

Karakterisering van tweetraps AFBB-reststoffen

Ref.nr. 91-054
Dossiernr. 112322-20524
Datum februari 1991
NP

Auteur(s)
Ing. G.J. Grootenboer
Ir. E. Mulder

Trefwoord(en)
— AFBB-reststoffen
— tweetraps-verbranding
— vliegas
— bedas
— karakterisering
— uitloging
— SU-test

Bestemd voor
NOVEM
St. Jacobstraat 61
3511 BP Utrecht

Summary

Title : Characterization of two-stage AFBB-residues

Key-words : AFBB-residues, two-stage combustion, fly ash, bed ash, characterization, leaching, standard leaching test

Within the framework of the dutch national coal research program (NOK) the project 'Characterization of two-stage fluid-bed ashes on physical and chemical properties and leaching behaviour' (NOVEM- contractnumber 882845/ 2629 (72.40 - 306.10)) is carried out, by order of the 'Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu (NOVEM)'.

To get a picture of the properties of two-stage 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 raw materials in the production of building materials.

Five residues have been characterized. This means that they have been chemically analysed on main and trace-elements and that the following physical properties have been determined: specific density, bulk density and particle size distribution. Besides the availability of these elements for leaching has been examined. Of these five residues, three have been chosen to be characterized more extensively. Of these three residues, in addition to the properties already mentioned, the bitume-number and the specific area have been determined and also the morphology has been investigated with a Raster Electron Microscope. The leaching behaviour of two fly ashes and one bed ash has been examined more extensively by carrying out the complete standard leaching test, as recommended and developed by the SOSUV working group.

The main results of this characterization are mentioned in the table below. Next to the results of the two- stage residues the former results of the one-stage residues are mentioned for comparison.

physical properties	two-stage residues			one-stage residues		
	bedash 285	fly ash 285	fly ash 276	bed ash 180	fly ash 180	fly ash 189
bulk density (kg/m ³)	1411	1056	1069	1410	1110	1030
spec.density (kg/m ³)	2653	2354	2481	2830	2410	2480
spec.area (m ² /g)	1.9	18.1	23.8	2.2	8.5	12.0
bitume-number (-)	-	66	57	32	51	57
chemical composition						
tot. C (%)	0.7	15.6	10.7	0.3	12.0	12.0
tot. Ca (%)	5.6	16.0	9.0	20.5	12.6	13.1
Cr mg/kg	142	120	76	506	123	106
Mo mg/kg	13	27	24	12	17	12
cumulative emission by leaching (mg/kg)						
As (bij L/S = 10)	0.01	0.01	0.31	0.02	0.03	0.03
Mo (idem)	2.8	± 1.6	3.63	0.97	3.7	2.44

According to the requirements in the 'Concept Voorontwerp Bouwstoffen-besluit' all three of the residues are categorised as N₃, caused by the leaching of molybdenum and/or the amount of it in the solid.

As appears from the examination different sorts of coal affect more on the results than the method of combustion.

The final conclusion can be that there are no essential differences between one- and two-stage AFBB- residues fired from the same sort of coal.

Samenvatting

In het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kolen is, in opdracht van de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu B.V. (NOVEM), het project 'Karakterisering tweetraps-wervelbedassen op fysische en chemische eigenschappen en uitloogkarakteristiek' (NOVEM-overeenkomstnummer 882845/2629 (72.40 - 306.10)) uitgevoerd.

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

Er is een vijftal assen gekarakteriseerd. Dit houdt in dat ze chemisch geanalyseerd zijn op hoofd- en spoorelementen, dat de fysische eigenschappen absolute dichtheid, stortgewicht en korrelgrootteverdeling bepaald zijn en dat een zuur-base- en beschikbaarheidstest uitgevoerd is. Van deze vijf assen zijn er drie uitgebreider gekarakteriseerd. Van deze assen zijn naast genoemde grootheden, het bitumengetal en het specifiek oppervlak bepaald en zijn de morfologische eigenschappen met behulp van elektronenmicroscopie nader onderzocht. Tenslotte is van deze drie assen de uitloogkarakteristiek nader onderzocht door het uitvoeren van de volledige standaarduitloogtest, volgens SOSUV-procedure.

De belangrijkste resultaten van dit onderzoek staan in onderstaande tabel met daarnaast de waarden gevonden voor de ééntraps-assen ter vergelijking.

morfologische eigenschappen	tweetraps-assen			ééntraps-assen		
	bedas 285	vliegass 285	vliegass 276	beas 180	vliegass 180	vliegass 189
stortgewicht (kg/m ³)	1411	1056	1069	1410	1110	1030
abs. dichtheid (kg/m ³)	2653	2354	2481	2830	2410	2480
spec.oppervlak (m ² /g)	1.9	18.1	23.8	2.2	8.5	12.0
bitumengetal (-)	-	66	57	32	51	57
chemische samenstelling						
tot. C (%)	0.7	15.6	10.7	0.3	12.0	12.0
tot. Ca (%)	5.6	16.0	9.0	20.5	12.6	13.1
Cr mg/kg	142	120	76	506	123	106
Mo mg/kg	13	27	24	12	17	12
cumulatieve emissie door uitloging (mg/kg)						
As (bij L/S=10)	0.01	0.01	0.31	0.02	0.03	0.03
Mo (idem)	2.8	± 1.6	3.63	0.97	3.7	2.44

Volgens de normen in het 'Concept Voorontwerp Bouwstoffenbesluit' vallen alle drie de assen in de categorie N₃. In alle drie de gevallen wordt dat veroorzaakt door de uitloging van molybdeen en/of het gehalte in de vaste stof.

Uit het onderzoek blijkt ook dat de verschillen in kolensoort een duidelijker invloed hebben op de resultaten dan dat de verschillen worden veroorzaakt door één- of tweetrapsverbranding.

Uiteindelijk moet worden geconcludeerd dat er niet veel wezenlijke verschillen zijn tussen de één- en tweetrapsassen die gestookt worden van dezelfde kolensoort.

Inhoudsopgave

	Summary	2
	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
2	Gedeeltelijke karakterisering	8
2.1	Beschrijving AFBB-reststoffen en productie ervan	8
2.2	Monstername en -voorbewerking	9
2.3	Chemische karakterisering	10
2.4	Fysische karakterisering	13
2.5	Zuur-base- en beschikbaarheidstest	15
2.6	Selectie assen voor uitgebreide karakterisering	16
3	Uitgebreide karakterisering	17
3.1	Morfologisch onderzoek	17
3.2	Standaard-Uitloogtest	18
3.2.1	Kolomtest	19
3.2.2	Cascade-schudtest	19
3.3	Resultaten SU-test	20
3.3.1	Uitgevoerde berekeningen en grafische presentatie	20
3.3.2	Resultaten per element	22
3.4	Relatie lab-proeven - praktijksituatie	25
4	Bespreking karakteriseringsresultaten	27
4.1	Onderlinge vergelijking karakteriseringsresultaten tweetrapsassen	27
4.2	Vergelijking met ééntrapsassen	28
5	Conclusies	31
6	Literatuur	32
7	Verantwoording	33

Bijlagen 1 t/m 15

1 Inleiding

In het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kolen (NOK) wordt bij MT-TNO in opdracht van de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu B.V. (NOVEM) onderzoek gedaan naar wervelbedverbranding in een tweetraps Atmospheric Fluid Bed Boiler (AFBB). Als deelproject van dit TNO-onderzoek wordt ook aandacht besteed aan de reststoffen, ontstaan bij de tweetrapskolenverbranding in de AFBB. Het voorliggende rapport beschrijft de resultaten van het project: 'Karakterisering tweetraps- wervelbedassen op fysische en chemische eigenschappen en uitloogkarakteristiek' (NOVEM-overeenkomstnummer 882845/2629(72.40 - 306.10)). De projectomschrijving is opgenomen als bijlage 1.

Het is van belang, in verband met onderzoek naar toepassingsmogelijkheden van tweetraps AFBB-reststoffen, de chemische, fysische en uitloogeigenschappen van de reststoffen te kennen, zowel van bed- als van vliegassen. Deze eigenschappen zijn bepaald van reststoffen die afwijken van reststoffen die tot 1988 in de TNO-ééntraps-AFBB werden geproduceerd doordat het ketelontwerp en de stookcondities zijn veranderd (de ketel wordt nu in twee trappen bedreven).

Het onderzoek, en daarmee ook dit rapport, valt uiteen in drie fasen. Hoofdstuk twee beschrijft de gedeeltelijke karakterisering van 3 vliegassen en 2 bedassen. Deze gedeeltelijke karakterisering houdt in een chemische analyse op matrixelementen en spoorelementen en de bepaling van enkele fysische eigenschappen, alsmede een zuur-base- en beschikbaarheidstest. Dit is fase één.

In hoofdstuk drie komt de uitgebreide karakterisering, fase twee, aan de orde van drie assen, geselecteerd uit de 5 gedeeltelijk gekarakteriseerde assen. Deze uitgebreide karakterisering bestaat uit de bepaling van enkele fysische eigenschappen, het maken van elektronenmicroscopische opnamen en de uitvoering van de Standaard-Uitloogtest. De resultaten van de tweede onderzoekfase, morfologisch onderzoek en de Standaard-Uitloogtest (SU-test) met de drie geselecteerde assen, worden eveneens beschreven in hoofdstuk drie.

In fase drie, beschreven in hoofdstuk vier, zal een vergelijking gemaakt worden tussen de reststoffen afkomstig uit de ééntraps-AFBB en de tweetraps-AFBB.

Tenslotte zullen in hoofdstuk vijf enkele conclusies getrokken worden 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, met name met betrekking tot de toepassingsmogelijkheden van de assen.

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

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 1 zal eerst kort worden ingegaan op AFBB-reststoffen in het algemeen en op de 5 te karakteriseren assen en de condities waaronder deze assen geproduceerd zijn, in het bijzonder. In paragraaf 2 wordt beschreven welke voorbewerking de monsters ondergaan. Daarna zal in paragraaf 3 de chemische karakterisering op hoofd- en sporenelementen beschreven worden en in paragraaf 4 de fysische. In paragraaf 5 wordt vervolgens de zuur-base- en beschikbaarheidstest beschreven. Tot slot zal in paragraaf 6 kort aangegeven worden op grond waarvan de drie assen voor de uitgebreide karakterisering, bestaande uit morfologisch onderzoek en de Standaard-Uitloogtest, gekozen zijn.

2.1 Beschrijving AFBB-reststoffen en productie ervan

Al de te karakteriseren assen zijn afkomstig van de 4-MW_{th} kolengestookte tweetraps-AFBB, aanwezig bij TNO-Apeldoorn [1]. De steenkool wordt in een tweetraps-wervelbed verbrand. Het verschil met het ééntraps stoken, waar het verbrandingsproces plaatsvindt in oxiderend milieu, is dat bij 2-traps stoken het milieu in de 1^e trap, in het bed, reducerend en in de 2^e trap, in het zogenaamde freeboard, oxiderend is. 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 verbrandingsrendement 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 tweetraps-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 5 gekarakteriseerde assen zijn gekozen uit de in 1988 en 1989 geproduceerde assen. Er is naar gestreefd de meest relevante assen te selecteren, dat wil zeggen die assen die geproduceerd zijn onder optimale ketelcondities, met de meest gebruikte kolensoorten.

In bijlage 3 is van alle relevante runs een korte beschrijving gegeven. Er zijn 2 bedassen en 3 vliegassen gekarakteriseerd. De wijze van coderen van de asmonsters is weergegeven in bijlage 4.

2.2 Monstervoorbewerking

De bed- en vliegassen die door het ketelbedrijf geleverd worden, worden aangevoerd in vaten van 50 liter per asmonster. Dit is niet allemaal nodig voor de volledige karakterisering van de assen. Om voor de karakterisering geschikte monsters te krijgen worden de assen als volgt verdeeld:

eerst wordt er uit het vat van 50 liter aselekt een hoeveelheid van ca 12 kg. gehaald. Dit wordt vervolgens gesplitst volgens het onderstaande schema: 12 kg verdelen in zesstaps roterende verdeler:

6 * $\pm$ 2 kg hiervan: 1 apart bewaren
4 terug in het vat
1 verdelen

2 kg verdelen in zesstaps roterende verdeler:

6 * $\pm$ 330 g hiervan: 3 apart bewaren
2 terug in het vat
1 verdelen

voor bedassen geldt: 4 apart bewaren
1 verkleinen
1 verdelen

$\pm$ 330 g verkleinen in de kruisslagmolen en vervolgens verdelen volgens onderstaand schema.

$\pm$ 330 g verdelen in achtstaps roterende verdeler:

8 * $\pm$ 40 g hiervan: 3 apart bewaren
2 weg
3 gezamenlijk opnieuw verdelen

Dit geldt voor de vliegassen en de verkleinde bedassen. De niet verkleinde bedassen worden niet verder verdeeld.

$\pm$ 120 g verdelen in achtstaps roterende verdeler:

8 * $\pm$ 15 g hiervan: 4 weg
4 gezamenlijk opnieuw verdelen

$\pm$ 60 g verdelen in achtstaps roterende verdeler:

8 * $\pm$ 8 g hiervan: 3 apart bewaren
5 weg

Uiteindelijk blijft dan over voor de vliegassen:

1 * $\pm$ 2 kg
 3 * $\pm$ 330 g
 3 * $\pm$ 40 g
 3 * $\pm$ 8 g

Voor de bedassen blijft uiteindelijk over:

1 * $\pm$ 2 kg
 4 * $\pm$ 330 g ongemalen
 3 * $\pm$ 40 g ongemalen
 3 * $\pm$ 40 g gemalen
 3 * $\pm$ 8 g gemalen

Hiervan worden dan de volgende monsters gebruikt:

2 kg : stortgewicht + kolomtest
 330 g : korrelgrootteverdeling (ongemalen monster voor bedas)
 330 g : absolute dichtheid (ongemalen monster voor bedas)
 40 g : chemische analyse vaste stof (gemalen monster)
 40 g : bepaling specifiek oppervlak
 40 g : bepaling bitumengetal (alleen vliegassen)
 8 g : beschikbaarheidstest
 8 g : röntgendiffractie-analyse (gemalen monster)

2.3 Chemische karakterisering

De assen zijn geanalyseerd op koolstof (organisch en anorganisch), zwavel (sulfide en sulfaat) en op de belangrijkste mineralen die in de kolen en het toeslagmateriaal voorkomen: calcium, silicium, aluminium en ijzer. De gevolgde procedures bij de chemische analyse zijn weergegeven in tabel 2.1.

Tabel 2.1 Gevolgde procedures bij chemische analyse

Grootheid	Procedure
Totaal koolstofgehalte	IR-detectie, na verbranding
Carbonaat-koolstof	IR-detectie, na ontleding van het carbonaat met H_3PO_4
Sulfaat S	ISO 157
Sulfide	NEN 3235 8.3 Fotometrisch
Silicium	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 $HClO_4$

De resultaten van deze chemische analyses zijn in tabelvorm weergegeven in bijlage 5.

Voor wat betreft de spoor-elementen-analyse moest vooraf een keuze gemaakt worden uit alle in kolenassen voorkomende elementen. Deze keuze is gemaakt aan de hand van reeds eerder verricht onderzoek [2], [3]. Daarbij is gekeken of het element in redelijke concentratie aanwezig was in de reeds onderzochte ééntraps-assen en of het element daarbij enigermate uitloogde.

De keuze is gevallen op de volgende spoor-elementen: antimoon, arseen, barium, cadmium, chroom, koper, lood, molybdeen, nikkel, selenium, vanadium en zink.

De gevolgde procedures bij de analyses van de gekozen spoor-elementen zijn weergegeven in tabel 2.2.

Tabel 2.2 Gevolge procedures bij spoor-elementen-analyse

Grootheid	Procedure
Antimoon	AAS-hydridetechniek, na ontsluiting in een ontsluitingsbom, in koningswater en waterstoffluoride
Barium, Chroom, Arseen, Molybdeen, Cadmium, Lood, Vanadium	AAS-grafietoventechniek, na ontsluiting volgens de Silberman-Fisher-methode, uit N.V.N 2507
Koper en Zink	AAS-vlamtechniek, na ontsluiting volgens dezelfde Silberman-Fisher-methode
Nikkel	AAS-vlamtechniek of -grafietoventechniek, afhankelijk van concentratie, na Silberman-Fisher-methode
Seleen	AAS-hydridetechniek, na ontsluiting volgens Silberman-Fisher-methode

De resultaten van deze spoor-elementen-analyse zijn opgenomen in bijlage 5.

Daarnaast is de minerale samenstelling van de verschillende assen voor zover mogelijk berekend (zie bijlage 9, 10 en 11).

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 als calciumsulfaat.
- Het overige calcium is aanwezig als oxyde.
- Alle aluminium, silicium en kalium is aanwezig als oxyde.
- De assen bevatten geen chloride.

De gekarakteriseerde assen zijn onder verschillende condities geproduceerd, met 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.

In het hierna volgende deel worden de resultaten van de chemische analyses kort besproken:

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.

De vliegassen hebben alle een hoog koolstofgehalte van ca 15%, uitgezonderd 81.250.276 dat 10% kool bevat. Dit is te verklaren door het gebruik van Australische kool -dat een as-gehalte heeft van 13%- in plaats van Poolse 11, met een as-gehalte van 9%.

De bedassen hebben beide een erg laag koolstofgehalte, beneden de 1%.

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

Calciumverbindingen

Het calciumgehalte van AFBB-vliegas is afhankelijk van de Ca/S-verhouding. Hoe meer calcium als toeslagmateriaal aan de kolen wordt toegevoegd, hoe meer calcium er in de as aanwezig is. Het calcium gehalte van de vliegassen varieert van 9% tot 16%.

De bedassen vertonen een groot verschil in calciumgehalte. De bedas van run 276 heeft een lager calciumgehalte dan de bedas van run 285, respectievelijk 8,5 en 15,6%. Dit is ook een gevolg van het verschil in Ca/S-verhouding, alleen het zo grote verschil is hiermee niet te verklaren. De meest voor de hand liggende verklaring is, dat door de toepassing van een ander soort toeslagmateriaal met een hogere hardheid (in run 285 is Ballidon kalk gebruikt in plaats van Engis, zoals gebruikelijk), de kalkdeeltjes minder snel slijten en er dus een groter deel in de bedas terecht komt. Het calciumcarbonaatgehalte is erg laag, circa 1,5%. Bijna alle calciumcarbonaat ontleedt dus in calciumoxide en kooldioxide. Deze calciumoxide-deeltjes worden met de aanwezige zwaveldioxide omgezet in calciumsulfaat, waarbij aan de buitenkant van het calciumoxide-deeltje een laagje calciumsulfaat wordt gevormd. Dit zorgt ervoor dat de calciumoxide niet meer, of in ieder geval veel minder bereikbaar is voor de zwaveldioxide. Deze deeltjes komen, afhankelijk van hun grootte, terecht in de bedas of de vliegas.

Mineralen

Het siliciumgehalte is voor de assen 81.238.267 en 81.261.285 redelijk hetzelfde (Poolse 11), ca 11%. Die van 81.250.276 is $\pm 17\%$ (Australische).

Dit verschil komt ook tot uitdrukking in de bedassen van run 276 en run 285, maar het gehalte in de bedassen is hoger dan dat van de vliegassen, namelijk tussen 16 en 23%. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door grove kwartsdeeltjes in de kolen, die nauwelijks slijten in het bed.

Het aluminiumgehalte in de Australische vliegas is ook beduidend hoger dan dat in de Poolse 11-vliegas, respectievelijk 12 en 7%. In de bedassen is het verschil kleiner, namelijk 11 en 8%.

Het ijzergehalte is daarentegen beduidend lager in de Australische vlieggas (< 1%) dan in de Poolse 11 (ca 3%), in beide bedassen 1 en 2%.

Sulfide

In de analyse blijkt dat in de bedassen en in de vlieggas van run 276 een duidelijke hoeveelheid sulfide aanwezig is. Dit betekent dat niet alle zwavel, die in de kolen aanwezig is, volledig is geoxideerd. Voor de bedassen is dit te verklaren uit het feit dat de ketel in twee trappen wordt bedreven, te weten een reducerend en een oxiderend gedeelte. Met name dit reducerende gedeelte zorgt ervoor dat niet alle zwavel omgezet wordt tot zwaveldioxide, maar dat een gedeelte wordt omgezet tot sulfide. Dit in tegenstelling tot de ééntrapsketel waarin alleen een oxiderende stap aanwezig is, en dus ook geen sulfides in de assen voorkomen. Voor de vlieggas uit run 276 moet opgemerkt worden dat deze onder niet-optimale condities is geproduceerd.

Spoorelementen

Uit de resultaten voor de spoorelementenanalyse blijkt dat:

- de gehalten voor alle spoorelementen in de vliegassen van de Poolse 11 vrijwel gelijk zijn, en dat de vlieggas van de Australische duidelijke afwijkingen hiervan vertoont.
- het chroom-gehalte voor de vliegassen van de Poolse 11 duidelijk hoger is dan voor de assen van de Australische kolen, respectievelijk ± 125 en 76 ppm. Dit geldt ook voor koper, antimoon en zink, respectievelijk ± 160 en 70 ppm, ± 9 en 2 ppm en ± 145 en 75 ppm.
- het arseen-gehalte voor de assen van de Poolse 11 duidelijk lager is dan voor de assen van de Australische kolen, respectievelijk ± 63 en 85 ppm. Dit geldt voor zowel de bed- als de vliegassen.
- het molybdeen-gehalte voor de vliegassen ongeveer 25 ppm is en voor de bedassen ongeveer 14 ppm.
- de bedassen van beide kolensoorten zeer goed overeenkomen, uitgezonderd vanadium.
- het vanadiumgehalte voor de bedas van de Poolse 11 lager is dan dat voor de Australische kool, te weten 200 en 290 ppm.

2.4 Fysische karakterisering

Van de vijf 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-pycnometer. De resultaten van deze bepalingen zijn ondergebracht in bijlage 6.

De absolute dichtheid van de vliegassen ligt tussen 2300 en 2500 kg/m³.

De absolute dichtheid van de bedassen varieert van 2650 tot 2670 kg/m³. Deze is niet veel groter dan van de vliegassen. Het verschil valt gedeeltelijk te verklaren uit het feit dat de bedassen een hoger silicium- gehalte hebben. Een uitzondering hierop is de vliegas 81.250.276, deze valt wat betreft Si-gehalte in dezelfde range als de bedassen. Het verschil hier valt te verklaren uit het hogere koolstofgehalte (= lichtere deeltjes) voor de vliegas ten opzichte van de bedassen. Het onderlinge verschil tussen de vliegassen is duidelijk te verklaren uit het feit dat de vliegas 81.250.276 een hoger Si-gehalte en een lager koolstofgehalte heeft.

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 2.000 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 6.

Vóór het stampen varieert de dichtheid van de vliegassen van 764 tot 815 kg/m³, na 2000 maal stampen van 1056 tot 1104 kg/m³.

Het stortgewicht van de tweetraps-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 poederkoolvliegas, waarvan de deeltjes rond zijn en waarvan het stortgewicht dan ook hoger is [4].

Het stampen heeft op de bedassen niet zoveel invloed. De dichtheid voor stampen varieert hier van 1241 tot 1281 kg/m³ en na het stampen van 1385 tot 1411 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)
- de afvangsmethode van de vliegas
- van het terugstookstelsel en
- de fluïdisatiesnelheid in de AFBB.

De korrelgrootteverdeling van de bedassen is bepaald met behulp van controle-zeven (NEN 2560). Bij de vliegassen is hiervan ook gebruik gemaakt vanaf 125 micrometer. De fractie fijner dan 125 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 in bijlage 7. Hieruit blijkt dat de vliegassen 81238267 en 81261285 ongeveer gelijk zijn, maar dat vliegas 81250276 een duidelijk fijnere fractie bevat. Dit is te verklaren door het feit dat deze

as afkomstig is van een andere kolensoort. De bedassen zijn vrijwel gelijk (helling van beide lijnen vrijwel gelijk), alleen bevat bedas 51210276 een grotere hoeveelheid van de fractie tussen 0,25 en 0,5 millimeter.

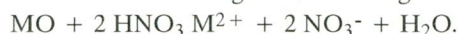
2.5 Zuur-base- en beschikbaarheidstest

Om in korte tijd na te kunnen gaan welk percentage van een element op zeer 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 NVN 2508 "Zuur-base-gedrag" en de beschikbaarheidstest volgens NVN 2508, onder 'Bepaling van de maximale uitloogbaarheid' [5].

De resultaten van dit gedeelte van het onderzoek zijn opgenomen in bijlage 9, 10 en 11 (blad 1). 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 $\text{pH} = 12$. Het asmateriaal is dus sterk basisch en heeft een grote buffercapaciteit, waardoor de pH van regenwater, $\text{pH} = 4-6$, 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 uitgelooft is. Basische metaaloxiden reageren namelijk met salpeterzuur. Bijvoorbeeld een metaaloxide met een tweewaardig metaalion reageert als volgt:



Bij de beschikbaarheidstest is 30-50 ml 1 N HNO_3 , dat is 30-50 mgeq. H^+ per 8 g. as verbruikt om de pH gedurende 3 uur op 7 + 3 uur op 4 te houden. Dit in tegenstelling tot de beschikbaarheidstest op ééntraps-assen waarbij gedurende 4 uur de pH op 4 werd gehouden.

- Van een aantal spoorelementen looft er uit as 81250276 duidelijk een kleinere hoeveelheid uit. Voorbeelden hiervan zijn: barium, koper, antimoon en zink. Dat het uiteindelijk beschikbare percentage van bepaalde elementen soms hoger uitvalt heeft te maken met het feit dat deze as van die bepaalde elementen in de vaste stof een lager gehalte heeft. Voorbeeld hiervan is chroom: vlieg-as 81261285 3.5 mg/kg (2.9% beschikbaar) en 81250276 4.0 mg/kg (5.3%).

2.6 Selectie assen voor uitgebreide karakterisering

Bij het maken van de keus van 2 vliegassen en 1 bedas uit de 5 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:

- 81.261.285 omdat deze onder 'optimale' verbrandingscondities geproduceerd is en als representatief beschouwd mag worden.
- 81.250.276 omdat dit een as is van een andere kolensoort en in de beschikbaarheidstest duidelijk andere hoeveelheden spoorelementen uitloogden. Ook omdat deze as veel fijnere deeltjes bevat dan de andere twee vliegassen.
- 51.223.285 omdat deze bedas als representatief beschouwd mag worden en weinig verschil toont met de bedas van de Australische kool.

3 Uitgebreide karakterisering

Om na te kunnen gaan welke toepassingsmogelijkheden er zijn voor bepaalde assen, is het van belang meer specifieke 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:

- 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.

De Standaard Uitloogtest, waarin de uitlooeigenschappen van een as getest worden, staat beschreven in paragraaf 2. De resultaten van deze test staan beschreven in paragraaf 3. Tenslotte zal in paragraaf 4 getracht worden een relatie te leggen tussen de uitgevoerde lab-proeven en te verwachten situaties in de praktijk.

3.1 Morfologisch onderzoek

In dit morfologische onderzoek zijn het bitumengetal en het specifiek oppervlak van de assen bepaald. Tevens zijn elektronenmicroscopische opnamen van de assen gemaakt.

Bitumengetal

Van de twee vliegassen is het bitumengetal bepaald. Deze 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 bepaling zelf is uitgevoerd volgens de 'eisen 1978 voor bouwstoffen in de wegenbouw' van Rijkswater- staat, proef 58. Het resultaat van deze bepaling is opgenomen in bijlage 6.

Het bitumengetal van de vliegassen is respectievelijk 57 en 66 voor de assen 81.250.276 en 81.261.285. Dit houdt in dat de vliegassen, wat het bitumengetal betreft, in aanmerking zouden komen als 'middelsoort vulstof'.

Specifiek oppervlak

Naast het bitumengetal is ook het specifiek oppervlak bepaald. Het specifiek oppervlak is één van de grootheden die het uitlooggedrag bepalen 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 bedas is niet vooraf gemalen.

De resultaten van deze bepaling zijn eveneens opgenomen in bijlage 6. Het specifiek oppervlak van de vliegassen ligt rond de $20 \text{ m}^2/\text{g}$, de waarde voor de bedas is $1,85 \text{ m}^2/\text{g}$.

Elektronenmicroscopische opnamen

Met behulp van een rasterelektronenmicroscop zijn vergrote opnamen gemaakt van de drie assen. Hierbij is gebruik gemaakt van met koolstof opgedampte preparaten (dikte opdamplaat 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. De resultaten van de analyses staan in bijlage 8, blad 1 en 2. Enkele gemaakte foto's zijn opgenomen in bijlage 8, blad 3 en 4.

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

- door de grove korrels van de as 51.223.285 is het niet goed mogelijk een redelijke vlakanalyse uit te voeren. De oppervlakte-diepteverschillen zijn namelijk veel groter dan 1 micrometer. De resultaten vertonen weinig overeenkomst met de chemische analyse.
- van beide vliegassen is wel een redelijke oppervlakte-analyse te maken. De resultaten vertonen duidelijke overeenkomsten met de chemische analyses. De verschillen worden verklaard door het feit dat met EDAX niet alle elementen gemeten zijn, onder andere koolstof en zuurstof, zodat bij het berekenen van de samenstelling de percentages iets hoger uitkomen.
- Koolstof komt zowel voor in deeltjes, die vrijwel geheel uit koolstof bestaan als in deeltjes die slechts gedeeltelijk uit koolstof bestaan. De eerst genoemde deeltjes zijn onverbrande kooldeeltjes en hebben over het algemeen een diameter van 30 tot 50 micrometer en zien eruit als stukjes 'gatenkaas'. Duidelijke voorbeelden zijn te zien op foto 81.261.285. 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 grillige vorm, met een concentratie mineralen aan de buitenkant. Uit vergelijking met de opnamen van de ééntrapsassen blijkt dat de deeltjes in de tweetrapsassen gelijkvormig zijn aan de deeltjes in de ééntrapsassen.

3.2 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], en geresulteerd heeft in de NVN 2508 [5].

In deze paragraaf zullen de kolomtest en de cascade-schudtest, beide onderdeel van de SU-test, in subparagraaf 1 respectievelijk subparagraaf 2 beschreven worden. In paragraaf 3.3 zullen de resultaten van beide tests bekeken worden.

3.2.1 Kolomtest

Met behulp van de kolomtest wordt percolatie van regenwater door gestorte as nagebootst. De enige factor die anders is dan in een praktijksituatie, is de toevoersnelheid van het (regen)water. Hierdoor kan in een tijdsbestek van ongeveer drie weken de percolatie van regenwater door een vliegasoopslag 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 'NVN 2508'. 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, 0.2, 0.5, 1, 2, 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 is geweest. De eerste monsters worden dus vrij snel na elkaar genomen. Dit is om ook voorspellingen te kunnen doen over de uitloging in de praktijk op korte termijn, dat wil zeggen tussen 1 en 5 jaar.

De kolommen met de beide vliegassen zijn echter niet, zoals 'NVN 2508' aangeeft, 10.000 maal gestampt maar slechts 1.000 maal, omdat bij een eerdere proefneming, waarbij wel 10000 maal was gestampt, gebleken was dat na een periode van ongeveer 4 dagen het uitloogmedium niet meer door de kolom geperst kon worden. Ook na slechts 1.000 maal aanstampen gaf de vliegass 81.261.285 nog problemen. Door het hoge kalkgehalte is de as gedurende de test gaan uitharden. De test is uiteindelijk gestopt tussen $\text{L/S} = 2$ en $\text{L/S} = 5$.

De opgevangen monsters zijn aangezuurd met 5 N salpeterzuur tot ongeveer $\text{pH} = 2$, waarna de monsters geanalyseerd zijn op calcium, arseen, barium, chroom, koper, molybdeen, antimoon en zink. Vóór het aanzuren is nog een kleine hoeveelheid monster apart gehouden zodat hierin sulfaat bepaald kon worden. De resultaten van de kolomtest zijn getalsmatig weergegeven in bijlage 9, 10 en 11 en grafisch weergegeven in bijlage 12, 13, 14 en 15 en worden besproken in paragraaf 3.3.

3.2.2 Cascade-schudtest

De cascade-schudtest wordt over het algemeen uitgevoerd bij grotere L/S-verhoudingen. Dit om iets te kunnen zeggen over het uitloog-gedrag 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 meer 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 'NVN 2508', 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 afgefilterd 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 uitgevoerd. De totaal uitgelooft 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 als de monsters van de kolomtest. De resultaten staan eveneens vermeld in de bijlagen 9 t/m 15.

3.3 Resultaten SU-test

In deze paragraaf zullen de resultaten van de volledige SU-test worden besproken (beschikbaarheidstest, kolomtest en cascade-schudtest). In de eerste subparagraaf zal aan de hand van een voorbeeld getoond worden welke berekeningen zijn uitgevoerd en hoe de resultaten worden gepresenteerd. Daarna volgt in de tweede subparagraaf een korte omschrijving van de resultaten per element. Een verder bespreking van de resultaten vindt plaats in hoofdstuk 4.

3.3.1 Uitgevoerde berekeningen en grafische presentatie

In deze subparagraaf wordt aan de hand van het element molybdeen uit de bedas 51223285 weergegeven welke berekeningen er uitgevoerd zijn en waar de resultaten van deze berekeningen te vinden zijn. Ook wordt aan de hand van dit element verklaard hoe de gegevens grafisch worden weergegeven en wat de betekenis van de verschillende lijnen in de grafieken is.

Uit de vaste stof analyse volgt het molybdeengehalte: 13 mg/kg.
De analyse van de vloeistof van de beschikbaarheidstest geeft een molybdeen-concentratie van 41 µg/l. De voor de beschikbaarheidstest ingewogen hoeveelheid vaste stof is: 7.33 gram (0% vocht). Dit is tweemaal gesuspenderd in 733 ml demi-water. De totale toegevoegde hoeveelheid zuur is 35 ml. De beschikbaarheid van molybdeen in mg per kg droge stof wordt dan als volgt berekend:

$$0.041(\text{mg/l}) * (2 * 733 + 35) / 1000 * 7.33 / 1000 = 8.4 \text{ mg/kg}$$

De beschikbaarheid in % van in de droge stof aanwezige hoeveelheid wordt dan als volgt berekend: ((beschikbaarheid in mg/kg droge stof) / (gehalte volgens vastestofanalyse)) * 100%

Ingevuld levert dat: $(8.4 / 13) * 100\% = 65\%$

Gemeten concentraties

Allereerst worden de gemeten concentraties van de verschillende elementen in de opgevangen vloeistof uitgezet tegen de L/S-verhouding. Hieruit volgt dan een concentratie-profiel, waaruit eventueel gelimiteerde oplosbaarheden van die elementen zijn te herkennen. Deze resultaten worden grafisch gepresenteerd in bijlage 13. Hierbij is voor de X-as een logaritmische schaal gebruikt die loopt van 0,1 tot 100. Op de Y-as is de gemeten concentratie, in mg/l, uitgezet op een logaritmische schaal die zes decaden omvat, overeenkomstig de Checklist [8].

Cumulatieve emissie

Voor een goede interpretatie van de uitlooggegevens is het gewenst niet alleen te kijken naar de concentraties aan uitgelooide componenten, maar ook naar de totale hoeveelheid die wordt uitgelooft, uitgedrukt in bijvoorbeeld milligrammen per kilogram materiaal. Dit wordt ook wel de cumulatieve emissie genoemd. Om deze cumulatieve emissie uit te kunnen zetten tegen de L/S-verhouding werd de emissie per opgevangen fractie gecumuleerd volgens de formule:

$$\text{Cumulatieve emissie } M(\text{olybdeen}) = (\text{conc. } M_i * (L_i - L_{i-1})) / (S * 1000) \text{ (mg/kg)}$$

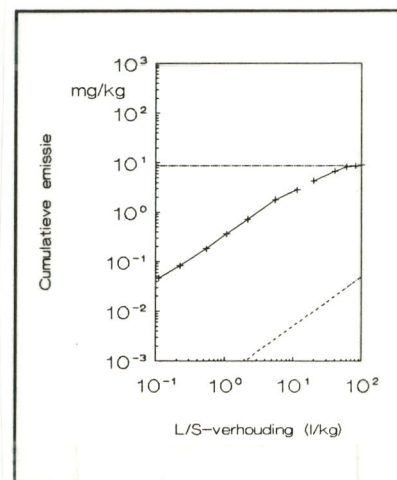
Hierin is conc. M_i de concentratie van het betreffende element M (in µg/l) gemeten in de opgevangen fractie. L is de gecumuleerde hoeveelheid opgevangen vloeistof tot en met fractie i respectievelijk $i-1$ en S is de bevochtigde hoeveelheid vaste stof.

De berekende cumulatieve emissies zijn, evenals de gemeten concentraties, uitgezet tegen de L/S-verhouding, en grafisch gepresenteerd in bijlagen 14. De grafieken zijn weergegeven op drie bladen, voor elke as één, waarbij zowel hoofd- als sporelementen vermeld staan. Figuur 3.1 geeft, als voorbeeld, de berekende emissie aan molybdeen uit de kolom- en cascade-test van de bedas 51223285. Op de X-as is de cumulatieve L/S-verhouding uitgezet op een logaritmische schaal die loopt van 0,1 tot 100. Op de Y-as

is de cumulatieve emissie, in mg/kg, uitgezet op een logaritmische schaal die zes decaden omvat, overeenkomstig de Checklist [8].

In figuur 3.1 loopt de Y-as van 0,001 tot 1000 (10^{-3} t/m 10^3) mg/kg. Voor elk afzonderlijk element is steeds hetzelfde bereik aangehouden, per element verschilt dit bereik, hoewel het wel steeds zes decaden omvat. De cumulatieve emissies, berekend per opgevangen fractie, zijn weergegeven door plusjes en zijn met elkaar verbonden door middel van een getrokken lijn. De onderbreking tussen $L/S = 10$ en $L/S = 20$ wordt veroorzaakt door het feit dat het gegevens zijn, verkregen uit respectievelijk de kolom- en de cascadetest.

De gestippelde lijn geeft hier de onderste emissiegrens aan, de cumulatieve emissie die berekend zou worden als alle concentraties gelijk zouden zijn aan de onderste bepalingsgrens. De gestreepte lijn in de figuur geeft de maximale emissie, de berekende beschikbaarheid weer. De berekende cumulatieve emissie zal dus in principe links van de stippellijn en onder de gestreepte lijn moeten liggen.



Figuur 3.1 Voorbeeld Emissie-L/S grafiek

Cumulatieve procentuele uitloging

Per as wordt, per element, uit de berekende cumulatieve emissie ook de cumulatieve procentuele uitloging berekend. Deze resultaten worden uitgezet tegen de L/S -verhouding en grafisch gepresenteerd in bijlage 15. Voor de X-as wordt dezelfde logaritmische schaal gebruikt als bij de gemeten concentraties en cumulatieve emissie. Voor de Y-as wordt een logaritmische schaal gebruikt die loopt van 0,01 tot 100 %.

3.3.2 Resultaten per element

De resultaten van de SU-test, zowel van de kolom- als de cascade-schudtest, zijn opgenomen in de bijlagen 12, 13, 14 en 15. Aan de hand van deze resultaten in grafiek-vorm zullen achtereenvolgens kort besproken worden:

- het pH-gedrag
- het uitlooggedrag van het hoofdelement calcium en sulfaat en
- het uitlooggedrag van de spoorelementen antimoon, arseen, chroom, koper, molybdeen en zink.

pH-gedrag (zie bijlage 12)

De pH van de uitloogvloeistof schommelt bij L/S-verhoudingen kleiner dan 40 voor de twee assen van run 285 tussen 12.3 en 12.6, 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. Omdat de oplosbaarheid van calciumhydroxide beperkt is (max. 1,3 g/l) en het oplossen van calcium maatgevend is voor de pH zien we dat de pH lange tijd constant blijft, net zolang tot er uitputting van calcium op gaat treden. Dit blijkt ook wel uit het vervolg van de pH-curve als functie van de L/S-verhouding. Na $L/S = 40$ daalt de pH bij de vliegass tot 12.0, bij de bedas naar ongeveer 11. Deze daling komt overeen met een daling in de uitloging van calcium(oxide). Voor de vliegass van run 276 daalt de pH bij $L/S = 10$ al naar 11.6, bij de cascadetest bij $L/S = 80$ ook van 12.4 naar 11.6. Dat de pH bij de cascadetest bij $L/S = 20$ niet al naar 11.6 is gedaald is te verklaren uit de beperkte oplosbaarheid van calcium, gecombineerd met het feit dat voor de cascadetest weer 'vers' materiaal wordt gebruikt. Hierdoor treedt pas na de tweede stap een verlaging op doordat de calciumconcentratie de beperkte oplosbaarheid niet meer overschrijdt.

Calcium (zie bijlage 13, 14 en 15)

De calciumconcentratie bij de vliegass van run 276 vertoont een normaal dalend karakter. Hier is dus vrijwel meteen sprake van uitputting van het calcium. Bij de vliegass van run 285 daalt de gemeten calciumconcentratie bij een $L/S = 4$ ineens zeer sterk. Dit is te verklaren door het uitharden van de kolominhoud, waardoor het nog aanwezige calcium in de as veel sterker gebonden wordt en dus slechter uitlooft.

Tot een L/S-verhouding van 60 bij de bedas is de calciumuitloging ongeveer constant met een calciumconcentratie in de uitloogvloeistof tussen 1100 en 1500 mg/l. Dit constant zijn komt door limitering van de uitloging door maximale oplosbaarheid van calciumhydroxide. De oplosbaarheid van $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is volgens de literatuur 1,3 g/l, wat resulteert in een pH van 12,5.

Sulfaat (zie bijlage 13, 14 en 15)

De gemeten sulfaatconcentraties vertonen duidelijke dalen in de grafieken. Voor het gedrag van sulfaat in de vliegassen is geen eenduidige verklaring, het kan mogelijk zijn dat sulfaat niet alleen als calciumsulfaat voorkomt, maar ook met andere elementen. Als deze sulfaatverbindingen slechter oplosbaar zijn, komen ze langzamer vrij, waardoor het mogelijk is dat de sulfaat-concentratie in het opgevangen percolaat tijdelijk is gedaald. Vergelijking met de gemeten concentraties van chroom en molybdeen in vliegass 276, vertoont sulfaat hetzelfde gedrag. Bij vliegass 285 vertoont alleen molybdeen een overeenkomend gedrag. Alleen de gemeten concentraties van de bedas blijven vrijwel constant, alleen een dal bij $L/S = 80$, mogelijk veroorzaakt door uitputting van het aanwezige sulfaat.

Antimoon (zie bijlage 13, 14 en 15)

De lijnen in de figuren van antimoon geven niet het echte uitlooggedrag weer maar de absolute bovengrens. Er zijn slechts twee waarden gevonden boven de onderste bepalingsgrens van 2 µg/l. Voor alle drie de assen geldt dus dat antimoon tot $L/S = 100$ slechts in geringe mate uitloogt, waarschijnlijk minder dan 15%. Over wat daarna gebeurt kan uiteraard niets zinnigs gezegd worden. De uitloging tot $L/S = 100$ blijft ver beneden de beschikbaarheid, die ligt tussen 40 en 80 %.

De uitloging van antimoon is waarschijnlijk pH-gevoelig (zie onder 'arseen'). Dit is namelijk ook gevonden bij uitloging van poederkoolvliegass [4].

Arseen (zie bijlage 13, 14 en 15)

Voor arseen geldt in grote lijnen hetzelfde als voor antimoon. Er is echter een groter aantal punten gevonden die werkelijk meetbare waarden voorstellen. De uitloging blijft hier beneden de 1% en ver beneden de beschikbaarheid, behalve de vliegass van run 276.

De uitloging van arseen is afhankelijk van de pH [2]. In basisch milieu loogt arseen slechts in geringe mate uit. De pH is weer afhankelijk van de uitloging van met name calciumoxide. Voor vliegass van run 276 daalt de pH al bij een $L/S = 40$, de uitloging van arseen begint hier. De pH gaat pas dalen in de buurt van $L/S = 80$ voor vliegass van run 285 en voor de bedas niet tot en met $L/S = 100$. Waarschijnlijk zal bij grotere L/S -verhoudingen arseen wel gaan uitlogen. Door het verschil in zuur-base-gedrag van wervelbedas en poederkoolvliegass en de pH afhankelijkheid van arseenuitloging is er ook een groot verschil in arseenuitloging tussen wervelbedas en poederkool-vliegass [2]. Bij poederkool-vliegass begint arseen al uit te logen ongeveer bij $L/S = 5$.

Barium (zie bijlage 13, 14, 15)

De uitloging van barium vertoont een ander gedrag: al het beschikbare barium loogt vrijwel uit, voor de vliegassen geldt zelfs dat er meer uitloogt dan er beschikbaar is. Mogelijke verklaring hiervoor is dat barium bij een hogere pH goed uitloogt, en bij een pH lager dan 7 minder goed. Er loogt bij de beschikbaarheidstest minder uit dan in werkelijkheid, bij hogere pH, mogelijk is.

Chroom (zie bijlage 13, 14, 15)

De maximaal beschikbare hoeveelheid chroom, wat waarschijnlijk in alle gevallen 6-waardig is, is bij een L/S -verhouding van 100 voor de vliegassen volledig uitgelooft, maar voor de bedas nog niet.

Koper (zie bijlage 13, 14, 15)

Uit de lage gemeten concentraties in de percolaten (maximaal 200 µg/l) en het feit dat de uitgelooftde hoeveelheid ver onder de maximale beschikbaarheid blijft, blijkt dat de uitloging van koper niet van wezenlijk belang is.

Molybdeen (zie bijlage 13, 14, 15)

Bij de vliegassen vertoont molybdeen bij een $L/S = 0.5$ een maximum in de uitloging, de concentratie is dan ongeveer 1 - 2 mg/l. De vliegassen van run 276 vertoont een sterke daling in de concentratie tussen $L/S = 0.5$ en 2, maar stijgt tussen $L/S = 5$ en 10 weer sterk. Een goede verklaring hiervoor is er echter niet. De concentratie in de uitloogvloei voor de vliegassen 285 daalt bij een $L/S = 4$ sterk, mogelijk te verklaren door fysische en/of chemische insluiting door uitharden. De molybdeen concentratie blijft voor de bedas tot een $L/S = 20$ vrijwel constant, maar daalt daarna snel. Uiteindelijk blijkt bij alle drie de assen vrijwel al het beschikbare molybdeen uit te logen.

Zink (zie bijlage 13, 14, 15)

Alle gemeten concentraties blijven zeer laag (maximaal 100 µg/l), waardoor het uitlooggedrag van zink niet van belang is. Uiteindelijk blijven alle cumulatieve emissies ver onder de maximale beschikbaarheid.

3.4 Relatie lab-proeven - praktijksituaties

Het doel van het onderzoek was ondermeer om aan de hand van proeven die in korte tijd uit te voeren zijn, voorspellingen te doen over het uitlooggedrag van de onderzochte assen 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 hoogte.

Stel dat de opslag een hoogte heeft van 5 meter en dat regenwater alleen van bovenaf kan binnendringen. Als de vliegassen van run 285 genomen wordt, waarvan het stortgewicht 1056 kg/m³ is (zie bijlage 6), bevindt zich onder een vierkante meter $5 \times 1056 = 5280$ kg vliegassen. Ervan uitgaande dat het 750 mm regent in een jaar, waarvan 250 mm verdampt, komt die 5280 kg vliegassen per jaar in aanraking met 500 liter water. Uit deze gegevens kan de L/S -verhouding na een jaar berekend worden: $500 / 5280 = 0.095$. Uit de grafieken van bijlage 15 kan nu voor de verschillende elementen afgelezen worden hoeveel procent van de in de as aanwezige hoeveelheid uitgelooft is. In tabel 3.3 zijn meerdere berekende waarden opgenomen.

Tabel 3.3 Voorspelling van het aantal jaren waarna $L/S = 1$ en 10 bereikt wordt, afhankelijk van de storthoogte

Storthoogte in meters	Vliegass 276		Vliegass 285		Bedas 285	
	L/S = 1 na jaar	L/S = 10 na jaar	L/S = 1 na jaar	L/S = 10 na jaar	L/S = 1 na jaar	L/S = 10 na jaar
1	2.1	22	2.1	21	2.8	28
2	4.3	43	4.2	42	5.6	56
5	10.7	107	10.6	106	14.1	141
10	21.4	214	21.2	212	28.2	282

Er bestaan nog geen wettelijke getalsmatige normen, waaraan de resultaten van het uitloogonderzoek kunnen worden getoetst. Om de resultaten toch enigermate te kunnen beoordelen is een vergelijking gemaakt met het 'Concept Voorontwerp Bouwstoffenbesluit' [7]. Deze normen gaan uit van de cumulatieve emissie bij $L/S = 10$. In de bovenstaande situatie zouden alle drie de assen vallen in de categorie N3. Dit wordt in alle drie de gevallen veroorzaakt door de cumulatieve emissie van molybdeen. In de gevallen van de vliegassen zou die situatie bereikt worden na ± 100 jaar. Voor de bedas is die situatie pas bereikt na 140 jaar.

4. Bespreking karakteriseringsresultaten

In dit hoofdstuk zullen de resultaten van de karakterisering van de tweetrapsassen onderling besproken worden en vervolgens zal een vergelijking gemaakt worden met de ééntrapsassen.

4.1 Onderlinge vergelijking karakteriseringsresultaten tweetrapsassen

In deze paragraaf wordt een vergelijking gemaakt tussen de tweetrapsassen van Australische kolen en die van Poolse kolen. Er is gekeken naar concentraties in de vaste stof, naar resultaten uit het morfologisch onderzoek en naar de resultaten van het uitloogonderzoek.

Vastestofconcentraties

Het blijkt dat de assen van Australische kolen voor een paar elementen afwijkende concentraties heeft ten opzichte van de assen van Poolse kolen. Dit geldt voor aluminium (bed- en vlieg as ca 50% hoger), ijzer (bed- en vlieg as ca 2x zo laag), antimoon (vlieg as 4x zo laag) en zink (vlieg as ca 2x zo laag). Voor de overige geanalyseerde elementen vertonen de assen onderling geen opmerkelijke verschillen. Dit is een gevolg van verschillen in samenstelling van de kolen. Dit is ook in eerder uitgevoerd onderzoek geconstateerd ten aanzien van kolen uit de USA (Virg.), Columbia en China [8].

Morfologisch onderzoek

- Het blijkt dat het bitumen getal van de vlieg as van run 285 hoger is dan dat van de vlieg as van run 276. Dit wordt veroorzaakt door een hoger koolstofgehalte [3].
- Door het hogere koolstofgehalte (poreuze deeltjes) valt te verwachten dat het specifiek oppervlak van de vlieg as van run 285 ook hoger is. Dit blijkt echter niet het geval en dat kan verklaard worden door het feit dat de vlieg as van run 276 meer fijnere deeltjes bevat, waardoor het specifiek oppervlak van deze as hoger wordt.

Uitloogbaarheid

Bij vergelijking van de uitloging van de verschillende elementen uit de onderzochte tweetraps-assen is gekeken naar de procentuele uitloging bij $L/S = 100$ en naar de procentuele beschikbaarheid.

Ten aanzien van de procentuele (cumulatieve) uitloging blijken de volgende elementen uit vlieg as 81.250.276 minder uit te logen dan dezelfde elementen uit vlieg as 81.261.285: calcium, sulfaat en barium. Meer uitloging vertonen arseen, chroom en koper. Zink en molybdeen vertonen ongeveer eenzelfde procentuele uitloging. Voor wat betreft de maximaal beschikbare percentages blijken deze voor calcium, sulfaat, molybdeen en zink ongeveer gelijk te zijn. Van arseen, koper en barium is procentueel minder beschikbaar in vlieg as 81.250.276 dan in vlieg as 81.261.285. Er

blijkt echter wel meer chroom in vlieggas 81.250.276 beschikbaar te zijn. Bij het vergelijken van bovenstaande gegevens blijken de geconstateerde verschillen in procentuele uitloging en in de maximale uitloogbaarheid voor een aantal elementen niet met elkaar te corresponderen. Uitgaande van as 81.261.285 is voor de elementen arseen en koper de maximale beschikbaarheid (procentueel) lager is in as 81.250.276 terwijl de cumulatieve procentuele uitloging bij $L/S = 100$ juist hoger is.

4.2 Vergelijking met ééntrapsassen

In deze paragraaf wordt een vergelijking gemaakt tussen de gegevens van de karakterisering van ééntrapsassen zoals beschreven in het rapport 'Karakterisering van AFBB-reststoffen' [3] en de karakteriseringsgegevens uit dit rapport. Er zal gekeken worden naar chemische samenstelling, morfologische eigenschappen en uitloogbaarheid. Daarbij zal voornamelijk gebruik gemaakt worden van de grafieken in de bijlagen waarin de gemeten concentraties en de procentuele uitloging, voor die elementen die zowel in een- als tweetrapsassen voorkomen. Opgemerkt dient te worden dat de vergelijking aan de hand van de procentuele uitlogingen niet helemaal juist is omdat het gaat om relatieve getallen, afhankelijk van de vaste stof gehalten. De absolute uitgeloopte hoeveelheden, in mg/kg, zijn in [3] echter niet gegeven, zodat toch gekozen is voor vergelijking aan de hand van de procentuele uitloging. In de hierna volgende vergelijking wordt alleen gekeken naar de assen die uit Poolse kolen gestookt zijn.

Chemische analyse

In dit deel wordt een vergelijking gemaakt tussen verschillende concentraties in de vaste stof van zowel vlieg- als bedassen van de één- en tweetrapsassen. Alleen die gevallen waar duidelijke verschillen optreden zullen hier besproken worden. Voor die elementen die niet besproken worden zijn dus geen duidelijk waarneembare verschillen geconstateerd.

Koolstof uit carbonaat

In de tweetraps-vlieggas komt een tweemaal zo hoog carbonaat-gehalte voor als in de ééntraps- vliegassen, hoewel absoluut gezien, dit gehalte nog erg laag is. Dit betekent dat er tijdens de verbranding minder kalk wordt omgezet in calciumoxide en kooldioxide. Een oorzaak kan zijn dat er kalkdeeltjes direkt na het inbrengen in de ketel door de gasstroom uit de ketel geblazen worden, waardoor ze in de vlieggas terecht komen.

Arseen

Het arseengehalte van de tweetrapsas is veel hoger dan het gehalte van de ééntrapsassen in vergelijking met de resultaten uit [3]. Bij vergelijking met resultaten van later onderzoek naar ééntrapsassen blijken de gemeten waarden van ééntraps en tweetrapsassen wel overeen te komen [8]. Een duidelijke verklaring hiervoor is niet te geven. (Het lijkt op een systematische fout in de Arseen-analyses in [3]).

Morfologisch onderzoek

In dit deel wordt een vergelijking gemaakt tussen de morfologische eigenschappen van één- en tweetrapsassen. Daarbij is gekeken naar stortgewicht, absolute dichtheid, specifiek oppervlak, bitumengetal en korrelgrootteverdeling. Daarbij blijkt het volgende:

- stortgewichten en absolute dichtheden liggen in dezelfde range.
- het specifiek oppervlak van de tweetrapsvliegass is duidelijk hoger dan dat van de ééntrapsvliegassen. Het is mogelijk dat het hogere gehalte organisch koolstof (poreuze deeltjes) een rol speelt.
- slechts de tweetrapsvliegass 81.262.285 heeft een duidelijk hoger bitumengetal dan de overige één- en tweetrapsvliegassen (66 in plaats van ± 55). Dit wordt veroorzaakt door het hogere koolstofgehalte van deze vliegass.

Uitloogbaarheid -bedas

In dit deel worden de verschillen voor pH-gedrag en de uitloging van de diverse elementen in de één- en tweetrapsbedassen aangegeven. Indien er niets wordt gemeld over een bepaald element dan zijn er geen opmerkelijke verschillen geconstateerd.

pH-gedrag

Bedas 51.223.285 vertoont een dalende pH op de plaats waar de pH van de ééntrapsas nog constant is. Dit kan veroorzaakt worden door het lagere calciumoxide-gehalte van de tweetrapsas (15% in vergelijking met 23% voor de ééntrapsas), zodat de calciumconcentratie sneller onder de maximale oplosbaarheid komt, waardoor de pH eerder daalt.

Chroom

Het percentage beschikbaar voor de ééntrapsas van run 180 is twee maal zo laag als voor de vergelijkbare tweetrapsas (0,3 tegen 0,6), terwijl de ééntrapsbedas van run 189 een vergelijkbaar (met tweetrapsas) percentage heeft. Het lagere percentage kan veroorzaakt worden door de hoge concentratie in de vaste stof in de bedas van run 180. Deze hogere concentratie kan een gevolg zijn van contaminatie met het materiaal van de molen waarmee de bedas is verkleind. De bedas van run 189 vertoont wel overeenkomst met de vastestofconcentratie van de tweetrapsas.

Molybdeen

De concentratieprofielen van de bedassen komen redelijk overeen, hoewel ze voor de tweetrapsassen hoger liggen. Er is ook procentueel meer beschikbaar, terwijl het gehalte in een en tweetrapsassen ongeveer gelijk is.

Zink

Voor zink geldt dat er in bedas 51.223.285 procentueel minder beschikbaar is dan in de vergelijkbare ééntrapsas. Hier staat tegenover dat het vastestof-gehalte in de tweetrapsas hoger is (resp. 281 en 186 ppm).

Uitloogbaarheid -vlieg

pH-gedrag

De pH van de tweetrapsvlieg 81.261.285 heeft een constanter gedrag dan de pH van de ééntraps- vliegassen. Mogelijke oorzaak is een hoger calciumoxide gehalte van deze tweetraps-vlieg ten opzichte van de ééntraps-vliegassen (16% tegen 12-13%).

Calcium

Het concentratieverloop van vlieg 81.261.285 is afwijkend, evenals het percentage-profiel. Dit kan veroorzaakt zijn door het uitharden van de inhoud van de kolom.

Chroom

De procentuele beschikbaarheid is in de tweetrapsas hoger (2,9%) dan in de ééntrapsassen (1,1 en 2,4%), maar de verschillen worden niet veroorzaakt door grote verschillen in de concentraties van de vaste stoffen (gehaltes ééntraps: 123 resp. 106 en tweetraps: 120 mg/kg). Vlieg 81.261.285 heeft een profiel dat redelijk overeen komt, maar is constant dalend in plaats van met schommelingen.

Molybdeen

De scherpe daling in de concentratie bij de tweetraps-vlieg 81.261.285 lijkt te worden veroorzaakt door het uitharden van de kolominhoud, waardoor er nauwelijks nog iets uitloopt. De diffusiesnelheid van het molybdeen door de matrix wordt snelheid-beperkend. Verder komen de concentratieprofielen redelijk overeen, hoewel de tweetrapsas wel hoger ligt. Er is ook procentueel meer molybdeen beschikbaar in de tweetrapsas.

Zink

Vlieg 81.261.285 heeft een ander soort concentratieprofiel dan de vergelijkbare ééntrapsassen. Het percentage beschikbaar is hoger voor de tweetrapsas, terwijl het gehalte in de vaste stof voor een- en tweetrapsas ongeveer hetzelfde is (118 en 135 ppm). Ondanks het hogere percentage beschikbaar voor de tweetrapsassen is het percentage uitgelooft bij kolom- en cascadetest uiteindelijk toch wat lager.

Uiteindelijk moet geconcludeerd worden dat er niet veel wezenlijke verschillen zijn tussen de één- en tweetrapsassen, gestookt van Poolse kolen.

5 Conclusies

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

- In de tweetraps-bedassen komt een hoeveelheid sulfide voor. Dit is een gevolg van de tweetrapsverbranding, waarin een reducerend (de bed-sectie) en een oxiderend gedeelte (het freeboard) voor komen. Door de bedas-aftap vanuit dit reducerende gedeelte wordt niet alle zwavel omgezet tot zwaveldioxide, maar een gedeelte tot sulfide.
- In de chemische samenstelling van de tweetraps-assen treden niet veel verschillen op met de ééntrapsassen. Daar waar er verschillen worden geconstateerd, is dat een gevolg van de toegepaste kolensoort.
- De morfologische eigenschappen van de tweetraps-assen zijn globaal gezien gelijk aan de ééntrapsassen, met uitzondering van het specifiek oppervlak en 1 bitumengetal van de vliegassen.
- Gerelateerd aan de normen in het 'Concept Voorontwerp Bouwstoffenbesluit' vallen alle drie de assen in de categorie N3. In alle drie de gevallen wordt dit veroorzaakt door het gehalte in de vaste stof en/of de uitloging van molybdeen.
- Uiteindelijk moet worden geconcludeerd dat er niet veel wezenlijke verschillen zijn tussen één- en tweetraps-assen die gestookt worden van dezelfde kolensoort.

6 Literatuur

- [1] A.W.B.M. van Haasteren. *Characterisation of ashes from the TNO 4MWth coal fired fluidised bed boiler*. TNO ref.nr. 86-259, augustus 1986.
- [2] R. Gerritsen en J.I. Walpot. *Uitloging van kolenas*. TNO ref.nr. 83-01610, februari 1983.
- [3] E. Mulder en R. Gerritsen. *Karacterisering van AFBB-reststoffen*. TNO ref.nr. 87-186, juli 1987.
- [4] 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.
- [5] Nederlandse Voornorm, N.V.N. 2508. *Bepaling van de uitloogkarakteristieken van kolenreststoffen*. NNI, 1e druk, februari 1988.
- [6] H.A. van der Sloot e.a./ SOSUV. *Omschrijving van de standaard uitloogtest voor verbrandingsresiduen*. BEOP-25, december 1983.
- [7] Concept-voorontwerp Bouwstoffenbesluit, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 's-Gravenhage, april 1989.
- [8] E. Mulder. *Onderzoek naar de verwerking van AFBC-vliegassen tot granulaten (kunstgrind) met behulp van het Aardelite-proces (Fase I)*. TNO ref. nr. 89-023/C1, januari 1989.

7 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever

NOVEM

St. Jacobstraat 61

3511 BP Utrecht

Namen en functies van de medewerkers

Ing. G.J. Grootenboer - researchmedewerker

G. van der Made - researchmedewerker

Ir. E. Mulder - onderzoeker

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed

Oostelijk Wegenbouw Laboratorium Twello

Postbus 53

7390 AA Twello

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad

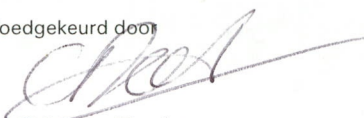
maart 1989 - september 1990

Ondertekening



Ir. E. Mulder
onderzoeker

Goedgekeurd door



Ir. C.L. van Deelen
werkgroep leider

Karakterisering van tweetraps AFBB-reststoffen

Bijlagen

1. Projectomschrijving
2. Stroomschema tweetraps-AFBB
3. Korte beschrijving relevante runs AFBB
4. Coderingsmethode as-monsters
5. Resultaten chemische analyse hoofd- en sporenelementen
6. Resultaten bepaling dichtheden, specifiek oppervlak en bitumengetal
7. Korrelgrootteverdelingen
8. Resultaten elektronenmicroscopische opnamen
9. Resultaten uitgebreide karakterisering bedas 51.223.285
10. Resultaten uitgebreide karakterisering vliegas 81.250.276
11. Resultaten uitgebreide karakterisering vliegas 81.261.285
12. Gedrag pH en geleidbaarheid
13. Grafische weergave gemeten concentraties hoofd- en sporenelementen
14. Grafische weergave cumulatieve emissies hoofd- en sporenelementen
15. Grafische weergave cumulatieve procentuele uitloging hoofd- en sporenelementen

3 PROJECTBESCHRIJVING

3.1 Titel van het project

Karakterisering van 2-traps AFBB-reststoffen.

3.2 Doelstelling

Het belangrijkste doel van het onderzoek is na te gaan in hoeverre de reststoffen die geproduceerd worden bij de 2-traps verbranding van steenkool in een AFBB (Atmosferic Fluid Bed Boiler) afwijken van de bij 1-traps stoken geproduceerde reststoffen. Bij 1-traps stoken vindt het verbrandingsproces plaats in oxiderend milieu, bij 2-traps stoken is het milieu in de 1^e trap, in het bed, reducerend en in de 2^e trap, in het zogenaamde freeboard, oxiderend.

De doelstelling zal gerealiseerd worden door 2-traps AFBB-reststoffen te karakteriseren, zowel fysisch als chemisch als op uitloogeigenschappen, en deze karakteristieken te vergelijken met die van 1-traps AFBB-reststoffen.

3.3 Beschikbare informatie

Bij de afdeling Milieutechnologie van MT-TNO is in ruime mate kennis en informatie beschikbaar over 1-traps AFBB-reststoffen. Deze informatie is o.a. samengevat in een drietal rapporten. De meest recente van deze drie, waarin de karakteristieken vermeld staan waarmee die van de 2-traps AFBB-reststoffen vergeleken zullen worden, is:

ref.nr. 87-186: Karakterisering van AFBB-reststoffen

Bij de afdeling Verbrandingstechniek is kennis en informatie beschikbaar over het 2-traps verbrandingsproces.

3.4 Werkzaamheden, werkwijzen en resultaten

Het onderzoek zal worden opgesplitst in twee onderdelen, te weten een beperkte karakterisering en een uitgebreide karakterisering.

Beperkte karakterisering

In nauw overleg met de projectleider van het project "Bedrijf en onderhoud van de 4 MW_{th} AFBB" zullen vier vliegassen en twee bedassen bemonsterd worden. Hierbij zal o.a. rekening gehouden worden met de soort te verstoken kolen.

Het karakteriseringsonderzoek aan deze zes reststoffen bevat in dit onderdeel de volgende werkzaamheden:

- Verdeling van de monsters in representatieve deelmonsters voor de verschillende karakterisering.
- Chemische analyse op hoofd- en spoorelementen. Speciale aandacht zal worden besteed aan het al dan niet aanwezig zijn van sulfides.

- Bepaling van enkele fysische grootheden, zoals stortgewicht, absolute dichtheid en korrelgrootteverdeling.
- Uitvoering van de beschikbaarheidstest volgens SOSUV-voorschrift (onderdeel van de Standaard Uitloogtest).

Op basis van de resultaten van deze beperkte karakterisering zullen uit de zes reststoffen twee vliegassen en één bedas gekozen worden voor het uitgebreide karakteriseringsonderzoek.

Uitgebreide karakterisering

De uitgebreide karakterisering zal bestaan uit:

- Bepaling van de fysische grootheden bitumengetal en specifiek oppervlak.
- Elektronenmicroscopisch onderzoek, gecombineerd met EDAX-analyse.
- Röntgendiffractie-onderzoek.
- Completering van de Standaard Uitloogtest, te weten uitvoering van de kolom- en cascadetest.

Na de uitvoering van het onderzoek zal hierover gerapporteerd worden.

3.5 Informatie en maatschappelijke consequenties

Het onderzoek levert informatie over een groot aantal fysische en chemische eigenschappen van 2-traps AFBB-reststoffen en tevens over de mate waarin deze verschillen met de eigenschappen van conventionele 1-traps AFBB-reststoffen. Hiermee ligt tevens het effect van het 2-traps verbrandingsproces op de geproduceerde reststoffen vast.

Uit de resultaten van het onderzoek zal tevens duidelijk worden of de toepasbaarheid van de 2-traps AFBB-reststoffen even groot is als die van 1-traps AFBB-reststoffen.

3.6 Tijdplanning

	Maanden	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Onderdeel												
Beperkte kar.		X	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0
Uitgebreide kar.												-----0-----
Rapportage											-----Y	0-----Z

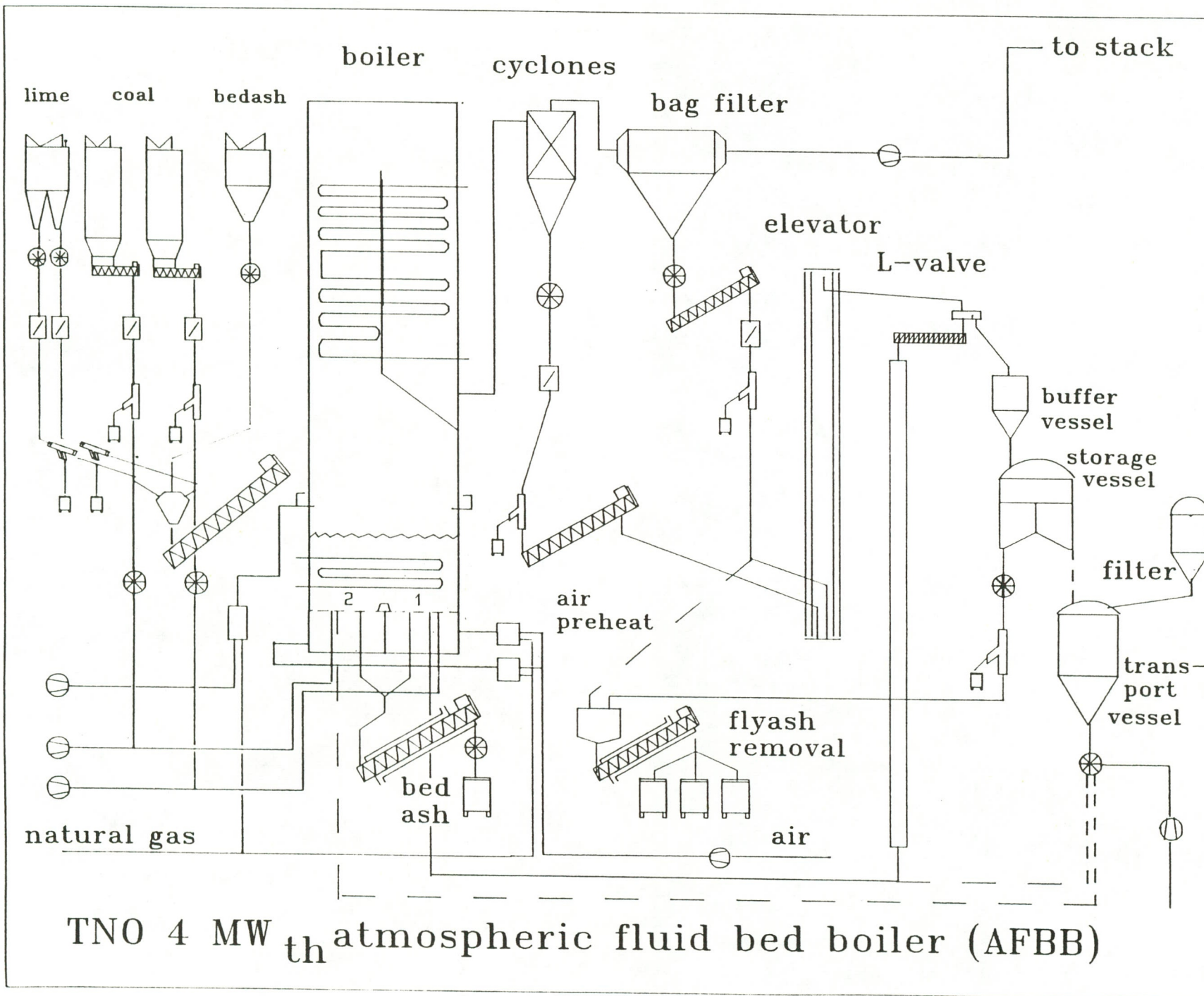
X = Opdrachtverlening
Y = Concept-eindrapport
Z = Eind-rapport
O = Controlepunten

3.7 Subcontractanten

Voor enkele analyses (o.a. bitumengetal) zal gebruik gemaakt worden van faciliteiten van derden. De contractant draagt de verantwoordelijkheid voor de door derden verrichte werkzaamheden.

3.8 Kennisoverdracht

Mondeling overleg met NOVEM zal, zoals gebruikelijk, plaatshebben in de KRA-vergaderingen. De schriftelijke kwartaalrapportage (t.b.v. de aangegeven controlepunten) en het concept-eindrapport zullen aan NOVEM in 12-voud ter beschikking worden gesteld, het eindrapport in 25-voud.



Bijlage 3 Korte beschrijving relevante runs AFBB

- Run 267: Gestookt met Poolse 11, kalksteentoeslag normaal, bedhoogte normaal, recirculering van vliegas, vliegasstroom 50 kg/hr, bedasstroom 70 kg/hr, Ca/S-verhouding= 3.1(incl.Ca uit kool).
- Run 276: Gestookt met Australische, bedhoogte normaal, kalksteentoeslag laag, recirculering van vliegas, vliegasstroom 50 kg/hr, bedasstroom 20 kg/hr, Ca/S-verhouding= 2.6(incl.Ca uit kool).
- Run 285: Gestookt met Poolse 11, kalksteentoeslag (Ballidon) normaal, bedhoogte normaal, recirculering van vliegas, vliegasstroom 50 kg/hr, bedasstroom 10 kg/hr, Ca/S-verhouding= 1.1-3.4(incl. Ca uit kool).

Bijlage 4 Coderingsmethode as-monsters

Als voorbeeld wordt hier het as-monster genomen met de code 51223285

5-1-223-285



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

Resultaten chemische analyse hoofdelementen

as-code	totaal koolstof- gehalte	carbonaat koolstof- gehalte	organisch koolstof- gehalte	totaal zwavel- gehalte	zwavel uit sulfaat	zwavel uit sulfide	silicium gehalte	aluminium gehalte	ijzer gehalte	calcium gehalte	natrium gehalte	kalium gehalte	magnesium gehalte
	%	%	%	%	%	mg/kg	%	%	%	%	%	%	%
51.210.276	0.60	0.15	0.45	1.31	1.20	40	22.7	11.0	1.33	8.5	0.19	0.36	0.19
51.223.285	0.69	0.14	0.55	4.26	3.59	46	15.7	8.5	2.52	15.6	0.22	0.85	0.36
81.238.267	14.80	0.24	14.56	3.15	2.38	26	11.4	7.4	3.33	14.0	0.17	0.78	0.67
81.250.276	10.70	0.20	10.50	1.58	1.43	< 10	16.9	12.3	0.76	9.0	0.12	0.30	0.28
81.261.285	15.60	0.22	15.38	3.11	2.80	< 10	10.5	6.6	2.98	16.0	0.09	0.86	0.56

Resultaten chemische analyse sporenelementen

as-code	arsen gehalte	barium gehalte	cadmium gehalte	chrom gehalte	koper gehalte	molybdeen gehalte	nikkel gehalte	lood gehalte	antimoon gehalte	selenium gehalte	vanadium gehalte	zink gehalte
	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
51.210.276	84	0.13	1.69	153	180	14	107	105	6.8	< 0.5	290	238
51.223.285	64	0.13	1.9	142	199	13	140	104	7.5	< 0.5	200	281
81.238.267	62	0.14	0.98	14	165	27	121	89	9.8	2.8	340	160
81.250.276	87	0.12	0.56	76	69	24	48	45	1.6	2.8	260	75
81.261.285	63	0.12	1.01	120	156	27	123	106	8.0	3.4	305	135

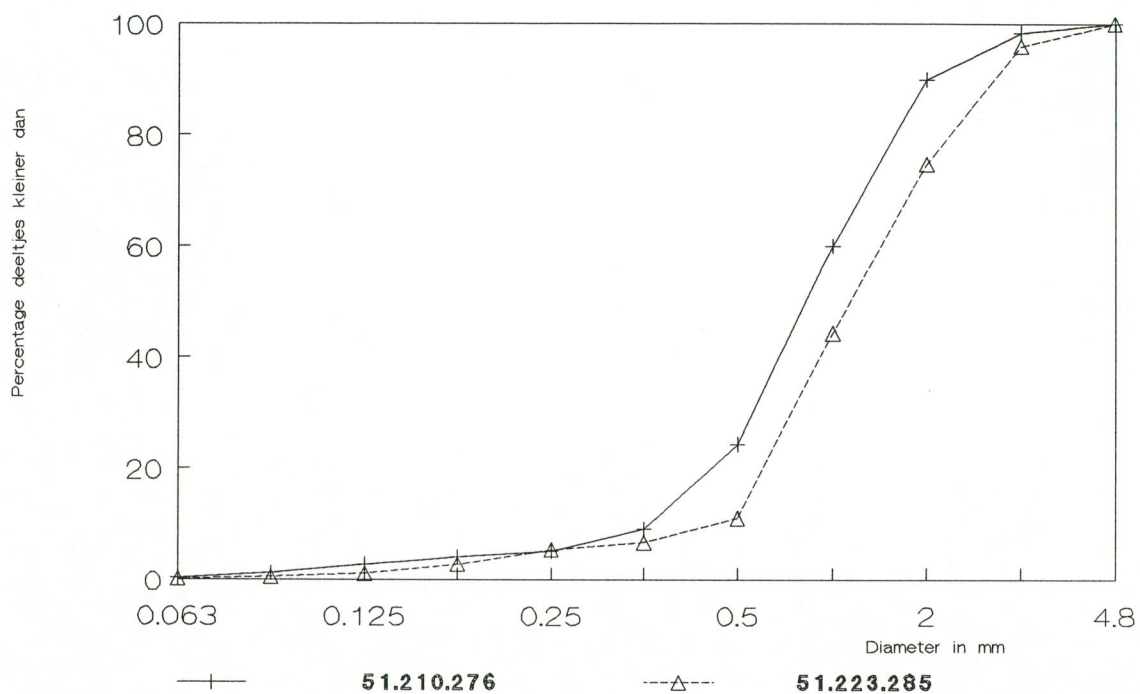
Bijlage 6 Resultaten bepaling stortgewicht, absolute dichtheid, specifiek oppervlak en bitumengetal

	stort gewicht kg/m ³	absolute dichtheid kg/m ³	specifiek oppervlak m ² /g	bitumen getal
51.210.276	1385	2668	-	-
51.223.285	1411	2653	1.9	-
81.238.267	1104	2395	-	-
81.250.276	1069	2481	23.8	57
81.261.285	1056	2354	18.1	66

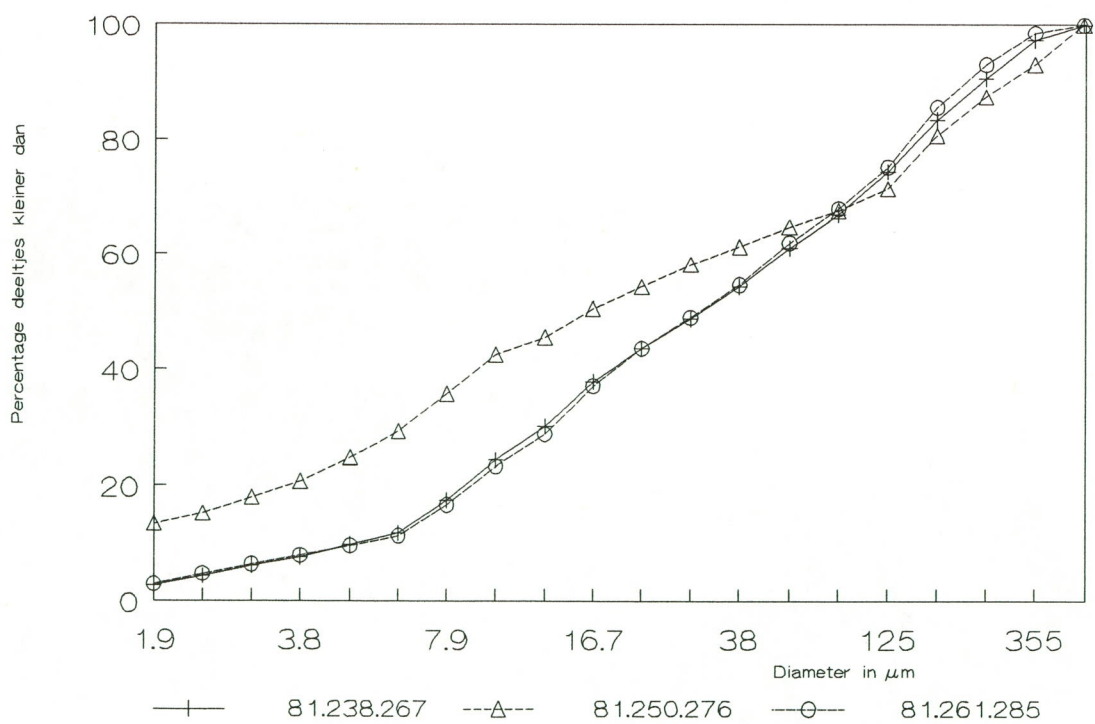
- = niet bepaald

Bijlage 7: Korrelgrootteverdeling Bed- en Vliegassen

Korrelgrootte-verdeling Bedassen



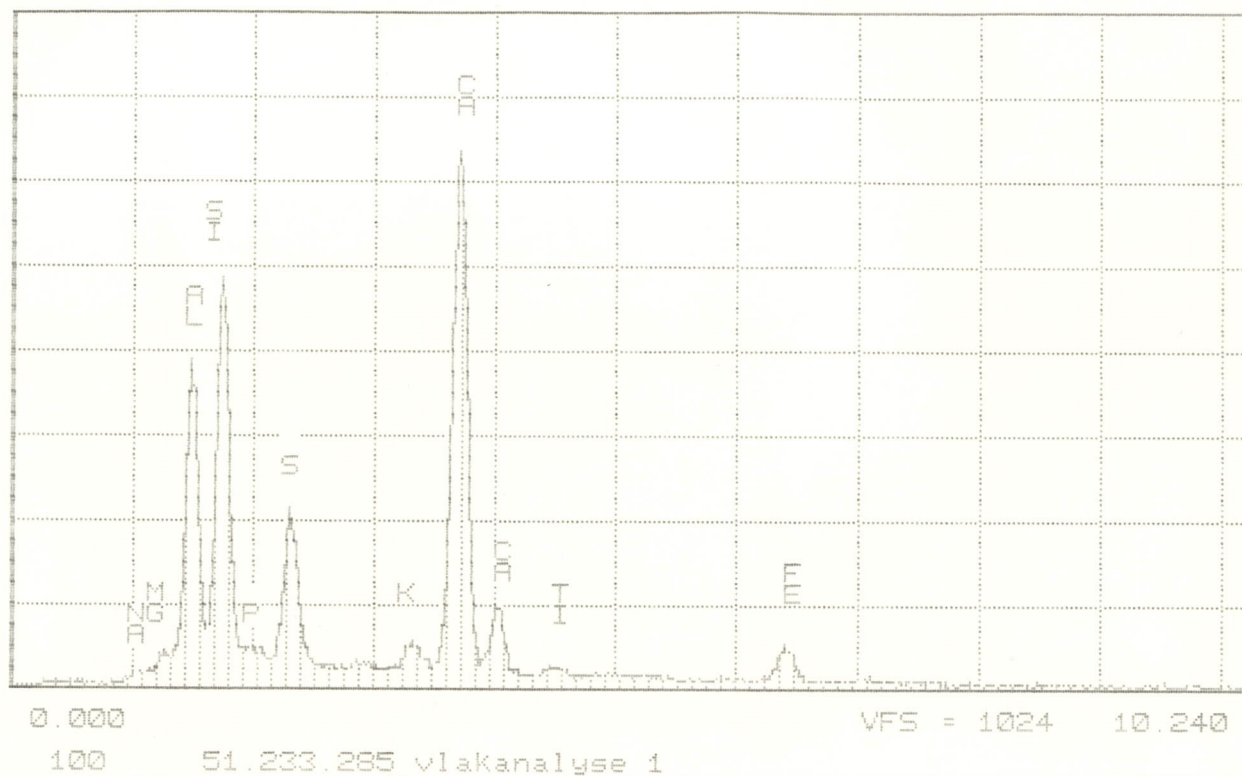
Korrelgrootte-verdeling Vliegassen



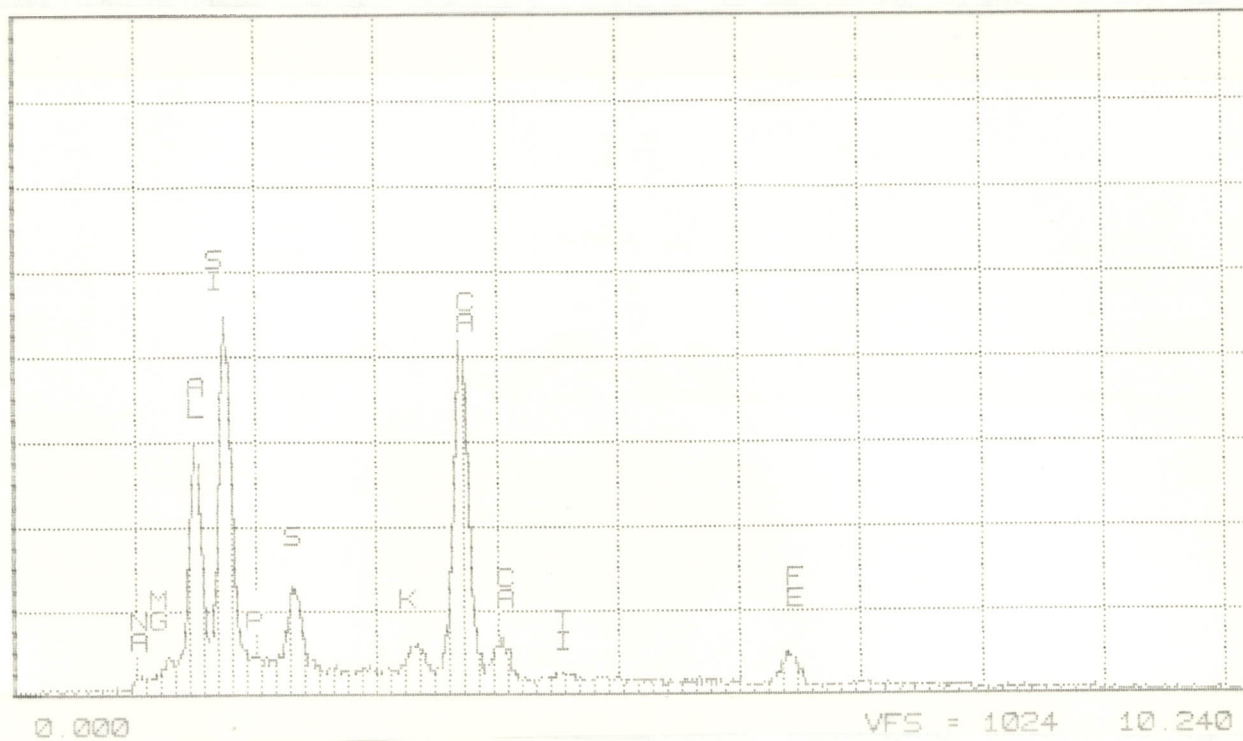
TN-5500 MT-TNO DELFT

TUE 27-MAR-90 15:06

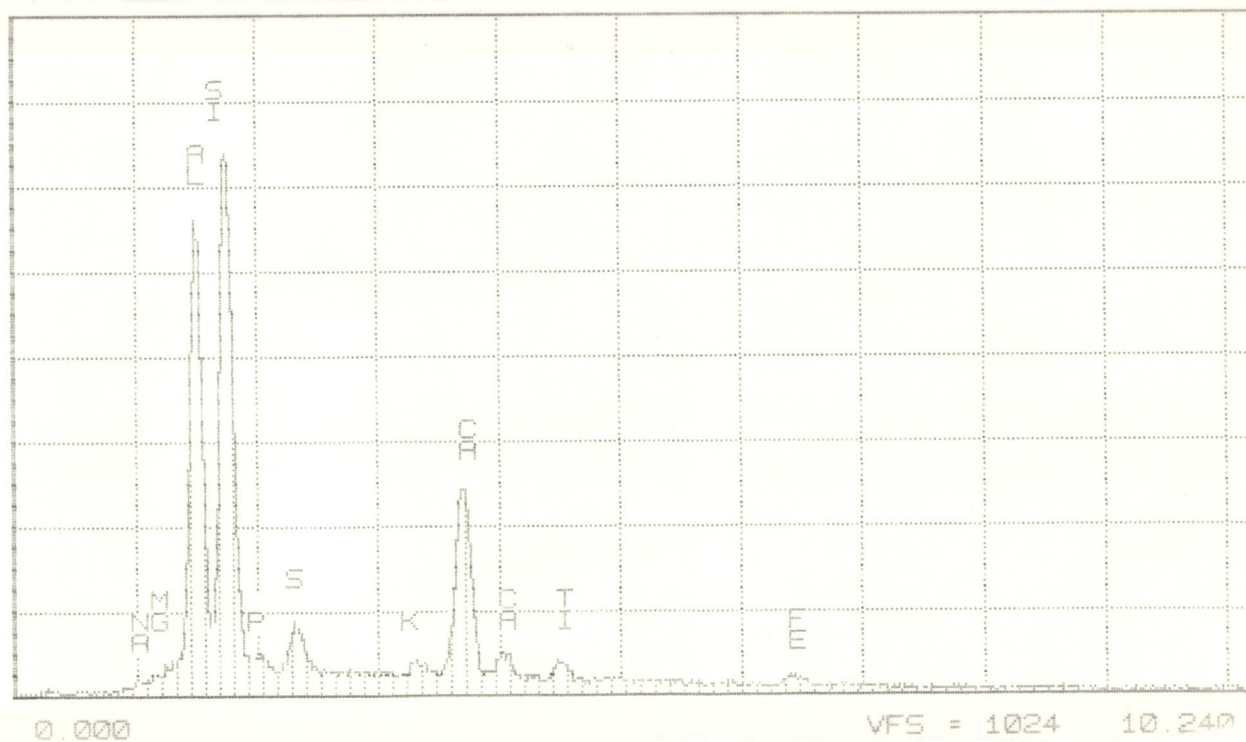
Cursor: 0.000keV = 0



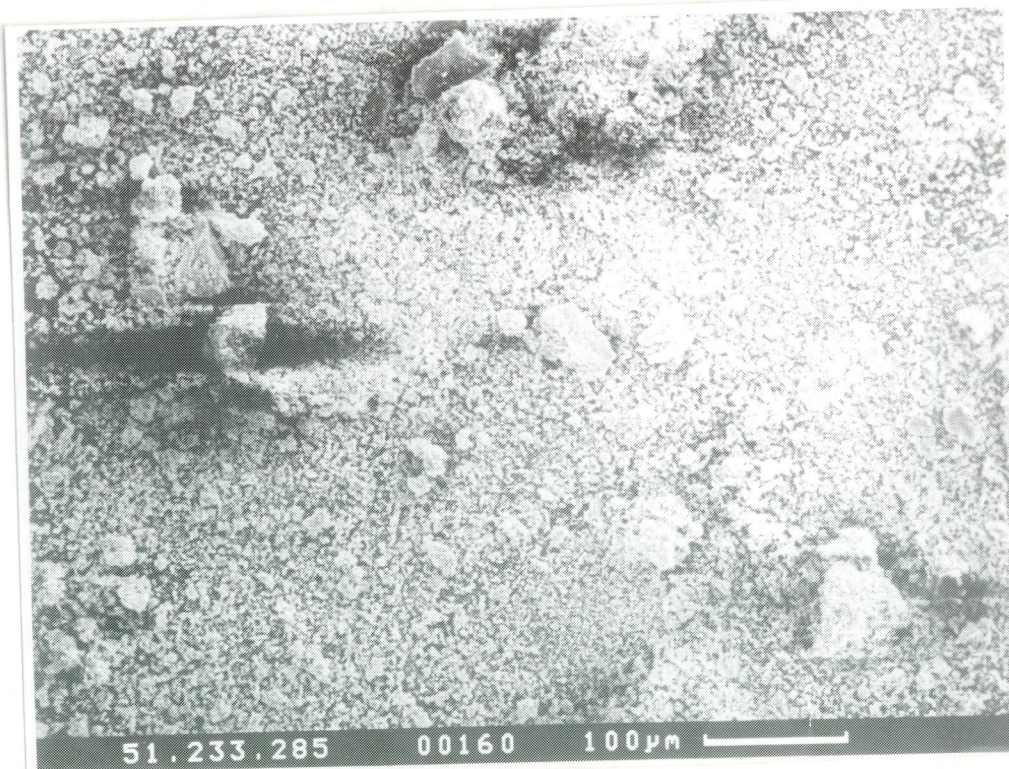
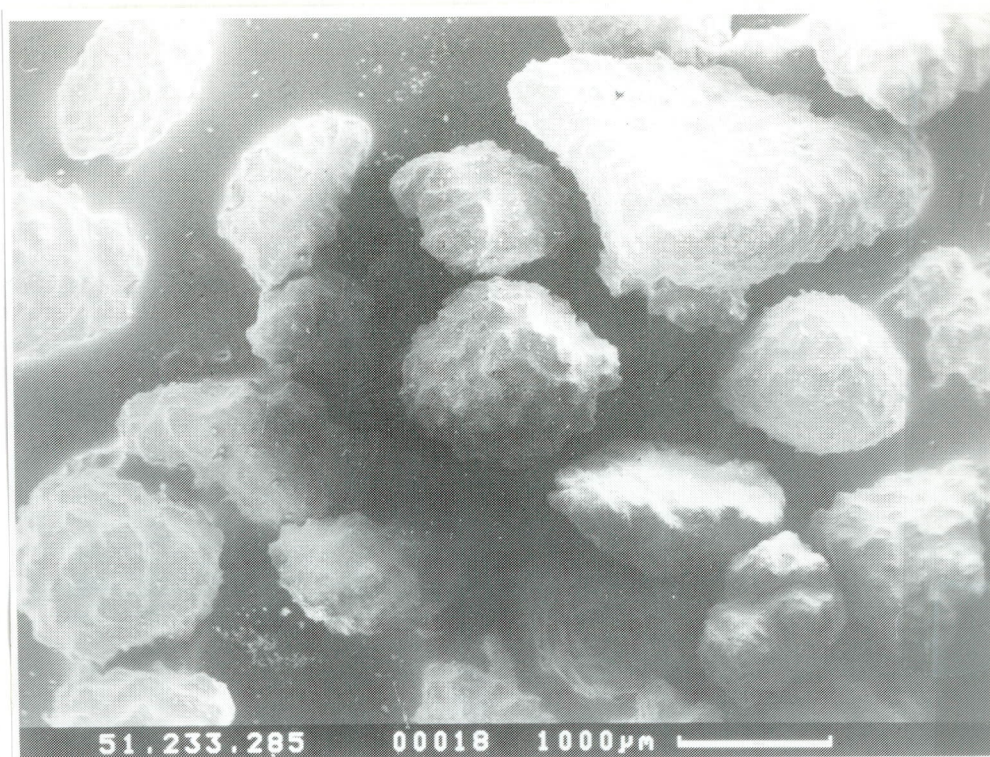
Element	Atom%	Wt%	Formula	Compound%
Na-K	0.80	0.81	Na2O	1.09
Mg-K	0.87	0.94	MgO	1.55
Al-K	9.18	10.95	Al2O3	20.68
Si-K	9.37	11.63	SiO2	24.87
K-K	0.49	0.85	K2O	1.02
S-K	4.05	5.74	SO3	14.33
Ca-K	12.16	21.54	CaO	30.13
Ti-K	0.33	0.69	TiO2	1.15
Fe-K	1.28	3.17	FeO	4.08
P-K	0.35	0.47	P2O5	1.09
O-K	61.13	43.22	---	---
Total=		100.00%	Total=	100.00%

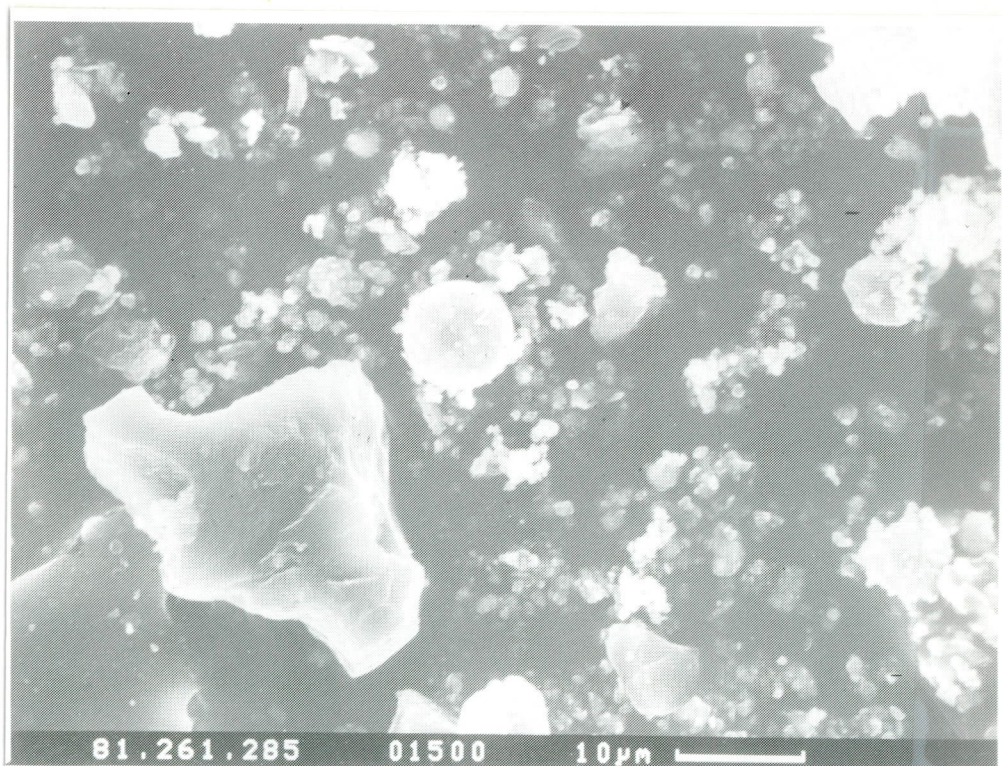
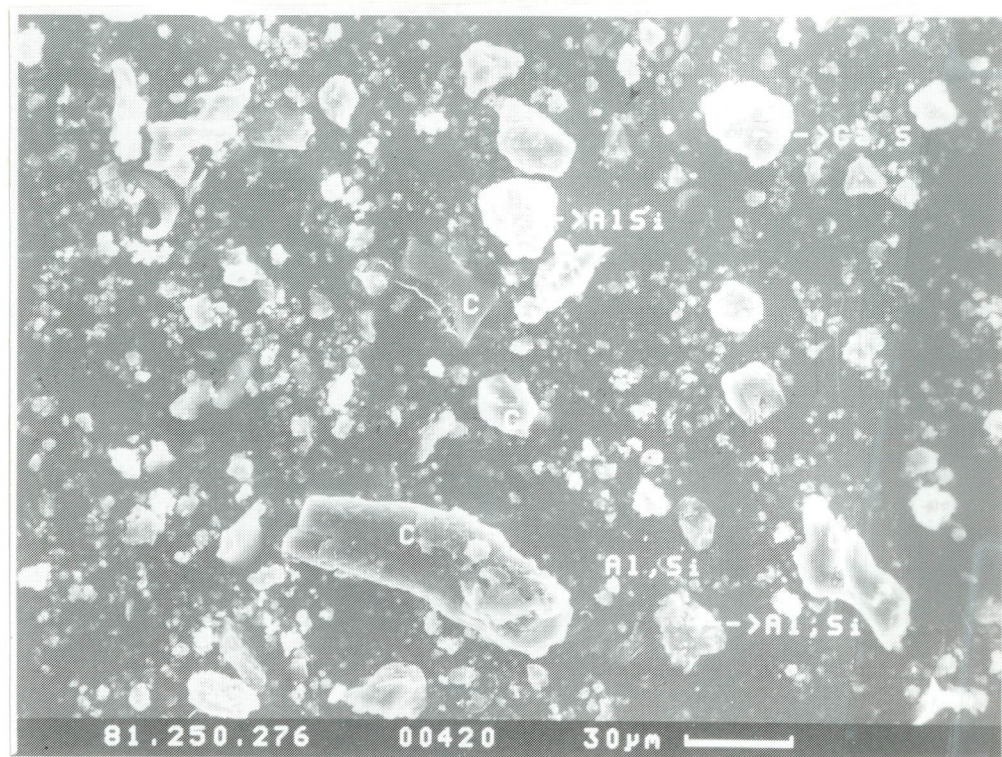


81.261.285; vlakanalyse



100 81.250.276 vlakanalyse





Gegevens produkt:

Naam produkt: 51.223.285

Vochtgehalte: 0 %

Absolute dichtheid: 2653 kg/m³Abs.dichth.dr.stof: 2653 kg/m³Stortgewicht: 1411 kg/m³Stortgew. dr.stof: 1411 kg/m³

Gehaltes in produkt:

Calcium 156000 mg/kg
Sulfaat 107700 mg/kgArseen 64 mg/kg
Barium 1300 mg/kg
Chroom 142 mg/kg
Koper 199 mg/kg
Molybdeen 13 mg/kg
Antimoon 7.5 mg/kg
Zink 281 mg/kg

Gehaltes in produkt:

Koolstof 6900 mg/kg

Silicium 157000 mg/kg
Aluminium 85000 mg/kg
Calcium 156000 mg/kg
IJzer 25200 mg/kg
Kalium 8500 mg/kg
Magnesium 3600 mg/kg
Natrium 2200 mg/kgChloride 0 mg/kg
C-carbon. 1400 mg/kg
S-sulfaat 35900 mg/kg

Omgerekende gehaltes in produkt:

Koolstof, onverbr. 5500 mg/kg

Siliciumoxide 335790 mg/kg
Aluminiumoxide 160556 mg/kg
Calciumchloride 0 mg/kg
-carbonaat 11678 mg/kg
-sulfaat 152323 mg/kg
-oxide 148958 mg/kg
IJzeroxide 36039 mg/kg
Kalium 10239 mg/kg
Magnesium 5970 mg/kg
Natrium 2965 mg/kgResultaten beschikbaarheidstest:L/S-verhouding: 205 l/kg
pH na 10 minuten: 12.6
Toegevoegd zuur tot.: 35.0 ml

Meetgegevens beschikbaarheidstest:

Gemeten concentraties
in extract, in ug/l:Beschikbaarheid in
mg/kg droge stofBeschikbaarheid in % van in droge
stof aanwezige hoeveelheidIngewogen vaste stof: 7.33 g
Toegev. demi-water 1e stap: 733 ml
Toegevoegd zuur 1e stap: 32.71 ml
Toegevoegd zuur 2e stap: 2.3 ml

L/S-verhouding: 205 l/kg

pH na 1 minuut: 12.45
pH na 5 minuten: 12.56
pH na 10 minuten: 12.60Calcium 580000 ug/l
Sulfaat 650000 ug/l
Arseen 7 ug/l
Barium 520 ug/l
Chroom 4 ug/l
Koper 79 ug/l
Molybdeen 41 ug/l
Antimoon 30 ug/l
Zink 80 ug/lCalcium 118770.2 mg/kg
Sulfaat 133104.6 mg/kg
Arseen 1.4 mg/kg
Barium 106.5 mg/kg
Chroom 0.8 mg/kg
Koper 16.2 mg/kg
Molybdeen 8.4 mg/kg
Antimoon 6.1 mg/kg
Zink 16.4 mg/kgCalcium 76.1%
Sulfaat 123.6%
Arseen 2.2%
Barium 8.2%
Chroom 0.6%
Koper 8.1%
Molybdeen 64.6%
Antimoon 81.9%
Zink 5.8%

Resultaten kolom- en cascade-test (gemeten concentraties, in ug/l):

Kolomtest: L/S = 0 - 10

Cascadetest: L/S = 20 - 100

L/S-verh. l/kg	Calcium ug/l	Sulfaat ug/l	Arseen ug/l	Barium ug/l	Chroom ug/l	Koper ug/l	Molybdeen ug/l	Antimoon ug/l	Zink ug/l
0.1	1160000	1740000	< 1.0	370	8.4	43	420	< 2	33
0.2	1310000	1220000	< 1.0	230	7.1	189	320	26	34
0.5	1190000	1220000	< 1.0	210	7.9	48	320	< 2	14
1.1	1210000	1110000	< 1.0	240	7.1	46	330	< 2	8
2.2	1090000	1470000	< 1.0	230	32.0	39	320	< 2	7
5.6	1120000	1460000	< 1.0	370	16.0	37	310	< 2	13
11.5	1170000	1190000	< 1.0	320	5.9	33	176	< 2	15
20.0	1480000	1110000	1.1	230	7.3	44	215	< 2	146
40.0	1310000	1110000	1.2	210	6.3	40	121	< 2	37
60.0	1200000	1080000	2.1	260	5.2	38	73	< 2	33
80.0	202000	41000	< 1.0	1030	1.3	14	14	< 2	29
100.0	95000	99000	< 1.0	260	2.7	14	19	2	25

Resultaten kolom- en cascade-test (cumulatief uitgelooagd, in mg/kg):

Kolomtest: L/S = 0 - 10

Cascadetest: L/S = 20 - 100

L/S-verh. l/kg	Calcium mg/kg	Sulfaat mg/kg	Arseen mg/kg	Barium mg/kg	Chroom mg/kg	Koper mg/kg	Molybdeen mg/kg	Antimoon mg/kg	Zink mg/kg
0.1	127	191	< 0.0001	0.04	0.001	0.00	0.05	< 0.000	0.00
0.2	276	329	< 0.0002	0.07	0.002	0.03	0.08	0.003	0.01
0.5	650	712	< 0.0005	0.13	0.004	0.04	0.18	< 0.004	0.01
1.1	1285	1295	< 0.0011	0.26	0.008	0.07	0.36	< 0.005	0.02
2.2	2497	2931	< 0.0022	0.51	0.044	0.11	0.71	< 0.007	0.02
5.6	6326	7921	< 0.0056	1.78	0.098	0.24	1.77	< 0.014	0.07
11.5	13263	14977	< 0.0115	3.68	0.133	0.43	2.82	< 0.026	0.16
20.0	29600	22200	0.0220	4.60	0.146	0.88	4.30	< 0.040	2.92
40.0	55800	44400	0.0460	8.80	0.272	1.68	6.72	< 0.080	3.66
60.0	79800	66000	0.0880	14.00	0.376	2.44	8.18	< 0.120	4.32
80.0	83840	66820	< 0.1080	34.60	0.402	2.72	8.46	< 0.160	4.90
100.0	85740	68800	< 0.1280	39.80	0.456	3.00	8.84	0.200	5.40

Resultaten kolom- en cascade-test:

Algemene gegevens kolom:

Vaste stof kolom: 0.5734 kg

Inhoud kolom: 0.4 l

Meetgegevens kolomtest:

Meetgegevens cascadetest:

ml opgev. per stap	L/S l/kg	pH --	Geleidbh. mS/m		L/S l/kg	pH --	Geleidbh. mS/m
63	0.1	12.5	1239	1e stap	20.0	12.6	1071
65	0.2	12.5	1143	2e stap	40.0	12.6	864
180	0.5	12.5	1097	3e stap	60.0	10.6	796
301	1.1	12.6	759	4e stap	80.0	12.3	213
638	2.2	12.5	701	5e stap	100.0	11.5	76
1960	5.6	12.7	68				
3400	11.5	12.6	778.0				

Resultaten kolom- en cascade-test (cumulatief uitgelopen, in % van totaal):

Kolomtest: L/S = 0 - 10

Cascadetest: L/S = 20 - 100

L/S-verh. l/kg	Calcium %	Sulfaat %	Arseen %	Barium %	Chroom %	Koper %	Molybdeen %	Antimoon %	Zink %
0.1	0.1	0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.4	< 0.00	0.00
0.2	0.2	0.3	0.00	0.01	0.00	0.01	0.6	0.04	0.00
0.5	0.4	0.7	0.00	0.01	0.00	0.02	1.4	< 0.05	0.00
1.1	0.8	1.2	0.00	0.02	0.01	0.03	2.7	< 0.06	0.01
2.2	1.6	2.7	0.00	0.04	0.03	0.05	5.5	< 0.09	0.01
5.6	4.1	7.4	< 0.01	0.14	0.07	0.12	13.6	< 0.19	0.02
11.5	8.5	13.9	< 0.02	0.28	0.09	0.22	21.7	< 0.34	0.06
20.0	19.0	20.6	0.03	0.35	0.10	0.44	33.1	< 0.53	1.04
40.0	35.8	41.2	0.07	0.68	0.19	0.84	51.7	< 1.07	1.30
60.0	51.2	61.3	0.14	1.08	0.26	1.23	62.9	< 1.60	1.54
80.0	53.7	62.0	< 0.17	2.66	0.28	1.37	65.1	< 2.13	1.74
100.0	55.0	63.9	< 0.20	3.06	0.32	1.51	68.0	2.67	1.92

Gegevens produkt:

Naam produkt: 81.261.285

Vochtgehalte: 0 %

Absolute dichtheid: 2354 kg/m³

Abs.dichth.dr.stof: 2354 kg/m³

Stortgewicht: 1056 kg/m³

Stortgew. dr.stof: 1056 kg/m³

Gehaltes in produkt:

Calcium 160000 mg/kg

Sulfaat 83900 mg/kg

Arseen 63 mg/kg

Barium 1200 mg/kg

Chroom 120 mg/kg

Koper 156 mg/kg

Molybdeen 27 mg/kg

Antimoon 8 mg/kg

Zink 135 mg/kg

Gehaltes in produkt:

Koolstof 156000 mg/kg

Silicium 105000 mg/kg

Aluminium 65600 mg/kg

Calcium 160000 mg/kg

IJzer 29800 mg/kg

Kalium 8600 mg/kg

Magnesium 5600 mg/kg

Natrium 900 mg/kg

Chloride 0 mg/kg

C-carbon. 2200 mg/kg

S-sulfaat 28000 mg/kg

Omgerekende gehaltes in produkt:

Koolstof, onverbr. 153800 mg/kg

Siliciumoxide 224573 mg/kg

Aluminiumoxide 123911 mg/kg

Calciumchloride 0 mg/kg

-carbonaat 18352 mg/kg

-sulfaat 118804 mg/kg

-oxide 164621 mg/kg

IJzeroxide 42617 mg/kg

Kalium 10360 mg/kg

Magnesium 9287 mg/kg

Natrium 1213 mg/kg

Resultaten beschikbaarheidstest:

L/S-verhouding: 206 l/kg

pH na 10 minuten: 12.6

Toegevoegd zuur tot.: 51.7 ml

Meetgegevens beschikbaarheidstest:

Gemeten concentraties
in extract, in ug/l:

Beschikbaarheid in
mg/kg droge stof

Beschikbaarheid in % van in droge
stof aanwezige hoeveelheid

Ingewogen vaste stof: 8.36 g

Toegev. demi-water 1e stap: 836 ml

Toegevoegd zuur 1e stap: 44.06 ml

Toegevoegd zuur 2e stap: 7.67 ml

L/S-verhouding: 206 l/kg

pH na 1 minuut: 12.35

pH na 5 minuten: 12.52

pH na 10 minuten: 12.57

Calcium 630000 ug/l

Sulfaat 560000 ug/l

Arseen 14 ug/l

Barium 820 ug/l

Chroom 16 ug/l

Koper 49 ug/l

Molybdeen 75 ug/l

Antimoon 21 ug/l

Zink 130 ug/l

Calcium 129898.3 mg/kg

Sulfaat 115465.2 mg/kg

Arseen 2.9 mg/kg

Barium 169.1 mg/kg

Chroom 3.3 mg/kg

Koper 10.1 mg/kg

Molybdeen 15.5 mg/kg

Antimoon 4.3 mg/kg

Zink 26.8 mg/kg

Calcium 81.2%

Sulfaat 137.6%

Arseen 4.6%

Barium 14.1%

Chroom 2.7%

Koper 6.5%

Molybdeen 57.3%

Antimoon 54.1%

Zink 19.9%

Resultaten kolom- en cascade-test (gemeten concentraties, in ug/l):

Kolomtest: L/S = 0 - 10

Cascadetest: L/S = 20 - 100

L/S-verh. l/kg	Calcium ug/l	Sulfaat ug/l	Arseen ug/l	Barium ug/l	Chroom ug/l	Koper ug/l	Molybdeen ug/l	Antimoon ug/l	Zink ug/l
0.11	1640000	1980000	< 1.0	560	137	49	370	< 2	40
0.24	1260000	1300000	< 1.0	480	89	41	480	< 2	28
0.51	1100000	1350000	< 1.0	480	12	33	920	< 2	22
1.06	1140000	1680000	< 1.0	440	7	33	850	< 2	23
2.12	1040000	1640000	< 1.0	430	6	34	640	< 2	19
4.05	1600	170000	1.5	270	1	14	8	< 2	20
20.0	1400000	1100000	< 1.0	350	68	38	430	< 2	31
40.0	1050000	610000	< 1.0	490	47	32	202	< 2	29
60.0	720000	< 5,000	< 1.0	8900	1	24	9	< 2	33
80.0	380000	< 5,000	6.1	3320	73	18	9	< 2	115
100.0	132000	11000	15.4	840	12	12	51	2	20

Resultaten kolom- en cascade-test (cumulatief uitgelooagd, in mg/kg):

Kolomtest: L/S = 0 - 10

Cascadetest: L/S = 20 - 100

L/S-verh. l/kg	Calcium mg/kg	Sulfaat mg/kg	Arseen mg/kg	Barium mg/kg	Chroom mg/kg	Koper mg/kg	Molybdeen mg/kg	Antimoon mg/kg	Zink mg/kg
0.1	188	227	< 0.0001	0.06	0.016	0.01	0.04	< 0.000	0.00
0.2	345	389	< 0.0002	0.12	0.027	0.01	0.10	< 0.000	0.01
0.5	643	754	< 0.0005	0.25	0.030	0.02	0.35	< 0.001	0.01
1.1	1268	1676	< 0.0011	0.50	0.034	0.04	0.82	< 0.002	0.03
2.1	2377	3424	< 0.0021	0.95	0.040	0.07	1.50	< 0.004	0.05
4.1	2380	3752	0.0050	1.47	0.041	0.10	1.52	< 0.008	0.09
20.0	28000	22000	< 0.0200	7.00	1.360	0.76	8.60	< 0.040	0.62
40.0	49000	34200	< 0.0400	16.80	2.300	1.40	12.64	< 0.080	1.20
60.0	63400	34300	< 0.0600	194.80	2.314	1.88	12.82	< 0.120	1.86
80.0	71000	34400	0.1820	261.20	3.774	2.24	13.00	< 0.160	4.16
100.0	73640	34620	0.4900	278.00	4.012	2.48	14.02	0.200	4.56

Resultaten kolom- en cascade-test:

Algemene gegevens kolom:

Vaste stof kolom: 0.40996 kg

Inhoud kolom: 0.4 l

Meetgegevens kolomtest:

Meetgegevens cascadetest:

ml opgev. per stap	L/S l/kg	pH --	Geleidbh. mS/m		L/S l/kg	pH --	Geleidbh. mS/m
47	0.1	12.5	1372	1e stap	20	12.5	883
51	0.2	12.5	995	2e stap	40	12.7	758
111	0.5	12.4	670	3e stap	60	11.9	646
225	1.1	12.5	739	4e stap	80	12.4	336
437	2.1	12.5	819	5e stap	100	11.8	135
791	4.1	12.1	368				

Resultaten kolom- en cascade-test (cumulatief uitgeloozd, in % van totaal):

Kolomtest: L/S = 0 - 10

Cascadetest: L/S = 20 - 100

L/S-verh. l/kg	Calcium %	Sulfaat %	Arseen %	Barium %	Chroom %	Koper %	Molybdeen %	Antimoon %	Zink %
0.1	0.1	0.3	0.00	0.01	0.01	0.00	0.2	0.00	0.00
0.2	0.2	0.5	0.00	0.01	0.02	0.01	0.4	< 0.01	0.01
0.5	0.4	0.9	0.00	0.02	0.02	0.01	1.3	< 0.01	0.01
1.1	0.8	2.0	0.00	0.04	0.03	0.02	3.0	< 0.03	0.02
2.1	1.5	4.1	0.00	0.08	0.03	0.05	5.6	< 0.05	0.03
4.1	1.5	4.5	0.01	0.12	0.03	0.06	5.6	< 0.10	0.06
20.0	17.5	26.2	0.03	0.58	1.13	0.49	31.9	< 0.50	0.46
40.0	30.6	40.8	0.06	1.40	1.92	0.90	46.8	< 1.00	0.89
60.0	39.6	40.9	0.10	16.23	1.93	1.21	47.5	< 1.50	1.38
80.0	44.4	41.0	0.29	21.77	3.15	1.44	48.1	< 2.00	3.08
100.0	46.0	41.3	0.78	23.17	3.34	1.59	51.9	2.50	3.38

Gegevens produkt:

Naam produkt: 81.250.276

Vochtgehalte: 0 %

Absolute dichtheid: 2481 kg/m³

Abs.dichth.dr.stof: 2481 kg/m³

Stortgewicht: 1069 kg/m³

Stortgew. dr.stof: 1069 kg/m³

Gehaltes in produkt:

Calcium 90000 mg/kg

Sulfaat 43000 mg/kg

Arseen 87 mg/kg

Barium 1200 mg/kg

Chroom 76 mg/kg

Koper 69 mg/kg

Molybdeen 24 mg/kg

Antimoon 1.6 mg/kg

Zink 75 mg/kg

Gehaltes in produkt:

Koolstof 107000 mg/kg

Silicium 169000 mg/kg

Aluminium 123000 mg/kg

Calcium 90000 mg/kg

IJzer 7600 mg/kg

Kalium 3000 mg/kg

Magnesium 2800 mg/kg

Natrium 1200 mg/kg

Chloride 0 mg/kg

C-carbon. 2000 mg/kg

S-sulfaat 14300 mg/kg

Omgerekende gehaltes in produkt:

Koolstof, onverbr. 105000 mg/kg

Siliciumoxide 361456 mg/kg

Aluminiumoxide 232333 mg/kg

Calciumchloride 0 mg/kg

-carbonaat 16683 mg/kg

-sulfaat 60675 mg/kg

-oxide 91569 mg/kg

IJzeroxide 10869 mg/kg

Kalium 3614 mg/kg

Magnesium 4644 mg/kg

Natrium 1617 mg/kg

Resultaten beschikbaarheidstest:

L/S-verhouding: 204 l/kg

pH na 10 minuten: 12.4

Toegevoegd zuur tot.: 30.0 ml

Meetgegevens beschikbaarheidstest:

Gemeten concentraties
in extract, in ug/l:

Ingewogen vaste stof:	7.78 g	Calcium	374000 ug/l
Toegev. demi-water 1e stap:	778 ml	Sulfaat	290000 ug/l
Toegevoegd zuur 1e stap:	26.48 ml		
Toegevoegd zuur 2e stap:	3.5 ml	Arseen	7.4 ug/l
		Barium	375 ug/l
L/S-verhouding:	204 l/kg	Chroom	19 ug/l
		Koper	10 ug/l
PH na 1 minuut:	12.24	Molybdeen	70 ug/l
pH na 5 minuten:	12.38	Antimoon	3 ug/l
pH na 10 minuten:	12.44	Zink	60 ug/l

Beschikbaarheid in
mg/kg droge stof

Calcium	76241.2 mg/kg
Sulfaat	59117.5 mg/kg
Arseen	1.5 mg/kg
Barium	76.4 mg/kg
Chroom	3.9 mg/kg
Koper	2.0 mg/kg
Molybdeen	14.3 mg/kg
Antimoon	0.6 mg/kg
Zink	12.2 mg/kg

Beschikbaarheid in % van in
stof aanwezige hoeveelheid

Calcium	84.7%
Sulfaat	137.5%
Arseen	1.7%
Barium	6.4%
Chroom	5.1%
Koper	3.0%
Molybdeen	59.5%
Antimoon	38.2%
Zink	16.3%

Resultaten kolom- en cascade-test (gemeten concentraties, in ug/l):

Kolomtest: L/S = 0 - 10

Cascadetest: L/S = 20 - 100

L/S-verh. l/kg	Calcium ug/l	Sulfaat ug/l	Arseen ug/l	Barium ug/l	Chroom ug/l	Koper ug/l	Molybdeen ug/l	Antimoon ug/l	Zink ug/l
0.1	1430000	1440000	< 1.0	39	490.0	47	1050	< 2	46
0.2	1410000	1580000	< 1.0	780	430.0	44	1800	< 2	42
0.5	920000	1370000	< 1.0	31	95.0	37	1920	< 2	63
1.1	360000	168000	< 1.0	450	9.9	24	450	< 2	37
2.2	415000	< 5,000	< 1.0	22600	0.5	19	23	< 2	30
5.7	154000	< 5,000	20.0	4600	0.7	11	26	< 2	26
11.0	55000	21000	46.0	200	2.1	10	450	< 2	26
20.0	770000	510000	< 1.0	1150	101.0	29	335	< 2	51
40.0	340000	< 5,000	9.5	5700	7.1	16	42	< 2	35
60.0	89000	25000	23.0	700	34.0	12	92	< 2	18
80.0	65000	37000	21.0	230	30.0	12	47	< 2	18
100.0	39000	55000	18.0	130	35.0	< 10	45	< 2	18

Resultaten kolom- en cascade-test (cumulatief uitgelooagd, in mg/kg):

Kolomtest: L/S = 0 - 10

Cascadetest: L/S = 20 - 100

L/S-verh. l/kg	Calcium mg/kg	Sulfaat mg/kg	Arseen mg/kg	Barium mg/kg	Chroom mg/kg	Koper mg/kg	Molybdeen mg/kg	Antimoon mg/kg	Zink mg/kg
0.1	158	160	< 0.0001	0.00	0.054	0.01	0.12	0.000	0.01
0.2	332	355	< 0.0002	0.10	0.107	0.01	0.34	0.000	0.01
0.5	611	769	< 0.0005	0.11	0.136	0.02	0.92	< 0.001	0.03
1.1	797	856	< 0.0011	0.34	0.141	0.03	1.15	< 0.002	0.05
2.2	1277	862	< 0.0022	26.47	0.142	0.06	1.18	< 0.004	0.08
5.7	1817	879	0.0723	42.59	0.144	0.09	1.27	< 0.011	0.17
11.0	2105	989	0.3136	43.64	0.155	0.15	3.63	< 0.022	0.31
20.0	15400	10200	< 0.0220	23.00	2.020	0.58	6.70	< 0.040	1.02
40.0	22200	10300	0.2120	137.00	2.162	0.90	7.54	< 0.080	1.72
60.0	23980	10800	0.6720	151.00	2.842	1.14	9.38	< 0.120	2.08
80.0	25280	11540	1.0920	155.60	3.442	1.38	10.32	< 0.160	2.44
100.0	26060	12640	1.4520	158.20	4.142	< 1.58	11.22	< 0.200	2.80

Resultaten kolom- en cascade-test:

Algemene gegevens kolom:

Vaste stof kolom: 0.39703 kg

Inhoud kolom: 0.4 l

Meetgegevens kolomtest:

Meetgegevens cascadetest:

ml opgev. per stap	L/S l/kg	pH --	Geleidbh. mS/m		L/S l/kg	pH --	Geleidbh. mS/m
44	0.11	12.5	909	1e stap	20.0	12.5	714
49	0.23	12.7	776	2e stap	40.0	12.5	373
120	0.54	12.3	499	3e stap	60.0	10.5	87
206	1.06	12.4	402	4e stap	80.0	11.5	44
459	2.21	12.4	441	5e stap	100.0	11.1	35
1391	5.71	11.9	1865				
2083	10.96	11.5	56.0				

Resultaten kolom- en cascade-test (cumulatief uitgeloozd, in % van totaal):

Kolomtest: L/S = 0 - 10

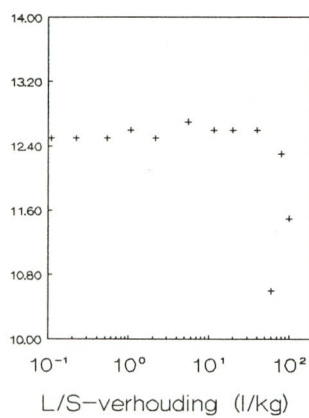
Cascadetest: L/S = 20 - 100

L/S-verh. l/kg	Calcium %	Sulfaat %	Arseen %	Barium %	Chroom %	Koper %	Molybdeen %	Antimoon %	Zink %
0.1	0.2	0.4	0.00	0.00	0.1	0.01	0.5	< 0.01	0.01
0.2	0.4	0.8	0.00	0.01	0.1	0.02	1.4	< 0.03	0.01
0.5	0.7	1.8	0.00	0.01	0.2	0.03	3.8	< 0.07	0.04
1.1	0.9	2.0	0.00	0.03	0.2	0.05	4.8	< 0.13	0.06
2.2	1.4	2.0	0.00	2.21	0.2	0.08	4.9	< 0.28	0.11
5.7	2.0	2.0	0.08	3.55	0.2	0.14	5.3	< 0.71	0.23
11.0	2.3	2.3	0.36	3.64	0.2	0.21	15.1	< 1.37	0.41
20.0	17.1	23.7	< 0.03	1.92	2.7	0.84	27.9	< 2.50	1.36
40.0	24.7	24.0	0.24	11.42	2.8	1.30	31.4	< 5.00	2.29
60.0	26.6	25.1	0.77	12.58	3.7	1.65	39.1	< 7.50	2.77
80.0	28.1	26.8	1.26	12.97	4.5	2.00	43.0	< 10.00	3.25
100.0	29.0	29.4	1.67	13.18	5.5	2.29	46.8	< 12.50	3.73

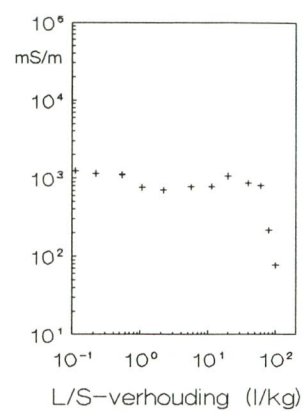
Gedrag pH en geleidbaarheid

as-code
51.223.285

pH

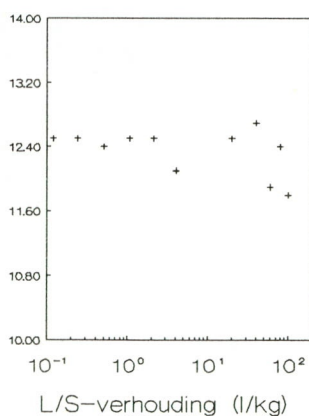


geleidbaarheid

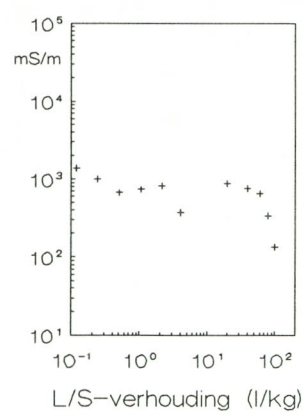


81.261.285

pH

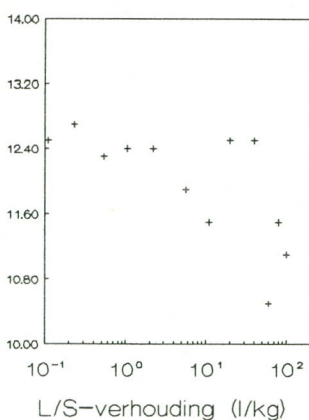


geleidbaarheid



81.250.276

pH



geleidbaarheid

