

Roterende Deeltjes Scheider (RDS) voor reiniging van biomassa stookgassen

C.M. van der Meijden
J.P.A. Neeft
F.B. van der Ploeg

Revisies		
A		
B		
Opgesteld door:	Geverifieerd door:	ECN-Biomassa Werkeenheid Biomassa technologie: Ontwikkeling en Toepassing
J.P.A. Neeft	J. Beesteheerde	
Geverifieerd door:	Vrijgegeven door:	
C.M. van der Meijden	H.J. Veringa	

Verantwoording

Dit is het eindrapport van het project “RDS (Roterende deeltjes scheider) voor reiniging van biomassa stookgassen”, ECN projectnummer 72233. Dit project is uitgevoerd door ECN en Aarding B.V. en medegefinancierd door Novem onder Projectnummer 355200/2610.

Abstract

The building, testing and evaluation of a Rotating Particle Separator (RPS) for the removal of dust, tar and NH_3 from biomass producer gases is reported. The RPS was operated at a low temperature at which water from the producer gas condenses, hence it is called a wet RPS.

In a technical evaluation, experimental tests were performed with the RDS installed downstream of the ECN CFB gasifier. These tests showed that the filter element of the RDS blocked by tars within hours after start of the tests, causing that the RPS had to be stopped. Cleaning of this filter element by a continuous water spray was not sufficient. Optimisation of the cleaning of the filter element is not strived for as during the project Aarding decided to abandon its RPS activities.

However, it was also shown that the RPS can effectively remove dust, tar aerosols and NH_3 from biomass producer gases. The removal efficiency is estimated to be sufficiently high for trouble-free use of the producer gas in a gas engine.

In a rough economical evaluation, the RDS is shown to be a potential more attractive option for biomass gas cleaning than an Electrostatic Precipitator (ESP) or a catalytic cracker (dolomite, TPS concept). However, the cleaning of the filter element must then be solved at limited costs. A nitrogen purge is a too costly option. If a nitrogen purge for cleaning of the RPS is included in the economical evaluation, then the ESP is the most attractive gas cleaning option amongst ESP, RPS and catalytic cracker. For the catalytic cracker, the investment costs are too high.

Finally, on the basis of the results of this study it is argued that existing tar specifications for use of producer gas in gas engines (the regularly mentioned 50 or 100 mg/m_n^3) can be regarded as not very useful. An alternative specification is proposed.

Trefwoorden

Biomassa, vergassing, gasreiniging, teer, RDS, RPS

INHOUD

1.	INLEIDING	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Probleemstelling	7
1.3	Doelstelling en werkwijze	7
2.	ROTERENDE DEELTJES SCHEIDER	9
2.1	Achtergrond	9
2.2	Ontwerp natte RPS	9
2.3	Aarding als leverancier van de RDS	10
3.	CONFIGURATIE BIJ ECN	11
3.1	CFB vergasser BIVKIN	11
3.2	Koppeling BIVIN – RDS	12
4.	UITGEVOERDE TESTEN	15
4.1	Deellast test	15
4.2	Vollast test	15
5.	RESULTATEN EN DISCUSSIE	19
5.1	Resultaten van stof-, teer- en NH ₃ -metingen	19
5.2	Gedetailleerde resultaten voor teer en dauwpunt bepalingen	19
5.3	Beoordeling van de technische prestatie van de RDS	20
5.3.1	Verwijderingsefficiëntie voor stof, teer en NH ₃	20
5.3.2	Bedrijfszekerheid	21
5.4	Beoordeling van de economische prestatie van de RDS	21
5.4.1	Inleiding	21
5.4.2	Beoordeelde systemen	22
5.4.3	Uitgangspunten	22
5.4.4	Werkwijze en bronnen gegevens	22
5.4.5	Resultaten van economische analyse	23
5.4.6	Discussie naar aanleiding van de resultaten	24
6.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	25
7.	REFERENTIES	26

SAMENVATTING

In dit rapport wordt verslag gedaan van een project dat door Aarding en ECN is uitgevoerd. In dit project is een roterende deeltjes scheider (RDS) gebouwd en getest voor de verwijdering van teren, stof en NH_3 uit biomassa stookgassen. De temperatuur waarop de RDS is bedreven was met ca. 50°C relatief laag. Omdat bij die temperatuur water uit het stookgas condenseert, kan worden gesproken van een “natte RDS”.

Er is een technische en een economische evaluatie van de natte RDS uitgevoerd. De technische evaluatie op basis van experimentele testen achter de ECN CFB vergasser heeft aangetoond dat de bedrijfszekerheid van de huidige natte RDS voor teerverwijdering laag is. Reeds na enkele uren moest de RDS uit bedrijf worden genomen vanwege verstoppingen van het filterelement. Er is echter ook aangetoond dat de RDS techniek efficiënt is voor de verwijdering van stof, teer aerosolen en NH_3 uit biomassa stookgassen. De verwijdering van stof en teer is voldoende efficiënt om de gezuiverde stookgassen in een gasmotor toe te kunnen passen.

De verstoppingen van het filterelement traden op doordat reiniging van de RDS met sproeiwater niet voldoende heeft gewerkt. Optimalisatie van de RDS zou nodig zijn voordat deze wordt toegepast, echter, dit zal niet door ECN en Aarding worden uitgevoerd omdat Aarding afziet van verdere activiteiten rond de RDS filters.

Uit de economische evaluatie waarbij de RDS werd vergeleken met een Elektrostatisch Filter (ESP) en een katalytische kraker (TPS concept, dolomiet katalysator) is gebleken dat een ESP naar de huidige inzichten voor een schaal van ruim 2 MW_{th} het meest aantrekkelijke apparaat voor teerverwijdering is. De kraker kent relatief erg hoge investeringskosten. De RDS heeft de potentie een goedkoper apparaat te worden voor teerverwijdering dan de ESP als het technisch knelpunt (teer vloeit niet weg uit de kanalen) kan worden opgelost tegen geringe meerkosten. Een stikstofpurge is een te dure oplossing. De kosten van de waterreiniging in RDS en ESP vormen een belangrijk aandeel in de overall kosten. De hoogte van deze kosten zijn echter onzeker (er is een grote onzekerheidsmarge) en dienen nader te worden bepaald. De kosten voor elektriciteitsverbruik voor de RDS en de ESP zijn laag in verhouding tot andere kosten.

Tot slot wordt op basis van de resultaten van deze studie aangevoerd dat de in de literatuur genoemde stookgasspecificaties voor teer (de regelmatig genoemde 50 of 100 mg/m_n^3) als weinig zinvol kunnen worden aangemerkt. Een alternatieve specificatie wordt voorgesteld.

1. INLEIDING

1.1 Achtergrond

De overheid wil de bijdrage van duurzame energie aan de Nederlandse energievoorziening verhogen tot 10% in 2020 door o.a. de toepassing van bio-energie.

Biomassavergassing wordt gezien als een belangrijke optie voor het mede realiseren van deze overheidsdoelstellingen. Via de vergassingsroute wordt kan een stookgas geproduceerd worden dat benut kan worden in o.a. gasgestookte ketels, gasmotoren, gasturbines, brandstofcellen, STEG systemen of voor methanisering, H_2 productie of Fischer Tropsch olie productie.

Deze gastoe toepassingen stellen bepaalde eisen aan de zuiverheid van het stookgas. Daarnaast worden vanuit de emissieregelgeving eisen gesteld aan het rookgas, en daarmee (indirect) aan de zuiverheid van het stookgas.

Afhankelijk van de gebruikte biomassa, het gekozen vergassingsproces en de beoogde gastoe toepassing dient het stookgas te worden gereinigd van tenminste enkele van de componenten stof, teer, $NH_3 + HCN$, $H_2S + COS$, $HCl (+HF)$ en metalen.

De natte Roterende Deeltjes Scheider (natte RDS of kortweg RDS)¹ zal naar verwachting een groot gedeelte van bovengenoemde verontreinigingen uit het stookgas kunnen verwijderen.

1.2 Probleemstelling

Voor het verwijderen van teer en stof uit stookgassen zijn nog geen bewezen technieken beschikbaar. De Roterende Deeltjes Scheider is mogelijk een techniek die tegen lage kosten verontreinigen als stof, teer en NH_3 in voldoende mate uit het stookgas kan verwijderen.

Tot op heden is er echter nog geen praktische ervaring met deze techniek voor een vergelijkbare toepassing. De bereiken verwijderingpercentages voor stof, teer, NH_3 en HCl en de mogelijke operationele problemen (verstoppingen door teer afzetting) zijn nog onbekend.

1.3 Doelstelling en werkwijze

De algemene doelstelling van dit project is het opdoen van praktische ervaring met de Roterende Deeltjes Scheider voor verwijdering van stof, teer en NH_3 uit biomassa stookgassen, het bepalen van de verwijderingpercentages voor stof, teer, en NH_3 en het maken van een globale economische analyse van deze techniek ten opzichte van een vergelijkbare toepassing.

Meer specifieke doelstellingen en de werkwijze luiden als volgt:

1. Bouw van een RDS geschikt voor verwijdering van stof, teer, NH_3 en installatie van deze RDS achter een biomassa vergasser.

Op dit moment bouwt Aarding verschillende typen RDS. De belangrijkste verschillen liggen met name in het type afdichtingswaaier (een afdichtende of een ventilerende) en de manier van reiniging van het filter. Standaard (bij toepassingen voor droog stof) wordt deze reiniging met perslucht uitgevoerd, voor toepassing van teerverwijdering is reiniging via een

¹: Roterende Deeltjes Scheider (afkorting **RDS**) is de Nederlandse benaming, hetgeen in het Engels wordt vertaald als Rotating Particle Separator (met afkorting **RPS**). In de literatuur wordt de term RPS vaak gebruikt, in dit Nederlandse rapport is RDS de gehanteerde afkorting.

constante waterstroom noodzakelijk omdat de verwachting is dat de teren te plakkerig zijn om met perslucht te kunnen worden verwijderd. Om deze reden dient voor dit project een RDS met een natte reiniging te worden gebouwd.

2. Experimenteel aantonen van de technische haalbaarheid van verwijdering van teer, stof en NH_3 met RDS.

Biomassa teren vormen bij afkoeling een mist van kleine teerdruppeltjes (aerosolen). Het doel van de experimenten is om aan te tonen dat de RDS techniek in staat is om een aanzienlijk deel van deze aerosolen uit biomassa stookgassen te verwijderen. Optimalisatie van de RDS techniek naar een zo hoog mogelijk verwijderingsrendement voor stof en teer is geen doel van deze studie maar zou moeten worden uitgevoerd indien deze studie een positieve technische haalbaarheid en een positieve globale economische evaluatie oplevert.

Ook het inschatten van de technische haalbaarheid van verwijdering van NH_3 is een doelstelling van dit project. Reden van deze doelstelling is dat het stookgas voor de RDS dient te worden gekoeld van ca. 250-300°C naar 50°C. Hiervoor kan een waterquench gebruikt worden. Er dient zoveel water te worden toegevoegd dat vloeibare druppeltjes aanwezig zijn, en hiermee ontstaat in combinatie met de cycloon-werking van de RDS mogelijk een scrubber-werking waarmee NH_3 kan worden verwijderd. Als dit principe kan worden aangetoond, zou de RDS twee apparaten in de bestaande (conventionele) gasreiniging kunnen vervangen: zowel een apparaat voor teerverwijdering zoals een zand/zaagselbedfilter (een scrubber is doorgaans beperkt geschikt voor teerverwijdering) en ook een scrubber voor verwijdering van stof en NH_3 .

De haalbaarheid van HCl-verwijdering is geen doelstelling in dit project aangezien de HCl-concentraties in stookgassen van schone biomassa laag zijn en niet tot overschrijding van emissie-eisen leiden.

3. Globale economische evaluatie van de RDS als teerverwijderaar.

Het doel van dit onderdeel is om met de beperkte gegevens over efficiëntie van teerverwijdering een eerste, globale economische evaluatie te maken van de RDS, deze in te passen in een concept voor gasreiniging voor een compleet biomassa vergassings systeem (een combinatie van apparaten voor gasreiniging) en deze te vergelijken met ten minste één conventioneel concept. Op basis van deze evaluatie en de uitkomst van de technische haalbaarheid kan dan worden ingeschat of verdere optimalisatie en eventuele uitontwikkeling van teerverwijdering met RDS perspectief biedt op kostenverlaging voor gasreiniging in biomassa vergassingsinstallaties.

In dit Hoofdstuk 2 van dit rapport worden achtergrond en ontwerp van de RDS beschreven. Hoofdstuk 3 behandelt de configuratie van de vergasser en het gasreinigingsysteem bij ECN. Daarna wordt in Hoofdstuk 4 het verloop van de uitgevoerde testen beschreven en worden in Hoofdstuk 5 de resultaten besproken en bediscussieerd. De conclusies van dit rapport zijn verwoord in Hoofdstuk 6.

2. ROTERENDE DEELTJES SCHEIDER

2.1 Achtergrond

Betrouwbare en economisch haalbare gasreiniging (met name teerverwijdering) is een van de belangrijke hinderpalen die succesvolle demonstratie en aansluitend commerciële vermarkting van integrale biomassa vergassingsystemen in de weg staan. Bestaande gasreiniging (met name teerverwijdering) heeft zich nog niet in de praktijk bewezen. Deze reiniging bestaat uit een aantal stappen en dus uit een aantal apparaten. Tot dusver zijn voornamelijk apparaten voor gasreiniging voorgesteld en beproefd die kunnen worden gezien als ‘conventioneel’.

In recentelijk uitgevoerde inventarisaties [1,2] wordt een aantal nieuwe technieken genoemd voor verwijdering van stof, teer, NH_3 en/of HCl . Drie mogelijk veelbelovende nieuwe technieken zijn de roterende deeltjesscheider (RDS), plasmareactoren (zoals gepulste corona en ‘GlidArc’) en de ‘Reversed Flow Catalytic Tar Cracker’.

De RDS en plasmareactoren hebben als potentieel groot voordeel boven andere technieken waarmee teren uit biomassa stookgassen kunnen worden verwijderd, dat deze technieken mogelijk ook stof, NH_3 en HCl (de laatste component alleen met de RDS) kunnen verwijderen. Op deze manier kunnen enkele of zelfs alle conventionele apparaten voor gasreiniging worden vervangen door een enkel apparaat.

De plasmatechnieken worden binnenkort voor teerverwijdering uit biomassa stookgassen getest binnen het SDE (Samenwerkingsverband Duurzame Energie) project “gasreiniging met plasmareactoren”. Doel van deze studie is het vinden van optimale bedrijfsparameters voor teer- en mogelijk ook stof- en NH_3 -verwijdering met plasmatechnieken, en het genereren van getallen waarmee een globale economische analyse kan worden uitgevoerd.

De RDS is tot dusverre bijna alleen voor stofverwijdering bij biomassa verbranding ingezet [4-6]; de enige plaats waar deze wordt ingezet in biomassa stookgassen is in Espenhain, waar een full-scale RDS is geplaatst achter een 4 MW_{th} vergasser. Vanuit Espenhain zijn slechts in beperkte mate technische gegevens vrijgekomen, omdat de RDS in Espenhain als commercieel apparaat is gekocht. Deze RDS is inmiddels om onbekende redenen ontmanteld.

Tenslotte heeft TNO [6] al eens aangevoerd dat de RDS voor teerverwijdering zeer succesvol zou kunnen zijn, echter, deze stelling is niet experimenteel onderbouwd.

2.2 Ontwerp natte RDS

Aarding heeft de bij ECN te installeren natte RDS ontworpen. De basis van dit ontwerp vormde een berekening op basis van een computermodel dat is ontwikkeld aan de Universiteit Twente. Voor het ontwerp relevante parameters zijn temperatuur, druk, flow, deeltjesdichtheid, deeltjesgrootte verdeling en de beoogde deeltjes afscheidingsgraad. Gekozen is voor een afdichtende waaier, hetgeen inhoudt dat de waaier als “gasslot” dient tussen de in- en uitgaande gasstroom. De gebruikte waaier resulteert in een (beperkte) drukval over de RDS, dit in tegenstelling tot een ventilerende waaier die resulteert in een lagere druk na de RDS ten opzichte van de druk voor de RDS. De keuze voor de afdichtende waaier is gemaakt omdat in de Gasreip installatie van ECN reeds een booster is geplaatst die voor een voldoende drukval zorgt.

Uit de berekeningen met de ontwerpparameters volgde een basisontwerp (lengte, hoogte, in- en uitlaat diameters). Door middel van het aanpassen en justificeren van variabelen (o.a. ingegeven door het programma) ontstond een optimale verhouding tussen het toerental van de motor, de gassnelheden aan de in- en aan de uitlaat van de RDS, de hoek van de cycloon, de

afscheidingsgraad en de dichtheid van het filterelement. Dit alles wordt begrensd door de maximale snelheid welke mag optreden in het filterelement.

De quench voor het afkoelen van het stookgas is ontworpen in samenspraak met de firma SWN (delavan). Zij hebben middels een computermodel de diameter, lengte en type nozzle voor de quench bepaald om het gas voldoende af te kunnen koelen van 250 naar 50°C. De druppelgrootte gecreëerd in de nozzle van de quench is 200 µm.

In de natte reiniging wordt het stookgas bewust met waterinjectie gekoeld in de voor de RDS geplaatste quench. Er wordt namelijk naar gestreefd om over de wanden van de kanaaltjes in het RDS filterelement een dun laagje water te laten lopen. Daarom is ook gekozen voor reinigen van de kanaaltjes in het RDS filterelement via stationaire nozzles geplaatst boven het element. De RDS is toch al behoorlijk nat van binnen en er wordt getracht een waterstoom door de kanaaltjes te creëren. De twee geplaatste nozzles hebben voldoende capaciteit om een waterfilm op het element aan te kunnen brengen.

Het ligt voor de hand om in deze natte omgeving juist met vloeistof (water) te koelen en niet met stoom omdat stoomreiniging de gasstroom juist opwarmt; dat is ongewenst na een quench die juist koelt. Een bewegend systeem heeft geen enkel voordeel; bovendien is het kwetsbaarder (teer!).

Voordeel van waterreiniging ten opzichte van persluchtreiniging of stoomreiniging is dat geen emissiepiek optreedt tijdens de reiniging.

2.3 Aarding als leverancier van de RDS

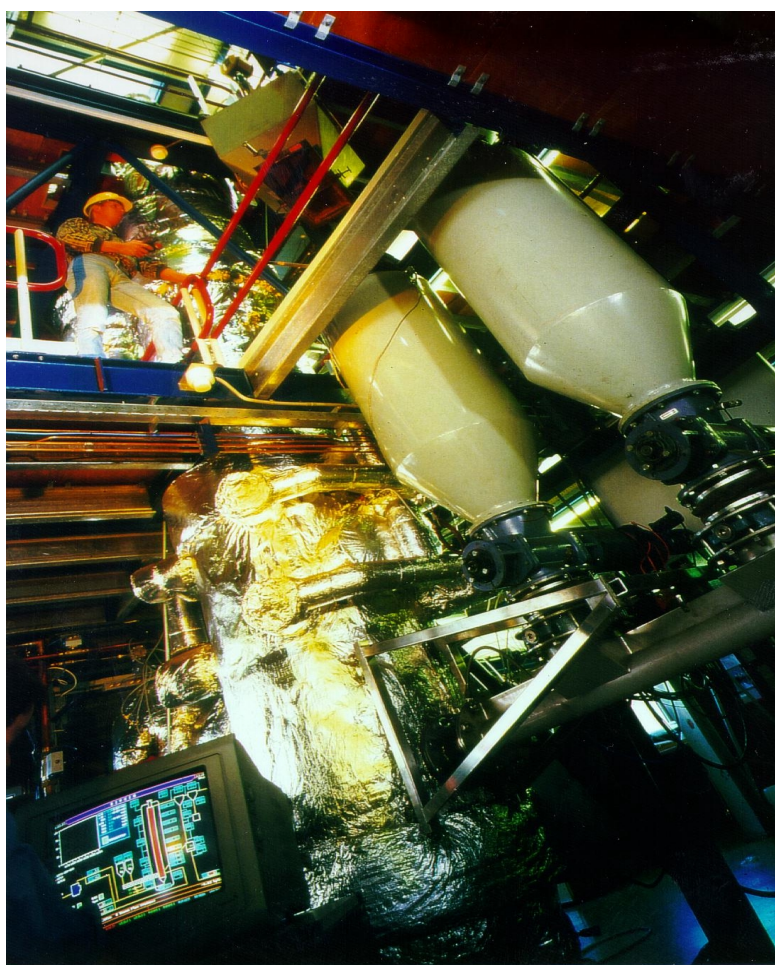
Oorspronkelijk is de RDS ontworpen door Prof. Brouwers aan de UT en later de TU/e [3]. De commerciële productie is ter hand genomen door Machinefabriek Aarding BV (in dit rapport “Aarding”). Tegen het einde van dit project werd duidelijk dat Aarding vanwege problemen op financieel gebied heeft besloten te stoppen met haar activiteiten op het gebied van RDS filters. Getracht wordt deze activiteiten onder te brengen bij een geïnteresseerd bedrijf.

3. CONFIGURATIE BIJ ECN

De door Aarding ontworpen en gebouwde RDS met natte quench is in augustus 2001 bij ECN aangesloten. De configuratie van het geteste systeem is in Bijlage 1 schematisch weergegeven, hieronder zullen de afzonderlijke onderdelen kort worden besproken.

3.1 CFB vergasser BIVKIN

De RDS is getest met biomassa stookgas uit de ECN Circulerend Fluidised Bed (CFB) vergasser BIVKIN (Biomassa Vergassings Karakteriserings INstallatie). Deze installatie is getoond in Figuur 1. De BIVKIN is een “bench scale” CFB vergasser met een doorzet van ongeveer 100 kg/uur aan biomassa. Dit levert ongeveer 200 m³/h aan stookgas met een calorische waarde van ongeveer 6 MJ/m³.



Figuur 1 *De ECN circulerend wervelbedvergasser (BIVKIN)*

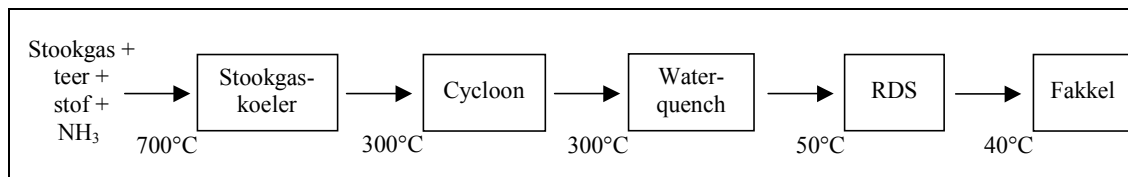
De BIVKIN installatie bestaat uit verschillende voedingsbunkers (voor verschillende brandstofsoorten), een riser (de vergasser), eerste cycloon, terugvoersysteem, tweede cycloon en een fakkel.

In de BIVKIN installatie zijn testen uitgevoerd met o.a. wilg, beuk, meranti, sloophout, groenhout, bermgras, plaatmateriaal, sloophout / rioolslib, sloophout / papier residuslib, stro, kippenmest, varkensmest, cacaodoppen en zonnebloem schilfers.

In 2000 is de BIVKIN installatie uitgebreid met de Gasreip A gasreiniging [7]. Van een gedeelte van deze uitbreiding is gebruikt gemaakt voor het beproeven van de RDS.

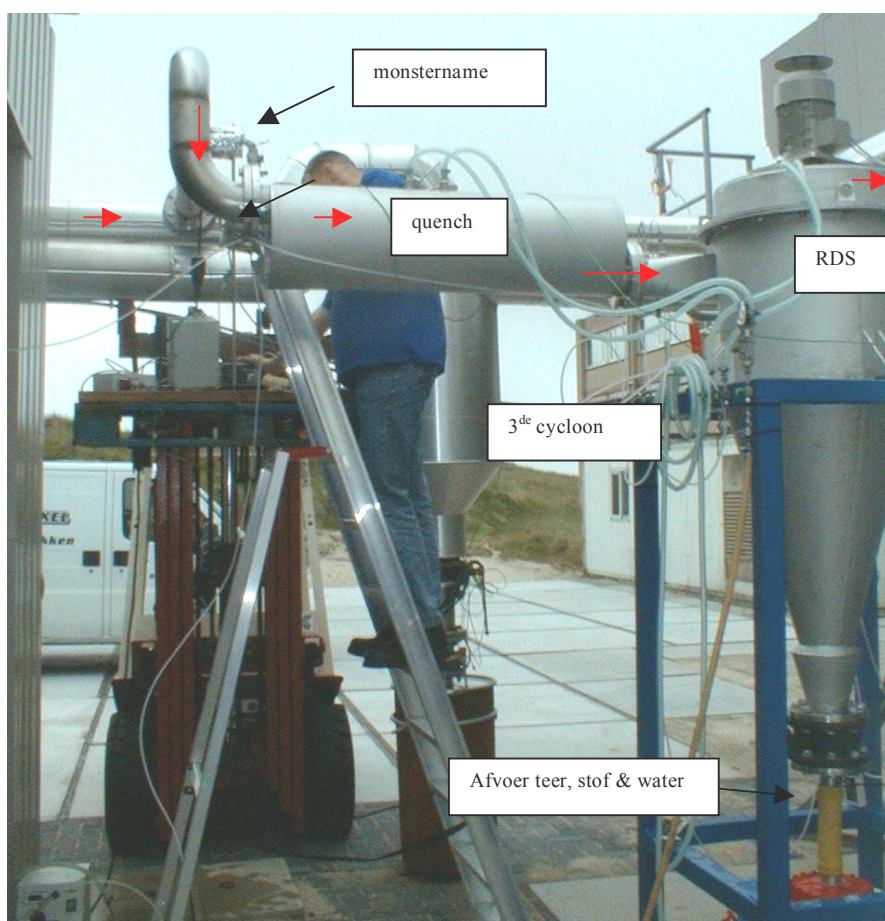
3.2 Koppeling BIVIN – RDS

De door Aarding geleverde RDS en natte quench zijn door ECN gemonteerd en aangesloten volgens het schema in Figuur 2.



Figuur 2 Schema van aansluiting van RDS. Het stookgas komt direct uit de BIVKIN.

Het aansluitschema van de RDS achter de BIVKIN is in meer detail weergegeven in Bijlage 1. Voor het plaatsen van de RDS is gebruik gemaakt van de infrastructuur die gebouwd is t.b.v. de Gasreip A en Gasreip B projecten. De RDS is geplaatst in de stookgas retourleiding na de 3^{de} cycloon van Gasreip B, zie Figuur 3.



Figuur 3 RDS en natte quench

Het stookgas uit de BIVKIN wordt gekoeld tot ongeveer 250 °C. De stofconcentratie van het stookgas wordt verlaagd van ongeveer 6 g/m³ tot ongeveer 2 g/m³ in een derde cycloon. Het stookgas gaat na de ontstofting naar het Gasreip gebouw (Dinkeldome), waar de Gasreip

gasreiniging staat. Deze reiniging is voor de RDS testen gebypassed. Na enige uren bedrijf (dit i.v.m. doorwarmen van het leidingsysteem) bedraagt de temperatuur van het stookgas na de Gasreip bypass leiding ongeveer 250 °C, de stofconcentratie ongeveer 2 g/m³ en de teerconcentratie ongeveer 7 g/m³.

Voordat het stookgas van 250 °C naar de RDS gaat wordt het verder afgekoeld tot ongeveer 40°C door water in te spuiten (natte quench). Het stookgas na de natte quench is oververzadigd met water. De waterdruppels behoren met het stof en de gecondenseerde teer aerosolen afgevangen te worden door de RDS.

Het afgevangen afvalwater met stof en teer wordt via de onderkant van de RDS afgevoerd naar een afvalwatertank. De reiniging van dit water was geen onderdeel van dit project.

4. UITGEVOERDE TESTEN

De RDS testen zijn uitgevoerd in augustus 2001. ECN heeft de stookgasproductie en de metingen verzorgd, Aarding heeft zorggedragen voor het bedrijf en de instellingen van de RDS.

Het stookgas dat tijdens de beide testen door de RDS is geleid, is geproduceerd in de BIVKIN uit vergassing van hout pellets (10 wt% vocht) onder ‘standaard’ condities. Deze standaard condities houden in: vergassingstemperatuur van gemiddeld 850 °C en een lineaire gassnelheid in de riser van 7 m/s. Dit resulteert in een stookgasdebiet van ongeveer 190 m³/h met direct na de vergasser en tweede cycloon een stof concentratie van ongeveer 5 g/m³ en een teerconcentratie van ongeveer 7 g/m³. De calorische waarde van het stookgas bedraagt ongeveer 6 MJ/m³ op LHV basis.

Voorafgaand aan de stookgas testen is een functionele test uitgevoerd op rookgas.

4.1 Deellast test

Op 14 augustus is de RDS voor de eerste maal getest. In de ochtend is een test op rookgas uitgevoerd, waarbij werd geconstateerd dat het systeem testklaar was. In de middag zijn de testen vervolgd op stookgas. Aan het eind van de testen bleek dat het filter slechts met een gedeelte van het stookgas doorstroomd was (grotendeels 25%, wat overeenkomt met 25 m³/h). Dit was het gevolg van een lekkende breekplaat in de stookgasleiding tussen de vergasser en het RDS filter.

Na reparatie van deze breekplaat bleek dat het tijdens de vollast test (zie 4.2) niet mogelijk was om betrouwbare metingen te doen vanwege het te snel verstopten van het RDS filter. Daarom zijn de stof-, teer- en NH₃-analyses uit de deellast test in Paragraaf 5.1 en 5.2 verder uitgewerkt.

Tabel 1 Proces parameters tijdens deellast bedrijf

Stookgasdebiet door filter (schatting) [m ³ /h]	±50
Intrede temperatuur voor natte quench [°C]	77
Stookgas temperatuur na natte quench [°C]	56
Stookgas temp na RDS [°C]	37
Quench water debiet [l/h]	± 20
Spoelwaterdebiet [l/h]	± 200
Toeren tal RDS [omw/min]	3000
Opgenomen E-vermogen [W]	1350
Drukval RDS [mbar]	2

4.2 Vollast test

Op 14 augustus zijn, nadat de breekplaat in de stookgas aanvoerleiding vervangen was, de testen vervolgd.

Het spoelwaterdebiet door de RDS (voor het schoonspoelen van de kanaaltjes, was op maximaal gezet, omdat gevreesd werd voor het verstopten van de kanaaltjes in de RDS. Nadat de RDS ingeschakeld was en het spoelwater ingesteld was, werd het stookgas door de RDS geleid. Tijdens de test in de ochtend kon ongeveer een half uur stookgas door het systeem geleid worden, voordat de drukval over de RDS zo hoog op was gelopen dat beveiligingen voor te hoge druk in de BIVKIN de test deden beëindigen. De uitlaatdruk was opgelopen van ongeveer 50 mbar tot boven de 95 mbar. Hierdoor werd de automatische noodstop geactiveerd.

Vanwege de relatief grote hoeveelheden water die in de RDS werden gespoten (het spoelwater voor het filter), liep de leiding na de RDS vol met water. Deze leiding is vervolgens voorzien van een aftap punt, zodat de testen in de middag hervat konden worden.

De procesparameters van de test uitgevoerd in de ochtend zijn gegeven in onderstaande tabel. De test heeft ongeveer 26 minuten geduurd.

Tabel 2 Procesparameters tijdens vollast bedrijf

Stookgasdebiet door filter [m_n^3/h]	1900
Intrede temperatuur voor natte quench [$^{\circ}\text{C}$]	203
Stookgas temperatuur na natte quench [$^{\circ}\text{C}$]	64
Stookgas temp na RDS [$^{\circ}\text{C}$]	52
Quench water debiet [l/h]	± 20
Spoelwaterdebiet [l/h]	± 200
Toeren tal RDS [omw/min]	3000
Opgenomen E-vermogen [W]	Niet gemeten
Drukval RDS [mbar]	4 - >50

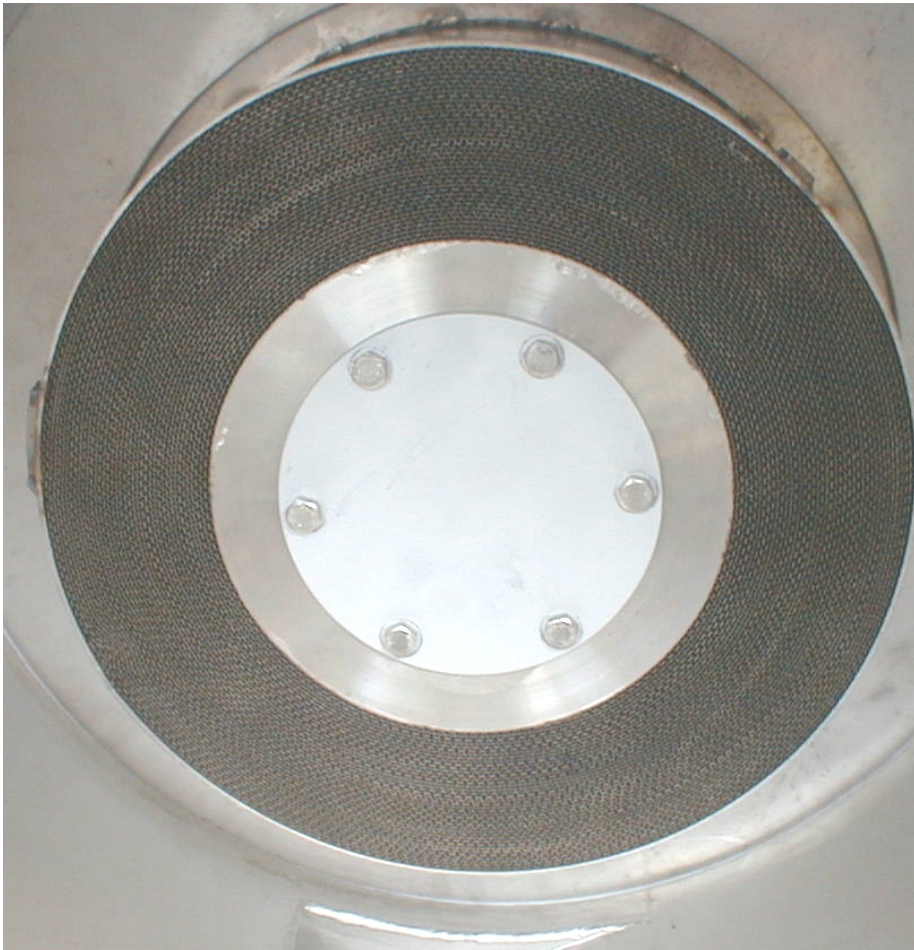
In de middag is de RDS nog tweemaal in bedrijf geweest, beide keren moest de stookgas toevoer naar het filter binnen 5 a 10 minuten uitgeschakeld worden i.v.m. de te hoog oplopende drukvallen.

Tijdens de testen stond het spoelwaterdebiet op maximaal ingesteld, hierdoor liep het afvalwatervat (inhoud 1000 liter) veel sneller vol dan gepland. Om deze praktische reden kon het spoelwaterdebiet niet nog verder worden verhoogd.

Geen van de uitgevoerde vollast testen heeft lang genoeg geduurd om stookgasanalyse metingen (stof, teer & NH_3) te kunnen uitvoeren. Wel was gedurende het ingeschakeld zijn van de RDS de vlam aan de fakkel zichtbaar schoon, dit is een kwalitatieve indicatie voor significante verwijdering van stof en teer.

Na de test is het filter geopend en is het filter geïnspecteerd op vervuiling en/of verstoppingen. Figuur 4 en Figuur 4 tonen foto's van het filterelement voor en na de test. Beide foto's zijn genomen vanaf de onderkant van het filter (de stookgas intrede kant). De rechter foto laat de met teer en stof verstopte kanaaltjes zien. Deze kanaaltjes zouden schoongehouden moeten worden door het water (spoelwater). Het vermoeden werd hiermee bevestigd dat het filter verstopt was met teer doordat deze kanaaltjes deels zouden zijn verstopt.

Na demontage en inspectie van het filter is in overleg met Aarding besloten om het filter niet opnieuw te testen. De vervuiling was van dien aard, dat met de huidige uitvoering van het RDS filter geen positief resultaat kan worden verwacht.



Figuur 4 Foto van RDS filter voor de test



Figuur 5 Foto van RDS filter na de test

5. RESULTATEN EN DISCUSSIE

Alle gerapporteerde en bediscussieerde getallen hebben betrekking op één set meetwaarden, verkregen onder deellastcondities zoals beschreven in Paragraaf 4.1.

5.1 Resultaten van stof-, teer- en NH₃-metingen

Tijdens deellast bedrijf zijn beperkt metingen uitgevoerd. Deze resultaten van deze metingen zijn weergegeven in Tabel 3 en geven een indicatie van de verwijdering van de componenten stof, teer en NH₃ onder deze condities. De resultaten voor teer zijn de overall resultaten, de resultaten voor verschillende componenten in teer worden in de volgende paragraaf uitgewerkt.

Tabel 3 Stookgas metingen tijdens deellast bedrijf

	Voor RDS	Na RDS	Verwijderingspercentage
Stof [mg/m ³]	340	15	96%
Teer SPA methode ² [mg/m ³]	8000	4500	44%
NH ₃ [Vppm]	4000	500	87%

Het lage verwijderingspercentage voor teer is niet geheel buiten verwachting omdat bij voorbaat bekend was dat de RDS alleen de condenserende teren (die na afkoelen aerosolen vormen) kan afvangen. De absolute teerconcentratie getallen zeggen dus niet direct veel over de werking van de RDS. In het volgende hoofdstuk wordt nader in gegaan op de resultaten per teerverbinding.

5.2 Gedetailleerde resultaten voor teer en dauwpunt bepalingen

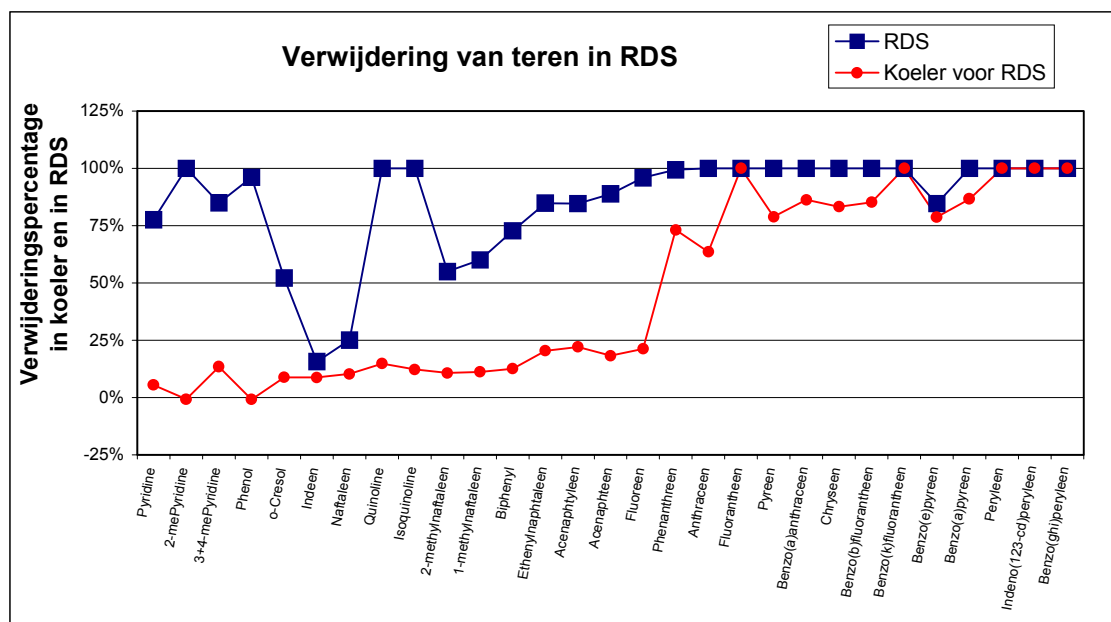
De SPA metingen die tijdens de deellasttest zijn uitgevoerd, worden gerapporteerd in Bijlage 2. Tevens zijn de resultaten grafisch weergegeven in Figuur 6. In deze figuur is duidelijk te zien dat de zwaardere teerverbindingen in de RDS geheel worden verwijderd (met een klein dipje voor benzo(a)pyreen en benzo(e)pyreen). De middelgrote verbindingen in de range methylnaftalenen t/m anthraceen worden tussen 50% en 90% verwijderd terwijl de lichtste niet-polaire verbindingen (indeen en naftaleen) voor slechts 20-25% worden verwijderd.

Verder wordt geobserveerd dat kleine polaire (en daardoor wateroplosbare) teerverbindingen als (methyl)pyridine, phenol en (iso)quinoline in de RDS voor nagenoeg 100% worden verwijderd, met als uitzondering o-cresol (verwijderingspercentage 52%).

Tabel 4 Teer concentraties en berekende dauwpunt temperaturen voor de RDS en koeler, tussen de koeler en RDS en na de RDS

Locatie	Gemeten teer concentratie	Berekend dauwpunt
Ruwe stookgas (vóór koeler)	12,0 g/m ³	184 °C
Stookgas na koeler, vóór RDS	8,0 g/m ³	142 °C
Stookgas na RDS	4,5 (4,489) g/m ³	118 °C
Idem, zonder benzo(e)pyreen	4,5 (4,487) g/m ³	52 °C

²: SPA staat voor “Solid Phase Adsorption”. De SPA teer meet methode is in Zweden ontwikkeld en is sinds 1998 door ECN op enkele punten verbeterd en wordt nu routinematig gebruikt. In referenties [8,9] wordt de oorspronkelijke methode beschreven. Meer informatie kan bij ECN worden verkregen.



Figuur 6 Verwijderingspercentage, gedefinieerd als $(100\% \cdot (\text{teer in} - \text{teer uit}) / \text{teer in})$ van teerverbindingen in de koeler voor de RDS en in de RDS.

De met SPA gemeten teerconcentraties zijn gebruikt om dauwpunt temperaturen te berekenen. Het dauwpunt is die temperatuur, waarbij de som van de concentraties (partiaalspanningen) gedeeld door de dampspanning gelijk is aan één. Beneden deze temperatuur condenseren teerverbindingen, boven dit dauwpunt vindt geen condensatie plaats. Resultaten staan weergegeven in Tabel 4. Uit de data kan worden opgemaakt dat de RDS het dauwpunt van de teren aanzienlijk verlaagt. Verder kan worden geconcludeerd dat het dauwpunt van bijna 120 °C voor een zeer groot deel is toe te schrijven aan de verbinding benzo(e)pyreen, die in zeer lage concentraties (2 mg/m^3) na de RDS is gemeten. Deze concentratie is lager dan de detectielimiet van de SPA methode, als het dauwpunt opnieuw wordt berekend met een concentratie “0” voor benzo(e)pyreen dan volgt daaruit een dauwpunt van 52°C.

5.3 Beoordeling van de technische prestatie van de RDS

De technische prestatie van de RDS wordt in deze paragraaf beoordeeld op basis van twee parameters, namelijk (i) de verwijderingsefficiëntie voor de verontreinigingen stof, teer en NH_3 en (ii) de bedrijfszekerheid.

5.3.1 Verwijderingsefficiëntie voor stof, teer en NH_3

Ten aanzien van de verwijderingsefficiëntie kan worden gesteld dat:

- Stof in voldoende mate wordt verwijderd. Met 96% is de verwijderingsefficiëntie hoog. De resterende 15 mg/m^3 stof voldoet aan de specificaties voor een gasmotor (50 mg/m^3 [1]).
- De overall teerverwijdering met 44% slechts beperkt is. Echter, het dauwpunt wordt verlaagd van 184°C naar 52°C, hetgeen een zeer grote reductie betekent zeker gezien het feit dat de stookgas temperatuur na de quench 56 °C bedroeg (en aan de uitlaat van de RDS 37 °C). Het dauwpunt van het gas was dus ongeveer gelijk aan de temperatuur van het stookgas in de RDS. Dit betekent dat een zeer efficiënte verwijdering van de teer aerosolen is bereikt (want als nog aerosolen = gecondenseerde teren aanwezig waren geweest, hadden deze geleid tot een hoer dauwpunt van het gas). Geconcludeerd wordt dat de teerverwijdering in de RDS afdoende is om het stookgas bij 10-20°C hogere temperatuur dan in de RDS heerst, probleemloos toe te kunnen voegen aan een gasmotor. Verwezen wordt in dit verband naar de discussie in Paragraaf 5.4.6.

- De verwijdering van NH_3 met 87% niet voldoende is om te voldoen aan de stookgaseisen voor een gasmotor (door Jenbacher gesteld op 55 mg/m_n^3 [1]). De verwijdering in de RDS maakt additionele reiniging in een scrubber eenvoudiger.

Geconcludeerd wordt dat de RDS efficiënt is voor het verwijderen van stof, teeraerosolen en NH_3 . De verwijdering van stof en teer is voldoende voor toepassing van de gezuiverde stookgassen in een gasmotor, voor NH_3 is aanvullende reiniging waarschijnlijk noodzakelijk.

5.3.2 Bedrijfszekerheid

De bedrijfszekerheid van de huidige natte RDS voor teerverwijdering is laag: reeds na enkele uren moest de RDS uit bedrijf worden genomen vanwege verstoppingen van het filterelement. Geconcludeerd moet worden dat de reiniging met sproeiwater van boven de RDS niet heeft gewerkt. Mogelijk hebben de grote centrifugaalkrachten in het filter, in combinatie met de gassnelheden door het filter (in opwaartse richting), gezorgd dat dit waterdebiet *niet* door de filterkanaaltjes heeft gestroomd.

Voor het voorkomen van deze verstoppingen wordt aan drie mogelijke opties gedacht. De eerste is het omkeren van de stromingsrichting van de stookgassen waardoor deze het op de filterkop gesproeiwater door de kanaaltjes trekt. Hiervoor is een herontwerp van de RDS noodzakelijk. De tweede optie is om toch stikstofpulsen toe te passen die het mengsel van water, teer en stof door de kanaaltjes blazen. De derde optie is tenslotte om twee RDS'en parallel toe te passen en de niet in gebruik zijnde RDS te reinigen, bijvoorbeeld door tegenstrooms te spoelen met (voorverwarmd) water.

Omdat Aarding om financiële redenen heeft besloten te stoppen met de commerciële productie van RDS filters (zie Paragraaf 2.3) is door ECN en Aarding tezamen ingeschat dat verder testen met de huidige, bij ECN geteste uitvoering van de RDS op dit moment niet zinvol is voor teerverwijdering. Het doen van onderzoek naar oplossingen voor de afvoer uit de kanaaltjes van ophopend stof en teer wordt echter, mede op basis van de economische analyse in de volgende paragraaf, als zinvol ervaren.

5.4 Beoordeling van de economische prestatie van de RDS

5.4.1 Inleiding

De verdere ontwikkeling van de huidige, bij ECN geteste RDS lijkt op dit moment niet langer kansrijk vanwege de lage bedrijfszekerheid en het gegeven dat Aarding stopt met de levering van RDS filters. Echter, voor de verdere ontwikkeling van biomassa vergassingssystemen is het wel interessant om via een globale economische analyse de nu meest kansrijke opties te vergelijken. Daarin is de RDS, zoals elders beoordeeld met een stikstof purge [10] meegenomen, nu echter bedreven op lage temperatuur voor verwijdering van teeraerosolen. De meest kansrijke en in deze studie beschouwde teerverwijderingsystemen zijn katalytische kraken, RDS en ESP. Voor katalytisch kraken is het TPS concept (CFB kraker met dolomiet) beschouwd.

Andere teerverwijderingsopties (zie voor een opsomming Tabel 5.6 in [2]) zijn niet meegenomen om de volgende redenen. Voor de plasma reactoren (GlidArc en gepulste Corona) en voor een nieuw, bij ECN ontwikkeld type scrubber zijn onvoldoende economische data voorhanden om ze in deze analyse mee te kunnen nemen. Van andere in [10] genoemde opties is op voorhand bekend dat ze voor kleine of middengrote CFB biomassa WKK systemen te duur zijn (thermisch kraken en adsorptie), of technisch niet in staat zijn teren in voldoende mate te ververwijden uit CFB stookgassen (zand- en zaagselbedfilter, andere typen filters, waterscrubber).

5.4.2 Beoordeelde systemen

De katalytische kraker wordt bij hoge temperatuur bedreven (800 of 900°C), het gasreinigingssysteem bestaat naast de kraker uit een watergekoelde warmtewisselaar en een scrubber. De RDS en de ESP zijn in een gasreinigingssysteem geplaatst na een warmtewisselaar (tot ca. 300°C), een quench (tot ca. 40°C) en een scrubber. De scrubber dient voor verwijdering van NH_3 . De RDS en ESP worden bedreven bij lage temperatuur (ca. 35°C). Voor de hier beoordeelde RDS is aangenomen dat reiniging met purge stikstof een oplossing biedt. Een succesvol herontwerp (omkering van de stromingsrichting) zou waarschijnlijk op lagere overall kosten uitkomen, plaatsing van een tweede RDS waarbij telkens één RDS buiten bedrijf is en kan worden gereinigd, zou waarschijnlijk op hogere overall kosten uitkomen.

5.4.3 Uitgangspunten

De economische analyse is gebaseerd op de volgende uitgangspunten:

- De berekening is uitgevoerd op een schaal van 2,2 MW_{th} (de schaal van de toekomstige ECN Bio-WKK).
- De rendementen van alle drie systemen zijn gelijk: de hogere uiteindelijke ER nodig voor de katalytische kraker (extra luchtinjectie in kraker) wordt gecompenseerd door de extra stoom productie in de grotere warmtewisselaar voor de kraker;
- De investerings- en operationele kosten voor de warmtewisselaars, de eventuele quench, de scrubber en een stripper (nodig in alle drie de systemen voor verwijdering van NH_3 en een deel van de (vluchtige) teerverbindingen uit het scrubberwater) zijn in alle drie de systemen gelijk. Daaruit volgt dat verschillen tussen de drie systemen zijn terug te voeren op investeringskosten en operationele kosten voor de kraker, RDS of ESP. Onderliggend uitgangspunt is dat in het systeem met de katalytische kraker stof afdoende in de scrubber wordt verwijderd en dus geen (extra) cycloon of stoffilter nodig is.
- Het scrubberwater kan na teerafscheiding in een bezinktank opnieuw worden ingezet. De teer kan naar de vergasser worden gerecycled. Het debiet aan afvalwater, dat vanwege hoge teer- en NH_3 -concentraties moet worden gereinigd, is gelijk aan het debiet aan condenswater uit de installatie;
- De kosten voor afvalwaterreiniging worden niet berekend als investerings- en operationele kosten maar als parameter (in Euro per m^3 afvalwater) meegenomen omdat ze onbekend en schaalafhankelijk zijn;

5.4.4 Werkwijze en bronnen gegevens

In deze ruwe economische analyse zijn vergeleken de investeringskosten plus de operationele kosten voor elektriciteitsverbruik, stikstofpurge (RDS), dolomietinkoop en –afvoer (kraker) en afvalwaterbehandeling (RDS en ESP). Onderhoudskosten en arbeidskosten zijn dus niet beschouwd. De gebruikte gegevens komen uit een rapport van Verenum [10] voor kleinschalige biomassa vergassingsinstallaties, uit een studie door Universiteit Utrecht en ECN voor grootschalige vergassingsystemen [11] en van ECN.

De investeringskosten voor de drie apparaten zijn als volgt tot stand gekomen:

- Twee waarden voor de RDS op een schaal van 1 MW_{th} zijn gevonden: 8 k-Euro [10] en 58 k-Euro op basis van dit project. Gerekend is met 40 k-Euro. Deze is met de in [11] gevonden schaalfactor van 0,675 naar 2,2 MW_{th} omgerekend.
- Op basis van begrotingen van BETH is de ESP begroot op 136 k-Euro voor een schaal van 1 MW_{th} . Deze is met de in [11] gevonden schaalfactor van 0,675 naar 2,2 MW_{th} omgerekend.
- De katalytische kraker is een CFB reactor met dolomiet als katalysator (het TPS concept). Voor andere katalytische krakers (zoals de reversed flow kraker) zijn geen economische data gevonden. De katalytische kraker kan met de investeringskosten uit [11] en de daar gevonden schaalfactor worden begroot op 261 k-Euro. Gezien de ervaring dat een katalytische kraker

op dezelfde kosten wordt geschat als een CFB reactor lijkt dit voor de hier beschouwde schaal erg laag. Er is daarom op basis van ECN gegevens gerekend met een geschatte investering van 750 k-Euro.

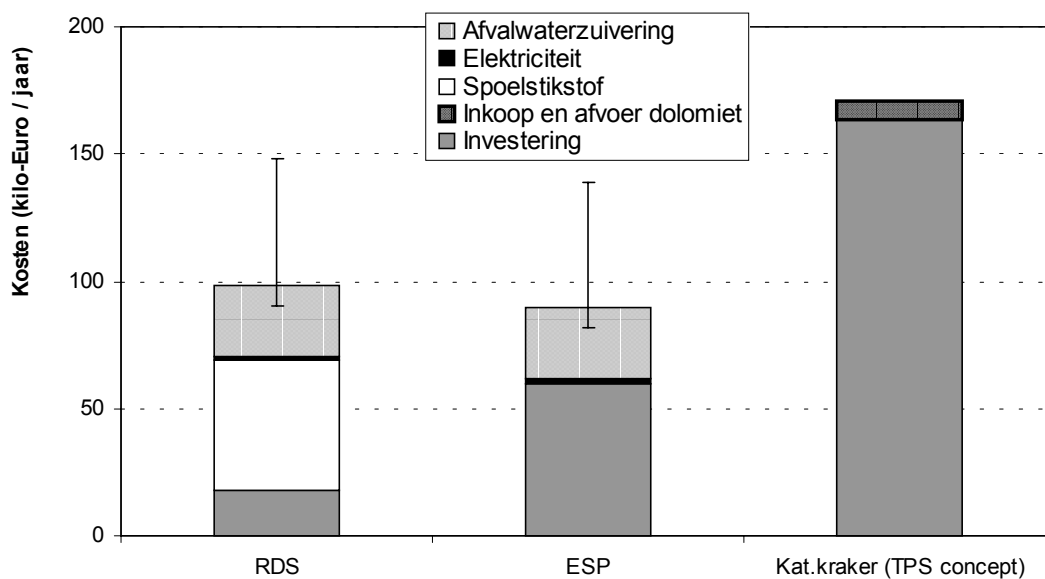
De operationele kosten zijn als volgt ingeschat:

- Er is een range aan kosten voor afvalwater meegenomen. De onderwaarde is de waarde van ca. 15 Euro/m³ genoemd voor reiniging van teerhoudend afvalwater uit cokesovens en de bovenwaarde is de meest gunstige waarde van 90 Euro/m³ genoemd door Hasler [10]. In eerste instantie is gerekend met 50 Euro/m³.
- Het elektriciteitsverbruik voor zowel de ESP als de RDS is 1 Watt per kW_{th} aan brandstof input. Dit is bij ECN gemeten voor de ESP, de RDS was wat hoger. Hasler geeft een soortgelijke waarde voor de RDS [10]. Kosten voor elektriciteit bedragen 25 cent (0,113 Euro) per kWh_e.
- Het debiet en de kosten van N₂ voor reiniging van de RDS is overgenomen uit Hasler [10]: 5 m_n³ / 1000 m_n³ stookgas, en 1,4 Euro / m_n³ N₂.
- Het verbruik aan dolomiet is gesteld op 0,0268 kg dolomiet / kg droge brandstof [11], de kosten voor dolomiet zijn 45 Euro voor inkoop en 45 Euro voor afvoer van verbruikte dolomiet [11].

De kosten per jaar zijn uitgerekend door uit te gaan van 80% beschikbaarheid (7000 draaiuren / jaar) en een afschrijvingstermijn van 10 jaar bij een rente van 10%.

5.4.5 Resultaten van economische analyse

De resultaten van de economische analyse zijn samengevat in Figuur 7.



Figuur 7 Resultaten van de economische analyse, uitgedrukt als kosten per jaar. De kosten voor de afvalwaterzuivering zijn weergegeven als gemiddelde waarde, de foutenbalk geeft de minimale en de maximale waarde weer van de berekende range (zie tekst).

Uit deze figuur kan worden geconcludeerd dat:

- Een ESP naar de huidige inzichten voor deze schaal het meest aantrekkelijke apparaat voor teerverwijdering is;
- De stikstofpurge een aanzienlijke kostenpost vormt in de RDS en dat verwijdering van teren uit de RDS tegen lage kosten een nastrevenswaardig onderzoeksdoel is. De RDS heeft de potentie een goedkoper apparaat te worden voor teerverwijdering dan de ESP;

- De investeringskosten sterk oplopen van RDS naar ESP naar katalytische kraker;
- De kosten van de waterreiniging in RDS en ESP een belangrijk aandeel vormen in de overall kosten. De hoogte van de kosten zijn echter onzeker (er is een grote onzekerheidsmarge) en dienen nader te worden bepaald.
- De kosten voor elektriciteitsverbruik geen enkele rol spelen in de economie van RDS en ESP.
- De kosten voor verbruik en afvoer van dolomiet geen rol spelen in de katalytische kraker.

Overigens dient te worden beseft dat deze conclusies slechts gelden voor de hier beschouwde, kleine schaal van ruim 2 MW_{th}. Voor een grotere schaal (waarop de dolomietkraker binnenkort ook zal worden toegepast in het ARBRE project) is de onderlinge vergelijking tussen RDS, ESP en kraker ongetwijfeld anders. Bovendien liggen dan de verhoudingen tussen investerings- en operationele kosten anders. Zo is op deze schaal van 2,2 MW_{th} de verhouding tussen de kosten van de kraker en de kosten voor inkoop en afvoer van dolomiet 22/1, terwijl deze voor een 100 MW_{th} is verlaagd naar 2,6/1.

5.4.6 Discussie naar aanleiding van de resultaten

Het gas dat bij 40-50°C uit de RDS komt is ontdaan van de condenseerbare (als aerosol voorkomende) teren. Een RDS, bedreven op lagere temperatuur (zeg 30°C) plus een lichte herverhitting van het stookgas na de RDS (tot zeg 45°C) zou in de ogen van de auteurs van dit rapport een gegarandeerd niet condenserend stookgas opleveren dat daardoor probleemloos in een gasmotor kan worden toegepast.

In de literatuur wordt vermeld dat teerverwijdering tot op 50 of 100 mg/m³ (en soms wordt zelfs 5 of 10 mg/m³ genoemd [1] noodzakelijk is om een gasmotor probleemloos te laten draaien. In deze paragraaf wordt deze grenswaarde voor teren bestreden op basis van elders in dit rapport genoemde gegevens. Om twee redenen is namelijk de uitspraak “stookgasspecificatie voor teer is 50 mg/m³” verwarrend en zelfs foutief:

1. Dat wat onder “teer” wordt verstaan verschilt van studie tot studie. Bij de boven genoemde stookgasspecificatie wordt waarschijnlijk iets van “condenseerbaar teer” bedoeld, in de huidige studie is wat onder teren wordt verstaan veel ruimer. Overigens worden in deze studie alleen kwantitatieve gegevens genoemd voor SPA teer, in de ogen van de auteurs is het niet zinvol een getal voor “teer” te noemen omdat – ondanks eerdere pogingen om tot een algemene definitie voor teren te komen – de term teer door verschillende mensen nog steeds verschillend wordt geïnterpreteerd. Omdat dat wat onder teer wordt verstaan zo verschilt, heeft een dergelijke uitspraak (“teer max. 50 mg/m³”) geen waarde.
2. De ingangscondities van een gasmotor kunnen verschillen qua druk en temperatuur. Om de motor te beschermen tegen het vervuilen door condenseerbare (teer)verbindingen, moet de maximale concentratie teer dus lager zijn dan de concentratie waarbij het *onder die condities* condenseert. Dus zelfs bij een algemeen geaccepteerde definitie is geen eenduidige teer specificatie te geven.

De auteurs van dit rapport stellen voor om de specificatie voor teren te herzien en te baseren op het gegeven dat deze teren niet mogen condenseren. Voorgesteld wordt de volgende specificatie te hanteren:

“Bij een stookgas temperatuur $T_{g, m}$ aan de inlaat van de gasmotor dient het dauwpunt van dit stookgas lager te zijn dan deze $T_{g, m}$. Stel dat de veiligheidsmarge X °C is. Dan moet het dauwpunt van het stookgas (T_d) dus voldoen aan de specificatie: $T_d \leq T_{g, m} - X$, in °C. Het dauwpunt wordt bepaald of berekend bij condities (concentraties, druk) aan de inlaat van de gasmotor”.

De hoogte van het temperatuurverschil X zou door teer- en gasmotor experts samen moeten worden ingevuld. Door teerexperts binnen ECN wordt een temperatuurverschil van 10°C voldoende hoog geacht.

6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De experimentele testen die in dit rapport staan beschreven leiden tot de volgende conclusies:

1. De bedrijfszekerheid van de huidige natte RDS voor teerverwijdering is te laag: na anderhalf uur op deellast en een half uur op vollast bedrijf moest de RDS uit bedrijf worden genomen vanwege verstoppingen van het filterelement. De reiniging van de RDS met sproeiwater vanuit de bovenkant van de RDS heeft derhalve niet voldoende gewerkt.
2. De RDS is een efficiënt apparaat voor de verwijdering van stof, teeraerosolen en NH_3 uit biomassa stookgassen. De verwijdering van stof en teer is voldoende efficiënt om de gezuiverde stookgassen in een gasmotor toe te kunnen passen. Voor NH_3 is waarschijnlijk aanvullende reiniging noodzakelijk om aan de specificaties voor een gasmotor te voldoen.
3. De economische haalbaarheid laat zien dat de ESP naar de huidige inzichten voor een schaal van ruim 2 MW_{th} het meest aantrekkelijke apparaat voor teerverwijdering is. De RDS heeft de potentie een goedkoper apparaat te worden voor teerverwijdering dan de ESP als het technisch knelpunt (teer vloeit niet weg uit de kanalen) kan worden opgelost tegen geringe meerkosten. Een stikstofpurge is een te dure oplossing. De kosten van de waterreiniging in RDS en ESP vormen een belangrijk aandeel in de overall kosten. De hoogte van de kosten zijn echter onzeker (er is een grote onzekerheidsmarge) en dienen nader te worden bepaald. De kosten voor elektriciteitsverbruik voor de RDS en de ESP zijn laag in verhouding tot andere kosten.

Omdat Aarding vanwege problemen op financieel gebied heeft besloten te stoppen met haar activiteiten op het gebied van RDS filters, is door ECN en Aarding tezamen ingeschat dat verder testen met de huidige, bij ECN geteste uitvoering van de RDS op dit moment niet zinvol is voor teerverwijdering. Het doen van onderzoek naar oplossingen voor de afvoer uit de kanaaltjes van ophopend stof en teer wordt als zinvol ervaren. Dit onderzoek zou zich moeten toespitsen op afvoer van teren uit de kanalen van het filterelement van de RDS.

Verder wordt aanbevolen om de huidige stookgasspecificatie voor teer (zoals de regelmatig genoemde 50 of 100 mg/m³) te herzien en te baseren op het gegeven dat deze teren niet mogen condenseren. Voorgesteld wordt de volgende specificatie te hanteren:

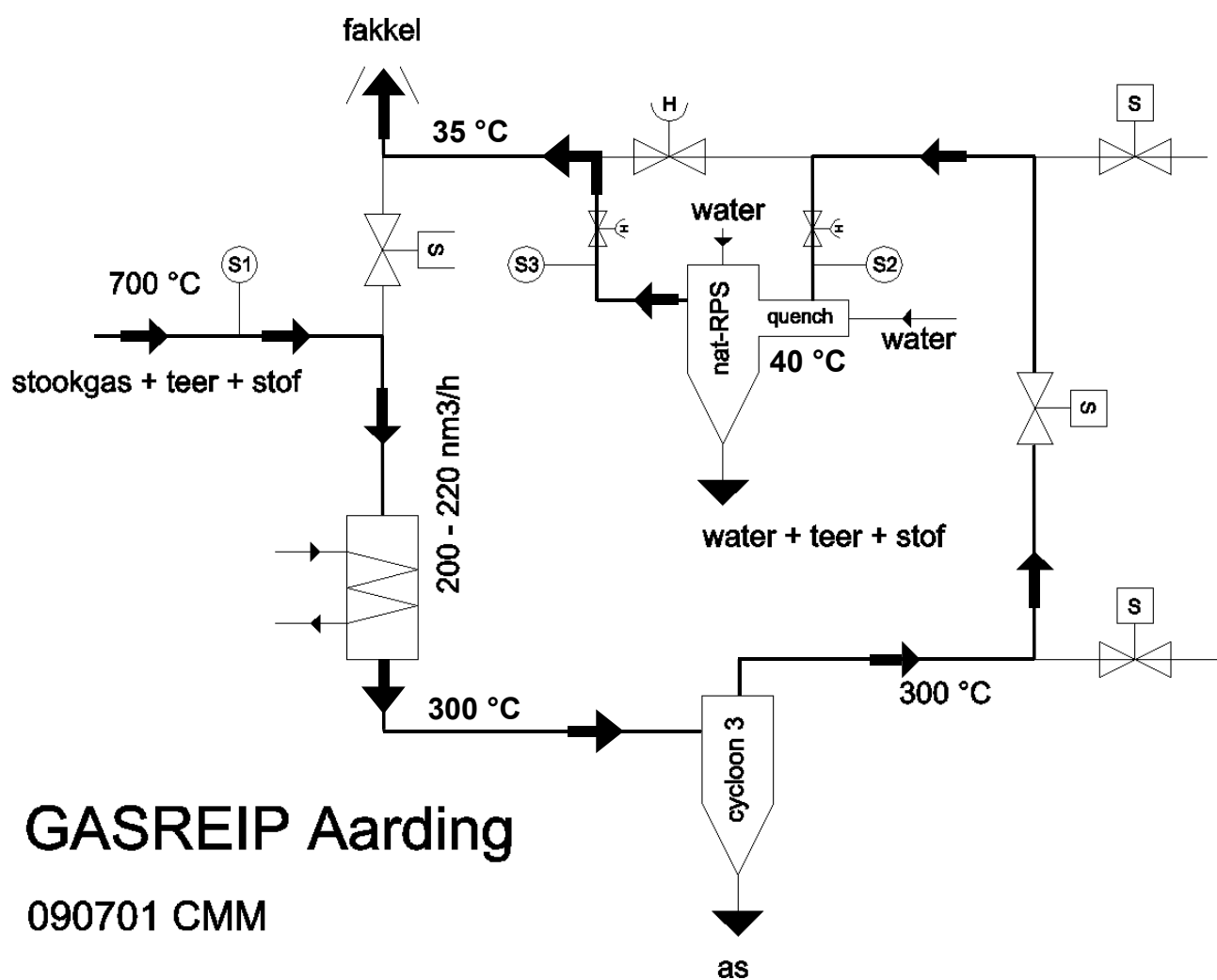
“Bij een stookgas temperatuur $T_{g, m}$ aan de inlaat van de gasmotor dient het dauwpunt van dit stookgas lager te zijn dan deze $T_{g, m}$. Stel dat de veiligheidsmarge X °C is. Dan moet het dauwpunt van het stookgas (T_d) dus voldoen aan de specificatie: $T_d \leq T_{g, m} - X$, in °C. Het dauwpunt wordt bepaald of berekend bij condities (concentraties, druk) aan de inlaat van de gasmotor”.

De hoogte van het temperatuurverschil X zou door teer- en gasmotor experts samen moeten worden ingevuld. Door teerexperts binnen ECN wordt een temperatuurverschil van 10°C voldoende hoog geacht.

7. REFERENTIES

1. E. P. Schenk, S. D. Ytsma, L. P. M. Rijpkema, S. van Loo, and J. H. A. Kiel: Stookgasreiniging bij vergassing van biomassa - State of the art, Petten, ECN, Novem-EWAB no.9829, 72 p. (1998).
2. J. P. A. Neeft, H. A. M. Knoef and P. Ojani: Behaviour of tar in biomass gasification systems. Tar related problems and their solutions, Enschede/Petten, BTG/ECN, Novem-EWAB no.9919 (1999).
3. B. Brouwers: Rotational particle separator: A new method for separating fine particles and mists from gases. Chem. Eng. Technol. 19 (1) 1-10 (1996).
4. T. Brunner, I. Obernberger, J. J. H. Brouwers and Z. Preveden: Efficient and economic dust separation from flue gas by the rotational particle separator as an innovative technology for biomass combustion and gasification plants. In: Biomass for energy and industry. Proc. 10th European conference and technology exhibition (Eds. H. Kopetz et al.), pp. 1630-1633, C.A.R.M.E.N. Rimpf (Germany) (1998).
5. P. Hasler, T. Nussbaumer, H. P. Schaffner and J. J. H. Brouwers: Reduction of aerosol particles in flue gases from biomass combustion with a rotational particle separator RDS. In: Biomass for energy and industry. Proc. 10th European conference and technology exhibition (Eds. H. Kopetz et al.), pp. 1353-1355, C.A.R.M.E.N. Rimpf (Germany) (1998).
6. A. I. van Berkel and H. M. G. Temmink: Tar removal from producer gas using the rotational particle separator, Apeldoorn, TNO, TNO-MEP-R 98/330, 33 p. (1998).
7. L. Dinkelbach, C. M. van der Meijden, L. M. Brenneisen, S. D. Strating, M. Geleijn and R. Wubbe: GASREIP Gasreiniging en prime mover design. Fase A: Realisatie en beproeving van een basisconfiguratie ten behoeve van biomassa warmte-kracht koppeling, Petten, ECN, ECN-C--00-084, 32 p. (2000).
8. C. Brage, Qizhuang Yu, Guanxing Chen and K. Sjöström: Use of amino phase adsorbent for biomass tar sampling and separation. Fuel 76 (2) 137-142 (1997).
9. C. Brage, Qizhuang Yu, Guanxing Chen, C. Rosén, T. Liliedahl and K. Sjöström: Application of solid-phase adsorption (SPA) to monitoring evolution of biomass tar from different types of gasifiers. In: Biomass Gasification & Pyrolysis. State of the art and future prospects (Eds. M. Kaltschmitt and A. V. Bridgwater), pp. 218-227, CPL Press, Newbury (UK) (1997).
10. P. Hasler, P. Morf, R. Bühler and T. Nussbaumer: Gas cleaning and waste water treatment for small scale biomass gasifiers, Zürich (Switzerland), Verenum, 102 p. (1998).
11. A. P. C. Faaij, B. Meuleman and R. van Ree: Long term perspectives of biomass integrated gasification with combined cycle technology. Costs and efficiency and a comparison with combustion, Utrecht / Petten, Universiteit Utrecht / ECN, Novem-EWAB no.9840, 93 p. (1998).

BIJLAGE 1 – CONFIGURATIE VAN NATTE RDS



GASREIP Aarding

090701 CMM

BIJLAGE 2 – SPA DATA

Locatie SPA meting:	Na RDS (S3)					Voor RDS, na koeler (S2)					Voor koeler (S1)
code monster	10676-1	10676-2				10676-3	10676-4	10676-5			10676-6
Tijd monster	14:43	14:55	Gem.			16:01	16:12	16:43	Gem.		
Verwijderingspercentage			t.o.v. S1		t.o.v. S2			t.o.v. S1			
Benzeen SPA	618	856	737	-30%	-155%	394	167	306	289	49%	567
Tolueen SPA	558	826	692	-34%	-167%	309	215	254	259	50%	515
m/p-Xyleen SPA	109	121	115	8%	-91%	68	59	53	60	52%	125
o-Xyleen + Styreen SPA	689	742	715	10%	-72%	452	418	374	415	48%	795
Pyridine	39	41	40	78%	76%	180	164	160	168	5%	178
2-mePyridine	0	0	0	100%	100%	38	33	31	34	-1%	34
3+4-mePyridine	(5)*	(6)*	(5)*	85%	83%	35	30	29	31	13%	36
Phenol	29	30	29	96%	96%	878	724	638	746	-1%	740
o-Cresol	12	13	12	52%	48%	30	22	18	24	9%	26
Indeen	951	979	965	16%	7%	1132	1004	994	1043	9%	1144
m/p-Cresol	0	0	0	0%	0%	0	0	0	0	0%	0
Naftaleen	1845	1828	1836	25%	16%	2284	2174	2136	2198	10%	2451
Quinoline	0	0	0	100%	100%	45	41	40	42	15%	49
Isoquinoline	0	0	0	100%	100%	20	19	18	19	12%	22
2-methylnaftaleen	139	141	140	55%	50%	297	276	260	278	11%	311
1-methylnaftaleen	85	86	85	60%	55%	203	188	177	189	11%	213
Biphenyl	41	41	41	73%	69%	139	130	124	131	13%	150
Ethenylnaphtaleen	20	21	21	85%	81%	114	107	102	108	20%	136
Acenaphtyleen	119	117	118	85%	80%	615	593	584	597	22%	767
Acenaphteen	(4)*	(5)*	(4)*	89%	86%	33	30	28	30	18%	37
Fluoreen	13	13	13	96%	95%	258	248	234	247	21%	313
Phenanthreen	(7)*	(6)*	(6)*	99%	98%	293	289	283	288	73%	1076
Anthraceen	0	0	0	100%	100%	108	106	106	107	64%	293
Fluorantheen	0	0	0	100%	0%	0	0	0	0	100%	(8)*
Pyreen	0	0	0	100%	100%	49	47	47	48	79%	226
Benzo(a)anthraceen	0	0	0	100%	100%	10	(9)*	(9)*	10	86%	69
Chryseen	0	0	0	100%	100%	(6)*	(6)*	(6)*	(6)*	83%	37
Benzo(b)fluorantheen	0	0	0	100%	100%	(4)*	(4)*	(4)*	(4)*	85%	28
Benzo(k)fluorantheen	0	0	0	100%	0%	0	0	0	0	100%	11
Benzo(e)pyreen	(4)*	0	(2)*	85%	28%	(3)*	(4)*	(3)*	(3)*	79%	15
Benzo(a)pyreen	0	0	0	100%	100%	(4)*	(4)*	(4)*	(4)*	87%	30
Peryleen	0	0	0	100%	0%	0	0	0	0	100%	(5)*
Indeno(123-cd)peryleen	0	0	0	100%	0%	0	0	0	0	100%	(8)*
Dibenz(a,h)anthraceen	0	0	0	0%	0%	0	0	0	0	0%	0
Benzo(ghi)peryleen	0	0	0	100%	0%	0	0	0	0	100%	(7)*
totaal+onbek+benz/tol	5644	6194	5919	55%	30%	9204	8227	8092	8507	35%	13047
onbekend	358	325	342	87%	70%	1202	1115	1069	1129	57%	2626
totaal-bez&tol	4467	4512	4489	62%	44%	8500	7845	7532	7959	33%	11966

*: Waarden tussen haakjes zijn hier gerapporteerd maar liggen in feite onder de detectielimiet van 10 mg/m³. In feite moet hier dus de waarde "0" worden gelezen.