se uitwerking nie. Dit wil egter voorkom asof daar 'n afname in die mediaan is sodra die afskerming op 'n afstand van nader as 10 mm van die nossel geplaas word. Dit gebeur egter net teen 'n druk van 500 kPa. By 200 kPa is daar geen verskil in die borrelgrootte te bespeur nie. Volgens die model beteken dit dus dat sodra die druk laag is, tref die waterstraal die obstruksie eers na t_{100} (tyd tot teen obstruksie is 0,65 millisekondes), en by die hoë druk, voor t_{100} (tyd tot teen die obstruksie is 0,42 millisekondes). Tyd t_{100} lê dus iewers tussen die twee tye. Verder word gevind dat f aansienlik minder word by 'n druk van 200 kPa. Die verskil in druk het nie 'n noemenswaardige uitwerking op U nie.

Eksperiment 3 toon weereens dat die mediaan afneem soos die druk verhoog word.

Die kombinerings van eksperiment 2 & 3 se data lewer 'n kontrasterende resultaat wat afwyk van die tendens. Die rede hiervoor kan nie verklaar word nie. Die resultaat voorspel dat die verhoogde druk 'n vergroting in die mediaan tot gevolg sal hê indien die koppie oor die nossel verder as 15 mm oor die kop steek. Die toevoeging van 'n koppie teen 'n lae druk het feitlik geen effek op f nie, maar f neem toe by 'n hoë druk namate die kantlengte kleiner word. U bly konstant ongeag die versadigerdruk.

Eksperiment 4 toon aan dat die mediaan afneem met $17,25 \mu\text{m}$ soos die druk toeneem. 'n Verhoging in druk het ook 'n afname van 2,11% in f tot gevolg.

Die verhoging van druk in eksperiment 5 toon 'n afname van $21,23 \mu\text{m}$ op die mediaan. Die hoër druk het ook 'n afname in f tot gevolg as daar 'n uitstroomtuit teenwoordig is. Die verhoging van die druk het 'n verbreding van die borrelverspreiding tot gevolg.

Die tendense wat verkry is, naamlik dat die verhoging van die versadigerdruk tot gevolg het dat die borrelgrootte afneem is in ooreenstemming met die bevindinge van Vrablik (1959), Treille (1972), Van Bennekom (1978), Degremont (1979) en Takahashi (1979). Dit is nie in ooreenstemming met die bevindinge van Lovet *et al* (1984) en McKay *et al* (1988) nie.

5.2.3 Buig In Nossel

Die toevoeging van 'n knak in die nosselkanaal het feitlik geen effek op die mediaan gehad by 'n lae versadigerdruk nie. By 'n hoë versadigerdruk het die nossel met die knak by alle diameters wat getoets is aansienlik kleiner borrels tot gevolg gehad. Die voorgestelde model voorspel dus dat die knak so geplaas is dat tyd t_{100} bereik word voordat die knak getref word, by 'n lae druk, en nadat die knak getref word by 'n hoë druk. By 200 kPa is die tyd wat die waterstraal neem om die knak te tref 2,04 millisekondes, en by 500 kPa is die tyd 1,32 millisekondes. Tyd t_{100} moet dus êrens tussen die twee tye lê.

Vir beide druk toestande en diameters wat getoets is het die toevoeging van 'n knak in die nosselkanaal tot gevolg gehad dat die aantal growwe borrels minder word. Die invloed op die uniformheidsindeks was nêrens noemenswaardig nie. Die model stel voor dat indien daar 'n obstruksie in die pad van die nosselkanaal is, sal die aantal growwe borrels minder word. Dit strook dus 100% met die model.

5.2.4 Afskerming

Die afstand wat die afskerming van die nosselopening af is blyk een van die kritieke faktore in die generasie van borrels te wees. In die eksperimente is gevind dat sodra die afskerming verder as 10 mm van die opening af is, word die borrels groter. Onder 10 mm van die opening af is die borrels aansienlik kleiner. Dit blyk dan om die punt te wees waar die t_{100} is. By 200 kPa is die tyd wat die waterstraal neem van die nossel tot by die afskerming wat 10 mm weg is, presies 0,67 millisekondes. By 500 kPa is hierdie tyd slegs 0,42 sekondes. Dit wil dus voorkom asof die tyd alleen nie 'n faktor is nie, maar die druk is 'n funksie daarvan.

By 'n hoë druk wil dit ook voorkom of die afstand van 10 mm die punt is waar f drasties begin toeneem. Vir lae drukke het die afstand geen effek op f nie. Die model stel voor dat indien die druk hoog is sal die hammer effek van die borrels op die obstruksie baie groot wees, en dit strook goed met wat wel gevind is. Die uniformheidsindeks verander geensins soos die afskermingsafstand verander nie.

Die effek van die koppie toon dat daar 'n afname in borrelgrootte is indien die druk verhoog word en die toplengte van die nossel bly klein. Die effek van die koppie is nie statisties betekenisvol by die bepaling van f nie.

5.2.5 Uitstroomtuit

Vir beide hoë en lae drukke, sowel as 2 en 3 mm diameter nossels het die toevoeging van 'n uitstroomtuit voor die nosselopening tot gevolg dat die mediaan drasties afneem. By 'n hoë druk word f ook aansienlik minder soos die druk verhoog word, wanneer die nossel van 'n uitstroomtuit voorsien is.

Soos met die toevoeging van 'n knak in die nosselkanaal, het die toevoeging van 'n tuit geen noemenswaardige effek op die uniformheidsindeks nie.

Die model het voorspel dat die toevoeging van 'n uitstroomtuit tot gevolg sal hê dat die mediaan afneem en dat die aantal growwe borrels afneem. Die tyd wat die waterstraal neem om uit die uitstroomtuit uit te vloei by 200 kPa is ongeveer 200 millisekondes, en by 500 kPa is dit ongeveer 70 millisekondes.

HOOFSTUK 6

GEVOLGTREKKINGS

6.1 GEVOLGTREKKINGS

Die navorsing wat gedoen is, en breedvoerig in hierdie verhandeling bespreek is, het definitief gelei tot 'n beter fundamentele begrip van die generasie van mikroborels vir opgelostelugflottasie. Die volgende algemene opmerkings kan gemaak word.

- 'n Meetstelsel is ontwikkel waarmee borels gemeet kan word onder omstandighede wat die praktyk goed simuleer. Die resultate wat verkry is, het klein, statisties bepaalbare foutgrense gelever. Hierdie statistiese foutgrense is nog deur weinig ander navorsers in soortgelyke studies gerapporteer. Hierdie werk is waarskynlik die naaste wat gekom kan word aan die werlike situasie sonder om in werklike flottasietenks te werk.
- Die bepaling van borelgrroottes, en die kwantifisering van die data om 'n persentasie van growwe borels, en 'n uniformheidsindeks te kan rapporteer is gedoen. Hierdie parameters is ook bereken met statistiese sekerheid, en dit is iets wat geen ander navorsers nog gerapporteer het nie.
- Die berekening van die lugeffektiwiteit, is 'n parameter wat nog nie algemeen gerapporteer is nie, en alhoewel die resultate nie bespreek is nie, lewer die resultaat skokkende antwoorde, betreffende die effektiwiteit van flottasie.
- 'n Wye reeks nossels is getoets. Die nossels was nie almal volskaal praktyk nossels nie, maar eenvoudige nossels, wat ontwerp is om antwoorde op spesifieke vrae te kan gee. Die eksperimentele program is uitgebou soos die eksperimente se resultate sekere tendense uitgewys het.

- Die effek van versadigerdruk op die borrelgrootte is onteenseglik bewys. Hierdie aspek het redelike chaos getoon in die literatuurstudie. Die bewys van die effek van die druk is gedoen oor 'n wye spektrum van nossels.
- Die resultate het aangetoon dat die praktiese implikasie van 'n afskerming, en 'n knak in die nosselkanaal, dieselde is. Hierdie is 'n tendens wat nog nooit van tevore gerapporteer is nie.
- Die effek van 'n uitstroomtuit op die borrel is pragtig uitgewys, en dit korreleer baie goed met wat 'n ander navorser gerapporteer het.
- Al die informasie het gelei tot die ontwikkeling van 'n eenvoudige konsepsuele model, waarmee baie van die eksperimentele resultate verduidelik kan word.
- Met al hierdie inligting, is die ingewikkelde ontwerp van inspuitsnossels gestroop tot die essensiële veranderlikes wat 'n uitstekende basis vorm vir die verdere verfyning van die onderwerp.
- Die navorsing het nie in totaliteit die aanvanklike doelstelling bevredig, naamlik:

Om die kritiese ontwerpparameters van inspuitsnossels wat in opgeloste-lug flottasie gebruik word te identifiseer, sodat nossels uiteindelik ontwerp kan word waarmee borreltjies met willekeurige grootte en klein variasie gegenereer kan word.

Wat egter wel duidelik geword het, is dat die waarskynlikheid dat borrels van willekeurige grootte en klein variasie gegenereer kan word, baie laag is. Dit is wel-moontlik om borrels binne 'n sekere bandwydte van borrelgroottes te genereer, maar die verlangde grootte sal die bepalende faktor wees in terme van wat die bandwydte sal wees.

- Die kritiese parameters wat die generasie van borrels beïnvloed is wel geïdentifiseer, maar daar is ook nuwe kritiese parameters geïdentifiseer wat nog nie ondersoek is nie.

6.2 VERDERE ONDERSOEKE

Waarskynlik die waardevolste gevolgtrekking wat gemaak kan word uit hierdie werk, is die identifisering van verdere werk wat sal lei tot die daarstel van meer effektiewe nosselontwerp.

- Die effek van temperatuur op die verrigting van die nossels moet ondersoek word. Alhoewel dit nie die ontwerp van die nossels direk sal affekteer nie, is dit nodig om 'n beter begrip te hê van die omgewing, en sy interaksie met die mikroborrel te kry.
- Die effek van oppervlak aktiewe agente by die water. Daar is baie oor die onderwerp in die literatuur, en vervolgens is dit nodig om dit beter te ondersoek, aangesien dit weereens indirek kan lei tot 'n meer optimale keuse van 'n nossel.
- Dit is nodig om eksperimente te doen, waar die flottasiekolom gevul is met onsuierhede en flokkulant. Die interaksie tussen die mikroborrels en hulle makro omgewing, sal van kardinale belang wees by die optimale keuse van 'n noseltipe.
- Die nossel geometrie moet in meer detail ondersoek word. Die verwantskap tussen die lengte en die deursnit, is heel moontlik die sleutel tot 'n suksesvolle ontwerpsprosedure vir inspuitsnossels. Die volume wat die nossel beslaan kan moontlik van kardinale belang wees, aangesien die tyd wat die oorversadigde water daarin verkeer, kan die generasie van borrels beïnvloed.
- Die vrylatingstyd van die nossels moet verder ondersoek word om, moontlik 'n verband te vind tussen die tyd en die presipitasie van borrels. Die vermoede bestaan dat daar 'n kritieke tyd en vloeisnelheid is, wat die optimum borrelgrootte en borrelverspreiding sal lewer.

VERWYSINGSLYS

1. Ahmed, N and Jameson, GJ (1985) The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles. *International Journal of Mineral Processing*. 14 195-215.
2. Bennekom, CA, van (1978) De invloed van verschillende nozzletypes op het flotatieproces: 1. Karakterisering van nozzles. *KIWA N.V. Speurwerkrapporten SWE-202*. Oktober 1978.
3. Bennekom, CA, van (1979) De invloed van verschillende nozzletypes op het flotatieproces: 2. Vergelykende nozzletest in een proefinstallatie. *KIWA N.V. Speurwerkrapporten SWE-213*. Januari 1979.
4. Bennett, GF (1988) The removal of oil from wastewater by air flotation: a review. *CRC Critical Reviews in Environmental Control*. 18(3) 189-253.
5. Bratby, J and Marais, GvR (1974) Dissolved air flotation. *Filtration & Separation*. 11 614-626.
6. Box, GEP, Hunter, WG and Hunter, JS (1978) *Statistics for Experimenters*, 1st edition. John Wiley & Sons, United States of America.
7. Cassel, EA, Kaufman, KM and Matijević, E (1975) The effects of bubble size on microflotation. *Water Research*. 9 1017-1024.
8. Degrémont (1979) *Water treatment handbook*. Fifth Edition, Halsted Press, John Wiley & Sons. New York.
9. De Groot, CPM en van Breemen, AN (1987) Ontspanningsflotatie en de bereiding van drinkwater. *Mededeling van de Vakgroep Gezondheidstechniek & Waterbeheersing*. TU Delft, Mededeling no. 11.
10. De Wet, FJ (1980) Flotation of algal waters. *Paper presented at meeting of IWPC (Southern African Branch)*. Junie.

11. Dobby, GS, Yianatos, JB and Finch, JA (1988) Estimation of bubble diameter in flotation columns from drift flux analysis. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 27(2) 85-90.
12. Franz, K, Buchholz, R and Schügerl, K (1980) Comprehensive study of the gas hold up and bubble size distribution in highly viscous liquids. *Chem. Eng. Commun.* 5 165-202.
13. Gardner, NA (1977) Practical experience with flotation on various United Kingdom waters. *Water Research Centre Conference*, Felixstowe. 339-347.
14. Hartunian, RA and Sears, WR (1957) On the instability of small gas bubbles moving uniformly in various liquids. *Source Unknown*. 27-47.
15. Heinänen, J (1988) Use of dissolved-air flotation in potable water treatment in Finland. *Aqua Fennica*. 18(2) 113-123.
16. Hyde, RA, Richards, WN and Burley, MJ (1973) A nozzle for introducing gas into liquid. *Patent Specification 1 444 027*.
17. Jackson, R (1964) The formation and coalescence of drops and bubbles in liquids. *The Chemical Engineer*. May. 107-118.
18. Janssens, JG and Mus, I (1988) Ontwerp van de te bouwen installaties te Antwerpen. *Workshop Flotatie II*. KIWA NV. SWI 89.113.
19. Jones, AD and Hall, AC (1981) Removal of metal ions from aqueous solution by dissolved-air flotation. *Filtration & Separation*. 18(5) 386-390.
20. Kitchener, JA and Gochin, RJ (1981) The mechanism of dissolved air flotation for potable water: basic analysis and a proposal. *Water Research*. 15 585-590.
21. Kirkpatrick, RD and Lockett, MJ (1974) The influence of approach velocity on bubble coalescence. *Chemical Engineering Science*. 29 2363-2373.

22. Leach, GW, Soutar, BN, Pullen, AW and Van Vuuren, LRJ (1985) Sewage effluent reclamation for potable industrial mine service water. *NIWR Report RW 0996*.
23. LeBlond, PH (1969) Gas diffusion from ascending gas bubbles. *J. Fluid Mech.* 35(4) 711-719.
24. Longhurst, SJ and Graham, NJD (1987) Dissolved air flotation for potable water treatment: a survey of operational units in Great Britain. *The Public Health Engineer.* 14(6) 71-76.
25. Lovett, DA and Travers, SM (1986) Dissolved air flotation for abattoir wastewater. *Water Research.* 20(4) 421-426.
26. Lovett, DA, Travers, SM and Maas RL (1984) Treatment of abattoir wastewater by dissolved air flotation. Part 1: Wastewater not pretreated. *CSIRO Meat Research Report.* No. 9.
27. Maddock, JEL (1976) Research experience in the thickening of activated sludge by dissolved air flotation. *Water Research Centre Conference.* Felixstowe, Suffolk. Juni.
28. Malley Jr, JP and Edzwald, JK (1991) Laboratory comparison of DAF with conventional treatment. *Journal AWWA.* September. 56-61.
29. Marrucci, G (1969) A theory of coalescence. *Chemical Engineering Science.* 24 975-985.
30. McKay, JD, Foot, Jr. DG and Shirts, MB (1988) Column flotation and bubble generation studies at the bureau of mines. *Column Flotation '88. Chapter 18.* 173-186.
31. Miller, RS (1985) Photographic observations of bubble formation in flashing nozzle flow. *Transactions of the ASME.* 107(November) 750-755.

32. Melville, JB and Matijević, E (1975) Microbubbles: generation and interaction with colloid particles. *Proceedings of Symposium on Foams. Brunel University. September 8-10, 1975.* 217-235.
33. Perry, RH, Green, DW and Maloney, JO (1984) *Perry's chemical engineers' handbook*, 6th edition. McGraw-Hill Book Company, U.S.A.
34. Plawsky, JL and Hatton TA (1988) Optical fiber probes for particle size/velocity measurements: a simulation model. part 1. *Applied Optics.* 27(20) 4200-4206.
35. Ramirez, ER (1979) Comparative physicochemical study of industrial wastewater treatment by electrolytic, dispersed air and dissolved air flotation technologies. *Proceedings of 34th Industrial Waste Conference.* Purdue University, Ann Arbor. 699-709.
36. Randall, EW, Goodall, CM, Fairlamb, PM, Dold, PL and O'Connor, CT (1989) A method for measuring the sizes of bubbles in two- and three-phase systems. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 22(April) 827-833.
37. Reay, D and Ratcliff, GA (1973) Removal of fine particles from water by dispersed air flotation: effects of bubble size and particle size on collection efficiency. *The Canadian Journal of Chemical Engineering.* 51(April) 178-185.
38. Rovel, JM (1976) Experience with dissolved air flotation for industrial effluents treatments. *Water Research Centre Conference.* Felixstowe, Suffolk. Junie.
39. Rykaart, EM (1993) Die Verfyning van inspuitsossels vir opgeloste-lug flottasie. *Meestersgraad Tesis voorgelê aan die Randse Afrikaanse Universiteit, Fakulteit Siviele Ingenieurswese.*
40. Sada, E, Yasunishi, A, Katoh, S and Nishioka, M (1978) Bubble formation in flowing liquid. *The Canadian Journal of Chemical Engineering.* 59(December) 669-672.
41. Semiat, R and Dukler, AE (1981) Simultaneous measurement of size and velocity of bubbles or drops: a new optical technique. *AIChE Journal.* 27(1) 148-159.

42. Shannon, WT and Buisson, DH (1980) Dissolved air flotation in hot water. *Water Research*. 14 759-765.
43. Shima, A and Tsujinu, T (1974) The dissolution and growth of a gas bubble in water. *High Speed Mech, Series B*. 30(274) 47-66.
44. Sutherland, KL (1947) Kinetics of the flotation process. *Physical Chemistry of Flotation, XI*. 394-425.
45. Takahashi, T, Miyahara, T and Mochizuki, H (1979) Fundamental study of bubble formation in dissolved air pressure flotation. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 12(4) 275-280.
46. Travers, SM and Lovett, DA (1985) Pressure flotation of abattoir wastewaters using carbon dioxide. *Water Research*. 19(12) 1479-1482.
47. Treille, P (1972) Flotation application to industrial waste waters. *Conference given at AQUATEC 72*, Amsterdam.
48. Tsuge, H, Tanaka, Y and Hibino (1981) Effect of the physical properties of gas on the volume of bubble formed from a submerged single orifice. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 59(October) 569-572.
49. Tsuge, H and Hibino, S (1978) Bubble formation from a submerged single orifice accompanied by pressure fluctuations in gas chamber. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 11(3) 173-178.
50. Tucker, JP, Franzidis, JP and O'Connor, CT (1990) The effect of physical and chemical parameters on bubble size distributions in a Cominco air sparging test rig. *Publication of Department of Chemical Engineering, University of Cape Town, South Africa*.
51. O'Connor, CT, Randall, EW and Goodall, CM (1988) Measurement of the effects of physical and chemical variables on bubble size. *International Journal of Mineral Processing*. 28 139-149.

52. Van Vuuren, LRJ, de Wet, FJ and Prinsloo, J (1982) Preliminary report on pilot plant runs at Empangeni Waterworks. *Source Restricted*.
53. Van Vuuren, LRJ and Prinsloo (1983) Forming of gas bubbles in a liquid. *South African patent no. 83/7720*.
54. Van Puffelen, J (1990) Flotatie: een topper in de waterzuivering. *H₂O*. 23(10) 256-262.
55. Vosloo, PBB and Langenegger, O (1979) Possible methods for dealing with phytoplankton at water purification works. *Presented at monthly meeting of IWPC (Southern African Branch)*. August.
56. Vrablik, ER (1959) Fundamental principles of dissolved air flotation of industrial wastes. *Proc. 14th Purdue Ind. Wastes Conf.* 743-779.
57. Williams, PG, Van Vuuren, LRJ and Van der Merwe, PJ (1985) Dissolved air flotation upgrades a conventional plant treating eutrophic water. *11th International Convention, Water and Wastewater Association*. Melbourne. 189-196.
58. Yamamoto, T and Ishii, T (1987) Effect of surface active materials on the drag coefficients and shapes of single large gas bubbles. *Chemical Engineering Science*. 42(6) 1297-1303.
59. Yasunishi, A, Fukuma, M and Muroyama, K (1986) Measurement of behavior of gas bubbles and gas holdup in a slurry bubble column by a dual electroresistivity probe method. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 19(5) 444-449.
60. Yianatos, JB, Finch, JA, Dobby, GS and Manqiu XU (1988) Bubble size estimation in a bubble swarm. *Journal of Colloid and Interface Science*. 126(1) 37-44.
61. Zabel, T (1978) Flotation. *Proceedings of the 12th Congress of the International Water Supply Association*. Kyoto. F1-F10.
62. Zieminski, SA, Caron, MM and Blackmore, RB (1976) Behavior of air bubbles in dilute aqueous solutions. *I & EC Fundamentals* 6(2) 233-242.

-
63. Zhang, Y (1985) Chinese show how DAF can reduce MLSS. *Water Engineering and Management*. 132(8) 38-42.

