

Ref.nr. : 87-186
Dossiernr. : 8722-14884
Datum : juli 1987
P

Titel
KARAKTERISERING VAN AFBB-RESTSTOFFEN

Auteur(s):
Ir. E. Mulder
Ing. R. Gerritsen

Trefwoord(en):
- AFBB-reststoffen
- vliegass
- bedas
- karakterisering
- uitloging
- SU-test

Bestemd voor:
Stichting Projectbeheerbureau
Energie-Onderzoek (PEO)
Postbus 8242
3503 RE Utrecht

INHOUDSOPGAVE	<u>PAGINA</u>
SUMMARY	3
SAMENVATTING	4
1. INLEIDING	5
2. GEDEELTELIJKE KARAKTERISERING	6
2.1 Beschrijving AFBB-reststoffen en productie ervan	6
2.2 Chemische karakterisering	7
2.3 Fysische karakterisering	12
2.4 Selectie assen voor uitgebreide karakterisering	14
3. UITGEBREIDE KARAKTERISERING	15
3.1 Morfologisch onderzoek	15
3.2 Spoor-elementen-analyse	17
3.3 Zuur-base- en beschikbaarheidstest	19
3.4 Selectie assen voor SU-test	21
4. STANDAARD UITLOOGTEST	22
4.1 Kolomtest	22
4.2 Cascade-schudtest	23
4.3 Resultaten SU-test	24
4.4 Relatie lab-proeven - praktijksituaties	28
5. VALIDATIE REKENMODEL AFBB	31
6. CONCLUSIES	33
7. LITERATUUR	35
BIJLAGEN 1 t/m 15	

SUMMARY

Title: Characterization of AFBB-residues.

Key-words: AFBB-residues, fly ash, bed ash, characterization, leaching, standard leaching test.

Within the framework of the dutch national coal research program (NOK) the project "Characterization of fluid-bed ashes on physical and chemical properties and leaching behaviour" (PEO-contractnumber 20.051-010.10) is carried out, by order of the "Stichting Projectbeheerbureau Energieonderzoek".

To get a picture of the properties of AFBB-residues, as they will be produced (in larger quantities) in the future has been the aim of this project. Moreover the characterization results can be used in research where AFBB-residues are used as secondary elements in building materials. Fifteen residues, ten fly ashes and five bed ashes, have been partially characterized. This means that they are chemically analysed on main elements and that the following physical properties have been determined: specific density, bulk density and particle size distribution. Of these fifteen residues, six are chosen, to be characterized more extensively. Of these six residues, in addition to the properties already mentioned, the bitume-number and the specific area are determined and at the same time Raster Electron Microscopical exposures are taken. Besides, these ashes are chemically analysed on trace elements, and the availability of these elements is examined. The leaching behaviour of two fly ashes and of one bed ash is examined more extensively by carrying out the complete standard leaching test, as recommended by the SOSUV working group.

Finally, the determined chemical compositions of the ashes are used to validate a simple mathematical model of the AFBB.

SAMENVATTING

In het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kolen is, in opdracht van de Stichting Projectbeheerbureau Energieonderzoek het project "Karakterisering wervelbedassen op fysieke en chemische eigenschappen en uitloogkarakteristiek" (PEO-overeenkomstnummer 20.051-010.10) uitgevoerd.

Dit project is uitgevoerd met het doel een beeld te krijgen van de eigenschappen van wervelbedassen, zoals ze in de toekomst (in grotere hoeveelheden) geproduceerd zullen gaan worden en tevens om de beschikbaar komende gegevens te kunnen gebruiken in een aantal andere onderzoeken, waarbij wervelbedas gebruikt wordt als secundaire grondstof in bouwmaterialen.

Er is een vijftiental assen gedeeltelijk gekarakteriseerd. Dit houdt in dat ze chemisch geanalyseerd zijn op matrix-elementen en dat de fysieke eigenschappen absolute dichtheid, stortgewicht en korrelgrootteverdeling bepaald zijn. Van deze vijftien assen zijn er zes uitgebreid gekarakteriseerd. Van deze assen zijn, naast genoemde grootheden, het bitumen-getal en het specifiek oppervlak bepaald en zijn elektronenmicroscopische opnamen gemaakt. Tevens zijn deze assen chemisch geanalyseerd op spoorelementen en zijn ze onderworpen aan een zuur-base- en beschikbaarheidstest. Van drie van deze zes assen is de uitloogkarakteristiek nader onderzocht door het uitvoeren van de volledige standaarduitloogtest, volgens SOSUV-procedure.

Tenslotte zijn de gevonden chemische samenstellingen gebruikt om een éénvoudig rekenmodel van de AFBB te valideren.

1. INLEIDING

In het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kolen (NOK) wordt bij MT-TNO in opdracht van de Stichting Projectbeheerbureau Energieonderzoek (PEO) onderzoek gedaan aan wervelbedverbranding in een Atmospheric Fluid Bed Boiler (AFBB). Als deelproject van dit TNO-onderzoek wordt ook aandacht besteed aan de reststoffen, ontstaan bij kolenverbranding in de AFBB. Het voorliggende rapport beschrijft de resultaten van het project: "Karakterisering wervelbedassen op fysische en chemische eigenschappen en uitloogkarakteristiek" (PEO-overeenkomstnummer 20.051-010.10). De projectomschrijving is opgenomen in bijlage 1.

Het is van belang, in verband met onderzoek naar toepassingsmogelijkheden van AFBB-reststoffen, de chemische-, fysische- en uitlooeigenschappen van de reststoffen, zowel van bed- als van vliegassen, te kennen.

Deze eigenschappen zijn bepaald van reststoffen die, door verandering van stookcondities, ketelontwerp en kolensoort afwijken van de tot 1985 in de TNO-AFBB geproduceerde reststoffen.

Het onderzoek, en daarmee ook het voorliggende rapport valt uiteen in drie fasen.

Hoofdstuk twee beschijft de gedeeltelijke karakterisering van 10 vliegassen en 5 bedassen. Deze gedeeltelijke karakterisering houdt in een chemische analyse op matrixelementen en de bepaling van enkele fysische eigenschappen.

In hoofdstuk drie komt de uitgebreide karakterisering aan de orde van zes assen, geselecteerd uit de 15 gedeeltelijk gekarakteriseerde assen. Deze uitgebreide karakterisering bestaat uit chemische analyse op spoor-elementen, bepaling van enkele fysische eigenschappen, het maken van elektronenmicroscopische opnamen en het bepalen van de beschikbaarheid van de spoorelementen voor uitloging.

De resultaten van de derde onderzoeksfase, de Standaard-Uitloogtest (SU-test), uitgevoerd met drie assen, geselecteerd uit de zes uitgebreid gekarakteriseerde assen, worden beschreven in hoofdstuk vier.

In hoofdstuk vijf zal kort gerapporteerd worden over de validatie van een eenvoudig rekenmodel, dat het wervelbedverbrandingsproces beschrijft.

Uitvoerige rapportage hierover volgt als meerdere gegevens beschikbaar zijn.

Tenslotte zal in hoofdstuk zes getracht worden enkele conclusies te trekken uit de verkregen onderzoeksresultaten.

2. GEDEELTELIJKE KARAKTERISERING

Om een eerste indruk te krijgen van de assen, is een chemische analyse op hoofdcomponenten noodzakelijk. Vooral de koolstof- en kalkgehalten zijn van belang. Ook kennis van fysische eigenschappen, zoals deeltjes-grootte en dichtheid is nodig om die assen, die uitgebreid zullen worden gekarakteriseerd, te kunnen selecteren.

In paragraaf één zal eerst kort worden ingegaan op AFBB-reststoffen in het algemeen en op de 15 te karakteriseren assen en de condities waaronder deze assen geproduceerd zijn, in het bijzonder.

Daarna zal in paragraaf twee de chemische karakterisering beschreven worden en in paragraaf drie de fysische.

Tot slot zal in paragraaf vier kort aangegeven worden op grond waarvan de zes assen voor de uitgebreide karakterisering gekozen zijn.

2.1 Beschrijving AFBB-reststoffen en productie ervan

Al de te karakteriseren assen zijn afkomstig van de 4-MW_{th} kolengestookte AFBB, aanwezig bij TNO-Apeldoorn [1].

De steenkool wordt in een wervelbed verbrand. Het grootste gedeelte van de as wordt met de afgassen meegevoerd en in cyclonen en een doekfilter afgevangen. Het resterende gedeelte van de as wordt als bedas afgevoerd. Om het verbrandingsredement van de AFBB te verhogen, wordt gebruik gemaakt van een terugstookstelsel. Hiermee wordt het grootste deel van de cycloon- en doekfilteras (samen vlieg-as) gerecirculeerd. Een klein deel van de vlieg-as wordt afgevoerd. Een stroomschema van de AFBB is bijgevoegd in bijlage 2.

Om de SO₂-emissie beneden de wettelijk gestelde norm te houden, wordt kalksteen aan de kolen toegevoegd. Het calciumcarbonaat ontleedt, bij de hoge temperatuur in het wervelbed, in eerste instantie in kooldioxide en calciumoxide, waarna het calciumoxide reageert met zwaveldioxide en zuurstof tot calciumsulfaat. Al naar gelang de hoeveelheid toeslagmateriaal (kalksteen), de hoeveelheid teruggestookte as en de stookcondities zal de as meer of minder calciumsulfaat, calciumoxide en koolstof bevatten.

De 15 gekarakteriseerde assen zijn gekozen uit de in 1985 en 1986 geproduceerde assen. Er is naar gestreefd de meest-relevante assen te selecteren. Het meest van belang zijn de assen van run 180 (gestookt onder "AZC" (= Akzo Zout Chemie)-condities), run 183 (extra kalktoeslag) en run 189

(NEKAMI-pellets als toeslagmateriaal). In bijlage 3 is van alle relevante runs een korte beschrijving gegeven. Tevens is in bijlage 4 een uitdraai van de stookcondities bijgevoegd.

Er zijn 5 bedassen en 9 vliegassen gekarakteriseerd en tevens 1 cycloonas. Het was de bedoeling ook de bij de cycloonas behorende doekfilteras te karakteriseren maar het bleek niet mogelijk deze as te bemonsteren. De wijze van coderen van de as-monsters is weergegeven in bijlage 5.

2.2 Chemische karakterisering

De assen zijn geanalyseerd op koolstof (organisch en anorganisch), zwavel (pyritisch en sulfaat) en op de belangrijkste in de kolen en het toeslagmateriaal voorkomende mineralen: calcium, silicum, aluminium en ijzer.

De bij de chemische analyse gevolgde procedures zijn weergegeven in tabel 2.1

grootheid	procedure
Totaal koolstof gehalte	IR-detectie, na verbranding
Carbonaat-koolstof	Ir-detectie, na ontleding van het carbonaat met H_3PO_4
Sulf. S en pyr. S	ISO 157
Silicum	Gravimetrisch, na smelten van NaOH, volgens NEN 3106-5 en neerslaan SiO_2 met $HClO_4$
Aluminium, Calcium en IJzer	A.A.S., na smelten van NaOH volgens NEN 3106-5 en oplossen in $HClO_4$

Tabel 2.1: Gevolgde procedures bij chemische analyses.

De resultaten van deze chemische analyses zijn in tabelvorm weergegeven in bijlage 6. Hierin zijn tevens beschikbare gegevens van enkele cycloon- en doekenfilterassen opgenomen. Het asmonster van run 165 heeft geen monster-nummer gekregen, terwijl van het asmonster met het monster-nummer 115 niet te achterhalen bleek tijdens welk experiment de as geproduceerd is. In bijlage 6 zijn tevens opgenomen de kaliumgehalten, die bepaald zijn bij de uitgebreide karakterisering (zie hoofdstuk 3).

Daarnaast is de minerale samenstelling van de verschillende assen berekend en is getracht aan de hand hiervan een elementenbalans op te stellen.

Hierbij zijn de volgende veronderstellingen gedaan:

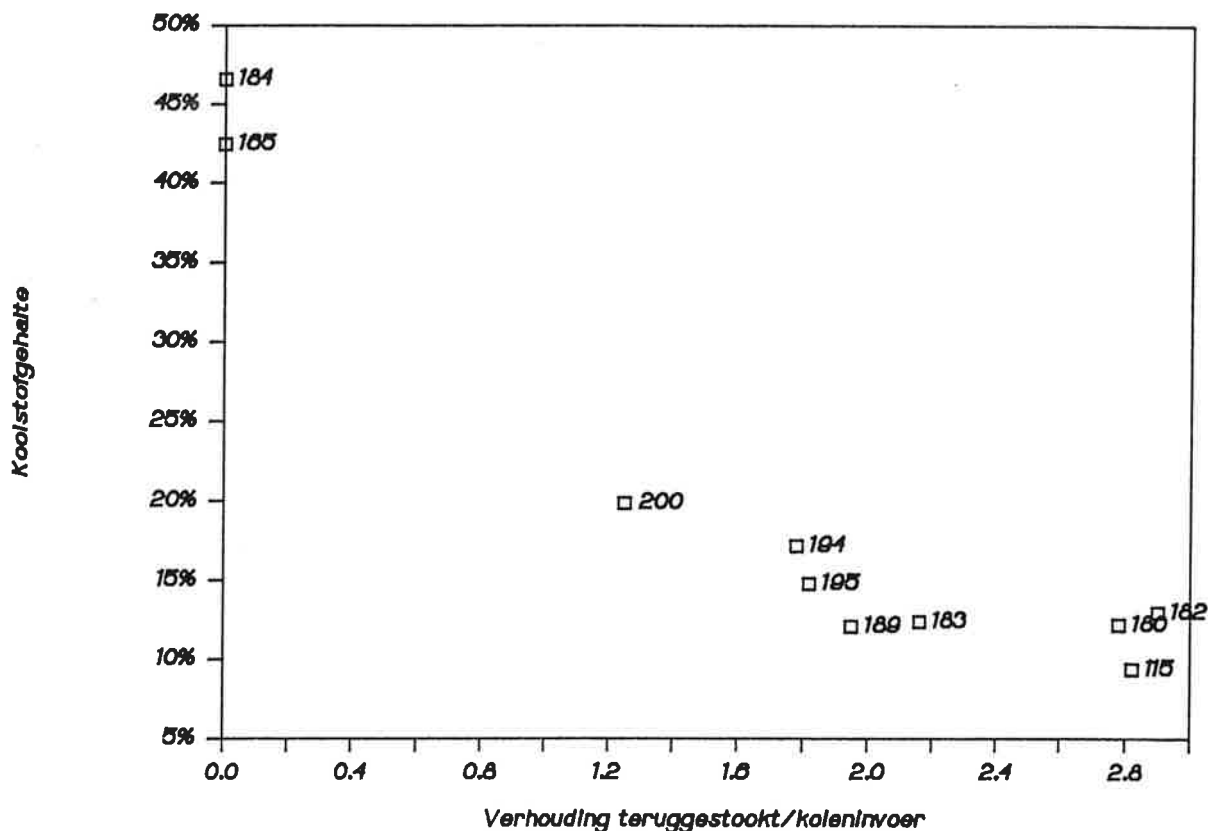
- . Het koolstof dat niet als carbonaatkoolstof aanwezig is, is als organische koolstof aanwezig.
- . Alle carbonaat is aanwezig in de vorm van calciumcarbonaat.
- . Alle sulfaat is aanwezig in de vorm van calciumsulfaat.
- . Het overige calcium is aanwezig als oxide.
- . Het ijzer dat niet gebonden is aan de pytrische zwavel is aanwezig als oxide.
- . Alle aluminium, silicium en kalium is aanwezig als oxide.

De gekarakteriseerde assen zijn onder verschillende condities geproduceerd (variatie van meerdere parameters tegelijk). Hierdoor wordt interpretatie van de analysegegevens bemoeilijkt. Bij bedassen komt hier nog een "geheugen"-effect bij doordat de verblijftijd van de bedas erg lang is. Er is een periode van meer dan 100 uur nodig voordat, na wijziging van stookcondities, de bedas een constante samenstelling bereikt. Desondanks zal in het hiernavolgende getracht worden relaties te leggen tussen de samenstelling van de as en de stookcondities.

Koolstofgehalte

Voor het verwerken van AFBB-reststoffen is het belangrijk het koolstofgehalte van de betreffende reststof te kennen. Bij veel toepassingen wordt slechts een koolstofgehalte van maximaal 5% toegestaan.

Het koolstofgehalte is afhankelijk van de gestookte kolen. Er bestaat een directe relatie met het asgehalte van de kool en een indirecte relatie met het zwavelgehalte ervan. Dit laatste in verband met "verdunning" door toevoeging van kalk, afhankelijk van het zwavelgehalte. Voor runs, waarbij kolen met eenzelfde asgehalte, van eenzelfde kolensoort dus, gestookt zijn, bestaat er een relatie tussen de hoeveelheid teruggestookte vliegashoudende stof en het koolstofgehalte van de vliegashoudende stof, zie figuur 2.1.



Figuur 2.1: Verband koolstofgehalte en hoeveelheid teruggestookt.

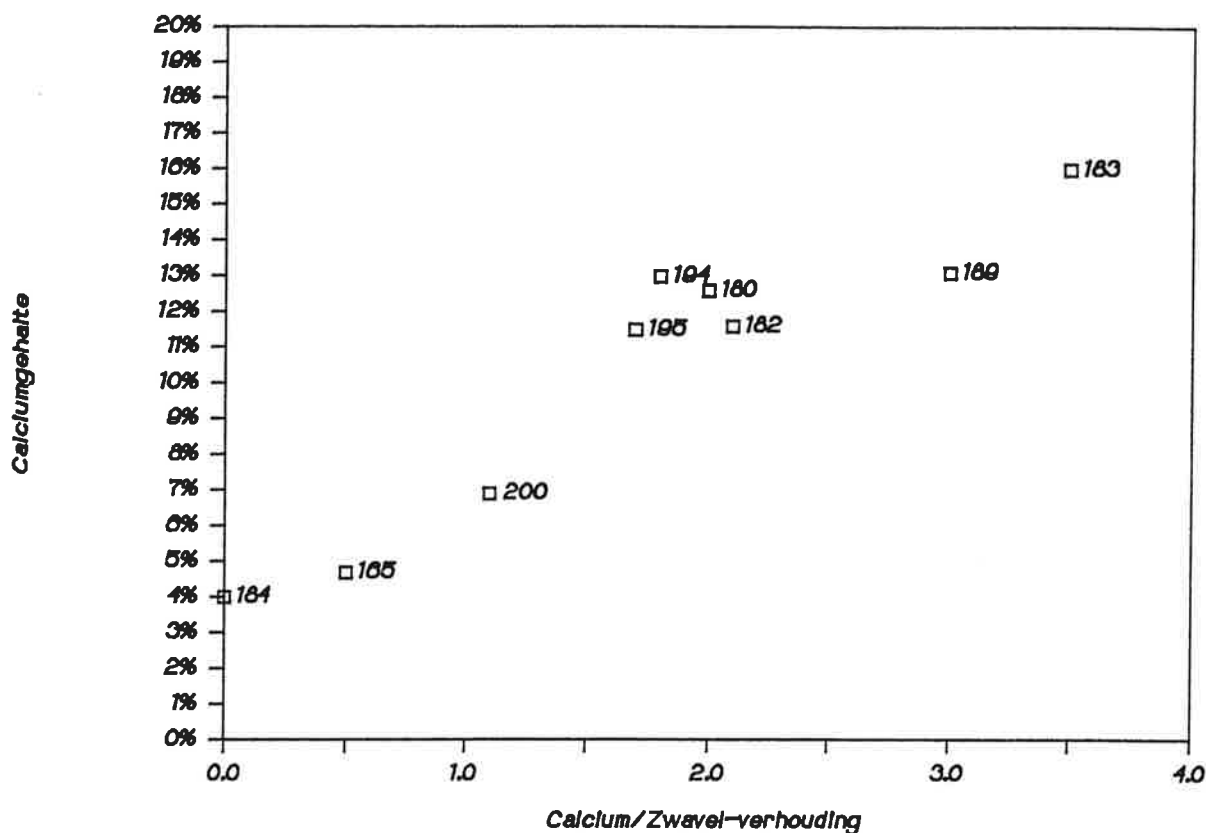
De assen van de runs 165 en 184 zijn niet teruggestookt, zodat deze assen een hoog koolstofgehalte hebben, boven de 40%. De vliegassen van de runs 180, 182, 183 en 189 hebben een koolstofgehalte van ongeveer 12%. Dit is beduidend lager dan bij vroegere runs het geval was [2] [3]. De vliegassen van de runs 194, 195 en 200 hebben een iets hoger koolstofgehalte namelijk rond 17%. De waarschijnlijke oorzaak hiervan is dat tijdens deze runs minder vlieggas is teruggestookt, zie figuur 2.1.

De cycloonassen hebben een hoger koolstofgehalte dan de doekfilterassen. De bedassen hebben allen een erg laag koolstofgehalte, beneden de 1%.

De verblijftijd van de bedasdeeltjes is blijkbaar groot genoeg om nagenoeg volledige verbranding te garanderen.

Calciumverbindingen

Zoals uit bijlage 4 en bijlage 6 blijkt, is het calciumgehalte van AFBB-vlieggas afhankelijk van de Ca/S-verhouding. Hoe meer calcium als toeslagmateriaal aan de kolen toegevoegd wordt, hoe meer calcium er in de as aanwezig is. In figuur 2.2 is van runs, gestookt met kolen met eenzelfde as- en zwavelgehalte, de relatie weergegeven tussen het calciumgehalte en de calcium/zwavel-verhouding.



Figuur 2.2: Verband calciumgehalte en calcium/zwavelverhouding.

Uit de cijfers van de runs 165 en 184 blijkt dat een calciumgehalte van 4-5% afkomstig is van de kolen (bij deze runs is geen extra kalk aan de kolen toegevoegd). Het calciumgehalte van de overige vliegassen varieert van 7% tot 16%.

De bedassen vertonen een groot verschil in calciumgehalte. De bedas van run 189 heeft een laag calciumgehalte. Dit komt doordat bij run 189 niet gewone kalksteen als toeslagmateriaal gebruikt is, maar NEKAMI-pellets. Deze NEKAMI-pellets zijn minder hard en slijten daardoor sneller. Hierdoor komen de calciumcomponenten overwegend in de vliegas terecht. Het calciumgehalte van de bedassen van de runs 194 en 195 is lager dan dat van de runs 180 en 183. De lager zijnde Ca/S-verhouding heeft hier zeker invloed op, maar dat het verschil zo groot is, is hiermee niet te verklaren. De meest voor de hand liggende verklaring is, dat door de grotere bedhoogte en de lage bedasstroom bij run 194 de verblijftijd van de bedasdeeltjes groter is, waardoor de kalkdeeltjes meer slijten en dus kleiner worden. Hierdoor daalt ook het calcium-aandeel in de bedas. Doordat bij run 195 de bedhoogte weer teruggebracht is tot 1 meter, is er meer bedas afgevoerd, waarbij door het "geheugen"-effect, waarschijnlijk nog een gedeelte van de tijdens run 194 gepro-

duceerde bedas meegenomen is. Het calciumcarbonaatgehalte is erg laag, overwegend beneden 1%. De waarden boven 2% zijn via een andere en zoals later bleek, foutieve analysemethode verkregen. Bijna alle calciumcarbonaat ontleedt dus in calciumoxide en kooldioxide.

Het calciumoxide kan tijdens of na afvangst, in aanwezigheid van waterdamp, gedeeltelijk overgaan in calciumhydroxide.

Het calciumsulfaatgehalte is afhankelijk van de Ca/S-verhouding. In de vliegassen is het gehalte CaSO_4 en CaO ongeveer even hoog. In de bedassen is het CaO-gehalte steeds hoger. Het gedeelte van de kalk dat zwavel bindt, lijkt, tot een Ca/S-verhouding van ongeveer 3, vrijwel onafhankelijk te zijn van de Ca/S-verhouding (zie ook § 3.1).

Het calciumoxidegehalte is uiteraard ook afhankelijk van de Ca/S-verhouding.

Mineralen

Het siliciumgehalte is in alle vlieg- en cycloonassen ongeveer hetzelfde, namelijk ongeveer 15%. De as van run 184 lijkt hierop een uitzondering te maken. De oorzaak hiervan is echter dat door het hoge gehalte aan onverbrande kool het gehalte aan mineralen, relatief gezien, lager is. Het aantal kg. mineralen per kg. kolen is wel hetzelfde.

Het Si-gehalte van de bedassen is hoger dan dat van de vliegassen, namelijk ongeveer 20-25%. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door grove kwartsdeeltjes in de kolen, die nauwelijks slijten in het bed. Het aluminiumgehalte is van alle assen ongeveer 7-8%. Het ijzergehalte van de vliegassen is ongeveer 5% en van de bedassen ongeveer 3,5%.

Elementenbalans

Als over de verschillende assen een elementenbalans wordt opgesteld, blijkt het gehalte aan "overig asmateriaal", op een enkele uitzondering na, tussen de 5 en 10% te liggen. Als bedacht wordt dat het gehalte kalium, titaan, magnesium en natrium bij elkaar ongeveer drie procent is [2] en het gehalte aan de desbetreffende oxides ongeveer vijf procent, mag gesteld worden dat de elementenbalans voor de meeste assen goed klopt.

2.3 Fysische karakterisering

Van de vijftien assen zijn de absolute dichtheid, het stortgewicht of stampgewicht en de korrelgrootteverdeling bepaald. De uitvoering van deze bepalingen en de resultaten hiervan zullen achtereenvolgens kort besproken worden.

Absolute dichtheid

De absolute dichtheid van de assen is bepaald met behulp van een helium-picnomete. De resultaten van deze bepalingen zijn ondergebracht in bijlage 7.

De absolute dichtheid van de vliegassen en de cycloonas ligt tussen 2400 en 2500 kg/m³. Een uitzondering vormen de twee niet teruggestookte koolstofrijke assen, waarvan de dichtheid ongeveer 1700 kg/m³ is. De dichtheid is groter dan van eerder geproduceerde assen, omdat het koolstofgehalte lager is. De onverbrande koolstofdeeltjes hebben blijkbaar een lage dichtheid. De absolute dichtheid van de bedassen varieert van 2660 tot 2830 kg/m³. Dit is niet veel groter dan van de vliegassen.

Stortgewicht

Voor het vertalen van uitloogresultaten naar praktijksituaties is het van belang het stortgewicht te kennen. Bij bepaling van het stortgewicht wordt van een hoeveelheid as waarvan de massa bekend is, voor het stampen en na 1.000 maal stampen het volume bepaald. Bij het stampen bevindt de as zich in een cilinder, die ongeveer één centimeter opgetild wordt en daarna door het eigen gewicht neervallend de as aanstampt. De berekende dichtheden zijn vermeld in bijlage 7.

Vóór het stampen varieert de dichtheid van de vliegassen en de cycloonas van 610 tot 850 kg/m³, na 1000 maal stampen van 870 tot 1110 kg/m³. De koolrijke assen hebben uiteraard een lager stortgewicht, namelijk ongeveer 500 kg/m³. Het stortgewicht van de AFBB-vliegassen is minder dan de helft van de absolute dichtheid. Dit komt door de grillige vorm van de deeltjes en door het grote aantal poriën in de deeltjes. Dit in tegenstelling tot poederkoolvliegass, waarvan de deeltjes rond zijn en waarvan het stortgewicht dan ook groter is.

Het stampen heeft op de bedassen niet zoveel invloed. De dichtheid voor stampen varieert hier van 1160 tot 1340 kg/m³ en na het stampen van 1360 tot 1460 kg/m³.

Korrelgrootteverdeling

De korrelgrootteverdeling van AFBB-reststoffen is van belang voor een aantal toepassingen van deze reststoffen, bijvoorbeeld in cement of in asfalt. De korrelgrootte van AFBB-reststoffen is onder andere afhankelijk van de hardheid van kolen en kalk (slijten van de deeltjes), van de afvangstmethode van de vlieggas, van het terugstookstelsel en van de fluidisatiesnelheid in de AFBB.

De korrelgrootteverdeling van de bedassen is bepaald met behulp van controlezeven (NEN 2560). Bij de vliegassen is hiervan ook gebruik gemaakt vanaf 180 micrometer. De fractie fijner dan 180 micrometer is op korrelgrootte geanalyseerd met behulp van een Malvern 3300 Particle Sizer. Deze bepaling berust op de eigenschap van deeltjes dat ze licht verstrooien op een wijze die karakteristiek is voor de grootte ervan.

De cumulatieve korrelgrootteverdeling van de verschillende assen is in grafiekvorm weergegeven en wel in bijlage 8. Als deze verdelingen bekeken en met elkaar vergeleken worden, valt het volgende op:

- . De vlieggas van run 184 is wat grover dan van de andere vliegassen. De oorzaak hiervan ligt in het feit dat de as bij deze run niet gerecirculeerd is, waardoor de deeltjes minder tijd gekregen hebben om te verbranden of door erosie te slijten.
- . De vlieggas van run 194 lijkt ook wat grover te zijn. De oorzaak hiervan is niet duidelijk.
- . Sommige vliegassen, maar in het bijzonder vlieggas 195, vertonen een discontinuïteit in de lijn van 90 tot 180 micrometer. Dit is het gevolg van het feit dat de twee gebruikte analysemethoden niet dezelfde grootte meten. Met behulp van de zeef wordt de kleinste diameter bepaald, terwijl de Malvern een oppervlakte-diameter, dus een gemiddelde diameter, bepaalt.
- . De cycloonas van run 195 is duidelijk iets grover dan de vlieggas. De grove fractie van de vlieggas komt goed overeen met die van de cycloonas.
- . Er is weinig verschil in de korrelgrootteverdeling tussen assen van runs die gestookt zijn met verschillende soorten Poolse kolen. De verschillende Poolse kolen hebben blijkbaar ongeveer dezelfde hardheid.
- . De bedassen hebben erg weinig deeltjes kleiner dan 350 micrometer. De lijn vertoont hier een vrij scherpe knik.
- . De bedas van run 183 is fijner dan de gemiddelde bedas, en die van run

194 is grover. In bijlage 6 is te zien dat de bedas van run 183 een hoog kalkgehalte heeft en die van run 194 juist een laag kalkgehalte. De gestookte kolen hebben een korrelgrootte van 0-6 mm, terwijl de aan de kolen toegevoegde kalkdeeltjes een korrelgrootte hebben, variërend van 1.5 tot 2.5 mm [1]. De kleinere deeltjes moeten dan overwegend kalkdeeltjes zijn, terwijl de grotere deeltjes geen kalkdeeltjes kunnen zijn. Dit blijkt ook uit de REM-opnamen (zie paragraaf 3.1).

- . Het verschil in kolensoort heeft ook bij de bedassen geen invloed op de korrelgrootteverdeling (runs 180, 189 en 195).
- . In het verleden geanalyseerde assen geven hetzelfde beeld te zien als de vliegass van run 184 [3]. Dit is logisch omdat in beide gevallen de as een hoog koolstofgehalte heeft.

2.4 Selectie assen voor uitgebreide karakterisering

Bij het maken van de keus van 4 vliegassen en 2 bedassen uit de 15 gedeeltelijk gekarakteriseerde assen zijn verschillende criteria gehanteerd. De belangrijkste hiervan is representativiteit. Verder is gekeken naar verschillen in chemische- en fysische eigenschappen. Het heeft namelijk weinig zin twee assen in het verdere onderzoek mee te nemen die vrijwel identiek zijn. Hiermee in verband staand is ook gelet op het verschil in kolensoort. Uiteindelijk zijn de volgende assen gekozen en wel om de erachter staande reden:

- vliegass 180: representatief ("AZC"-condities)
- vliegass 183: afwijkend kalkgehalte
- vliegass 189: NEKAMI-pellets als toeslagmateriaal; andere kolensoort
- vliegass 195: andere kolensoort en hoger koolstofgehalte
- bedas 180: representatief ("AZC"-condities)
- bedas 189: afwijkend kalkgehalte, NEKAMI-pellets als toeslagmateriaal.

3. UITGEBREIDE KARAKTERISERING

Om na te kunnen gaan welke toepassingsmogelijkheden er zijn voor bepaalde assen, is het van belang bepaalde morfologische eigenschappen te kennen. Ook is het voor bijna elke toepassing van belang het uitloog-gedrag van de as te kennen.

Er is daarom onderzoek gedaan naar bepaalde morfologische eigenschappen, het bitumengetal, het specifiek oppervlak en de vorm en consistentie van de as-deeltjes. De onderzoeksresultaten hiervan zullen in paragraaf 1 van dit hoofdstuk besproken worden.

Om het uitlooggedrag te kunnen onderzoeken, moet eerst nagegaan worden welke (voor het milieu schadelijke) elementen, in welke mate, in de as aanwezig zijn. In paragraaf 2 zal daarom de uitgevoerde spoor-elementen-analyse besproken worden. In paragraaf 3 zal bekeken worden welk percentage van deze spoor-elementen in de verschillende assen voor uitloging beschikbaar is.

In paragraaf 4 zal tenslotte uit de zes uitgebreid gekarakteriseerde assen een drietal assen geselecteerd worden voor de standaard uitloogtest.

3.1 Morfologisch onderzoek

In dit morfologisch onderzoek zijn het bitumengetal en het specifiek oppervlak van de assen bepaald, terwijl tevens electronenmicroscopische opnamen van de assen gemaakt zijn.

Bitumengetal

Van de zes assen is onder andere het bitumengetal bepaald. De bepaling is één van de bepalingen, die nodig zijn om te beoordelen of een poeder geschikt is om gebruikt te worden als vulstof in asfalt. De bedassen zijn vooraf gemalen tot alle deeltjes kleiner dan 200 micrometer waren. De bepaling zelf is uitgevoerd volgens de "eisen 1978 voor bouwstoffen in de wegenbouw" van Rijkswaterstaat, proef 58. Het resultaat van deze bepaling is opgenomen in bijlage 9.

Het bitumengetal van de vliegassen varieert van 50 tot 57, dat van de beide gemalen bedassen is 32. Dit houdt in dat de vliegassen, wat het bitumengetal betreft, in aanmerking zouden komen als "middelsoort vulstof" en de gemalen bedassen als "zeer zwakke vulstof". Deze gemeten bitumengetallen zijn

aanmerkelijk lager dan in het verleden gemeten waarden [4]. Deze waarden lagen in de buurt van de 80. Aangenomen mag worden dat dit verschil veroorzaakt is door het verschil in koolstofgehalte van de assen, namelijk ongeveer 12% respectievelijk ongeveer 35%.

Specifiek oppervlak

Naast het bitumengetal is ook het specifiek oppervlak bepaald. De waarde van het specifiek oppervlak is bepalend voor het uitlooggedrag en is van belang voor toepassingen van vliegassen in gebonden vorm. De bepaling is uitgevoerd als 1-punts BET-oppervlak-bepaling door middel van stikstofadsorptie. De bedassen zijn ook voor deze bepaling vooraf gemalen, op dezelfde manier als voor de bepaling van het bitumengetal. De resultaten van deze bepaling zijn eveneens opgenomen in bijlage 9.

Het specifiek oppervlak van de vliegassen ligt, op een enkele uitzondering na, tussen 8 en 12 m²/g, dat van de bedassen tussen 2 en 3 m²/g. Een uitzondering vormt de vliegase van run 195. Het specifiek oppervlak hiervan is erg laag. Wat hiervan de oorzaak is, is niet duidelijk.

Electronenmicroscopische opnamen

Met behulp van een rasterelectronenmicroscop zijn vergrote opnamen gemaakt van de zes assen. Hierbij is gebruik gemaakt van met koolstof opgedampte preparaten (dikte opdamp laag 10 nm). Het opdampen is gedaan met koolstof in plaats van met goud om naast opnamen ook oppervlakte-analyses te kunnen uitvoeren met behulp van EDAX (Energy Dispersive Analysis by X-ray). Deze analyse-methode berust op röntgenspectrometrie en analyseert de oppervlakteverschillen tot een diepte van ongeveer 1 micrometer. Enkele gemaakte foto's zijn opgenomen in bijlage 10.

Naar aanleiding van deze opnamen kunnen de volgende opmerkingen gemaakt worden:

- Koolstof komt zowel voor in deeltjes, die vrijwel geheel uit koolstof bestaan als in deeltjes die slechts gedeeltelijk uit koolstof bestaan. De eerstgenoemde deeltjes zijn onverbrande kooldeeltjes en hebben over het algemeen een diameter van 30 tot 50 micrometer en zien eruit als stukjes "gatenkaas". Duidelijke voorbeelden hiervan zijn te zien op foto 8-195. De tweede soort deeltjes zijn gedeeltelijk verbrande kooldeeltjes en zijn over het algemeen wat groter, met een diameter van ongeveer 80

micrometer. Deze deeltjes hebben meestal een grilliger vorm, met een concentratie mineralen aan de buitenkant. Een duidelijk voorbeeld hiervan is te zien midden op foto 8-180.

In paragraaf 2.2 bleek dat cycloonassen een hoger koolstofgehalte hebben dan doekfilterassen. Het blijkt nu dat bij de vliegassen de meeste koolstof zich bevindt in de middenfractie, wat korrelgrootte betreft, dus in het fijne gedeelte van de cycloonassen, zie ook [9].

- Van nagenoeg alle kalkdeeltjes bestaat de oppervlakteschil voornamelijk uit calciumsulfaat. Alleen de vliegas van run 183, waarbij extra kalk is toegevoegd, bevat kalkdeeltjes met calciumoxide in de schil. Aangezien uit de chemische analyse blijkt dat ook in de andere assen aanzienlijke hoeveelheden calciumoxide voorkomen, kan geconcludeerd worden, dat de kalkdeeltjes maar een beperkte opnamecapaciteit hebben voor zwavaldioxide, namelijk alleen de schil van het deeltje. Er komen zowel grote als kleine kalkdeeltjes voor in de assen. Een groot deeltje is te zien rechtsboven op foto 8-180.
- De mineraaldeeltjes zijn overwegend kleine deeltjes, met een diameter van 1 tot 10 micrometer, hoewel ook enkele grotere mineraaldeeltjes voorkomen. Deze grotere deeltjes lijken te zijn opgebouwd uit kleinere deeltjes, zie midden-onder op foto 8-180.
- De bedasdeeltjes hebben diameters, variërend van 0.35 mm tot ongeveer 5 mm. De kleinere deeltjes lijken voornamelijk kalkdeeltjes te zijn, terwijl vooral de grotere deeltjes uit de kolen afkomstige steentjes lijken te zijn. De eerste deeltjes bevatten voornamelijk calciumcomponenten en verder silicum-, aluminium- en ijzeroxide. De laatste bestaan voornamelijk uit aluminium of silicum, met de andere drie elementen ondervertegenwoordigd (zie paragraaf 2.3).

3.2 Spoor-elementen-analyse

Om bij de beschikbaarheidstest en de standaard-uitloogtest na te kunnen gaan welk percentage van een bepaald element is uitgeloozd, zal eerst nagegaan moeten worden hoeveel van dat element in de betreffende as aanwezig is. Om dat na te gaan, is op de zes assen een spoor-elementen-analyse uitgevoerd.

Vooraf moest een keuze gemaakt worden uit alle in kolenassen voorkomende elementen. Deze keuze is gemaakt aan de hand van reeds eerder verricht on-

derzoek [2] [3] [5], en de normen gesteld in de "Leidraad Bodemsanering" [8]. Gekeken is of het element in redelijke concentratie in de reeds onderzochte assen aanwezig was, of het element enigermate uitgeloopte en/of de concentratie bij uitloging in de buurt van de gestelde norm zou kunnen komen. De keuze is gevallen op de volgende spoor-elementen: antimon, arseen, chroom, lood, molybdeen, vanadium en zink. Tevens is kalium in dit onderzoek meegenomen om vergelijking met eerder uitgevoerd onderzoek mogelijk te maken.

De bij deze analyses gevolgde procedures zijn weergegeven in tabel 3.1.

Grootheid	Procedure
Antimon en Arseen	AAS-hydridetechniek, na ontsluiting in een ontsluitingsbom, in koningswater en waterstoffluoride
Chroom, Lood en Molybdeen	AAS-grafietoventechniek, na ontsluiting volgens de Silberman-Fisher-methode, uit N.V.N. 2507
Kalium, Vanadium en Zink	AAS-vlamtechniek, na ontsluiting volgens dezelfde Silberman-Fisher-methode

Tabel 3.1: Gevolgde procedures bij spoor-elementen-analyse.

De resultaten van deze spoor-elementen-analyse zijn opgenomen in bijlage 11. Hieruit blijkt dat:

- . Het gehalte aan kalium voor alle assen in dezelfde orde van grootte ligt, tussen 1 en 2%, ofwel tussen 10.000 en 20.000 parts per million (ppm) ofwel tussen 10.000 en 20.000 mg/kg.
- . Het chroomgehalte rond de 110 ppm ligt. Een uitzondering vormt de bedas van run 180, waarvan het chroomgehalte veel hoger is. Dit komt hoogst waarschijnlijk doordat contaminatie is opgetreden. Deze bedas is namelijk gemalen in een molen met roest-vast-stalen maalringen, waarin ook chroom verwerkt is.
- . Het loodgehalte in de vliegassen iets lager is dan in de bedassen, namelijk 100 ppm respectievelijk ongeveer 150 ppm.
- . Ditzelfde ook geldt voor het zinkgehalte, namelijk ongeveer 120 ppm respectievelijk ongeveer 190 ppm.

- . Het vanadiumgehalte een spreiding vertoont van 150 tot 320 ppm.
- . Het antimoongehalte varieert van 3 tot 16 ppm.
- . Het arseengehalte in de vliegassen beduidend hoger is dan in de bedassen, namelijk ongeveer 18 ppm respectievelijk 8 ppm.
- . Het molybdeengehalte varieert van 8 tot 17 ppm.

Als deze gemeten concentraties getoetst worden aan de in de Leidraad Bodemsanering gestelde normen, volgt dat de zink- en arseengehaltes beneden de A-, of referentiewaarden liggen. Verder blijkt dat de chroom-, lood- en molybdeengehaltes beneden de B-, of toetsingswaarde ten behoeve van (nader) onderzoek, liggen. Voor geen enkel element wordt de C-, of toetsingswaarde ten behoeve van sanering(sonderzoek) bereikt. Calcium, kalium, vanadium en antimoon worden niet genoemd in de genoemde Leidraad.

3.3 Zuur-base- en beschikbaarheidstest

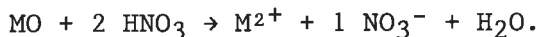
Om in korte tijd na te kunnen gaan welk percentage van een element op on-eindig lange termijn zou kunnen uitlogen, wordt meestal een beschikbaarheidstest gedaan. Hiermee wordt in feite de maximale uitloogbaarheid bepaald. Tevens is het nuttig het zuur-base-gedrag van een as te kennen. De pH bepaalt in belangrijke mate het tijdseffect van de uitloging. De meeste metaalhydroxiden zijn slecht oplosbaar, zodat de uitloging onder basische omstandigheden gering is.

De zuur-base-test en de beschikbaarheidstest zijn gekoppeld uitgevoerd, de zuur-base-test volgens SOSUV-procedure [6], de beschikbaarheidstest volgens "Ontwerp NVN 2508", onder "Bepaling van de maximale uitloogbaarheid".

De resultaten van dit gedeelte van het onderzoek zijn opgenomen in bijlage 12. Naar aanleiding van deze resultaten kan het volgende geconcludeerd worden:

- . De pH, zowel na 1 minuut als na 10 minuten, is ruim boven de 10, namelijk rond pH = 12. Het asmateriaal is dus sterk basisch en heeft een grote buffercapaciteit, waardoor de pH van regenwater, pH = 4-6, in de praktijk niet gemakkelijk bereikt zal worden. Met andere woorden de gemeten beschikbaarheid zal voor die elementen, waarvan de hydroxiden slecht oplossen in de praktijk vrijwel nooit bereikt worden.

- . De hoeveelheid zuur die nodig is om de pH op vier te houden, is een maat voor de hoeveelheid asmateriaal dat uitgeloogd is. Basische metaaloxiden reageren namelijk met salpeterzuur. Bijvoorbeeld een metaaloxide met een tweewaardig metaalion reageert als volgt:



Bij de beschikbaarheidstest is 30-40 ml 1 N HNO₃, dat is 30-40 mgeq. H⁺ per 8 g. as verbruikt om de pH gedurende 4 uur op 4 te houden.

- . De bedas van run 189 maakt hierop een uitzondering. Hieraan is maar 12 ml zuur toegevoegd. De verklaring hiervoor is dat in de bedas van run 189 weinig calciumoxide aanwezig is. Calciumoxide is namelijk groten-deels verantwoordelijk voor de hoge pH.
- . De beschikbaarheid van calcium is voor de vliegassen ongeveer 80%, voor de bedassen ongeveer 70%.
- . Voor kalium is dit voor alle assen ongeveer 4-5%.
- . Chroom is in de vliegassen beter beschikbaar dan in de bedassen. De uitloogpercentages zijn respectievelijk 1-6% en ongeveer 0.4%.
- . Voor lood varieert de beschikbaarheid voor de vliegassen van 1 tot 4% en voor de bedassen van 6 tot 11%.
- . Bij zink varieert de beschikbaarheid voor vliegass van 20 tot 25%, terwijl deze voor de bedassen ongeveer 7% is.
- . De beschikbaarheid van vanadium ligt tussen 7 en 17%.
- . Voor antimoon vertoont deze een zeer sterke spreiding, namelijk van 13 tot 47%. Het is moeilijk hiervoor een verklaring te geven.
- . De arseen-beschikbaarheid vertoont eveneens een sterke spreiding, van 1 tot 18%. Van arseen is bekend dat het zeer pH-gevoelig is, wat uitloging betreft.
- . De beschikbaarheid van molybdeen varieert van 10 tot 20%.

De uitloogbaarheid van sommige elementen wordt beïnvloedt door aanwezigheid van calciumionen. Gezien de hoge calciumconcentratie in de oplossing bij de beschikbaarheidstest zal dit hier ook het geval zijn. Voor deze elementen is een éénstaps beschikbaarheidstest onvoldoende, en zou een tweede stap uitgevoerd moeten worden [10].

De resultaten van de beschikbaarheidstest komen in grote lijnen overeen met de resultaten van eerder gedaan onderzoek [5]. De elementen waarvan de beschikbaarheid een grote spreiding vertoont over de assen, zijn die elementen die, wat uitloging betreft, pH-gevoelig zijn, arseen, antimoon, lood en iets minder, chroom.

3.4 Selectie assen voor SU-test

Uit de zes uitgebreid gekarakteriseerde assen zijn drie assen gekozen, waarop de volledige standaard-uitloog-test uitgevoerd is.

Bij lopende projecten, waarin de mogelijkheden voor de verwerking van AFBB-reststoffen worden onderzocht, zijn assen gekozen, die gestookt zijn onder "AZC"-condities, zoals de assen van run 180.

Om de resultaten van de SU-test bij deze onderzoeken te kunnen gebruiken, en tevens omdat deze as representatief genoemd wordt voor in de toekomst te produceren AFBB-assen, is zowel de vlieg- als de bedas van run 180 gekozen voor de SU-test.

Als derde as is gekozen voor de vliegas van run 189 omdat op het moment van keuze van de as van run 195 nog niet alle gegevens beschikbaar waren en, wat 183 en 189 betreft, ander toeslagmateriaal (189) interessanter leek dan meer toeslagmateriaal (183), temeer daar de beschikbaarheid van met name arseen en vanadium van de vliegas van run 189 fors afwijkt van die van de vliegas van run 180.

4. STANDAARD-UITLOOGTEST

Om een beeld te krijgen van het uitlooggedrag van vliegass, bijvoorbeeld van in de open lucht opgeslagen vliegass, is uitloogonderzoek uitgevoerd door middel van de Standaard-Uitloogtest, die ontwikkeld en beschreven is door de SOSUV [6].

In dit hoofdstuk zullen de kolomtest en de cascade-schudtest, beide onderdeel van de SU-test, in paragraaf 1 respectievelijk paragraaf 2 beschreven worden. In paragraaf 3 zullen de resultaten van beide tests bekeken worden. Tenslotte zal in paragraaf 4 getracht worden een relatie te leggen tussen de uitgevoerde lab-proeven en te verwachten situaties in de praktijk.

4.1 Kolomtest

Met behulp van de kolomtest wordt percolatie van regenwater door gestorte vliegass nagebootst. De enige factor die anders is dan in een praktijk situatie, is de toevoer van het (regen)water. Hierdoor kan in een tijdsbestek van ongeveer drie weken de percolatie van regenwater door een vliegassopslag gedurende ongeveer 50 jaar gesimuleerd worden. Het doel van de kolomtest is dan ook, aan de hand van de testresultaten, het uitlooggedrag van de as in een opslag op korte en middellange termijn te kunnen voorspellen. Belangrijk is daarom dat een te testen monster representatief is voor de totale hoeveelheid.

Wat de uitvoering van de test betreft, de gebruikte kolommen hebben een diameter van 5 cm en een hoogte van ongeveer 20 cm. De kolommen zijn gevuld volgens "BEOP-25". De kolommen zijn in opwaartse richting doorstroomd met demi-water, aangezuurd met salpeterzuur tot $\text{pH} = 4$, om regenwater te simuleren. Er zijn monsters genomen bij de volgende L/S-verhoudingen: 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5 en 10. In de L/S-verhouding is S de hoeveelheid uit te logen (as)materiaal (in kilogram) en L de hoeveelheid percolaat (in liter), waarmee het in contact geweest is. De eerste monsters worden dus vrij snel na elkaar genomen. Dit is om ook voorspellingen te kunnen doen over de uitloog in de praktijk op korte termijn, dat wil zeggen tussen 1 en 5 jaar.

De beide vliegassen zijn door het erin aanwezige hoge kalkgehalte al gedurende de test gaan uitharden. Doordat tevens het porievolume door het stampen bij het vullen van de kolom klein was, kon na een periode van 11 dagen het uitloogmedium niet meer door de kolom geperst worden. De test is dan

ook gestopt vóór het monster bij L/S-verhouding 5 genomen kon worden.

De opgevangen monsters zijn aangezuurd met 5 N salpeterzuur tot ongeveer pH is 2, waarna de monsters geanalyseerd zijn op de matrix-elementen Ca en K en op de spoor-elementen Sb, As, Cr, Pb, Mo, V en Zn. De analyses zijn uitgevoerd door middel van AAS-hydridetechniek voor Sb en As en met behulp van AAS-vlamtechniek voor de overige elementen, waarbij voor Cr, Pb, Mo en V de oplossingen een factor 10 geconcentreerd zijn. De resultaten van zowel de kolom- als de cascade-schudtest zijn grafisch weergegeven in bijlage 13 en worden besproken in paragraaf 4.3.

4.2 Cascade-schudtest

De cascade-schudtest wordt over het algemeen uitgevoerd bij grotere L/S-verhoudingen. Dit om iets te kunnen zeggen over het uitlooggedrag van materialen in praktijksituaties waarin het uit te logen materiaal in korte tijd met veel vloeistof in contact komt, of waarin het materiaal gedurende lange tijd met weinig vloeistof in contact komt. Dit kan uiteraard ook met behulp van de kolomtest onderzocht worden, maar dat vergt veel tijd. De cascade-schudtest is vele malen sneller uit te voeren, hoewel, door de batchgewijze in plaats van propstroomsgewijze uitvoering de overeenkomst met de praktijksituatie minder is, waardoor de nauwkeurigheid achteruit gaat.

Het is van belang ook iets te kunnen zeggen over het uitlooggedrag van verbrandingsresiduen op langere termijn, omdat de uitloging van veel elementen afhankelijk is van de zuurgraad. Door het basische karakter van de assen wordt het zure uitloogmedium in eerste instantie geneutraliseerd. Pas na verloop van tijd, als het uitloogbare deel van de basische oxiden uitgelooft is, zal de pH van de suspensie gaan dalen, waarna de elementen die in zuur milieu oplossen, zullen gaan uitlogen. Dit betekent dat sommige elementen een uitloogpiek te zien zullen geven bij grote L/S-verhouding.

De cascade-schudtest is uitgevoerd volgens "BEOP-25", waarbij het vaste uit te logen materiaal gemengd wordt met de vloeistof, in (L/S-)verhouding 20. Hierna wordt de suspensie gedurende 23 uur geschud of gerold om een goed contact tussen de vloeistof en vaste stof te garanderen. Vervolgens wordt de vaste stof afgefiltreerd en opnieuw gesuspenderd in vers uitloogmedium. Van het filtraat wordt een monster genomen. Dit proces is vier keer herhaald, de schudtest is dus vijf keer in cascade uitgevoerd. De totaal uit-

geloogde hoeveelheid is een sommatie van die hoeveelheden in de verschillende stappen.

Ook bij deze test zijn de monsters aangezuurd tot $\text{pH} = 2$ en op dezelfde manier geanalyseerd.

4.3 Resultaten SU-test

De resultaten van de SU-test, zowel van de kolom- als de cascade-schudtest, zijn opgenomen in bijlage 13. Aan de hand van deze resultaten in grafiekvorm zullen achtereenvolgens kort besproken worden: het pH-gedrag, het uitlooggedrag van de matrix-elementen calcium en kalium en het uitlooggedrag van de spoor-elementen antimon, arseen, chroom, lood, molybdeen, vanadium en zink.

pH-gedrag (zie bijlage 13, blad 1)

De pH van de uitloogvloeistof schommelt bij L/S-verhoudingen kleiner dan 40 voor alle drie de assen tussen 12.2 en 12.4, overeenkomend met de pH na 10 minuten bij de zuur-basetest. Dit betekent dat de hydroxideconcentratie ongeveer 0.02 mol per liter is. Deze hydroxide-ionen zijn gevormd door opname van water door basische oxiden, met name calciumoxide. Dit blijkt ook wel uit het vervolg van de pH-curve als functie van de L/S-verhouding. Na $\text{L/S} = 40$ daalt de pH bij de vliegassen naar ongeveer 11. Deze daling komt overeen met een daling in de uitloging van calcium(oxide). Bij de bedas blijft de pH na $\text{L/S} = 40$ op hetzelfde niveau. Zie voor een verklaring hiervoor onder "calcium".

Calcium (zie bijlage 13, blad 2)

Tot een L/S-verhouding van 20 bij de vliegassen en van 40 bij de bedas is de calcium-uitloging ongeveer constant met een calciumconcentratie in de uitloogvloeistof tussen 1100 en 1500 ppm. Dit constant zijn komt door limitering van de uitloging door maximale oplosbaarheid van calciumhydroxide. De oplosbaarheid van Ca(OH)_2 is volgens de literatuur 1,3 g/l, wat resulteert in een pH van 12,5. Tevens kan op grond van ionen-activiteiten berekend worden dat het oplosbaarheidsprodukt van calciumsulfaat, $2.45 \cdot 10^{-5}$, overschreden wordt (het ionenprodukt is $6 \cdot 10^{-5}$) en dat er dus een oververzadiging optreedt van calciumsulfaat. Dit blijkt ook uit het feit dat na verloop van tijd (minimaal enkele dagen) in de uitloogvloeistof calciumsul-

faat in de vorm van naalden neerslaat. Dit gaat door tot, bij vliegassen, $L/S = 40$ en bij bedas $L/S = 80$. Bij deze L/S -verhoudingen gaat de calciumconcentratie dalen terwijl de pH nog enige tijd constant blijft. Het beschikbare deel van het calciumsulfaat is nu ongeveer uitgeloozd, terwijl dat bij calciumhydroxide nog niet het geval is. Dit is vooral goed te zien bij de bedas, omdat in de bedas het gehalte aan calciumoxide twee maal zo hoog is als dat aan calciumsulfaat, terwijl in de vliegassen deze gehalten ongeveer gelijk zijn. De pH blijft bij de bedas constant op 12.4, terwijl de calciumconcentratie al met een factor twee gedaald is bij $L/S = 100$.

Omdat in een praktijksituatie de uitloging minder snel zal gaan, zal de hier geconstateerde oververzadiging van calciumsulfaat daar waarschijnlijk niet, of in geringere mate, optreden. De calciumconcentratie in de uitloogvloeistof zal dan lager zijn, zodat de goed uitloegbare calcium-fractie eerst bij een grotere L/S -verhouding uitgeloozd zal zijn.

Bij vliegase daalt de calciumconcentratie na $L/S = 40$ vrij snel tot beneden 100 ppm. Voor de bedas is deze daling veel minder snel, namelijk tot ongeveer 800 ppm bij $L/S = 100$.

De goed uitloegbare calciumfractie is voor vliegase ongeveer 50%, voor bedas meer dan 60%. Dit komt in de buurt van de voor uitloging beschikbare fractie. Bij $L/S = 100$ is voor vliegase het grootste deel van het beschikbare calcium uitgeloozd.

Kalium (zie bijlage 13, blad 3).

In het eerste monster van de kolomtest is erg veel kalium aanwezig. Er is blijkbaar een klein gedeelte van het kalium dat erg goed beschikbaar is. Waarschijnlijk is dit het uit het toeslagmateriaal afkomstige kalium.

Een op het eerste gezicht vreemd verschijnsel is dat het uitloogpercentage bij $L/S = 20$ ineens veel lager is dan dat bij $L/S = 10$. Dit is tevens de overgang van kolom- naar cascade-schudtest. Het lijkt erop dat de diffusiesnelheid van kalium in de as-matrix erg laag is, en daarmee de snelheidsbepalende stap in het uitloogproces. Bij de kolom-test krijgt dit diffusieproces drie weken de tijd voor $L/S = 10$ bereikt is, terwijl bij de cascade-schudtest dit proces voor $L/S = 20$ na 23 uur al gestopt wordt. Het constant zijn van de kaliumconcentratie tussen $L/S = 0.5$ en 5 bij de bedas wijst ook in deze richting. Dat de kalium-concentratie bij de vliegassen in dit gebied wat oploopt, is te wijten aan een daling van het percolaatdebiet

door het uitharden en dichtslaan van de kolommen. Ook uit eerder gedaan onderzoek blijkt deze diffusie-limitering [5]. Als de daar gemeten kalium-concentraties uitgezet worden tegen de tijd, blijkt het verband hiertussen van $L/S = 2$ tot $L/S = 100$ vrijwel lineair te zijn.

Deze diffusielimitering zou ook de oorzaak kunnen zijn van het feit dat er meer uitloopt dan er volgens de beschikbaarheidstest voor uitloging beschikbaar is. Blijkbaar is bij de beschikbaarheidstest de duur van vier uur, ondanks het zure milieu, niet voldoende om al het in werkelijkheid beschikbare kalium uit te logen.

Antimoon (zie bijlage 13, blad 4).

De lijnen in de figuren op blad 4 van bijlage 13 geven niet het echte uitlooggedrag weer maar de absolute bovengrens. Er is slechts één waarde gevonden boven de meetgrens van 2 ppb ofwel 0.002 ppm. Voor alle drie de assen geldt dus dat antimoon tot $L/S = 100$ slechts in zeer geringe mate uitloopt, waarschijnlijk minder dan 1%. Over wat daarna gebeurt kan uiteraard niets zinnigs gezegd worden. De uitloging tot $L/S = 100$ blijft ver beneden de beschikbaarheid, die ligt tussen 13 en 20%.

De uitloging van antimoon is waarschijnlijk pH-gevoelig (zie onder "arseen"). Dit is namelijk ook gevonden bij uitloging van poederkoolvliegias [11].

Arseen (zie bijlage 13, blad 5)

Voor arseen geldt in grote lijnen hetzelfde als voor antimoon. Ook hier zijn slechts twee meetbare waarden gevonden, rond $L/S = 40$, bij vliegias 180. De uitloging blijft hier ook beneden de 1% en ver beneden de beschikbaarheid.

De uitloging van arseen is afhankelijk van de pH [5]. In basisch milieu loopt arseen slechts in geringe mate uit. De pH is weer afhankelijk van de uitloging van met name calciumoxide. De pH gaat pas dalen in de buurt van $L/S = 80$ voor vliegias en voor bedas niet tot en met $L/S = 100$. Waarschijnlijk zal bij grotere L/S -verhoudingen arseen wel gaan uitlogen.

Door het verschil in zuur-basagedrag van wervelbedas en poederkool-vliegias en de pH-afhankelijkheid van arseen-uitloging is er ook een flink verschil in arseen-uitloging tussen wervelbedas en poederkool-vliegias [5]. Bij poederkoolvliegias begint arseen al uit te logen ongeveer bij $L/S = 5$.

Chroom (zie bijlage 13, blad 6)

De chroomuitloging, bezien op blad 6, lijkt wat grilliger te verlopen. Dit komt echter vooral door de fijne schaalverdeling en door de vrij grote relatieve meetfout bij het meten van zulke lage concentraties.

Grofweg daalt de concentratie van 10-50 ppb naar ongeveer 3 ppb bij L/S = 3. Daarna blijft de concentratie voor de bedas vrij laag, terwijl de vliegassen nog een stijging te zien geven tot 30-40 ppb bij L/S = 20 en weer een daling bij L/S = 50.

Het percentage chroom dat uitloopt is bij de vliegassen ongeveer 1.5%, bij de bedas minder dan 0.1%. Dit is, evenals het beschikbare deel, waarschijnlijk het in de as aanwezige zeswaardige chroom, dat als CrO_4^{2-} in oplossing kan gaan [5]. Driewaardig chroom loopt slecht uit bij hoge pH door de slechte oplosbaarheid van $\text{Cr}(\text{OH})_3$.

Bij vliegass 180 lijkt er meer uit te logen dan er beschikbaar is. Dit verschil valt echter binnen de fout-marge bij het meten van de chroomconcentratie in de beschikbaarheidstest.

Lood (zie bijlage 13, blad 7)

De concentratie in de uitloogvloeistof daalt bij de vliegassen van ongeveer 100-200 ppb tot beneden de detectiegrens van 6 ppb bij L/S = 70. Er is dan ongeveer 1% uitgeloozd, wat duidelijk minder is dan de beschikbare fractie namelijk ongeveer 4%.

Bij de bedas neemt de concentratie in de uitloogvloeistof juist weer toe tot 50 ppb bij L/S = 100. Er is dan, bij L/S = 100, ongeveer 3% uitgeloozd. De beschikbaarheid is bij de bedas ook veel groter, namelijk 11%. De gemakkelijk uitloogbare fractie (ongeveer 1%) zou heel goed het lood uit de kalk kunnen zijn, en de rest het lood uit de kolen [1].

Molybdeen (zie bijlage 13, blad 8)

Molybdeen vertoont een maximum in de uitloging, ongeveer bij L/S = 1. De concentratie is dan ongeveer 0.2-1.0 ppm. Deze concentratie daalt daarna tot ongeveer 10 ppb bij L/S = 100. Er is dan een groot gedeelte van het aanwezige molybdeen uitgeloozd, namelijk ongeveer 40%.

Een mogelijke verklaring voor het feit dat er meer lijkt uit te logen dan er beschikbaar is, is dat molybdeen in het basisch milieu van de SU-test

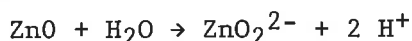
(pH = 12.3) beter uitloogt dan in het zure milieu van de beschikbaarheidstest (pH = 4). Dit is ook gevonden bij onderzoek aan poederkoolvliegass [11].

Vanadium (zie bijlage 13, blad 9)

Er loogt maar weinig vanadium uit [5]. De concentratie in de uitloogvloei-stof daalt van 50-100 ppb tot beneden 20 ppb bij L/S = 2 en stijgt daarna weer. Tot L/S = 100 is ongeveer 2% van het in de as aanwezige vanadium uitgelooft, wat beduidend minder is dan er beschikbaar is. Waarschijnlijk gaat de uitloging van vanadium na L/S = 100 gewoon door. De uitloging van vanadium is vergelijkbaar met eerder uitgevoerd onderzoek [5].

Zink (zie bijlage 13, blad 10)

Het uitgelooft zink kan niet als Zn^{2+} in de uitloogvloei-stof aanwezig zijn, omdat de oplosbaarheid van zinkhydroxide erg laag is. Waarschijnlijk worden er zinkaat-ionen gevormd volgens:



Dit zinkaat-ion kan wel in oplossing gaan.

De zink-concentratie varieert tot L/S = 60 tussen 100 en 300 ppb, met, althans gemeten bij de bedas, een scherpe daling bij L/S = 5 en een stijging tot het oude niveau bij L/S = 20. Wat de oorzaak van deze daling is, is niet duidelijk. Na L/S = 60 daalt de concentratie snel tot beneden de detectiegrens, 10 ppb. Er is dan 5-15% uitgelooft, hetgeen ongeveer overeenkomt met de beschikbare fractie.

4.4 Relatie lab-proeven - praktijksituaties

Het doel van het onderzoek was om aan de hand van in korte tijd uit te voeren proeven voorspellingen te kunnen doen over het uitlooggedrag van de onderzochte vliegassen in praktijksituaties. De belangrijkste parameter hierbij is de L/S-verhouding. Als in de praktijksituatie een schatting gegeven kan worden van de te verwachten L/S-verhouding, kan aan de hand van de onderzoeksresultaten een uitspraak gedaan worden over de te verwachten uitloging van de verschillende elementen.

Als voorbeeld zal voor de drie onderzochte assen een voorspelling gegeven worden van de uitloging van een opslag, afhankelijk van de tijd en de hoog-

te.

Stel dat de opslag een hoogte heeft van 5 meter en dat regenwater alleen van bovenaf kan binnendringen. Als de vliegass van run 180 genomen wordt, waarvan het stortgewicht 1114 kg/m^3 is (zie bijlage 7), bevindt zich onder een vierkante meter $5 \times 1114 = 5.570 \text{ kg}$ vliegass. Ervan uitgaande dat het 750 mm regent in een jaar, waarvan 250 mm verdampt, komt die 5.570 kg vliegass in aanraking met 500 l water. Uit deze gegevens kan de L/S-verhouding na een jaar berekend worden: $500 / 5.570 = 0.09$. Uit de grafieken van bijlage 12 kan nu voor de verschillende elementen afgelezen worden hoeveel procent van de in de as aanwezige hoeveelheid uitgelooft is. In tabel 4.1 zijn meerdere berekende waarden weergegeven.

	Vliegass 180		Vliegass 189		Bedas 180	
Stortheogte in meters	L/S=1 na ... jaar	L/S=20 na ... jaar	L/S=1 na ... jaar	L/S=20 na ... jaar	L/S=1 na ... jaar	L/S=20 na ... jaar
1	2.2	45	2.1	41	2.8	56
2	4.5	89	4.1	82	5.6	110
5	11	220	10	200	14	280
10	22	450	21	410	28	560

Tabel 4.1: Voorspelling van het aantal jaren waarna L/S = 1 en 20 bereikt wordt, afhankelijk van de stortheogte.

Er bestaan nog geen getalsmatige normen, waaraan de resultaten van het uitloogonderzoek kunnen worden getoetst. Om de resultaten toch enigermate te kunnen beoordelen, is een vergelijking gemaakt met de "Leidraad Bodemsanering" [8].

De arseenconcentratie blijft tot L/S = 100, in de beschreven opslagsituatie, tenminste 1.000 jaar beneden de A- of referentiewaarde. De chroomconcentraties komen wel tijdelijk boven de A-waarde, maar niet boven de B- of toetsingswaarde ten behoeve van (nader) onderzoek.

De loodconcentratie komt de eerste tijd, tot L/S = 1, dus tot ongeveer 10 jaar, boven de B-waarde en voor één van de vliegassen het eerste jaar boven de C- of toetsingswaarde ten behoeve van sanering(sonderzoek). Dit geldt ook voor zink. De zinkconcentratie schommelt gedurende ruwweg 700 jaar, tot L/S = 70, rond de B-waarde.

De molybdeenconcentratie is, volgens deze norm, wel erg hoog, namelijk tot $L/S = 40$, dus ongeveer gedurende 400 jaar, boven de C-norm.

De overige onderzochte metalen, calcium, kalium, antimoon en vanadium worden niet genoemd in de leidraad.

5. VALIDATIE REKENMODEL AFBB

Om uitspraken te kunnen doen over de samenstelling van toekomstige wer-
velbedassen met betrekking tot de gehalten aan de verschillende erin
voorkomende verbindingen is, in eerste instantie voor intern gebruik, een
model opgesteld. Hiermee kan, afhankelijk van de belangrijkste procespara-
meters bij de AFBB-verbranding van steenkool, de samenstelling van de ge-
produceerde reststoffen berekend worden [7].

Het model gaat uit van de materiaalbalans over de vaste-stofstromen in het
verbrandingsproces. De ingaande stromen zijn kolen en toeslagmateriaal. Als
uitgaande stromen zijn een top-stroom (vliegas) en een bodemstroom (bedas)
aangenomen. Omdat het een overall materiaalbalans betreft, zijn de interne
stofstromen (terugstoken) niet van belang.

Als variabele procesparameters kent het model:

1. Koolstofrendement
2. Gehalte aan minerale bestanddelen in de kolen (asgehalte)
3. Zwavelgehalte in de kolen
4. Molaire calcium/zwavel-verhouding (Ca/S)
5. Rendement ontleding calciumcarbonaat
6. Zwavelbindingsrendement
7. Verhouding minerale bestanddelen in vliegas en bedas
8. Verhouding siliciumoxide in vliegas en bedas
9. Verhouding calciumverbindingen in vliegas en bedas
10. Verhouding koolstof in vliegas en bedas.

Silicium is apart genomen (de overige minerale bestanddelen zijn onder één
noemer gebracht) omdat silicium preferent in de bedas terecht komt. Dit
komt waarschijnlijk door de vrij grote in de kolen voorkomende steentjes
(kwartsdeeltjes), zie ook paragraaf 3.1.

Voor één bepaalde kolensoort blijven de paramters 2 en 3 constant, terwijl
als de stookcondities hetzelfde zijn, ook de parameters 1,5,7,8,9 en 10
constant verondersteld mogen worden. Het zwavelbindingsrendement wordt
berekend uit de Ca/S-verhouding, zodat bijvoorbeeld voor de runs 180, 182
en 183, de Ca/S-verhouding de enige variërende ingangsvariabele is, naast
de ingaande kolenstroom.

Het doel van de validatie van dit model is nu na te gaan of er een set
parameters gevonden kan worden, waarmee onder standaard-stookcondities,
uitgaande van het koolstof-, zwavel- en asgehalte van de kool, binnen een

zekere marge, de samenstelling van de te produceren reststoffen voorspeld kan worden. Hierbij zou de Ca/S-verhouding berekend moeten worden uit het zwavelgehalte van de kool en de wettelijk toelaatbare SO₂-uitstoot.

Voor de validatie is tot nog toe alleen gekeken naar de runs 180, 182 en 183, die alle drie gestookt zijn met Poolse kolen 5. Na enig experimenteren met de verschillende parameters, is voor het koolstof- en calciumcarbonaat-ontledingsrendement een waarde van 98% gekozen, voor de vlieg-as-bedasverhouding van koolstof 250 en voor de vlieg-as-bedasverhouding van de verschillende minerale componenten waarden variërend van 2 tot 6. Een overzicht van deze parameters en best-passende waarden daarvoor is gegeven in bijlage 14.

Hierna is voor de drie runs de assamenstelling berekend. Deze berekende waarden zijn vergeleken met de gemeten waarden (zie bijlage 15).

De berekende waarden wijken, over het algemeen, niet meer dan 10% af van de gemeten waarden. Dit betekent dat het model, ondanks de eenvoudige opzet ervan, een redelijk tot goede voorspellende waarde heeft.

Omdat van de bij andere runs gestookte kolen nog geen gegevens bekend waren, is nog niet gekeken naar de relatie tussen kool-samenstelling en de verschillende rendementen en verhoudingen (parameters 1,5,7,8,9 en 10).

Als meer gegevens beschikbaar zijn, ook over andere kolensoorten, zal uitgebreider gerapporteerd worden over het rekenmodel en de validatie ervan.

6. CONCLUSIES

Naar aanleiding van het uitgevoerde onderzoek en de verkregen onderzoeksresultaten kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- * Het koolstofgehalte van de wervelbedvliegassen, geproduceerd onder "AZC"-condities, is ongeveer 12%. Dit is beduidend lager dan van in het verleden geproduceerde vliegassen. Het koolstofgehalte van de bijbehorende bedassen is lager dan 1%.
- * Het gehalte aan calciumverbindingen varieert in de vliegassen afhankelijk van de molaire Ca/S-verhouding, van 8% (Ca/S=0) tot 30% (Ca/S=3.5) en in de bedassen van 10% tot 40%. Het gehalte aan $\text{Ca}(\text{CO})_3$ is steeds lager dan 1%. Het gehalte aan CaO en $\text{Ca}(\text{SO})_4$ is in de vliegassen ongeveer even hoog, in de bedassen is dat aan CaO hoger.
- * Bij toevoeging van de bij run 189 gebruikte NEKAMI-pellets als toeslagmateriaal is het gehalte aan calciumoxide in de bedas lager dan bij gebruik aan Engis kalksteen.
- * De absolute dichtheid van vliegassen en bedassen is respectievelijk ongeveer 2400 en 2800 kg/m³, het stortgewicht respectievelijk ongeveer 1100 en 1400 kg/m³.
- * De korrelgrootte van de gekarakteriseerde reststofdeeltjes varieert voor vliegassedeeltjes van 2 tot 300 micrometer ($d_{50} = 40$), voor cycloonasdeeltjes van 10 tot 300 micrometer ($d_{50} = 70$) en voor bedasdeeltjes van 0.4 tot 5 millimeter ($d_{50} = 1.2$).
- * De korrelgrootte en de -verdeling van bedassen zijn gecorreleerd aan het kalkgehalte ervan. Als het kalkgehalte hoger is, zijn er meer fijne deeltjes aanwezig.
- * Het bitumengetal van de vliegassen is ongeveer 55, dat van de (gemalen) bedassen 32. Het specifiek oppervlak is voor vliegassen en bedassen ongeveer 10 respectievelijk ongeveer 3 m²/g.
- * Uit de REM-opnamen blijkt dat de vlieg- cycloonassen bestaan uit drie soorten deeltjes, namelijk koolrijke, kalkrijke en mineraalrijke deeltjes. De bedassen bestaan voornamelijk uit kalkrijke en mineraalrijke deeltjes.
- * Het stortgewicht van vliegassen blijkt afhankelijk te zijn van het koolstofgehalte (zie paragraaf 2.3). Hieruit kan geconcludeerd worden dat het stortgewicht van de onverbrande kooldeeltjes vrij laag is. Dit blijkt ook uit de REM-opnamen. Deze deeltjes hebben namelijk een

"gaten-kaasstructuur" (zie paragraaf 3.1).

- * De in de assen aanwezige hoeveelheden spoor-elementen (zware metalen) zijn vergelijkbaar met die in poederkoolvliegassen.
- * De assen hebben, gesuspendeerd in water, (de bedassen in gemalen toestand), een pH van ongeveer 12.4, wat overeenkomt met de pH van een verzadigde calciumhydroxide-oplossing.
- * Het percentage van het betreffende element dat beschikbaar is voor uitloging, is voor calcium hoog (>40%), voor antimoon, molybdeen en zink (vliegassen) gemiddeld (10-40%), voor kalium, chroom, lood en zink (bedassen) laag (<10%), terwijl arseen en vanadium een spreiding vertonen van 1 tot 20%.
- * Door het hoge gehalte aan calcium-componenten gaat vliegase na contact met water vrij snel uitharden. Bij opslag van deze vliegase zal zich bij contact met water waarschijnlijk een harde korst vormen, waardoor het regenwater niet of in zeer geringe mate zal percoleren. Het grootste gedeelte van het water zal naar de zijanten afvloeien.
- * Doordat calciumoxide bij vliegassen pas bij L/S = 100 voor het grootste deel is uitgeloozd, is de pH bij L/S = 100 nog maar weinig gedaald (pH = 11). Bij de bedase is de pH in het geheel nog niet gedaald bij L/S = 100. Hierdoor wordt geen duidelijk beeld verkregen van de uitloging van die elementen die eerst bij lagere pH gaan uitlogen.
- * Genormeerd aan de "Leidraad Bodemsanering" van het ministerie van VROM is de concentratie in de uitloogvloeistof voor arseen en chroom, tot L/S = 100 laag, voor lood tot L/S = 1 en voor zink tot L/S = 70 tamelijk hoog en voor molybdeen tot L/S = 40 erg hoog. Aan calcium, kalium, antimoon en vanadium is geen norm gesteld.
- * Het eenvoudige, op een overall-materiaalbalans gebaseerde rekenmodel heeft een redelijke tot goede voorspellende waarde.

7. LITERATUUR

- [1] A.W.M.B. van Haasteren
Characterisation of ashes from the TNO 4MWth coal fired fluidised bed boiler
TNO ref. nr. 86-259, augustus 1986.
- [2] J.I. Walpot
Karakterisering van monsters afkomstig van AFBB-beproeving run 002
TNO ref. nr. 82-03019, maart 1982.
- [3] J.I. Walpot
Analysegegevens van AFBB-reststoffen van run 001 t/m run 010
TNO ref. 82-012191, september 1982.
- [4] B. Boesmans en R. Gerritsen
Toepassing van AFBB-kolenassen in cement, asfaltvulstof en kunstgrind
TNO ref. nr. 83-09557, augustus 1983.
- [5] R. Gerritsen en J.I. Walpot
Uitloging van kolenas
TNO ref. nr. 83-01610, februari 1983.
- [6] H.A. van der Sloot e.a./SOSUV
Omschrijving van de standaard uitloogtest voor verbrandingsresiduen
BEOP-25, december 1983.
- [7] R. Gerritsen
Samenstelling van toekomstige AFBB-assen in relatie tot de procesparameters
Intern rapport TNO, november 1984.
- [8] Leidraad bodemsanering, samengesteld door het ministerie van VROM
Staatsuitgeverij 's Gravenhage, 1983.
- [9] E. Mulder e.a.
Verbetering van AFBB-vliegassen door scheiding
(TNO-rapport in voorbereiding).
- [10] R. Gerritsen
Uitloogonderzoek aan pyrietslak
TNO ref. nr. 86-062, februari 1986.

[11] H.A. van der Sloot e.a.

Physical and chemical characterization of pulverized-coal ash with
respect to cement-based applications

ECN-178, november 1985.

BIJLAGEN

1. Projectomschrijving
2. Stroomschema AFBB
3. Korte beschrijving relevante runs AFBB
4. Stookcondities relevante runs AFBB
5. Coderingsmethode as-monsters
6. Resultaten chemische analyse
7. Resultaten bepaling dichtheden
8. Korrelgrooteverdelingen
9. Resultaten bepaling bitumengetal en specifiek oppervlak
10. Eelectronenmicroscopische opnamen
11. Resultaten spoor-elementen-analyse
12. Resultaten zuur-base- en beschikbaarheidstest
13. Resultaten Standaard-Uitloogtest
14. Benodigde paramters voor het eenvoudig rekenmodel
15. Validatie rekenmodel AFBB.

BIJLAGE 1
Projectomschrijving

2. PROJECTBESCHRIJVEN

2.1 Titel van het project

Karakterisering wervelbedassen op fysische en chemische eigenschappen en uitloogkarakteristiek.

2.2 Doelstelling

Het karakteriseren van reststoffen die vrijkomen uit de 4 MW_{th} wervelbedketel, geïnstalleerd bij MT-TNO te Apeldoorn. De karakterisering zal worden uitgevoerd op reststoffen die door verandering van stookcondities, ketelontwerp en/of kolensoort afwijken van de tot 1985 geproduceerde reststoffen. De karakterisering bestaat o.a. uit chemische analyse op hoofdcomponenten, fysische analyse op o.a. dichtheid en stortgewicht, REM-opnamen met EDAX-analysefaciliteit en bepaling van de uitloogeigenschappen door middel van de standaard-uitloogtest (SU-test). De resultaten zullen worden vergeleken met reeds beschikbare gegevens over reststoffen van wervelbedverbranding. Tevens zal een eenvoudig, reeds ontwikkeld model, dat het wervelbedverbrandingsproces beschrijft, worden getoetst aan de verkregen resultaten.

Het onderzoek zal worden gericht op assen zoals deze worden verwacht uit een industriële installatie.

2.3 Beschikbare informatie

De beschikbare informatie over reststoffen uit de MT-TNO wervelbedketel is samengevat in een tweetal rapporten:

ref.no. 82-0319: Analysegegevens van AFBB-reststoffen van run 002,

ref.no. 82-012191: Analysegegevens van AFBB-reststoffen van run 001 t/m 010,

en in de evaluatierapporten over de perioden 1981-1982 en 1983-1984.

Verder is informatie beschikbaar van andere wervelbedketels in diverse binnen- en buitenlandse publikaties.

Het model waaraan de resultaten zullen worden getoetst, is beschreven in een intern TNO-rapport "Samenstelling van toekomstige AFBC-assen in relatie tot de procesparameters".

2.4 Werkzaamheden, werkwijzen en resultaten

2.4.1 Keuze van te karakteriseren wervelbedassen voor gedeeltelijke karakterisering

In nauw overleg met de projectleider van het project "Bedrijf en onderhoud van de 4 MW_{th} AFBB" zullen zowel top- als bodemassen worden gekozen voor een gedeeltelijke karakterisering, bestaande uit chemische analyse op koolstof (organisch en anorganisch), calcium, silicium, aluminium, ijzer en sulfaat en Bepaling van de absolute dichtheid, stortgewicht en deeltjesgrootteverdeling. Deze gedeeltelijke karakterisering zal worden uitgevoerd op circa vijf bodemassen en circa tien topassen.

2.4.2 Uitgebreide karakterisering

Op basis van de gedeeltelijke karakterisering en de representativiteit van de bij 2.4.1 geselecteerde wervelbedassen worden twee bodemassen en vier topassen gekozen voor een uitgebreide karakterisering, bestaan de uit:

- . chemische analyse op spoorelementen (maximaal 10 *)
- . bepaling specifiek oppervlak
- . bepaling bitumengetal
- . REM-opnamen met EDAX-analyse
- . zuur-basegedrag (pH 1 en 10 min.)
- . beschikbaarheid spoorelementen voor uitloging.

*)

De keuze van de spoorelementen hangt af van de te verstoffen kolen. Afstemming zal plaatsvinden met de projecten ketelbedrijf/emissiemetingen.

Uit de zes assen waarop een volledige karakterisering wordt uitgevoerd, worden op basis van zuur-basegedrag en beschikbaarheid voor uitloging één bodemas en twee topassen gekozen, waarop de SU-test wordt uitgevoerd.

2.4.3 Toetsing resultaten aan model en reeds beschikbare gegevens

De resultaten van gedeeltelijke en volledige karakterisering zullen worden getoetst aan een eenvoudig model dat het wervelbedverbrandingsproces beschrijft. De resultaten van de karakterisering worden daardoor gecorreleerd aan het verbrandingsproces, waarbij o.a. de invloeden van ketelontwerp, stookcondities en kolensoort op de eigenschappen van de reststoffen worden onderzocht. Daarbij zal ook gebruik worden gemaakt van reeds beschikbare gegevens van tot 1985 in de MT-TNO-ketel geproduceerde reststoffen en van gegevens van andere (buitenlandse) wervelbedketels.

2.5 Informatie en maatschappelijke consequenties

Het onderzoek levert informatie over een groot aantal fysische en chemische eigenschappen van in de toekomst te verwachten wervelbedassen in relatie tot de kolenkwaliteit. Deze gegevens zijn noodzakelijk voor een aantal andere deelonderzoeken, waarbij wervelbedas wordt gebruikt als secundaire grondstof in bouwmaterialen.

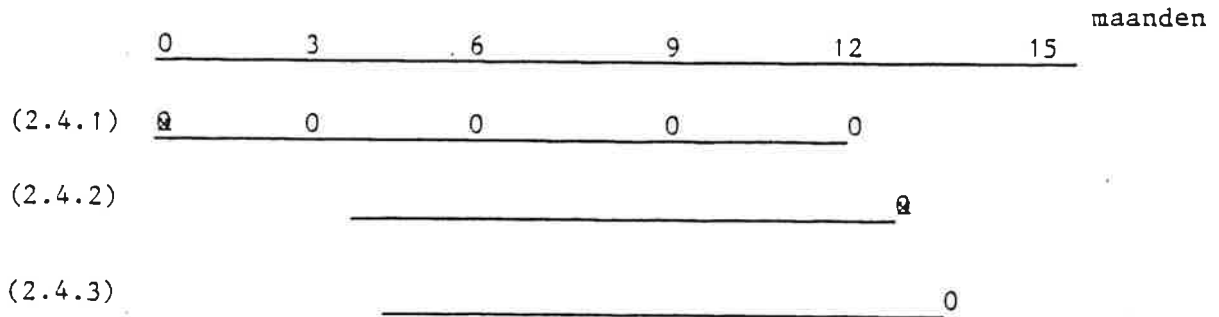
Daarnaast kan de invloed van variaties in het wervelbedverbrandingsproces op de eigenschappen van de reststoffen worden vastgesteld. De REM-opnamen en EDAX-analyses op afzonderlijke asdeeltjes geven informatie over de structuur van de reststoffen en de mogelijkheden tot deeltjesscheiding (op koolstof, calciumverbindingen, ijzer e.d.).

BIJLAGE 1 (vervolg)

2.6 Eisen

De resultaten van het onderzoek moeten enerzijds informatie verschaffen over de eigenschappen van toekomstige wervelbedassen en anderzijds bruikbaar zijn bij andere deelonderzoeken, waarbij toepassingsmogelijkheden van wervelbedassen worden onderzocht.

2.7 Tijdsplanning



2.8 Subcontractanten

Voor enkele analyses (o.a. bitumengetal) zal van faciliteiten van derden gebruik worden gemaakt. De verantwoordingen van de door derden verrichte werkzaamheden ligt echter bij de contractant.

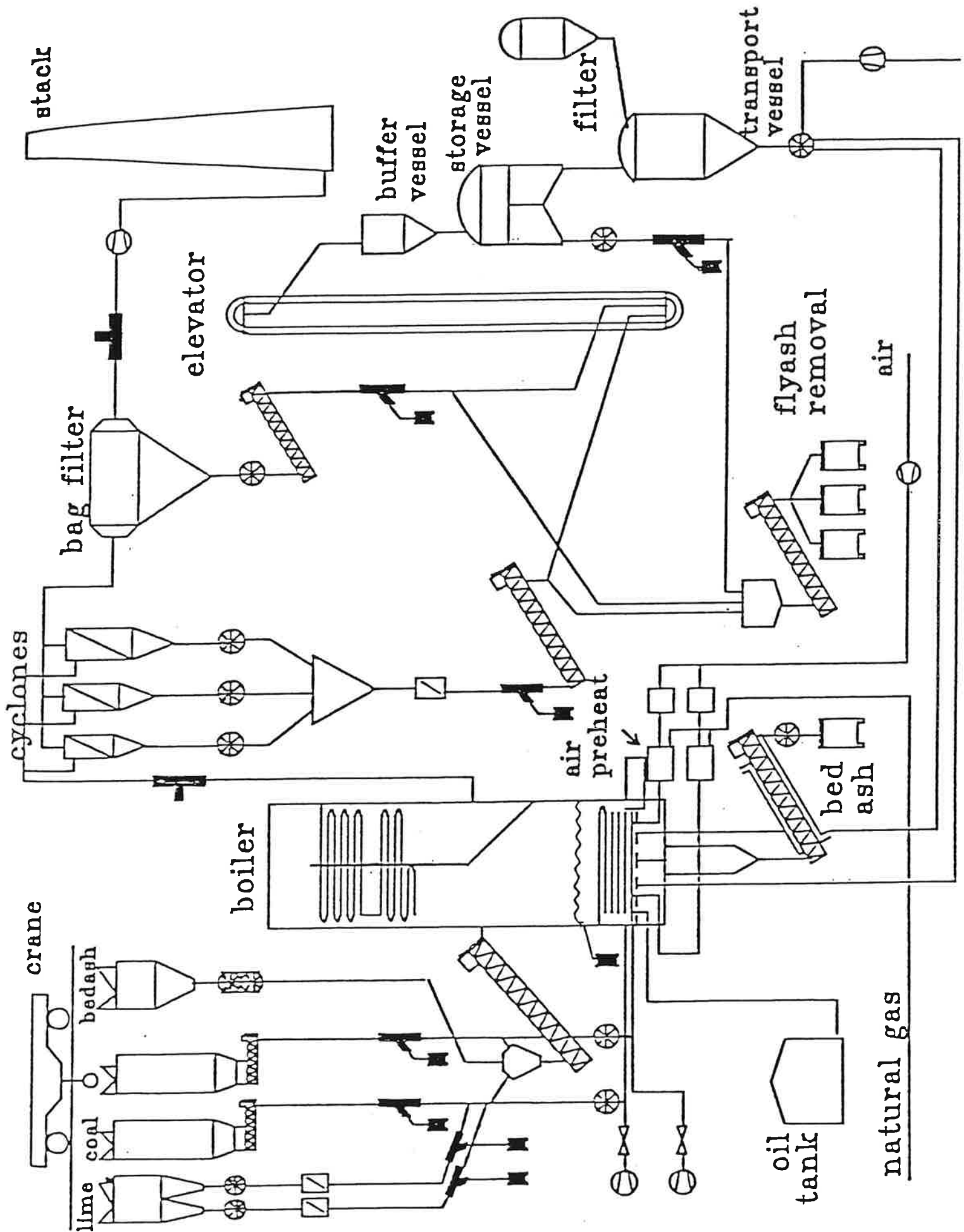
2.9 Overleg- en samenwerkingsstructuren

Tijdens de uitvoering van het project zal driemaandelijks het verslag worden uitgebracht voor de kwartaalbesprekingen.

2.10 Kennisoverdracht

De uit paragraaf 2.4 verworven kennis zal zowel mondeling als schriftelijk aan PEO en derden ter beschikking worden gesteld in het bijzonder in de PEO adviescommissie: "Karakterisering en uitloging van kolenreststoffen en reststoffenprodukten". De kwartaalrapportage en het concept-eindrapport zullen in 12-voud aan PEO ter beschikking worden gesteld. De PEO ontvangt het eindrapport in 25-voud. De Stichting PEO zal de (tussentijdse) resultaten inbrengen in de verslaggeving over het onderzoeksgedeelte van het NOK.

BIJLAGE 2
Stroomschema AFBB



BIJLAGE 3

Korte beschrijving relevante runs AFBB

- Run 165: Gestookt met poolse 4, kalksteentoeslag (erg weinig), geen recirculering van vliegas, vliegasstroom 83 kg/uur, geen bedas afgevoerd.
- Run 180: Gestookt met poolse 5, kalksteentoeslag (normaal), recirculering van vliegas, vliegasstroom 51 kg/uur, bedasstroom 9 kg/uur.
- Run 182: Gestookt met poolse 5, kalksteentoeslag (normaal), recirculering van vliegas, vliegasstroom 50 kg/uur, bedasstroom 11 kg/uur.
- Run 183: Gestookt met poolse 5, kalksteentoeslag (veel), recirculering van vliegas, vliegasstroom 58 kg/uur, bedasstroom 16 kg/uur.
- Run 184: Gestookt met poolse 5, geen kalktoeslag, geen recirculering van vliegas, vliegasstroom 72 kg/uur, geen bedas afgevoerd.
- Run 189: Gestookt met poolse 7, kalktoeslag in de vorm van NEKAMI-pellets, (meer dan normaal), recirculering van vliegas, vliegasstroom 83 kg/uur, bedasstroom 17 kg/uur.
- Run 194: Gestookt met poolse 8, bedhoogte van 1,27 meter, kalksteentoeslag (iets minder dan normaal), recirculering van vliegas, vliegasstroom 60 kg/uur, bedasstroom 8 kg/uur.
- Run 195: Gestookt met poolse 8, bedhoogte normaal (± 1 meter), kalksteentoeslag (iets minder dan normaal), recirculering van vliegas, vliegasstroom 54 kg/uur, bedasstroom 25 kg/uur.
- Run 200: Gestookt met poolse 8, bedhoogte van $\pm 0,6$ meter, kalksteentoeslag, recirculering van vliegas.

BIJLAGE 4

Stookcondities relevante runs AFBB

TNO 4MW Atmospheric fluid bed boiler test facility

RUN NUMBER			165	180	182	183	184	189	194	195
START: date	yyymmdd	time	051107	060418	060422	060424	060522	060610	061003	061016
	hr:min		17:00	14:45	19:30	20:00	21:45	22:30	00:00	6:00
END : date	yyymmdd	time	051108	060420	060423	060425	060523	060611	061003	061016
	hr:min		8:45	19:00	7:45	5:45	9:30	8:15	10:00	14:00
TYPE OF EXPERIMENT			d,s,t	s	s	s	s	s	s	s
FLUID VELOCITY bed	m/s		2.02	2.09	1.75	2.03	1.99	2.13	2.11	2.05
	freeboard m/s		2.02	2.09	2.09	2.03	1.99	2.13	2.11	2.05
AIR FACTOR			1.26	1.31	1.31	1.33	1.28	1.28	1.25	1.23
air factor bed			1.26	1.31	1.10	1.33	1.28	1.28	1.25	1.23
air factor freeboard			0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BED HEIGHT			cm	107	107	106	106	101	110	102
BED SECTIONS FLUIDISED			1 or 2	2	2	2	2	2	2	2
CYCLONES			1,m,s	1,m,s	1,m,s	1,m,s	1,m,s	1,m,s	1,m,s	1,m,s
TYPE OF COAL			polish4	polish5	polish5	polish5	polish5	polish7	polish8	polish8
COAL FLOW	bed 1	kg/hr	199	200	200	190	193	214	212	210
	under/over		u	u	u	u	u	u	u	u
	bed 2	kg/hr	199	200	200	190	194	221	219	215
			u	u	u	u	u	u	u	u
TYPE OF SORBENT *			1	1	1	1	4	1	1	1
SORBENT FLOW	bed 1	kg/hr	13.9	20	21	49	0	30	20	18
	bed 2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca/S RATIO			(molar)	0.5	2.0	2.1	3.5	0	3.0	1.8
SULFUR RETENTION			%	71	59	61	80	15	62	63
REFIRING	cyclones	+/-	-	+	+	+	-	+	+	+
	fabric filter	+/-	-	+	+	+	-	+	+	+
	bed		-	1+2	1+2	1+2		1+2	1+2	1+2
CYCLONE DUST FLOW			kg/hr	54	860	910	620	nm	650	491
Unburned carbon			%	53.1	10.6	13.8	13.4	45.4	19.5	19.9
FABRIC FILTER DUST FLOW			kg/hr	29	250	250	200	nm	200	282
Unburned carbon			%	21.9	3.9	3.9	4.0	26.7	9.2	8.4
FLY ASH COLLECTED			kg/hr	83	51	50	58	72	83	54
Unburned carbon			%	42.2	9.3	10.8	10.4	35.2	11.7	15.7
BED ASH COLLECTED			kg/hr	- 3.6	9	11	16	0	17	25
COMBUSTION EFFICIENCY			%	91.0	98.8	98.6	98.5	93.4	97.7	97.9
combustion in bedsection			%	88.4	91.3	86.8	92.0	91.9	91.4	91.7
combustion in freeboard			%	2.6	7.5	11.8	6.5	1.5	6.3	6.2
energyloss in flyash			%	8.9	1.1	1.3	1.4	6.5	2.2	2.0
energyloss via CO in fluegas			%	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
TEMPERATURES			deg C							
air preheater 1				58	36	37	36	39	40	38
air preheater 2				59	36	37	36	39	40	38
bed 1				838	840	841	840	843	839	839
bed 2				841	844	846	846	845	845	837
mid freeboard				833	849	837	844	826	845	854
end freeboard				797	877	857	859	780	860	839
flue gas conv. section				379	415	416	392	335	428	407
flue gas outlet boiler				230	259	264	256	212	228	223
flue gas before filter				228	247	247	240	204	220	215
STEAM										
steam pressure			barg	14.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
steam flow main drum			ton/hr	2.56	2.95	2.88	2.75	2.53	2.90	2.93
steam flow side drum			ton/hr	1.72	1.91	1.93	1.89	1.92	1.93	2.15
LOAD (fuel input)			MW	3.36	3.40	3.40	3.25	3.33	3.37	3.49
POWER (steam output)			MW	2.42	2.76	2.62	2.51	2.53	2.74	2.85
Heat Exchanger										
test tube bank AKZO version				(@)	@	@	@	@	@	@
HE side drum				bed 1&2	bed 1&2	bed 1&2	bed 1&2	bed 1&2	bed 1&2	bed 1&2
STACK EMISSIONS										
O2 (Ametek)			%	6.3	5.7	5.9	6.2	6.5	5.8	5.3
O2 (GAR)			%	6.9	5.5	5.9	6.0	6.7	5.9	4.4
SO2			ppm,g/GJ	211	202	191	183	194	189	200
NOx			ppm,g/GJ	305	209	219	151	181	127	233
CxHx			ppm,g/GJ	15	51	6	2	9	3	6
CO			ppm,g/GJ	183	70	326	131	406	163	285
CO2			%	12.3	13.8	13.8	13.9	13.0	13.9	13.0

*) 1 = Engis 1,5-2,5 mm 4 = NEKAMI pellets 2 n.m. = not measured
 @) reduced heat transfer surface in bed section
 Values between brackets are estimated values

BIJLAGE 5
Coderingsmethode as-monsters

Als voorbeeld wordt hier het as-monster genomen met de code 81099180

8 - 1 - 099 - 180

				Run- of experimentnummer
				(chronologisch)
				As-monster-nummer
				(nummering per soort as)
				1 betekent as-monster van de TNO-AFBB
				1 betekent kool-monster
				2 betekent cycloonas-monster
				3 betekent doekenfilteras-monster
				5 betekent bedas-monster
				6 betekent monster toeslagmateriaal
				8 betekent vliegas-monster

BIJLAGE 6

Resultaten chemische analyse

AS-CODE	TOTAAL KOLSTOF GEHALTE	CALCIUM GEHALTE	KOLSTOF UIT CARBONAAT	KOLSTOF ORGANISCH	TOTAAL ZWAVEL GEHALTE	ZWAVEL UIT SULFAAT	ZWAVEL UIT PYRIET	SILICIUM GEHALTE	ALUMINIUM GEHALTE	IJZER GEHALTE	KALIUM GEHALTE
81.099.180	12.2%	12.6%	0.1%	12.1%	3.1%	3.0%	0.1%	14.2%	8.8%	5.4%	1.2%
81.104.182	13.0%	11.6%	0.1%	13.0%	3.0%	2.7%	0.1%	14.1%	8.8%	5.1%	
81.106.183	12.4%	16.0%	0.1%	12.3%	3.4%	3.2%	0.1%	13.2%	8.0%	5.0%	1.0%
81.114.184	46.6%	4.0%	0.1%	46.5%	1.1%	0.7%	0.0%	9.5%	5.7%	3.4%	
81.122.189	12.1%	13.1%	0.1%	12.0%	2.9%	2.8%	0.0%	15.6%	8.1%	4.5%	1.3%
81.115	9.5%	14.9%	0.1%	9.4%	4.0%	3.7%	0.1%	14.6%	7.0%	5.0%	
81.???165	42.5%	4.7%	0.2%	42.3%	1.8%						
81.129.194	17.2%	13.0%	0.1%	17.1%	3.1%	3.0%	0.1%	13.9%	6.7%	4.8%	
81.132.195	14.8%	11.5%	0.1%	14.7%	2.7%	2.6%	0.1%	15.6%	6.6%	4.2%	1.1%
81.139.200	19.9%	6.9%	0.1%	19.8%	1.9%	1.8%	0.1%	16.6%	7.6%	5.4%	
51.096.180	0.3%	20.5%	0.3%	0.1%	2.9%	2.6%	0.1%	19.7%	7.4%	3.7%	1.6%
51.101.183	0.2%	21.6%	0.2%	0.1%	4.1%	3.9%	0.1%	17.0%	7.3%	3.2%	
51.105.189	0.5%	5.5%	0.1%	0.4%	1.4%	1.3%	0.0%	26.3%	9.7%	3.5%	2.1%
51.109.194	0.5%	7.4%	0.1%	0.4%	1.2%	1.1%	0.1%	25.8%	9.4%	3.7%	
51.110.195	0.4%	10.0%	0.1%	0.3%	2.0%	1.9%	0.1%	24.9%	8.3%	3.2%	
21.180.183	15.7%	17.9%	2.3%	13.4%	3.7%						
21.181.184	45.5%	5.5%	0.7%	44.8%	1.5%	1.1%					
21.191.195	18.6%	12.4%	0.1%	18.5%	2.7%	2.6%	0.1%	14.8%	6.0%	5.0%	
31.247.183	5.5%	10.3%	1.4%	4.1%	2.4%						
31.248.184	26.8%	5.1%	0.3%	26.5%	1.4%	1.0%					

BIJLAGE 6 (vervolg)

Bereken de minerale samenstelling (elementenbalans)

[illegible]

BIJLAGE 7

Resultaten bepaling dichtheden

AS-CODE	ABSOLUTE DICHT- HEID kg/m3	STORT GEWICHT LOS kg/m3	STORT GEWICHT GESTAMPT kg/m3
81.099.180	2410	854	1114
81.104.182	2420	840	1086
81.106.183	2480	819	1083
81.114.184	1650	355	459
81.122.189	2480	784	1027
81.115	2400	655	819
81.???.165	1810	473	591
81.129.194	2540	680	1020
81.132.195	2390	670	1010
81.139.200	2400	610	870
51.096.180	2830	1340	1410
51.101.183	2800	1160	1460
51.105.189	2660	1270	1360
51.109.194	2660	1340	1430
51.110.195	2700	1320	1430
21.180.183			
21.181.184			
21.191.195	2430	700	980
31.247.183			
31.248.184			

BIJLAGE 8
Korrelgrootteverdelingen

Blad 1 Vergelijking vliegassen 180, 182, 183 en 184 (poolse 5)

Blad 2 Vliegassen 115 en 189

Blad 3 Vergelijking vliegassen 194, 195 en 200 (poolse 8)

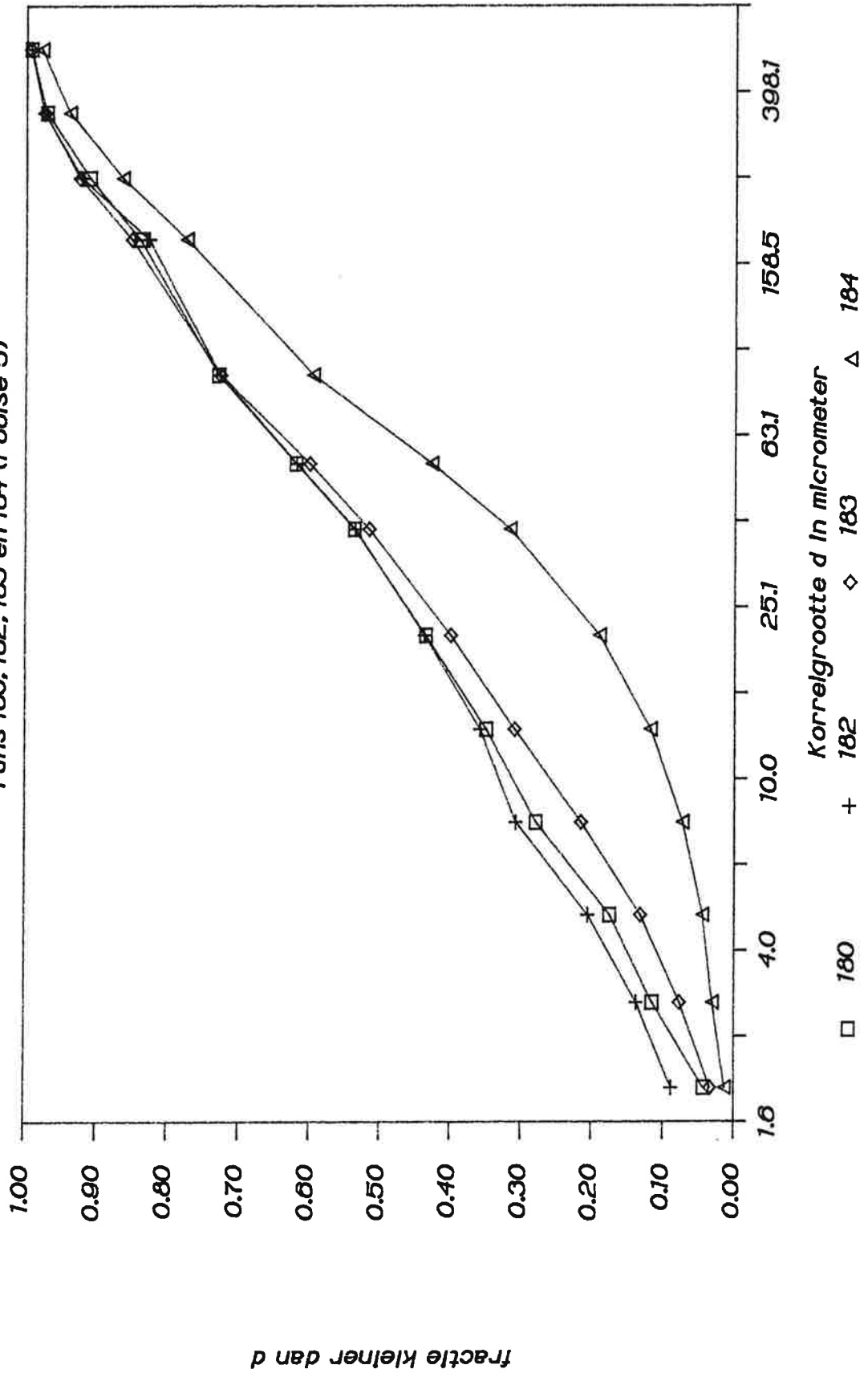
Blad 4 Vergelijking vliegas en cycloonas 195

Blad 5 Vergelijking vliegassen van verschillende kolensoort, 180, 189
 en 195

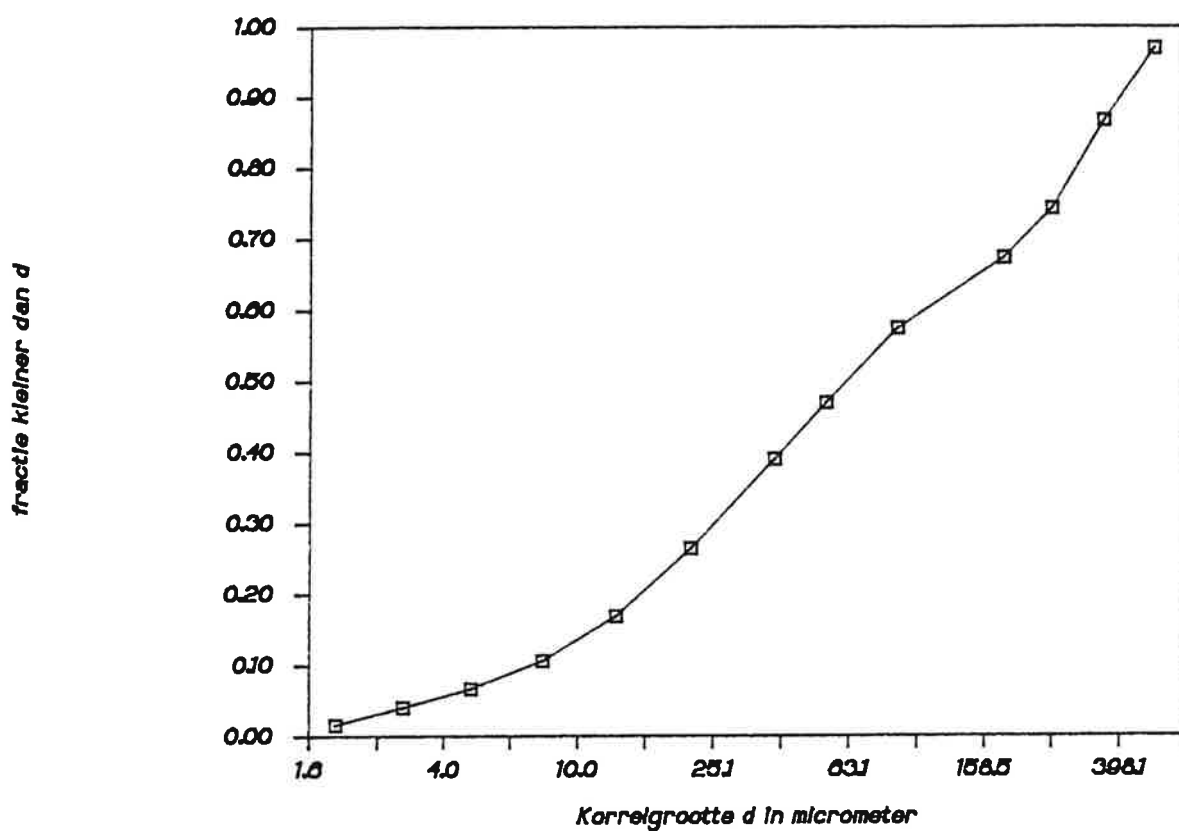
Blad 6 Vergelijking bedassen 180, 183, 189, 194 en 195

KORRELGROOTTEVERD. WERVELBEDVLIEGASSEN

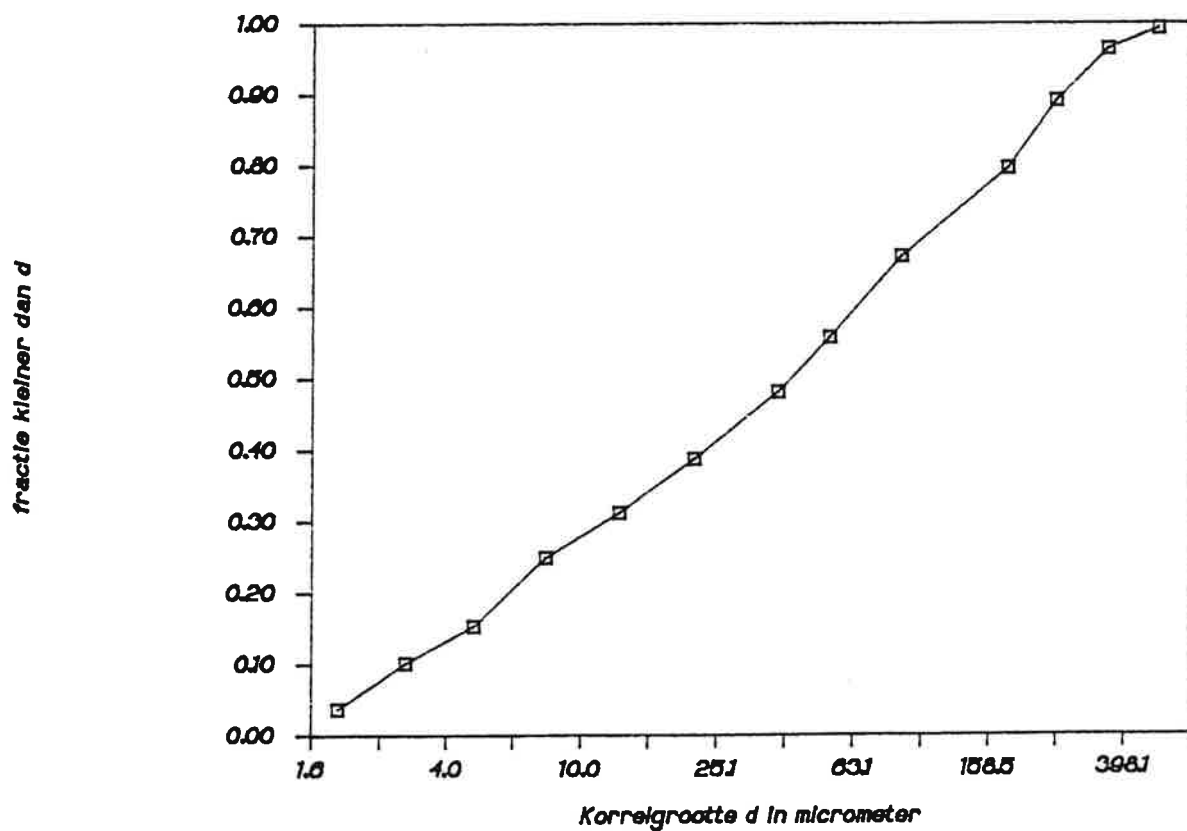
runs 180, 182, 183 en 184 (Poolse 5)



KORRELGROOTTEVERDELING VLEGAS IIS

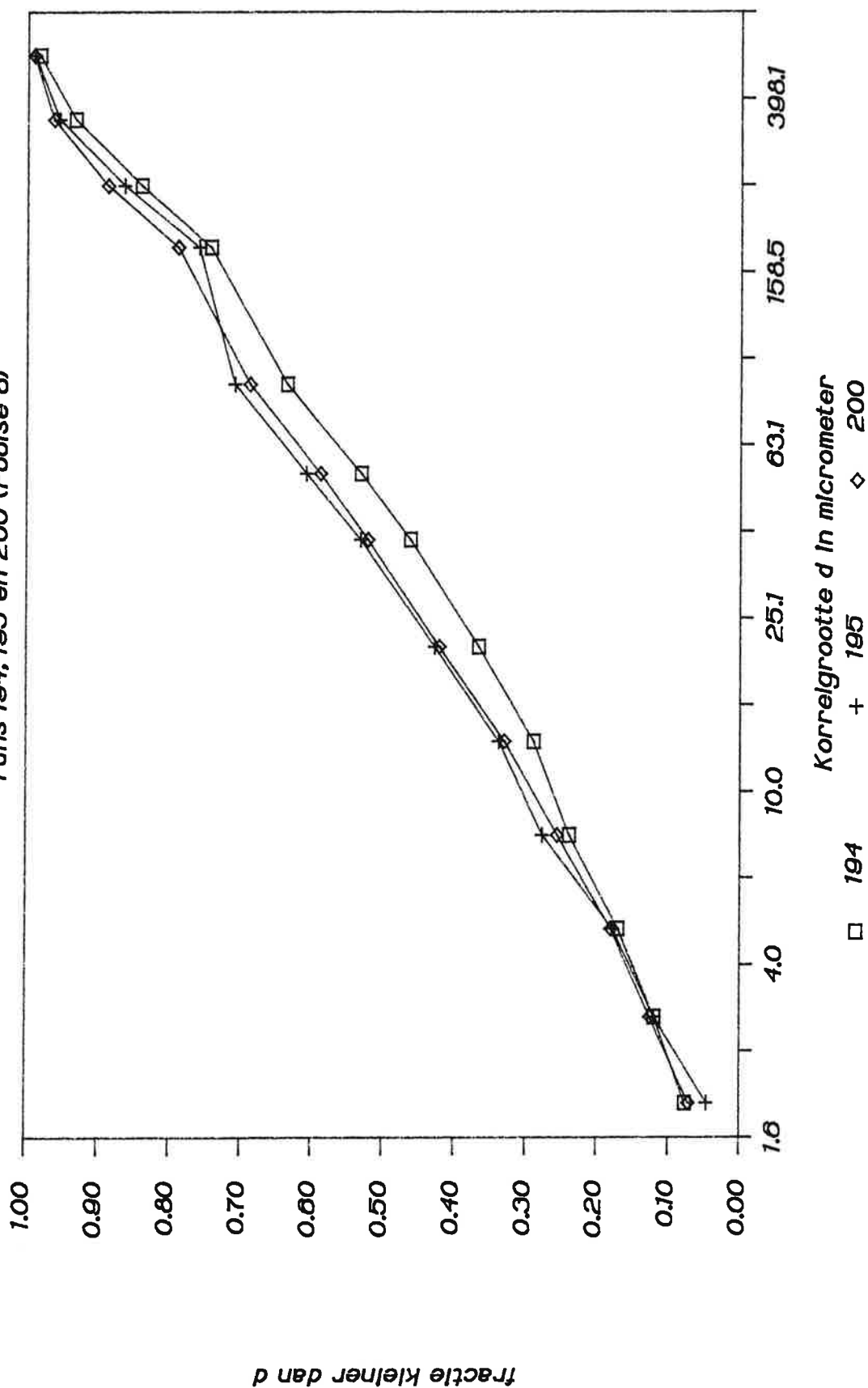


KORRELGROOTTEVERDELING VLEGAS RUN 189



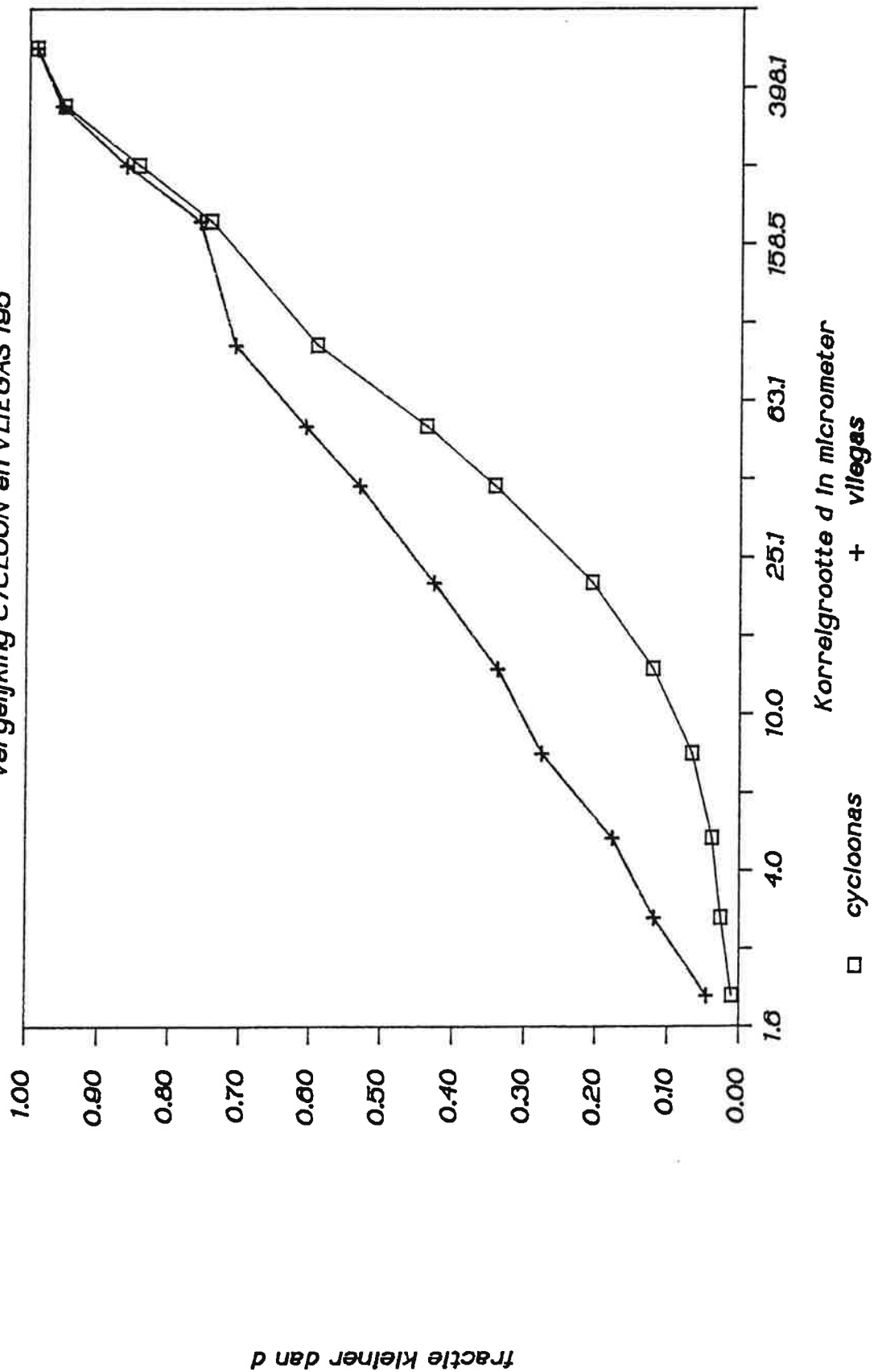
KORRELGROOTTEVERD. WERVELBEDVLIEGASSEN

runs 194, 195 en 200 (Poolse 8)

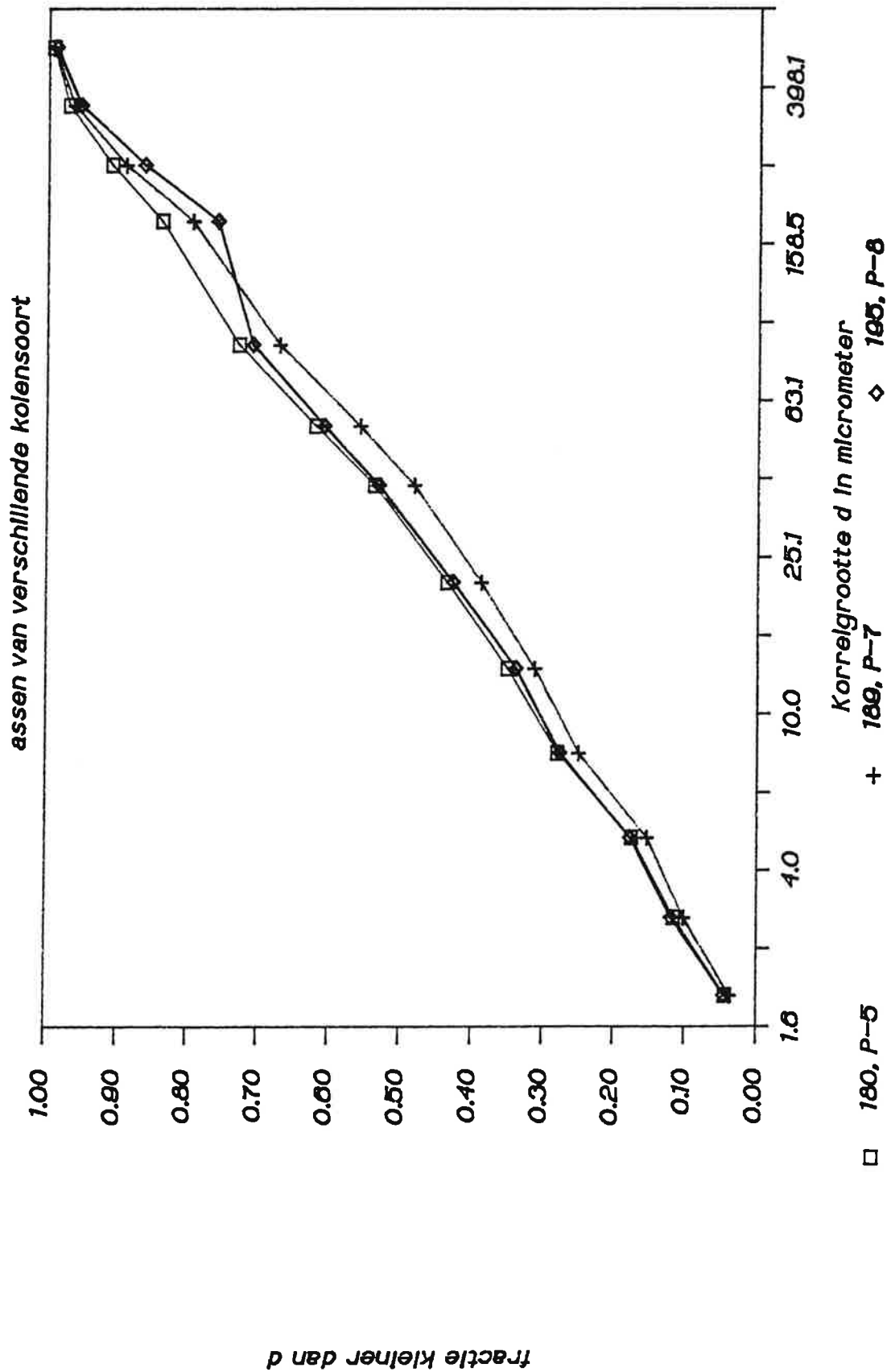


KORRELGROOTTEVERDELING WERVELBEDASSEN

vergelijking CYCLOON en VLEEGAS 195

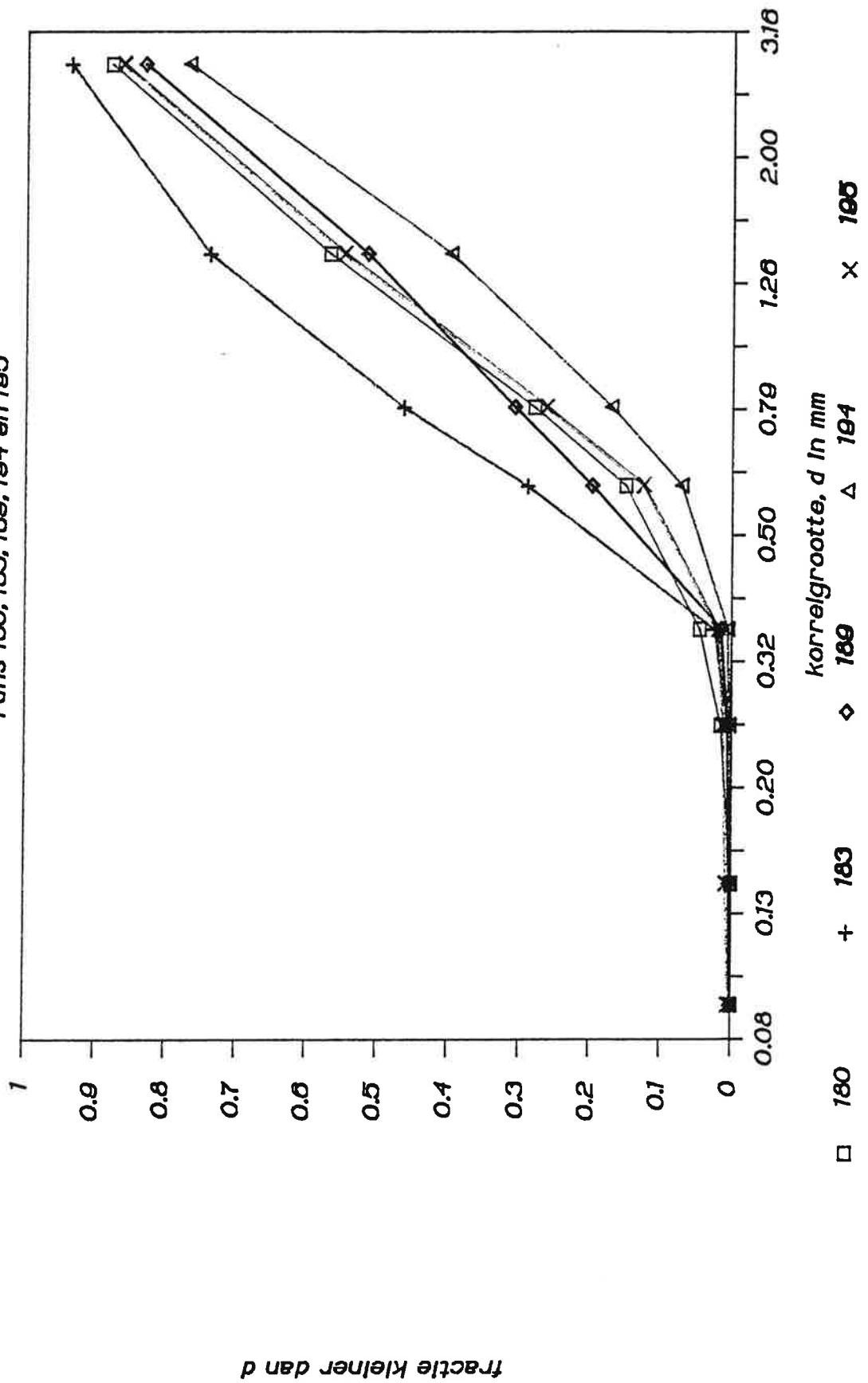


KORRELGROOTTEVERD. WERVELBEDVLIEGASSEN



Korrelgrootteverdeling bedassen

runs 180, 183, 189, 194 en 195

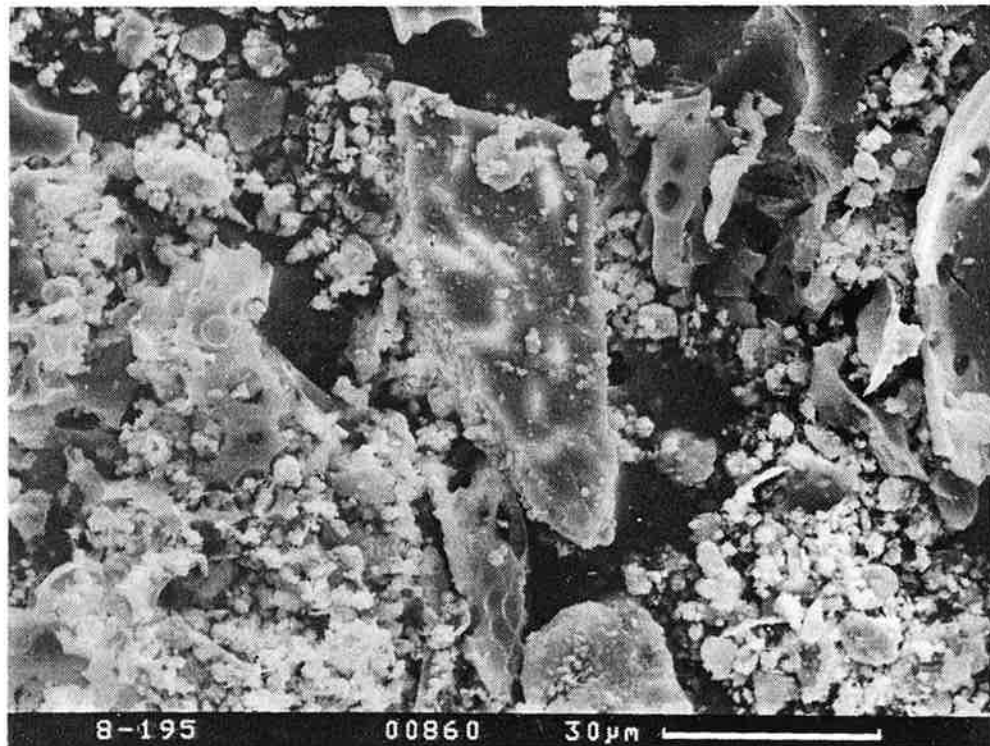
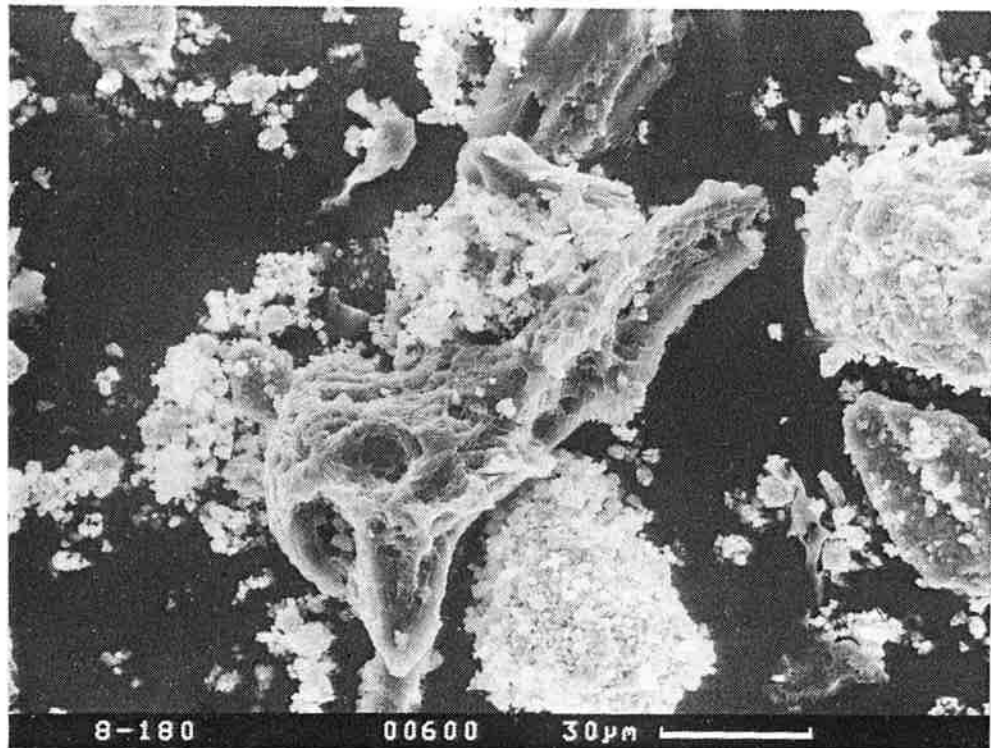


BIJLAGE 9

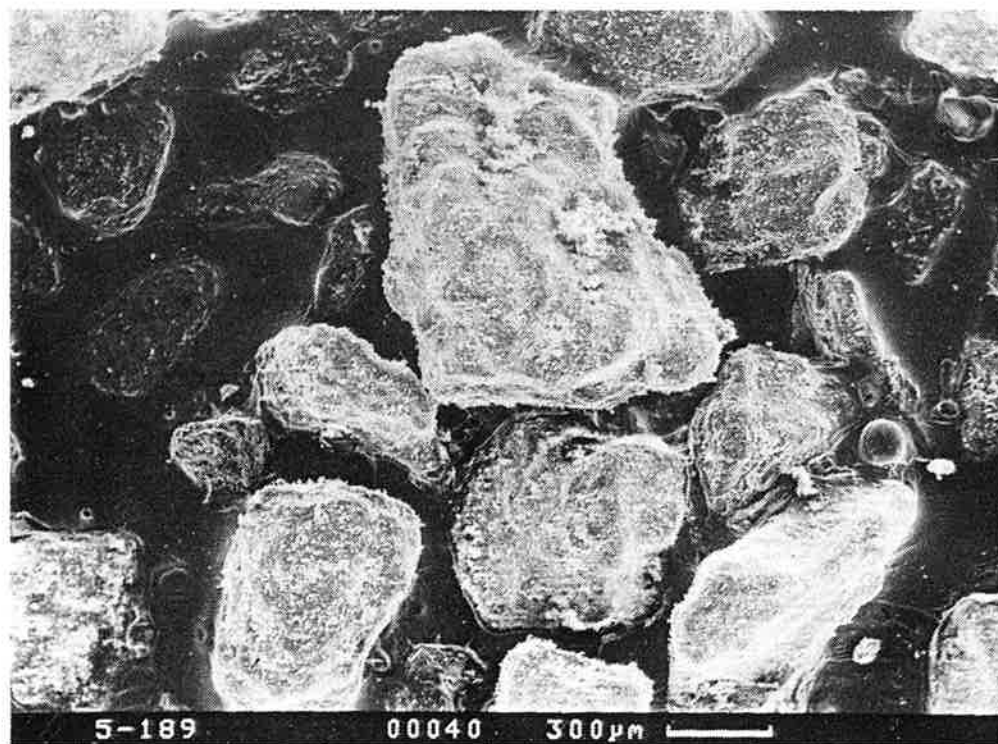
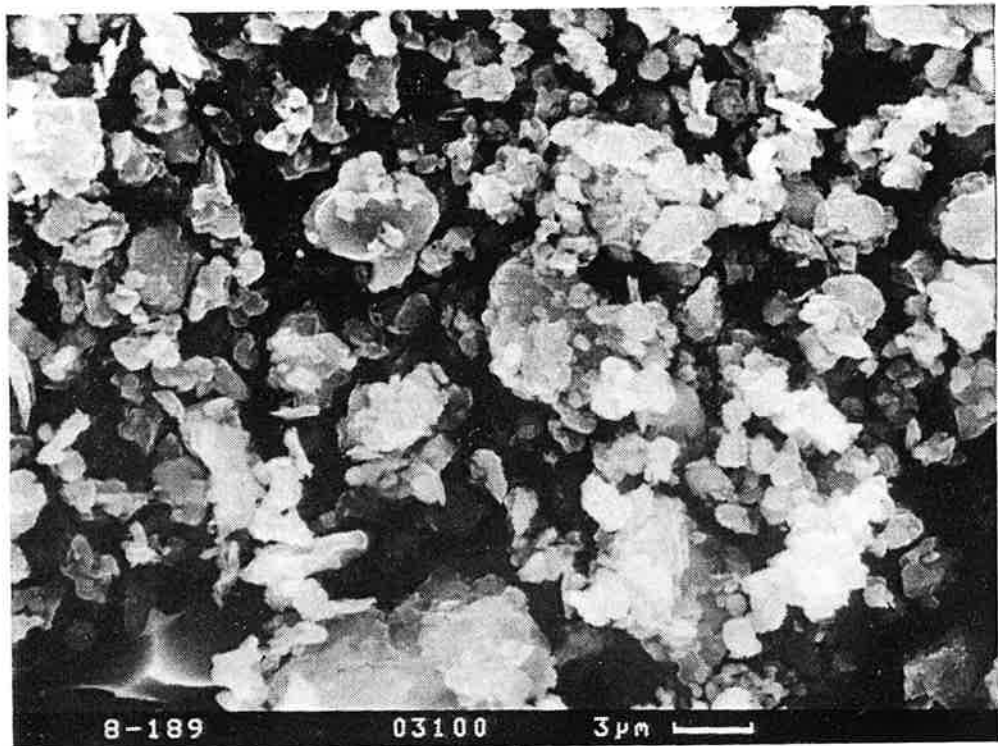
Resultaten bepaling bitumengetal en specifiek opperv

AS-CODE	ABSOLUTE DICHTHEID kg/m3	STORT GEWICHT kg/m3	SPECIFIEK OPPERVLAK m2/g	BITUMEN GETAL
81.099.180	2410	1110	8.5	51
81.106.183	2480	1080	10.7	52
81.122.189	2480	1030	12.0	57
81.132.195	2390	1010	3.4	55
51.096.180	2830	1410	2.2	32
51.105.189	2640	1360	3.1	32

BIJLAGE 10
Electronenmicroscopische opnamen



BIJLAGE 10 (vervolg)



BIJLAGE 11

Resultaten spoor-elementen-analyse

AS-CODE	CHROOM GEHALTE PPM	LOOD GEHALTE PPM	ZINK GEHALTE PPM	VANADIUM GEHALTE PPM	ANTIMOON GEHALTE PPM	ARSEEN GEHALTE PPM	MOLYBDEEN GEHALTE PPM
81.099.180	123	102	118	322	11.0	16.2	16.7
81.106.183	107	69	102	316	7.7	16.7	16.4
81.122.189	106	104	135	165	7.5	20.2	12.2
81.132.195	93	101	135	213	2.9	22.2	13.5
51.096.180	506	138	186	226	16.2	7.3	12.1
51.105.189	128	160	186	148	5.3	8.2	7.5

BIJLAGE 12

Resultaten zuur-base- en beschikbaarheidstest

AS-CODE	PH NA 1 MIN.	PH NA 10 MIN	L/S VERHOUDING	ZUURVERBR ml 1 N HNO3	AANZUREN OP PH = 1 ml 15N HNO3 OP 250 ml	VASTE STOF UITGELOOGD
81.099.180	11.62	12.05	100	29.34	6.2	24.9%
81.106.183	11.89	12.35	100	41.99	6.8	31.5%
81.122.189	11.80	12.31	100	41.56	6.5	28.7%
81.132.195	11.72	12.20	100	35.18	2*	24.6%
51.096.180	12.29	12.52	100	43.51	7	30.0%
51.105.189	11.75	11.86	100	11.92	7	13.6%

* aangezuurd op pH = 2

BIJLAGE 12 (vervolg)

Resultaten beschikbaarheidstest

AS-CODE	PEM CALCIUM IN UIT- LOOGVLSIF	PEM KALIUM IN UIT- LOOGVLSIF	PEM CHROOM IN UIT- LOOGVLSIF	PEM LOOD IN UIT- LOOGVLSIF	PEM ZINK IN UIT- LOOGVLSIF	PEM VANADIUM IN UIT- LOOGVLSIF	PEM ANTIMOON IN UIT- LOOGVLSIF	PEM ARSEEN IN UIT- LOOGVLSIF	PEM MOLYBDEEN IN UIT- LOOGVLSIF
81.099.180	930	4.7	0.013	0.040	0.19	0.20	0.019	0.004	0.015
81.106.183	1190	4.8	0.060	0.026	0.21	0.20	0.023	0.002	0.026
81.122.189	1060	5.9	0.024	0.042	0.37	0.27	0.009	0.030	0.017
81.132.195	933	3.0	0.015	0.013	0.24	0.038	0.013	0.002	0.017
51.096.180	1280	5.9	0.014	0.14	0.13	0.32	0.030	0.012	0.026
51.105.189	390	8.8	0.006	0.094	0.11	0.15	0.010	0.006	0.007

AS-CODE	PERCENTAGE CALCIUM UITGELOOGD	PERCENTAGE KALIUM UITGELOOGD	PERCENTAGE CHROOM UITGELOOGD	PERCENTAGE LOOD UITGELOOGD	PERCENTAGE ZINK UITGELOOGD	PERCENTAGE VANADIUM UITGELOOGD	PERCENTAGE ANTIMOON UITGELOOGD	PERCENTAGE ARSEEN UITGELOOGD	PERCENTAGE MOLYBDEEN UITGELOOGD
81.099.180	78.4%	4.3%	1.1%	4.2%	17.1%	6.6%	18.4%	2.6%	9.5%
81.106.183	80.4%	5.2%	6.1%	4.1%	22.3%	6.8%	32.3%	1.3%	17.1%
81.122.189	87.3%	5.1%	2.4%	4.4%	29.6%	17.7%	13.0%	16.0%	15.0%
81.132.195	85.4%	2.8%	1.7%	1.4%	18.7%	1.9%	47.2%	0.9%	13.3%
51.096.180	67.7%	4.1%	0.3%	11.0%	7.6%	15.3%	20.1%	17.8%	23.3%
51.105.189	74.0%	4.4%	0.5%	6.1%	6.2%	10.6%	19.7%	7.6%	9.7%

BIJLAGE 13
Resultaten Standaard-Uitloogtest

Blad 1 pH-gedrag

Blad 2 Uitloogkarakteristieken - Calcium

Blad 3 Uitloogkarakteristieken - Kalium

Blad 4 Uitloogkarakteristieken - Antimoon

Blad 5 Uitloogkarakteristieken - Arseen

Blad 6 Uitloogkarakteristieken - Chroom

Blad 7 Uitloogkarakteristieken - Lood

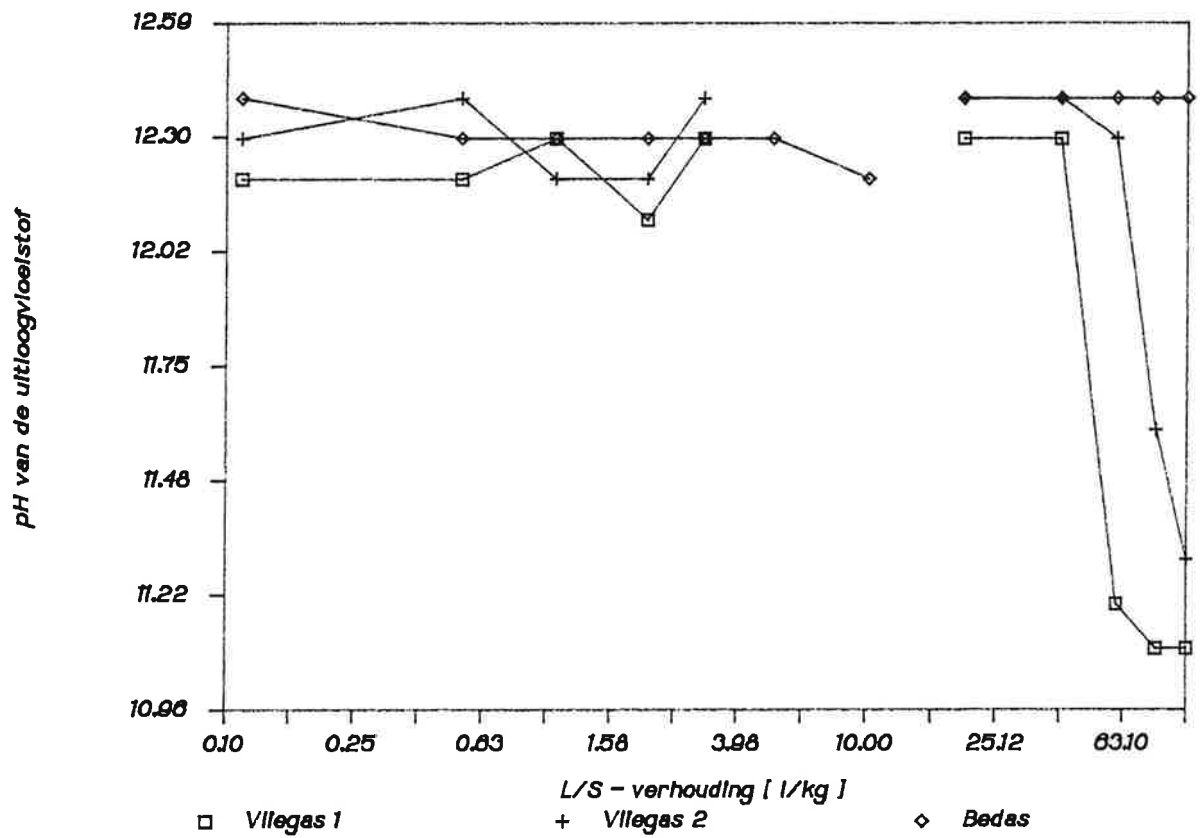
Blad 8 Uitloogkarakteristieken - Molybdeen

Blad 9 Uitloogkarakteristieken - Vanadium

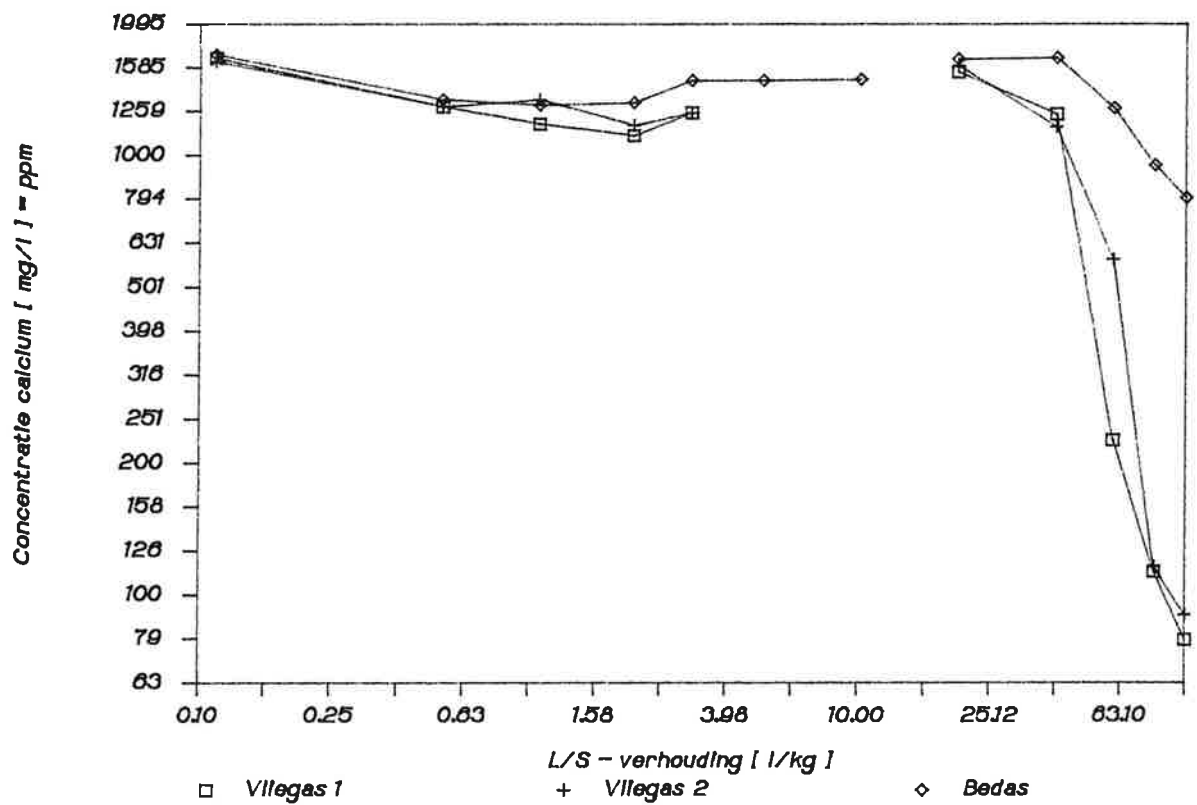
Blad 10 Uitloogkarakteristieken - Zink

In alle figuren hebben de X- en de Y-as een logaritmische schaal

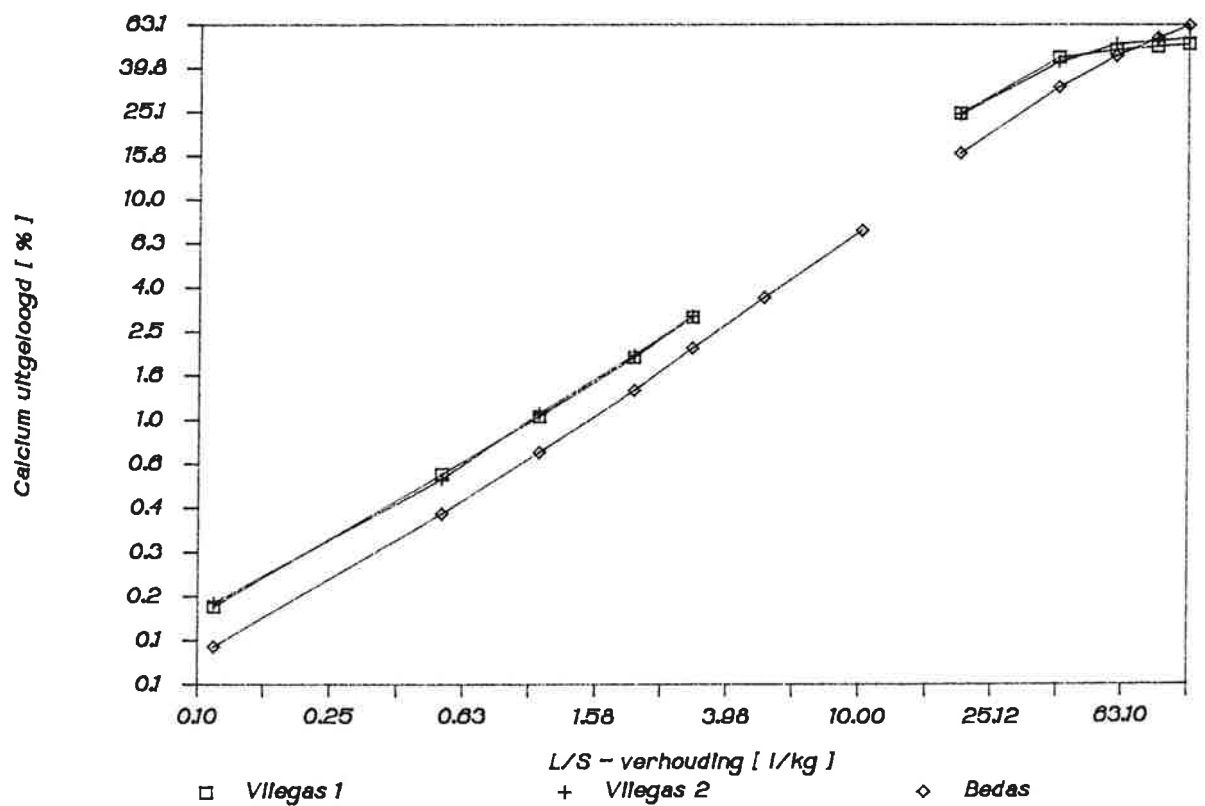
Uitloogkarakteristieken - pH - L/S



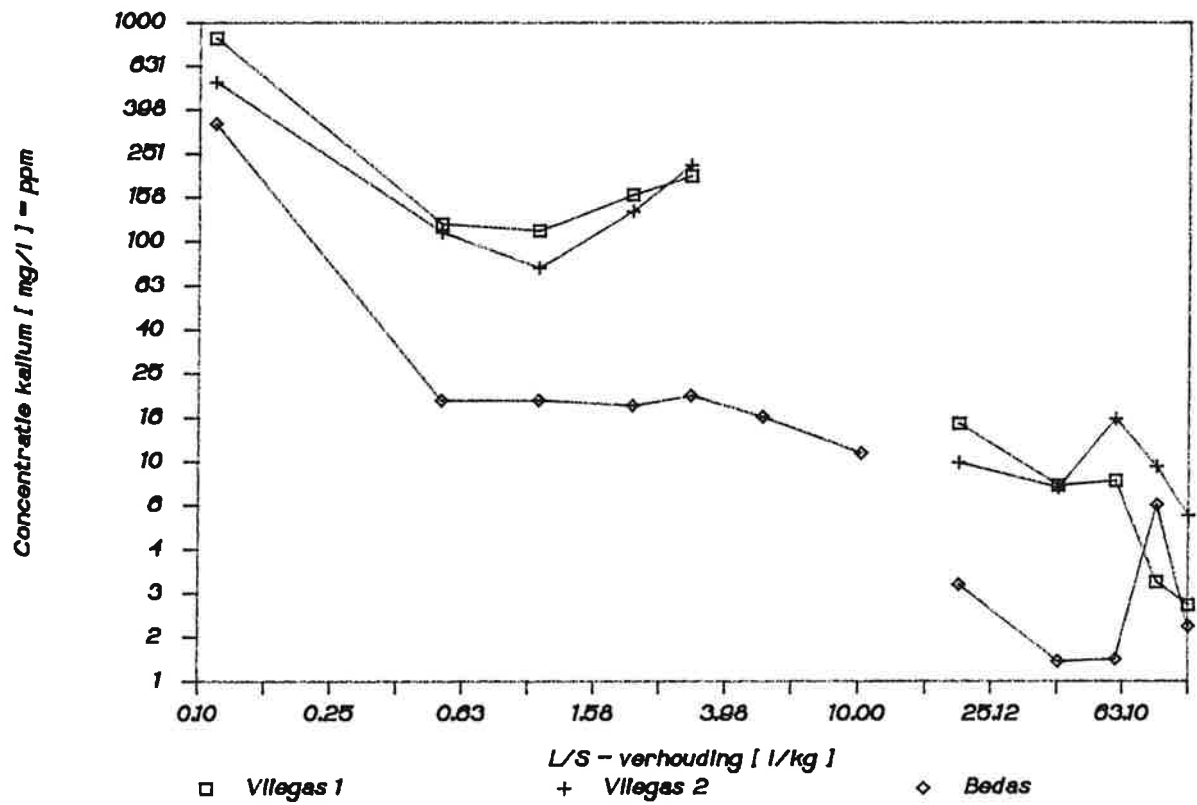
Uitloogkarakteristieken - Calcium



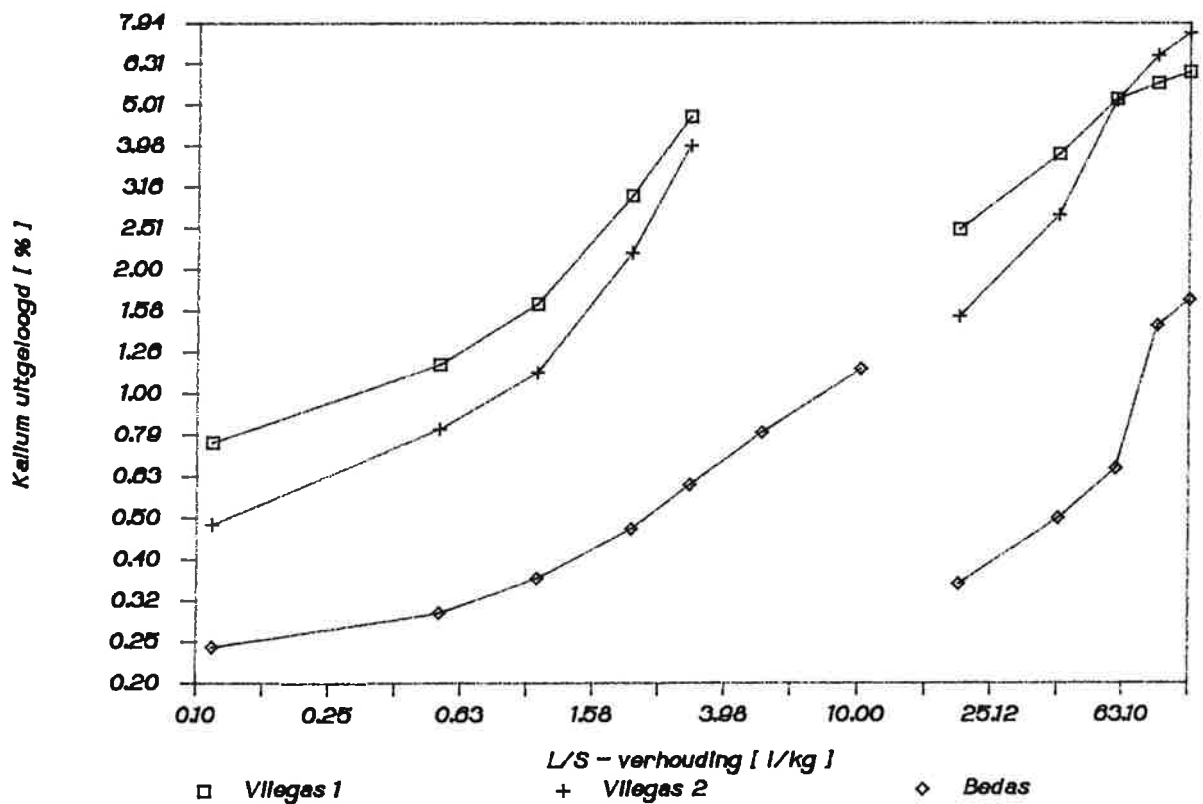
Uitloogkarakteristieken - Calcium



Uitloogkarakteristieken - Kalium

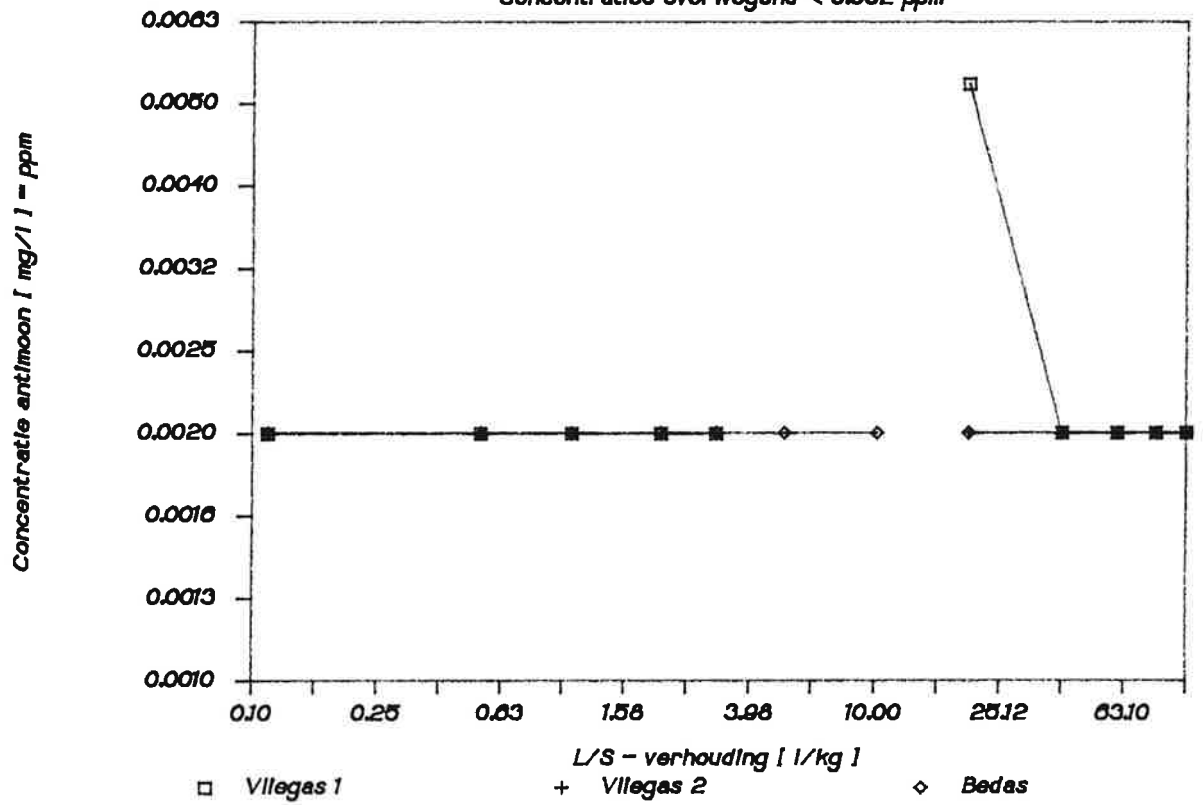


Uitloogkarakteristieken - Kalium



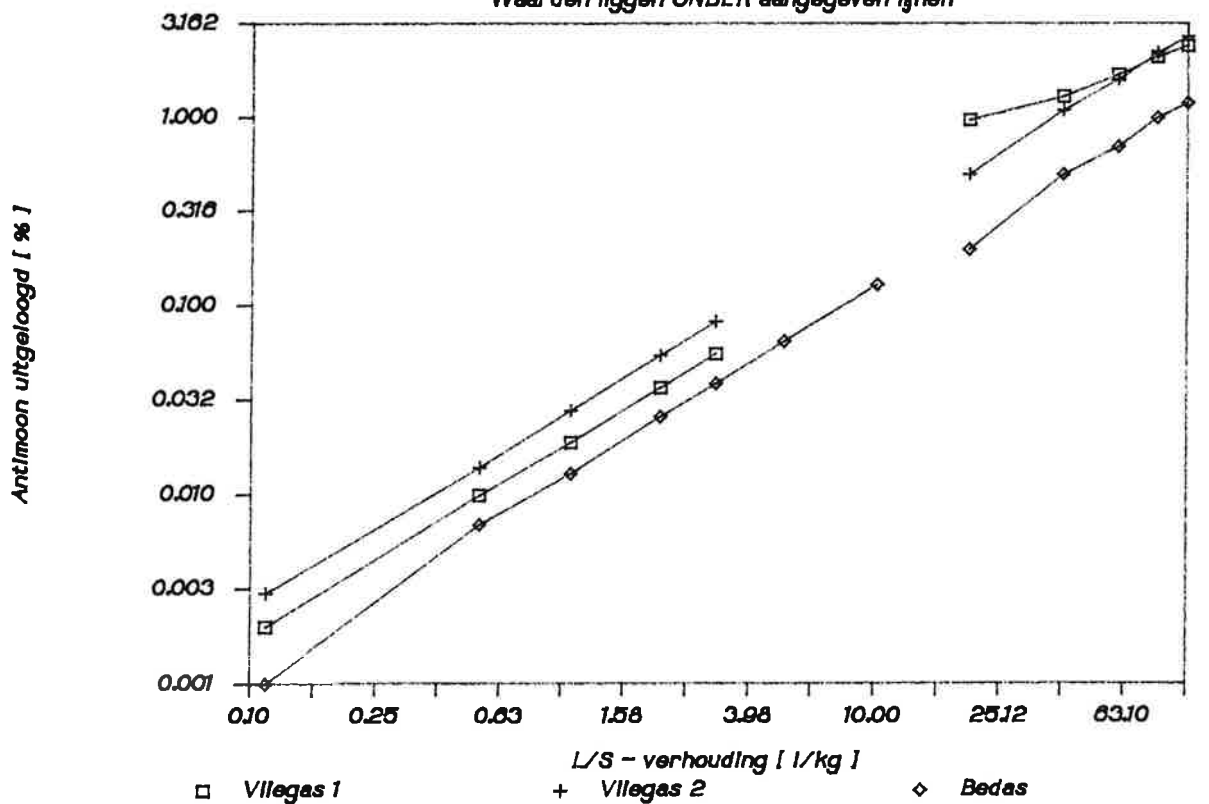
Uitloogkarakteristieken - Antimoon

Concentraties overwegend < 0.002 ppm



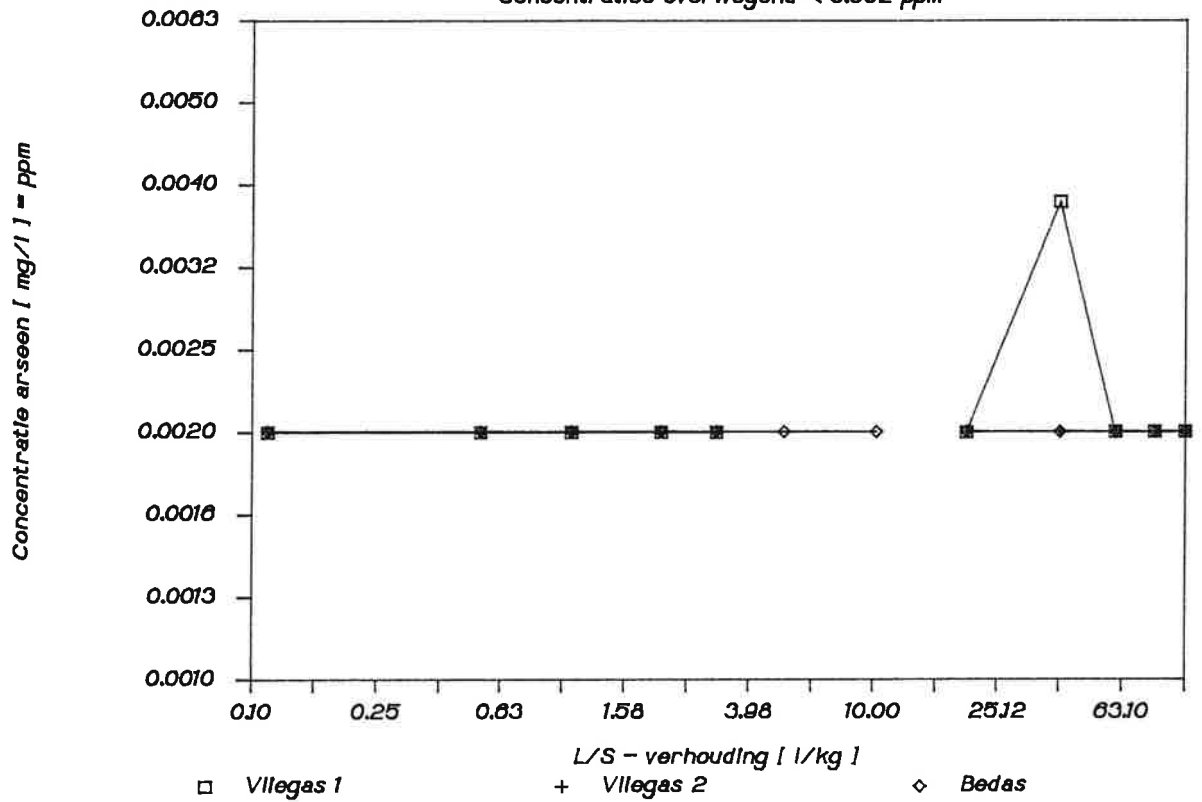
Uitloogkarakteristieken - Antimoon

Waarden liggen ONDER aangegeven lijnen



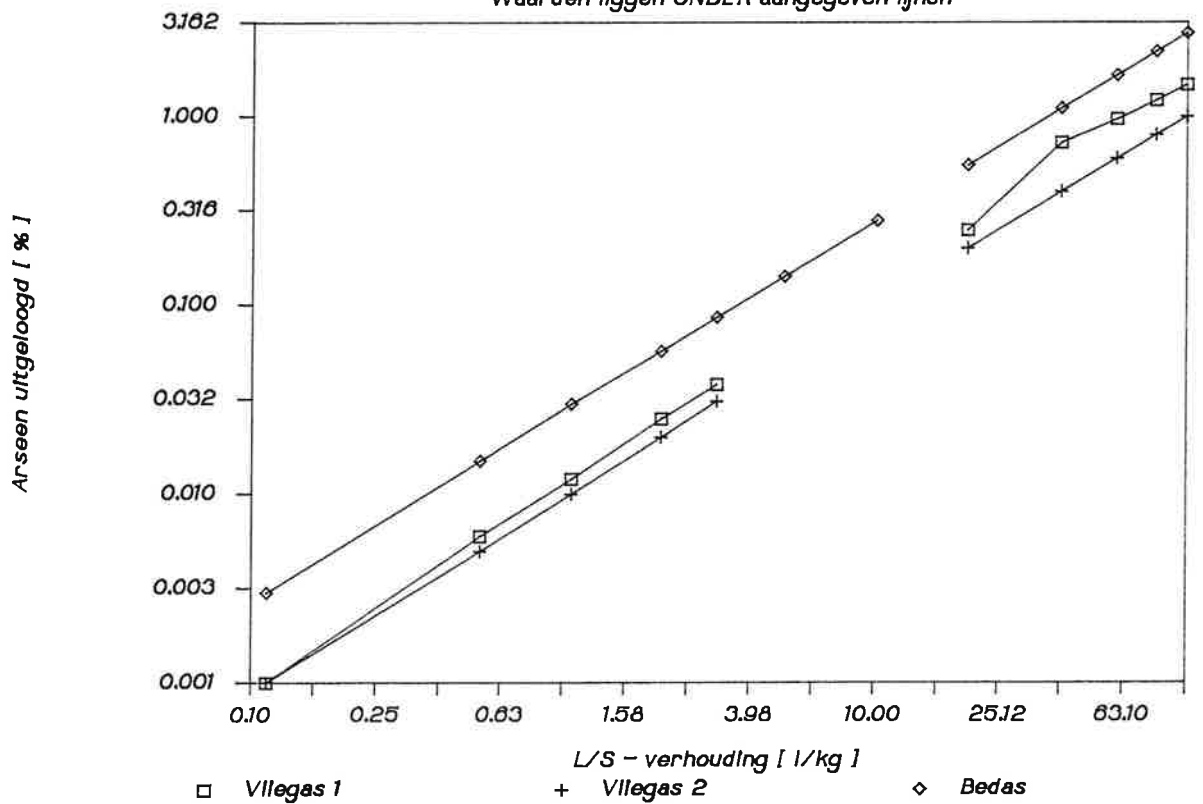
Uitloogkarakteristieken - Arseen

Concentraties overwegend < 0.002 ppm

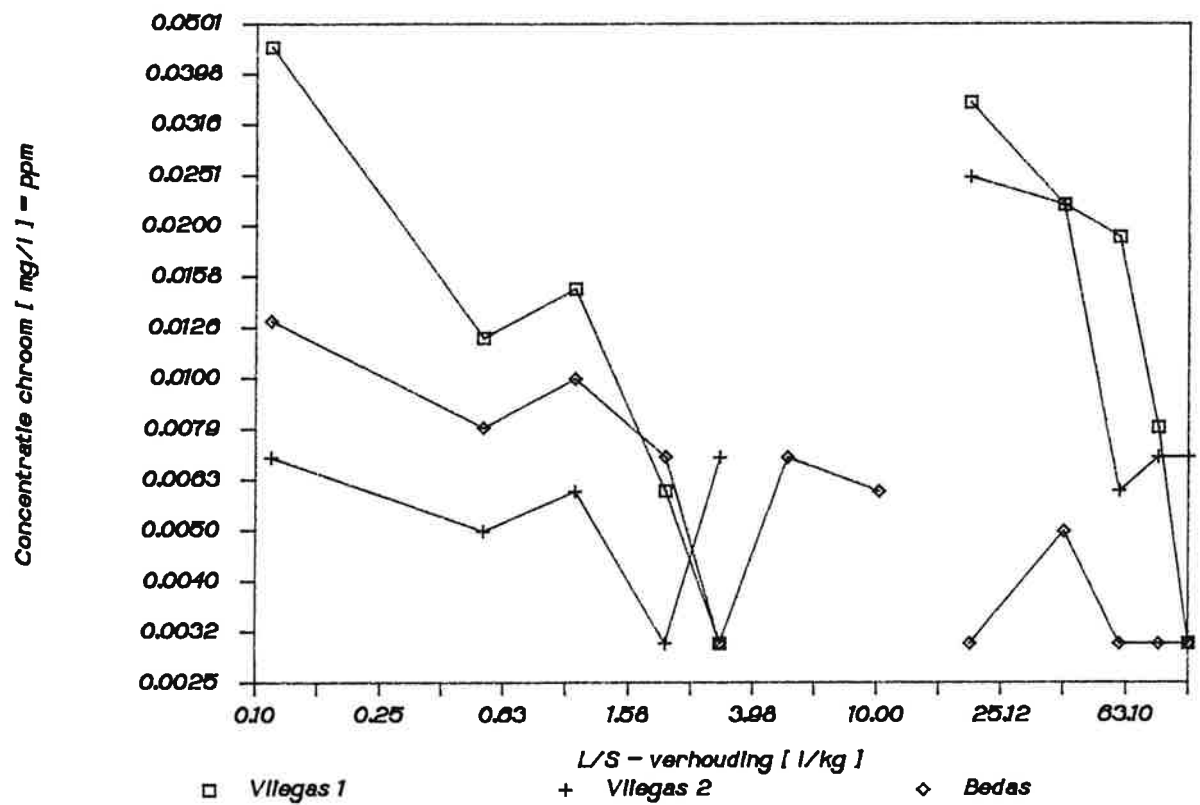


Uitloogkarakteristieken - Arseen

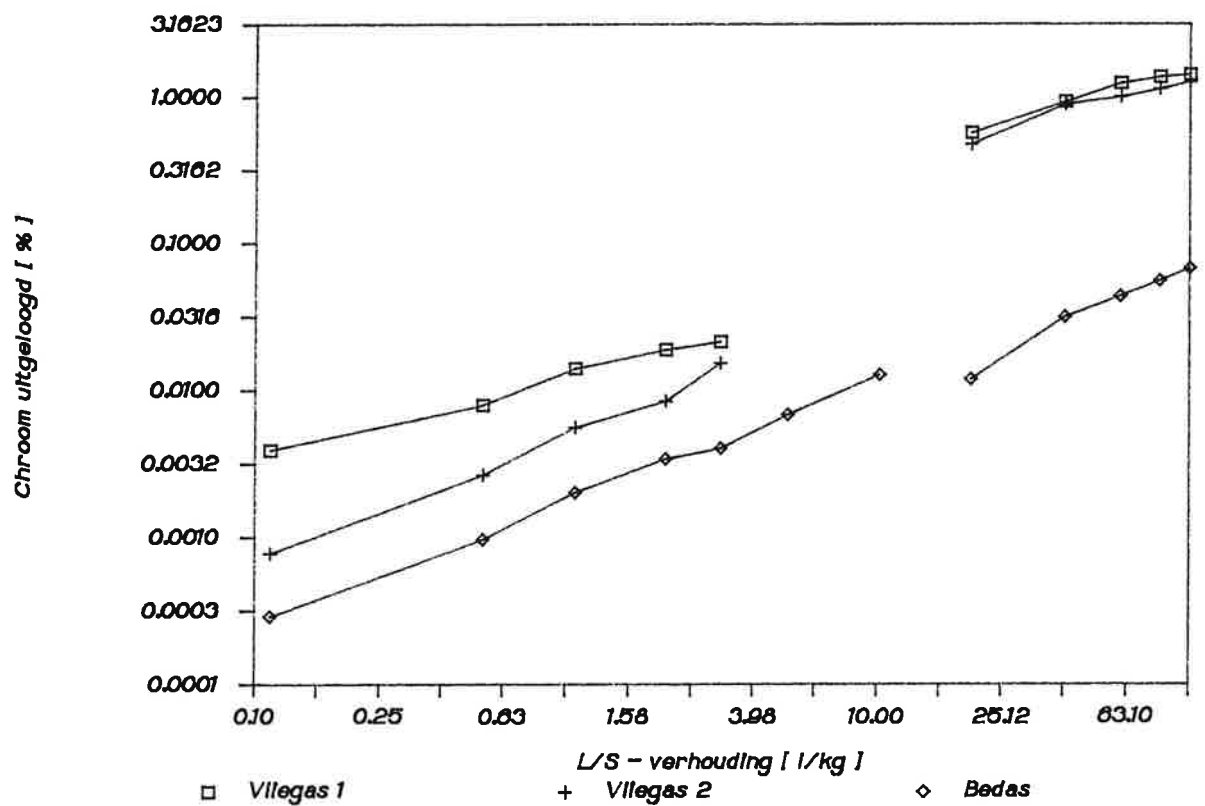
Waarden liggen ONDER aangegeven lijnen



Uitloogkarakteristieken - Chroom

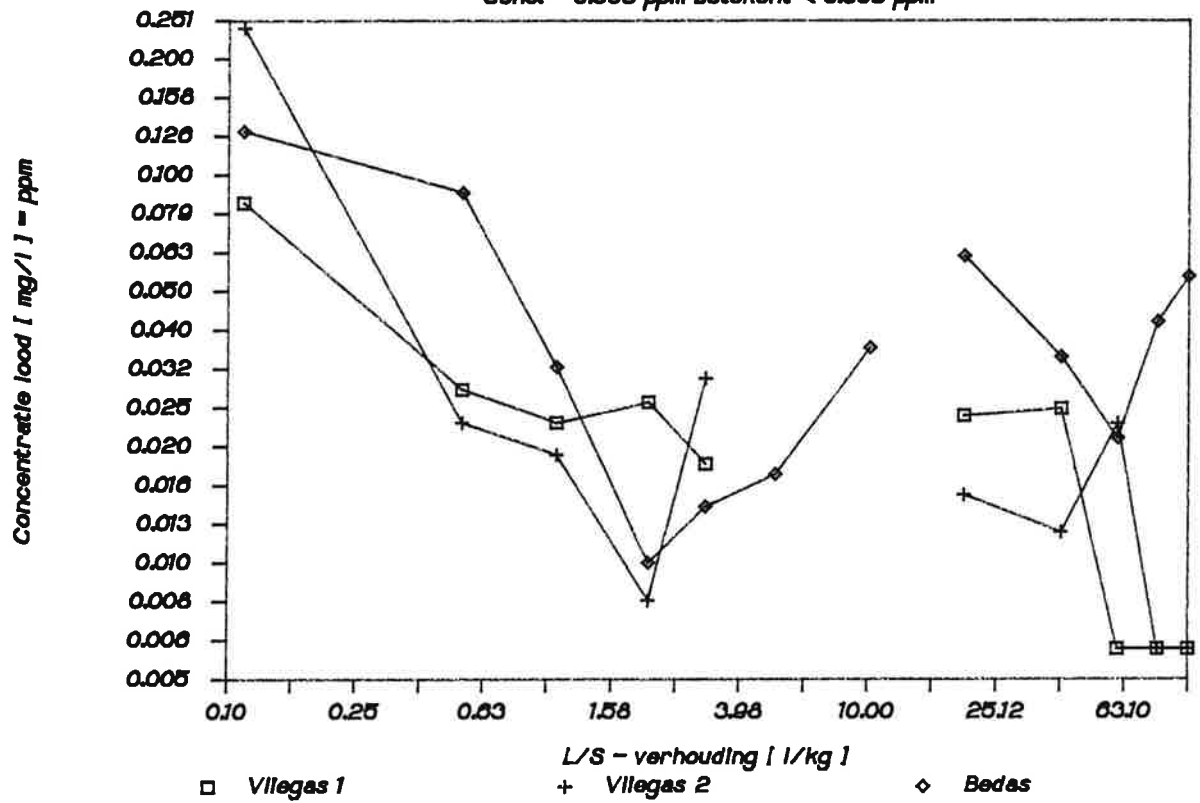


Uitloogkarakteristieken - Chroom

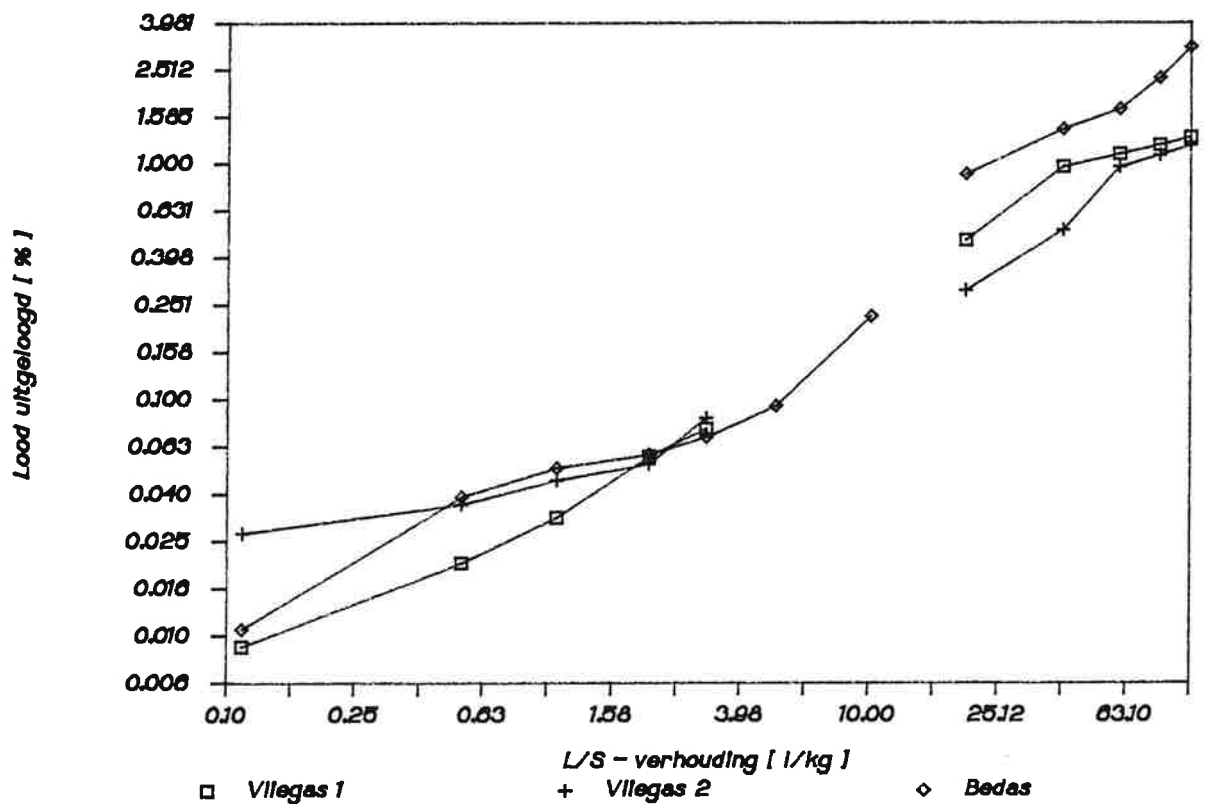


Uitloogkarakteristieken - Lood

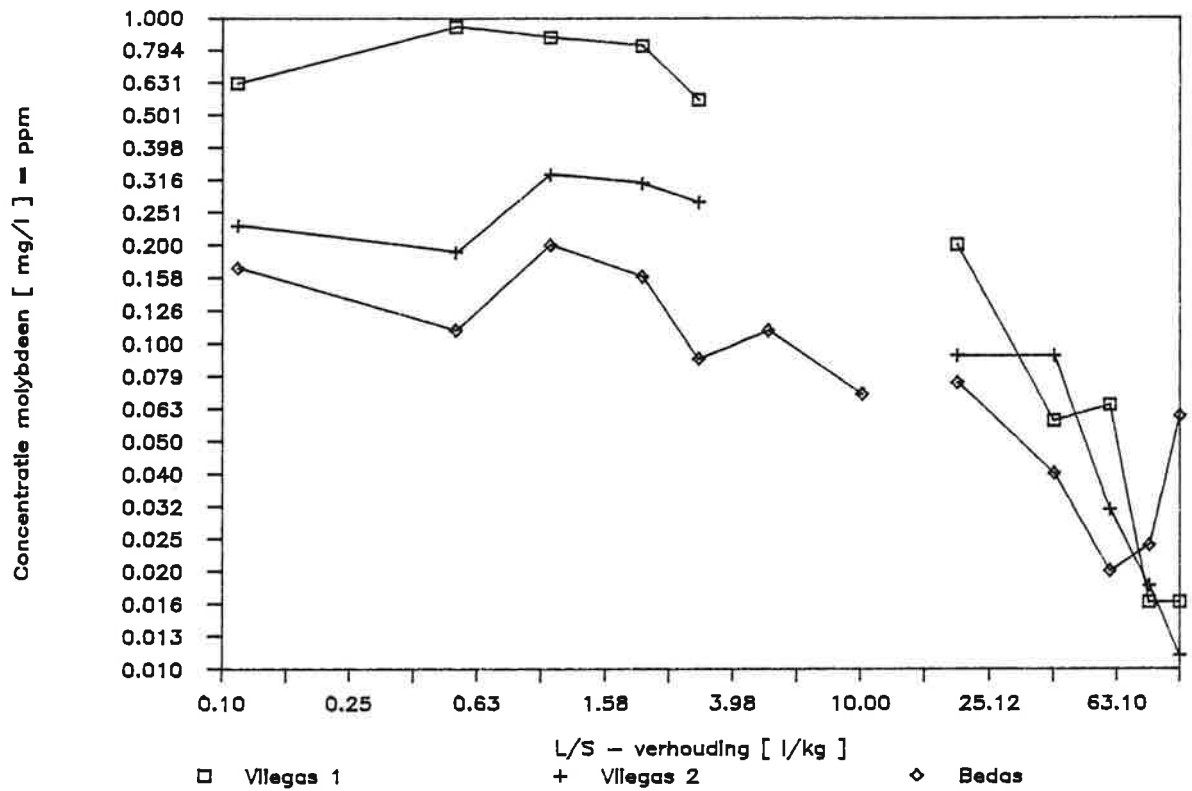
Conc. = 0.006 ppm betekent < 0.006 ppm



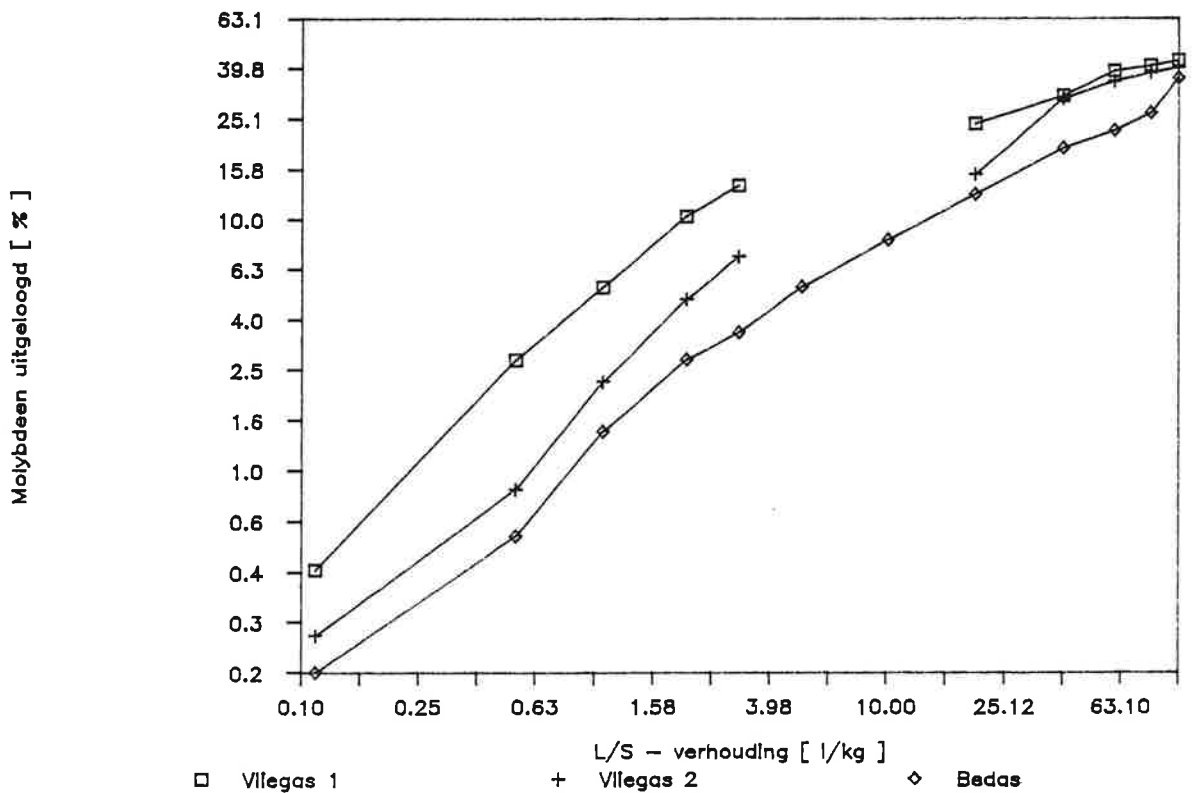
Uitloogkarakteristieken - Lood



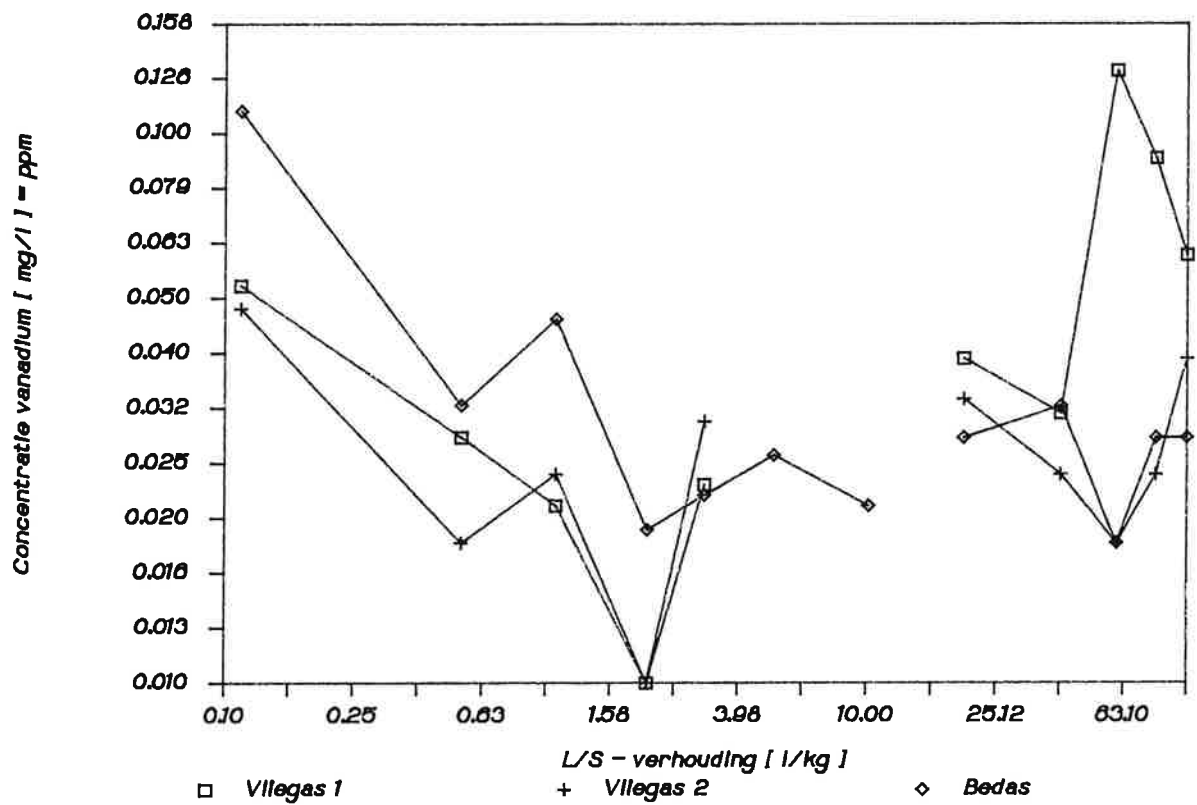
Uitloogkarakteristieken — Molybdeen



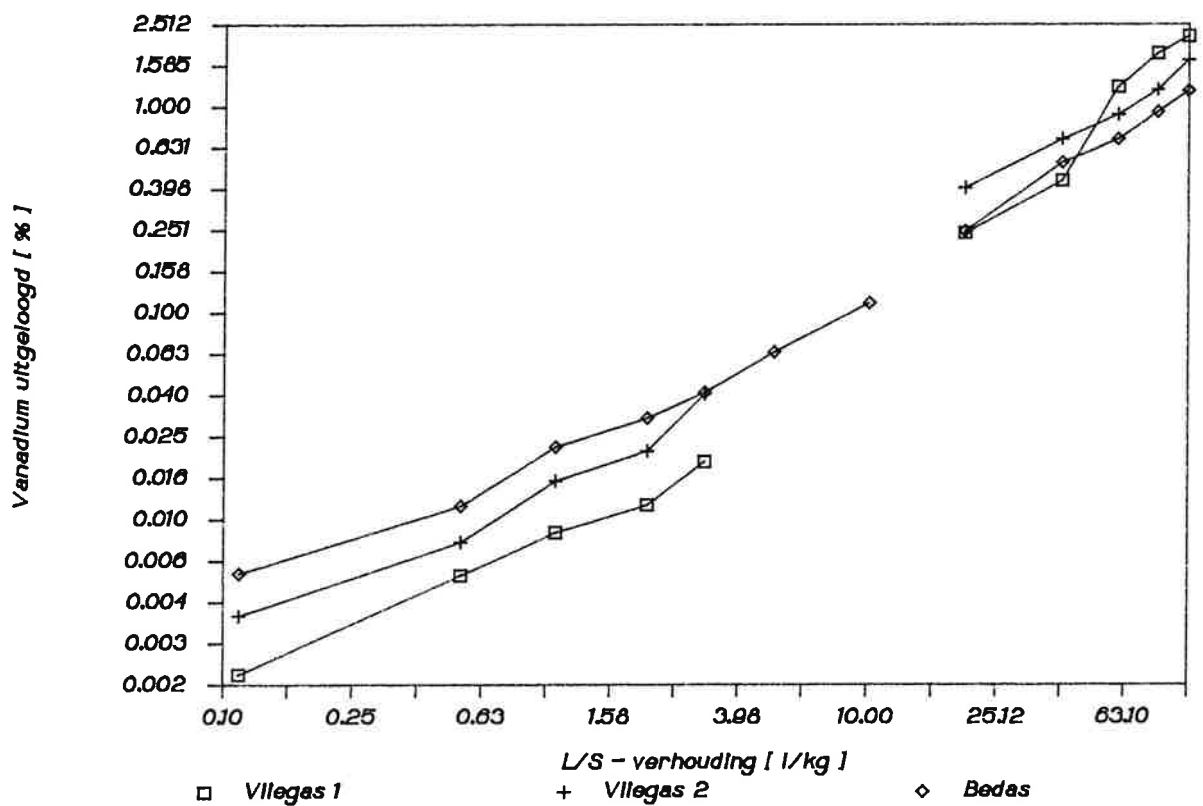
Uitloogkarakteristieken — Molybdeen



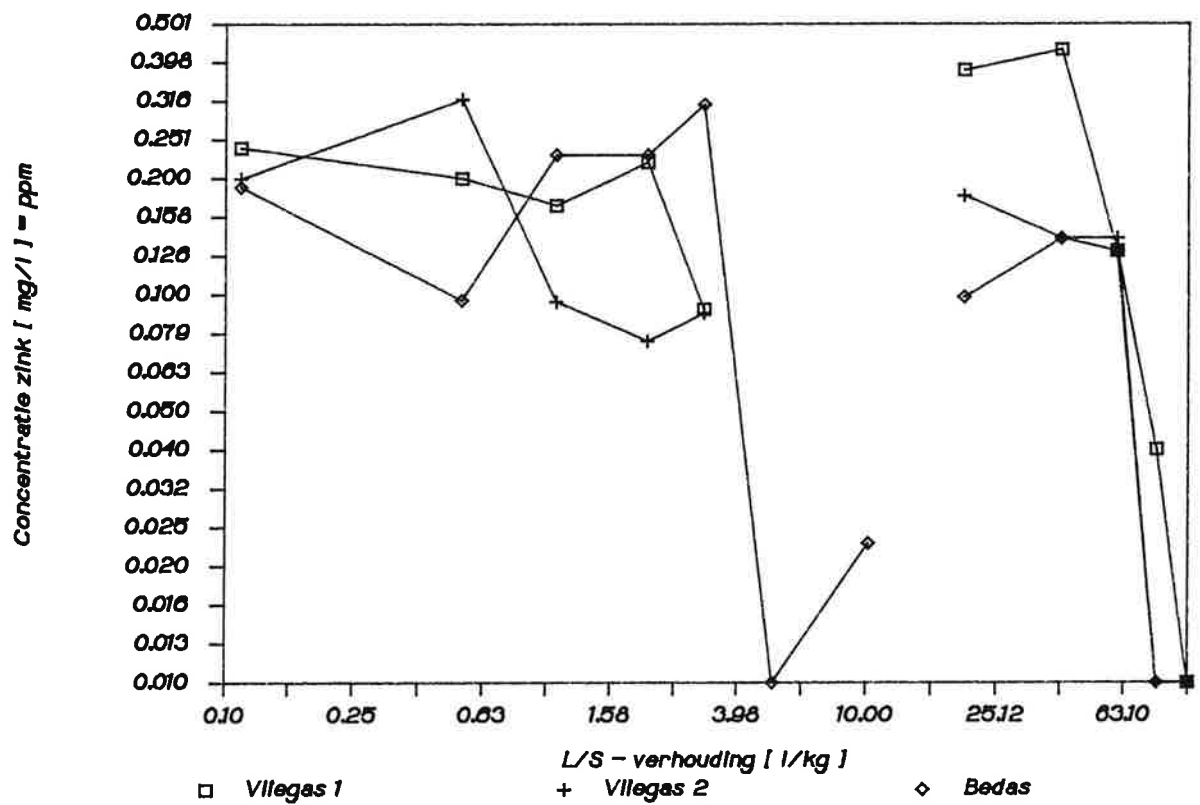
Uitloogkarakteristieken - Vanadium



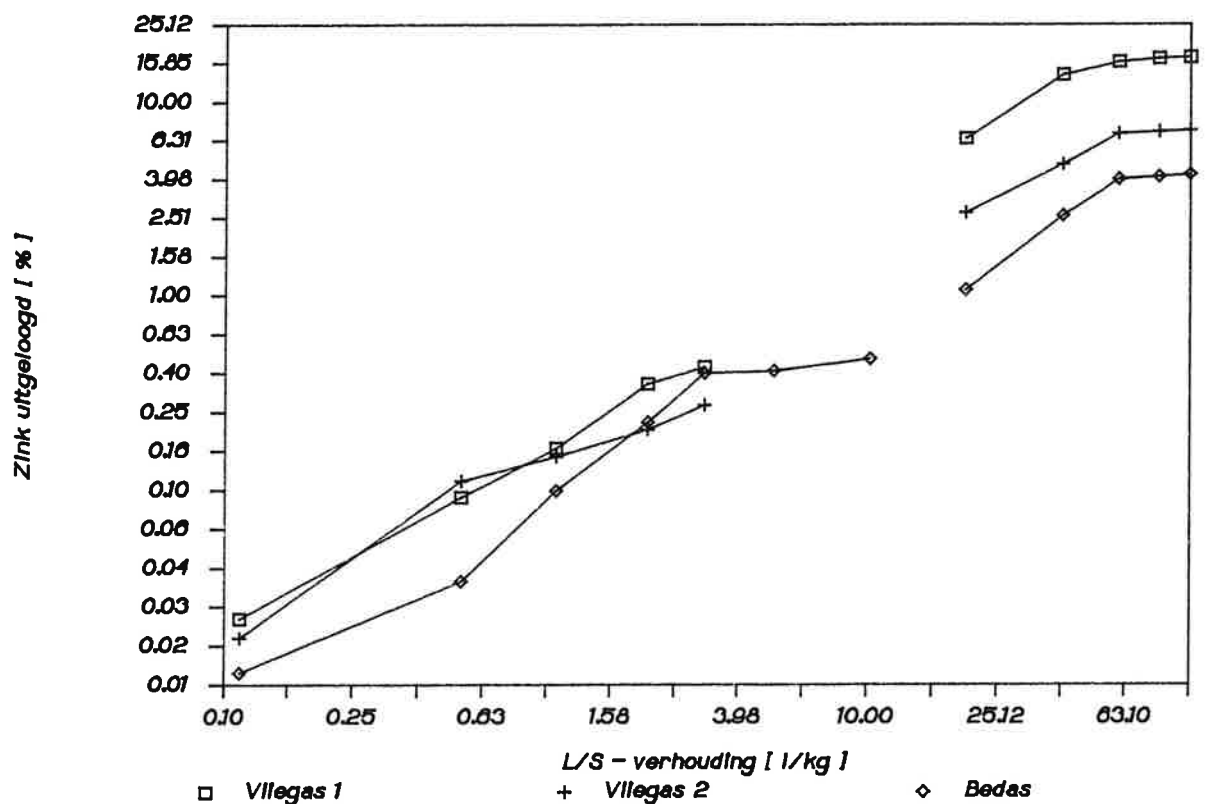
Uitloogkarakteristieken - Vanadium



Uitloogkarakteristieken - Zink



Uitloogkarakteristieken - Zink



BIJLAGE 14

Benodigde parameters voor het eenvoudig rekenmodel

RUN 180

Samenstelling kolen:

-----		Nulretentie:	15.0%
Koolstof:	88.75%	Stookwaarde:	31.28 MJ/kg
Zwavel:	0.74%		
Mineralen:	10.51%	----> SiO2:	48.0%
	-----	Al2O3:	26.0%
	100.00%	Fe2O3:	12.0%
	=====	CaO:	5.0%
		TiO2:	1.5%
		MgO:	2.0%
		Na2O:	1.5%
		K2O:	2.0%
		rest:	2.0%

			100.0%
		=====	

Procescondities van invloed op assamenstelling:

Koolstofrendement:	98.0%
Ca/S-verhouding:	2 mol Ca/mol S
CaCO3-rendement:	98.0%
S-bindingsrendement:	59.0%
Mineralen in top/bodemas:	6 kg/kg
SiO2 in top/bodemas:	4 kg/kg
Koolstof in top/bodemas:	250 kg/kg
CaCO3 in top/bodemas:	2 kg/kg
CaO in top/bodemas:	3 kg/kg
CaSO4 in top/bodemas:	5 kg/kg
Kolendosering:	400 kg/h
Kalkdosering:	18.5 kg/h
Topas produktie:	54.2 kg/h
Bodemas produktie:	10.7 kg/h
SO2-emissie:	194 g/GJ

