

TNO-rapport

**Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en
vliegassen met behulp van zwavel**

Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het
T-2000 programma

Referentienummer 94-427
Dossiernummer 112322-25082
Datum januari 1995
NP

Auteurs
Ir. J.I.A. Koene
Mw. ir. M.M.C. Alkemade

Met medewerking van
M. Buitenhuis
Ing. G.J. Grootenboer
Ir. E. Mulder
Ing. R.K. Zijlstra

Trefwoorden
– AVI
– AVIRA
– T-2000
– immobilisatie
– rookgasreinigingsresidu
– vliegassen
– zwavel
– granulaten

Opdrachtgever
AVIRA, Regio Arnhem
Rivierweg 20
Duiven

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO', dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

Samenvatting

In opdracht van AVIRA zijn in het kader van het door het Ministerie VROM gestimuleerde T-2000 'Immobilisatie' programma door TNO de perspectieven onderzocht van een immobilisatieprocédé, gebaseerd op elementaire zwavel. Het doel van het onderzoek is om na te gaan wat de haalbaarheid is van de technologie op basis van zwavel ten behoeve van de immobilisatie van rookgasreinigingsresiduen en vliegassen van afvalverbrandingsinstallaties (AVI's). De immobilisatie van het rookgasreinigingsresidu heeft daarbij een hogere prioriteit dan de immobilisatie van vliegassen. Voor de experimenten zijn uitsluitend rookgasreinigingsresiduen en vliegassen van de afvalverbrandingsinstallatie 'AVIRA' gebruikt. Als immobilisatieproducten zijn granulaten en zwavelblokken geproduceerd. De haalbaarheid van het zwavel-immobilisatieprocédé voor genoemde toepassing is beoordeeld op technische, milieuhygiënische en economische aspecten.

Vanuit technisch oogpunt bestaan er geen grote belemmeringen. Zowel granulaten als zwavelblokken kunnen worden geproduceerd op basis van het zwavelprocédé. Door de zwavelimmobilisatie ontstaan granulaten die ongeveer 20 keer zo sterk zijn als granulaten zonder de toevoeging van zwavel. Hiervoor moet wel het rookgasreinigingsresidu vooraf grotendeels gedroogd worden. Ook is het toevoegen van een fractie vliegassen aan het rookgasreinigingsresidu essentieel. Een zeer goede sterkte (ca. 6 N/mm²) van de granulaten wordt gerealiseerd als rookgasreinigingsresidu, vliegassen en zwavel in ongeveer dezelfde hoeveelheden worden gebruikt.

Indien het uitgangsmateriaal (rookgasreinigingsresidu en vliegassen) bij de productie van zwavelblokken als (droog en gemalen) poeder toegevoegd wordt, is het minimale zwavelgehalte circa 60% (op basis van het totaalgewicht); indien het als granulaten wordt toegevoegd, kan de hoeveelheid zwavel worden teruggebracht tot ca. 30 à 40%. Tengevolge van de toevoeging van zwavel vindt er geen volumetoename plaats.

Met betrekking tot de fysische immobilisatie neemt de fysische retardatie (of tortuositeit) een factor 50 toe. Voor wat betreft de chemische immobilisatie worden enkele componenten (kwik en lood) zeer sterk vastgelegd, maar dat geldt niet voor alle componenten (zink en cadmium). Op basis van de milieuhygiënische criteria voldoen zonder aanvullende bewerkingen de granulaten **noch** de zwavelblokken aan de norm voor het storten op de C₃-deponie. De aanwezigheid van zink en cadmium in de vorm van zouten is de vermoedelijke oorzaak van deze slechte immobilisatie.

De totale verwerkingskosten (zonder aanvullende bewerkingen) worden geschat op f 200,- per ton (nat) rookgasreinigingsresidu. De kosten voor het drogen van het rookgasreinigingsresidu bedragen meer dan een derde deel van de verwerkingskosten. De in de markt aangeleverde hoeveelheid elementaire afvalzwavel is ruim voldoende voor de immobilisatie van rookgasreinigingsresidu op grote schaal.

Voor verder ontwikkeling van het zwavelprocédé voor de immobilisatie van rookgasreinigingsresidu wordt aanbevolen om na het zwavelprocédé een wasstap uit te voeren. Uit de resultaten van de diffusieproef blijkt namelijk dat oppervlakte-afspoeling van groot belang is bij de uitloging van de verontreinigingen, die na de immobilisatiestap met zwavel te veel blijven uitlogen. In plaats van de verontreinigingen te immobiliseren zouden ze kunnen worden gemobiliseerd en uitgespoeld. De ontstane zoutoplossing moet vervolgens worden opgewerkt.

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	4
1.1	Doelstelling van het onderzoek	4
1.2	Achtergrond van het T-2000 programma	4
1.3	Achtergrond van het project 'de immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel'	4
1.4	Korte beschrijving van eigenschappen van elementaire zwavel voor immobilisatiedoelinden	5
1.5	Achtergrondinformatie met betrekking tot zwavelbeton.....	6
1.6	De produktie van vliegassen, rookgasreinigingsresidu en elementaire zwavel in Nederland	6
1.7	De produktie van vliegass en rookgasreinigingsresidu bij AVIRA	7
2	Technische aspecten van het zwavelimmobilisatieproces	8
2.1	Inleiding	8
2.2	Granuleerproeven	9
2.3	Produktie van zwavelblokken	11
2.4	Invloed van zwavel op de sterkte van het granulaat.....	12
2.5	De uitvoeringsvorm van het proces (procesbeschrijving).....	14
3	Milieuhygiënische aspecten van het zwavelimmobilisatieproces	15
3.1	Milieuhygiënische aspecten.....	15
3.2	Onbehandeld granulaat versus zwavel-geïmpregneerd granulaat	15
3.3	Zwavelblokken (vormgegeven immobilisaat)	17
4	Economische aspecten van het zwavelimmobilisatieproces	21
5	Conclusies	23
6	Aanbevelingen	25
7	Referenties	26
8	Verantwoording	27

Bijlagen

*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

1 Inleiding

1.1 Doelstelling van het onderzoek

In opdracht van AVIRA zijn in het kader van het door het Ministerie VROM gestimuleerde T-2000 programma door TNO de perspectieven onderzocht van een immobilisatieprocédé, gebaseerd op elementaire zwavel. Het doel van het onderzoek is om na te gaan wat de haalbaarheid is van de technologie op basis van zwavel ten behoeve van de immobilisatie van rookgasreinigingsresiduen en vliegassen van afvalverbrandingsinstallaties (AVI's). Immobilisatie van het rookgasreinigingsresidu heeft daarbij een hogere prioriteit dan de immobilisatie van vliegassen.

1.2 Achtergrond van het T-2000 programma

Het T-2000 programma is een initiatief van het Ministerie van VROM, Directie Afvalstoffen, Afdeling Verwijderingstechnologie. De doelstelling van het programma is het op termijn (het jaar 2000) bieden van perspectiefrijke technologische oplossingen voor het verwerken van prioritaire afvalstoffen (PRIAF) door stimulering van onderzoek naar verwerkingstechnologieën voor deze afvalstoffen. Op grond van een voorstudie is het T-2000 programma toegespitst op vier kansrijke technologieën [1, 2]:

- deeltjesscheiding;
- hydro- en pyrometallurgie;
- thermische vernietiging en
- immobilisatie.

Het T-2000 programma is geconcentreerd op het ontwikkelen van verwerkingstechnieken voor afvalstoffen, vanaf het moment waarop de producent zich van deze stoffen ontdoet. Het gaat hierbij dus om 'end-of-pipe'-technieken.

Bij het opstellen van het kader van het programma T-2000 zijn daarom preventieve maatregelen ter voorkoming van het ontstaan van afvalstoffen, alsmede procesgeïntegreerde technieken buiten beschouwing gebleven. Ook richt het T-2000 programma zich niet op het oplossen van normatieve en logistieke problemen, die zich kunnen voordoen bij de verwerking van afvalstoffen.

1.3 Achtergrond van het project 'de immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel'

In Nederland zijn de meeste afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) uitgerust met een rookgasreinigingsinstallatie. Hierin worden na het afvangen van de vliegassen nog in het rookgas resterende zure gassen, vluchtige (zware) metalen en vluchtige organische componenten door middel van wasprocessen verwijderd. De rookgasreiniging bestaat in de meeste gevallen uit een combinatie van een zure en een alkalische natte was. In de zure was (pH = 1 - 2) worden met name zoutzuur en zware metalen afgevangen. In de basische was, waarin kalkmelk (calciumhydroxyde) of natronloog (natriumhydroxyde) wordt ingespoten, wordt met name zwaveloxyde af-

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

gevangen, evenals een deel van de zware metalen. De filterkoek (het rookgasreinigingsresidu) van de hierboven omschreven rookgasreinigingsinstallatie heeft een droge-stof-gehalte van ongeveer 40%. Het residu bestaat voor een groot deel uit calcium- of natriumsulfaat en chloridezouten. Daarnaast bevat het relatief hoge concentraties aan zware-metaal-hydroxyden. Voor zover bekend, zijn de concentraties aan organische verontreinigingen minimaal en wordt het milieuhygiënisch risico van het residu bepaald door de anorganische componenten. De vrijkomende hoeveelheid rookgasreinigingsresidu bij een dergelijke installatie bedraagt ongeveer 4 kg (droge stof) per ton verbrand afval.

Enkele Nederlandse AVI's zijn niet uitgerust met de hierboven omschreven natte wassers, maar met een (semi) droge rookgasreiniging. In een dergelijk systeem worden **alle** zouten afgevangen. Hierdoor is de vrijkomende hoeveelheid rookgasreinigingsresidu aanzienlijk groter, terwijl ook de samenstelling anders zal zijn (met name hogere concentraties chloridezouten).

Zowel rookgasreinigingsresiduen als AVI vliegassen zijn C₂-afvalstoffen. Rookgasreinigingsresiduen komen in steeds grotere hoeveelheden vrij (inmiddels meer dan 20.000 ton op jaarbasis en naar verwachting 40.000 ton per jaar in het jaar 2000). Ook de hoeveelheden AVI-vliegassen nemen nog steeds toe. Het ligt daarom voor de hand om te zoeken naar mogelijkheden om de bovengenoemde afvalstoffen dusdanig te bewerken dat ze gestort kunnen worden onder een minder stringent regime met lagere storttarieven (als C₃- of C₄-afvalstof). Immobilisatie lijkt hiervoor in principe een geschikte bewerking. Het belangrijkste knelpunt hierbij is de in rookgasreinigingsresidu aanwezige, gemakkelijk uitlogbare zoutfractie.

1.4 Korte beschrijving van eigenschappen van elementaire zwavel voor immobilisatiedoeleinden

Bij kamertemperatuur is zwavel een vaste verbinding, met als stabiele vorm het rhombische zwavel. Bij een temperatuur van 95,5 °C vindt een fasenovergang plaats naar monoclien zwavel. Het smeltpunt hiervan is 114,5 °C. In de vloeibare fase treden eveneens overgangen op; bij een temperatuur van 159 - 160 °C gaat het zwavel polymeriseren. Dit heeft een grote toename van de viscositeit tot gevolg. Alle overgangen zijn reversibel.

Als het zwavelimmobilisaat wordt afgekoeld tot onder het smeltpunt van zwavel, kristalliseert het zwavel uit in de *monocliene* vorm. Een immobilisaat wordt dan vast. Na verdere afkoeling ($T < 95,5$ °C) gaat het zwavel over in de rhombische vorm. Hierbij treedt tevens een kleine volumereductie van het aanwezige zwavel op van 5%.

Omdat gesmolten zwavel boven een bepaalde temperatuur gaat polymeriseren, neemt de viscositeit sterk toe. Tot aan dat punt vertoont zwavel een 'normaal' smeltgedrag; de viscositeit neemt af bij een verhoging van de temperatuur. De combinatie van beide effecten zorgt ervoor dat er een minimum bestaat in de viscositeit van gesmolten zwavel. Voor de bereiding van een *immobilisaat* betekent dit dat de temperatuur van de smelt zo dicht mogelijk bij dat minimum dient te liggen. De viscositeit van de smelt is namelijk bepalend voor de handelbaarheid bij de verwerking en dus uiteindelijk ook voor de kwaliteit van een immobilisaat.

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

1.5 Achtergrondinformatie met betrekking tot zwavelbeton

Een min of meer bekende toepassing van zwavel is zwavelbeton. Zwavelbeton wordt bijvoorbeeld gebruikt voor zuurbestendige vloeren en een bepaald type rioolbuizen. Ten opzichte van cementbeton heeft zwavelbeton voor- en nadelen, terwijl de mechanische eigenschappen vergelijkbaar zijn.

Voordelen zijn de bestendigheid tegen chemicaliën (bijvoorbeeld zuren) en de ondoordringbaarheid voor water, waardoor de uitloogbaarheid geringer zal zijn. Nadelen zijn de slechte hittebestendigheid (boven 115 °C smelt zwavel en bij verbranding komt zwaveldioxyde vrij) en de moeilijke verwerkbaarheid (de produktie van een zwavelbeton is vanwege arbeidsomstandigheden moeilijker dan de produktie van cementbeton).

1.6 De produktie van vliegassen, rookgasreinigingsresidu en elementaire zwavel in Nederland

De produktie van vliegas in Nederland

Van de geproduceerde AVI vliegassen wordt een deel nuttig toegepast en een deel gestort. De sluiting van een aantal AVI's en de optimalisatie van de bedrijfsvoering als onderdeel van in bedrijfname van rookgasreinigingsinstallaties is de hoeveelheid AVI-vliegas afgenomen. Hierdoor is de vereiste stortcapaciteit voor AVI-vliegas gedaald van ca. 75 kton in 1989 tot ruim 50 kton in 1993 [3]. De hoeveelheid AVI vliegas, die nuttig toegepast wordt bedraagt circa 20 kton/jaar. De verwachte hoeveelheid AVI vliegas in het jaar 2000 bedraagt circa 140 kton. De nuttige toepassing van AVI vliegas als vulstofcomponent in asfalt zal in de toekomst niet of nauwelijks toenemen [3].

De produktie van rookgasreinigingsresidu in Nederland

Rookgasreinigingsresiduen zullen in steeds grotere hoeveelheden vrijkomen. Inmiddels bedraagt de jaarlijkse produktie meer dan 20.000 ton en wordt verwacht dat deze hoeveelheid zal stijgen tot circa 40.000 ton per jaar in het jaar 2000 [4]. De beschikbare stortruimte voor de categorieën C₂ zal snel uitgeput raken.

De produktie van elementaire zwavel in Nederland

Zwavel wordt in steeds grotere mate als secundaire grondstof gewonnen bij de ontzwaveling van aardgas en ruwe olie (petrochemie). De zwavel komt als elementaire zwavel vrij uit rookgasontzwavelingsinstallaties, zoals Claus en Scotte installaties. In deze installaties wordt SO_x omgezet in S°. De dagproduktie in Nederland van elementaire zwavel wordt geschat op 500 - 600 ton [5].

*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

Enkele producenten zijn:

- * NAM (20 - 30 ton/dag);
- * Kolenvergassingsinstallatie te Buggenum (20 - 30 ton/dag);
- * Hycon Shell (ca. 450 ton/dag);
- * Esso.

Elementaire zwavel wordt hoofdzakelijk gebruikt bij de zwavelzuur- (> 80%) en kunstmestproductie.

Er kan geconcludeerd worden dat er een overproductie bestaat en dat dit de komende 10 jaar zo zal blijven [5]. In het buitenland (onder andere Duitsland) zijn enkele zeer grote producenten van elementaire zwavel. De wereldproductie bedraagt 38 miljoen ton elementaire zwavel per jaar [6]. De prijs van zwavel bedraagt circa 25 US\$/ ton [6]. Prijsindicatie van scheepsladingen zijn weergegeven in bijlage 1.

1.7 De produktie van vliegas en rookgasreinigingsresidu bij AVIRA

De produktie van vliegas bij AVIRA is op dit moment circa 8.000 ton/jaar (ca. 6.000 ton/jaar droge stof); de produktie van rookgasreinigingsresidu is circa 2.000 ton/jaar.

De vliegassen worden afgevoerd naar de Nederlandse Vulstoffen Combinatie (NE-VUL) en het rookgasreinigingsresidu naar de C₂ deponie. De kosten die gemaakt worden voor afvoer van de vliegassen bedragen ongeveer f 275,- per ton en de kosten voor deponie (C₂) circa f 600,- per ton. In de nabije toekomst zal een vierde verbrandingslijn operationeel worden, waardoor de verbrandingscapaciteit van AVIRA zal toenemen van 280.000 (in 1993) tot 480.000 ton huisvuil/jaar in 1997.

De haalbaarheid van het zwavelimmobilisatie-procédé voor genoemde toepassing is beoordeeld op technische, milieuhygiënische en economische aspecten. Deze komen in respectievelijk hoofdstuk 2, 3 en 4 aan de orde. In hoofdstuk 5 worden de conclusies gegeven en in hoofdstuk 6 enkele aanbevelingen.

2 Technische aspecten van het zwavelimmobilisatieproces

2.1 Inleiding

Bij de uitvoering van het experimentele onderzoek is eerst aandacht besteed aan de produktie-technische aspecten van het immobilisatieproces. Hierbij zijn van belang:

- a. de mengverhouding van de grondstoffen;
- b. de vorm van het immobilisaat;
- c. de uitvoeringsvorm van het proces.

De mengverhoudingen van de grondstoffen

Als uitgangspunt is gesteld dat de fractie rookgasreinigingsresidu zo groot mogelijk en de fractie zwavel zo klein mogelijk moet zijn. De reden hiervoor is een economische; de storkosten van rookgasreinigingsresidu zijn het hoogst, terwijl voor zwavel betaald moet worden. De optimalisatie wordt gedicteerd door de milieuhygiënische criteria en de eventuele toepassingsmogelijkheden. Bovendien wordt voor immobilisatie maar een beperkte volumetoename geaccepteerd. De moeilijkheid hierbij was dat er bij de optimalisatie van de verhouding nog geen uitlooggegevens bekend waren. Alleen gegevens over de sterkte van het immobilisaat waren relatief gemakkelijk te verkrijgen. Dit is dan ook als eerste selectie-criterium gebruikt. Een sterke korrel wordt gevormd als er een chemische binding tussen silicaten en aluminaten heeft plaatsgevonden. Verder heeft een beoordeling plaatsgevonden op basis van een parameterstudie. Met behulp van een statistisch programma (Design Ease) is nagegaan welke factoren van belang zijn om een goede kwaliteit (sterkte) van het produkt te verkrijgen.

De vorm van het immobilisaat

De uiteindelijke toepassingsmogelijkheden van een immobilisaat worden bepaald door de milieuhygiënische kwaliteit, en door de vorm van het produkt. Wordt er bijvoorbeeld gestreefd naar een nuttige toepassing van het produkt als toeslagstof in de bouw, dan is een korrelvorm of granulaat waarschijnlijk het meest geschikt. Is het hoofddoel om het materiaal te storten dan is de vorm minder belangrijk (zolang de uitloogbaarheid maar aan de storteisen voldoet).

In het uitgevoerde onderzoek is een deel van de tijd besteed aan het produceren van zwavelblokken. Daarnaast is er aandacht besteed aan het produceren van granulaten (immobilisaten in korrelvorm). Daarbij is nagegaan wat de kwaliteit van een granulaat is met en zonder toevoeging van zwavel, en tevens wat meer in fundamentele zin het effect van zwavel als toeslagstof is onderzocht.

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

De uitvoeringsvorm van het proces

Op basis van de ervaringen die in het laboratorium zijn opgedaan is een processchema opgesteld. Dit processchema wordt in § 2.5 besproken.

2.2 Granuleerproeven

Het granuleren

Op een granuleerschotel zijn een groot aantal verschillende korrels geproduceerd, bestaande uit rookgasreinigingsresidu en vliegass. Als uitgangsmaterialen werden gebruikt:

- vliegass (van AVIRA);
- rookgasreinigingsresidu (van AVIRA), met een droge stof gehalte van circa 55%.

De volgende series experimenten zijn uitgevoerd:

- serie 1: oriënterende experimenten;
- serie 2: granulaten geproduceerd met gedroogd rookgasreinigingsresidu;
- serie 3: granulaten geproduceerd met nat rookgasreinigingsresidu;
- serie 4: vaststellen van het minimale droge stof gehalte van rookgasreinigingsresidu;
- serie 5: effect van de droogtemperatuur op de sterkte van de korrels.

Resultaten

Eerste serie: Instelling van granuleerschotel

In een eerste serie (oriënterende) experimenten werd de juiste instelling van de granuleerschotel vastgesteld (draaisnelheid, toevoegsnelheid van water en vast materiaal). Een batchgrootte (een experiment) bedroeg ca. 3 kg granulaten. Het toevoegen van water tijdens het granuleren moet heel nauwgezet gebeuren, om de vorming van te grote korrels te voorkomen. Te veel water levert bovendien te zachte korrels op. Uit de resultaten van de eerste serie experimenten bleek dat het rookgasreinigingsresidu eerst gedroogd moet worden voordat het gebruikt kan worden voor de granuleerproeven.

Tweede serie: Verhouding rookgasreinigingsresidu en vliegass

Uit de tweede serie experimenten (uitgaande van gedroogd rookgasreinigingsresidu) bleek dat toevoeging van vliegass noodzakelijk is voor een goede korrelvorming. Een goede korrelvorming werd gerealiseerd bij een verhouding vliegass:(gedroogd) rookgasreinigingsresidu = 1:1. Tengevolge van de toevoeging van water reageren calcium (uit het rookgasreinigingsresidu) en silicium (uit de vliegassen) met elkaar tot calciumsilicaten en ontstaat er een stevige korrel.

Uitgaande van gedroogd rookgasreinigingsresidu bleek er meer rookgasreinigingsresidu verwerkt te kunnen worden dan vliegassen. Een verhouding van vliegass:rookgasreinigingsresidu = 1:3 leverde nog goede korrels op. Een en ander is geïllustreerd in bijlage 2.

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

Derde serie: Granulaten geproduceerd met nat rookgasreinigingsresidu

Het droge stof gehalte van het gebruikte rookgasreinigingsresidu was 55%. Omdat een droogstap niet aantrekkelijk is voor een proces op industriële schaal, is gezocht naar een mogelijkheid, waarbij het rookgasreinigingsresidu niet voorbehandeld (niet gedroogd) hoeft te worden. Daarvoor is een grote batch vliegas en rookgasreinigingsresidu gemengd in een betonmolen. Een kluitenbreker, in deze betonmolen, zorgde voor een verkleining en menging. Bij dit experiment was de verhouding (gebaseerd op nat gewicht) vliegas:rookgasreinigingsresidu = 6:8. Dit komt neer op de verhouding (gebaseerd op droog gewicht) vliegas: rookgasreinigingsresidu = 6:4,3 (of 1,4:1). Bij het granuleren van dit mengsel bleek dat de granulaten aanzienlijk kleiner waren dan bij de experimenten waarbij uitgegaan was van een gedroogd rookgasreinigingsresidu en dat bovendien de sterkte van de granulaten (zowel voor als na het drogen) gering was. Blijkbaar wordt het vliegas in deze situatie niet goed vermengd en blijven er klonten rookgasreinigingsresidu aanwezig. Net als in serie 1 blijkt het dus noodzakelijk te zijn om het rookgasreinigingsresidu vooraf te drogen om een goede sterkte van de granulaten te verkrijgen.

Vierde serie: Vaststellen van het minimale droge stof gehalte van rookgasreinigingsresidu

Deze serie experimenten is uitgevoerd om na te gaan hoe ver het vochtgehalte gereduceerd moet worden om nog een acceptabele korrel te krijgen. Uit de experimenten bleek dat voor een goede granulaatvorming en voor een goede sterkte het noodzakelijk is dat het droge stofgehalte van het mengsel minimaal 85% bedraagt. Bij een totaal droge stofgehalte van < 81 à 82% ontstaat er reeds verkleefing en is de granulaatvorming slecht. Uitgaande van een rookgasreinigingsresidu met een droge stofgehalte van 55% zou de verhouding vliegas:rookgasreinigingsresidu dus groter moeten zijn dan 3 om een mengsel met een droge stofgehalte van maximaal 85% te verkrijgen. Echter er wordt naar gestreefd (uitgangspunt) om zo weinig mogelijk vliegas te verwerken in het granulaat en zo veel mogelijk rookgasreinigingsresidu.

Op basis van deze resultaten wordt aanbevolen het rookgasreinigingsresidu vooraf grotendeels te drogen, zodat een zo groot mogelijke fractie rookgasreinigingsresidu in het immobilisaat verwerkt kan worden.

Vijfde serie Effect van de droogtemperatuur op de sterkte van de korrels

Bij dit experiment werd een deel van de granulaten gedroogd bij kamertemperatuur en een ander deel bij een temperatuur van 40 °C. Granulaten gedroogd bij een temperatuur van 40 °C waren aanzienlijk sterker dan die gedroogd waren bij kamertemperatuur. In bijlage 2 (tabel) is weergegeven wat het verschil in sterkte bedraagt tussen korrels gedroogd bij kamertemperatuur en korrels gedroogd bij 40 °C. Tevens is in een figuur het verloop van de droging weergegeven bij de twee temperaturen (bijlage 2).

Conclusies

- Voor een goede granulaatvorming (dat wil zeggen een goede sterkte) is de toevoeging van een fractie vliegas aan het rookgasreinigingsresidu noodzakelijk.
- Voor een goede granulaatvorming (dat wil zeggen een goede sterkte) is het droge stofgehalte van het mengsel zeer belangrijk. Bij een droge stofgehalte van het mengsel van 85% of meer worden goede granulaten verkregen.

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

- Bij het toevoegen van gedroogd en vermalen rookgasreinigingsresidu kan met een verhouding van vliegass:rookgasreinigingsresidu = 1:3 een goed en hard granulaat worden verkregen.
- Granulaten gedroogd bij een temperatuur van 40 °C zijn aanzienlijk sterker dan die gedroogd zijn bij kamertemperatuur.

2.3 **Productie van zwavelblokken**

Inleiding

Bij de eerste serie experimenten zijn zwavelblokken geproduceerd ten behoeve van een parameterstudie. Het doel van deze studie was om een indruk te krijgen welke parameters belangrijk zijn om te komen tot een acceptabel produkt. Daarvoor zijn eerst granulaten geproduceerd met een verhouding rookgasreinigingsresidu en vliegass = 1:1. Deze granulaten zijn gebruikt als basismateriaal bij de productie van de zwavelblokken. Hierbij werd overigens het rookgasreinigingsresidu eerst gedroogd omdat met het natte rookgasreinigingsresidu geen goede granulaten gevormd konden worden.

Vervolgens zijn 64 immobilisaten in bekerglazen geproduceerd, waarbij steeds één parameter veranderd werd. De immobilisaten zijn op basis van hun sterkte en uiterlijk beoordeeld als ‘goed’ of ‘slecht’. Vervolgens is via het statistisch programma ‘Design Ease’ berekend wat de invloed van de verschillende parameters is op de kwaliteit van het produkt. De korrelopbouw van het geproduceerde granulaat was niet optimaal (er waren relatief veel grote korrels aanwezig), maar dit is niet van belang bij de beoordeling volgens deze methodiek.

De invloed van de volgende parameters op de produktkwaliteit (zwavelblok) zijn onderzocht:

- toevoeging van grof-korrelig (na drogen en verbrokkelen) en fijnkorrelig rookgasreinigingsresidu (na drogen en malen);
- verhouding rookgasreinigingsresidu en vliegass (0 - 1, 1/3 - 2/3, 2/3 - 1/3, 1 - 0 delen respectievelijk);
- het rookgasreinigingsresidu/vliegass toegevoegd als ‘granulaat’ of als gedroogd (stofvormig) materiaal;
- de hoeveelheid zwavel (30, 40, 50 of 60 gew-%).

Resultaten

Uit de analyse van de proefopzet met ‘Design Ease’ volgt onderstaand model. De resultaten van deze berekening zijn grafisch weergegeven in bijlage 3.

Granulaat:Wel

$$\text{Hardheid} = -7,875 + 0,563 * \text{zwavel1} + 0,169 * \text{zwavel2} - 0,006 * \text{zwavel1} * \text{zwavel2}$$

Granulaat:Niet

$$\text{Hardheid} = 6,188 - 0,619 * \text{zwavel1} - 0,338 * \text{zwavel2} + 0,034 * \text{zwavel1} * \text{zwavel2}$$

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

Conclusies

- Zowel fijnkorrelig als grofkorrelig rookgasreinigingsresidu leiden tot een goed produkt.
- De hoeveelheid toegevoegde zwavel bepaalt de (fysische) kwaliteit van de gevormde zwavelblok.
- De toevoeging (van rookgasreinigingsresidu en vliegass) in de vorm van granulaat geeft een betere kwaliteit van het produkt (zwavelblok) dan de toevoeging in de vorm van poeder (gedroogd en vormalen uitgangsmateriaal).
- Indien rookgasreinigingsresidu en vliegass als poedervormig materiaal toegepast wordt is het minimale zwavelgehalte 60% (op basis van het totaalgewicht) en indien ze als granulaten worden toegevoegd kan de hoeveelheid zwavel worden teruggebracht tot ca. 30 à 40%.

2.4 Invloed van zwavel op de sterkte van het granulaat

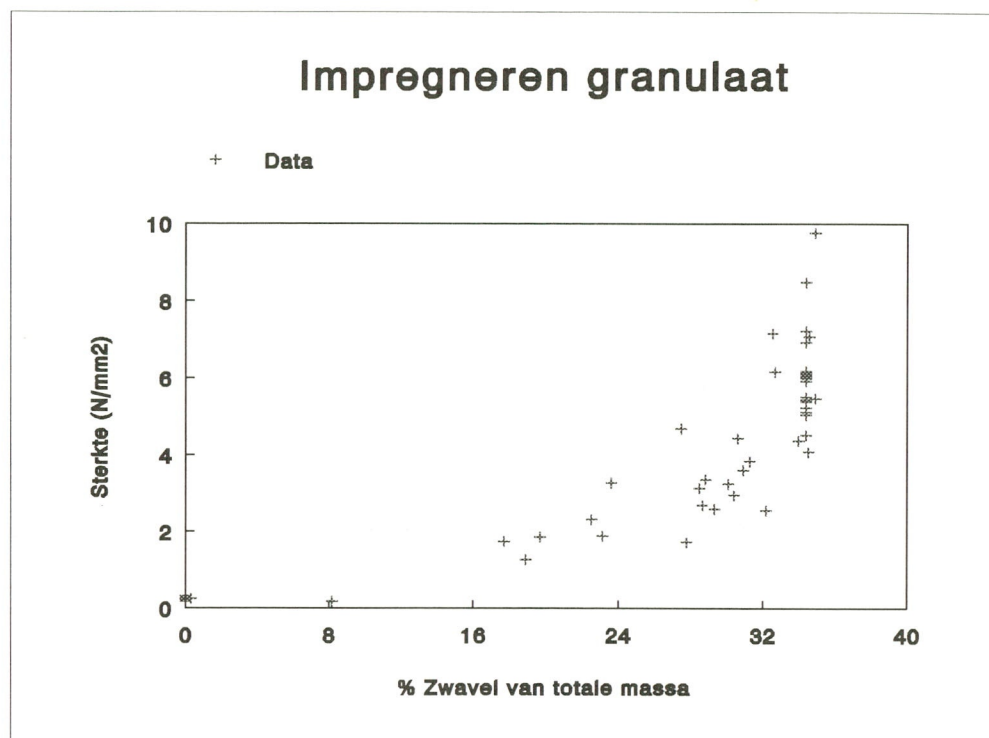
De sterkte van de korrels is bepaald met behulp van een hydraulische pers, via een krachtopnemer aangesloten op een voltmeter, die de piekwaarde vasthoudt. De maximale sterkte wordt bepaald door de druk te verhogen totdat de korrel vervorming begint te vertonen zoals: breuk, scheuren of afknappen van een dun laagje. Via een omrekeningstabel kan de gemeten waarde in Volt omgerekend worden naar kgf (kg force). De druksterkte is gepresenteerd in N/mm^2 .

In de figuren 1 en 2 is de sterkte als functie van het zwavelgehalte weergegeven. In figuur 1 is de sterkte van de korrel uitgezet als functie van de fractie toegevoegde zwavel. Het zwavelgehalte werd gevarieerd van 0 tot maximaal 34,4%. In figuur 2 is de diameter van de korrels uitgezet tegen de sterkte van de korrels (bij een zwavelgehalte van ca. 34%). De sterkte van de korrels zonder zwavel was gemiddeld ongeveer $0,3 \text{ N/mm}^2$. De sterkte van de korrels die wel met zwavel geïmpregneerd waren was gemiddeld ongeveer 6 N/mm^2 . Ten opzichte van de korrels **zonder** zwavel is de sterkte dus een factor 20 toegenomen. De korrels met een grotere diameter zijn iets minder sterk.

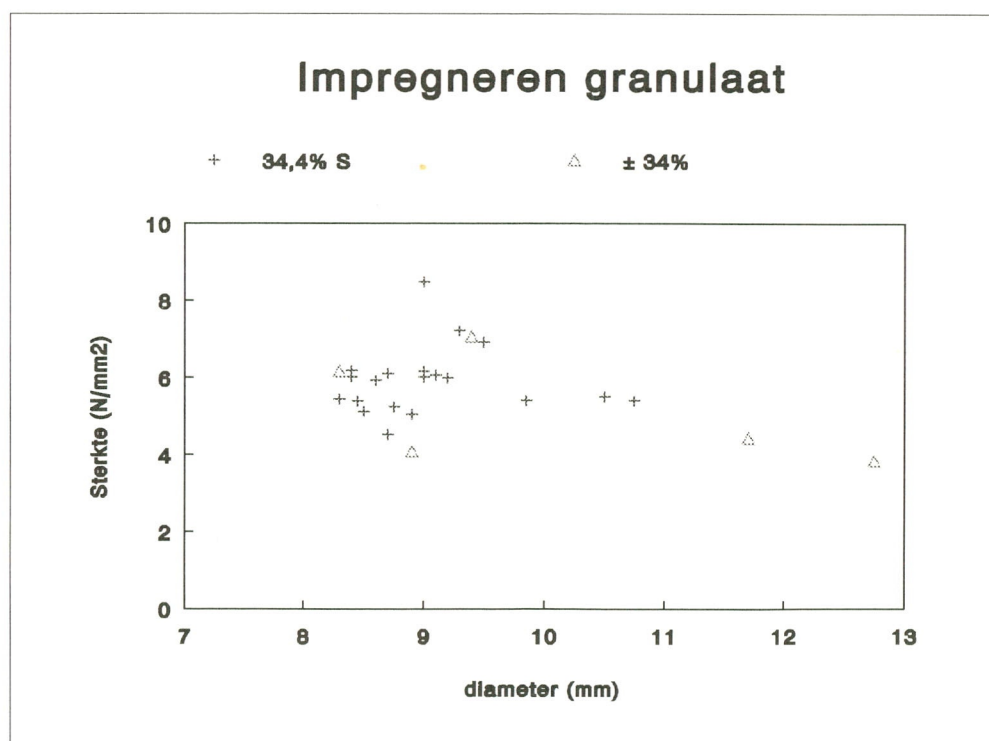
Conclusies

- Een goede sterkte van de granulaten wordt gerealiseerd bij een zwavelgehalte van ca. 34%. Door aan de korrels zwavel toe te voegen neemt de sterkte een factor 20 toe.

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma



Figuur 1 Resultaten zwavel-immobilisatie

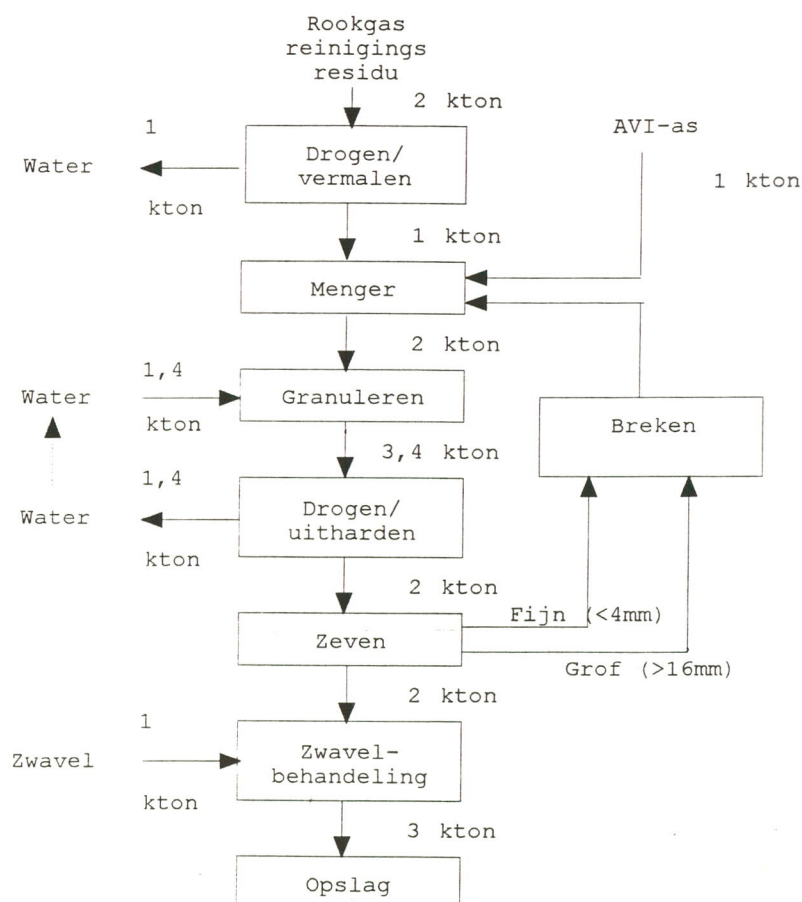


Figuur 2 Resultaten zwavel-immobilisatie

*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

2.5 De uitvoeringsvorm van het proces (procesbeschrijving)

Rookgasreinigingsresidu wordt eerst gedroogd, gemalen en gemengd met AVI vliegas, dat reeds als droog poeder aangeleverd wordt. Met dit mengsel vliegas-rookgasreinigingsresidu worden vervolgens op een granuleerschotel de granulaten of korrels geproduceerd (standaardtechnologie). Voor een goede korrelopbouw is toevoeging van water noodzakelijk. Een chemische binding tussen silicaten en aluminaaten zorgt ervoor dat er een stevige korrel ontstaat. De korrels worden dan gedroogd waarbij de waterdamp naar de granuleerschotel zou kunnen worden teruggevoerd. De waterdampstroom wordt dan over het mengsel heen geleid. Door afkoeling van de waterdamp door aanraking met het relatief koude mengsel condenseert water. De condensatiewarmte wordt zo tevens benut voor opwarmen van het produkt. Na het drogen en uitharden van de korrels in een verwarmde tunnel worden te kleine (bijvoorbeeld kleiner dan 4 mm) en te grote fracties (bijvoorbeeld groter dan 16 mm) uitgezeefd en teruggevoerd naar de granuleerschotel. De korrels met een diameter tussen 4 en 16 mm worden vervolgens geïmpregneerd met zwavel en na afkoelen opgeslagen. De uitvoeringsvorm van het proces wordt geïllustreerd door middel van een processchema in figuur 3.



Figuur 3 Uitvoeringsvorm van het proces

3 Milieuhygiënische aspecten van het zwavelimmobilisatieproces

3.1 Milieuhygiënische aspecten

Ten aanzien van de milieuhygiënische aspecten zijn de volgende criteria van belang:

1. het uitlooggedrag van het immobilisaat:
Het uitlooggedrag van de met zwavel geïmpregneerde korrels is onderzocht met een beschikbaarheidsproef, een kolomproef en een diffusieproef. Daarnaast zijn vormgegeven immobilisaten (zwavelblokken) geproduceerd, uitgaande van granulaten om oppervlakte afspoeling bij uitloging te minimaliseren. Aan deze producten zijn beschikbaarheidstesten en diffusieproeven uitgevoerd. Op de resultaten van het uitloogonderzoek wordt ingegaan in § 3.2 en § 3.3.
2. het energieverbruik van het proces:
Er is energie nodig voor het drogen van het rookgasreinigingsresidu (1.400.000 KJ/ ton nat rookgasreinigingsresidu), voor het opwarmen van de vliegassen, het opwarmen en smelten van de zwavel, voor het opwarmen van gedroogd rookgasreinigingsresidu (110.000 KJ/ton nat rookgasreinigingsresidu) en de energiebehoefte van de apparatuur (54.000 KJ/ton nat rookgasreinigingsresidu). Voor de aannames en berekeningen wordt verwezen naar bijlage 4.

3.2 Onbehandeld granulaat versus zwavel-geïmpregneerd granulaat

Bereiding van het met zwavel-geïmpregneerd granulaat

Het onderzochte granulaat is aangemaakt met 50% vliegass en 50% rookgasreinigingsresidu. Het materiaal werd in de juiste verhouding opgemengd met water tot rul materiaal in een molen. Op een granuleerschotel werd vervolgens gegraneerd en de rest van het benodigde water toegevoegd. Na uitharden aan de lucht ontstond een granulaat met een diameter van ca. 1 cm. Het granulaat is vervolgens gedroogd en geïmpregneerd met zwavel (gedurende ca. 30 minuten). Met deze werkwijze blijkt circa 30% zwavel in de granulaten te worden opgenomen.

Milieuhygiënische beoordeling van het met zwavel-geïmpregneerd granulaat

Voor de milieuhygiënische beoordeling is op het **on**behandelde granulaat een beschikbaarheidsproef (volgens NEN 7341) en een diffusieproef uitgevoerd. Op de geïmpregneerde granulaat is een beschikbaarheidsproef (volgens NEN 7341), een verkorte kolomproef en een diffusieproef uitgevoerd.

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

De diffusieproef is ontworpen om het uitlooggedrag van produkten te bepalen die tenminste 40 mm zijn. De geïmpregneerde granulaten zijn echter kleiner dan deze voorgeschreven minimum grootte. De resultaten van de diffusieproef die uitgevoerd is aan de granulaten geven daarom geen uitsluitsel omtrent restricties voor verwerkingsmogelijkheden van het granulaat. De diffusieproef is hier alleen uitgevoerd om meer inzicht te verkrijgen in het *mechanisme* van het uitloggen van de met zwavel geïmpregneerde korrels. De resultaten van deze diffusieproef zijn in bijlage 5 beschreven.

Beschikbaarheidsproef

De beschikbaarheidsproef geeft aan wat de beschikbaarheid is voor uitloging van componenten uit het onderzochte materiaal. Bij de proef wordt het materiaal verkleind (95% passeert draadzeef van 125 µm) en in twee stappen wordt opgemengd met demiwater. Elke stap heeft een looptijd van 3 uur. Bij de eerste stap wordt de pH van het mengsel op 7 en bij de tweede stap op 4 gehouden door toevoeging van 1 mol/l salpeterzuur. De resultaten van deze beschikbaarheidsproeven zijn in verkorte vorm in tabel 1 weergegeven. De uitgebreide resultaten van de beschikbaarheidsproeven zijn in bijlage 6 en 7 weergegeven.

Tabel 1 Beschikbaarheden van componenten in het onbehandelde en het geïmpregneerde granulaat in mg/kg

Analyse componenten	Onbehandeld granulaat (in mg/kg)	Geïmpregneerd granulaat (in mg/kg)
Cl ⁻	40 000	31 000
F	4 400	3 100
SO ₄ ²⁻	200 000	170 000
Cd	350	250
Hg	37	< 0,21
Sr	90	62
Zn	23 000	16 000
Mo	< 0,12	< 0,10
Pb	280	19
Sb	40	49

Uit tabel 1 valt op dat de beschikbaarheid van alle componenten uit het granulaat in meer of mindere mate afneemt na behandeling met zwavel.

Opvallend is de zeer sterke afname van de beschikbaarheid van kwik. Het in de granulaten aanwezige kwik wordt door behandeling met zwavel waarschijnlijk omgezet in het vrijwel onoplosbare kwiksulfide. Ook de beschikbaarheid van Pb is beduidend minder na zwavelimpregnatie.

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

Kolomproef

Bij de kolomproef wordt het materiaal onderzocht op uitloging van componenten als functie van de tijd. Daartoe wordt een kolom gevuld met het te onderzoeken materiaal (in dit geval geïmpregneerde korrels). Door de kolom wordt demiwater gepompt dat op pH = 4 gebracht is (met salpeterzuur). Het debiet door de kolom is afhankelijk van het stortgewicht. De eluatens worden opgevangen aan de hand van verhouding vloeistof - vaste stof (= L/S). Voor de kolomproef werd het granulaat gebroken tot 95% < 4 mm. Er is tijdens de kolomproef slechts één eluaat opgevangen (in tegenstelling tot wat de NEN 7343 voorschrijft) bij L/S = 1, omdat deze waarde slechts nodig is voor het bepalen van het stortregime. Het belangrijkste resultaat van de kolomproef is in tabel 2 weergegeven. In de tabel zijn tevens de grenswaarden voor storten weergegeven [7]. De uitgebreide resultaten van de kolomproef zijn in bijlage 8 weergegeven.

Tabel 2 Uitloging bij L/S = 1 van componenten uit de geïmpregneerde granulaat in mg/kg bepaald met de kolomproef

Analyse componenten	Geïmpregneerd granulaat (mg/kg)	U0 norm (mg/kg)	U1 norm (mg/kg)
Cl ⁻	23 000	50 000	50 000
F ⁻	3,1	25	28
SO ₄ ²⁻	2 500	80 000	80 000
Cd	56	0,065	0,2
Hg	< 0,002	0,1	0,1
Sr	2,4	1	5
Zn	88	10	40

waarin: U0 = de grenswaarde C3/IBC.
 U1 = de grenswaarde C2/C3.

Op basis van vergelijking met de grenswaarden voor het stortregime mag het geïmpregneerde granulaat niet op een C₃-deponie gestort worden. De uitloging van cadmium en zink is namelijk te hoog. De andere gemeten componenten voldoen wel aan de U1 norm.

3.3 Zwavelblokken (vormgegeven immobilisaat)

Het met zwavel impregneren van granulaten bleek niet tot een voldoende mate van immobilisatie van de verontreinigingen te leiden om het immobilisaat op een C₃-deponie te mogen storten. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door **oppervlakte**-afspoeling van een aantal elementen dat als zout aanwezig is (zie resultaten van de diffusieproef in bijlage 5). Het ligt daarom voor de hand niet uit te gaan van granulaten die een relatief groot oppervlak hebben, maar van grotere produkten (blokken). Hierdoor wordt tevens gebruik gemaakt van de gunstige fysische retardatie die door de zwavel veroorzaakt (zie bijlage 5) wordt.

*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

Bereiding van het met zwavelblokken

Het inbedden van de afvalstoffen in zwavel waardoor zwavel**blokken** ontstaan lijkt daarom een goede optie, ware het niet dat hiervoor ca. 60% zwavel toegevoegd dient te worden met als nadeel een te sterke volume- en gewichtstoename. Er is daarom gekozen voor een tussenoplossing, waarbij (niet geïmpregneerde) granulaten worden gebruikt als basis en de ruimten tussen de granulaten zo ver als mogelijk opgevuld worden met AVI-vliegas of AVI-rookgasreinigingsresidu en dan zwavel wordt toegevoegd. Het blijkt dat op deze manier circa 45% zwavel nodig is om een voldoende hard materiaal te verkrijgen. De granulaten die voor de productie van de zwavelblokken zijn gebruikt bestonden uit 50% AVI-vliegas en 50% rookgasreinigingsresidu. Een tweetal zwavelblokken werd geproduceerd zoals vermeld in tabel 3.

Tabel 3 Samenstelling van de twee geproduceerde zwavelblokken

Zwavelblok	Samenstelling
I	44,3% zwavel 38,6% rookgasreinigingsresidu 17,2% AVI-vliegas
II	48,5% zwavel 18,2% rookgasreinigingsresidu 33,3% AVI-vliegas

Milieuhygiënische beoordeling van de zwavelblokken

De zwavelblokken zijn onderworpen aan een beschikbaarheidsproef (NEN 7341) en een diffusieproef (NEN 7345) voor het bepalen van het uitlooggedrag (de diffusieproef is ontworpen voor materialen groter dan 40 mm). Met de resultaten van de diffusieproef kan getoetst worden aan het ontwerp Bouwstoffen Besluit en zodoende kan inzicht verkregen worden in de toepasbaarheid van het produkt. De beschikbaarheidsproef geeft aan wat de beschikbaarheid is voor uitloging op de lange termijn en is uitgevoerd om de resultaten van de diffusieproef te kunnen interpreteren.

De beschikbaarheid van de immobilisaten, waarbij *rookgasreinigingsresidu* als vulstof is toegevoegd, is weergegeven in tabel 4. Duidelijk is te zien dat de beschikbaarheid van zink, cadmium en chloride sterk afneemt, maar van molybdeen toeneemt. Deze toename zal waarschijnlijk veroorzaakt worden door het molybdeen dat aanwezig is in het extra toegevoegde rookgasreinigingsresidu.

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

Tabel 4 Beschikbaarheidsproef aan zwavelimmobilisaat met granulaat en rookgasreinigingsresidu

Analyse componenten	Onbehandeld granulaat [mg/kg]	Zwavelgeïmpregneerd granulaat [mg/kg]	Vormgegeven immobilisaat extra rookgas-reinigingsresidu [mg/kg]
Zn	23 000	16 000	8 700
Cd	350	350	130
Mo	< 0,12	< 0,10	2,4
Cl	40 000	31 000	20 000

De beschikbaarheid van de immobilisaten, waarbij *AVI-vliegas* als vulstof is toegevoegd, is weergegeven in tabel 5. Ook hier geldt dat de beschikbaarheid van de elementen zink, cadmium en chloride is afgenomen. Echter, de beschikbaarheid van molybdeen is ook hier toegenomen.

Tabel 5 Beschikbaarheidsproef aan zwavelimmobilisaat met granulaat en AVI-vliegas

Analyse componenten	Onbehandeld granulaat [mg/kg]	Zwavelgeïmpregneerd granulaat [mg/kg]	Vormgegeven immobilisaat extra AVI-vliegas [mg/kg]
Zn	23 000	16 000	14 000
Cd	350	350	190
Mo	< 0,12	< 0,10	0,63
Cl	40 000	31 000	33 000

Diffusieproef

De gehele diffusieproef is uitgevoerd waarbij een viertal elementen is geanalyseerd. Uit deze gegevens komt duidelijk naar voren dat een nuttige toepassing van het immobilisaat volgens de aangegeven recepturen niet haalbaar is. Vergelijking van deze resultaten met de resultaten van de diffusieproef aan zwavel-geïmpregneerde granulaten laat zien dat de hoeveelheid chloride, cadmium en molybdeen wel is afgenomen.

Als we aannemen dat de relatieve afname (uitlooggedrag van zwavelblokken ten opzichte van zwavel-geïmpregneerde granulaten) bij de diffusieproeven een zelfde relatieve afname van de uitlooggegevens gemeten bij de kolomproeven laat zien, blijkt het uitlooggedrag van de zwavelblokken nog steeds niet voldoende voor het storten van het immobilisaat op een C₃-deponie (dit is een **ruwe** inschatting van het uitlooggedrag volgens de kolomproef).

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

Tabel 6 Resultaten van diffusieproef van de twee soorten immobilisaten

Analyse component		pDe (negatieve logaritme van de Diffusie- coëfficiënt) [-logm ² /sec]	Chemische retardatie (Retentie- factor) (-)	Gemeten ¹⁾ cumulatieve belasting na 64 dagen (mg/m ²)	Cat1A ²⁾ (mg/m ²)	Cat1B ²⁾ en Cat2 (mg/m ²)
Cl-	granulaat met vliegass	12,1	1	190 000	18 000	54 000
	granulaat met rookgas- reinigingsresidu	12	1	160 000		
Cd	granulaat met vliegass	13,3 ¹⁾	5,3 ¹⁾	270 ¹⁾	1,1	3,8
	granulaat met rgr	13,5	11	180		
Zn	granulaat met vliegass	15,1	360	2 400	200	670
	granulaat met rgr	14,3 ¹⁾	68 ¹⁾	4 900 ¹⁾		
Mo	granulaat met vliegass	12,2	0,6	3,3	14	48
	granulaat met rgr	13,1 ¹⁾	6,7 ¹⁾	5,2 ¹⁾		

¹⁾ Alle cursief weergegeven waarden zijn geschatte waarden

²⁾ Cat1 = Bouwmaterialen die geen van de samenstellingswaarden overschrijden en op zodanige wijze worden gebruikt dat, ook indien geen isolatiemaatregelen worden genomen, geen van de toegelaten immissies worden overschreden.

Cat2 = Bouwmaterialen die geen van de samenstellingswaarden overschrijden en op zodanige wijze worden gebruikt dat, slechts indien isolatiemaatregelen worden genomen, geen van de toegelaten immissies worden overschreden.

A = Vrijwel continu vochtige toepassing.

B = Periodiek vochtige toepassing tengevolge van atmosferische omstandigheden.

4 Economische aspecten van het zwavelimmobilisatieproces

Om een indruk te krijgen van de economische aspecten van het zwavelimmobilisatieproces is een globale kostenschatting gemaakt van het proces waarbij de volgende uitgangspunten zijn genomen:

- verwerking van 10.000 ton rookgasreinigingsresidu per jaar;
- immobilisatie in de vorm van een granulaat;
- verhouding rookgasreinigingsresidu: vliegass: zwavel = 1:1:1.

In bijlage 11 zijn de totale jaarlijkse kosten en de kostprijs per ton gegeven in een jaar van volledige productie.

Investeringen

Voorlopig is de investering in apparatuur voor de verwerking van 10 kton/jaar rookgasreinigingsresidu geschat op f 1.000.000,= (directe kosten). Naast de directe kosten voor de installatie is er sprake van projectmanagement en engineering kosten. Voor deze indirecte kosten is de directe investering verhoogd met een opslag van 25% voor management en 15% voor engineering.

Bij de berekening van de verwerkingskosten per ton rookgasreinigingsresidu is uitgegaan van kapitaalskosten van 20% van de investering. Hierbij is uitgegaan van een afschrijving in 15 jaar, een rentepercentage van 10% en een fiscale afschrijving van 10 jaar bij een belastingpercentage van 50%. De kapitaallasten bedragen ca. f 30,= per ton nat rookgasreinigingsresidu.

Energiekosten

De energiekosten zijn in hoofdstuk 3 besproken. Deze bedragen naar schatting circa f 75,= per ton nat rookgasreinigingsresidu. Met name de kosten voor het drogen van het rookgasreinigingsresidu zijn hoog (f 68,=/ton nat rookgasreinigingsresidu).

Personele kosten

Bij het ontwerp is uitgegaan van vier ploegen met een bezetting van 2 operators en 0,5 ploegchef. Het gemiddeld salaris bedraagt f 70.000,= inclusief vakantietoeslag/sociale lasten.

Toeslagstoffen

Elementaire zwavel dient toegevoegd te worden in orde van grootte van 50% ten opzichte van te verwerken (nat) rookgasreinigingsresidu. Dat betekent dat per ton te verwerken (nat) rookgasreinigingsresidu circa $(0,5 \text{ ton} \times f 40,=/\text{ton} =)$

*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

f 20,= aan zwavel uitgegeven wordt. Mogelijk is echter de (afval)zwavel tegen transportkosten te verkrijgen.

De totale verwerkingskosten (inclusief drogen van het rookgasreinigingsresidu) worden geschat op f 200,= per ton (nat) rookgasreinigingsresidu, waarvan f 68,= voor het drogen.

5 Conclusies

Met betrekking tot technische aspecten bij de productie van granulaten:

- Voor een goede granulaatvorming (dat wil zeggen een goede sterkte) is de toevoeging van een fractie vliegassan het rookgasreinigingsresidu noodzakelijk.
- Voor een goede granulaatvorming (dat wil zeggen een goede sterkte) is het droge stofgehalte van het uitgangsmateriaal zeer belangrijk. Bij een droge stofgehalte van 85% of meer worden goede granulaten verkregen.
- Bij het toevoegen van gedroogd en vormalen rookgasreinigingsresidu kan met een verhouding van vliegass:rookgasreinigingsresidu = 1:3 een goed en hard granulaat worden verkregen.
- Granulaten gedroogd bij een temperatuur van 40 °C zijn aanzienlijk sterker dan die gedroogd zijn bij kamertemperatuur.
- Een goede sterkte van de granulaten wordt gerealiseerd bij een zwavelgehalte van ca. 34%. Door aan de korrels zwavel toe te voegen neemt de druksterkte een factor 20 toe.

Met betrekking tot technische aspecten bij de productie van zwavelblokken:

- Zowel fijnkorrelig als grofkorrelig rookgasreinigingsresidu leiden tot een goed produkt
- De hoeveelheid toegevoegde zwavel bepaalt grotendeels de (fysische) kwaliteit van de zwavelblokken.
- De toevoeging van rookgasreinigingsresidu en vliegass in de vorm van granulaat geeft een betere kwaliteit van het produkt (zwavelblok) dan de toevoeging in de vorm van poeder (gedroogd en vormalen uitgangsmateriaal).
- Indien rookgasreinigingsresidu en vliegass als poedervormig materiaal toegepast wordt, is het minimale zwavelgehalte 60% (op basis van het totaalgewicht) en indien ze als granulaten worden toegevoegd kan de hoeveelheid zwavel worden teruggebracht tot ca. 30 à 40%.

Met betrekking tot milieuhygiënische aspecten van zwavel-geïmpregneerde granulaten:

- De beschikbaarheid van alle gemeten componenten neemt af indien de granulaten geïmpregneerd worden met zwavel. De beschikbaarheid van kwik en lood neemt zelfs sterk af. Dit impliceert dat de componenten chemisch gebonden worden.
- De verkorte kolomproef geeft aan dat het gevormde granulaat geïmpregneerd met zwavel niet gestort mag worden op een C₃-deponie doordat cadmium en zink te veel uitlogen. De andere componenten voldoen wel aan de U1 norm.
- De fysische retardatie (of tortuositeit) neemt na behandelen met zwavel met een factor 50 toe.

Met betrekking tot milieuhygiënische aspecten van zwavelblokken:

- Het immobiliseren van granulaten in zwavelblokken, waarbij de ruimte tussen de granulaten opgevuld wordt met respectievelijk AVI-rookgasreinigingsresidu of AVI-vliegass, blijkt onvoldoende vermindering van uitloging op te leveren met betrekking tot chloride, cadmium, zink en molybdeen om storten op C₃-deponie mogelijk te maken.

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

Met betrekking tot economische aspecten:

- De in de markt aangeleverde hoeveelheid elementaire zwavel is ruim voldoende voor toepassing in een zwavelimmobilisatieproces. De kosten voor zwavel bedragen momenteel US\$ 15 - 20 per ton (f 25 - 40,= per ton).
- De totale verwerkingskosten worden geschat op f 200,= per ton (nat) rookgasreinigingsresidu (inclusief de kosten van het drogen van het rookgasreinigingsresidu à f 68,= per ton).

6 Aanbevelingen

Het immobiliseren van de uitloogbare componenten

Bij koude immobilisatieprocessen op basis van cementachtige materialen worden additieven ingezet om groepen van zware metalen te binden in de matrix. De additieven die bij deze cementachtige immobilisatie gebruikt worden voor het vastleggen van cadmium en zink zouden ook ingezet kunnen worden bij de zwavelimmobilisatie om zo een beter stortregime te bewerkstelligen voor geïmpregneerde granulaten. De mogelijkheden voor immobilisatie van zouten zijn echter zeer beperkt.

Het mobiliseren van de uitloogbare componenten

Uit de resultaten van de diffusieproef blijkt dat oppervlakte afspoeling een belangrijk mechanisme is bij de uitloging van de verontreinigingen, die na de immobilisatiestap met zwavel te veel blijven uitlogen. In plaats van het immobiliseren van deze verontreinigingen kan gedacht worden aan het mobiliseren en verwijderen van genoemde componenten door middel van een wasproces. De granulaten blijven na de immobilisatie met zwavel intact, waardoor het wassen van granulaten gemakkelijker verloopt dan het direct wassen van de uitgangsstoffen. De metalen kunnen vervolgens bijvoorbeeld door middel van elektrolyse uit de ontstane zoutoplossing worden verwijderd.

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

7 Referenties

- [1] T 2000: een pijler voor het technologiebeleid van de afdeling VT, Alons & Partners, december 1991.
- [2] Werkrapport TNO/RIVM-activiteiten in het kader van het project T-2000, TNO-rapport 91-331.
- [3] Plan van aanpak behandeling AVI-vliegas, Vereniging van Afvalverwerkers, concept van 20/9/94.
- [4] Mulder, interne notitie, dec. 1993.
- [5] M.L.J.A. Wetsels, Shell, mondelinge mededelingen.
- [6] Sulphur, March-April 1994, no. 231, pg 5-8 en 11, British Sulphur Publishing, London.
- [7] Grenswaarden notitie, storten gevaarlijk afval, mei 1993.
- [8] Albers Th., Milieuhygiënische kwaliteit van primaire en secundaire bouwmaterialen in relatie tot hergebruik en bodembescherming, RIVM rapportnummer 771402006, 1994.
- [9] Reststoffen van afvalverbranding, VVAV.

*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

8 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever

AVIRA, Regio Arnhem
Rivierweg 20
Duiven

Namen en functies van de medewerkers

Mw. ir. M.M.C. Alkemade
M. Buitenhuis
Ing. G.J. Grootenboer
Ir. E. Mulder
Ing. R.K. Zijlstra

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed

—

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad
januari - december 1994

Ondertekening

Ir. J.I.A. Koene
onderzoekleider

Goedgekeurd door

Dr. ir. J.A. Zeevalkink
werkgroep leider

*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

Bijlage 1 Prijsindicatie van scheepsladingen elementaire zwavel en zwavelzuur [4]

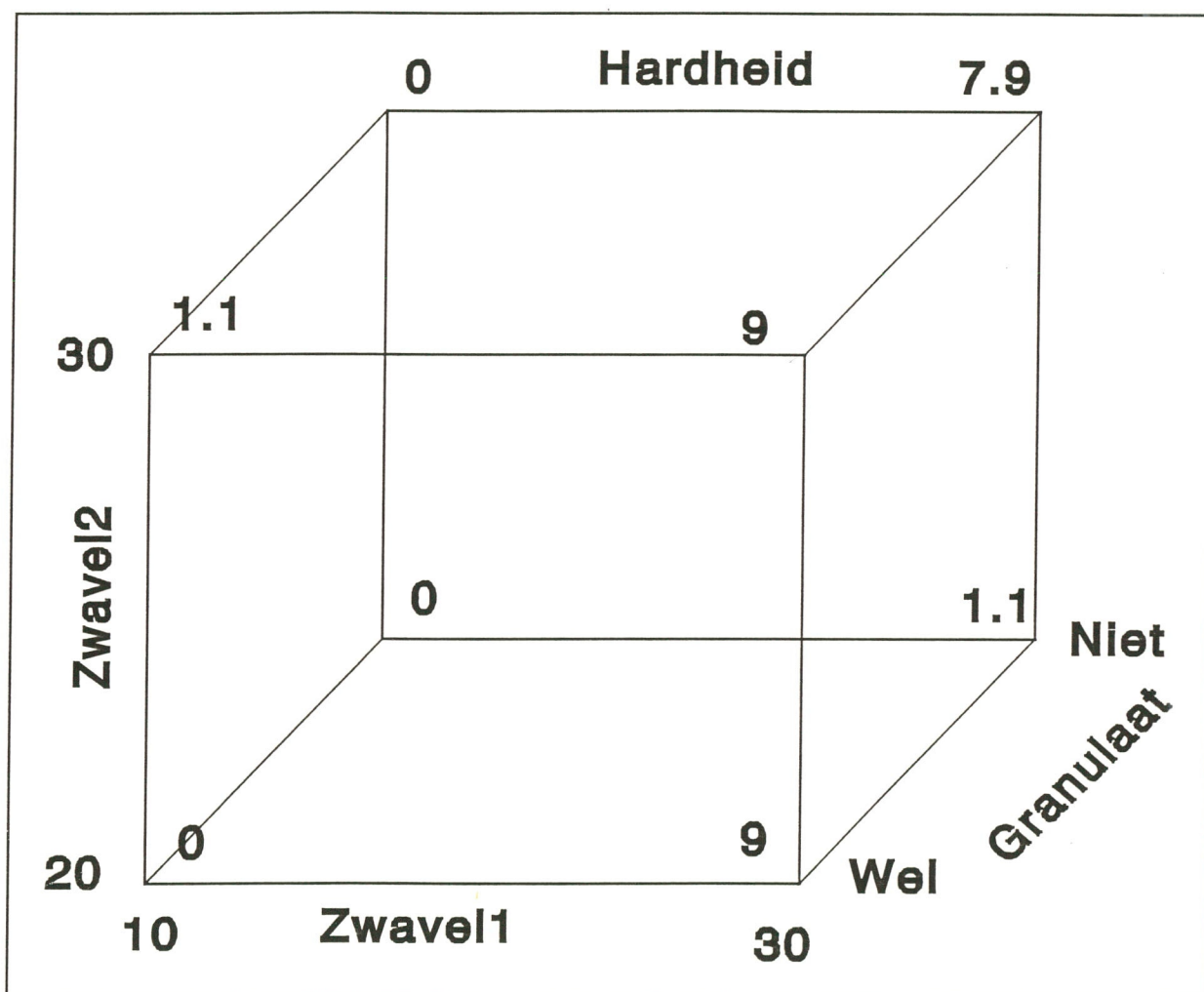
Representative freight rates for dry bulk sulphur and sulphuric acid⁽¹⁾			
Cargo	Route	Cargo size (tonnes)	Rate indication (\$/t)⁽²⁾
Sulphur	Szczecin to Sfax or Gabès	20,000	Early March 14-15
Sulphur	Vancouver or Long Beach to Ashdod	40-50,000 12,000/ 10,000	high 20s
Sulphur	Vancouver to Jorf Lasfar	55,000 12,000/ 7,500	12.25
Sulphur	Vancouver to Dakar	30-35,000 10,000/ 6,500	15
Sulphur	Los Angeles to Sfax or Gabès	30,000 8,000/ 2,500	21
Sulphur	US WC to EC India	30,000	mid-high 20s
Sulphur	Jubail to Morocco	30,000	13-14
Sulphur	Jubail to Turkey	20,000	17
Sulphur	Kharg Island to WC India	15,000	17
Sulphuric acid	Kristiansand, to Avonmouth	2,500	c. £12
Sulphuric acid	Helsingborg to S. Spain	4-5,000	22-23
Sulphuric acid	Rotterdam or UK to S. Spain	4,500	18
Sulphuric acid	Rotterdam to Venezuela	7-7,500	30-35

⁽¹⁾Spot and single voyage fixtures
⁽²⁾Rates in dollars per tonne unless otherwise specified

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

Bijlage 2 Schematische weergave van de uitkomsten van de parameterstudie bij de beoordeling van zwavelblokken

In de afbeelding geeft de combinatie van 'zwavel1' en 'zwavel2' het totale zwavelgehalte weer. De getallen 0, 1,1, 7,9 en 9 geven de berekende hardheid weer van het proefstuk op een schaal van 0 - 9. Deze schaal is arbitrair gekozen.



Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

Bijlage 3 Effect van de verhouding rookgasreinigingsresidu (droog)/vliegase op de sterkte van de granulaten

Tabel Sterkte van de geproduceerde granulaten uitgaande van verschillende verhoudingen vliegase-rookgasreinigingsresidu

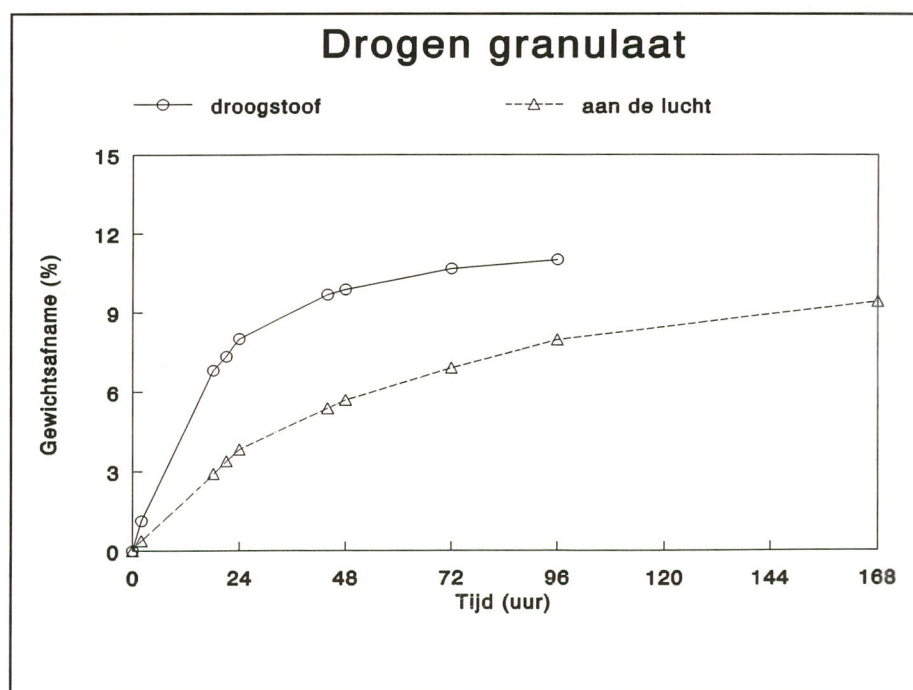
Verhouding AVI:RGR	AVI (g)	RGR (g)	Water ¹⁾ (g)	Water ²⁾ (g)	Gran (%H ₂ O)	Drogen (16 °C)	Drogen (40 °C)	Sterkte ³⁾ (16 °C)	Sterkte ³⁾ (40 °C)
1:1	1275,2	1516,2	209,0	521,7	27,6	16,4%	19,8%	+/+	++
1:1,5	1019,8	1819,0	169,0	609,6	29,4	14,3%	19,6%	-	+/+
1:2	850,3	2021,1	129,1	635,1	29,8	18,0%	20,4%	-	o
1:2,5	729,1	2166,1	105,1	602,3	29,2	21,4%	14,9%	o/+	o/+
1:3	638,0	2274,0	88,3	671,8	30,6	7,8%	26,8%	o	++
1,5:1	1530,1	1213,1	257,2	602,9	29,2	14,7%	21,1%	--	o
2:1	1700,0	1011,0	240,6	683,2	25,4	11,7%	23,4%	-	o
2,5:1	1821,0	866,0	241,5	574,0	23,3	11,9%	19,8%	+	++
3:1	1913,0	758,0	185,99	573,7	22,1	10,3%	20,9%	-	+/+

1) Toegevoegd voor aanmaken mengsel.

2) Toegevoegd tijdens granuleren.

3) -- = < 0,5 kg druk, - = 0,5 - 1,5 druk, o = 1,5 - 2,5 kg druk
 + = 2,5 - 3,5 kg druk en ++ = > 3,5 kg druk.

Het verloop van de droging bij kamertemperatuur en bij 40 °C.



Bijlage 4 Berekening van het energieverbruik van het zwavelimmobilisatieproces

Voor de volgende procesonderdelen ('unit-operations') is energie vereist:

1. het drogen van het rookgasreinigingsresidu;
2. het opwarmen van de vliegassen;
3. het smelten van de zwavel;
4. het opwarmen van vliegass, droog rookgasreinigingsresidu en zwavel;
5. de energiebehoefte van de apparatuur.

De berekeningen zijn gebaseerd op de aannames, zoals vermeld in tabel 4.1.

Tabel 4.1 Aannames voor de berekeningen

Soortelijke warmte (C_p) voor water	4,2	KJ/kg.K
Soortelijke warmte (C_p) voor zwavel	0,7	KJ/kg.K
Soortelijke warmte (C_p) voor vliegass	0,9	KJ/kg.K
Soortelijke warmte (C_p) voor droog rookgasreinigingsresidu	0,9	KJ/kg.K
Verdampingswarmte voor water	2256	KJ/kg
Smeltwarmte voor zwavel	62,3	KJ/kg
Verhouding:		
vliegass : rookgasreinigingsresidu(nat) : zwavel = 1:1:1		
droge stof gehalte 500 kg/ton rookgasreinigingsresidu		

Voor de volgende procesonderdelen ('unit-operations') is energie vereist.

Per ton (nat) rookgasreinigingsresidu is nodig:

- | | |
|---|--------------|
| 1. het drogen van het rookgasreinigingsresidu: | 1.346.750 KJ |
| 2. het opwarmen van de vliegassen | 38.250 KJ |
| 3. het smelten van de zwavel, het opwarmen van vliegass,
droog rookgasreinigingsresidu en zwavel | 68.650 KJ |
| 4. de energiebehoefte van de apparatuur (25 kW) $\approx$ | 54.000 KJ |

Voor het verwerken van 1 ton (nat) rookgasreinigingsresidu is nodig:

1. Opwarmen van het water, verdampen van het water en opwarmen van rookgasreinigingsresidu van 15 tot 100 °C:
 $\{500 \text{ (kg)} \times 4,2 \text{ (KJ/kg.K)} \times 85 \text{ (K)}\} + \{500 \text{ (kg)} \times 2256 \text{ (KJ/kg)}\} + \{500 \text{ (kg)} \times 0,9 \text{ (KJ/kg.K)} \times 85 \text{ (K)}\} = 1.346.750 \text{ KJ}$
2. Opwarmen van vliegass $\{500 \text{ (kg)} \times 0,9 \text{ (KJ/kg.K)} \times 85 \text{ (K)}\} = 38.250 \text{ KJ}$
3. 4. Smelten zwavel + verwarmen van de zwavel (van 100 tot 130°C) + verwarmen van de vliegass/rookgasreinigingsresidu-mengsel (van 100 tot 130°C): $\{500 \text{ (kg)} \times 62,3 \text{ (KJ/kg)}\} + \{500 \text{ (kg)} \times 0,7 \text{ (KJ/kg.K)} \times 30 \text{ (K)}\} + \{1000 \text{ (kg)} \times 0,9 \text{ (KJ/kg.K)} \times 30 \text{ (K)}\} = 68.650 \text{ KJ}$
5. Energieverbruik apparatuur 25 kW $\approx 54.000 \text{ KJ}$
 $\{(25 \text{ KJ/sec} \times 3600 \text{ sec/hr} \times 5000 \text{ hr/jaar}) / 11000 \text{ ton nat rookgasreinigingsresidu/jaar}\}.$

Bijlage 5 Diffusieproef (volgens NEN 7345)

De diffusieproef is ontworpen om het uitlooggedrag van produkten te bepalen die tenminste 40 mm zijn. De geïmpregneerde granulaten zijn echter kleiner dan deze voorgeschreven minimum grootte. De resultaten van de diffusieproef die uitgevoerd is aan de granulaten geven daarom geen uitsluitel omtrent restricties voor verwerkingsmogelijkheden van het granulaat. De diffusieproef is hier uitgevoerd om meer inzicht te verkrijgen in het *mechanisme* van het uitlogen van de met zwavel geïmpregneerde korrels. De resultaten van de aangepaste diffusieproef zijn hier beschreven.

De diffusieproef is uitgevoerd aan de hand van het voorschrift uit de NEN 7345. Voorafgaande aan de proef, zijn de massa en de afmetingen van de produkten bepaald. Daarna zijn de produkten geplaatst in een hoeveelheid demiwater (gelijk aan vijf maal de massa van het produkt) dat vooraf met salpeterzuur was aangezuurd tot pH = 4. Dit aangezuurde demiwater wordt zeven maal ververst, op vooraf vastgestelde tijdstippen (0,25, 1, 2,25, 4, 9, 16, en 36 dagen). De test wordt gestopt op 64 dagen na inzet. De afgetapte uitloogvloeistoffen worden afgefilterd over een 0,45 µm membraanfilter. Nadat de pH en de geleidbaarheid in de filtraten zijn gemeten, worden de monsters gesplitst. Eén van de gesplitste monsters wordt aangezuurd tot pH = 2 met salpeterzuur en geanalyseerd op de metalen, het andere afgesplitste monster word als zodanig geanalyseerd op de anionen.

De resultaten van de diffusieproef zijn in tabel 5.1 verkort weergegeven. Tevens is in de tabel de maximaal toelaatbare emissies voor vormgegeven bouwmaterialen weergegeven [8]. De uitgebreide resultaten van de diffusieproeven zijn in bijlage 9 en 10 weergegeven.

Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma

Tabel 5.1 Diffusieproefberekeningen van de componenten in de twee series

Analyse component		pDe (negatieve logaritme van de Diffusie- coëfficiënt) [-logm ² /sec]	Chemische retardatie (Retentie- factor) (-)	Gemeten ¹⁾ Cumulatieve belasting na 64 dagen (mg/m ²)	Cat1A ²⁾ (mg/m ²)	Cat1B ²⁾ en Cat2 (mg/m ²)
Cl ⁻	Onbehandeld granulaat	-	-	410 000	18 000	54 000
	Behandeld granulaat	-	-	410 000		
F ⁻	Onbehandeld granulaat	-	-	1 700	1 300	4 400
	Behandeld granulaat	13,7	120	1 300 (2 000)		
SO ₄ ²⁻	Onbehandeld granulaat	11,3	7400	760 000 (1 500 000)	27 000	80 000
	Behandeld granulaat	11,7	1 ³⁾	710 000 (1 100 000)		
Cd	Onbehandeld granulaat	-	-	87	1,1	3,8
	Behandeld granulaat	-	-	320		
Hg	Onbehandeld granulaat	-	-	36	0,4	1,4
	Behandeld granulaat	11,2	-	8,3 (2,5)		
Sr	Onbehandeld granulaat	-	-	380	-	-
	Behandeld granulaat	12	1,3	260 (300)		
Zn	Onbehandeld granulaat	-	-	50	200	670
	Behandeld granulaat	19,5	4 10 ⁸	1 300 (13)		
Mo	Onbehandeld granulaat	7,42	1	- (71)	14	48
	Behandeld granulaat	9	1	- (15)		
Sb	Onbehandeld granulaat	13,3	670 000	- (27)	3,7	12
	Behandeld granulaat	13,8	50 000	- (30)		

¹⁾ Tussen haakjes staan de berekende cumulatieve belasting na 64 dagen (mg/m²).

²⁾ Cat1 = Bouwmaterialen die geen van de samenstellingswaarden overschrijden en op zodanige wijze worden gebruikt dat, ook indien geen isolatiemaatregelen worden genomen, geen van de toegelaten immissies worden overschreden.

Cat2 = Bouwmaterialen die geen van de samenstellingswaarden overschrijden en op zodanige wijze worden gebruikt dat, slechts indien isolatiemaatregelen worden genomen, geen van de toegelaten immissies worden overschreden.

A = Vrijwel continu vochtige toepassing.

B = Periodiek vochtige toepassing tengevolge van atmosferische omstandigheden.

³⁾ De chemische retardatie (of retentiefactor) wordt bepaald aan de hand van de fysische retardatie (of tortuositeit). De fysische retardatie is bepaald op basis van sulfaat, waardoor er een 1 staat bij de chemische retardatie van sulfaat.

*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

In de tabel zijn de (-log van de) diffusiecoëfficiënten (pDe) weergegeven voor de componenten die een diffusie-gecontroleerde uitloging hebben. Indien de pDe groter is dan 12 heeft een component een lage mobiliteit. Bij een pDe tussen 10,5 en 12 heeft de component een gemiddelde mobiliteit.

Deze diffusiecoëfficiënten geven een overall beeld van de snelheid van uitlogen van een component. Deze snelheid van uitlogen wordt bepaald door drie onderscheidbare factoren, namelijk de beschikbaarheid, de tortuositeit en de retentie.

- De beschikbaarheid zegt iets over de fractie die potentieel uitloogbaar is.
- De tortuositeit (of fysische retardatie) zegt iets over de vertraging die een component ondervindt bij het transport door de fysische structuur van het produkt, ten opzichte van het vrije transport in water. De tortuositeit zegt dus iets over de structuur van het produkt, en is dus een produktgebonden constante.
- De retentie (of chemische retardatie) zegt iets over de vertraging die de uitloging van een component ondervindt door chemische interactie van de component met de vaste-stof matrix. De retentie is dus component-afhankelijk.

De resultaten van de diffusieproef geven aanleiding tot de volgende opmerkingen:

- Twee van de geanalyseerde componenten van het onbehandelde granulaat geven een diffusie-gecontroleerde uitloging; molybdeen en antimoon.
Bij de andere componenten van het onbehandelde granulaat is geen diffusie-gecontroleerde uitloging vastgesteld. Er treedt waarschijnlijk snel uitputting op door oppervlakte-afspoeling van de eerste fractie.
Ook het geïmpregneerde granulaat heeft slechts voor enkele componenten een diffusie-gecontroleerde uitloging. Hier lijkt eveneens dat oppervlakte-afspoeling een rol speelt.
- Uit de tabel valt op te maken dat de uitloging uit geïmpregneerd granulaat van fluoride, sulfaat, kwik, strontium, molybdeen en antimoon lager is dan van onbehandeld granulaat. Cadmium en zink logen zelfs meer bij geïmpregneerde granulaten dan bij onbehandelde granulaten. Deze twee componenten bleken ook bij de kolomproef de meest kritische verontreinigingen.
- Voor de meeste componenten bleek het niet mogelijk om een chemische retardatie te bepalen. Om deze reden lijkt het niet zinvol een uitspraak te doen over de chemische binding van de componenten in zwavelgeïmpregneerde granulaten ten opzichte van onbehandelde granulaten.
- De fysische retardatie is voor geïmpregneerd granulaat 1,01; voor onbehandeld granulaat is de fysische retardatie 0,03. Op grond van deze waarden kan geconcludeerd worden dat de componenten fysisch gehinderd worden tijdens de uitloging.

*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

**Bijlage 6 Resultaten beschikbaarheidsproef :
onbehandeld granulaat**

Berekeningen voor de beschikbaarheidsproef volgens NEN7341

Gegevens produkt:	Projectnummer:	25082
	Bladnummer MEL-FU-001:	39
Naam produkt:	Datum verwerking:	4-08-94
MEL/94/1812	Filenaam:	BESB0039
Onbehandeld granulaat	Monstercodes vloeistoffen:	
Vochtgehalte bij 105 C	aangezuurd:	MEL/ 94/2024
13,17 %	niet-aangezuurd:	MEL/ 94/2025
Meetgegevens beschikbaarheidstest:		

Ingewogen vaste stof:	16 g
Toegev. demi-water 1e stap:	800 ml
Toegevoegd zuur 1e stap:	8,63 ml
Toegevoegd zuur 2e stap:	43,06 ml

L/S-verhouding: 119 l/kg

pH na 1 minuut:	8,90
pH na 10 minuten:	9,16

ZuurNeutraliserendVermogen: 3,72 mol/kg

Gemeten concentraties in extract, in µg/l:	Beschikbaarheid in mg/kg droge stof:
Cd 2960 µg/l	Cd 350 mg/kg
Hg 310 µg/l	Hg 37 mg/kg
Sr 760 µg/l	Sr 90 mg/kg
Zn 196000 µg/l	Zn 23000 mg/kg
Mo < 1 µg/l	Mo < 0,12 mg/kg
Pb 2330 µg/l	Pb 280 mg/kg
Sb 340 µg/l	Sb 40 mg/kg
Cl 340000 µg/l	Cl 40000 mg/kg
F 37000 µg/l	F 4400 mg/kg
SO4 1710000 µg/l	SO4 200000 mg/kg

*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

**Bijlage 7 Resultaten beschikbaarheidsproef :
geïmpregneerd granulaat**

Berekeningen voor de beschikbaarheidsproef volgens NEN7341

Gegevens produkt:	Projectnummer:	25082
	Bladnummer MEL-FU-001:	40
Naam produkt: MEL/94/2023	Datum verwerking:	4-08-94
Geïmpregneerd granulaat	Filenaam:	BESB0040
Vochtgehalte bij 105 C 0 %	Monstercodes vloeistoffen:	
	aangezuurd:	MEL/94/2026
Meetgegevens beschikbaarheidstest:	niet-aangezuurd:	MEL/94/2027

Ingewogen vaste stof:	16 g
Toegev. demi-water 1e stap:	800 ml
Toegevoegd zuur 1e stap:	5,029 ml
Toegevoegd zuur 2e stap:	43,45 ml

L/S-verhouding: 103 l/kg

pH na 1 minuut:	7,80
pH na 10 minuten:	7,99

ZuurNeutraliserendVermogen: 3,03 mol/kg

Gemeten concentraties in extract, in µg/l:	Beschikbaarheid in mg/kg droge stof:
Cd 2380 µg/l	Cd 250 mg/kg
Hg < 2 µg/l	Hg < 0,21 mg/kg
Sr 600 µg/l	Sr 62 mg/kg
Zn 156000 µg/l	Zn 16000 mg/kg
Mo < 1 µg/l	Mo < 0,10 mg/kg
Pb 184 µg/l	Pb 19 mg/kg
Sb 480 µg/l	Sb 49 mg/kg
Cl 305000 µg/l	Cl 31000 mg/kg
F 30000 µg/l	F 3100 mg/kg
SO4 1670000 µg/l	SO4 170000 mg/kg

*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

Bijlage 8 Resultaten (verkorte) kolomproef : geïmpregneerd granulaat

Berekeningen voor de kolom-
proef volgens NEN 7343

Datum print

13-Sep-94

monster MEL/94/1863

Projectnummer: 25082

Bladnummer MEL-FU-003: 6

omschrijving Behandeld granulaat
herkomst TNO

Datum verwerking: 14-jul-94

Filenaam: KOLB0006

file beschikbaarheidspreef BESB0040

fractie	ml opgev. per stap	pH	Geleidbh. mS/cm	Temperatuur °C	ml gec HNO3 conservering
1	490	7,5	60	21	NA
2	NA	NA	NA	NA	NA
3	NA	NA	NA	NA	NA
4	NA	NA	NA	NA	NA
5	NA	NA	NA	NA	NA
6	NA	NA	NA	NA	NA
7	NA	NA	NA	NA	NA

Cd

Hg

Sr

Zn

Cl

F

concentraties (µg/l)

L/S	1	56000	< 2	2500	88000	23000000	3200
	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Uitloging (mg/kg)

L/S	1	57	< 0,002	2,5	89	24000	3,2
	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Uitloging cumulatief

L/S = 1 (in mg/kg)	57	< 0,002	2,5	89	24000	3,2
L/S = 10 (in mg/kg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
L/S = 1 (in %)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
L/S = 10 (in %)	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Gehalte (in mg/kg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Beschikbaarheid (in mg/kg)	250	< 0,21	62	16000	31000	3100
Beschikbaarheid (in %)	NA	NA	NA	NA	NA	NA



Berekeningen voor de kolon
proef volgens NEN 7343

Datum print

13-Sep-94

monster MEL/94/186

Projectnummer: 25082

Bladnummer MEL-FU-003: 6

omschrijving Behandeld
herkomst TNO

Datum verwerking: 14-jul-94

Filenaam: KOLB0006

nr beschikbaarheidspreef BESB0040

fractie	ml opgev. per stap	pH	Geleidbh. mS/cm	Temperatuur °C	ml gec HNO3 conservering
1	490	7,5	60	21	NA
2	NA	NA	NA	NA	NA
3	NA	NA	NA	NA	NA
4	NA	NA	NA	NA	NA
5	NA	NA	NA	NA	NA
6	NA	NA	NA	NA	NA
7	NA	NA	NA	NA	NA

SO4

concentraties (µg/l)

L/S	1	2500000					
	NA	NA					
	NA	NA					
	NA	NA					
	NA	NA					
	NA	NA					
	NA	NA					

Uitloging (mg/kg)

L/S	1	2600					
	NA	NA					
	NA	NA					
	NA	NA					
	NA	NA					
	NA	NA					

Uitloging cumulatief

L/S = 1 (in mg/kg)	2600					
L/S = 10 (in mg/kg)	NA					
L/S = 1 (in %)	NA					
L/S = 10 (in %)	NA					

Gehalte (in mg/kg)	NA					
Beschikbaarheid (in mg/kg)	170000					
Beschikbaarheid (in %)	NA					



*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

Bijlage 9 Resultaten diffusieproef : onbehandeld granulaat

Produkt: MEL/94/1589 Onbehandeld granulaat

herkomst en specificatie produkt
aard van het onderzocht produkt

Tijdstip in dagen	pH	geleidbaarheid d in mS/cm	Temperatuur in °C	conserverings middel: ml 5Mol/l HNO3
0,00				
0,26	8,51	10	21	NA
0,97	9,75	3	21	NA
2,21	9,82	2	21	1,37
3,99	9,97	2	21	1,42
8,99	10,2	2	21	1,82
15,97	7,33	2	21	NA
35,98	10,1	2	21	NA
63,96	9,7	2	21	1,03

Oppervlak:	0,0105 m ²
Massa :	0,1 kg
Dichtheid (dr.st.) :	1330 kg/m ³
Volume contactvst.:	0,837 liter
Projectnummer:	25082
Bladnummer MEL-FU-004:	8
Datum verwerking:	21-jul-1994
beschikbaarheidsproef	BESB0039

		Cl	F	SO4		Cd	Hg	Mo	Pb
Analyseresultaten in µg/l									
0,26 dagen		4400000	1400	1500000		1000	370	66	260
0,97 dagen		510000	2600	1000000		22	30	47	120
2,21 dagen		95000	2800	970000		13	13	53	80
3,99 dagen		19000	2700	1000000		10	8	60	13
8,99 dagen		14000	2900	1200000		10	15	71	14
15,97 dagen		7800	2400	1000000		10	2	NA	NA
35,98 dagen		8600	3200	1300000		10	2	NA	NA
63,96 dagen		6200	2800	1500000		10	2	NA	NA
onderste bepalingsgrens		100	100	500		10	2	3	2

Richtingscoëfficiënten en standaardafw.

Gehele traject:	richtingscoëff.	-1,04	0,12	0,17		-0,09	-0,64	NA	NA
	standaardafw.	0,19	0,06	0,06		0,04	0,18	NA	NA
Fracties 1 t/m 3:	richtingscoëff.	-1,26	0,86	0,30		-1,59	-1,09	0,39	-0,04
	standaardafw.	0,14	0,14	0,04		0,57	0,21	0,08	0,00
Fracties 3 t/m 6	richtingscoëff.	-1,06	0,02	0,14		-0,03	-0,61	NA	NA
	standaardafw.	0,27	0,07	0,10		0,11	0,47	NA	NA
Fracties 5 t/m 8	richtingscoëff.	-0,25	0,11	0,23		0,07	-0,80	NA	NA
	standaardafw.	0,05	0,03	0,09		0,13	0,49	NA	NA
Fracties 2 t/m 5	richtingscoëff.	-1,52	0,22	0,25		-0,17	-0,16	0,37	-0,93
	standaardafw.	0,22	0,13	0,12		0,04	0,18	0,14	0,32
Fracties 4 t/m 7	richtingscoëff.	-0,47	-0,03	0,02		-0,08	-0,90	NA	NA
	standaardafw.	0,09	0,05	0,06		0,11	0,41	NA	NA

Bepaling diffusie-gecontroleerde trajecten

1.5 <= conc-fact <= 3.0 Gehele traject:	geen diff.	geen diff.	geen diff.		geen diff.	geen diff.	NA	NA
conc-fact > 3.0 Gehele traject:	geen diff.	geen diff.	geen diff.		geen diff.	geen diff.	NA	NA
Stap 4: voorwaarde 1	Frac. 1 t/m 3	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.
	Frac. 3 t/m 6	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA
	Frac. 5 t/m 8	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA
	Frac. 2 t/m 5	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	diffusie	geen diff.
	Frac. 4 t/m 7	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA
Stap 4: voorwaarde 2	Frac. 1 t/m 3	geen diff.	geen diff.	diffusie	geen diff.	geen diff.	diffusie	geen diff.
	Frac. 3 t/m 6	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA
	Frac. 5 t/m 8	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA
	Frac. 2 t/m 5	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.
	Frac. 4 t/m 7	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA

Resultaten diffusieproef

afspoeling (mg/m ²)	NA	NA	19000		NA	NA	0,32	NA
De gemiddeld m ² /s:	NA	NA	5,5E-12		NA	NA	3,8E-08	NA
laagste gem. pDe	NA	NA	11,3		NA	NA	7,42	NA
standaard afwijking pDe	NA	NA	0,16		NA	NA	0,1	NA
Cum. bel. gem., 64 d (mg/m ²):	410000	1700	760000		87	36	NA	NA
Cum. bel. ber., 64 d (mg/m ²):	NA	NA	1500000		NA	NA	71	NA
Totaal samenstelling (mg/kg):	NA	NA	NA		NA	NA	NA	NA
Beschikbaarheid in (mg/kg)	40000	4400	200000		350	37	0,12	280
Uitgelooft ber. 64 d (mg/kg):	NA	NA	150000		NA	NA	7,4	NA
Beschikbaarheid (% v.tot):	NA	NA	NA		NA	NA	NA	NA
Uitgelooft ber 64d (% v.bes):	NA	NA	75		NA	NA	6200	NA
tortuositeit op basis van	Mo	0,0265						
Retardatiefactor (-)	NA	NA	7400		NA	NA	1	NA

Produkt:

MEL/94/1589

Onbehandeld granulaat

herkomst en specificatie produkt
aard van het onderzocht produkt

Tijdstip in dagen	pH	geleidbaarheid in mS/cm	Temperatuur in °C	conserveringsmiddel: ml 5Mol/l HNO ₃
0,00				
0,26	8,51	10	21	NA
0,97	9,75	3	21	NA
2,21	9,82	2	21	1,37
3,99	9,97	2	21	1,42
8,99	10,2	2	21	1,82
15,97	7,33	2	21	NA
35,98	10,1	2	21	NA
63,96	9,7	2	21	1,03

Oppervlak:	0,0105 m ²
Massa :	0,1 kg
Dichtheid (dr.st.) :	1330 kg/m ³
Volume contactvst.:	0,837 liter
Projectnummer:	25082
Bladnummer MEL-FU-004:	8
Datum verwerking:	21-jul-1994
beschikbaarheidsproef	BESB0039

Analyseresultaten in µg/l

Sb Sr Zn

0,26 dagen	28	1000	390					
0,97 dagen	17	590	87					
2,21 dagen	20	410	49					
3,99 dagen	28	390	25					
8,99 dagen	39	530	13					
15,97 dagen	NA	530	28					
35,98 dagen	NA	680	16					
63,96 dagen	NA	610	13					
onderste bepalingsgrens	2	100	2					

Richtingscoëfficiënten en standaardafw.

Gehele traject:	richtingscoëff.	NA	0,17	-0,34				
	standaardafw.	NA	0,03	0,15				
Fracties 1 t/m 3:	richtingscoëff.	0,34	0,08	-0,47				
	standaardafw.	0,13	0,04	0,09				
Fracties 3 t/m 6	richtingscoëff.	NA	0,25	-0,28				
	standaardafw.	NA	0,06	0,42				
Fracties 5 t/m 8	richtingscoëff.	NA	0,18	-0,03				
	standaardafw.	NA	0,07	0,38				
Fracties 2 t/m 5	richtingscoëff.	0,57	0,14	-0,69				
	standaardafw.	0,12	0,05	0,16				
Fracties 4 t/m 7	richtingscoëff.	NA	0,16	-0,19				
	standaardafw.	NA	0,07	0,37				

Bepaling diffusie-gecontroleerde trajecte

1,5 <= conc-fact <= 3,0 Gehele traject:	NA	geen diff.	geen diff.				
conc-fact > 3,0 Gehele traject:	NA	geen diff.	geen diff.				
Stap 4: voorwaarde 1	geen diff.	geen diff.	geen diff.				
Frac. 1 t/m 3	NA	geen diff.	geen diff.				
Frac. 3 t/m 6	NA	geen diff.	geen diff.				
Frac. 5 t/m 8	NA	geen diff.	geen diff.				
Frac. 2 t/m 5	diffusie	geen diff.	geen diff.				
Frac. 4 t/m 7	NA	geen diff.	geen diff.				
Stap 4: voorwaarde 2	geen diff.	geen diff.	geen diff.				
Frac. 1 t/m 3	NA	geen diff.	geen diff.				
Frac. 3 t/m 6	NA	geen diff.	geen diff.				
Frac. 5 t/m 8	NA	geen diff.	geen diff.				
Frac. 2 t/m 5	geen diff.	geen diff.	geen diff.				
Frac. 4 t/m 7	NA	geen diff.	geen diff.				

Resultaten diffusieproef

afspoeling (mg/m ²)	0,34	NA	NA				
De gemiddeld m ² /s:	4,7E-14	NA	NA				
laagste gem. pDe	13,3	NA	NA				
standaard afwijking pDe	NA	NA	NA				
Cum. bel. gem., 64 d (mg/m ²):	NA	380	50				
Cum. bel. ber., 64 d (mg/m ²):	27	NA	NA				
Totaal samenstelling (mg/kg):	NA	NA	NA				
Beschikbaarheid in (mg/kg)	40	90	23000				
Uitgelooft ber. 64 d (mg/kg):	2,8	NA	NA				
Beschikbaarheid (% v.tot):	NA	NA	NA				
Uitgelooft ber 64d (% v.bes):	6,9	NA	NA				
tortuositeit op basis van	Mo	0,0265					
Retardatiefactor (-)	670000	NA	NA				

Resultaten diffusieproef volgens NEN 7345:

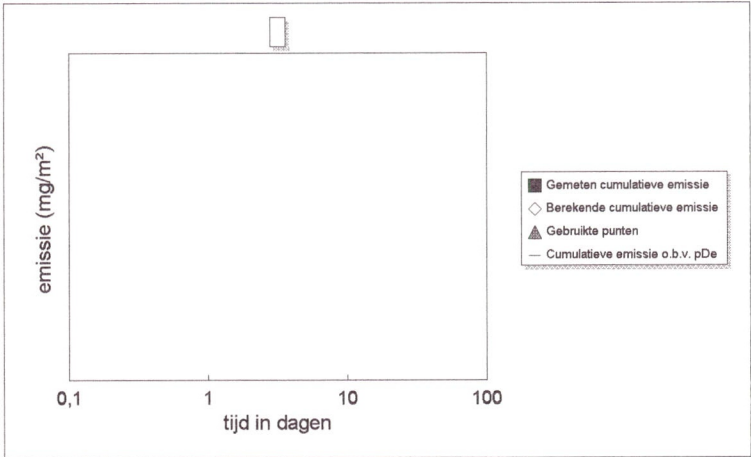
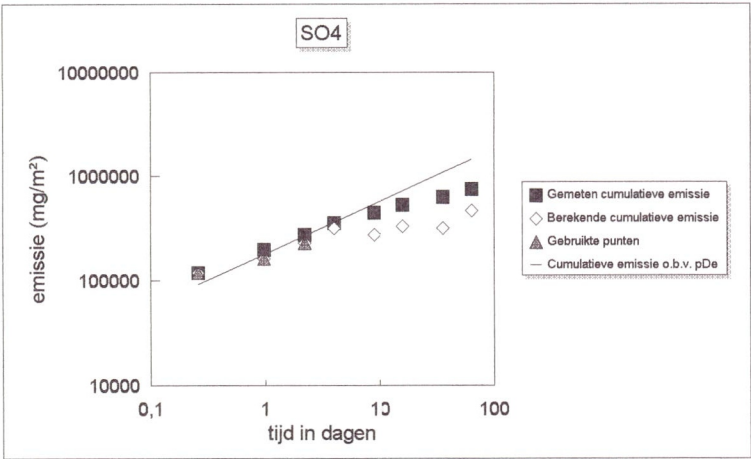
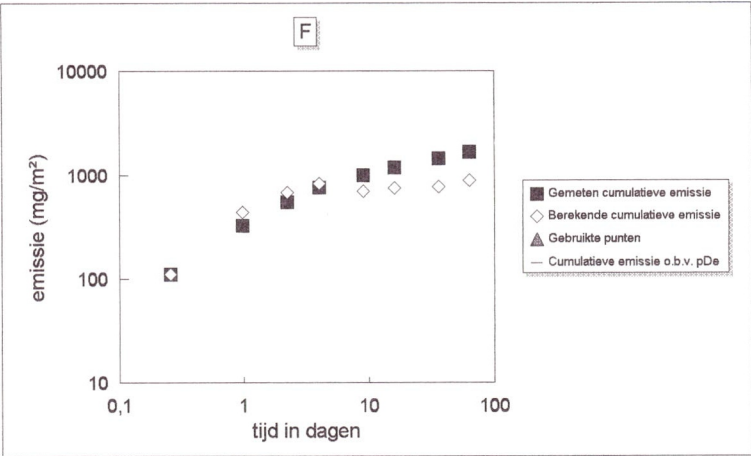
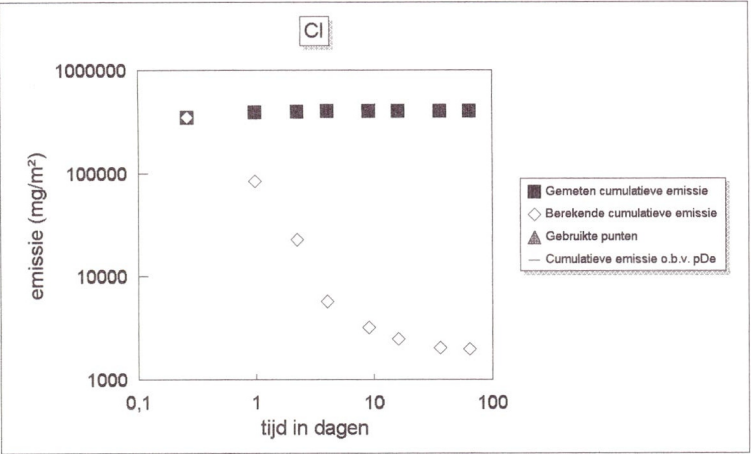
Produkt: MEL/94/1589
Bladnummer MEL-FU-004

Onbehandeld granulaat
8

datum print

29-Sep-94

herkomst en specificatie produkt
aard van het onderzocht produkt



Resultaten diffusieproef volgens NEN 7345:

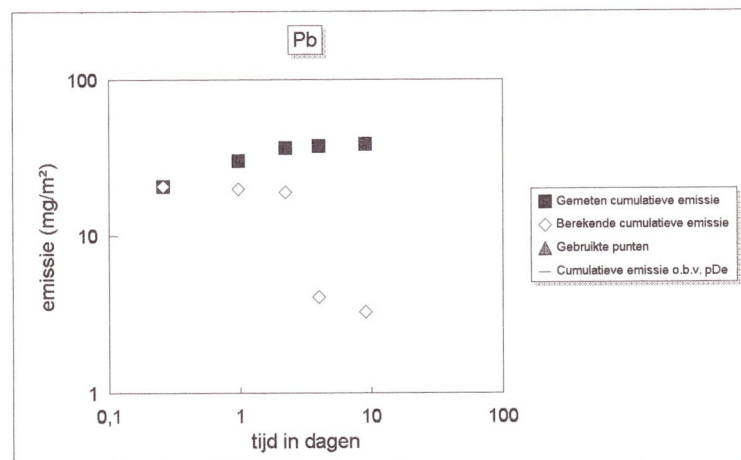
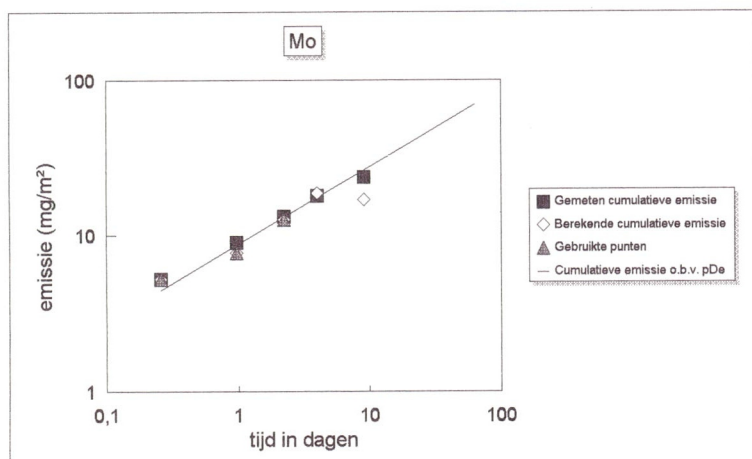
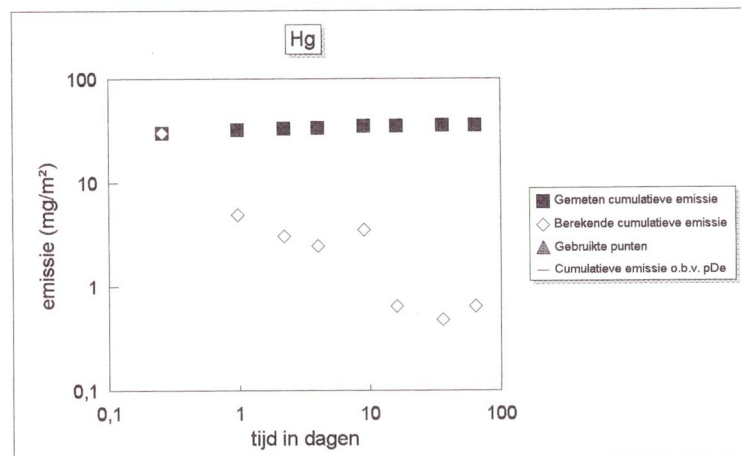
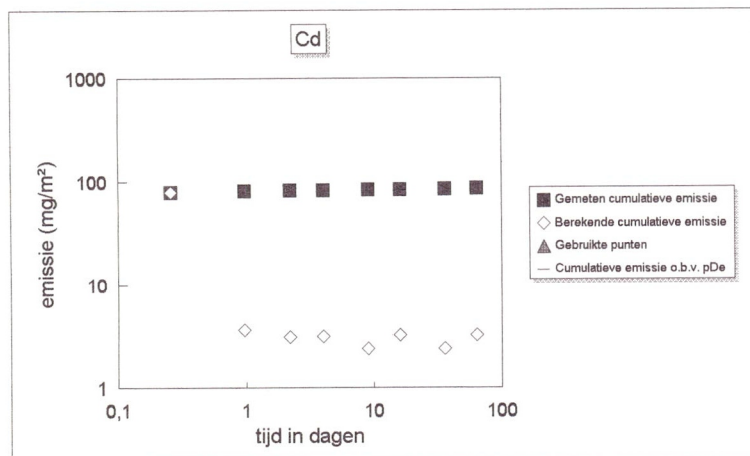
datum print

29-Sep-94

Produkt: MEL/94/1589
Bladnummer MEL-FU-004

Onbehandeld granulaat
8

herkomst en specificatie produkt —
aard van het onderzocht produkt —



Resultaten diffusieproef volgens NEN 7345:

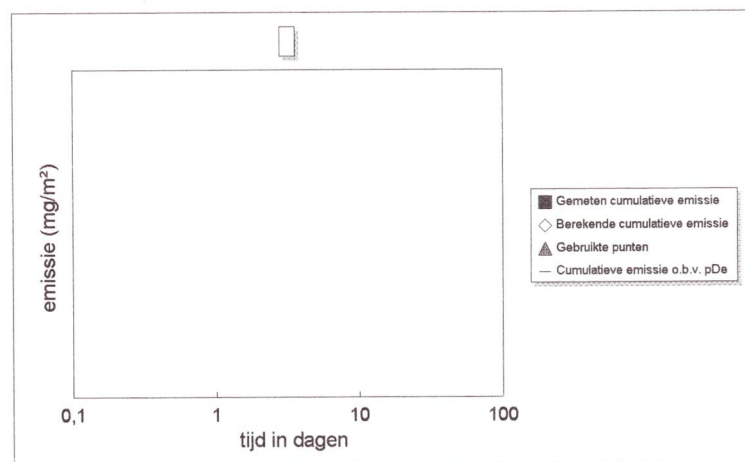
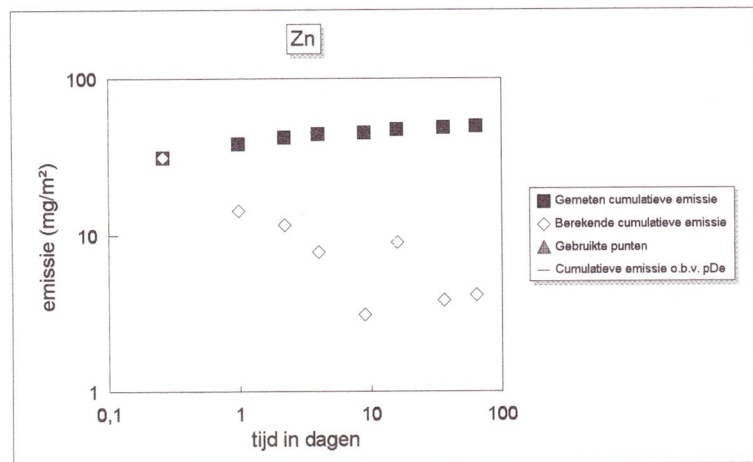
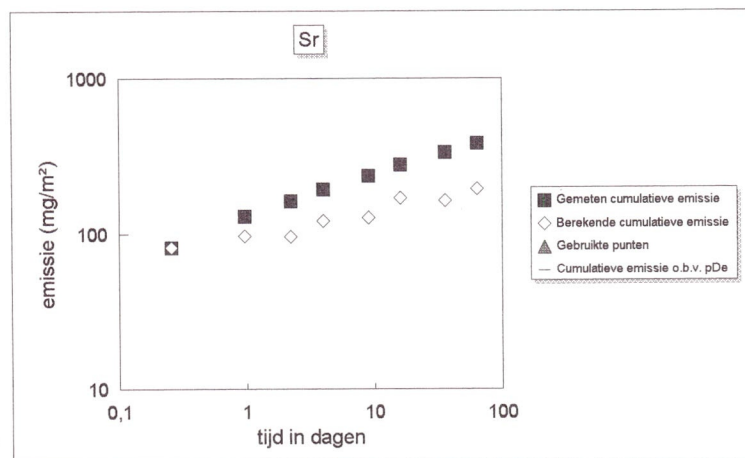
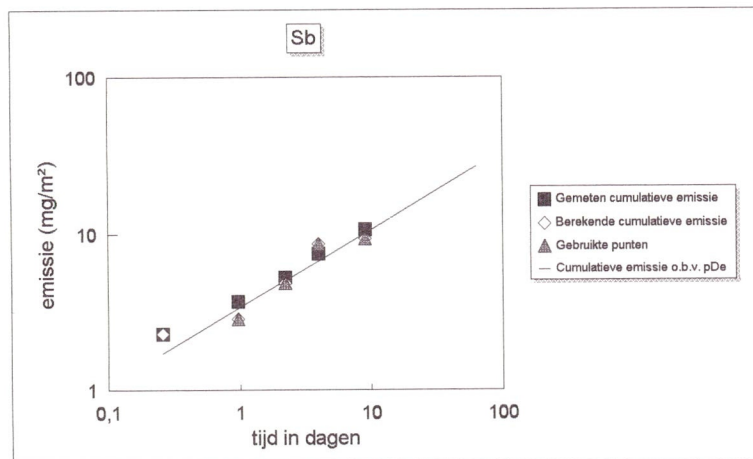
datum print

29-Sep-94

Produkt: MEL/94/1589
Bladnummer MEL-FU-004

Onbehandeld granulaat
8

herkomst en specificatie produkt —
aard van het onderzocht produkt —



*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

**Bijlage 10 Resultaten diffusieproef :
geïmpregneerd granulaat**

Produkt: MEL/94/1590 Behandeld granulaat

herkomst en specificatie produkt Immobilisaal
aard van het onderzocht produkt

Tijdstip in dagen	pH	geleidbaarheid in mS/cm	Temperatuur in °C	conserveringsmiddel: ml 5Mol/l HNO ₃
0,00				
0,26	8,51	1	21	NA
0,97	9,75	3	21	NA
2,21	9,82	2	21	NA
3,99	9,97	2	21	1,27
9,00	10,2	2	21	1,12
15,97	7,33	2	21	NA
35,97	8,77	3	21	1
63,95	7,96	3	21	NA

Oppervlak:	0,00718 m ²
Massa :	0,1 kg
Dichtheid (dr.st.) :	1750 kg/m ³
Volume contactvst.:	0,575 liter
Projectnummer:	25082
Bladnummer MEL-FU-004:	9
Datum verwerking:	21-jul-1994
beschikbaarheidsproef	BESB0040

	Cl	F	SO ₄	Cd	Hg	Mo	Pb
Analyseresultaten in µg/l							
0,26 dagen	2400000	920	860000	3700	34	3	3400
0,97 dagen	530000	1700	770000	76	2	17	60
2,21 dagen	440000	1700	950000	27	2	10	7,7
3,99 dagen	460000	1900	920000	34	2	9,2	6,2
9,00 dagen	650000	2400	1200000	14	5	24	7,7
15,97 dagen	320000	2300	1300000	10	3,1	NA	NA
35,97 dagen	250000	2600	1400000	39	28	NA	NA
63,95 dagen	83000	2800	1400000	43	28	NA	NA
onderste bepalingsgrens	100	100	500	10	2	3	2

Richtingscoëfficiënten en standaardafw.

Gehele traject:	richtingscoëff.	-0,07	0,24	0,27	-0,19	0,73	NA	NA
	standaardafw.	0,13	0,07	0,08	0,20	0,17	NA	NA
Fracties 1 t/m 3:	richtingscoëff.	-0,31	0,80	0,55	-1,84	-0,89	1,14	-2,34
	standaardafw.	0,22	0,15	0,06	0,42	0,54	0,54	0,12
Fracties 3 t/m 6	richtingscoëff.	0,00	0,27	0,28	-0,50	0,44	NA	NA
	standaardafw.	0,18	0,09	0,10	0,30	0,15	NA	NA
Fracties 5 t/m 8	richtingscoëff.	-0,86	0,17	0,15	0,81	1,22	NA	NA
	standaardafw.	0,11	0,11	0,13	0,18	0,35	NA	NA
Fracties 2 t/m 5	richtingscoëff.	0,28	0,35	0,36	-0,50	0,57	0,34	-0,70
	standaardafw.	0,05	0,10	0,13	0,28	0,07	0,19	0,38
Fracties 4 t/m 7	richtingscoëff.	-0,42	0,06	0,12	-0,06	0,99	NA	NA
	standaardafw.	0,15	0,08	0,12	0,49	0,37	NA	NA

Bepaling diffusie-gecontroleerde trajecten

1,5 <= conc-fact <= 3,0 Gehele traject:	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA
conc-fact > 3,0 Gehele traject:	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA
Stap 4: voorwaarde 1	Frac. 1 t/m 3	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.
	Frac. 3 t/m 6	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	diffusie	NA	NA
	Frac. 5 t/m 8	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA
	Frac. 2 t/m 5	geen diff.	diffusie	diffusie	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.
	Frac. 4 t/m 7	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA
Stap 4: voorwaarde 2	Frac. 1 t/m 3	geen diff.	geen diff.	diffusie	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.
	Frac. 3 t/m 6	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA
	Frac. 5 t/m 8	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA
	Frac. 2 t/m 5	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	diffusie	diffusie	geen diff.
	Frac. 4 t/m 7	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	geen diff.	NA	NA

Resultaten diffusieproef

afspoeling (mg/m ²)	NA	-42	-5990	NA	2,5	-0,27	NA
De gemiddeld m ² /s:	NA	2,0E-14	1,9E-12	NA	8,1E-12	9,9E-10	NA
laagste gem. pDe	NA	13,7	11,7	NA	11,1	9	NA
standaard afwijking pDe	NA	0,15	0,06	NA	0,08	0,22	NA
Cum. bel. gem., 64 d (mg/m ²):	410000	1300	710000	320	8,3	NA	NA
Cum. bel. ber., 64 d (mg/m ²):	NA	2000	1100000	NA	2,7	15	NA
Totaal samenstelling (mg/kg):	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Beschikbaarheid in (mg/kg)	31000	3100	170000	250	0,21	0,1	19
Uitgelooft ber. 64 d (mg/kg):	NA	140	79000	NA	0,19	1,1	NA
Beschikbaarheid (% v.tot):	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Uitgelooft ber 64d (% v.bes):	NA	4,7	46	NA	94	1000	NA
tortuositeit op basis van	Mo	1,01					
Retardatiefactor (-)	NA	72000	550	NA	NA	1	NA

Produkt: MEL/94/1590 t Behandeld granulaat

herkomst en specificatie produkt
aard van het onderzocht produkt

Tijdstip in dagen	pH	geleidbaarheid in mS/cm	Temperatuur in °C	conserveringsmiddel: ml 5Mol/l HNO ₃
0,00				
0,26	8,51	1	21	NA
0,97	9,75	3	21	NA
2,21	9,82	2	21	NA
3,99	9,97	2	21	1,27
9,00	10,2	2	21	1,12
15,97	7,33	2	21	NA
35,97	8,77	3	21	1
63,95	7,96	3	21	NA

Oppervlak:	0,00718 m ²
Massa :	0,1 kg
Dichtheid (dr.st.) :	1750 kg/m ³
Volume contactvst.:	0,575 liter
Projectnummer:	25082
Bladnummer MEL-FU-004:	9
Datum verwerking:	21-jul-1994
beschikbaarheidsproef	BESB0040

	Sb	Sr	Zn						
Analyseresultaten in µg/l									
0,26 dagen	21	240	16000						
0,97 dagen	23	250	44						
2,21 dagen	25	260	41						
3,99 dagen	24	290	27						
9,00 dagen	36	450	13						
15,97 dagen	NA	430	42						
35,97 dagen	NA	650	40						
63,95 dagen	NA	630	30						
onderste bepalingsgrens	2	100	2						

Richtingscoëfficiënten en standaardafw.

Gehele traject:	richtingscoëff.	NA	0,37	0,05					
	standaardafw.	NA	0,04	0,19					
Fracties 1 t/m 3:	richtingscoëff.	0,60	0,55	-2,42					
	standaardafw.	0,01	0,03	1,14					
Fracties 3 t/m 6	richtingscoëff.	NA	0,38	-0,04					
	standaardafw.	NA	0,05	0,51					
Fracties 5 t/m 8	richtingscoëff.	NA	0,30	0,43					
	standaardafw.	NA	0,04	0,42					
Fracties 2 t/m 5	richtingscoëff.	0,37	0,44	-0,37					
	standaardafw.	0,07	0,06	0,28					
Fracties 4 t/m 7	richtingscoëff.	NA	0,27	0,22					
	standaardafw.	NA	0,03	0,45					

Bepaling diffusie-gecontroleerde trajecte

1.5 <= conc-fact <= 3.0 Gehele traject:	NA	geen diff.	geen diff.						
conc-fact > 3.0 Gehele traject:	NA	diffusie	geen diff.						
Stap 4: voorwaarde 1	geen diff.	geen diff.	geen diff.						
Frac. 1 t/m 3	NA	geen diff.	geen diff.						
Frac. 3 t/m 6	NA	geen diff.	diffusie						
Frac. 5 t/m 8	geen diff.	geen diff.	geen diff.						
Frac. 2 t/m 5	NA	geen diff.	geen diff.						
Frac. 4 t/m 7	diffusie	diffusie	geen diff.						
Stap 4: voorwaarde 2	NA	diffusie	geen diff.						
Frac. 1 t/m 3	NA	geen diff.	geen diff.						
Frac. 3 t/m 6	NA	geen diff.	geen diff.						
Frac. 5 t/m 8	diffusie	diffusie	geen diff.						
Frac. 2 t/m 5	NA	geen diff.	geen diff.						
Frac. 4 t/m 7	NA	geen diff.	geen diff.						

Resultaten diffusieproef

afspoeling (mg/m ²)	-0,15	3,1	1300						
De gemiddeld m ² /s:	1,7E-14	1,1E-12	3,0E-20						
laagste gem. pDe	13,8	12	19,5						
standaard afwijking pDe	0,07	0,16	0,39						
Cum. bel. gem., 64 d (mg/m ²):	NA	260	1300						
Cum. bel. ber., 64 d (mg/m ²):	30	300	13						
Totaal samenstelling (mg/kg):	NA	NA	NA						
Beschikbaarheid in (mg/kg)	49	62	16000						
Uitgelooft ber. 64 d (mg/kg):	2,1	21	0,92						
Beschikbaarheid (% v.tot):	NA	NA	NA						
Uitgelooft ber 64d (% v.bes):	4,3	34	0,0057						
tortuositeit op basis van	Mo	1,01							
Retardatiefactor (-)	50000	740	2,3E+10						

Resultaten diffusieproef volgens NEN 7345:

Produkt: MEL/94/1590
Bladnummer MEL-FU-004

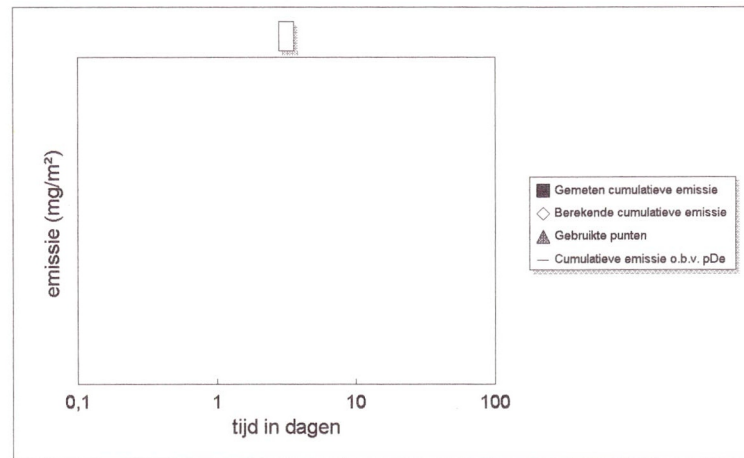
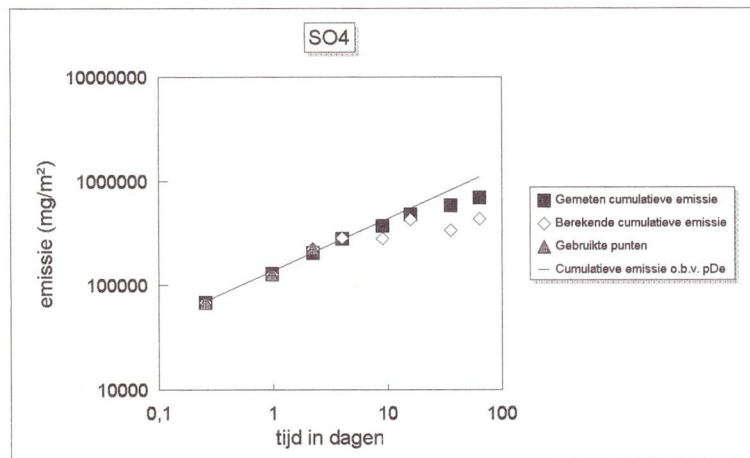
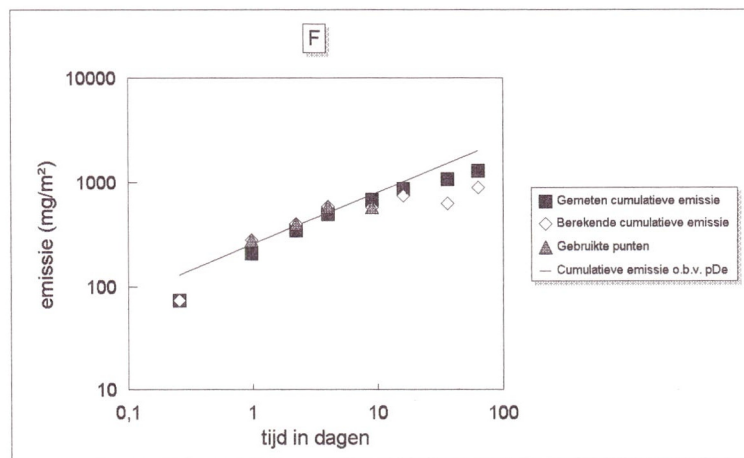
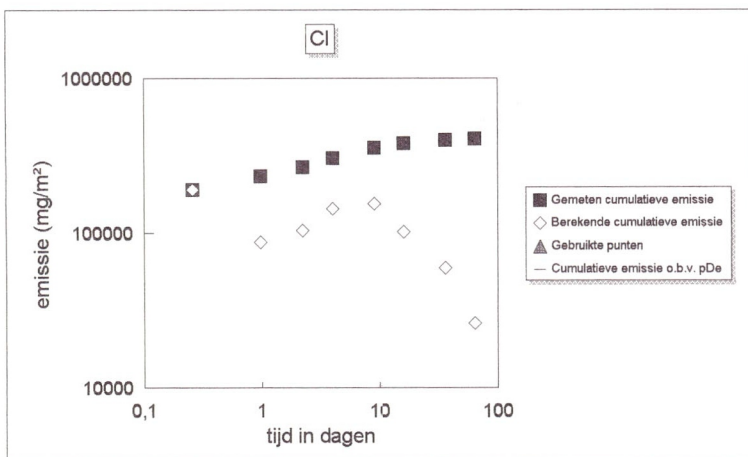
Behandeld granulaat
9

datum print

29-Sep-94

herkomst en specificatie produkt
aard van het onderzocht produkt

Immobilisaat
—



Resultaten diffusieproef volgens NEN 7345:

datum print

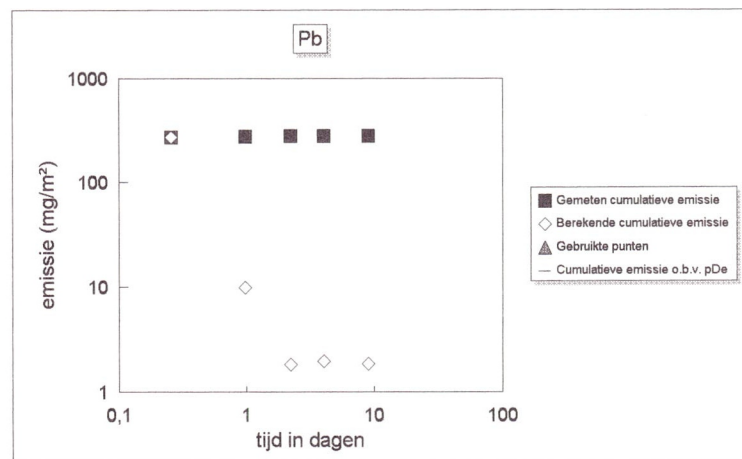
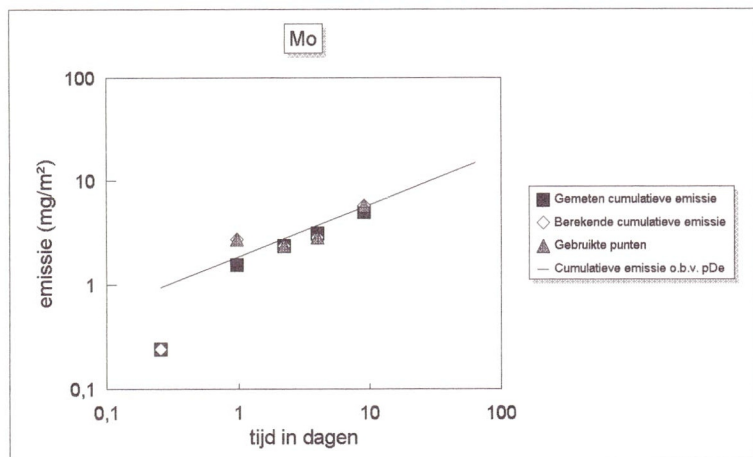
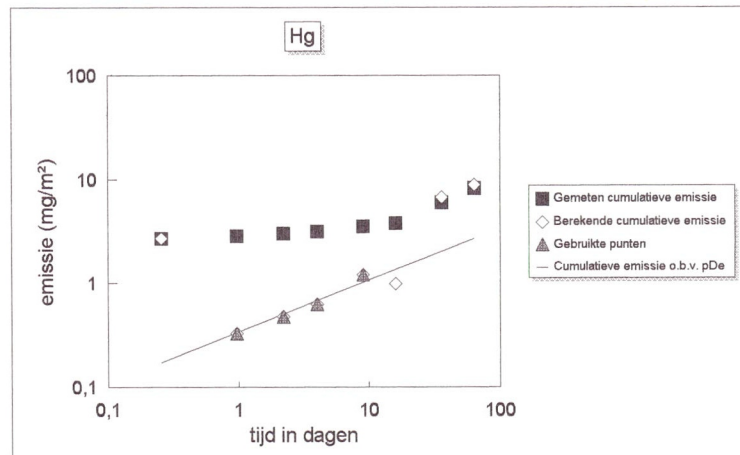
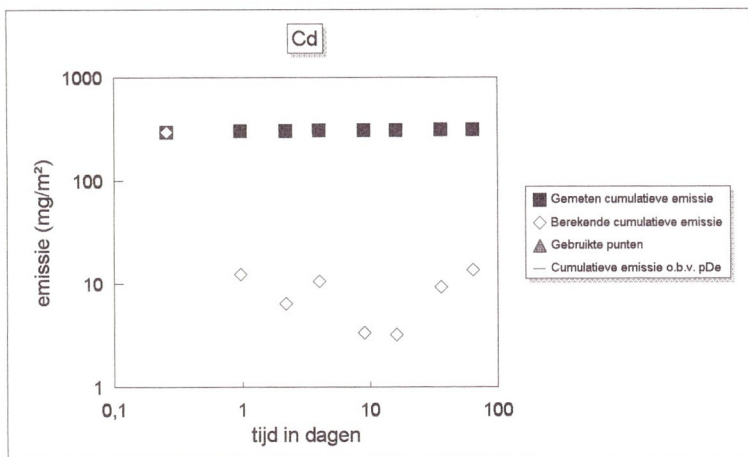
29-Sep-94

Produkt: MEL/94/1590
Bladnummer MEL-FU-004

Behandeld granulaat
9

herkomst en specificatie produkt
aard van het onderzocht produkt

Immobilisaat
—



Resultaten diffusieproef volgens NEN 7345:

Produkt: MEL/94/1590
Bladnummer MEL-FU-004

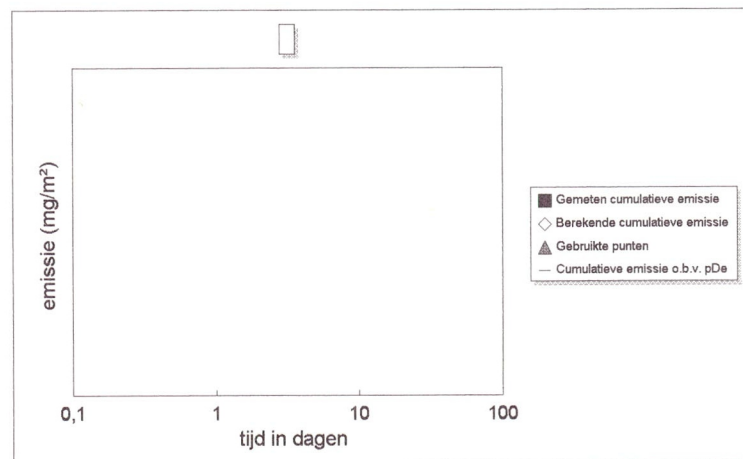
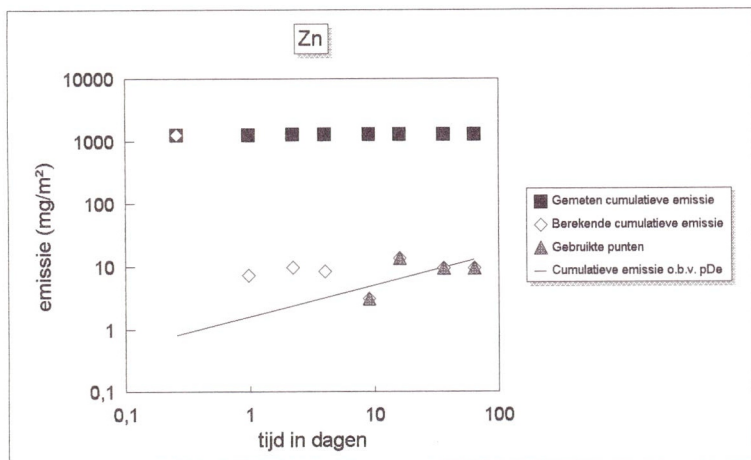
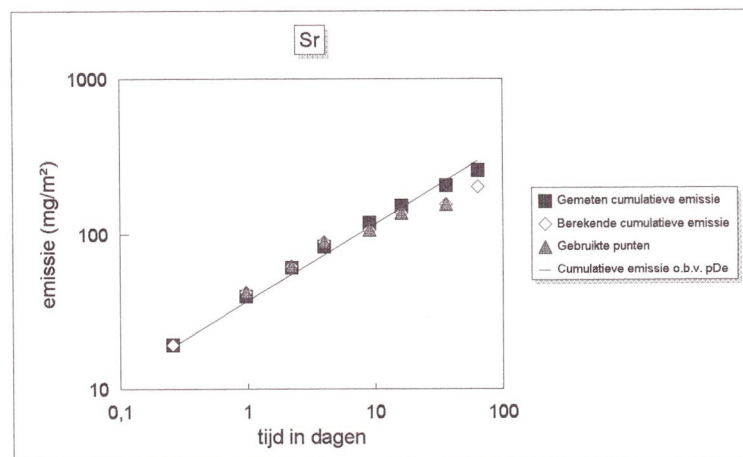
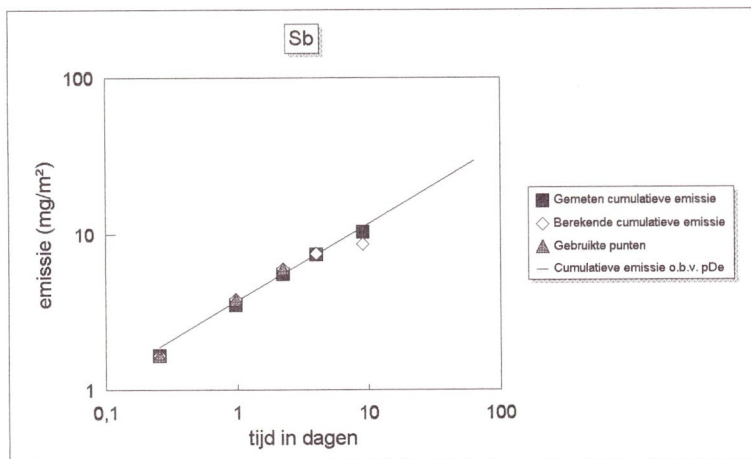
Behandeld granulaat
9

datum print

29-Sep-94

herkomst en specificatie produkt
aard van het onderzocht produkt

Immobilisaat
—



*Immobilisatie van rookgasreinigingsresidu en vliegassen met behulp van zwavel
Een haalbaarheidsonderzoek in het kader van het T-2000 programma*

Bijlage 11 Produktiekosten van het zwavelimmobilisatieproces

zwavelimmobilisatie rookgasreinigingresidu/vliegas		
UITGANGSPUNTEN: case a	nat RGR	droog RGR
DOORZET:		
aantal weken	50	50
aantal uren/week	100	100
bedrijfstijd (uren/jaar)	5000	5000
capaciteit (ton/uur)	2.00	2.00
doorzet (ton rgr nat/jaar)	10000	10000
INVESTERINGEN		
* directe investering (apparatuur)	1000000	1000000
* engineering (15% van dir.invest.)	150000	150000
* project management (25%)	287500	287500
totale investering	1437500	1437500
CAPITAL CHARGE		
kapitaallasten 20%	287500	287500
PRODUCTIEKOSTEN (VARIABEL)		
energiekosten (Hfl/kJ)	0.000040	0.000035
1) energie: drogen rgr (kJ/ton rgr)	1346750	0
2) energie: opwarmen vliegas (kJ/ton rgr)	38250	38250
3) energie: smelten zwavel (kJ/ton rgr)	68650	68650
4) energiebehoefte apparatuur (kJ/ton rg)	45000	45000
tot. energiebeh.(kJ/ton rgr) (eff=100%)	1498650	151900
tot. energiebeh.(kJ/ton rgr) (eff=80%)	1873313	189875
totale energiebehoefte (Hfl/ton rgr)	75	7
PRODUCTIEKOSTEN (VAST)		
personeel:		
* aantal ploegen	4	4
* aantal operators per ploeg	2.5	2.5
* jaarsalaris operator* (Hfl/jaar)	70000.00	70000.00
totaal personeelskosten (Hfl/jaar)	700000.00	700000.00
onderhoud (5% v. dir.inv. kosten)	50000.00	50000.00
verzekering (1% van tot.invest.)	14375.00	14375.00
TOTAAL VASTE PRODUCTIEKOSTEN (Hfl/jaar)	764375.00	764375.00
* inclusief sociale lasten, vakantietoeslag etc		
KOSTEN-OPBOUW per jaar	Kf/jaar	Kf/jaar
kapitaallasten	288	288
energiekosten:	749	66
vaste productiekosten:		
* personeel	700	700
* onderhoud	50	50
* verzekering	14	14
kosten per jaar	1801	1118
KOSTEN-OPBOUW PER TON NAT RGR	Hfl/ton	Hfl/ton
kapitaallasten	29	29
energiekosten	75	7
kosten zwavel per ton nat RGR	20	20
vaste productiekosten:		
* personeel	70	70
* onderhoud	5	5
* verzekering	1	1
kosten per ton	200	132