

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties

Fase 1: Voorstudie

Referentienummer 93-403
Dossiernummer 112326-24861
Datum juni 1994
NP

Auteurs
Ing. B.J. Gerrits
G. Kuipers

Trefwoorden

- stof
- vliegias
- afvalverbranding
- stofafscheiding
- hoge-temperatuur
- rookgas
- rookgasreiniging
- zware metalen
- dioxinen

Bestemd voor
Ir. K. Braber
NOVEM
Postbus 8242
3503 RE Utrecht

Colofon

Contractnummer: 355100/2030

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het programma Energiewinning uit afval en biomassa (EWAB).

Beheer en coördinatie van het EWAB-programma berust bij:

NOVEM

Nederlandse Onderneming voor Energie en Milieu B.V.

St. Jacobsstraat 61

Postbus 8242

3503 RE Utrecht

Tel. 030-363444

Contactpersoon: Ir. K. Braber

NOVEM geeft geen garantie voor de juistheid en/of volledigheid van gegevens, ontwerpen, constructie, producten of produktiemethoden voorkomende of beschreven in dit rapport, noch voor de geschiktheid daarvan voor enige bijzondere toepassing.

Het onderzoek is uitgevoerd door:

Ing. B.J. Gerrits

G. Kuipers

De auteurs zijn werkzaam bij:

TNO Milieu- en Energietechnologie (TNO-ME)

Postbus 342

7300 AH Apeldoorn

Tel. 055-493216

Fax. 055-419837

Datum van rapportage: mei 1994

Meer exemplaren van dit rapport zijn verkrijgbaar door overmaking van een bedrag van f 75,00 (exclusief BTW) op postbankrekening nr. 416269 van TNO-ME Apeldoorn, onder vermelding van referentienummer 93-403.

Contactpersoon: Mevrouw T.E. van Kampen, tel. 055-493592.

Samenvatting

In opdracht van de Nederlandse Onderneming voor Energie en Milieu (NOVEM) is een voorstudie uitgevoerd om de toepassing te beoordelen van hoge temperatuur (HT) stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties (AVI's).

De mogelijke voordelen van HT-stofafscheiding bij AVI's zijn:

- verbetering van de vliegaskwaliteit;
- voorkoming van vorming van dioxinen;
- verhoging van het ketelrendement.

Onderwerpen van deze voorstudie zijn:

- inventarisatie van de stand van de techniek;
- inventarisatie van commercieel beschikbare systemen;
- eventueel voorstel tot experimenteel onderzoek.

In Nederland wordt voornamelijk gebruik gemaakt van elektrofilters voor de primaire stofafscheiding bij AVI's. Elektrofilters kunnen worden gebruikt tot een gastemperatuur van 400 °C.

De laatste jaren zijn nieuwe technieken ontwikkeld voor HT-stofafscheiding. Deze nieuwe technieken zijn ontwikkeld voor en worden toegepast bij verbranding en vergassing van kolen. Van deze technieken zijn cyclonen en keramische kaarsfilters geschikt voor AVI's.

Er is nauwelijks experimenteel onderzoek uitgevoerd naar de effecten van HT-stofafscheiding bij AVI's. Uit een onderzoek van de TU Berlijn blijkt HT-stofafscheiding, bij een rookgastemperatuur van minimaal 500 °C, de concentraties van de vluchtige zware metalen zink, cadmium en lood in vlieggas te verlagen en de vorming van dioxinen tijdens het afkoelen van de ontstofte rookgassen te voorkomen.

Uit de open literatuur zijn geen detailgegevens bekend over de warmteoverdracht van de rookgassen in de stoomketel van een AVI. Daarom is door TNO-ME een mathematisch model ontwikkeld op basis van de ontwerpgegevens van een stoomketel van de Afvalverwerking Rijnmond (AVR). Op grond van de warmteoverdrachtberekeningen, kan de HT-stofafscheiding uitgevoerd worden bij de volgende temperatuurniveaus en plaatsen in de ketel:

- 700 - 800 °C, voor verdampersecties;
- 500 - 600 °C, tussen verdamper- en OVO-secties;
- 400 - 500 °C, tussen OVO- en ECO-secties.

Met het mathematisch model zijn de effecten van de vuillaag op de stoomproductie en de rookgastemperatuur berekend. Door toepassing van HT-stofafscheiding is het mogelijk de vervuiling van de ketel te vermijden en de standtijd te verlengen. Het model toont aan dat een verlaging van de stoomproductie met 5% kan worden vermeden bij het voorkómen van een vuillaag van 10 mm.

Uit de voorstudie blijkt dat HT-stofafscheiding een veelbelovende optie is ter verbetering van de huidige AVI. Omdat er weinig experimentele informatie bekend is over de effecten van HT-stofafscheiding, wordt aanbevolen een experimenteel onderzoek uit te voeren met een proefopstelling bij een AVI.

Summary

Title: High Temperature dust removal at Municipal Solid Waste Incinerators
Phase 1: Feasibility study

Keywords: dust, fly ash, waste incineration, dust removal, high temperature, flue gas, flue gas cleaning, heavy metals, dioxins, boiler efficiency

A feasibility study was performed, under the management of the Netherlands Agency for Energy and Environmental (NOVEM), to evaluate the application of high temperature (HT) dust removal at Municipal Solid Waste Incinerators (MSWI).

The possible advantages of HT dust removal at MSWI's are:

- improvement of the fly ash quality;
- avoidance of composition of dioxins;
- increase of boiler efficiency.

Subjects of this study are:

- a literature survey of the state of the art;
- a survey of commercially available systems;
- a proposal for experimental research.

In the Netherlands almost only electrostatic precipitators (ESP) are used for the dust removal at MSWI's. The application of an ESP is limited to a maximum temperature of 400 °C. Recently new technics have been developed for HT dust removal. These new technics have been developed and used for combustion and gasification of coal. From these technics cyclons and ceramic filter candles are suitable for MSWI's.

Hardly any experimental investigations have been carried out into the effects of HT dust removal at MSWI's. Only one investigation, carried out by the TU Berlin, indicates that the application of HT dust removal at a flue gas temperature of 500 °C, decreases the contents of the volatile heavy metals zinc, cadmium and lead in the fly ash and avoids the composition of dioxins during the cooldown of the dust free flue gas.

No specific information with respect to boiler efficiency has been found. With a mathematical computermodel heat transfer calculations have been made on the base of the design specifications of a steam boiler from the MSWI Rijnmond. The HT dust removal can be carried out at the following temperature levels and positions in the boiler:

- 700 - 800 °C, in front of the steam tubes;
- 500 - 600 °C, between the steam and the superheater tubes;
- 400 - 500 °C, between the superheater tubes and the economizer.

With the mathematical model the effects of the dust layer on the steam production and flue gas temperature have been calculated. The model shows that the application of HT dust removal avoids fouling of the evaporator/superheater tubes. A decrease of the boiler efficiency by approximately 5% can be avoided and therefore the operating time of the boiler can be increased.

It turns out that little information on the effects of HT dust removal is available. Therefore an experimental investigation with a pilot plant is recommended.

Inhoudsopgave

Colofon2

Samenvatting3

Summary4

1	Inleiding	7
2	Voorstudie	9
2.1	Doelstellingen	9
2.2	Afbakening	9
2.3	Resultaten	9
2.4	Werkwijze/uitvoering	10
3	Principes van stofafscheiding	11
4	Stofafscheiding bij AVI's	13
4.1	Inleiding	13
4.2	Elektrofilter	13
4.3	Natte water	14
4.4	Doekfilter	14
4.5	Samenvatting	15
5	Hoge-temperatuur stofafscheiding	16
5.1	Inleiding	16
5.2	Cycloon	17
5.3	Elektrofilter	19
5.4	Doekfilter	19
5.5	Korrelbedfilter	20
5.6	Kaarsfilter	24
5.7	Cross-flow filter	30
5.8	Evaluatie en selectie van HT-stofafscheidingstechnieken voor mogelijke toepassing bij AVI's	34
5.8.1	Evaluatie	34
5.8.2	Selectie	34
6	Mogelijkheden van HT-stofafscheiding bij AVI's	37
6.1	Keuze van het temperatuurniveau voor HT-stofafscheiding	37
6.2	Invloed van HT-stofafscheiding op de samenstelling van AVI-vliegas	39
6.2.1	Inleiding	39
6.2.2	Beschrijving van experimenteel onderzoek uitgevoerd door TU Berlijn	41
6.2.3	Resultaten van het experimenteel onderzoek van de TU Berlijn	43

*Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties**Fase 1: Voorstudie*

6.3	Invloed van HT-stofafscheiding op het uitlooggedrag van AVI-vliegas46	
6.3.1	Inleiding	46
6.3.2	Invloed van HT-stofafscheiding op de toepassing van AVI-vliegas als bouw materiaal	46
6.3.3	Invloed van HT-stofafscheiding op het stortregime van AVI-vliegas	48
6.4	Invloed van HT-stofafscheiding op de vorming van dioxinen en furanen49	
6.5	Invloed van HT-stofafscheiding op vervuiling van de ketel50	
6.6	Samenvatting53	
7	Commercieel verkrijgbare elementen en systemen voor HT-stofafscheiding 54	
8	Conclusies en aanbevelingen 56	
9	Referenties 58	
10	Verantwoording 61	

Bijlage A Mogelijkheden van experimenteel onderzoek bij een AVI

1 Inleiding

Nederland produceert momenteel 7,7 miljoen ton huishoudelijk en bedrijfsafval per jaar. Van deze afvalstroom wordt 35% verbrand in afvalverbrandingsinstallaties (AVI's). De rest van deze afvalstroom wordt hergebruikt, gecomposteerd of gestort.

Het beleid van de Nederlandse overheid is gebaseerd op de motie Lansink (1979). Deze motie bepaalt achtereenvolgens, voor de oplossing van de problematiek van afvalstoffen, de volgende prioriteiten:

- preventie;
- hergebruik;
- thermische verwerking met energierugwinning;
- storten.

Het doel van het afvalbeleid is dat tot aan het jaar 2000 de totale hoeveelheid afval per jaar niet meer toeneemt en door preventie eventueel vermindert. Het aandeel van de afvalstroom, dat via thermische conversie wordt verwerkt, moet toenemen van 35% naar 49%. Dit wordt gerealiseerd door vernieuwing en uitbreiding van de capaciteit van de AVI's. Tabel 1.1 geeft een overzicht van de bestaande en toekomstige capaciteit van AVI's in Nederland.

Tabel 1.1 Bestaande en toekomstige capaciteit AVI's in Nederland en toegepaste systemen voor stofafscheiding en rookgasreiniging (1993) [1], [2]

AVI	Bouwjaar	Capaciteit kton/jaar	Stofaf- scheiding	Rest rookgasreiniging (schakeling)
Alkmaar	1971	123	EF	DA-DF
Amsterdam	1993	765	EF	SA-EF-NW2-EDV-SNCR
Den Haag	1968	330	EF	KI
Dordrecht	1972	144	EF	NW2-SCR
Duiven	1975	265	EF	NW2-SNCR
Eindhoven	1986	25	EF	NW
Nijmegen	1986	68	EF	SA-NW2-DF-SCR (180 °C)
Roosendaal	1976	35	EF	DF
Rotterdam	1963	390	EF	NW2-HOK-SCR (215 °C)
Rijnmond	1972	975	EF	NW2-HOK-SCR (180 °C)
Alkmaar	1995	385	EF	SA-DF-NW2-HOK-SCR (310 °C)
Maasbracht	1998	600	?	?
Moerdijk	1996	600	?	?
Wijster	1996	480	EF	SA-EF-NW2-HOK-SCR

Afkortingen:

EF = Elektrofilter	NW = Natte water (1 traps)
DF = Doekfilter	NW2 = Natte water (2 traps)
KI = Kalkinjectie	HOK = Koelfilter (bruinkoolcokes)
SA = Sproei-absorber	SCR = DeNOx (katalytisch)
DA = Droogabsorber	SNCR = DeNOx (niet katalytisch)
EDV = El.dyn. venturi	

*Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties**Fase 1: Voorstudie*

Uit tabel 1.1 blijkt, dat bij alle bestaande en toekomstige AVI's in Nederland de primaire stofafscheiding wordt uitgevoerd met een elektrostatisch filter. Het afscheiden van stof uit de rookgassen met een elektrostatisch filter is een bewezen en betrouwbare techniek, die al tientallen jaren wordt toegepast.

De laatste jaren komen er nieuwe technieken voor stofafscheiding bij hoge temperaturen en drukken beschikbaar. Veel onderzoek op het gebied van stofafscheiding bij verbranding van steenkool onder druk in wervelbedden (PFBC) en vergassing van steenkool (KV-STEG) hebben geleid tot commercieel beschikbare technieken.

Op het gebied van verbranding van afvalstoffen wordt de stofafscheiding bijna uitsluitend uitgevoerd met elektrostatische filters (ESP). De rookgastemperatuur aan de inlaat van een ESP varieert, afhankelijk van de AVI, tussen 200 °C en 300 °C. De nieuwe technieken voor stofafscheiding werken in een temperatuurgebied tussen 200 °C en 1000 °C. Tot nu toe worden deze technieken nog niet bij AVI's toegepast.

Mogelijke voordelen van HT-stofafscheiding zijn:

- verbetering van de vliegaskwaliteit;
- vermindering van vervuiling van de ketel en daardoor verhoging van het ketelrendement;
- voorkomen van vorming van dioxinen en furanen tijdens afkoelen van de rookgassen.

In opdracht van NOVEM wordt een onderzoek uitgevoerd om te beoordelen of stofafscheiding bij hoge temperaturen ook voor AVI's interessant is. Het onderzoek zal worden uitgevoerd in verschillende fasen. In dit rapport zijn de resultaten van de eerste fase beschreven. Deze eerste fase bestaat uit een voorstudie om te beoordelen of een experimenteel onderzoek, uitgevoerd bij een AVI, zinvol is.

De inhoud van dit rapport is verder als volgt:

- hoofdstuk 2 geeft de doelstellingen, de afbakening en het beoogde resultaat van de voorstudie;
- hoofdstuk 3 beschrijft in het kort de principes van stofafscheiding;
- hoofdstuk 4 beschrijft de huidige technieken van stofafscheiding bij AVI's;
- hoofdstuk 5 geeft een overzicht van de stand van de techniek van HT-stofafscheiding, zoals deze wordt toegepast bij wervelbedverbranding en vergassing van kolen;
- hoofdstuk 6 beoordeelt de mogelijkheden en de eventuele effecten van HT-stofafscheiding bij AVI's;
- hoofdstuk 7 geeft een overzicht van de elementen en systemen, die voor HT-stofafscheiding commercieel beschikbaar zijn;
- hoofdstuk 8 geeft de conclusies en aanbevelingen van de voorstudie.

In bijlage A worden de mogelijkheden beschreven van experimenteel onderzoek naar de effecten van HT-stofafscheiding bij een AVI.

2 Voorstudie

2.1 Doelstellingen

De doelstellingen van de voorstudie zijn:

- inventarisatie van de kennis en effecten van HT-stofafscheiding;
- beoordeling van het nut en de haalbaarheid van een experimenteel onderzoek;
- het eventueel formuleren van een concreet onderzoeksplan.

2.2 Afbakening

De voorstudie is beperkt en beknopt. De volgende afbakening van het onderwerp is toegepast:

- de literatuurstudie naar de ervaring van HT-stofafscheiding is beperkt tot openbare literatuur;
- de inventarisatie van commercieel beschikbare systemen voor HT-stofafscheiding is beperkt tot een beknopt marktoverzicht op basis van bestaande TNO kennis en gesprekken met enkele deskundigen van mogelijke leveranciers;
- de beoordeling van het nut en de haalbaarheid van een experimenteel onderzoek is toegespitst op de invloed van HT-stofafscheiding op de samenstelling van de vliegass, vermindering van vervuiling van ketel en de eventuele vermijding van de vorming van dioxinen;
- de beoordeling van bedrijfseconomische voordelen, door verlaging van de vervuilingsgraad van de ketel en daardoor verlenging van de standtijd van een AVI, is **niet** uitgevoerd.

Deze mogelijke voordelen zijn alleen haalbaar als de HT-stofafscheiding plaats vindt tussen de oven en de ketel bij een zo hoog mogelijke rookgastemperatuur. Dit betekent een totaal ander concept van een afvalverbrandingsinstallatie. De financiële consequenties van een dergelijk concept zijn in het kader van deze voorstudie **niet** te overzien;

- het onderzoeksplan, voor experimenteel onderzoek naar de effecten van HT-stofafscheiding bij een AVI, is beperkt tot het opstellen van een meetprogramma en de samenstelling van een proefopstelling.

2.3 Resultaten

De resultaten van de voorstudie geven inzicht in:

- Bestaande kennis op het gebied van HT-stofafscheiding en de mogelijke effecten van toepassing bij AVI's;
- Commerciële beschikbaarheid van systemen voor HT-stofafscheiding, en mogelijke toepassing bij AVI's;
- De gewenste opzet van een plan voor experimenteel onderzoek bij een AVI.

2.4 Werkwijze/uitvoering

Voor de beperkte literatuurstudie zijn de volgende bronnen uit de openbare beschikbare literatuur gebruikt:

- tijdschriften:
 - Staub Reinhaltung der Luft, jaargangen 1988 - 1993;
 - Filtration and Separation, jaargangen 1988 - 1993;
 - VGB Kraftwerkstechnik, jaargangen 1988 - 1993;
 - Müll und Abfall jaargangen 1988 - 1993;
- conferentiepapers:
 - 10th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, San Francisco, USA, 1989;
 - 11th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, Montreal, Canada, 1991;
 - 12th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, San Diego, USA, 1993;
 - 1th Int. Conf. on Municipal Waste Combustion, Hollywood, USA, 1989;
 - 2th Int. Conf. on Municipal Waste Combustion, Tampa, USA, 1991;
 - VGB Konf. 'Wirbelschichtsysteme 1990', Essen, BRD, 1990;
 - VGB Konf. 'Wirbelschichtsysteme 1992', Essen, BRD, 1990;
 - BMFT/VGB Konf. 'Fortschrittliche Kohlekraftwerkstechnologie und Heissgasreinigung', Düsseldorf, BRD, 1987;
 - 1th Int. Symp. 'Gas Cleaning at High Temperatures', Guildford, UK, 1986;
 - 8th Int. Symp. on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology, San Diego, USA, 1990;
- literatuurrecherche in databestanden via computer CID-TNO.

Voor de beknopte inventarisatie van commercieel beschikbare systemen voor HT-stofafscheiding is gebruik gemaakt van:

- dezelfde bronnen als bij de literatuurstudie;
- beschikbare TNO kennis;
- informatie uit gesprekken met leveranciers (Didier, Schumacher, Van Tongeren, Fläkt).

In het kader van de uitvoering van dit onderzoek is het 2th International Symposium 'Gas Cleaning at High Temperatures' bijgewoond in de periode 27 tot 29 September 1993. Deze conferentie werd, evenals de eerste conferentie in 1986, georganiseerd door de Universiteit van Surrey in Guildford (Engeland).

3 Principes van stofafscheiding

De technieken om stof uit een gasstroom af te scheiden maken gebruik van karakteristieke eigenschappen van stofdeeltjes [3].

Dat zijn met name de volgende mechanische eigenschappen:

- grootte (vorm);
- dichtheid;
- massa, de feitelijke resultante van bovengenoemde karakteristieken.

Daarnaast maakt men gebruik van fysische en chemische eigenschappen van stofdeeltjes:

- elektrische geleidbaarheid;
- elektrostatische oplaadbaarheid;
- oppervlaktespanning;
- reactiviteit;
- oplosbaarheid.

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de belangrijkste basisprincipes en de bijbehorende fysisch-mechanische achtergronden.

Tabel 3.1 Relatie van basisprincipe, fysisch-mechanische verschijnselen en stofeigenschappen [3]

Basisprincipe van stofafscheidings-techniek	Fysisch-mechanisch verschijnsel	Stofeigenschap
Zeefwerking	Botsing	Grootte/massa
Sedimentatie	Zwaartekracht	Gewicht
Centrifugaalwerking	Traagheid	Massa
Diffusie	Brownse beweging	Massa
Elektrostatische oplading	Oplading/ladingverschuiving	Geleidbaarheid
Hechting	Adsorptie Absorptie	Elektrisch/elektrostatisch/chemisch karakter Oppervlaktespanning

In de meeste systemen voor stofafscheiding spelen meerdere basisprincipes een rol. In een aantal gevallen maken systemen ook gebruik van combinaties van technieken. Dat betekent een veel verder gaande combinatie van afscheidingsprincipes.

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de toepassing van de basisprincipes bij verschillende systemen voor stofafscheiding.

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

Tabel 3.2 Toepassing van de basisprincipes bij systemen voor stofafscheiding [3]

Basisprincipe	Cycloon	Doekfilter	Elektrofilter	Natte afscheider	Diep bed filter	Oppervlakte filter
Zeefwerking		X			X	X
Sedimentatie	X					
Traagheid	X	X		X	X	
Diffusie		X	X	X	X	
Elektrostatische oplading			X			

4 Stofafscheiding bij AVI's

4.1 Inleiding

Een systeem voor rookgasreiniging bij een AVI is opgebouwd uit de volgende functies:

- stofafscheiding;
- afvangst van zure gasen (bijvoorbeeld HCl, HF, SO₂) en zware metalen (bijvoorbeeld Hg);
- verlaging van NO_x-emissie (deNO_x);
- afvangst van organische stoffen, bijvoorbeeld dioxinen, furanen, pak's en pcb's.

De stofafscheiding wordt uitgevoerd met elektrofilters, natte wassers en doekfilters. Aan de uitlaat van de ketel wordt bijna uitsluitend een elektrofilter toegepast (zie tabel 1.1). Een elektrofilter heeft echter in vergelijking met de emissienormen een te beperkt afscheidingsrendement (circa 99%). De rest van het stof, met name de fijne fractie, wordt afgescheiden in natte wassers en/of doekfilters. De belangrijkste functie van natte wassers is echter het verwijderen van zure gasen en zware metalen. Doekfilters worden vaak gebruikt na een sproei-absorber of droge kalkinjectie.

De verschillende mogelijkheden van elektrofilters, natte wassers en doekfilters voor het afscheiden van stof uit de rookgasen van een AVI worden hieronder in het kort beschreven en in tabel 4.1 samengevat.

4.2 Elektrofilter

Een elektrofilter maakt gebruik van elektrostatische oplading van deeltjes. Er bestaan één-trapsfilters en twee-trapsfilters. Bij de laatste vindt oplading van de deeltjes plaats in een eerder aangelegd (vaak veel sterker) elektrisch veld. Tweetrapsfilters zijn kleine systemen voor kleine gasstromen, zoals in de luchtbehandeling.

De meest toegepaste grote elektrofilters zijn één-trapssystemen. De opladingselektroden liggen tussen de afscheidingselektroden en er is maar één elektrisch veld. Ter verbetering van het afscheidingsrendement worden eventueel meer secties, elk met een eigen elektrisch veld, achter elkaar geplaatst.

In geval van afscheiding van vaste deeltjes bestaan de afscheidingselektroden uit rechte platen. Voor afscheiding van vloeistoffen in de vorm van druppels of aerosolen worden cilindrische platen toegepast. Het is belangrijk om een homogeen elektrisch veld te krijgen zonder kans op doorslag (feitelijk kortsluiting). Spanningen tot aan 60 kV worden toegepast.

Voor- en nadelen van elektrostatische filters zijn:

Voordelen:

- lage drukval;
- continu proces;
- hoge afscheidingsgraad;
- toepasbaar voor grote rookgasdebieten;
- laag energieverbruik.

Nadelen:

- restemissie is afhankelijk van stofaanbod;
- afscheidingsgraad is afhankelijk van stofeigenschappen;
- groot ruimtebeslag.

4.3 Natte water

In de natte water vindt de afscheiding van stofdeeltjes plaats door direct contact tussen deeltjes en druppels en contact tussen deeltjes en het vloeistofoppervlak. Een goed contact tussen deeltjes en vloeistof is dus noodzakelijk. Dit wordt bereikt door met hoge druk vloeistof in de vorm van een fijne nevel in te spuiten in de gasstroom (sproei-wasser), of door het gas met hoge snelheid door een vloeistof te leiden (venturi-wasser), of door de vloeistof over een pakking fijn te verdelen (gepakt bed-wasser).

Voor- en nadelen van natte wassers zijn:

Voordelen:

- compact;
- geschikt voor 'natte gassen' en 'kleverige stoffen';
- relatief lage investeringskosten;
- gasvormige componenten (zuren en zware metalen) worden mee uitgewassen.

Nadelen:

- verontreiniging van extra milieucompartiment (water);
- hoge energiekosten voor redelijke afscheidingsgraad;
- afscheidingsgraad is afhankelijk van stofeigenschappen;
- werkgebied bij relatief lage gastemperaturen.

4.4 Doekfilter

Een doekfilter scheidt het stof af op een dicht weefsel. De laag stof, die zich op de buitenkant van het weefsel opbouwt, werkt ook als filter. Daardoor neemt de afscheidingsgraad bij een schoon filter in eerste instantie toe. Tengevolge van de opbouw van een laag stof wordt de drukval groter. De stoflaag moet dan ook regelmatig verwijderd worden. Dit wordt gedaan door mechanisch kloppen, terugblazen met schoon gas of via een persluchtpuls. Bij laag belaste filters ($< 100 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$) stroomt het ruwe gas van binnen naar buiten door het filterweefsel. Bij hoog belaste filters ($> 100 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$) stroomt het ruwe gas van buiten naar binnen.

De materialen (textiel, polymeren) die tot nu toe gebruikt worden voor doekfilters, zijn bestand tot een temperatuur van maximaal 250°C . Recente ontwikkelingen richten zich op het verbeteren van de reiniging en het gebruik van nieuwe materialen, die tegen hogere temperaturen bestand zijn. Nieuwe materialen zijn onder andere glasvezel, speciale polymeren, metaalvezel en keramische vezel. Bij gebruik van metaalvezel en keramische vezel kunnen doekfilters gebruikt worden bij rookgastemperaturen tot aan 600°C , respectievelijk 800°C .

Voor het afscheiden van 'kleverige' stoffen wordt een toeslagstof verstoven in de aanvoerleiding van het doekfilter. Tegenwoordig gebruikt men kalkverbindingen en ac-

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

tieve kool, met een zeer hoge specifieke oppervlakte (m^2/kg), om zure gasen en dioxines te binden in de stoflaag op het doekfilter.

De voor- en nadelen van doekfilters zijn:

Voordelen:

- hoge belastingsgraad;
- hoge afscheidingsgraad;
- restemissie onafhankelijk van aanbod;
- relatief lage drukval.

Nadelen:

- beperkt werkgebied, geschikt voor gastemperaturen tot aan $250\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- problemen met kleverige stoffen en rookgassen met een hoog dauwpunt;
- groot ruimtebeslag bij groot rookgasdebit;
- kans op brand, veroorzaakt door broei tengevolge van onverbrande koolstof in stoflaag op filter of in hopper.

4.5 Samenvatting

Tabel 4.1 geeft een overzicht van een aantal prestatiekenmerken van toegepaste technieken voor stofafscheiding bij AVI's.

Tabel 4.1 Enkele prestatiekenmerken van toegepaste technieken voor stofafscheiding bij AVI's [3], [4]

Kenmerk		Elektrofilter	Natte water	Doekfilter
Stof inlaat	mg/nm^3	1.000 - 10.000	1.000 - 10.000	1.000 - 10.000
Stof uitlaat	mg/nm^3	10 - 100	1 - 50	1 - 25
Max. efficiency	%	99	99,9	99,9
Temperatuur	$^{\circ}\text{C}$	< 400	dauwpunt	< 250

5 Hoge-temperatuur stofafscheiding

5.1 Inleiding

Hoge-temperatuur (HT) stofafscheiding is het afscheiden van stof uit gas bij een gastemperatuur hoger dan 250 °C. Is de gasdruk hoger dan 1 bar dan spreekt men van Hoge Temperatuur Hoge Druk (HTHD) stofafscheiding. De ontwikkeling van technieken voor HTHD stofafscheiding is noodzakelijk geworden voor processen zoals verbranding onder druk van steenkool in wervelbedden (PFBC) en vergassing van steenkool in combinatie met elektriciteitsopwekking (KV-STEG).

In Nederland wordt door de Technische Universiteit Delft (TUD) vanaf 1984 onderzoek uitgevoerd aan HTHD stofafscheiding achter een PFBC opstelling [5].

In opdracht van de Samenwerkende Elektriciteits Producenten (SEP) is in Bugge-num een demonstratie KV-STEG installatie gebouwd. De installatie heeft een vermogen van 250 MWe en is gebaseerd op het Shell stofwolk-vergassingsproces. De installatie is in april 1994 opgestart.

Een belangrijk onderdeel van de KV-STEG installatie is de gasreiniging. De gasreiniging bestaat uit een combinatie van bewezen technologieën. Het stof (vliegslak) wordt verwijderd met cyclonen en kaarsenfilters (Schumacher). De rest van de gasreiniging bestaat uit natte wassers (venturi-scrubbers) en een organische wasser.

Door toepassing van HTHD-gasreinigingstechnieken kan in principe het rendement van de KV-STEG installatie verhoogd worden. Dit was ondermeer een aanleiding voor het Ministerie van Economische Zaken (via NOVEM) om een systeemstudie uit te laten voeren naar de mogelijkheden van HTHD gasreiniging bij toekomstige commerciële KV-STEG installaties in Nederland. De studie diende ook de programmering aan te geven van verder onderzoek- en ontwikkelingswerk op dit gebied. De systeemstudie bestond ondermeer uit een inventarisatie van de stand van de techniek (1990) op het gebied van HTHD stofafscheiding [6].

De systeemstudie was gericht op de ervaringen met HT-stofafscheiding bij vergassing en verbranding van kolen. De toepassing van HT-stofafscheiding beperkt zich voorlopig ook tot deze processen. Uit de resultaten van de systeemstudie blijkt echter dat de volgende technieken ook interessant kunnen zijn voor toepassing bij AVI's:

- cycloon;
- elektrofilter (ESP);
- doekfilter;
- korrelbedfilter;
- kaarsfilter;
- cross-flow filter.

5.2 Cycloon

Principe

De afscheiding van deeltjes in een cycloon berust op de traagheid van deeltjes bij toepassing van centrifugaalkrachten. Het gas en de deeltjes worden in een cycloon aan een centrifugale stroming onderworpen. Dit kan op twee manieren worden uitgevoerd:

- het gas stroomt tangenciaal de cycloon in;
- het gas stroomt axiaal de cycloon in en wordt door vaste schoepen in werveling gebracht.

Door de opgewekte centrifugaalkrachten botsen de deeltjes tegen de wand van de cycloon. De deeltjes glijden langs de wand naar beneden en worden via een conusvormige uitloop afgevoerd.

Mogelijkheden

Cyclonen zijn toepasbaar voor stofaf scheiding bij temperaturen tot 1000 °C en drukken tot 100 bar. Cyclonen zijn in staat grote doorzetten (tot 25 m/s inlaatsnelheid) en massastromen stof (tot kg/m³) te verwerken. Het afscheidingsrendement van cyclonen is afhankelijk van de korrelgrootteverdeling van het aangeboden stof en varieert van 85 - 95%. Door cyclonen in serie (maximaal 3) of parallel (multicycloon) te schakelen kan het afscheidingsrendement verhoogd worden tot 99%. Bij de parallelle schakeling van de cyclonen (bijvoorbeeld in een multicycloon) wordt de rendementsverhoging bereikt door een lagere belasting per cycloon.

Voordelen van cyclonen zijn:

- ervaring in een groot aantal processen, ook bij hogere temperatuur;
- eenvoud van constructie;
- grote capaciteit;
- compactheid van installatie.

Nadelen van cyclonen zijn:

- relatief grote drukval;
- laag afscheidingsrendement (nageschakeld afscheidingssysteem noodzakelijk);
- tijdelijke verstoringen veroorzaken hoge stofconcentraties in de uitlaat;
- 'kleverige' vliegassen zijn moeilijk af te scheiden;
- deeltjes, met een korrelgrootte kleiner dan 5 micron, zijn niet af te scheiden.

Ontwikkelingen

Sinds de systeemstudie voor KV-STEG (1990) zijn nauwelijks nieuwe praktische ontwikkelingen gepubliceerd op het gebied van HT-stofaf scheiding met cyclonen. Indien er nog onderzoek wordt uitgevoerd, beperkt zich dat tot kleine sys-

*Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties**Fase 1: Voorstudie*

temen, waarbij de cyclonen als voorafscheiding gebruikt worden. Dergelijk onderzoek wordt uitgevoerd door TU Delft [7].

Theoretisch onderzoek aan cyclonen en validatie aan een koud model, met een diameter van 900 mm, is uitgevoerd door de TU Stuttgart. Door optimalisering van de constructie van de cycloon zou het afscheidingsrendement verhoogd kunnen worden tot meer dan 99% [8].

Ervaringen met cyclonen bij hoge temperaturen en drukken zijn verkregen bij verbranding en vergassing van kolen.

Bij de verbranding van kolen in wervelbedden worden cyclonen gebruikt bij temperaturen tot 850 °C en drukken tot 16 bar. De stofdeeltjes zijn bij deze verbrandingsprocessen relatief groot (100 - 1.000 micron) en eenvoudig af te scheiden. Het stof is ook niet 'kleverig' omdat het stof relatief veel onverbrande koolstof (char) bevat. De cyclonen worden bij deze processen als voorafscheider gebruikt.

Voor de vergassing van kolen worden de volgende technieken gebruikt:

- vastbed vergasser, 800 - 1000 °C, 10 - 100 bar;
- wervelbed vergasser, 800- 1100 °C, 10 -25 bar;
- stofwolk vergasser, 1500- 1900 °C, 25 - 40 bar;
- gesmolten ijzerbad vergasser, 1500 °C, 1 - 3 bar.

Bij de vergassing van bruinkool in een wervelbedvergasser (HT-Winklerproces) werden cyclonen gebruikt voor stofafscheiding bij circa 950 °C en 10 bar. Het afgevangen stof werd teruggevoerd in de vergasser. Het rendement van de cycloon was maximaal 94% [9].

De vergassing van kolen in de Shell stofwolkvergasser in Buggenum wordt uitgevoerd bij temperaturen van 1400 - 1600 °C en een druk van 28 bar. Na quenching en koeling van het kolengas tot een temperatuur van 235 °C, wordt het stof afgescheiden door een combinatie van cycloon en kaarsenfilter.

Shell heeft ervaringen met cyclonen bij hogere temperaturen, maar deze ervaringen zijn niet openbaar. Volgens Shell kunnen cyclonen bij kolenvergassing gebruikt worden tot aan een temperatuur van 400 °C. Boven deze temperatuur zou sintering van vliegias kunnen optreden en daardoor erosie van de cycloon kunnen veroorzaken.

Problemen

Geconstateerde problemen bij gebruik van cyclonen bij hoge temperatuur zijn onder andere:

- verlaging van het afscheidingsrendement met circa 20%, doordat de viscositeit van het gas toeneemt met de temperatuur;
- erosie van de cyclonen door de toenemende abrasieve eigenschappen van het stof tengevolge van sintering van de stofdeeltjes.

De verlaging van het afscheidingsrendement van de cycloon kan beperkt worden tot circa 10%, door uitwendige koeling van het conische gedeelte van de cycloon [10].

Door toepassing van slijtvaste materialen kan de erosie van de cycloon verminderd worden. De consequentie van deze maatregelen is echter dat de constructie van hete cyclonen ingewikkelder wordt en daardoor de kosten toenemen.

5.3 Elektrofilter

Principe en mogelijkheden

In hoofdstuk 4.2 zijn het principe en de mogelijkheden van elektrofilters (ESP) beschreven.

In de systeemstudie voor KV-STEG (1990) werden de volgende conclusies getrokken:

- ESP lijkt voor HTHD stofafscheiding een realistische technologie, die vrij snel commercieel beschikbaar kan komen;
- de reinigingstemperatuur is echter beperkt tot circa 400 °C, door mogelijke 'kleverige' eigenschappen van het afgevangen stof boven deze temperatuur;
- de constructiematerialen van een ESP zijn bij temperaturen boven 400 °C beperkt resistent tegen corrosieve componenten in het gas.

Ontwikkelingen

In de recente literatuur (na 1990) zijn weinig nieuwe ontwikkelingen gevonden van het gebruik van ESP's voor HT-stofafscheiding bij gastemperaturen hoger dan 400 °C.

Door de Universiteit van Karlsruhe is een onderzoek, op laboratoriumschaal, uitgevoerd om een ESP te testen bij een gasdruk tot 20 bar en een gastemperatuur tot 700 °C. De resultaten van dit onderzoek tonen aan, dat het principe van elektrostatische stofafscheiding ook mogelijk is bij hoge temperaturen (400 °C - 700 °C). Voorwaarde is echter dat de gasdruk verhoogd wordt tot circa 20 bar [11].

5.4 Doekfilter

Principe en mogelijkheden

In hoofdstuk 4.3 zijn het principe en de mogelijkheden van een doekfilter beschreven.

Ontwikkelingen

Door toepassing van metaalvezel en keramische vezel kunnen doekfilters gebruikt worden voor HT-stofafscheiding bij temperaturen hoger dan 250 °C.

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

Metaalvezel

Roestvast staal (Bekinox) en Inconel worden gebruikt als materialen voor de fabricage van metaalvezeldoekfilters. Deze metaalvezeldoekfilters kunnen gebruikt worden voor HT-stofafscheiding bij temperaturen tot 450 °C, respectievelijk 600 °C. De filtratie eigenschappen van metaalvezeldoekfilters zijn erg gunstig. Bij een vergelijkend onderzoek aan commercieel verkrijgbare metaalvezeldoekfilters zijn afscheidingsrendementen hoger dan 99,9% gemeten. De resultaten van de metaalvezeldoekfilters waren beter dan die van gelijktijdig onderzochte keramische vezeldoekfilters [12].

Nadelen van metaalvezeldoekfilters voor gebruik bij HT-stofafscheiding zijn:

- vermindering op den duur van mechanische sterkte;
- corrosieve aantasting door zure gassen;
- hoge kostprijs.

Keramische vezel

Keramische vezels worden gemaakt uit de grondstoffen door verspinning van de smelt bij hoge temperaturen, en de laatste tijd ook door verspinning uit oplossingen. Het uitgangsmateriaal is een mengsel van Aluminiumsilicaat ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) en Boriumoxide (B_2O_3). Keramische vezeldoekfilters hebben een diameter van circa 150 mm en een lengte van circa 2500 mm. Het werkzame oppervlak is circa 1,5 m².

Voordelen van keramische vezeldoekfilters:

- geschikt voor temperaturen tot 850 °C.

Nadelen van keramische vezeldoekfilters:

- slecht bestand tegen fluorwaterstofzuur, fosforzuur en alkalimetalen;
- rekristallisatie van keramisch materiaal door reducerende gasatmosfeer;
- materiaal is moeilijk verwerkbaar;
- filtratie eigenschappen slechter dan doekfilters van polymere materialen.

5.5 Korrelbedfilter

Principe

Korrelbedfilters worden reeds circa 80 jaar gebruikt voor de reiniging van gassen bij temperaturen tot aan 450 °C. Sedert het begin van de 60-er jaren is er veel inspanning verricht om korrelbedfilters te ontwerpen voor condities van hoge temperatuur en druk. In eerste instantie voor toepassing voor de regeneratie van verbruikt katalysatormateriaal in de raffinage industrie, later ook voor toepassing in PFBC en vergassingsprocessen.

De belangrijkste afscheidingsmechanismen zijn:

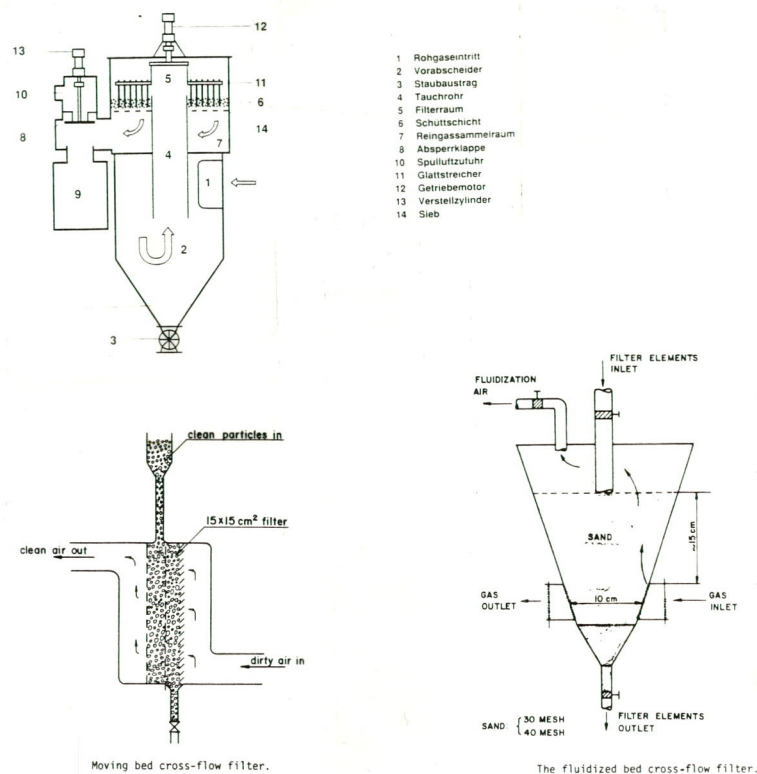
- uitzakken onder invloed van zwaartekracht;
- impactie;
- directe interceptie.

*Hoge-temperatuur stofaf scheiding bij afvalverbrandingsinstallaties**Fase 1: Voorstudie*

Het afscheidingrendement neemt toe met afnemende grootte van de bedkorrels. Nadeel is dat de drukval toeneemt en daardoor de toelaatbare gassnelheid afneemt. Dit moet weer gecompenseerd worden door een groter bedvolume.

Korrelbedfilters bestaan in de volgende uitvoeringen (figuur 5.1):

- gepakt bed filter;
- glijdend bed filter;
- wervelbed filter.



Figuur 5.1 Verschillende principes korrelbedfilter

Bij een **gepakt** bed filter blijft het filtermedium gedurende het filtratieproces op zijn plaats. Filtratie vindt plaats in het bed en aan het oppervlak. Het filter wordt gereinigd door middel van perslucht in tegenstelde stromingsrichting of door fluïdisatie van het bed.

Bij een **glijdend** bed filter wordt het filtermedium continu of discontinu afgevoerd onder invloed van de zwaartekracht. Filtratie vindt plaats in het bed. Het filter wordt gereinigd door afvoer van de verontreinigde korrels, die geregenereerd kunnen worden.

Bij een **wervelbed** korrelfilter stroomt het te reinigen gas in opwaartse richting door een bed met korrels. De gassnelheid is zodanig dat het bed in werveling wordt gebracht. De stofdeeltjes hechten zich aan de bedkorrels. Door aftappen van het vervuilde bedmateriaal en toevoer van schoon bedmateriaal wordt het wervelbed korrel filter gereinigd.

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

Mogelijkheden

Voordelen van korrelbedfilters zijn:

- geschikt voor 'kleverige' stofdeeltjes;
- mogelijke combinatie van stofafscheiding en binding zure componenten;
- hoge filtratiesnelheid.

Nadelen van korrelbedfilters zijn:

- extra energieverbruik voor het vaste stof transport;
- complexe systemen;
- hoge drukval.

Ontwikkelingen

De ontwikkeling van korrelbedfilters richt zich met name op de mogelijkheden van stofafscheiding in combinatie met de afvangst van zure gassen.

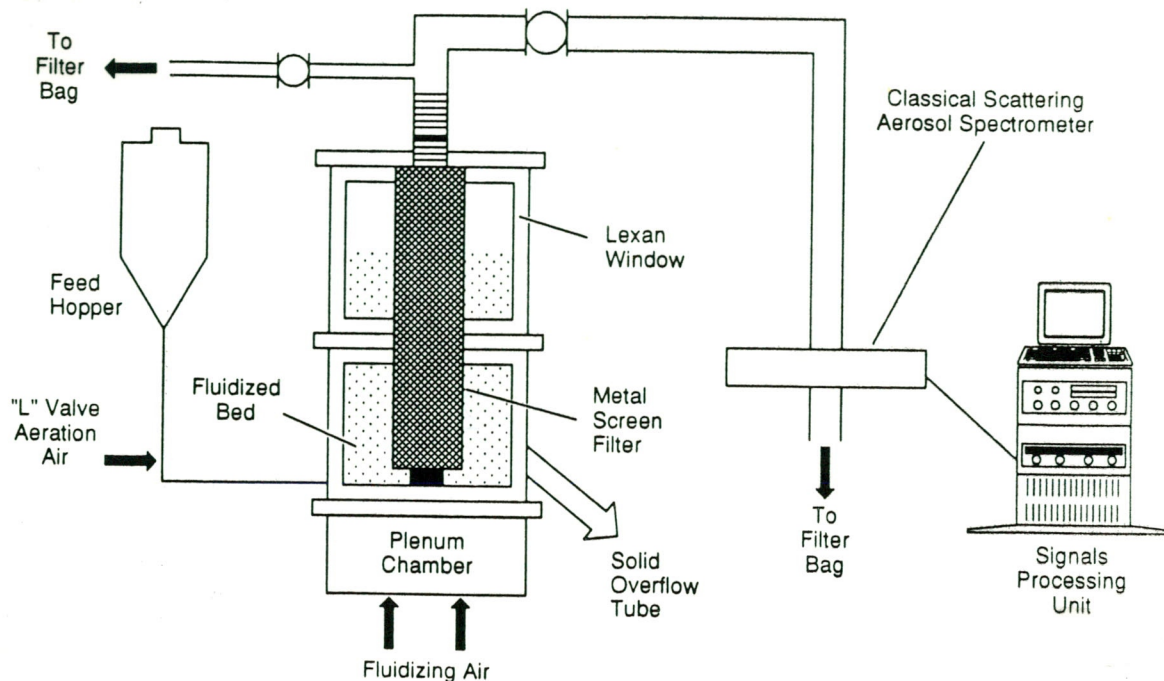
In Japan wordt door Mitsubishi Heavy Industries (MHI) vanaf 1991 onderzoek uitgevoerd in een KV pilot plant (kolendebiet van 200 ton/dag). Het kolengas wordt gereinigd door korrelbedfilters, die in serie geschakeld zijn. Het stof wordt afgevangen in het eerste korrelbedfilter (vast-bed uitvoering). De zwavelverbindingen worden afgevangen in de volgende korrelbedfilters (wervelbed uitvoering met FeO korrels). In Japan wordt deze reinigingstechniek beschouwd als een van de twee mogelijkheden voor gasreiniging bij KV voor de komende jaren. De andere mogelijkheid is een combinatie van stofafscheiding door keramische filterkaarsen en zwavelafvangst door FeO in een vast bed [13].

Recent onderzoek, uitgevoerd door de Universiteit van Karlsruhe, toont aan dat gecombineerde stofafscheiding en afvangst van HCl en SO₂ in een korrelbedfilter met CaCO₃ korrels goede mogelijkheden bieden [14].

De resultaten op laboratoriumschaal werden bevestigd door onderzoek bij de reiniging van afgassen van een aluminiumsmelterij. Stofdeeltjes werden afgevangen in een korrelbedfilter met kwartskorrels bij een temperatuur van circa 700 °C. HCl en SO₂ werden afgevangen in een tweede korrelbedfilter met CaO korrels bij een temperatuur van circa 500 °C of met NaHCO₃ korrels bij een temperatuur van circa 200 °C [15].

Een gemodificeerd wervelbed korrelfilter is ontwikkeld door Morgontown Energy Technology Center (METC) in de V.S. Figuur 5.2 geeft een stroomschema van het filtratieprincipe.

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie



Figuur 5.2 Stroomschema gemodificeerd wervelbed korrelfilter METC

In het wervelbed wordt een scherm van fijn gaas aangebracht. Op het scherm zet zich een laag af van fijn bedmateriaal. Deze laag fungeert als filterlaag. In de filterlaag wordt stof afgevangen en eventueel zure gassen gebonden.

Er zijn tot nu toe slechts voorlopige resultaten met een koud schaalmodel bekend. Voordelen van het principe zouden zijn een lage drukval over het bed bij hoge filtratiesnelheden. Uit de eerste resultaten bleek echter dat de drukval over het bed hoger moet zijn om de fluïdisatie van het bed in stand te houden. Het gas kiest namelijk de weg van de minste weerstand en er ontstaat in het bed een voorkeurstroom van het gas direct naar het filtratiescherm.

Verder onderzoek zal uitgevoerd worden. Het systeem zal getest worden onder realistische condities (hogere gastemperaturen en stofbelasting) tijdens lange duurbeproevingen.

Onderzocht zal worden:

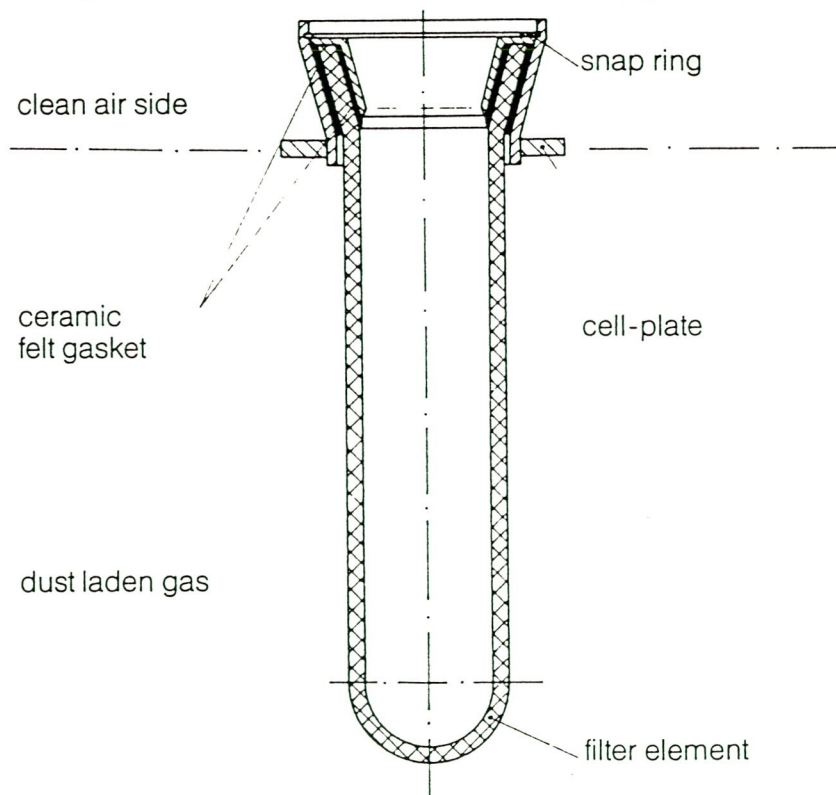
- gedrag en verblijftijd van het stof in het bed en op de filtratielaag;
- vorming van de filtratielaag en de invloed van de filtratielaag op de fluïdisatie in het bed.

Potentiële toepassingen van het wervelbed korrelfilter zijn stofafvangst en bindingen van zure gassen (SO_2) geïntegreerd met de verbranding in atmosferische en drukwervelbedden. Het wervelbed korrelfilter kan eventueel ook na een verbrandingsinstallatie geplaatst worden voor HT-stofafscheiding in combinatie met binding van zure gassen [16].

5.6 Kaarsfilter

Principe

Kaarsfilters behoren tot het type barrière filter met een hoog afvangstrendement ($> 99,9\%$). Figuur 5.3 geeft een voorbeeld van een (keramisch) kaarsfilter. Het filtermedium bestaat uit keramisch materiaal, gesinterd metaal of dunne folies voorzien van spleten en of poriën. De materialen zijn gevormd tot een cilinder, die aan een zijde open is. De open zijde wordt gemonteerd in een pijpplaat. Filtratie kan zowel van buiten naar binnen als omgekeerd plaats vinden. Bijna alle fabrikanten passen een filtratie van buiten naar binnen toe, zoals ook bij doekfilters het geval is. De enige uitzondering, tot nu toe, zijn de kaarsfilters van Asahi Glass Company uit Japan. Deze filterkaarsen zijn gemaakt van corderiet en hebben een grotere diameter (circa 170 mm) dan de standaard filterkaarsen (circa 60 mm). De filterkaarsen worden samengebouwd tot een filterinstallatie. Op het ogenblik worden filterinstallaties gebouwd met meer dan 1000 filterkaarsen. De normale constructie is dat de filterkaarsen verticaal hangen aan een pijpplaat. Er zijn echter ook installaties waarbij de filterkaarsen horizontaal gemonteerd zijn.



Figuur 5.3 Keramisch kaarsfilter

Filtermaterialen

Voor de fabricage van de filterkaarsen worden de volgende materialen gebruikt:

- metalen, in de vorm van korrels, vezels en folies;
- keramische materialen, in de vorm van korrels en vezels.

Metalen filterkaarsen

De metalen filterkaarsen worden gemaakt van roetsvast staal of Inconel in de vorm van korrels, vezels of folies. Deze filterkaarsen hebben een specifiek toepassingsgebied, zoals de procesindustrie en de metaalindustrie.

De filterkaarsen zijn geschikt voor temperaturen tot aan maximaal 600 °C. Boven deze temperatuur zijn metalen filterkaarsen gevoelig voor corrosie. Metalen filterkaarsen worden niet gebruikt voor HT-stofafscheiding bij kolenverbrandings- en kolenvergassingsprocessen.

Keramische filterkaarsen

De volgende keramische grondstoffen worden gebruikt:

- | | |
|-------------------|---|
| — Siliciumcarbide | SiC; |
| — Aluminiumoxide | Al ₂ O ₃ ; |
| — Siliciumoxide | SiO ₂ ; |
| — Boriumoxide | B ₂ O ₃ ; |
| — Magnesiumoxide | MgO; |
| — β-Corderiete | Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈ . |

SiC wordt uitsluitend in de vorm van korrels gebruikt. De grondstoffen worden in bepaalde verhoudingen met elkaar gemengd en eventueel met toevoeging van bindmiddelen geperst tot korrels of vezels. Via sintering van korrels of persing van vezels worden de poreuze filterkaarsen vervaardigd.

Op basis van het gebruikte materiaal (korrels of vezels) worden keramische filterkaarsen als volgt ingedeeld:

- hoge dichtheid keramische filterkaarsen (high density, low porosity ceramics);
- lage dichtheid keramische filterkaarsen (low density, high porosity ceramics).

Hoge-dichtheid keramische filterkaarsen

Deze filterkaarsen bestaan uit aan elkaar gesinterde keramische korrels. De dichtheid van het filtermateriaal is circa 1300 kg/m³. De porositeit van het filtermateriaal is circa 0,3 tot 0,5.

De filterkaarsen hebben een maximale lengte van 1500 mm en een diameter van 60 mm. Het filteroppervlak is circa 0,26 m².

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

De eerste keramische filterkaarsen bestonden uit gesinterde SiC korrels (Schumacher, Didier). Tegenwoordig levert Schumacher verschillende soorten filterkaarsen op basis van SiC. Tabel 7.2 geeft een overzicht van het huidige leveringsprogramma van Schumacher.

Lage-dichtheid keramische filterkaarsen

Deze filterkaarsen bestaan uit keramische vezels, die met speciale bindmiddelen worden gemengd. Het mengsel wordt geperst in de vorm van een filterkaars. De dichtheid van het filtermateriaal is circa $0,2 \text{ kg/m}^3$. De porositeit van het filtermateriaal is circa 0,8 tot 0,9.

De filterkaarsen hebben een lengte van circa 1000 mm (Cerel) of 1500 mm (BWF) en een diameter van 60 mm (Cerel) tot 150 mm (BWF). Het filteroppervlak is circa $0,19 \text{ m}^2$ respectievelijk $0,66 \text{ m}^2$.

Leveranciers van deze filterkaarsen zijn onder andere BWF in Duitsland en Cerel in Engeland. Tabel 7.3 geeft een overzicht van deze filterkaarsen.

Mogelijkheden

Kaarsfilters van keramische materialen hebben de volgende voor- en nadelen:

Voordelen:

- grote duurzaamheid van de materialen;
- hoog afscheidingsrendement ($> 99,9\%$);
- geschikt voor hoge drukken (SiC filters);
- eenvoudig te reinigen (via pulse jet met perslucht);
- lage kostprijs (lage dichtheid filterkaarsen circa $f 50,=/\text{stuk}$);
- hoge filtratiesnelheid (tot $0,1 \text{ m/s}$).

Nadelen:

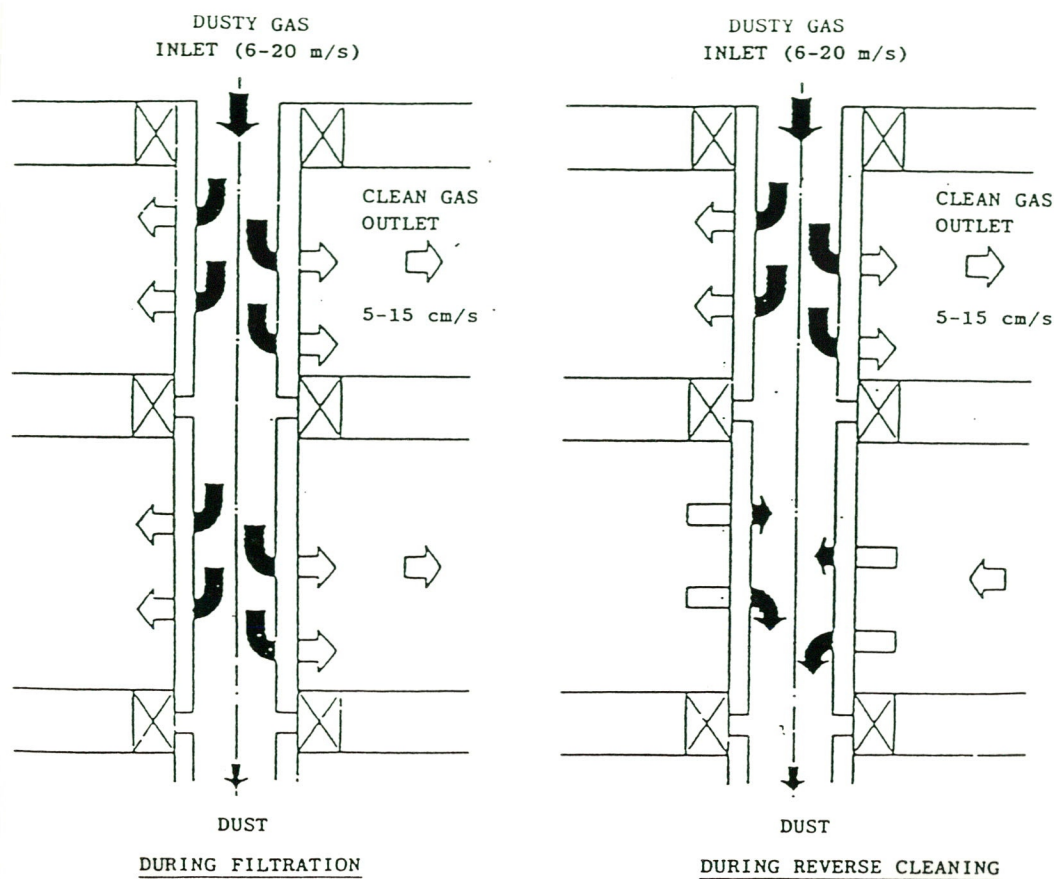
- constructie van de pijpplaat is kritisch;
- kans op breuk.

Ontwikkelingen

Door Schumacher zijn de laatste jaren nieuwe typen keramische kaarsfilters ontwikkeld op basis van SiC. Er zijn nu filters, die uit een mengsel van korrels en vezels bestaan (Schumacel). Een verdere ontwikkeling is het type Dia-Schumalith, dat opgebouwd is uit een grof poreuze drager van SiC en een toplaag van fijne SiC korrels en minerale vezels. Dit type filterkaars heeft een lage drukval (circa 35 mbar) bij gas-temperaturen tot 850°C en een filtratiesnelheid van $0,06 \text{ m/s}$. Verdere informatie over de Schumacher filters is opgenomen in tabel 7.2.

Door Asahi Glass Company in Japan is een kaarsfilter ontwikkeld, dat afwijkt van de kaarsfilters van Schumacher en Cerel (zie figuur 5.4).

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie



Figuur 5.4 Principeschema kaarsfilter Asahi Glass Company

De cilindervormige elementen zijn aan beide uiteinden open en worden geklemd tussen twee pijpplaten. De elementen zijn gemaakt van β -corderiete. De elementen hebben een lengte van circa 6 m, een uitwendige diameter van 170 mm en een wanddikte van 15 mm. Het werkzame filteroppervlak is circa 2 m² per element.

De filterelementen worden van binnen naar buiten doorstroomd. De elementen hebben een drukval van circa 100 mbar bij een filtratiesnelheid van 0,06 m/s.

De filters worden gereinigd door een luchtpuls van buiten naar binnen (reverse puls cleaning).

Voordelen van reverse puls cleaning zijn:

- reverse pulse cleaning verhoogt door de uitwendig aangebrachte druk de mechanische sterkte van de filterkaars;
- de pulsdruk kan verhoogd worden tot circa 40 bar;
- de benodigde tijdsduur voor de reiniging is slechts 0,1 tot 0,4 seconde.

De filterelementen zijn ontworpen voor HT-stofafscheiding bij wervelverbranding onder druk (PFBC) en kolenvergassing (KV). Ervaringen zijn opgedaan bij een pilot plant in Yubari in Japan.

Een filtersysteem, met 21 elementen, is geplaatst achter een kolengestookte 10 MW PCFB pilot plant van Ahlstrom in Karhula Finland. Figuur 5.5 geeft een stroomschema van de filterinstallatie en tabel 5.1 geeft een overzicht van de ontwerpparameters voor de beproevingen van het filtersysteem.

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

Tabel 5.1 Ontwerpparameters voor beproeving van filterelementen Asahi Glass Company in 10 MW PCFB pilot plant Ahlstrom, Karhula, Finland [17]

Parameter	Eenheid	
Temperatuur gas	°C	880
Druk gas	bar	16
Massastroom gas (max)	kg/s	5,5
Oppervlak filter	m ²	58 (26 kaarsen)
Filterkaars ID	mm	140
Filterkaars ID	mm	170
Filtratiesnelheid (max)	m/s	0,06
Drukval (max)	mbar	200
Puls (lucht) druk (max)	bar	40
Puls (lucht) tijd (max)	s	0,4
Puls (lucht) temperatuur	°C	50
% oppervlakreiniging/puls	%	50

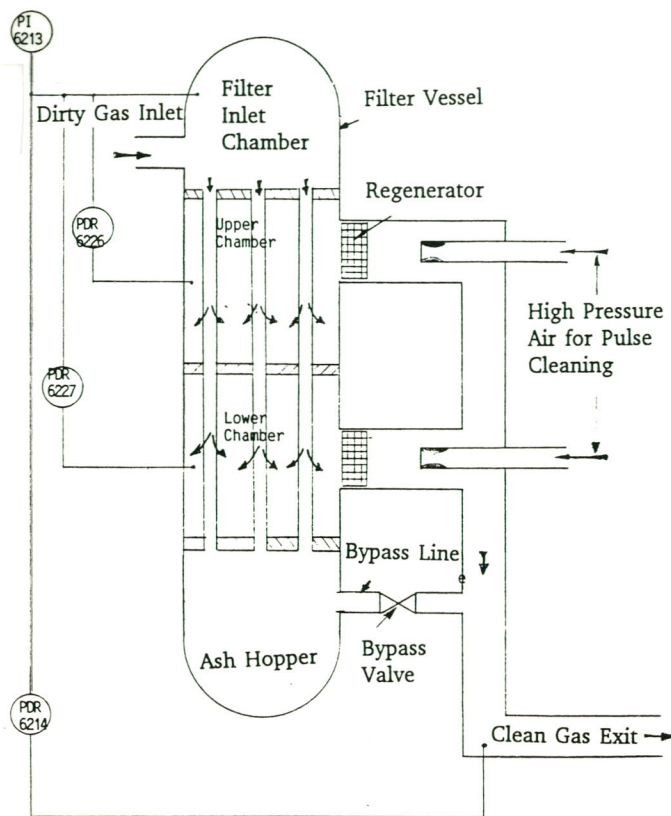
Het filter is geschakeld achter een hete cycloon. De stofbelasting van het filter is circa 10 g/m³ bij een temperatuur van 850 °C en een druk van 10 bar. De berekende drukval is circa 100 mbar bij de nominale condities.

Het onderzoek is gestart in 1989 en zou minimaal 3 jaar duren. De eerste gepubliceerde resultaten tonen aan dat de reiniging (reverse pulse cleaning) van de filterkaarsen effectief is. De reiniging werd uitgevoerd bij een maximaal drukverschil van 150 mbar. De drukval over het filter na de reiniging was lager dan 100 mbar. De laagdikte op de binnenkant van de filterkaarsen was circa 3 tot 5 mm. Deze voorlopige resultaten zijn in overeenstemming met de ontwerpcondities.

Problemen waren er met de afsluiters in de omloopleiding (zie figuur 5.5). Deze afsluiters sluiten op het moment dat de filterkaarsen schoon geblazen worden. De afsluiters vertoonden lekkage over de klepzittingen.

Het filtersysteem zal door Asahi opgeschaald worden voor HT-stofafscheiding in 300 MW_e PFBC installaties. Het filtersysteem bestaat dan uit maximaal 72 elementen [17].

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie



Figuur 5.5 Stroomschema filterinstallatie Ahlstrom met Asahi filterkaarsen

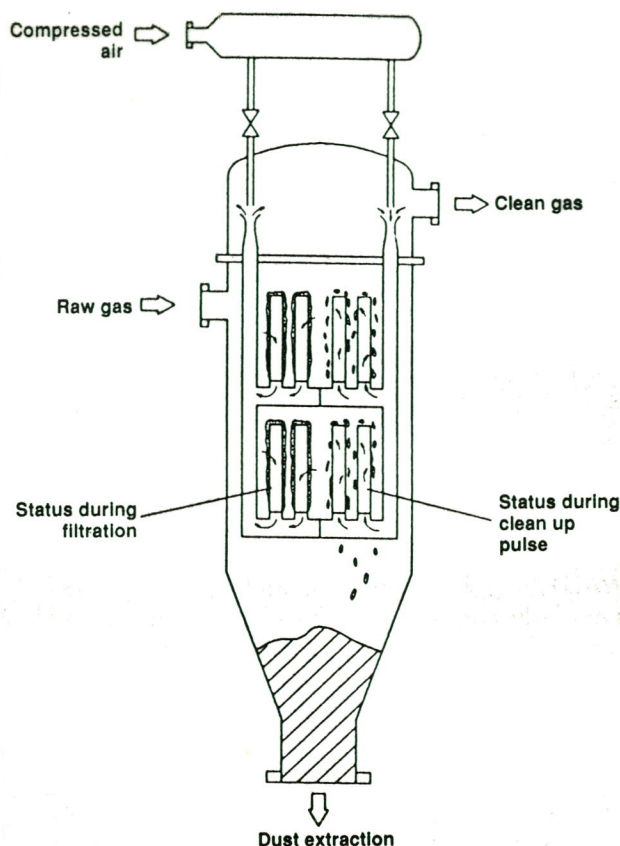
Een opmerkelijke onderzoek wordt uitgevoerd door LLB Energietechnik GmbH in Oberhausen in Duitsland. LLB is een gemeenschappelijke dochteronderneming van Lurgi, Lentjes en Babcock. LLB onderzoekt in een 15 MW_{th} PFBC testinstallatie de stabiliteit en de filtratie-eigenschappen van keramische filterkaarsen, die wel verticaal maar omgekeerd zijn gemonteerd. De filterkaarsen hangen dus niet in een pijpplaat maar staan op een verdeelheader. Deze constructie biedt de mogelijkheid om filterkaarsen te 'stapelen' via verdeelheaders op verschillende hoogtes in het filtratievat (zie figuur 5.6).

Tot augustus 1993 hebben de filterkaarsen meer dan 1000 bedrijfsuren gemaakt bij een gastemperatuur van 350 °C.

Het volgende doel is de bouw van een filtratievat met 600 kaarsen voor het 300 MW_e KOBRA vergassingsproject (RWE/RheinBraun/Lurgi).

Het uiteindelijke doel is het ontwerp en de fabricage van filtratie systemen met maximaal 1800 kaarsen in een drukvat [18].

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie



Figuur 5.6 Principeschema filtratievat met 'staande' keramische filterkaarsen LLB

5.7 Cross-flow filter

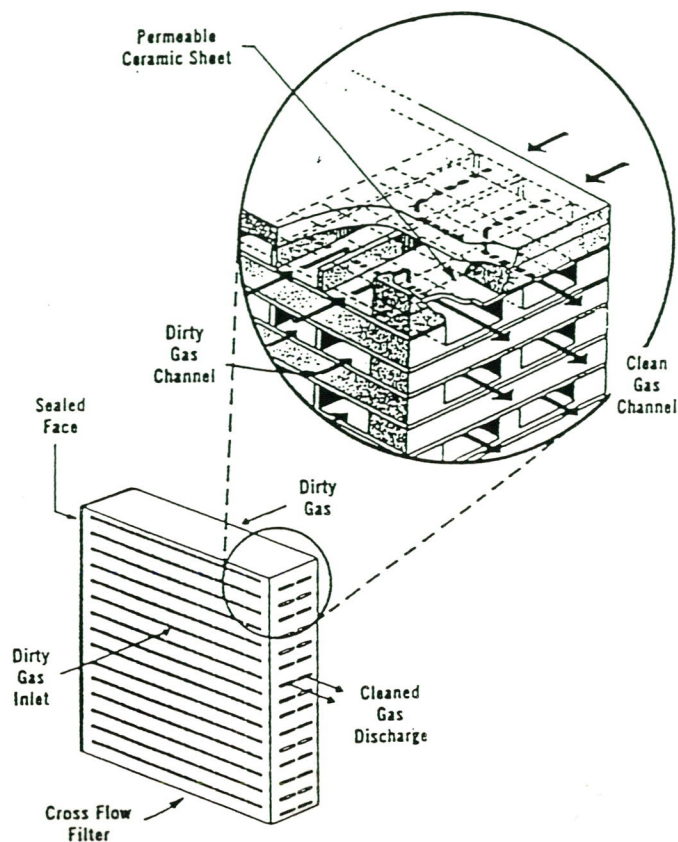
Principe

Het cross-flow filter is een keramisch filter en ontwikkeld door Westinghouse in samenwerking met Coors Ceramics voor HT-stofafscheiding bij PFBC en de laatste jaren ook voor KV.

Figuur 5.7 toont het principe van een cross-flow filter.

Een filterelement bestaat uit dunne keramische platen met ribben, die zo zijn gestapeld, dat in de opeenvolgende lagen kanalen worden gevormd, die loodrecht op elkaar staan. Een van de vier zijden van het filter is afgesloten. Het vuile gas komt in het filter door de kanaalopeningen, die loodrecht op de afgesloten zijde staan. Het vuile gas stroomt door het poreuze keramische materiaal en verlaat het filter door de openingen parallel aan de afgesloten zijde. Filterreiniging vindt plaats door reverse cleaning. Vroeger werden de filters gemaakt door losse platen aan elkaar te sinteren. Deze constructie veroorzaakte problemen als scheurvorming en delaminatie. Een nieuwe ontwikkeling is de vorming uit een monolitisch stuk keramiek [20].

Schematic Representation of Cross Flow Filter



Figuur 5.7 Principeschema keramisch cross-flow filter

Mogelijkheden

Voordelen van cross-flow filters zijn:

- zeer gunstige verhouding oppervlak/volume;
- compacte vorm;
- relatief klein filtervat door stapeling van filterelementen.

Nadelen van cross-flow filters zijn:

- keramische materialen als alumina/mulliet veroorzaken glasvorming;
- problemen met afdichtingen.

Ontwikkelingen

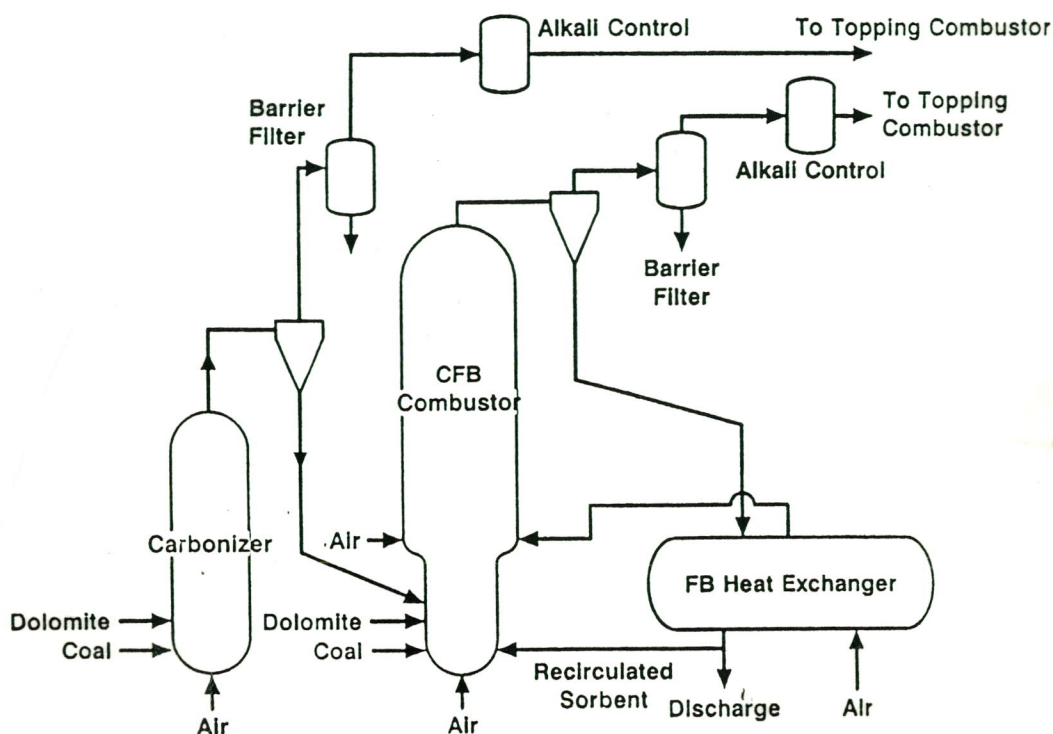
Cross-flow filters zijn getest achter een PFBC pilot plant van de Universiteit van New York (USA) en een KV pilot plant van Texaco in Montebello (USA). Tot 1993 hebben cross-flow filterelementen circa 8000 bedrijfsuren gemaakt, waaronder lange duurtesten van 1300 uur en 2000 uur [20], [21].

Een filterinstallatie op commerciële schaalgrootte is getest achter een zogenaamde tweede generatie PFBC pilot plant van Foster Wheeler in Livingstone New Jersey.

Figuur 5.8 geeft een stroomschema van deze installatie. De kolengestookte wervelbedvergasser produceert kolengas en char bij een temperatuur van 816 tot 927 °C en

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

een druk van 10 tot 14 bar. De char wordt verbrand in een circulerend drukwervelbed en vormt rookgas. Het stof in de twee gasstromen (kolengas en rookgas) werd afgescheiden door filterinstallaties met keramische cross-flow filterelementen.



Figuur 5.8 Stroomschema PFBC pilot plant Foster Wheeler, Livingstone, N.J. USA

Figuur 5.9 geeft een stroomschema van de filterinstallatie.

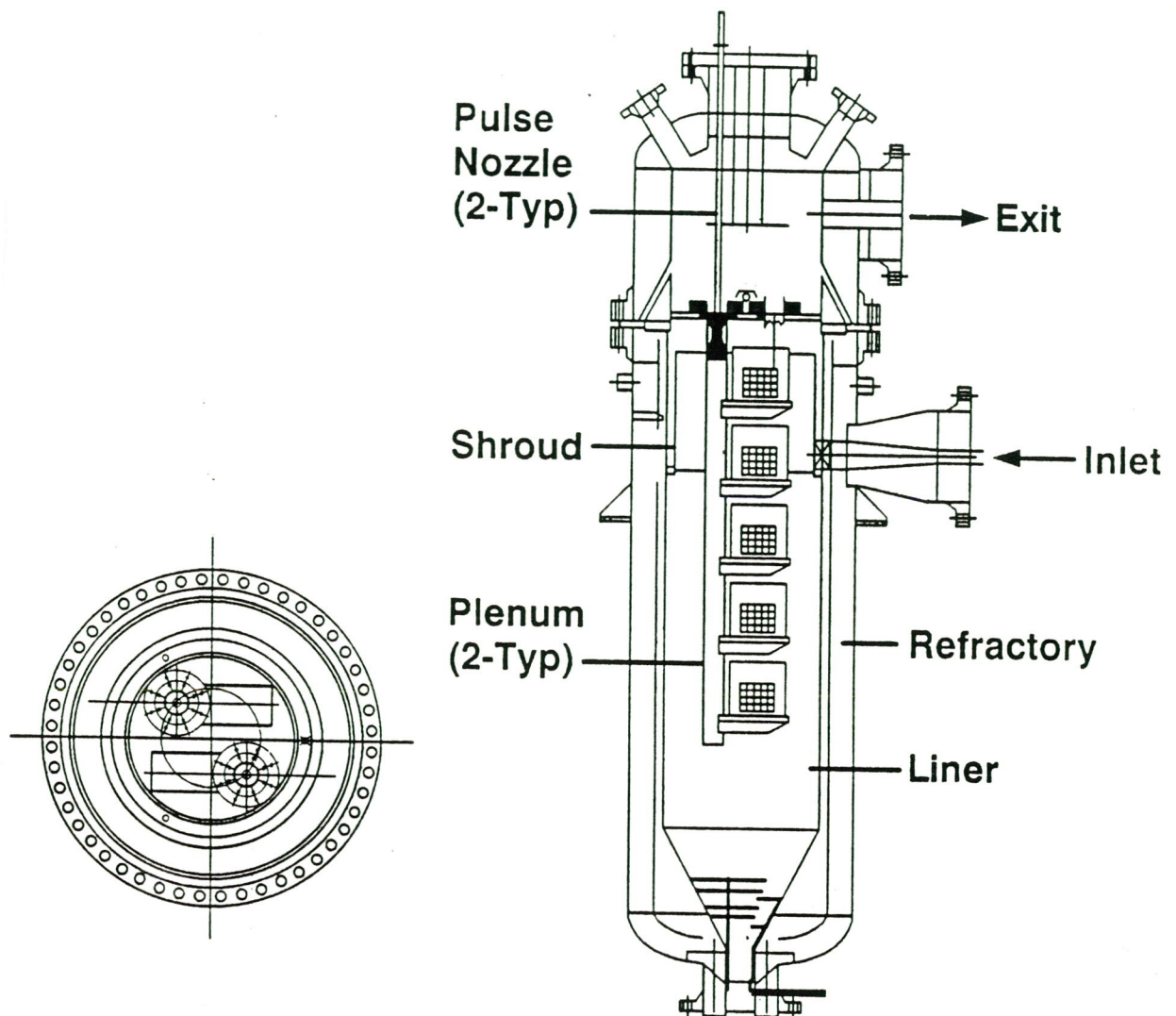
Het filtervat (hoogte 5,32 m, diameter 1,27 m) bevat 10 filterelementen (afmetingen 30,5 * 30,5 * 10,2 cm). De nominale vuile gasstromen zijn circa 200 m³/h (kolengas) en 700 m³/h (rookgas). De stofconcentraties zijn respectievelijk circa 10 en circa 20 g/m³. De filtratiesnelheid is circa 0,8 m/s.

De filterinstallatie in de kolengasstroom is getest tijdens een duurbeproeving van circa 170 uur. De nominale gasstroom was circa 170 m³/h bij een maximale gastemperatuur van 816 °C en een stofconcentratie van circa 5 tot 35 g/m³.

Tijdens de beproeving varieerde de drukval van circa 20 tot circa 50 mbar. De tijdsduur tussen twee reinigingspulsen varieerde van 6 tot 50 minuten. De stofconcentratie aan de uitlaat van de filterinstallatie was lager dan 5 mg/m³.

Na 100 uur ontstond een lek in de filterinstallatie. De stofconcentratie aan de uitlaat steeg tot circa 900 mg/m³. Na afloop van de test bleek bij inspectie dat de bevestigingsconstructie van de filterelementen was vervormd en dat twee van de tien filterelementen waren beschadigd. De porositeit van de gebruikte filterelementen was circa 20% van de oorspronkelijke porositeit [21].

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie



Figuur 5.9 Principeschema van cross-flow filterinstallatie

5.8 Evaluatie en selectie van HT-stofafscheidingstechnieken voor mogelijke toepassing bij AVI's

Bij de evaluatie van de prestatiekenmerken van de beschreven technieken voor HT-stofafscheiding en de selectie voor mogelijke toepassing bij AVI's moet rekening gehouden worden met het feit dat de technieken tot nu toe alleen zijn toegepast bij verbranding en vergassing van kolen.

5.8.1 Evaluatie

De prestatiekenmerken van de technieken voor HT-stofafscheiding, beschreven in de hoofdstukken 5.2 tot en met 5.7, zijn in tabel 5.2 samengevat.

Tabel 5.2 Prestatiekenmerken van technieken voor HT-stofafscheiding

Techniek	Afscheidingsrendement %	Drukval mbar	Filtratiesnelheid m/s	Energiegebruik
Cycloon	90	75 - 250	< 20	laag
Elektrofilter	> 99	3 - 6	0,01 - 0,03	gemiddeld
Korrelbedfilter	> 99	60 - 100	0,15 - 0,2	hoog
Doekfilter	> 99	10 - 35	0,01 - 0,03	laag
keramisch				
Kaarsfilter	> 99,5	20 - 40	0,03 - 0,07	gemiddeld
l-d keramiek				
Kaarsfilter	> 99,5	100 - 200	0,03 - 0,07	gemiddeld
h-d keramiek				
Kaarsfilter	> 99,5	80 - 125	0,03 - 0,05	gemiddeld
Asahi				
Cross-flow filter	> 99,5	25 - 75	0,03 - 0,05	gemiddeld
Westinghouse				

5.8.2 Selectie

De mogelijke toepassing van een techniek voor HT-stofafscheiding bij AVI's is beoordeeld op basis van de volgende criteria.

Criteria

Technieken voor HT-stofafscheiding bij AVI's, moeten functioneren onder de volgende omstandigheden:

- hoge rookgastemperaturen, tot maximaal 1000 °C;
- corrosieve rookgassen, door aanwezigheid van zure componenten;

*Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties**Fase 1: Voorstudie*

- abrasieve eigenschappen van vlieggas;
- stofconcentraties tot circa 10 g/m³;
- afscheidingsrendement minimaal 99%;
- lage drukval bij atmosferische druk;
- laag energieverbruik.

Tevens zijn aan de technieken de volgende voorwaarden gesteld:

- de techniek moet zijn waarde bewezen hebben tijdens langdurige beproevingen bij voorkeur in praktijkinstallaties of minimaal op pilot plant schaal.

Op basis van een vergelijking tussen bovengenoemde criteria en de prestatiekenmerken van de verschillende technieken voor HT-stofafscheiding, beschreven in de hoofdstukken 5.2 tot en met 5.7, is een selectie gemaakt van technieken, die geschikt kunnen zijn voor toepassing bij AVI's.

De volgende technieken kunnen toegepast worden voor HT-stofafscheiding bij AVI's:

- cyclonen, als voorafscheider;
- keramische (lage-dichtheid) filterkaarsen.

Cyclonen kunnen toegepast worden, als voorafscheider, om de volgende redenen:

- eenvoudige constructie;
- door toepassing van slijtvaste en corrosievaste materialen geschikt tot temperaturen tot 1000 °C;
- ervaringen op praktijkschaal bij vergassing en verbranding van kolen;
- laag energiegebruik.

Cyclonen kunnen echter door een te laag afscheidingsrendement (circa 90%) alleen toegepast worden als voorafscheider. De rest van de vliegastroom dient afgescheiden te worden in het nageschakelde gedeelte van de rookgasreiniging.

Keramische (lage-dichtheid) filterkaarsen kunnen toegepast worden, om de volgende redenen:

- bestand tegen rookgastemperaturen tot 1000 °C;
- bestand tegen corrosieve rookgascomponenten;
- bestand tegen erosie door lage filtratiesnelheid (max. 0,06 m/s);
- hoog afscheidingsrendement (> 99%);
- lage drukval (20 - 40 mbar);
- ervaringen op praktijkschaal bij vergassing en verbranding van kolen.

De andere technieken kunnen voorlopig niet worden toegepast voor HT-stofafscheiding bij AVI's om de volgende redenen:

ESP:

- niet toepasbaar voor gastemperaturen hoger dan 400 °C wegens beperkte resistentie van constructiematerialen;
- voor handhaving van het afscheidingsrendement (circa 99%) dient bij hoge gastemperaturen het afscheidingsoppervlak vergroot te worden;
- geen ervaringen bij hogere temperatuur dan 400 °C bekend op praktijkinstallaties.

Doekfilter:

- polymere vezelmaterialen niet bestand tegen temperaturen hoger dan 300 °C;
- metalen vezelmaterialen bij hoge temperaturen niet bestand tegen corrosieve gascomponenten (HCl);

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

- keramische vezelmateriaal niet geschikt door rekristallisatie veroorzaakt door HF.

Korrelbedfilter:

- hoge drukval;
- hoog energiegebruik;
- slechts ervaringen bekend op pilot plant schaal bij verbranding en vergassing van kolen, nog geen ervaringen bij praktijkinstallaties.

Cross-flow filter:

- complexe constructie;
- constructieve problemen met afdichtingen;
- vermindering van porositeit tijdens bedrijf;
- alleen ervaringen bekend op pilot plant schaal.

6 Mogelijkheden van HT-stofafscheiding bij AVI's

6.1 Keuze van het temperatuurniveau voor HT-stofafscheiding

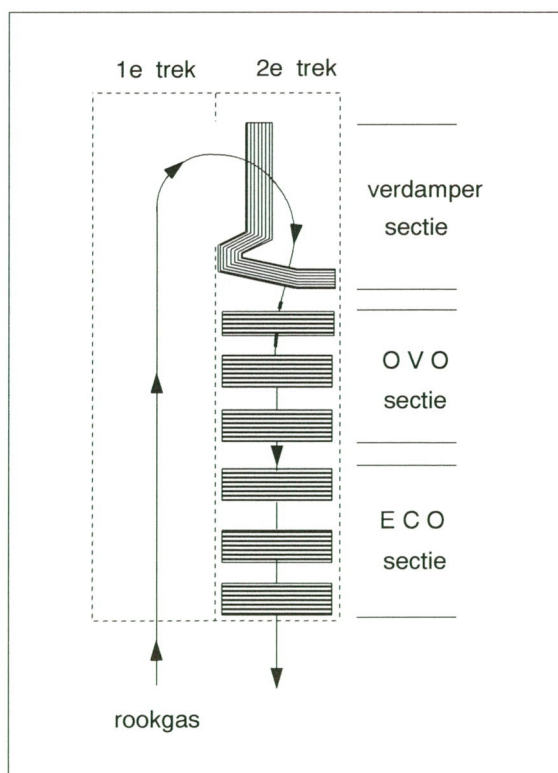
De keuze op welk temperatuurniveau de HT-stofafscheiding bij een AVI kan worden uitgevoerd wordt bepaald door de temperatuurniveaus van de rookgassen in de eerste en tweede trek van de ketel.

In de eerste en tweede trek van de ketel wordt de warmte uit de rookgassen overgedragen aan een voedingwater/stoomkringloop. Deze kringloop bestaat uit een verdampersectie, oververhittersectie (OVO) en een voorverwarmingsectie voor het ketelvoedingwater (ECO).

In de eerste trek van de ketel zijn de wanden in het algemeen uitgevoerd als membraanwanden. In de membraanwanden wordt voedingwater omgezet in verzadigde stoom. De warmteoverdracht van de rookgassen naar de membraan wanden vindt voornamelijk plaats door straling. In de tweede trek bestaan de secties uit pijpenbundels. De warmteoverdracht vindt hier voornamelijk plaats door convectie.

Bij de warmteoverdracht van de rookgassen naar de water/stroomkringloop is er sprake van een aantal vaste temperatuurniveaus. Bij het volgende voorbeeld is gekozen voor de bedrijfssituatie van een roosteroven met ketel bij de Afvalverwerking Rijnmond (AVR)

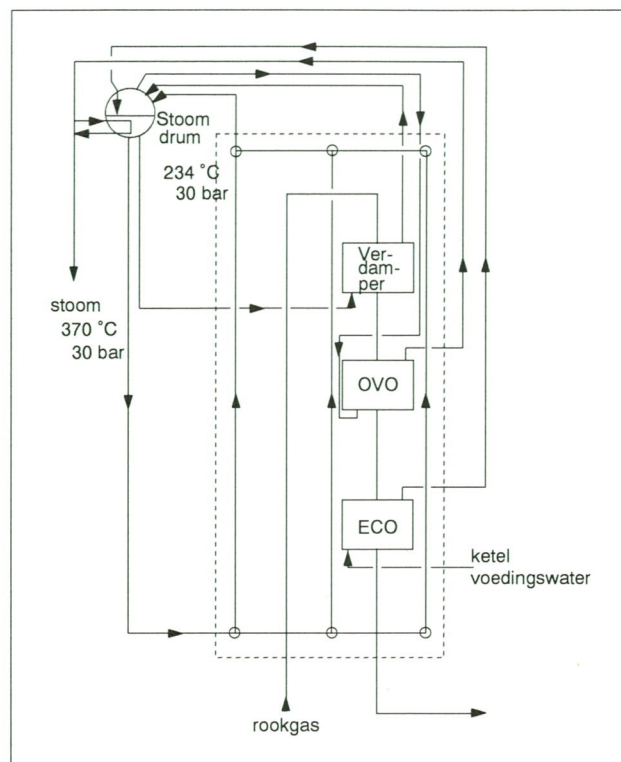
De figuren 6.1 en 6.2 geven de stroomschema's van de ketel en de voedingwater/stoomkringloop.



Figuur 6.1 Rookgasschema ketel

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties

Fase 1: Voorstudie



Figuur 6.2 Stroomschema ketel

In de ketel wordt oververhitte stoom opgewekt met een temperatuur van 370 °C en een druk van 30 bar. De ketel is uitgevoerd als een 2-treksketel van het watertype met natuurlijke circulatie. Behalve in de membraanwanden wordt ook stoom geproduceerd in de verdampersectie. Het water/stoommengsel stroomt naar de stoomruimte van de water/stoomdrum. De druk in de stoomdrum is circa 30 bar met een verzadigde stoomtemperatuur van 234 °C. Vanuit de stoomdrum stroomt de verzadigde stoom via een waterafscheider, boven in de drum, naar de OVO, waar verzadigde stoom wordt omgezet in oververhitte stoom van 390 - 460 °C. De OVO is opgebouwd uit drie na elkaar geschakelde secties in tegenstroom met de rookgassen. In de ECO (bestaande uit drie in serie geschakelde secties) wordt ketelvoedingwater opgewarmd van 135 °C naar 220 - 230 °C. Het voedingwater stroomt van de ECO naar de stoom/water drum.

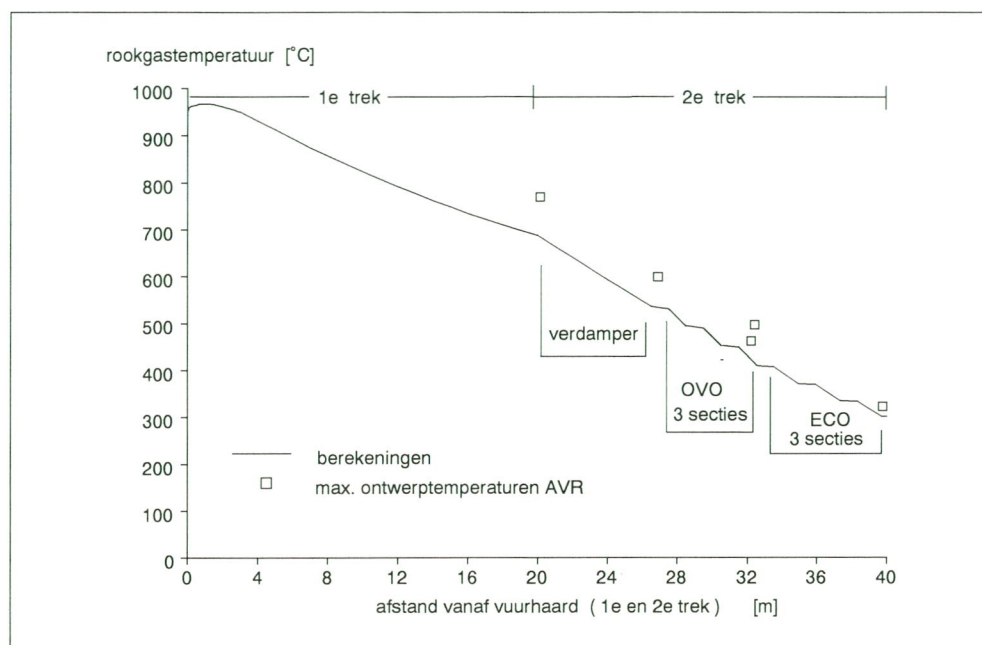
Op basis van bovenstaande ontwerpgegevens van de AVR is door TNO-ME een mathematische model gemaakt voor de warmteoverdracht van de rookgassen naar de verschillende secties van de water/stoomkringloop [23].

Met dit model zijn de volgende rookgastemperaturen berekend (figuur 6.3):

- inlaat 1e verdampersectie 680 °C;
- inlaat 2e verdampersectie 587 °C;
- inlaat 1e OVO-sectie 526 °C;
- inlaat 2e OVO-sectie 487 °C;
- inlaat 3e OVO-sectie 447 °C;
- inlaat 1e ECO-sectie 406 °C;

*Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties**Fase 1: Voorstudie*

- inlaat 2e ECO-sectie 368 °C;
- inlaat 3e ECO-sectie 333 °C.



Figuur 6.3 Rookgastemperaturen in ketel van AVI

Op basis van de bovenstaande rookgastemperaturen zijn voor de plaats van de HT-stofafscheiding de volgende temperatuurniveaus beschikbaar:

- 700 - 800 °C → HT-stofafscheiding na 1e trek, voor verdampersectie;
- 500 - 600 °C → HT-stofafscheiding tussen verdamper- en OVO-secties;
- 400 - 500 °C → HT-stofafscheiding tussen OVO- en ECO-secties.

6.2 Invloed van HT-stofafscheiding op de samenstelling van AVI-vliegas

6.2.1 Inleiding

In Nederland wordt 2,8 miljoen ton huishoudelijk afval per jaar verbrand in AVI's. Hierbij ontstaat 490 kton slak en 83 kton vliegas. De slak wordt hergebruikt als ophoogmateriaal in de wegenbouw. De vliegas wordt gedeeltelijk hergebruikt als vulstof in de asfalt (23 kton), de rest wordt gestort onder IBC condities [25].

Tabel 6.1 geeft een overzicht van de samenstelling van het huishoudelijk afval, de slak en de vliegas.

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

Tabel 6.1 Samenstelling van huishoudelijk afval, slak en vliegashouding [4], [25]

Element	Afval		Slak		Vliegashouding	
Macro-	bereik g/kg	gem. g/kg	bereik g/kg	gem. g/kg	bereik g/kg	gem. g/kg
Al			30 - 40		50 - 80	
Ca			70 - 90		100 - 125	
Fe			30 - 60		10 - 20	
K			8 - 12		20 - 30	
Mg			10 - 15		10 - 15	
Na			25 - 35		15 - 25	
Si			250 - 325		180 - 220	
Ti			3 - 4		7 - 100	
Br			0 - 0,4		0,03 - 9	0,5
Cl		7,540	1 - 6	2,5	40 - 50	
F		0,103	0 - 1		0,4 - 2	
PO ₄			7 - 9		4 - 6	
SO ₄			4 - 22	15	60 - 70	
C			20		10	
Micro-	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Hg	2 - 4		0 - 0,2		0,14 - 11	2,6
As	0,2 - 4		0,5 - 65	6	0 - 300	25
Ba			340 - 3700	900	700 - 4400	2350
Cd	1 - 10		0,2 - 20	3,9	0 - 750	177
Cr	5 - 250		50 - 380	125	50 - 1700	225
Co			4 - 70	12	8 - 80	20
Cu	400 - 600		500 - 6300	2000	80 - 2100	624
Mn					244 - 1909	565
Mo			4,5 - 65	12	4 - 1000	62
Ni	15 - 85		22 - 300	100	40 - 375	123
Pb	400 - 1200		35 - 4900	1250	65 - 9000	4500
Sb			3 - 80	30	2 - 3500	130
Se			0,1 - 15	1,2	1 - 35	12
Sn			8 - 350	160	200 - 9000	534
V			0,1 - 130	60	34 - 175	81
Zn	1000 - 2000		550 - 5200	2000	200 - 27000	12200

Bij een vergelijking tussen de metaalconcentraties in de slak en de vliegashouding blijkt dat de verrijking in de vliegashouding toeneemt met de vluchtigheid van de metalen. Verder is bekend dat de metaalconcentraties in de vliegashouding afhankelijk zijn van de deeltjesgrootte. Hoe kleiner de deeltjes hoe hoger de metaalconcentraties.

Componenten, die bij de vuurhaardtemperatuur niet vluchtig zijn, zijn in de slak en de vliegashouding in vergelijkbare concentraties aanwezig (Si, Al, Ca, Fe). Vermoedelijk zijn de concentratieverdelingen van alle metalen op het moment van slak en vliegashouding bij benadering gelijk. De korrelgrootte en de korrelvorm van de slak en de vliegashouding en de dampdruk van de metaalverbindingen zijn criteria hoe de metaalverbindingen

*Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties**Fase 1: Voorstudie*

en over de reststoffen verdeeld worden. Kleine deeltjes en gasvormige stoffen gaan mee met de rookgassen, terwijl grote deeltjes als slak afgevoerd worden.

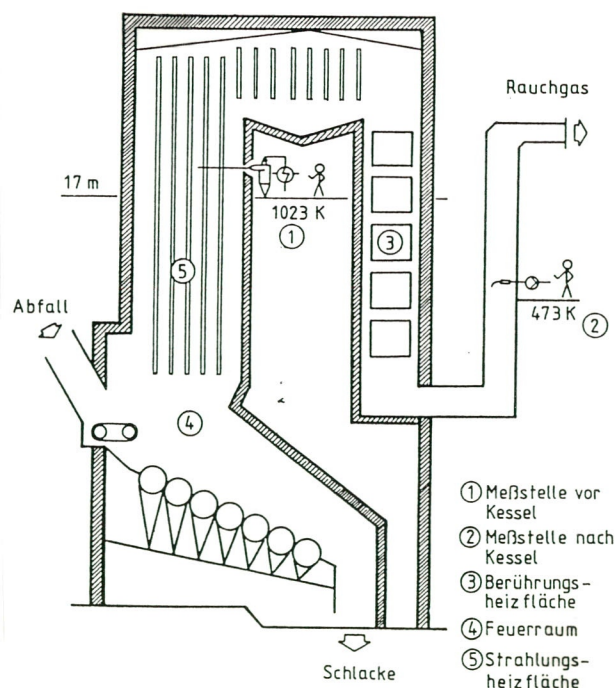
Bij vuurhaardtemperaturen van 1000 tot 1200 °C verdampt een deel van de metaalverbindingen en komt in de rookgassen. Bij afkoeling van de rookgassen in de ketel tot circa 200 tot 300 °C condenseren deze verbindingen weer. De stofdeeltjes in de rookgassen fungeren als condensatiekernen. Hiermee zijn de hogere concentraties van met name de vluchtige zware metalen in vliegias verklaard.

De aanwezigheid van zware metalen in vliegias is een van de belangrijkste redenen waarom vliegias als chemisch afval gestort moet worden. Door toepassing van HT-stofafscheiding bestaat de mogelijkheid vliegias af vangen met een lage concentratie van zware metalen. Door het toepassen van een techniek voor stofafscheiding met een hoog rendement (> 99,9%) zijn er in de rookgassen na de stofafscheiding ook minder stofdeeltjes, die kunnen fungeren als condensatiekernen voor de gasvormige metaalverbindingen. Dit betekent dat de metaalverbindingen in de nageschakelde rookgasreiniging (natte wassers) worden afgevangen.

6.2.2 Beschrijving van experimenteel onderzoek uitgevoerd door TU Berlijn

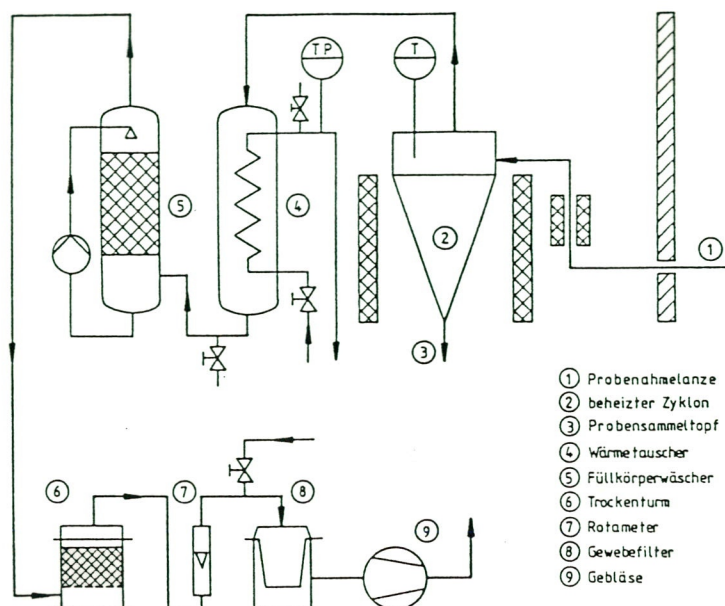
Er is zeer weinig experimenteel onderzoek gedaan naar de effecten van HT-stofafscheiding bij AVI's. Door de Technische Universiteit van Berlijn is een onderzoek uitgevoerd bij een AVI in Berlijn Ruhleben [24].

Figuren 6.4 en 6.5 geven een overzicht van ketel 2 van de AVI Berlijn Ruhleben en de experimentele opstelling voor monsterneming in de vuurhaard (**voor** de ketel).



Figuur 6.4 Stroomschema van ketel 2 van AVI Berlijn Ruhleben

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie



Figuur 6.5 Stroomschema opstelling monsterneming voor ketel

Tabel 6.2 geeft een overzicht van de procescondities en de stofstromen tijdens het onderzoek.

Tabel 6.2 Procescondities van ketel 2, AVI Berlin Ruhleben [24]

Massastroom afval	11,5 ton/h
Massastroom stoom	23,1 ton/h
Zuurstofgehalte rookgas	11,3 vol%
Temperatuur ketel uit	200 °C
Massastroom slak	4330 kg/h
Massastroom ketelas	21,6 kg/h
Massastroom vliegias	322 kg/h

In het onderzoek van de TU Berlin is een deelstroom van de rookgassen door een hete cycloon geleid. De rookgassen zijn afgezogen voor de ketel (in de vuurhaard) bij een temperatuur van circa 750 °C. Als vergelijking is simultaan rookgas afgezogen na de ketel bij een temperatuur van circa 200 °C. De samenstelling van het afgevangen vliegias werd bepaald.

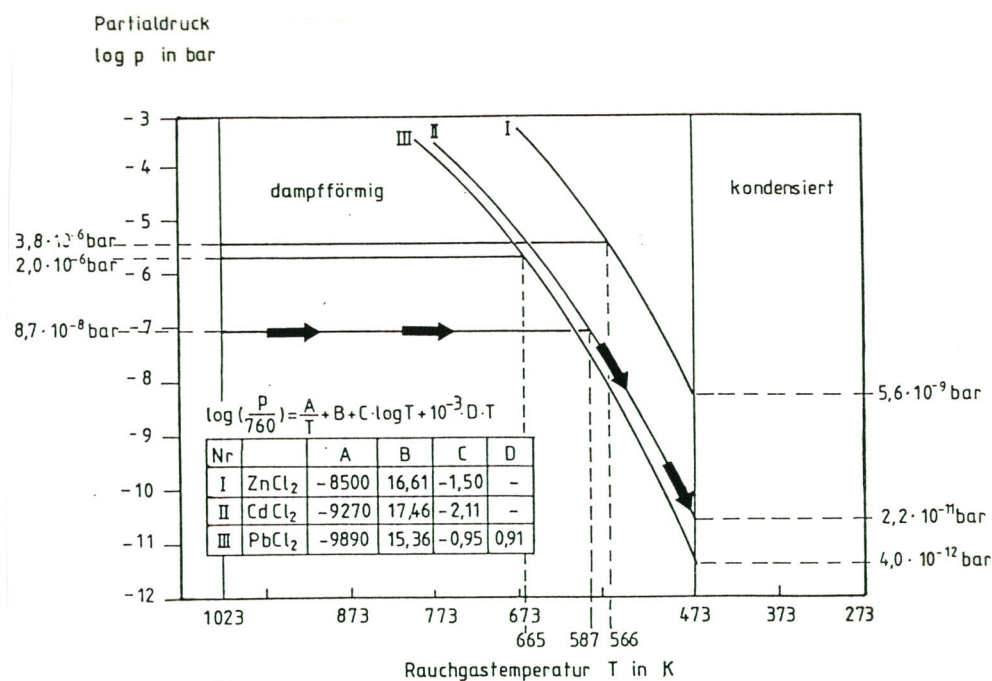
Het onderzoek heeft zich uitsluitend gericht op de metalen Cadmium (Cd), Lood (Pb) en Zink (Zn). Tabel 6.3 geeft een overzicht van de aggregatietoestanden, waarin deze metalen en metaalverbindingen in de rookgassen voorkomen.

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

Tabel 6.3 Aggregatietoestanden van Zink-, Cadmium- en Loodverbindingen bij vuurhaardtemperaturen van 1000 tot 1200 °C

Fase	Zink	Cadmium	Lood
Vast	ZnO	CdO	PbO
Gas	Zn ZnCl ₂	Cd CdCl ₂	Pb PbO Pb ₂ O ₂ Pb ₂ O ₃ Pb ₃ O ₃ Pb ₄ O ₄ PbCl ₂ PbCl ₄

Op basis van thermodynamische berekeningen zijn de metalen voor 90 - 100% als metaalchloriden in de rookgassen aanwezig. Figuur 6.6 geeft de relatie tussen temperatuur en dampdruk van deze metaalchloriden [25].



Figuur 6.6 Partiële druk van metaalchloriden als functie van de temperatuur

6.2.3 Resultaten van het experimenteel onderzoek van de TU Berlijn

De monsterneming van vlieg-as voor de ketel (in de vuurhaard) is uitgevoerd met een cycloon. Het afvangstrendement van de cycloon was circa 92%. De monsterneming na de ketel is uitgevoerd met een vlakfilter volgens VDI 2066. Het rendement van een vlakfilter is > 99,9%.

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

Op zichzelf zou het gebruik van niet gelijke monsternemingsmethoden kunnen betekenen dat metaalconcentraties in de vliegasmaonsters voor de ketel te laag zijn ten opzichte van de metaalconcentraties in de vliegasmaonsters na de ketel. In de fijne fractie, die door de cycloon niet wordt afgevangen, bevinden zich normaal de hoogste concentraties aan vluchtige zware metalen. Tabel 6.4 laat het verschil zien tussen de twee monsternemingsmethoden op grond van de gemeten kengrootheden van de afgevangen vliegasmaonsters.

Tabel 6.4 Kengrootheden van vliegasmaonsters AVI Berlijn Ruhleben [24]

Monstername positie	Specifiek oppervlak m ² /kg	Gemiddelde korrelgrootte µm
Voor ketel (cycloon)	65 +/- 5	146 +/- 15
Na ketel (vlakfilter)	90 +/- 5	118 +/- 13

Uit tabel 6.4 blijkt inderdaad dat de vliegasmaonsters afgevangen door de cycloon een grotere gemiddelde korrelgrootte hebben dan de vliegasmaonsters afgevangen met de vlakfiltermethode.

Het doel van het onderzoek door de TU Berlijn was echter om aan te tonen dat door het afscheiden van vliegasmaonsters bij hoge temperaturen de condensatie van vluchtige zware metaalverbindingen op vliegasmaonsters voorkomen kan worden. De condensatie bij een bepaalde gastemperatuur wordt alleen bepaald of bij deze temperatuur de maximale dampspanning aanwezig is en niet door het feit of er fijne of grove vliegasmaonsters aanwezig zijn. Dit betekent, dat ondanks het gebruik van verschillende monsternemingstechnieken, de analyseresultaten van de vliegasmaonsters een goed inzicht geven in het effect van stofafscheiding bij hoge temperaturen op de vliegaskwaliteit.

In de afgescheiden vliegasmaonsters zijn de concentraties van Cadmium, Lood en Zink bepaald. Tabel 6.5 geeft een overzicht van de analyseresultaten.

Tabel 6.5 Metaalconcentraties in vliegasmaonsters AVI Berlijn Ruhleben, [24]

Monstername positie	Cadmium mg/kg	Lood mg/kg	Zink mg/kg
Voor ketel (cycloon, 750 °C, n = 8)	23 +/- 3	550 +/- 140	6380 +/- 650
Na ketel (vlakfilter, 200 °C, n = 8)	87 +/- 13	3590 +/- 930	8850 +/- 1400

Uit de resultaten in tabel 6.5 blijkt, dat de concentraties van Cd, Pb en Zn in de vliegasmaonsters **voor** de ketel (750 °C) respectievelijk circa 75%, 80% en 25% lager zijn dan de overeenkomstige concentraties in de vliegasmaonsters **na** de ketel (200 °C).

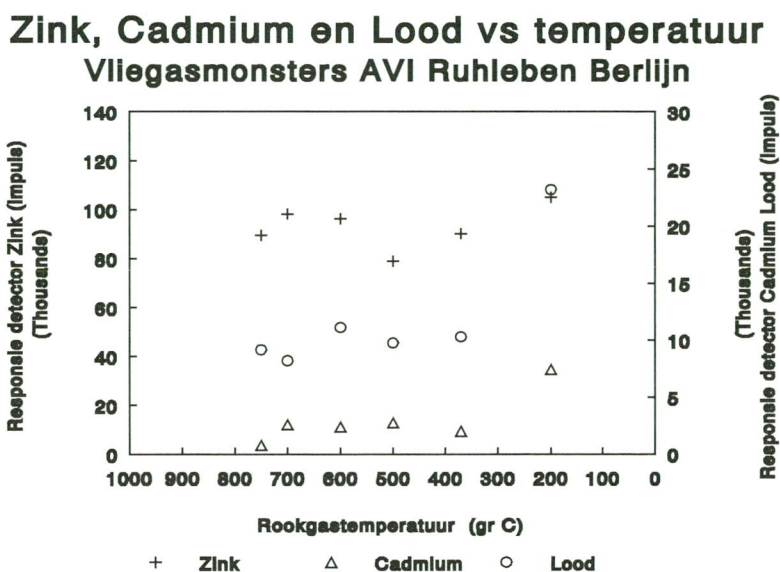
*Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties**Fase 1: Voorstudie*

Door de cycloon tijdens de monsternamen op verschillende temperaturen af te koelen is de relatie bepaald tussen rookgastemperatuur en concentratie van de metalen (Cd, Pb, en Zn) in de vliegasmonters.

Het doel van dit experiment was tweeledig. In de eerste plaats zou op deze manier experimenteel bepaald kunnen worden bij **welke** rookgastemperatuur een **stijging** van de metaalconcentraties in de afgescheiden vliegasmonters zou optreden.

In de tweede plaats zou op deze manier een mogelijk **adsorptie** van **gasvormige** metaalverbindingen aan de vliegaseeltjes kunnen worden aangetoond.

Figuur 6.7 geeft de relatie tussen de ingestelde temperatuur van de cycloon en de gemeten metaalconcentraties in de afgescheiden vliegasmonters.



Figuur 6.7 Zink, lood en cadmiumconcentraties in vliegasmonters als functie van de temperatuur

Uit figuur 6.7 blijkt dat bij afkoeling van de rookgassen tot aan een temperatuur van circa 400 °C geen stijging van de metalenconcentraties in de afgescheiden vliegasmonters gemeten is.

Dit betekent ook dat er geen mogelijke adsorptie van gasvormige metaalverbindingen aan vliegaseeltjes is waargenomen.

Op grond van deze resultaten zou een HT-stofafscheiding reeds bij minimaal circa 400 °C een verlaging van de vluchtige zware metalenconcentratie in de afgescheiden vliegaseeltjes tot gevolg kunnen hebben. Deze vluchtige zware metalen worden dan afgevangen in de natte wassers van de nageschakelde rookgasreiniging.

6.3 Invloed van HT-stofafscheiding op het uitlooggedrag van AVI-vliegas

6.3.1 Inleiding

AVI-vliegas kan worden hergebruikt als secundaire grondstof of dient eventueel als gevaarlijke afvalstof te worden gestort. Het hergebruik en het stortregime worden mede bepaald door het uitlooggedrag van de vliegas. De overheid heeft de intentie de verschillende milieuwetten samen te voegen tot de overkoepelende Wet Milieubeheer (WM). In het kader van deze samenvoeging zijn een ontwerp Bouwstoffenbesluit (oBB 1991, [27]) en een ontwerp Besluit Stortverbod Afvalstoffen gepubliceerd (oBSA 1993, [28]).

Toepassing van HT-stofafscheiding bij AVI's zou de kwaliteit van het afgescheiden vliegas zodanig kunnen verbeteren dat hergebruik van de vliegas als secundaire grondstof bevorderd wordt of het storten van de vliegas onder een lichter regime mogelijk is. Het hergebruik of het storten van AVI-vliegas zal in de toekomst slechts mogelijk zijn na toepassing van zogenaamde opwaarderings technieken voor de vliegas. In het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Hergebruik van Afvalstoffen (NOH) is een inventarisatie uitgevoerd van opwaarderings technieken voor reststoffen van AVI's [29].

De toepassing van HT-stofafscheiding bij AVI's kan een mogelijk alternatief zijn ten opzichte van andere opwaarderings technieken. Het voordeel van HT-stofafscheiding, in vergelijking met andere opwaarderings technieken, is dat HT-stofafscheiding een procesgeïntegreerde techniek is.

In hoofdstuk 6.3.2 zijn de resultaten van het onderzoek van de TU Berlijn, met betrekking tot het uitlooggedrag van de vliegasmonsters, vergeleken met de normen in het ontwerp Bouwstoffenbesluit (1991).

In hoofdstuk 6.3.3 zijn de resultaten van het onderzoek van de TU Berlijn, met betrekking tot het uitlooggedrag van de vliegasmonsters, vergeleken met de normen in het ontwerp Besluit stortverbod afvalstoffen (1993).

6.3.2 Invloed van HT-stofafscheiding op de toepassing van AVI-vliegas als bouw materiaal

Secundaire grondstoffen kunnen als zelfstandig granulair bouw materiaal worden gebruikt of verwerkt worden in andere bouw materialen. Voor het hergebruik van vliegas als secundaire grondstof in de bouw zijn de normen voor het uitlooggedrag vastgelegd in het ontwerp Bouwstoffenbesluit (oBB, 1991).

Het oBB 1991 hanteert de volgende indeling:

- categorie 1: Bouw materialen die **geen** van de samenstellings waarden (S_1) overschrijden en op zodanige wijze worden gebruikt dat, ook indien **geen** isolatiemaatregelen worden genomen, **geen** van de toegelaten immissies worden overschreden (U_1);
- categorie 2: Bouw materialen die **geen** van de samenstellings waarden (S_1) overschrijden en op zodanige wijze worden gebruikt dat, indien **wel** isolatiemaatregelen worden genomen, **geen** van de toegelaten immissies worden overschreden (U_2).

*Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties**Fase 1: Voorstudie*

Bouwmaterialen, die niet meer uitlogten dan de U_1 grenswaarde, mogen worden toegepast onder de voorwaarden van categorie 1.

Bouwmaterialen, die niet meer uitlogten dan de U_2 grenswaarde maar meer dan de U_1 grenswaarde, mogen worden toegepast onder de voorwaarden van categorie 2.

In het onderzoek van de TU Berlijn is het uitlooggedrag bepaald van de vliegasmonters, die **voor** de ketel (cycloon) en **na** de ketel (vlakfilter) zijn genomen. Het uitlooggedrag is bepaald met de Duitse uitloogmethode volgens DEV S4. Deze methode is vergelijkbaar met de Nederlandse methode volgens NEN 7343.

De tabellen 6.6 en 6.7 geven een overzicht van de uitloogresultaten en de samenstelling van de vliegasmonters in vergelijking met de relevante normen in het oBB 1991.

Tabel 6.6 Uitloging van vliegasmonters AVI Berlijn Ruhleben in vergelijking met normstelling in oBB 1991 (L/S 10, mg/kg)

Element	Voor ketel (cycloon)	Na ketel (vlakfilter)	oBB 1991 (U_1)	oBB 1991 (U_2)
Cd	0,015 - 0,084	0,014 - 0,079	0,010	0,10
Pb	1,027 - 1,205	4,716 - 13,559	0,80	8,0
Zn	0,806 - 1,617	5,809 - 16,062	1,4	14

Tabel 6.7 Samenstelling van vliegasmonters AVI Berlijn Ruhleben in vergelijking met normstelling in oBB 1991 (mg/kg)

Element	Voor ketel (cycloon)	Na ketel (vlakfilter)	oBB, 1991 (S_1)
Cd	23	87	10
Pb	550	3590	1250
Zn	6380	8550	1250

Uit tabel 6.6 blijkt dat, met betrekking tot het **uitlooggedrag** van de vliegasmonters **voor** de ketel, de U_2 grenswaarden van het oBB 1991 **niet** worden overschreden.

Uit tabel 6.7 blijkt dat, met betrekking tot de **samenstelling** van de vliegasmonters, de S_1 grenswaarden van het oBB 1991 voor Cd en Zn **wel** worden overschreden.

Uit het onderzoek van de TU Berlijn kan de **beperkte** conclusie getrokken worden dat AVI-vliegass, ondanks eventuele toepassing van HT-stofafscheiding, voorlopig **niet** hergebruikt kan worden als **zelfstandig** granulair bouw materiaal categorie 2.

De conclusie is **beperkt**, omdat in het onderzoek van de TU Berlijn de samenstelling en het uitlooggedrag van de vliegasmonters slechts is beoordeeld op drie elementen (Cd, Pb en Zn).

6.3.3 Invloed van HT-stofafscheiding op het stortregime van AVI-vliegas

In september 1991 is het Stoffen- en processenbesluit uit de Wet Chemische Afvalstoffen (WCA) vervangen door het Besluit Aanwijzing Chemische afvalstoffen BACA. Vanaf 1994 valt AVI-vliegas onder de gevaarlijk afvalstoffen volgens het Besluit Aanwijzing Gevaarlijke Afvalstoffen (BAGA) uit de Wet Milieubeheer (WM) [25].

Vanaf 1 januari 1996 mag onbehandeld vliegas volgens het concept Besluit stortverbod afvalstoffen niet meer gestort worden, maar dient na toepassing van opwaarde-ringstechnieken zoveel mogelijk nuttig te worden hergebruikt [28].

Voor het storten van AVI-vliegas dient een stortplaats te beschikken over de desbetreffende ontheffing. Sinds augustus 1993 is de zogenaamde grenswaarden-notitie van kracht, die fungeert als een richtlijn voor het storten van gevaarlijke afvalstoffen. De grenswaarden-notitie deelt gevaarlijke afvalstoffen in de categorieën C₄, C₃, C₂ en C₁, op basis van de uitloogbaarheid van een aantal contaminanten. Voor de gevaarlijkste categorie (C₁) bestaan in Nederland tot op heden nog geen verwerkingsfaciliteiten. De lichtste categorie gevaarlijke afvalstoffen (C₄) mag gestort worden tezamen met huishoudelijke afvalstoffen op een normale IBC stortplaats. De C₃-afvalstoffen dienen verwerkt te worden op een stortplaats met een aangescherpt voorzieningen niveau (IBC+). Hetzelfde geldt voor C₂-afvalstoffen, met dien verstande dat deze categorie geheel droog verwerkt moet worden ter voorkoming van de vorming van verontreinigd percolaat.

In de tabellen 6.8 en 6.9 worden de resultaten van het uitlogingsonderzoek van de TU Berlijn vergeleken met de normstelling volgens BACA (1991).

Tabel 6.8 Uitloging van vliegasmonsters AVI Berlijn Ruhleben in vergelijking met normstelling in BACA (1991) (L/S 10, mg/kg)

Element	Voor ketel (cycloon)	Na ketel (vlakfilter)	BACA 1991 (U ₀ , C ₃)	BACA 1991 (U ₁ , C ₂)
Cd	0,015 - 0,084	0,014 - 0,079	0,05	0,20
Pb	1,027 - 1,205	4,716 - 13,559	4,00	25,00
Zn	0,806 - 1,617	5,809 - 16,062	10,00	40,00

Tabel 6.9 Samenstelling van vliegasmonsters AVI Berlijn Ruhleben in vergelijking met normstelling in BACA 1991 (mg/kg)

Element	Voor ketel (cycloon)	Na ketel (vlakfilter)	BACA, 1991
Cd	23	87	50
Pb	550	3590	5000
Zn	6380	8550	20000

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

Uit tabel 6.8 blijkt dat, met betrekking tot het **uitlooggedrag** van de vliegasmonters **voor** de ketel, de U_0 -grenswaarden van BACA 1991 **niet** (Pb, Zn) of **nauwelijks** (Cd) worden overschreden.

Uit tabel 6.9 blijkt dat, met betrekking tot de **samenstelling** van de vliegasmonters **voor** de ketel, de grenswaarden van BACA 1991 **niet** worden overschreden.

Uit het onderzoek van de TU Berlijn kan de **beperkte** conclusie getrokken worden dat **onbehandeld** AVI-vliegass, door toepassing van HT-stofafscheiding, gestort kan worden op een C_3 -stortplaats. Tot nu toe dient AVI-vliegass gestort te worden op een C_2 -stortplaats.

De conclusie is **beperkt**, omdat in het onderzoek van de TU Berlijn de samenstelling en het uitlooggedrag van de vliegasmonters slechts is beoordeeld op drie elementen (Cd, Pb en Zn).

6.4 Invloed van HT-stofafscheiding op de vorming van dioxinen en furanen

Uit onderzoek van de laatste jaren is bekend dat de concentraties dioxinen en furanen in de ketel lager zijn dan de concentraties aan de uitlaat van de ketel. Oorzaak van dit verschijnsel is de zogenaamde 'de novo' vorming van dioxinen en furanen. De volgende omstandigheden zijn hiervoor nodig:

- aanwezigheid van precursors (onverbrande koolstof of koolwaterstoffen);
- aanwezigheid van chloorverbindingen;
- aanwezigheid van zuurstof;
- afkoelingstraject van $500 \rightarrow 200$ °C;
- voldoende verblijftijd van de rookgassen tijdens het afkoeltraject;
- eventuele aanwezigheid van katalysatoren (bijvoorbeeld $CuCl_2$ in vliegass).

Uit het onderzoek van de TU Berlijn blijkt dat de dioxinen- en furanen concentraties in de afgevangen vliegasmonters bovenstaande 'de novo' vorming bevestigen. De vliegasmonters, voor en na de ketel, zijn geanalyseerd op de concentraties dioxinen en furanen. Tabel 6.10 geeft een overzicht van de analysesresultaten.

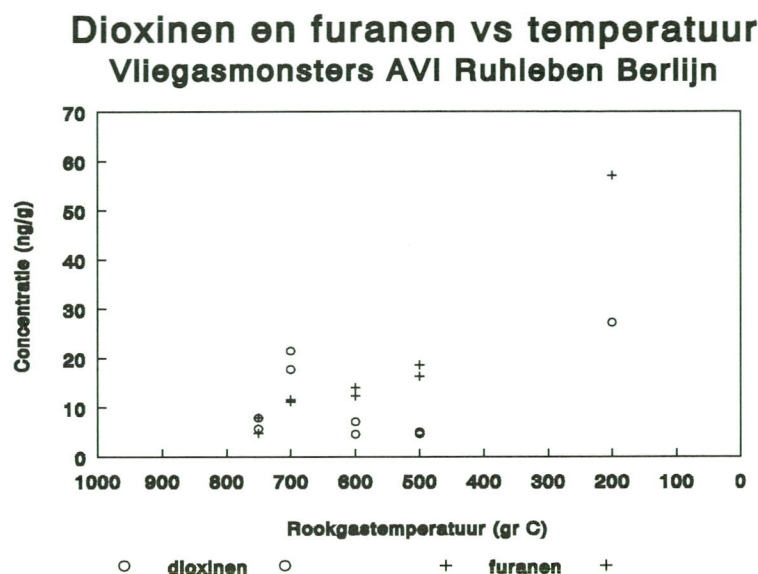
Tabel 6.10 Dioxine- en furanenconcentraties in vliegasmonters AVI Berlijn Ruhleben [24]

Monstername positie	Dioxinen ng/g	Furanen ng/g
Vliegass (voor ketel)	9,3	12,2
Vliegass (na ketel)	27,3	57,1
E-filteras ¹⁾	200,6	281,4

¹⁾ Gemiddelde dioxine- en furanenconcentraties in vliegass gemeten bij 8 AVI's in BRD.

In de vliegasmonters, die door de cycloon bij verschillende temperaturen zijn afgevangen, zijn ook de dioxine- en furanenconcentraties bepaald.

Figuur 6.8 geeft een relatie tussen de gemeten dioxine en furaanconcentraties in de vliegasmaonsters en de rookgastemperatuur waarop de cycloon was ingesteld.



Figuur 6.8 Dioxine- en furaanconcentraties in vliegasmaonsters als functie van de temperatuur

Uit figuur 6.8 blijkt, dat bij afkoeling van de rookgassen tot aan een temperatuur van minimaal circa 500 °C geen significante stijging van de dioxine- en furaanconcentraties in de vliegasmaonsters is waargenomen.

Uit deze resultaten kan de voorzichtige conclusie getrokken worden, dat HT-stofafscheiding bij minimaal 500 °C de dioxine- en furaanconcentraties in de afgevangen vliegasmaonsters kan verlagen en de vorming van dioxinen en furanen via 'de novo' synthese in het afkoeltraject kan voorkomen.

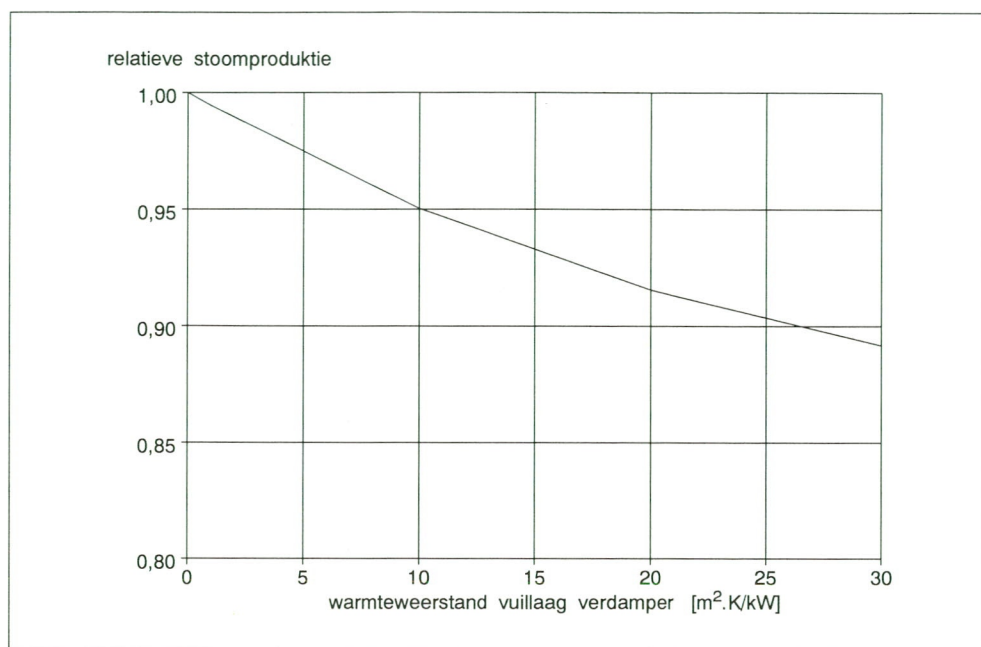
6.5 Invloed van HT-stofafscheiding op vervuiling van de ketel

Bij een AVI ontstaat een vuillaag (vliegasmaonsters) op de pijpenbundels van de ketel. Door deze vuillaag wordt de warmteoverdracht van de rookgassen naar de water/stoomkringloop verminderd. Dit veroorzaakt een lagere stoomproductie en een verhoging van de rookgastemperatuur aan de uitlaat van de ketel. Tijdens het periodieke onderhoud moeten de pijpenbundels gereinigd worden en vaak zijn ook voorzieningen in de ketel aangebracht om de pijpenbundels tijdens bedrijf te reinigen. In het mathematisch model, dat door TNO-ME is ontwikkeld, is de invloed van de vuillaag op de warmteoverdracht berekend.

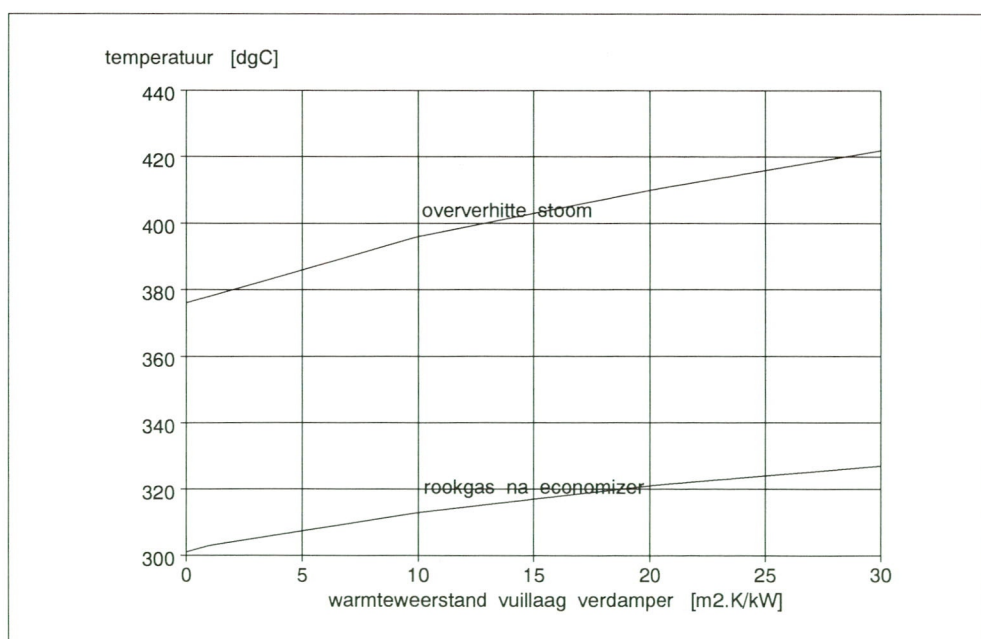
Figuur 6.9 geeft de invloed van de vuillaag, door verhoging van de warmteweerstand, op de stoomproductie van de verdamper. Figuur 6.10 geeft de invloed van de vuillaag, door verhoging van de warmteweerstand, op respectievelijk de temperatuur van de oververhitte stoom en de rookgastemperatuur.

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

Voor de beoordeling van het effect van de vuillaag moet men rekenen dat een vuillaag van circa 1 mm een warmteweerstand oplevert van circa $1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/kW}$.



Figuur 6.9 Daling stoomproductie door vervuiling van de verdamper



Figuur 6.10 Toename temperatuur oververhitte stoom en de eindtemperatuur rookgas door vervuiling van de verdamper

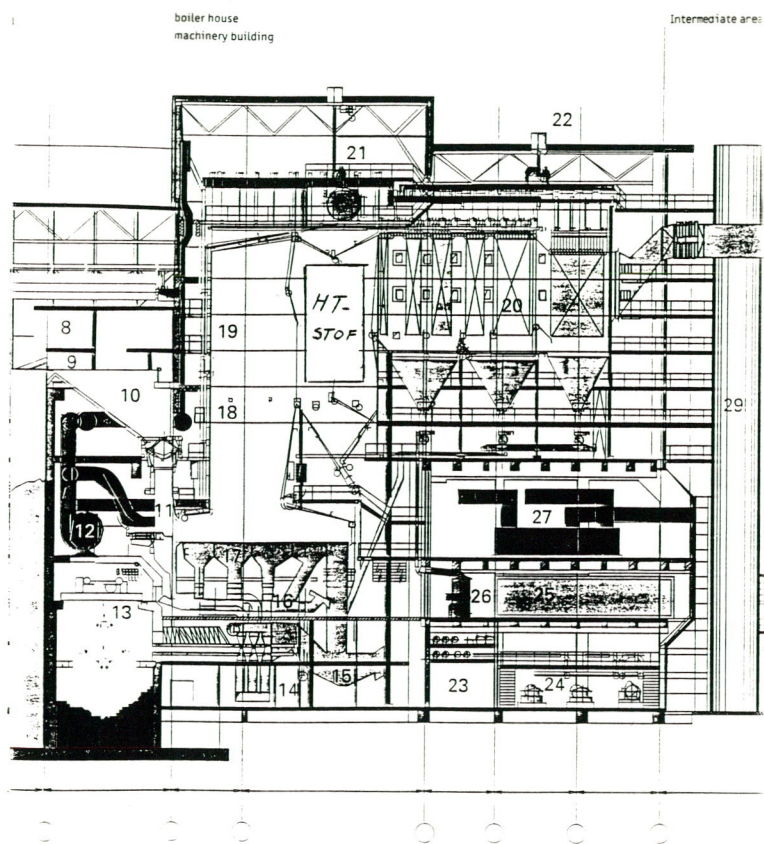
*Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties**Fase 1: Voorstudie*

Uit figuur 6.9 blijkt dat een vuillaag van circa 10 mm een verlaging van circa 5% van de stoomproductie betekent.

Toepassing van HT-stofafscheiding betekent dat de vervuiling van de pijpenbundels in de ketel wordt verminderd. De grootte van deze vermindering is afhankelijk van de plaats van de HT-stofafscheiding in de oven/ketel. De optimale plaats voor HT-stofafscheiding, met betrekking tot maximale voorkoming van vervuiling van de warmtewisselaars in de ketel, is de 'lege' ruimte na de oven en voor de warmtewisselaars van de ketel.

In deze 'lege' ruimte zou door aanpassing van de ketelconstructie een filtratiesysteem met keramische kaarsfilters geplaatst kunnen worden. Op deze manier is de HT-stofafscheiding geïntegreerd in de oven/ketelcombinatie.

Figuur 6.11 geeft een voorbeeld van deze mogelijkheid.



Figuur 6.11 Principeschema van mogelijke integratie van HT-stofafscheiding in oven/ketel van AVI

6.6 Samenvatting

De keuze op welk temperatuurniveau de HT-stofafscheiding bij een AVI kan worden uitgevoerd wordt bepaald door de temperatuurniveaus van de rookgassen in de eerste en tweede trek van de ketel.

Op basis van berekeningen van de warmteoverdracht van de rookgassen naar de water/stoomkringloop zijn voor de plaats van de HT-stofafscheiding de volgende temperatuurniveaus gekozen:

- 700 - 800 °C → HT-stofafscheiding na 1e trek, voor verdampersectie;
- 500 - 600 °C → HT-stofafscheiding tussen verdamper- en OVO-secties;
- 400 - 500 °C → HT-stofafscheiding tussen OVO- en ECO-secties.

Op grond van de resultaten van het onderzoek door de TU Berlijn, zal door toepassing van HT-stofafscheiding bij circa 400 °C de **vluchtige zware** metalenconcentratie in de afgevangen vlieggas verlaagd worden. De vluchtige zware metalen worden dan afgevangen in de natte wassers van de nageschakelde rookgasreiniging.

Uit het onderzoek van de TU Berlijn kan de **beperkte** conclusie getrokken worden dat AVI-vlieggas, ondanks eventuele toepassing van HT-stofafscheiding, voorlopig **niet** hergebruikt kan worden als **zelfstandig** granulair bouw materiaal categorie 2.

De conclusie is beperkt, omdat in het onderzoek van de TU Berlijn de samenstelling en het uitlooggedrag van de vliegasmonters slechts is beoordeeld op drie elementen (Cd, Pb en Zn).

Uit het onderzoek van de TU Berlijn kan de **beperkte** conclusie getrokken worden dat onbehandeld AVI-vlieggas, door toepassing van HT-stofafscheiding, gestort kan worden op een C₃-stortplaats. Tot nu toe dient AVI-vlieggas gestort te worden op een C₂-stortplaats.

De conclusie is beperkt, omdat in het onderzoek van de TU Berlijn de samenstelling en het uitlooggedrag van de vliegasmonters slechts is beoordeeld op drie elementen (Cd, Pb en Zn).

Uit het onderzoek van de TU Berlijn wordt de **voorzichtige** conclusie getrokken, dat HT-stofafscheiding bij minimaal 500 °C de dioxine- en furaanconcentraties in de afgevangen vlieggas kan verlagen en de vorming van dioxinen en furanen via 'de novo' synthese in het afkoeltraject kan voorkomen.

Toepassing van HT-stofafscheiding betekent dat de vervuiling van de pijpenbundels in de ketel wordt verminderd. De grootte van deze vermindering is afhankelijk van de plaats van de HT-stofafscheiding in de oven/ketel.

De optimale plaats voor HT-stofafscheiding, met betrekking tot maximale voorkoming van vervuiling van de warmtewisselaars in de ketel, is de 'lege' ruimte tussen de oven en warmtewisselaars van de ketel.

In deze 'lege' ruimte zou door aanpassing van de ketelconstructie een filtratiesysteem met keramische kaarsfilters geplaatst kunnen worden. Op deze manier is de HT-stofafscheiding geïntegreerd in de oven/ketelcombinatie.

7 Commercieel verkrijgbare elementen en systemen voor HT-stofafscheiding

Op het ogenblik is er een groot aantal fabrikanten en/of leveranciers van elementen of systemen voor het afscheiden van stof bij temperaturen hoger dan 250 °C. Het overzicht in tabel 7.1 beperkt zich tot de meest bekende fabrikanten en leveranciers. Criteria voor opname in tabel 7.1 zijn:

- de fabrikant of leverancier heeft elementen of een compleet systeem geleverd voor een demonstratieplant of een commercieel bedreven installatie;
- de resultaten van de geleverde elementen of systemen zijn of lijken succesvol.

Tabel 7.1 Fabrikanten van elementen en systemen voor HT-stofafscheiding

Fabrikant	Plaats, Land	C	EF	DF	KF ld	KF hd	KF ss	BF	CF
van Tongeren	Godalming, UK	X							
BWF	Offingen, BRD			X	X				
Schumacher	Crailsheim, BRD					X			
Didier	Eisenberg, BRD					X			
Cerel	Hinckley, UK				X				
Pall	Portsmouth, UK						X		
Hokosawa	Keulen, BRD							X	
Memcor	Eschborn, BRD			X					
3M Company	St Paul, USA			X					
Westinghouse	Pittsburgh, USA								X
Babcock	Oberhausen, BRD					X			
ABB/Fläkt	Butzbach, BRD	X	X	X					
Lurgi	Frankfurt, BRD	X	X	X					

C = Cyclonen

EF = Elektrofilter

DF = Doekfilter

BF = Bedfilter (korrels)

CF = Cross-flow filter

KF = Kaarsfilter

ld = lage dichtheid keramiek (vezel)

hd = hoge dichtheid keramiek (korrels)

ss = roestvast staal

In hoofdstuk 5.8 zijn keramische filterkaarsen geselecteerd als mogelijke techniek voor HT-stofafscheiding bij AVI's.

Tabel 7.2 is een overzicht van de kenmerken van hoge-dichtheid filterkaarsen van Schumacher.

Tabel 7.3 is een overzicht van de kenmerken van lage-dichtheid filterkaarsen van Cerel en BWF

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

Tabel 7.2 Kenmerken van hoge-dichtheid keramische filterkaarsen Schumacher

Materiaal		Korrel	Korrel/vezel		
Structuur		Homogeen	Heterogeen	Asymmetrisch	Asym/profiel
Type		Schumalith	Schumacel HTHP	Dia-Schumalith	Dia-Schumalith Star
Korrel/vezeldiam.	[μm]	120	120/3	300/3	300/3
Poriëndiameter	[μm]	40	30/10	100/10	100/10
Wanddikte	[mm]	10	10	15	15
Lengte	[mm]	1000/1500	1000/1500	1000/1500	1000/1500
Buitendiameter	[mm]	60	60	60	60
Binnendiameter	[mm]	40	40	30	30
Filteroppervlak	[m ²]	0,16/0,26	0,16/0,26	0,16/0,26	0,16/0,26
Max. temperatuur	[°C]	1000	1000	1000	1000
Drukval ΔP_0	[mbar]	15 +/- 2	25 +/- 3	6 +/- 2	4 +/- 2
Filtratiesnelheid	[m/s]	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06
Barstdruk	[bar]	> 40	> 15	> 60	> 40
Gewicht	[kg]	4,2/6,3	4,1/6,2	4,1/6,2	3,3/4,7

Tabel 7.3 Kenmerken van lage-dichtheid keramische filterkaarsen Cerel, BWF

Type		Cerafil S 1000	BWF KE 85/60	BWF KE 85/150	BWF KE 85/200
Dichtheid	[kg/m ³]	0,35 +/- 0,03	0,2	0,2	0,2
Porositeit	[%]	86 +/- 2	93	93	93
Lengte	[mm]	1000 +/- 2	1000	1530	1050
Buitendiameter	[mm]	60 +/- 2	60	150	200
Binnendiameter	[mm]	40 +/- 2	42	110	160
Wanddikte	[mm]	10	9	20	20
Filteroppervlak	[m ²]	0,19	0,19	0,66	0,60
Rendement	[%]	> 99,9	> 99,99	> 99,99	> 99,99
Max. temperatuur	[°C]	900	900	900	900
Filtratiesnelheid	[m/s]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Drukval ΔP_0	[mbar]	8	10	10	10
Max. drukval	[mbar]		100	100	100
Gewicht	[kg]	0,67	0,67	2,31	2,1

8 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

- In Nederland worden voornamelijk elektrofilters toegepast, in het temperatuurgebied tot aan 250 °C, voor de primaire afscheiding van stof uit de rookgassen van de huidige en toekomstige AVI's.
- Van de technieken voor HT-stofafscheiding zijn, op grond van de stand van de ontwikkeling en de opgedane ervaringen, voorlopig slechts cyclonen en keramische kaarsfilters geschikt voor de toepassing bij AVI's.
- De toepassing van keramische kaarsfilters heeft de voorkeur, op grond van het hoge afscheidingsrendement (> 99,9%), lage drukval en de mogelijkheid tot integratie van het filtratiesysteem met de ketel.
- Door toepassing van HT-stofafscheiding boven 400 °C, kunnen de concentraties van de **vluchtige** zware metaalverbindingen in de afgevangen vliegase verlaagd worden.
- Uit experimenteel onderzoek (met een hete cycloon) door TU Berlijn, blijkt dat de concentraties van zink, cadmium en lood in de vliegase met respectievelijk 25%, 75% en 80% worden verlaagd bij stofafscheiding boven 500 °C.
- De resultaten van het onderzoek van de TU Berlijn, met betrekking tot de uitloging van de vliegase monsters, geven aanleiding tot een voorzichtige conclusie dat toepassing van HT-stofafscheiding kan leiden tot een minder streng stortregime voor AVI vliegase (C_3 in plaats van C_2).
Toepassing van AVI-vliegase als zelfstandig granulaair bouw materiaal categorie 2 zal, ondanks toepassing van HT-stofafscheiding, waarschijnlijk niet mogelijk zijn.
- Toepassing van HT-stofafscheiding bij AVI's kan een procesgeïntegreerd alternatief zijn voor opwaardering van AVI vliegase in tegenstelling tot achteraf toegepaste andere opwaarderingstechnieken.
- Door toepassing van HT-stofafscheiding boven 500 °C, kunnen de dioxine- en furaanconcentraties in het afgescheiden vliegase verlaagd worden en de vorming van dioxinen en furanen, via 'de novo' synthese tijdens het afkoeltraject van de ontsafte rookgassen, waarschijnlijk voor een belangrijk deel voorkomen worden.
- Op basis van berekeningen van de warmteoverdracht van de rookgassen naar de water/stoomkringloop, kan voor de plaats van de HT-stofafscheiding uit de volgende temperatuurniveaus worden gekozen:
 - 700 - 800 °C → HT-stofafscheiding na 1e trek, voor verdampersectie;
 - 500 - 600 °C → HT-stofafscheiding tussen verdamper- en OVO-secties;
 - 400 - 500 °C → HT-stofafscheiding tussen OVO- en ECO-secties.
- Toepassing van HT-stofafscheiding kan de vervuiling van de pijpenbundels in de ketel verminderen en de standtijd van de ketel verlengen.
De effecten zijn afhankelijk van de plaats van de HT-stofafscheiding in de ketel. De optimale plaats voor een HT-stofafscheidingssysteem, met betrekking tot maximale voorkoming van vervuiling van de ketel, is de 'lege' ruimte tussen de oven en de ketel.
- Op basis van warmteoverdrachtsberekeningen veroorzaakt een vuillaag van 10 mm op de pijpenbundels van de verdampersectie:
 - een verlaging van de stoomproductie met circa 5%;
 - een verhoging van de stoomtemperatuur na OVO met circa 20 °C;
 - een verhoging van de uitlaat rookgastemperatuur met circa 10 °C.

Aanbevelingen

- Op grond van de conclusies van deze voorstudie en de volgende argumenten dient een experimenteel onderzoek uitgevoerd te worden naar de effecten van HT-stofafscheiding bij een AVI:
 - de uitgevoerde inventarisatie van de beschikbare literatuur geeft aanwijzingen dat HT-stofafscheiding goede perspectieven zou kunnen bieden;
 - de betreffende informatie is echter te summier om definitieve uitspraken te kunnen doen, zodat aanvullende informatie uit experimenteel onderzoek dringend gewenst is;
 - de resultaten van een dergelijk experimenteel onderzoek kunnen een bijdrage leveren aan de verdere gedachtenvorming over de rookgasreiniging bij toekomstige AVI's en andere verbrandingsinstallaties.
- Een experimenteel onderzoek naar de effecten van HT-stofafscheiding bij AVI's, dient uitgevoerd te worden met een proefopstelling, waarbij rookgassen uit de ketel van een AVI worden afgezogen bij rookgastemperaturen van respectievelijk circa 750, circa 600 en circa 400 °C.
- De afgezogen rookgasstroom dient in de proefopstelling ontstoft te worden met keramische kaarsfilters. De rookgasstroom dient in de proefopstelling gesplitst worden in twee gelijke deelstromen. De ene deelstroom (HT-teststroom) dient gefilterd te worden bij de afzuigtemperatuur (respectievelijk circa 750, 600 en 400 °C) en vervolgens gekoeld tot circa 200 °C. De andere deelstroom (LT-referentiestroom) dient eerst gekoeld te worden tot circa 200 °C en daarna gefilterd te worden.
- De proefopstelling dient voorzien te zijn van mogelijkheden voor monsterneming van de hoofdgasstroom (voor de proefopstelling) en van de twee deelstromen (in de proefopstelling).
- De monsterneming dient gericht te zijn op de kwantificering van de effecten van HT-stofafscheiding op de samenstelling van de afgezogen rookgassen (dioxine en stof) en de samenstelling van het afgescheiden vlieggas (zware metalen en uitlooggedrag).

9 Referenties

- [1] Quapp M., Sierhuis W.M., Steenhuis H.,
Die Entwicklung der Rauchgasreinigung bei Müllverbrennungsanlagen in den
Niederlanden,
VGB Kraftwerkstechnik 72, (1992), 8, pag. 709-712.
- [2] Rijpkema L.P.M.,
Survey of municipal solid waste combustion in Europe,
TNO report nr. 92-304, August 1992.
- [3] Venselaar J., Jol A.,
Standaardtechnieken voor afscheiding van stof uit gasstromen,
I² Procestechnologie, (1987), 9, pag. 15 - 23.
- [4] Reimann D.O.,
Grenzen und Möglichkeiten der Rauchgasreinigung,
BWK/TU/Umwelt-Spezial, 3, (1993), pag. L27 - L39.
- [5] Zevenhoven C.A.P., Scarlett B., Andries J.,
The Filtration of PFBC Combustion gas in a Granular Bed Filter,
Filtration & Separation, 5/6, (1992), pag. 239 - 244.
- [6] Klein Teeselink, H., Alderliesten P.T.,
Systeemstudie hoge temperatuur gasreiniging, deelstudie 2.4,
ECN rapport C-90-052, november 1990.
- [7] Zevenhoven C.A.P., Bernard J.G., Hein K.R.G., Scarlett B.,
Stofverwijdering uit gasstromen bij hoge temperatuur en druk,
I² Procestechnologie, 1991, 10, pag. 50 -55.
- [8] Trefz M., Muschelknautz E.,
Erweiterung der Zyklontheorie für hochbeladene Strömungen in ZWSF,
VGB Konferenz 'Wirbelschichtsysteme 1990', Essen, BRD, November 1990.
- [9] Adloch W., Keller J., Herbert P.K.,
Das Rheinbraun-HTW-Kohlevergasungsverfahren,
VGB Kraftwerkstechnik 72 (1992), 4, pag. 345-348.
- [10] Koschowitz M.,
Verbesserung der Abscheidung in Zyklonen bei hohen Temperaturen,
BMFT/VGB Konferenz, Düsseldorf, Dezember 1987.
- [11] Riehle C.,
Bewegung und Abscheidung von Partikeln in Elektrofilter,
Dissertation Universität Karlsruhe, 1992.

*Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties**Fase 1: Voorstudie*

- [12] Helfritsch D.J., Feldman P.L.,
High Temperature Filter Media Evaluation,
The 8th Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control
Technology, EPA/EPRI, San Diego, USA, March 1990.
- [13] Ishikawa I., Hamamatsu T., Moritsuka H., Toda H., Ishigami S., Furuya T.,
Der Entwicklungsstand der integrierten Kohlevergasung in Japan,
VGB Kraftwerkstechnik 72 (1992), 5, pag. 405 - 412.
- [14] Peukert W., Löffler F.,
Zur Abscheidung von Staub und gasförmigen Schadstoffen in einem
Schüttstofffilter,
Staub Reinhaltung der Luft 48 (1988) pag. 379 - 386.
- [15] Peukert W., Löffler F.,
An integrated concept for the application of high-temperature granular bed
filters in the aluminium industry,
Second International Symposium on Gas Cleaning at High Temperatures,
Guildford, Surrey, UK, September 1993.
- [16] Mei J.S., Yue P.C., Halow J.S.,
Fluidized Bed Filtration For Particulate Cleanup,
12th FBC Conference, San Diego, USA, May 1993.
- [17] Sellakumar K.M., Isaksson J., Provol S.J.,
High pressure high temperature gas cleaning using an advanced ceramic tube
filter,
11th FBC Conference, Montreal, Canada, 1991.
- [18] Kalthoff U.,
Second International Symposium on Gas Cleaning at High Temperatures,
Guildford, Surrey, UK, September 1993.
- [19] Abrams R.F., Goldsmith R.L.,
Compact Ceramic Membrane Gas Filter,
Second International Symposium on Gas Cleaning at High Temperatures,
Guildford, Surrey, UK, September 1993.
- [20] Lippert, T. e.a.,
'Long-term durability testing of ceramic cross-flow filter',
in 'Proceedings of 1990 Gasification and Gas Stream Cleanup Systems
Contractors Meeting',
DOE/METC.
- [21] Haldipur, G.B. e.a.,
'Subpilot-scale gasifier evaluation of ceramic cross-flow filters',
in 'Proceedings of the Tenth Annual Gasification and Gas Streams Cleanup
Systems Contractors Meeting', pag. 73-82,
DOE/METC 90/6115

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties

Fase 1: Voorstudie

- [22] Newby R.A., Lippert T.E., Smeltzer E.E., Robertson A., Bonk D.,
Cross-flow filter performance with second-generation PFBC carbonizer fuel
gas,
12th FBC Conference, San Diego, USA, May 1993.
- [23] Bijvoet U.H.C.,
Mathematisch model van de naverbranding en de warmte-afvoer in de 1e en
2e trek van een afvalverbrandingsinstallatie,
Intern TNO rapport, ref nr. 92-159.
- [24] Borchers H.W.,
Metallgehalte in Flugstauben aus der Heisszyklonabscheidung einer
Abfallverbrennungsanlage,
Dissertation Technische Universität Berlin, 1991.
- [25] Born J.G.P.,
Reststoffen van afvalverbranding,
publikatie nr: VVAV 93029 TR, november 1993, VVAV, Utrecht.
- [26] Handbook of Chemistry and Physics,
68th Edition, CRC Press, Florida, 1988.
- [27] Ontwerp Bouwstoffenbesluit,
VROM-DGM, juni 1991.
- [28] Concept-Besluit stortverbod afvalstoffen,
VROM-DGM, november 1993.
- [29] Lamers, F.J.M.,
Inventarisatie opwaarderings technieken voor reststoffen van
afvalverbrandingsinstallaties,
publikatie nr: VVAV 93028 TR.R, november 1993, VVAV Utrecht.

10 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever

Ir. K. Braber

NOVEM

Postbus 8242

3503 RE Utrecht

Namen en functies van de medewerkers

Ing. B.J. Gerrits, researchmedewerker

G. Kuipers, werkgroep leider

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed

N.v.t.

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad

Ondertekening



G. Kuipers
onderzoekleider

Goedgekeurd door



Ir. J. de Koning
werkgroep leider

Bijlage A Mogelijkheden van experimenteel onderzoek bij een AVI

Na inventarisatie van kennis en effecten van HT-stofafscheiding blijkt dat het uitvoeren van experimenteel onderzoek met een proefopstelling bij een AVI zinvol zal kunnen zijn.

Opzet van het experimenteel onderzoek

Om de effecten van HT-stofafscheiding te kunnen vaststellen, wordt een rookgasstroom bij een vastgestelde temperatuur uit een AVI gezogen. Deze rookgasstroom wordt gesplitst in twee gelijke deelstromen. De ene deelstroom wordt gefilterd bij de afzuigtemperatuur en vervolgens gekoeld tot circa 200 °C. De andere deelstroom wordt eerst afgekoeld tot 200 °C en vervolgens gefilterd. Vergelijking van de meetresultaten aan de vrijwel identieke lijnen levert informatie op over het effect van HT-stofafscheiding.

Beschrijving proefopstelling

De proefopstelling waarmee de experimenten zullen worden uitgevoerd, is schematisch weergegeven in figuur A.1.

De proefopstelling bestaat uit twee parallel opgestelde filterlijnen. Elke filterlijn is voorzien van een filtersectie en een convectiesectie. Voor beide lijnen zijn deze secties identiek; alleen de plaats in de lijn verschilt.

De filtersectie is een keramische filterunit van Didier. Didier is een van de weinige leveranciers die filtertypen levert voor de gewenste lage capaciteit van de proefopstelling (25 m³ rookgas per uur). Nadat het positieve effect van HT-stofafscheiding is gekwantificeerd kan optimalisatie van het filtertype aan de orde komen. De aanvoerbeleidingen naar de filters zullen voorzien worden van een verwarmingssysteem. De leidingen en dergelijke zullen tevens worden geïsoleerd om condensatie van waterdamp uit het rookgas op koude wanden te voorkomen.

De convectiesectie zal bestaan uit een platenwarmtewisselaar. De rookgassen zullen hierin met omgevingslucht indirect worden gekoeld tot een temperatuur van circa 200 °C.

Uitvoering

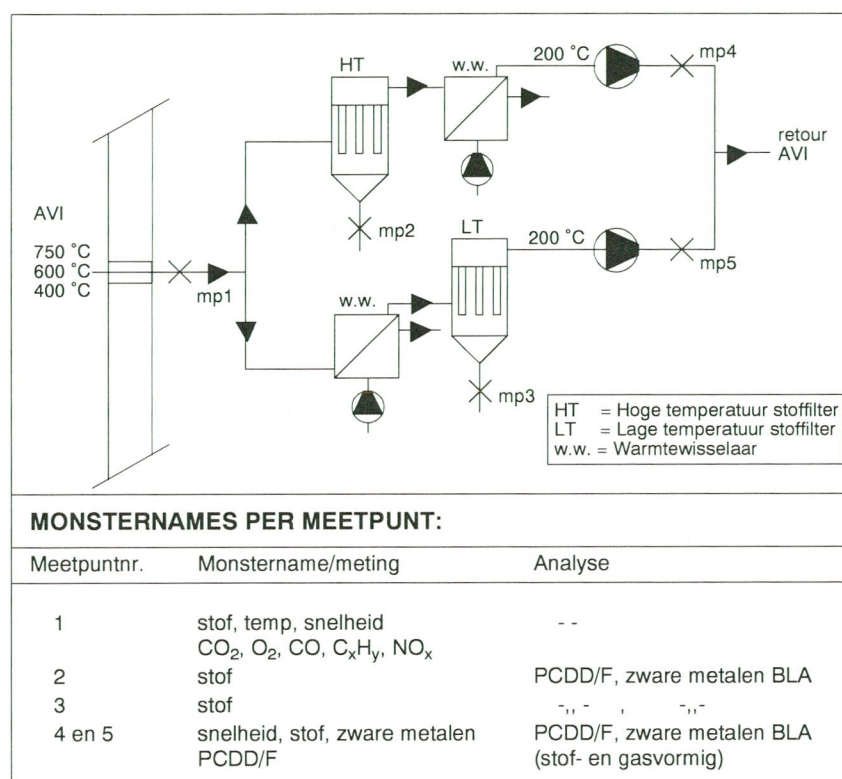
Bij de experimenten zal gebruik worden gemaakt van een standaard type keramisch filter. Onderzocht worden de effecten van HT-stofafscheiding bij temperaturen van circa 750 °C, 600 °C en 400 °C.

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties
Fase 1: Voorstudie

Hiertoe zullen bij de AVI voorzieningen worden getroffen om op drie verschillende plaatsen in één van de afvalverbrandingslijnen een rookgasstroom af te zuigen bij genoemde temperaturen. Van de rookgasstroom wordt het stofgehalte vastgesteld. De rookgasstroom wordt gesplitst in twee deelstromen namelijk de referentiestroom en de teststroom.

De referentiestroom (LT-situatie) ondergaat de volgende behandeling:

- indirecte afkoeling tot circa 200 °C door een luchtgekoelde warmtewisselaar;
- stofafscheiding met een keramisch filter.



Figuur A.1 Schema van de proefopstelling en een overzicht van de monsternemingen per meetpunt

Na deze behandeling wordt het rookgas met een verdunningsset bemonsterd op dioxinen. Tevens wordt het stofgehalte bepaald. De afgescheiden reststoffen uit de keramische filters worden geanalyseerd op dioxinen en zware metalen (14 metalen uit de BLA).

De teststroom (HT-situatie) wordt op de volgende wijze behandeld:

- stofafscheiding bij rookgastemperaturen van respectievelijk circa 750, 600 en 400 °C met een keramisch filter;
- indirecte afkoeling tot circa 200 °C door een luchtgekoelde warmtewisselaar.

Na deze behandeling wordt de teststroom met een verdunningsset bemonsterd op dioxinen en wordt het stof op zware metalen (BLA metalen) gehalte bepaald. De verkregen reststoffen uit de keramische filters worden eveneens geanalyseerd op dioxinen en zware metalen (14 metalen uit de BLA).

Hoge-temperatuur stofafscheiding bij afvalverbrandingsinstallaties

Fase 1: Voorstudie

Uit vergelijking van de meetresultaten van de twee deelstromen kunnen conclusies worden getrokken omtrent het rendement van de stofafscheiding, het effect van de HT-stofafscheiding op het dioxinengehalte van de gefilterde rookgassen en de samenstelling van de asresten.