

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Referentienummer 92-278
Dossiernummer 112326-23227
Datum november 1992
NP

Auteur
W.F. Sulilatu

Met medewerking van
Dr. ir. E. Mot

Trefwoorden
– biomassa
– verbranding
– installaties
– emissies
– reiniging
– vermogens
– houtafval
– filters

Bestemd voor
NOVEM B.V.
t.a.v. Drs. G. Smakman
Sint Jacobstraat 61
3503 RE Utrecht

Colofon

Contractnummer: 55130/0910

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 Maatschappij voor Energie en Milieu B.V.

St. Jacobstraat 61

Postbus 8242

3503 RE Utrecht

Tel. 030- 363 444

Contactpersoon Drs. G. Smakman, programmanager EWAB

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

Het onderzoek is uitgevoerd door:

IMET-TNO

Postbus 342,

7300 AH Apeldoorn

Tel. 055- 493 615

Fax. 055- 419 837

Contactpersoon: W.F Sulilatu

Meer exemplaren van dit rapport zijn verkrijgbaar door overmaking van een bedrag van f 75,- exclusief BTW op postbankrekening nr. 416269 van IMET-TNO, Apeldoorn, onder vermelding van rapport 92-278. Contactpersoon Mevr. C.F. Goedhart, tel. 055 - 49 35 92.

Summary

In this study the current situation of the combustion of non contaminated waste wood in the Dutch industry is reviewed. In this context, also on the basis of foreign experiences, recommendations are given for possible improvements.

In The Netherlands 2 to 3 Mton/a of waste wood (clean plus contaminated) is generated; part of this, some 1.3 Mton/a, is combusted – almost always with energy recovery. This contributes some 0.7% to the Dutch energy supply. This concerns mostly the use of clean wood in residential stoves. Only a small fraction of this 1.3 Mton/a, viz. 0.15 Mton/a is used for industrial energy supply from clean waste wood. The applied technology is rather simple in many cases - to some extent lagging behind in comparison with well-known “wood countries” like Norway or Switzerland. The difference is, however, not really large.

Increasing the industrial combustion of clean waste wood up to 0.25 Mton/a (4 PJ/a) is supposed to be feasible by utilising 0.1 Mton/a of clean waste wood that is now being landfilled.

In The Netherlands there are some 900 installations, with a capacity up to 5 MWth. Over 600 of these have a capacity of 0.1 MWth or less. These smaller ones are generally equipped with a static grate. In larger installations the underscrew principle is often applied. The total installed capacity in The Netherlands is approximately 220 MWth. The installations are generally applied for heating purposes, hot water or steam production, drying and also for the smoking of food products.

The emissions concern CO, NO_x, C_xH_y and particulates. In addition, also PAH's, are emitted; however, from the latter data are hardly available. Therefore research on PAH emissions is recommended. Nowadays flue gas cleaning is hardly applied. Only in 5% of all cases, approximately, a cyclone for dust removal is used. Other methods of flue gas cleaning are hardly applied in The Netherlands.

It is expected that the flue gas emission limitation values will be sharpened considerably in the near future. New developments, especially in foreign countries, show that low emissions are feasible at relatively low costs (except for NO_x). Newly developed combustion installations are often based on the principle of staged combustion. With regard to flue gas cleaning systems, new developments focus on flue gas condensation, micro-perforated metal sheet filters and electro gravel bed filters.

In order to encourage ongoing developments, it is proposed to organize the transfer of knowledge to Dutch equipment suppliers. Moreover, it is recommended to investigate the options for diminishing PAH and particulates emissions and the development of improved control systems. When issuing environmental permits, uniformity in maximum allowable emission values should be promoted. In this context, also regulations regarding operation and maintenance should be formulated.

Implementation of the necessary improvements will lead to an increase in investment costs of maximum 25%. The present pay-back period is 2 to 3 years; due to these improvements it will increase to 3 to 4 years, approximately.

Korte samenvatting

In deze studie wordt een beeld geschetst van de situatie van het verbranden van schoon afvalhout in de Nederlandse industrie. Op basis daarvan worden - mede aan de hand van buitenlandse ervaringen - aanbevelingen gedaan om tot verbeteringen te komen.

In Nederland komt 2 à 3 Mton/jr aan (schoon + verontreinigd) afvalhout vrij; een deel daarvan, circa 1,3 Mton/jr, wordt verbrand, en wel bijna altijd met energiebenutting. Dit levert een bijdrage van circa 0,7% aan de Nederlandse energievoorziening. Dit betreft vooral het gebruik van schoon hout in huishoudelijke houtkachels.

Slechts een beperkt deel van die 1,3 Mton/jr, namelijk 0,15 Mton/jr wordt gebruikt voor industriële energiewinning uit schoon afvalhout. De daarbij toegepaste technologie is in veel gevallen eenvoudig - hij loopt soms wat achter bij die in bekende "houtlanden" als Noorwegen of Zwitserland.

Vergroting van het industriële gebruik tot circa 0,25 Mton/jr (4 PJ/jr) wordt realiseerbaar geacht door 0,1 Mton/jr aan schoon afvalhout, dat thans nog wordt gestort, te benutten.

In totaal staan in Nederland circa 900 installaties met een vermogen tot 5 MWth. Ruim 600 daarvan bezitten een vermogen onder 0,1 MWth. Deze zijn veelal met een statisch rooster uitgevoerd. Bij de grotere installaties komt het onderschroefprincipe vaak voor. In totaal is voor circa 220 MWth aan vermogen in Nederland geïnstalleerd. De installaties worden in het algemeen gebruikt voor verwarmingsdoeleinden, warm water- of stoomproductie, drogen, en daarnaast voor het roken van voedingsmiddelen.

De voornaamste emissies betreffen CO, NO_x, C_xH_y en stof. Verder worden ook PAK's geëmitteerd; hier zijn echter geen praktijkgegevens over bekend. Onderzoek hiernaar is gewenst.

Rookgasreiniging vindt thans slechts weinig plaats. Slechts bij circa 5% van het totale aantal installaties wordt een cycloon voor stofafvangst toegepast; andere rookgasreinigingsmethoden komen in Nederland niet of nauwelijks voor.

De verwachting is dat de grenswaarden voor rookgasemissies in de komende jaren aanzienlijk zullen worden verlaagd. Ontwikkelingen, met name in het buitenland, tonen dat zonder veel extra kosten aan aanzienlijk strengere eisen kan worden voldaan (behalve voor wat betreft NO_x). Nieuw ontwikkelde verbrandingssystemen zijn vrijwel steeds gebaseerd op het principe van getrapte verbranding. Nieuwe rookgasreinigingssystemen betreffen rookgascondensatie, microgeperforeerde metaalfoliefilters, elektro-grindbedfilters.

Om de reeds lopende ontwikkelingen te stimuleren, wordt voorgesteld kennisoverdracht naar Nederlandse installatiebouwers te organiseren. Voorts wordt nader onderzoek nodig geacht ter vermindering van de emissies van PAK en stof en naar het ontwikkelen van betere regelconcepten. Bij vergunningverlening dient te worden gestreefd naar uniformiteit in grenswaarden en naar aandacht voor bedrijfsvoering en onderhoud.

Om aan toekomstige emissie-eisen te kunnen voldoen, zal naar verwachting per installatie een meerinvestering tot 25% nodig zijn. De terugverdientijd (ten opzichte van een aardgasgestookte installatie) zal hierdoor stijgen van de huidige 2 à 3 jaar tot 3 à 4 jaar.

Samenvatting

Een van de grotere afvalstromen die in Nederland vrijkomt is die van afvalhout. Voorlopige schattingen wijzen uit dat deze afvalstroom 2 à 3 Mton/jr bedraagt.

Het gaat daarbij om zowel schoon als verontreinigd (geverfd, geïmpregneerd, enz.) hout. Hoewel het beleidsmatige accent steeds op hergebruik ligt, groeit zowel nationaal als internationaal de aandacht voor toepassing van afvalhout (en biomassa in het algemeen) als energiebron. Deze toegenomen aandacht komt voort uit de voordelen die verbranding van afvalhout biedt. Dat zijn onder andere:

- differentiatie van brandstofaanbod;
- vermindering van netto CO₂-emissie¹⁾;
- besparing van fossiele brandstoffen;
- vermijden van hoge storkosten (in de toekomst wordt zelfs een stortverbod verwacht);
- vermijden van transportkosten.

De decentrale verbranding van afvalhout door industrieën is voor verontreinigd afvalhout economisch vaak niet rendabel. De rookgasreiniging die nodig is om aan de emissienormen te voldoen, zou daarvoor in het algemeen te uitgebreid moeten zijn. De verbranding van schoon afvalhout biedt meer perspectief.

Om een inzicht te krijgen in de concrete mogelijkheden op dit gebied wordt in deze studie een overzicht gegeven van de state-of-the-art van het verbranden van schoon afvalhout in de Nederlandse industrie.

Daarnaast worden de belangrijkste ontwikkelingen in het buitenland gezien – in het bijzonder in typische “houtlanden”, als Noorwegen en Zwitserland. In dit kader wordt aandacht geschonken aan de diverse mogelijkheden om het verbrandingsproces te verbeteren. Ook aan de emissies, en met name aan de opties voor vermindering daarvan, wordt aandacht besteed.

1. Brandhoutpotentieel

In tabel 1 is aangegeven wat volgens de huidige inzichten het brandhoutpotentieel in Nederland is en welk deel daarvan op dit moment al wordt verbrand. Verder is aangegeven wat reeds aan schoon afvalhout in de industrie wordt verbrand en wat het potentieel voor die specifieke toepassing is.

¹⁾ De koolstof in biomassa is relatief kort tevoren, door zonne-energie, uit de atmosfeer gehaald en geeft daarom bij verbranding geen extra bijdrage tot het broeikaseffect. De mens creëert op deze wijze een koolstof-subcyclus.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Tabel 1 Brandhoutpotentieel en energiewinning daaruit in Nederland

	Verontreinigd en schoon hout (ton/jr)	Industrieel schoon brandhout (ton/jr)	Huidige energiewinning uit hout, verontreinigd en schoon (ton/jr)
Houtkachels in huishoudens (schoon)	981,250		981,250
Verbranding schoon hout in industrie	148,000	148,000 ¹⁾	148,000
Verbranding verontreinigd hout in industrie	80,000		80,000
Verbranding in AVI's (verontreinigd)	50,000		50,000
Stort, verontreinigd	200,000		
Stort, schoon	100,000	→ 100,000 ²⁾	
Totaal (Mton/jr)	1,56	0,25	1,26
Energie (PJ/jr) (m ³ aardgas/jr)	25 0,78 x 10 ⁹	4 1,25 x 10 ⁹	20 0,62 x 10 ⁹

1) Verbranding industrieel schoon afvalhout in Nederland, huidige situatie.

2) Idem, realiseerbare aanvulling.

Blijkens de tabel wordt het totale brandhoutpotentieel (verontreinigd + schoon) geschat op 1,56 Mton/jr, corresponderend met ca. 25 PJ/jr, ofwel 0,9% van het nationale energieverbruik. Dit percentage is een van de laagste in Europa; de verbruiken variëren van 0,1% (Engeland) tot 11,3% (Zweden). Op dit moment wordt van het potentieel van 25 PJ/jr reeds 20 PJ/jr benut. In de industrie wordt op dit moment ca. 0,148 Mton/jr aan schoon afvalhout verbrand. Geschat wordt dat aan de hoeveelheid hout die momenteel wordt gestort ca. 0,1 Mton/jr schoon afvalhout voor industriële verbranding kan worden onttrokken. Het potentieel aan in de industrie te verbranden schoon afvalhout komt hiermee op 0,248 Mton/jr, ofwel 4 PJ/jr. Voorwaarde voor de volledige benutting van dit potentieel is dat de verbranding op economisch en milieutechnisch verantwoorde wijze kan plaatsvinden.

2. Industriële verbrandingsinstallaties

Verbrandingsinstallaties zijn, op basis van de verbrandingswijzen, te onderscheiden in de volgende typen:

- Inblaasverbranding;
- Onderschroefverbranding;
- Doorschroefverbranding;
- Statisch rooster (schuin/horizontaal);
- Schuifroosterverbranding (schuin/horizontaal);
- Getrapte verbranding;
- Wervelbedverbranding;
- Tunnelbrander.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

In Nederland zijn bij kleine installaties statische roosters het meest gangbaar; bij grotere wordt veelal onderschroefverbranding toegepast; er staat momenteel circa 218 MWth vermogen opgesteld voor de industriële verbranding van schoon hout

Het aantal installaties bedraagt thans circa 900; 600 daarvan bezitten een vermogen van 0,1 - 0,3 MWth. Installaties > 5 MWth komen niet voor. Tabel 2 geeft een overzicht van de aantallen en vermogens verdeeld over de verschillende merken.

Tabel 2 Aantallen en geïnstalleerde vermogens van de industriële verbrandingsinstallaties voor schoon hout

Range: [MWth]	Fabrikaten									
	Reinders	Vyncke	WVT	Weiss	Justsen	Passat	Heizomat	Nolting	ER 3	Overige
0.02 - 0.1						500	3		123	
0.1 - 0.25	7	-	4	-	-	20	6			-
0.25 - 0.5	9	-	1	-	-	-	3	90	20	-
0.5 - 1	9	1	5	2	1	-		60		3
1 - 2	10	6	1	7	2	-			4	1
2 - 3	6	-	-	1	2	-			3	1
3 - 4	2		-	1	-	-			1	-
4 - 5	-	1	-	2	-	-				-
Totaal	43	8	11	13	5	520	12	150	133	5
Geïnstalleerd vermogen [MWth]	49	15	10	26	8.5	29	2.25	~50	22	6

De verbrandingsinstallaties komen vooral voor in de hout/meubelbranche en in de voedings- en genotsmiddelenindustrie. Niet voor alle installaties zijn de toepassingsgebieden bekend; het betreft droogprocessen, produktie van stoom en warm water, verwarmingsdoeleinden en roken van voedingsmiddelen (waarbij de emissies dus juist worden benut).

3. Huidige emissies

Slechts circa 5% van het totaal aantal installaties is uitgerust met enige vorm van rookgasreiniging. Deze beperkt zich tot een cycloon of multicycloon. Slechts één installatie is uitgerust met een doekenfilter; een tweede wordt geïnstalleerd. Rookgasreiniging wordt alleen toegepast bij installaties > 0,3 MWth.

De rookgasemissies van de houtverbrandingsinstallaties in Nederland, door TNO gemeten, zijn weergegeven in tabel 3.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Tabel 3 Emissies van automatische en handgestookte installaties in Nederland (TNO-metingen)
(mg/m³ ind; 11% O₂)

Component	
	Automatisch gestookt
CO	56 - 370
C _x H _y	1 - 63
NO _x	99 - 249
Stof ¹⁾	78 - 230
	Handgestookt
CO	2545 - 3011
C _x H _y	245 - 514
NO _x	94 - 217
Stof ²⁾	- 809

¹⁾ Alleen met cycloon.

²⁾ Zonder cycloon.

4. Huidige stand van zaken regelgeving

Voor de verbranding van schoon houtafval zijn tot dusver geen centrale richtlijnen opgesteld. De Algemene Maatregel van Bestuur voor stookinstallaties noch de Richtlijn Verbranden gelden voor met schoon hout gestookte verbrandingsinstallaties. Per provincie kunnen derhalve emissie-eisen op dit gebied verschillen.

Deze qua regelgeving niet eenduidige situatie is zowel voor leveranciers als voor gebruikers van houtverbrandingsinstallaties onbevredigend.

In de onlangs verschenen NER (Nederlandse Emissie Richtlijnen [36]) zijn enkele algemene richtlijnen gesteld voor de emissie van stof en CO; deze zijn (m³ ind; 11% O₂):

Stof: 50 mg/m³ bij een massastroom < 0,5 kg/h; daarboven 25 mg/m³;
10 mg/m³ als (doek)filters worden toegepast, voor alle massastromen.

NO_x: 200 mg/m³ (bij een massastroom > 5 kg/h).

Vertaalt men deze algemene richtlijn naar de schaalgrootten van houtgestookte installaties dan betekent dit, dat zonder stoffilter een stofemissie tot 50 mg/m³ is toegestaan voor een vermogen <5 MWth; bij een hoger vermogen mag de stofemissie slechts 25 mg/m³ bedragen. De werkelijke stofemissies van houtgestookte installaties zonder filter zullen echter altijd hoger liggen. Wel is met een goedkope reinigingstechniek (multicycloon) een emissie van 100 à 150 mg/m³ realiseerbaar. Verder dient, bij alle vermogens, de stofemissie bij aanwezigheid van een stoffilter kleiner te zijn dan 10 mg/m³. Deze emissie-eis is technisch goed realiseerbaar. Een doekfilter vereist echter een belangrijke investering.

Vertaling van de algemene NER-richtlijn ten aanzien van NO_x betekent dat geen NO_x -eisen worden gesteld bij een belasting < 12 MWth; daarboven geldt een maximumgrens van 200 mg/m^3 . De in dit rapport beschouwde installaties voor het verbranden van schoon afvalhout zijn kleiner dan 12 MWth; op grond van voornoemde algemene richtlijn zou voor deze categorie dus geen beperking gelden voor de NO_x -concentratie in de rookgassen.

5. Technologisch realiseerbare emissies

Discussie is gaande om houtverbranding als “bijzondere regeling” in de NER op te nemen. In dat kader is het van belang te weten, welke emissiewaarden bij het verbranden van schoon hout realiseerbaar lijken. Onder “realiseerbaar” wordt in dit verband verstaan: bereikbaar met de nieuwste ontwikkelde verbrandingssystemen, met alleen een stofvanger, bijvoorbeeld een (multi)cycloon of een doekfilter, als reinigingstechniek. Wanneer verdergaande rookgasreiniging wordt vereist zijn kleinere verbrandingssystemen vrijwel altijd onrendabel. Verder wordt in dit kader aangenomen dat de installatie modulerend is geregeld, overwegend continu in werking is en automatisch wordt gestookt. (Hierdoor is tevens aangenomen dat de installatie een grootte heeft van meer dan circa 0,1 MWth, want dat is ongeveer het vermogen waarboven men overgaat op automatisering)

Op basis van de in deze studie verzamelde gegevens worden onder bovengenoemde voorwaarden bij het verbranden van schoon (afval)hout de volgende emissies goed realiseerbaar geacht (tabel 4).

Tabel 4 Naar verwachting (technisch en economisch) realiseerbare emissies bij het verbranden van schoon afvalhout¹⁾ (in mg/m^3 ind; 11% O_2)

CO	< 100
C_xH_y	< 20
NO_x	< 250
Stof {	< 10 met filter (bijvoorbeeld doek of metaalfolie)
	< 125 met multicycloon

¹⁾ in automatisch gestookte installaties (0,1 tot 5 MWth)

De werkelijke realiseerbaarheid van deze emissiewaarden zou aan bedrijfsinstallaties moeten worden gevalideerd, omdat de in tabel 4 genoemde waarden uit emissies van prototypen zijn afgeleid; nadere onderbouwing is daarom nodig. In dit verband zou ook aandacht aan de emissie van PAK's moeten worden besteed.

Bovengenoemde haalbaar geachte emissie-eisen gelden alleen voor nieuwe, moderne installaties. In hoeverre bestaande systemen kunnen worden aangepast zal doorgaans per type installatie moeten worden bestudeerd.

Verder is het duidelijk dat de emissies van handgestookte installaties hoger zullen zijn dan die van automatisch gestookte installaties.

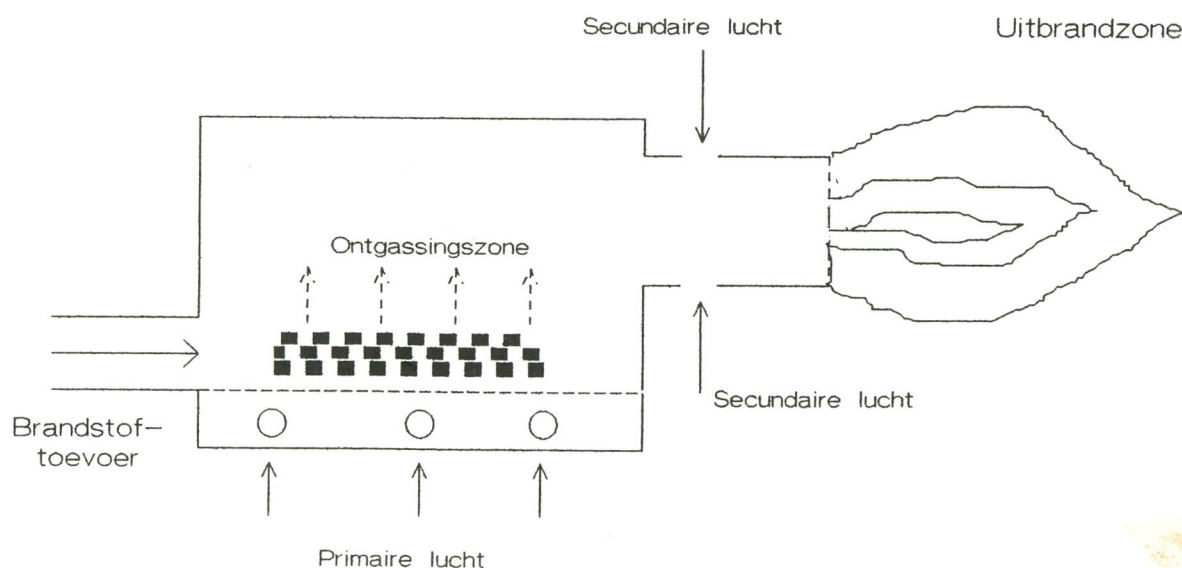
6. Technologische opties voor emissievermindering

De in tabel 4 genoemde emissies kunnen met name worden gerealiseerd door het toepassen van *getrapte verbranding*. Daarbij wordt de brandstof eerst bij een ondermaat lucht ($\lambda = 0,5$ à $0,8$) ontgast. Tevens wordt de overgebleven vaste stof (de "char", hoofdzakelijk cokesachtige koolstof) verbrand. De vrijgekomen gassen worden in een volgend, meestal ruimtelijk gescheiden compartiment verbrand met een overmaat lucht ($\lambda_{\text{tot}} \approx 1,5$).

Dit systeem leidt doorgaans tot vollediger verbranding, en daardoor tot lagere emissies dan bij conventionele systemen.

De constructie van de installatie is iets complexer, maar niet zodanig dat dat tot omvangrijke prijsverhogingen behoeft te leiden.

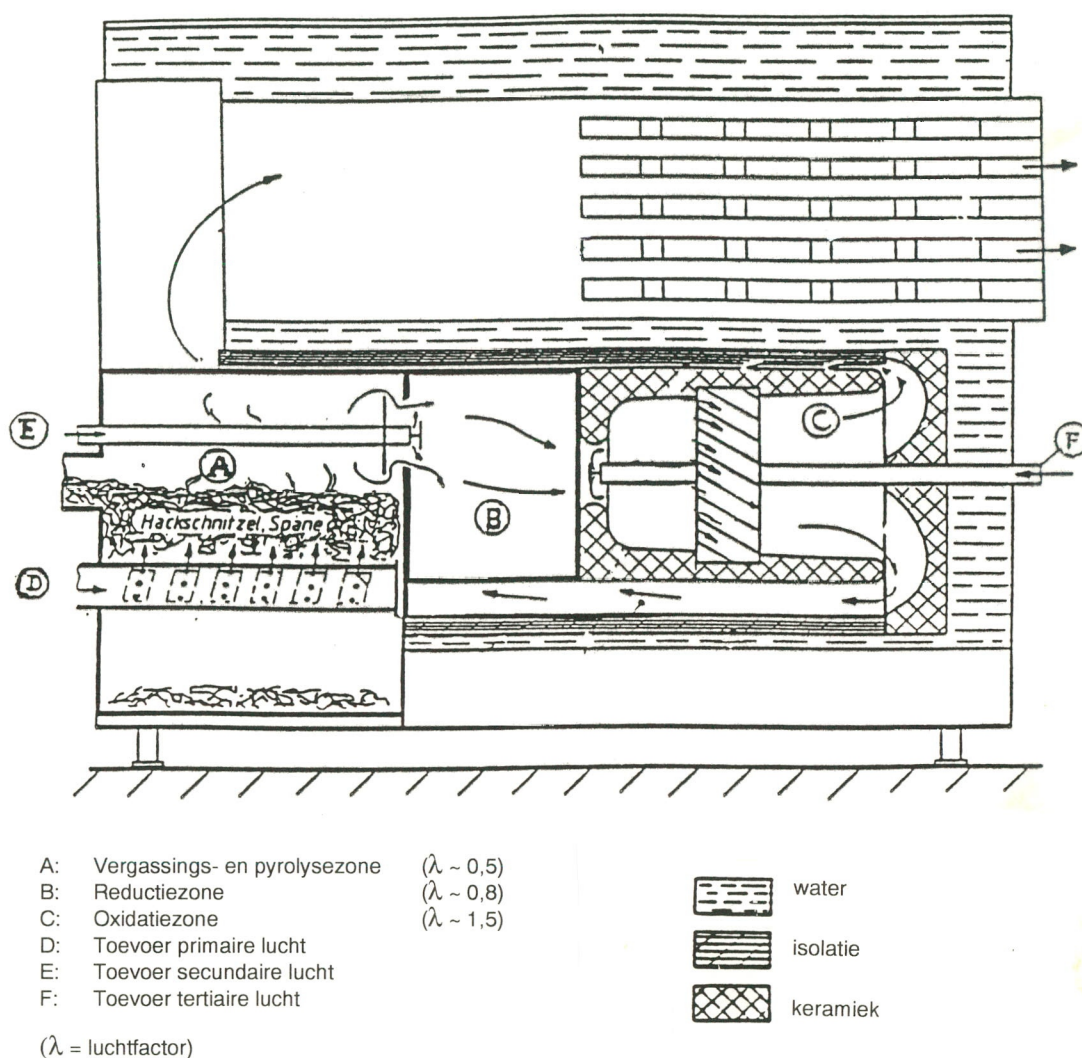
Het basisprincipe van de getrapte verbranding is in figuur 1 weergegeven.



Figuur 1 Principeschema tweetrapsverbranding

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

In figuur 2 wordt een geavanceerde technische uitvoeringsvorm van dit principe getoond: het Pyros verbrandingssysteem (ETH, Zürich). Daarbij is de tweede trap uit figuur 1 nog eens verder opgesplitst, zodat nu een drietrapsverbrandingssysteem is ontstaan¹⁾.



Figuur 2 Principeschema "Pyros" verbrandingsinstallatie

Voor wat betreft de beperking van de emissie van stof zijn nieuwe ontwikkelingen gaande in de vorm van rookgascondensatie, microgeperforeerde metaalfoliefilters en grindbedfilters. Ter vermindering van NO_x wordt vooral gedacht aan primaire maatregelen.

¹⁾ De tweede trap is bedoeld om de ontstane NO_x te reduceren.

7. Kosten

Verwacht wordt dat de extra investeringen, nodig voor het bereiken van bovenvermelde strengere emissiegrenswaarden, ca. 25% van die van de huidige installaties zullen bedragen. Door deze meerinvesteringen zullen de terugverdientijden (ten opzichte van een aardgasgestookte installatie) stijgen van de huidige 2 à 3 jaar naar 3 à 4 jaar.

8. Gewenste acties

Om te komen tot een milieutechnisch aanvaardbare wijze van het verbranden van schoon hout in Nederland is het van belang ontwikkelingen op dit gebied in het buitenland nauwgezet te volgen. Deze ontwikkelingen dienen actief bij de installatiebouwers in Nederland onder de aandacht worden gebracht. Daarbij verdient het ontwikkelen en toepassen van goede regelconcepten voor deze kleine installaties speciale aandacht.

Over de emissies van PAK's door deze installaties is nauwelijks iets bekend; een inventarisatie op dit gebied is zeer gewenst.

Om de stofemissies te verminderen dient onderzoek aan en ontwikkeling van goedkope kleinschalige stofvangstechnieken te worden gestimuleerd.

Voor wat betreft de vergunningverlening dient te worden gestreefd naar eenduidige emissiegrenswaarden voor Nederland. In de vergunningverlening zou tevens aandacht moeten worden besteed aan de vakbekwaamheid van het bedienend personeel, opdat een eenmaal geplaatst systeem deskundig wordt bedreven en onderhouden.

Inhoudsopgave

	Colofon	2
	Summary	3
	Korte samenvatting	4
	Samenvatting	5
1	Inleiding	15
	1.1 Doel van de studie	16
	1.2 Opzet van de rapportage	16
	1.3 Begrippenkader	17
2	Houtpotentieel en bereikbare energiebenutting in Nederland	18
3	De technologie van houtverbranding	20
	3.1 Het verbrandingsprincipe	20
	3.2 Werkingsprincipes van verbrandingsinstallaties	22
	3.3 Milieuaspecten	31
	3.4 Rookgasreinigingstechnieken	32
	3.4.1 Primaire maatregelen	32
	3.4.2 Secundaire maatregelen	36
4	Verbranding van schoon houtafval (huidige situatie)	46
	4.1 Verbrandingsinstallaties in Nederland	46
	4.2 Totaal geïnstalleerd industrieel vermogen	54
	4.3 Toegepaste rookgasreiniging	56
	4.4 Toepassingsgebieden	57
	4.5 Brandstofdosering en -voorbehandeling	57
	4.5.1 Brandstofdosering	57
	4.5.2 Voorbehandeling	57
	4.6 Emissies	63
	4.7 Economische aspecten	66
	4.7.1 Prijsindicaties verbrandingsinstallaties en componenten	67
	4.7.2 Terugverdiertijden	71
5	Verbranding van schoon hout in het buitenland	73
	5.1 Energie uit biomassa in het buitenland; enige gegevens	73
	5.2 Enkele verbrandings- en reinigingsinstallaties in het buitenland	76
	5.2.1 Verbrandingsinstallaties	76

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

6	Nieuwe ontwikkelingen	88
6.1	Verbrandingssystemen.....	88
6.1.1	Getrapte verbranding.....	88
6.1.2	Cyclonic (“cyco”) Combustor van D&C Engineering B.V. te Alblasterdam	91
6.1.3	Biocomb Cyclone burner	94
6.1.4	Verbrandingsinstallatie van The Belgian Incinerator Company.....	96
6.1.5	De Vyncke verbrandingsmodule	99
6.1.6	PYROS verbrandingsinstallatie.....	101
6.1.7	Moffel-inblaasvuurhaarden	103
6.1.8	Awina Industrie Anlagen GmbH, Gmunden (Oostenrijk)	106
6.2	Verbrandingsinstallaties met een vergassingsstap.....	107
6.3	Kleinschalige opwekking van elektriciteit.....	110
6.4	Rookgasreiniging.....	112
6.4.1	Rookgascondensatie	112
6.4.2	Stoffiltering	114
7	Mogelijkheden tot emissievermindering	117
7.1	Technologisch realiseerbare minimum-emissies.....	117
7.2	Kosten van emissieverlaging	119
8	Conclusies en aanbevelingen	121
8.1	Conclusies.....	121
8.2	Aanbevelingen	123
9	Referenties	125
10	Verantwoording	130

Bijlage 1 Prijsindicaties van rookgasreinigingsapparatuur

1 Inleiding

Onderzoek en ontwikkelingen op het gebied van afval, en energie uit afval in Nederland zijn gebaseerd op de Motie Lansink uit 1979. Daarin werd de prioriteitsvolgorde vastgelegd:

- preventie;
- hergebruik;
- energiewinning;
- storten.

Een van de grotere afvalstromen die in Nederland vrijkomt is die van afvalhout. Voorlopige schattingen wijzen uit dat deze afvalstroom 2 à 3 Mton/jr bedraagt (zie hoofdstuk 2). Het beleidsmatige accent ligt bij deze afvalstroom op hergebruik. Doel is daarbij, de zelfvoorzieningsgraad van hout in Nederland te vergroten; momenteel bedraagt deze circa 8% [24]; het overige hout wordt geïmporteerd. De uit afvalhout gewonnen energie bedraagt thans circa 20 PJ/jr. Dit is circa 0,7% van het totale energieverbruik. Ongeveer 0,15 Mton/jr (2,4 PJ/jr) aan schoon afvalhout wordt in de industrie voor energiedoeleinden gebruikt.

Op nationaal en internationaal niveau wint de aandacht voor toepassing van afvalhout, en van biomassa in het algemeen, als energiebron steeds meer terrein. Afgezien van het surplus aan afvalhout kan deze trend worden toegeschreven aan de wens tot:

- differentiatie van brandstofaanbod;
- vermindering van netto CO₂-emissie¹⁾;
- besparing van fossiele brandstoffen;
- vermijden van hoge stortkosten, of zelfs (in de toekomst) een mogelijk stortverbod;
- vermijden van transportkosten.

Mede vanwege het laatst genoemde punt is het in vele gevallen aantrekkelijk voor de industrie, om deze energie op te wekken in kleine eenheden (bijvoorbeeld < 10 MWth). Het doel van dit rapport is onder andere om na te gaan, hoe die hoeveelheid kan worden vergroot en op welke wijzen de verbranding milieuvriendelijker kan worden gemaakt. Uiteraard zonder de doelstellingen met hogere prioriteit – preventie en hergebruik – aan te tasten.

Omdat in Nederland aan de verbranding van *verontreinigd* afvalhout strenge milieu-eisen worden gesteld, die omvangrijke reinigingsapparatuur nodig maken, is dit op de hier beschouwde schaalgrootte niet rendabel [7]. Daarom wordt in deze studie alleen het verbranden van “schoon” afvalhout, bezien. Kleinschalige verbranding van schoon hout (< 10 MWth) met energieteerugwinning kan wél rendabel zijn.

Schoon afvalhout bestaat voornamelijk uit resthout van beplantingen en niet verontreinigd houtafval uit de hout- en meubelindustrie. Het verbranden daarvan is op dit moment niet aan regelgeving gebonden (behalve aan de Hinderwet).

¹⁾ De koolstof in biomassa is relatief kort tevoren, door zonne-energie, uit de atmosfeer gehaald en geeft daarom bij verbranding geen extra bijdrage tot het broeikaseffect. De mens creëert op deze wijze een koolstof-subcyclus.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Het ligt echter in de lijn der verwachting, dat met het verschijnen van de NER (Nederlandse Emissie Richtlijnen) op korte termijn wel degelijk regelgeving zal ontstaan ten aanzien van de verbranding van schoon hout. Uit contacten met provinciale overheden kan worden afgeleid dat de bestaande kleine installaties nu vaak overlast voor de omgeving veroorzaken. Door het toenemende milieubewustzijn van de mensen wordt bovendien de acceptatiegrens voor milieubelastende activiteiten lager.

Hoewel het duidelijk is dat kleinschalig verbranden van hout vaak overlast geeft en milieuhygiënisch kan worden verbeterd, is er thans slechts weinig kwantitatief inzicht in de huidige situatie in Nederland.

Op grond van bovenstaande problematiek is in opdracht van de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu (NOVEM) in het kader van het programma "Energiewinning uit Afval en Biomassa" (EWAB) door IMET-TNO een onderzoek uitgevoerd naar het kleinschalig verbranden (< 10 MWth) van schoon afvalhout. Daarbij wordt de opwekking van energie met zogenaamde "sfeer-eenheden", zoals houtkachels, voorzethaarden en open haarden, buiten beschouwing gelaten.

1.1 Doel van de studie

Op basis van de voorgaande overwegingen is de doelstelling van deze studie: Het bevorderen van het optimaal gebruik (hoog rendement/lage emissies) van biomassa in het algemeen en van "schoon" afvalhout in het bijzonder, als brandstof bij energie-opwekking op kleine industriële schaal (< 10 MWth). Tevens zal worden aangegeven welke technische en niet-technische maatregelen mogelijk zijn ter optimalisatie van het verbrandingsproces, waardoor enerzijds de energieopbrengst kan worden vergroot en anderzijds kan worden voldaan aan toekomstige regelgeving ten aanzien van het milieu.

1.2 Opzet van de rapportage

In het onderhavige rapport zullen de volgende onderwerpen worden behandeld:

Hoofdstuk 2 handelt over het afvalhoutpotentieel in Nederland en over de mogelijke (fossiele) energiebesparing die daarmee kan worden bereikt. In **hoofdstuk 3** worden de technische aspecten van houtverbranding in het algemeen besproken, waarna vervolgens in **hoofdstuk 4** een beeld wordt geschetst van de huidige state-of-the-art van houtverbranding in Nederland. In **hoofdstuk 5** wordt eerst een globale indruk gegeven van de situatie op het gebied van houtverbranding in enkele IEA-landen; daarna worden enkele technologische ontwikkelingen beschreven die in het buitenland worden toegepast, maar in Nederland nog niet.

Hoofdstuk 6 handelt over nieuwe ontwikkelingen op het gebied van verbrandingsinstallaties en rookgasreiniging; in **hoofdstuk 7** wordt een vergelijking gemaakt tussen de emissies van conventionele en nieuw ontwikkelde installaties. **Hoofdstuk 8** bevat de conclusies en aanbevelingen, die uit deze studie resulteren.

1.3 Begrippenkader

In dit rapport wordt een aantal begrippen veelvuldig gebruikt. Om misverstanden te voorkómen volgt hierna een omschrijving van wat met deze begrippen wordt bedoeld. Het gaat daarbij niet om een juridisch waterdichte formulering; de bedoeling is uitsluitend, de leesbaarheid van de volgende hoofdstukken te bevorderen.

- **resthout** is houtafval dat vrijkomt uit bossen, plantsoenen en overige landschapselementen, door snoeien van bestaande bomen en struiken.
Enkele voorbeelden hiervan zijn:
 - houtafval bij het rooien van bomen, onder andere in de vorm van takken;
 - houtafval bij het ontschorsen van stammen;
 - zaagsel en spanen of massief afval bij het opdelen van de stam.
- **oud hout** is hout dat vrijkomt na het einde van de gebruiksduur in de toepassing waarvoor het oorspronkelijk was bedoeld. Dit hout kan toegevoegde stoffen bevatten die onmiddellijk hergebruik bemoeilijken, zoals lijmstoffen, impregneermiddelen (creosoot, gechloreerde koolwaterstoffen), vochtwerende stoffen (verven, lakken en beitsen), spijkers, cement, etc.
- **industriel schoon afvalhout** is afval uit de houtverwerkende industrie, zoals zaagsel, houtkrullen, houtstof en massieve stukken (lengte-afvallen) dat geen toegevoegde stoffen bevat.
- **brandhout** kan samengesteld zijn uit industrieel schoon afvalhout en resthout.

2 Houtpotentieel en bereikbare energiebenutting in Nederland

Recentelijk is door de Stichting Bos en Hout een studie uitgevoerd naar de huidige situatie van aanbod en verwerking van resthout en oud hout in Nederland [3]. Daaruit blijkt dat de hoeveelheid resthout en oud hout in 1990 circa 1,83 Mton bedraagt. De bestemming daarvan is, volgens [3], als volgt:

36% (0,655 Mton/jr) hergebruik;
19% (0,350 Mton/jr) stort;
45% (0,825 Mton/jr) onbekend.

De hoeveelheid onbekend en gestort hout bedraagt totaal dus 1,18 Mton/jr en zou kunnen worden gekwalificeerd als potentieel brandhout.

Door Okken is echter onlangs berekend dat het brandhoutpotentieel circa 2,1 Mton/jr bedraagt [18]¹⁾, met als bestemming:

- Houtkachels²⁾ 981.250 ton/jr (15,7 PJ/jr);
- Industr. verbranding 125.000 ton/jr (2,1 PJ/jr);
- Stort + AVI 356.250 ton/jr;
- Natuurlijke afbraak 625.000 ton/jr.

Hergebruik is daar niet bij inbegrepen. Telt men voornoemde 0,655 Mton uit [3] bij de 2,1 Mton uit [18] op, dan zou het totaal aan afvalhout dus rond 2,8 Mton/jr bedragen – dus circa 1 Mton meer dan uit [3] volgt.

In deze studie zullen in de eerste plaats de getallen uit [18] als uitgangsggegevens worden gebruikt.

Van voornoemde post “Stort + AVI” wordt volgens [3] 40.000 à 60.000 ton/jr in AVI’s verbrand. De netto-post “stort” bedraagt dus rond 300.000 ton/jr. Dit gestorte hout zal ten dele verontreinigd zijn. Het opstellen en – meer nog – het implementeren van correcte regels om het schone afvalhout uit deze hoeveelheid af te scheiden, lijkt niet eenvoudig. Een voorzichtige schatting is, dat rond 100.000 ton/jr aan schoon hout ten behoeve van energiewinning kan worden afgescheiden.

Verder wordt een post “natuurlijke afbraak” van 625.000 ton/jr genoemd [18]. Natuurlijke afbraak wordt de laatste tijd bevorderd door “verchippen” van afvalhout, om het dan ter plaatse te laten liggen als grondverbeteraar. Dit om te voorkomen dat te veel organische stof aan de bodem wordt onttrokken. In deze studie wordt er van uitgegaan dat dit hout niet voor energiewinning in aanmerking komt.

Het bovenstaande betekent dat in totaal circa 0,1 Mton/jr extra voor industriële energetische doeleinden zou kunnen worden benut; dat zou dan ca. 1,6 PJ/jr extra opleveren.

¹⁾ Berekend uit de in [18] genoemde calorische waarde van hout (16 MJ/kg) en de in [18] genoemde energiestromen (totaal 33,4 PJ).

²⁾ In huishoudens; dit hout wordt verondersteld schoon te zijn. In de praktijk zal dit zeker niet voor 100% het geval zijn.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Een verdere correctie op de uit [18] stammende getallen is echter relevant.

Uit de onderhavige studie blijkt namelijk dat het geïnstalleerde vermogen aan houtverbrandingsinstallaties (zie hoofdstuk 4) 218 MWth bedraagt (vermogens tussen 0,02 en 5 MWth). Hieruit kan worden afgeleid dat de hoeveelheid *schoon* hout die in deze installaties wordt verbrand circa 148.000 ton/jr bedraagt. Deze schatting is gebaseerd op 3000 bedrijfsuren per jaar [37]. Dit betekent dat de hoeveelheid verbrand schoon afvalhout (iets) meer is dan dat wat in [18] aan industriële verbranding (schoon plus verontreinigd) wordt genoemd. Bij gebrek aan gegevens schatten wij nu dat boven voornoemde 148.000 ton/jr schoon afvalhout nog eens circa 80.000 ton/jr vuil afvalhout industrieel wordt verbrand, en wel in grote installaties, boven 10 MWth, omdat bij kleinere installaties de rookgasreiniging naar verhouding te duur wordt [7]. Aldus ontstaat een beeld van het brandhoutpotentieel in Nederland. In tabel 2.1 is dit kwantitatief weergegeven.

Tabel 2.1 Brandhoutpotentieel en energiewinning daaruit in Nederland

	Verontreinigd en schoon hout (ton/jr)	Industrieel schoon brandhout (ton/jr)	Huidige energiewinning uit hout, verontreinigd en schoon (ton/jr)
Houtkachels in huishoudens (schoon)	981,250		981,250
Verbranding schoon hout in industrie	148,000	148,000 ¹⁾	148,000
Verbranding verontreinigd hout in industrie	80,000		80,000
Verbranding in AVI's (verontreinigd)	50,000		50,000
Stort, verontreinigd	200,000		
Stort, schoon	100,000	→ 100,000 ²⁾	
Totaal (Mton/jr)	1,56	0,25	1,26
Energie (PJ/jr) (m ³ aardgas/jr)	25 0,78 x 10 ⁹	4 1,25 x 10 ⁹	20 0,62 x 10 ⁹

1) Verbranding industrieel schoon afvalhout in Nederland, huidige situatie.

2) Idem, realiseerbare aanvulling.

Wellicht ten overvloede moet in dit verband worden opgemerkt dat de gegevens van tabel 2.1 voortkomen uit schattingen, en door de onderzoekers zijn verzameld uit fragmentarische gegevens van diverse bronnen. Daarom bestaat nog steeds behoefte aan goede kwantitatieve informatie aangaande de diverse houtstromen in Nederland. Ook in [18] wordt deze behoefte onderkend.

Vooralsnog ziet het er echter naar uit dat in Nederland voor circa 2,4 PJ/jr (148.000 ton/jr) aan schoon brandhout industrieel wordt benut, en dat dit tot circa 4 PJ/jr (248.000 ton/jr) zou kunnen toenemen door schoon hout dat nu wordt gestort te gaan verbranden.

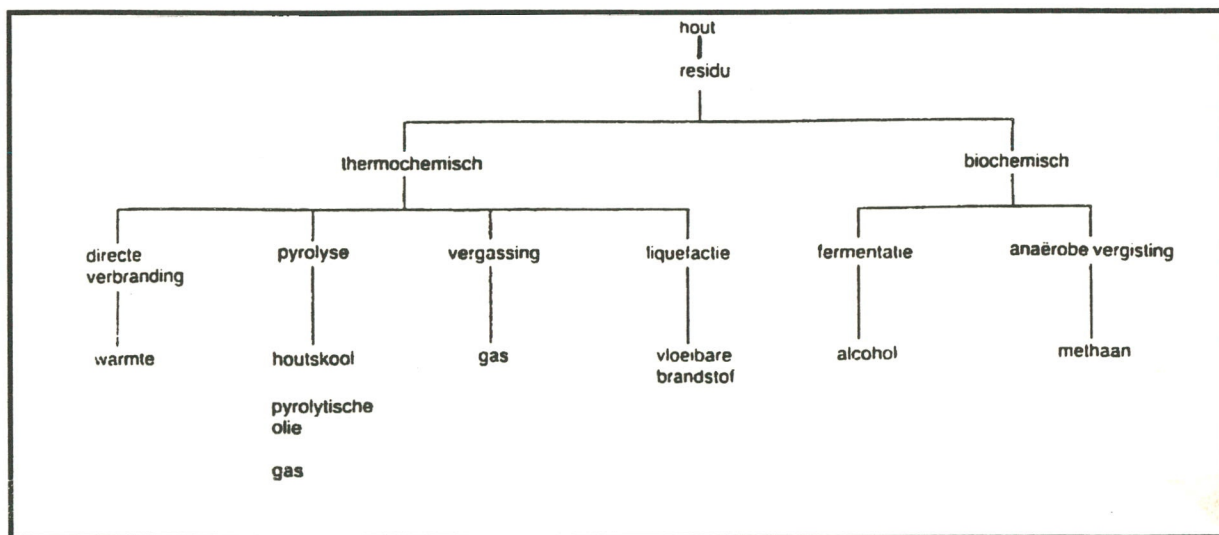
3 De technologie van houtverbranding

De technologie van houtverbranding, in het bijzonder die van de verbranding van verontreinigd afvalhout, komt min of meer overeen met die van afvalverbranding in het algemeen. Voor het verbranden van schoon afvalhout is de uitvoeringsvorm van de oven in feite dezelfde. Alleen kan in dat geval de rookgasreiniging (meestal) gedeeltelijk worden weggelaten. Om die reden kunnen ook kleinere vermogens, bijvoorbeeld in de orde van 0,1 MWth rendabel worden toegepast.

In dit hoofdstuk wordt eerst aandacht besteed aan het principe van verbranding (3.1). Daarna wordt een summier overzicht gegeven van de uitvoeringsvormen van de voorkomende belangrijkste typen ovens (3.2). In 3.3 komen de milieu-aspecten, met name van de verbranding van schoon afvalhout aan de orde. De technieken voor rookgasreiniging, die desondanks in bepaalde gevallen nodig kunnen zijn, worden in 3.4 behandeld.

3.1 Het verbrandingsprincipe

Hout en houtafval kunnen via diverse technieken in bruikbare energie worden omgezet. Deze technieken verkeren in verschillende stadia van ontwikkeling. Een overzicht van de belangrijkste basismethoden wordt in figuur 3.1 schematisch gegeven [29].



Figuur 3.1 Overzicht van de belangrijkste methoden van de omzetting van hout en houtafval in energiedragers

Hout bestaat uit

1. vocht
2. vluchtige bestanddelen
3. vaste koolstof
4. anorganische stoffen (as)

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Bij de verbranding van hout kunnen de volgende stappen worden onderscheiden.

1. Drogen

De eerste stap is het drogen van de brandstof. Reeds bij lage temperatuur ($\sim 100^\circ\text{C}$) zal het nog aanwezige vocht verdampen. Dit drogen impliceert een aanzienlijk energieverlies (bij een vochtgehalte van 50 à 60% wordt verbranden energetisch neutraal).

2. Ontgassen

Bij hogere temperatuur ($150\text{--}350^\circ\text{C}$) treedt een ontgassingsstap (pyrolyse) op. Hierbij wordt de chemische structuur van de brandstof afgebroken. Er ontstaan vluchtige verbindingen zoals CO , H_2O , CH_4 , lagere koolwaterstoffen en vaak ook complexere verbindingen (alcoholen, zuren). Daarnaast ontstaan vaak stoffen die bij de ontledingstemperatuur vluchtig zijn, maar die bij lagere temperatuur condenseren: de teerachtige componenten.

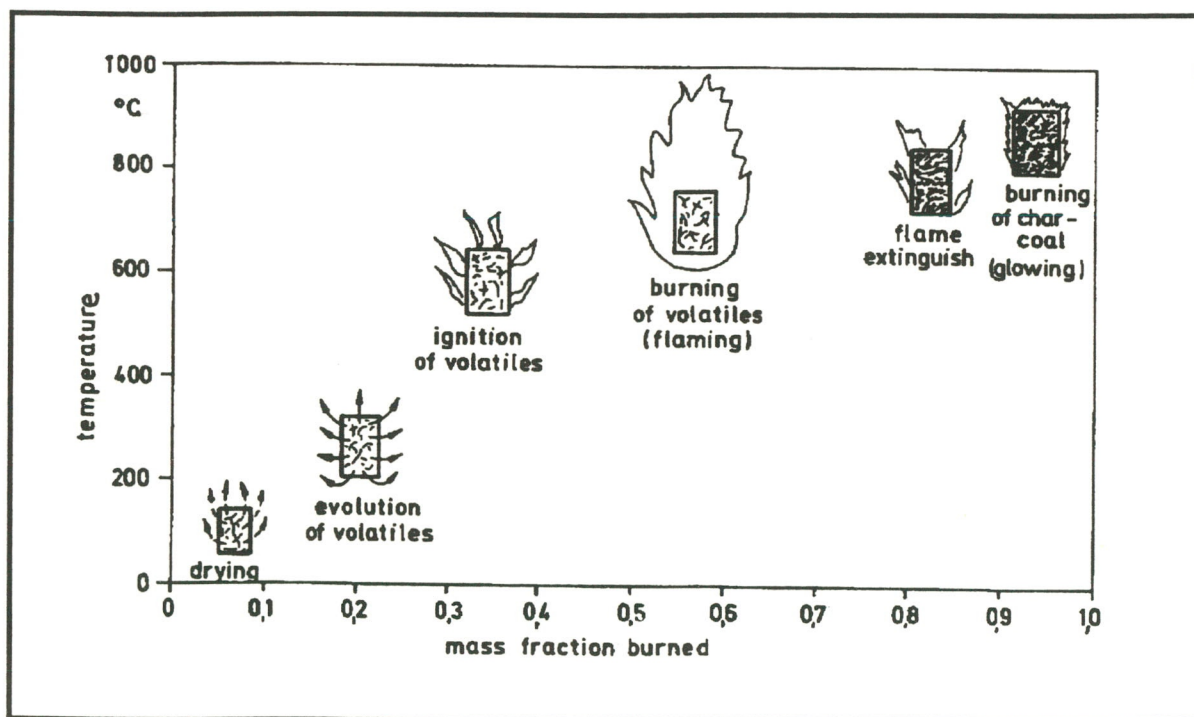
3. Verbranding van de ontgassingsprodukten

De vluchtige verbindingen verbranden in de gasfase onder toevoer van O_2 (lucht). De ontstekingtemperatuur van de vluchtige verbindingen is ongeveer 550°C .

4. Verbranden van vaste koolstof

De vaste component die overblijft bestaat uit bijna zuivere koolstof (char), die bij circa 800°C onder toevoer van O_2 (lucht) verbrandt.

In figuur (figuur 3.2) zijn de verschillende processtappen vereenvoudigd weergegeven [17].



Figuur 3.2 Vereenvoudigde schematische weergave van het proces van (hout)verbranding

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Het aandeel vluchtige bestanddelen (75-85 gewichtsprocenten op water- en as-vrije basis) is een hoofdkenmerk van hout. Dit percentage is in hoge mate bepalend bij het ontwerp van verbrandingsinstallaties, mede omdat meer dan 2/3 van de totale verbrandingswaarde van hout vrijkomt uit de verbranding van de vluchtige bestanddelen in de gasfase [36].

Tabel 3.1 [17] toont de karakteristieke kenmerken van hout en houtafvallen. Het hoge zuurstofgehalte is een indicatie voor een hoge reactiviteit (bij normale verbrandingstemperaturen) resulterend in een relatief snelle verbranding.

Tabel 3.1 Enkele relevante grootheden van onbehandeld hout [17]

Brandstof	H ₂ O- gehalte ¹⁾	As- gehalte ¹⁾	Stook- waarde ¹⁾	Vluchtig ²⁾	Elementairanalyse ²⁾			
					C	H	O	N
	[gew. %]		[MJ/kg]	gew.%	[gew. %]			
vers hout	40 - 60	0,1 - 0,5	8,3	} >70	50	6	44	0,2 à 0,5
luchtdroog hout	12 - 25	0,2 - 0,8	15,0					
Houtafval (stukhout)	6 - 47	0,3 - 1,5	7,5 - 17,2	80 - 84	5,9 - 6,1			
hout spaanders	5 - 44	0,3 - 1,1	9,2 - 17,6	79 - 85	5,3 - 6,0			
Houtstof	8 - 17	0,4 - 0,8	15,5 - 17,2	82 - 84	6,0 - 6,2			
Afrikaans hout	20 - 30	0,7 - 1,9	19,0 - 15,1	79 - 85	5,4 - 5,8			
schors	25 - 60	2 - 4 ³⁾	5,4 - 13,4	—	—			

¹⁾ Betrokken op de oorspronkelijke samenstelling.

²⁾ Water- en asvrij.

³⁾ Meegekomen as en aarde kunnen het asgehalte met max. 12 gew.% doen stijgen.

3.2 Werkingsprincipes van verbrandingsinstallaties

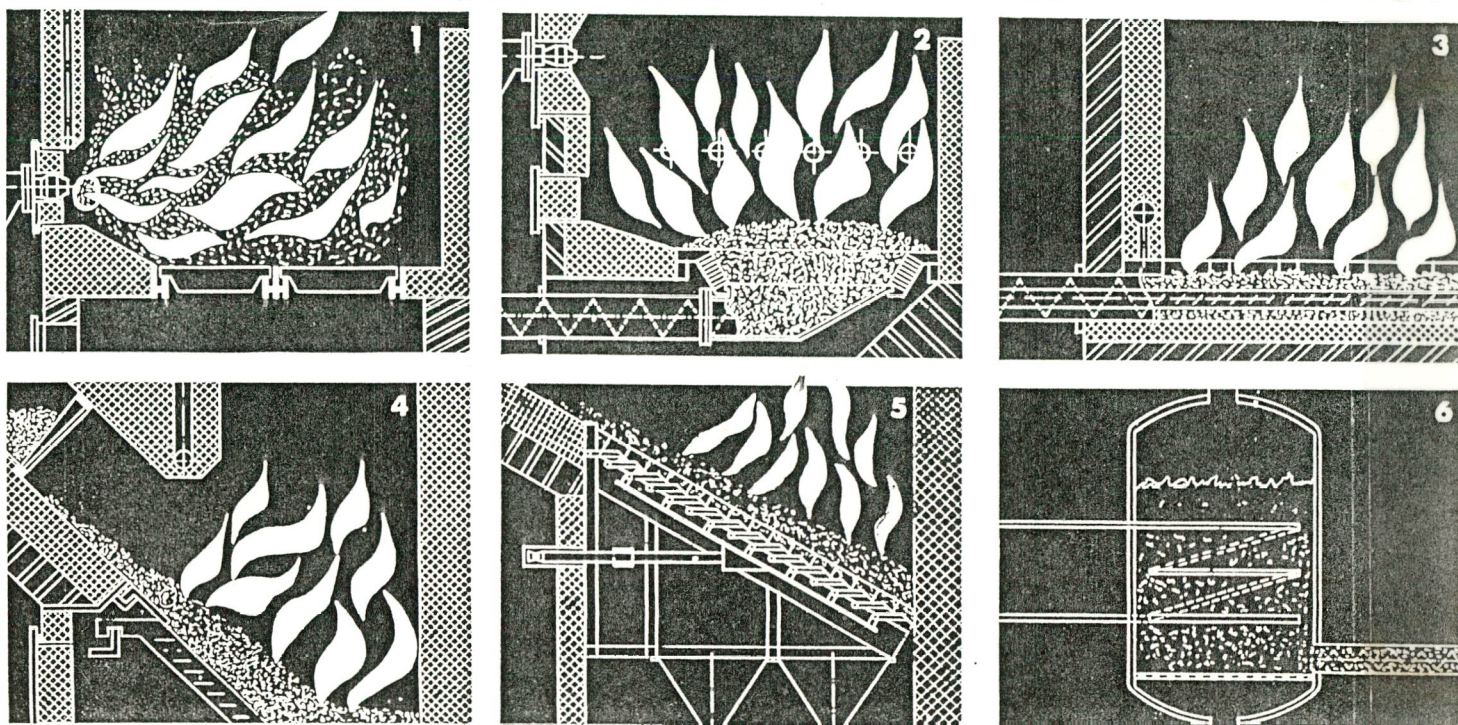
Verbrandingsinstallaties zijn, op basis van hun verbrandingsprincipes, te onderscheiden in de volgende typen:

- **Inblaasverbranding;**
- **Onderschroefverbranding;**
- **Doorschroefverbranding;**
- **Statisch rooster** : schuin, **horizontaal**;
- **Schuifroosterverbranding** : schuin, horizontaal;
- **Getrapte verbranding**
- **Wervelbedverbranding;**
- **Tunnelbrander;**
- **Moffelinblaas vuurhaard.**

De vet gedrukte principes zijn de meest gangbare.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Hierna worden de bovengenoemde verbrandingsprincipes in het kort besproken. Verder wordt in figuur 3.3 een aantal daarvan schematisch weergegeven. Voorts wordt in tabel 3.2 een overzicht gegeven van de brandstoffen die in de verschillende typen installaties kunnen worden verbrand. De installaties die in Nederland toegepast worden komen in de volgende hoofdstukken nader aan de orde.



Figuur 3.3 Illustratie van enkele gangbare verbrandingssystemen (de vet gedrukte systemen zijn het meest gangbaar)

1. **Inblaasverbranding**
2. **Onderschroefverbranding**
3. **Doorschroefverbranding**
4. Verbranding op statisch rooster – schuine uitvoering
5. Verbranding op schuifrooster – schuine uitvoering
6. Wervelbedverbranding

Inblaasverbranding (figuur 3.3.1)

Bij inblaasverbranding wordt de brandstof pneumatisch in de vuurhaard gebracht. Een deel van de transportlucht wordt tevens als verbrandingslucht benut. Inblaasverbranding is geschikt voor brandstoffen met een kleine korrel ($< 5 \times 5 \times 5$ mm), zoals stof en fijne spaanders en een vochtgehalte tot maximaal 20%. Het voordeel van inblaasverbranding is dat het systeem eenvoudig is en daardoor goedkoop. Een nadeel, inherent aan het inblaasprincipe, is de grote luchtvermaat waarmee het systeem wordt bedreven. Het gevolg is een groot rookgasdebiet, en daardoor een relatief laag rendement. Meestal wordt dit systeem uitgerust met een ontstekingsbrander.

Onderschroefverbranding (figuur 3.3.2)

Bij het onderschroefverbrandingssysteem wordt de brandstof onder in de vuurhaard geschroefd. In de branderbak wordt de brandstof in de vorm van een omgekeerde, afgeknotte kegel omhoog gestuwd. Via gaten in de branderbak wordt geforceerd primaire verbrandingslucht toegevoerd. Boven het niveau waar de afbrand plaatsvindt wordt secundaire verbrandingslucht toegevoerd, die zorg moet dragen voor een volledige verbranding van CO en vluchtige componenten.

Automatische asafvoer is mogelijk.

De afmeting van de brandstof bedraagt maximaal $40 \times 30 \times 15$ mm, maar minstens (bijvoorbeeld) $20 \times 20 \times 10$ mm. Het vochtgehalte van de brandstof mag maximaal 40% bedragen.

Met dit systeem kunnen relatief hoge rendementen gehaald worden (70 à 75%)¹⁾.

Doorschroefverbranding (figuur 3.3.3)

De brandstof wordt door een of meer wormen in de vuurhaard geschroefd. Deze wormen lopen door de gehele vuurhaard. Langs de worm wordt primaire verbrandingslucht toegevoerd, die tevens zorgt voor koeling van de schoepen. Boven het branderbed wordt secundaire verbrandingslucht toegevoerd, ten behoeve van naververbranding van de gassen. Wanneer de brandstoffen in de vuurhaard komen ontsteken zij vrijwel direct. De brandstof wordt vervolgens al brandend naar het einde van de vuurhaard doorgeschroefd, waar de as wordt afgevoerd, bijvoorbeeld naar een container.

Het doorschroefverbrandingssysteem wordt toegepast voor brandstoffen met een relatief kleine afmeting ($l_{\max}$ 100 mm, $d \sim \varnothing$ 50 mm), een vochtgehalte tot 40% en een hoog asgehalte.

Rendementen zijn vergelijkbaar met die van een onderschroefverbranding.

Verbranding op statisch rooster - schuine uitvoering (figuur 3.3.4)

In dit geval vindt de verbranding plaats op een schuin, niet beweegbaar rooster waarmee door de zwaartekracht een constante brandstofstroom wordt bewerkstelligd. De brandstoftoevoer vindt plaats via een dubbele klepunit, die boven het rooster is geplaatst. Door de bovenklep te openen wordt de brandstof, al dan niet automatisch, op de onderklep gestort. Pas na het sluiten van de bovenklep wordt de onderklep geopend (aanzuigen van valse lucht wordt daarmee zo veel mogelijk voorkomen). De brandstof die langzaam over het schuine rooster naar beneden glijdt belandt uiteindelijk op een vlak rooster, waar de uitbrand van de koolstof plaatsvindt. Door de constructie van de vuurhaard stromen de rookgassen langs de verse brandstoffen; hierdoor vindt droging en ontgassing plaats. De verbrandingslucht wordt door onderdruk in de vuurhaard vrij door het rooster aangezogen. Secundaire lucht zorgt voor verdere verbranding van CO en vluchtige organische componenten. De as kan automatisch worden afgevoerd.

Schuinroosterverbrandingssytemen worden over het algemeen toegepast voor schors en grof vershredderd hout ($l \sim 300$ mm, $d \sim \varnothing$ 200 mm); vochtgehalten tot 50% zijn toegestaan.

Het rendement is vergelijkbaar met dat van een doorschroefverbrander.

¹⁾ Rendementen zijn sterker afhankelijk van vochtgehalte en stukgrootte dan van het type verbrandingsinstallatie (zie tabel 4.3 en 4.4).

*Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland**Verbranding op statisch rooster - horizontale uitvoering*

In dit geval ligt de brandstof op een horizontaal rooster. De primaire lucht wordt van onder het rooster aangevoerd; secundaire lucht boven het brandstofbed.

Dit type toestel is geschikt voor grovere stukken hout (tot $l = \sim 300$ mm, $d = \sim \varnothing 100$ mm) met vochtgehalten van de brandstof tot circa 25%.

Verbranding op schuifrooster, schuine uitvoering (figuur 3.3.5)

Het schuifrooster is een mechanisch aangedreven *beweegbaar* rooster. Door de schuivende beweging van het rooster vindt het transport van de brandstof plaats; daardoor wordt een goede verdeling van de brandstof bereikt. Door de voorwaartse beweging van het rooster verandert tevens de structuur (menging van verbrande en onverbrande delen) van de brandstof.

Aan het rooster kan men drie zones onderscheiden:

- de droogzone,
- de verbrandingszone,
- de uitbrandzone.

De ontassing vindt, evenals de aandrijving van het rooster, mechanisch plaats.

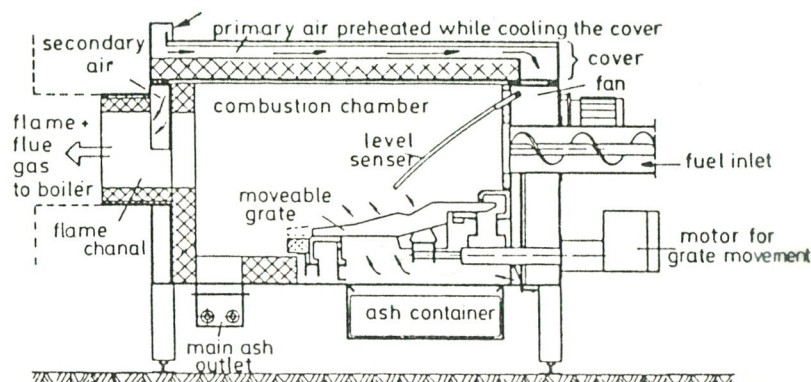
Schuifroostersystemen zijn, evenals statische roosters in schuine uitvoering (figuur 3.1.4) zeer geschikt voor de verbranding van wat grovere stukken houtafval.

Het schuifrooster in kleinere afmetingen wordt vaak uitgevoerd als schuin rooster; bij grotere afmetingen wordt het schuifrooster horizontaal uitgevoerd. Brandstofafmetingen tot $300 \times 100 \times 50$ mm; vochtgehalte tot 50%. Rendement, afhankelijk van vochtgehalte, 60 tot 75%.

Wervelbedverbranding (figuur 3.3.6)

Dit principe verschilt aanmerkelijk van de vorige vijf uit figuur 3.1. Een wervelbed bestaat uit een gesloten vat met daarin een geperforeerde plaat, waarop zich een korrelig inert materiaal bevindt. Door de geperforeerde plaat wordt lucht geblazen met een zodanige snelheid, dat het bedmateriaal in een fluïdiserende toestand komt. De brandstof wordt aan het bed toegevoegd, waarbij de fluïdisatielucht tevens dienst doet als verbrandingslucht. De afmeting van de brandstof wordt bepaald door de fluïdisatiesnelheid (bijvoorbeeld $25 \times 25 \times 5$ mm). Het vochtgehalte mag maximaal circa 30% bedragen. Door de goede menging van brandstof en lucht kan een goede verbranding bereikt worden, met hoge rendementen (tot 80%). De werktemperatuur ligt tussen de 750 en 950 °C; dit is 100 à 200° lager dan bij conventionele houtverbranding.

Getrapte verbranding (figuur 3.4)

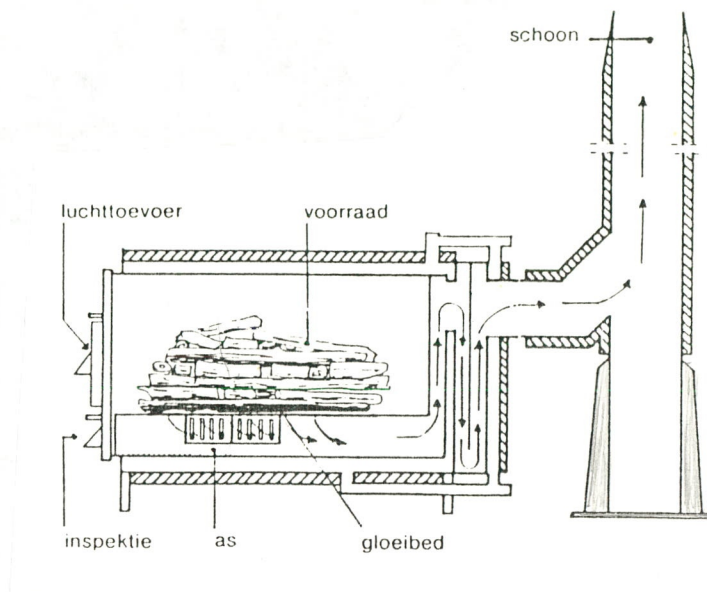


Figuur 3.4 Uitvoeringsvorm van een getrapte verbrandingssysteem

Bij getrapte verbranding wordt het hout eerst in contact gebracht met een ondermaat aan primaire lucht, die juist genoeg is om de vaste koolstof te verbranden. Met de hierbij ontstane warmte wordt het aangevoerde hout ontgast. Het brandbare gas dat aldus ontstaat wordt met secundaire lucht gemengd en vervolgens verbrand. Vergassings- en verbrandingsstap zijn ruimtelijk nauwelijks gescheiden¹⁾. Getrapte verbranding kan in verschillende rooster- of schroefinstallaties worden uitgevoerd.

Brandstoffen met een lengte vanaf 50 mm en een diameter van minimaal 25 mm kunnen met dit principe worden verwerkt. Het maximaal toegestane vochtgehalte is circa 20%.

¹⁾ Bij "echte" vergassing is het vergassingsproces ruimtelijk gescheiden van de verbranding. Het gas is in dat geval het eindproduct van het proces.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Figuur 3.5 Voorbeeld van een “omgekeerd” verbrandingssysteem (de luchtstroom wordt geforceerd door het bed naar beneden gericht)

Een variant van getrapte verbranding zoals hierboven omschreven betreft de zogenaamde “omgekeerde” verbranding. In dat geval wordt de primaire verbrandingslucht boven het rooster toegevoerd en stroomt vervolgens door het brandstofbed naar beneden. De brandstoflaag op het rooster verbrandt onvolledig en draagt de daarbij ontwikkelde warmte over aan het daarboven liggende brandstofbed, wat hierdoor ontgast. De gassen stromen door het hete brandstofbed en worden vervolgens met secundaire lucht volledig verbrand.

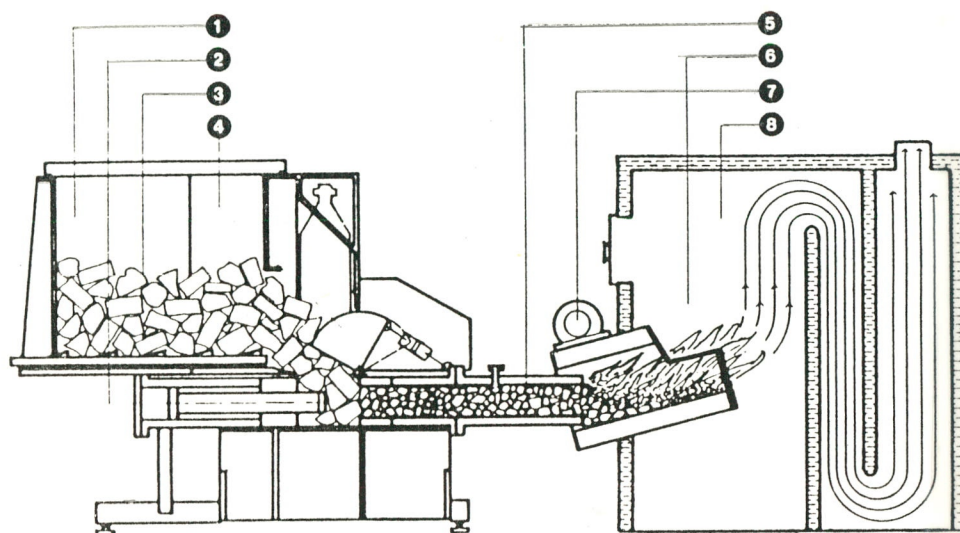
Deze techniek maakt het mogelijk om ook grovere stukken hout (tot bijvoorbeeld $500 \times \varnothing 50$ mm) te verbranden. Ook handbediende installaties kunnen volgens het getrapte verbrandingsprincipe worden uitgevoerd. Het rendement ligt in de buurt van 75%. Getrapte verbranding wordt beschouwd als een belangrijke nieuwe ontwikkeling, vooral omdat daardoor emissieverlaging mogelijk wordt. In hoofdstuk 6 wordt daar nader op ingegaan.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Tunnelbrander

Bij een tunnelbrander (figuur 3.6) wordt de brandstof door een tunnel geperst met behulp van een hamermechanisme. Vervolgens komt de brandstof in een branderbak, waarin hij tot ontsteking wordt gebracht. Daarna kunnen de brandbare gassen verder uitbranden in de uitbrandkamer. Een ventilator draagt zorg voor de primaire verbrandingslucht.

Houtblokken van bijvoorbeeld $80 \times \varnothing 50$ mm vierkant zijn geschikt voor dit soort installaties. Het vochtgehalte mag maximaal circa 20% bedragen.



Figuur 3.6 Tunnelbrander

1. Brandstoftkamer
2. Plunjer
3. Brandstoftoevoerinrichting
4. Brandstofregelaar
5. Brandstoftoevoerbuiss
6. Brander
7. Ventilator
8. Verbrandingsruimte

Moffel-inblaasvuurhaarden¹⁾

Een variatie op de inblaasverbranding is de moffel-inblaasvuurhaard (figuur 3.7). Het principe berust op het voormengen van brandstof en lucht in een afzonderlijke verbrandingskamer. De uitbrand vindt plaats in de uitbrandkamer van de ketelininstallatie; draaglucht fungeert als transportmiddel van de brandstof. Een olie- of gasbrander wordt zonnodig als hulpbrander gebruikt, bij opstarten en wanneer onvoldoende hout beschikbaar is. De installaties worden over het algemeen toe-

¹⁾ Dit type apparaat wordt **moffel**-inblaasvuurhaard genoemd omdat het oorspronkelijk specifiek voor moffeldoeleinden werd gebruikt.

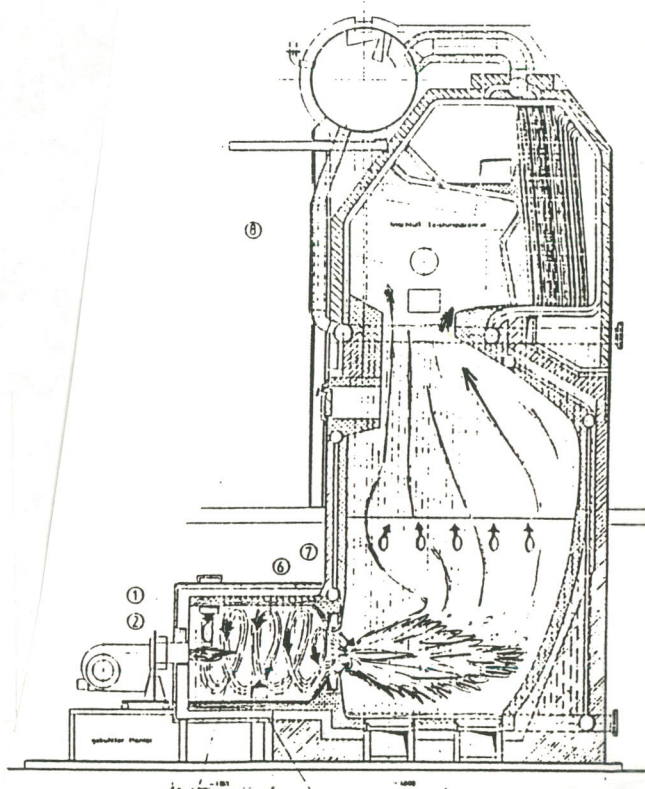
Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

gepast voor grotere vermogens (5 à 10 MWth). Ontassing vindt meestal langs mechanische weg plaats.

Moffel-inblaasvuurhaarden worden hoofdzakelijk toegepast wanneer het stofaandeel van de brandstof minstens 50% bedraagt en de grootte van de deeltjes van bijvoorbeeld $25 \times \varnothing 15$ mm. Vochtgehalten tot circa 10% zijn toegestaan.

Dit systeem wordt in Nederland (nog) niet voor houtverbranding toegepast.

**Muffeleinblasfeuerung
in Kombination mit
einem Wasserkessel.**
1 Primärluftzufuhr,
2 Spänezufuhr, 3 Vergasung und partielle Verbrennung, 4 Rauchgaszufuhr, 5 Entaschung, 6 Sekundärluftzufuhr, 7 Tertiärluftzufuhr, 8 vorhandener Wasserrohrkessel



Figuur 3.7 Moffel-inblaasvuurhaard

De in deze paragraaf besproken verbrandingsprincipes worden, tenslotte, in tabel 3.2 samengevat. Daarbij is ook de brandstofvorm aangegeven. In principe kunnen in deze typen ovens ook andere stoffen dan hout worden verbrand; de brandstofafmeting en -samenstelling zijn daarbij belangrijke criteria. De installaties zijn echter wel specifiek voor houtverbranding ontworpen; andere brandstoffen kunnen daarom problemen opleveren (bijvoorbeeld slakvorming, lagere rendementen, te hoge temperaturen, ongewenste emissies).

*Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland*Tabel 3.2 Overzicht van de meest gangbare typen verbranding voor het verbranden van hout¹⁾

Type verbranding	Brandstofvorm	Brandstof-afmetingen (mm)	Vochtgehalte (gew%) ²⁾	Zie figuur
Inblaasverbranding	Stof, fijne spaanders	< 5 × 5 × 5	< 20	3.3.1
Onderschroefverbranding	Spaanders, gehakseld hout, chips	< 40 × 30 × 15; > 20 × 20 × 10	< 40	3.3.2
Doorschroefverbranding	Spaanders, gehakseld hout, chips	< 100 × ø 50	< 40	3.3.3
Verbranding op statisch rooster - schuine voering	Schors, grove stukken	< 300 × ø 200	< 50	3.3.4
Idem horizontaal	Idem	< 300 × ø 100	< 25	—
Verbranding op schuif-rooster - schuine uitvoering	Idem	< 300 × 100 × 50	< 50	3.3.5
Wervelverbranding	Pellets, chips	< 25 × 25 × 5	< 30	3.3.6
Tunnelbrander	Spaanders, gehakseld hout, chips	< 50 × ø 50	< 20	3.6
Moffel-inblaasverbranding	Stof, spaanders	ca. 25 × ø 15	< 10	3.7

¹⁾ Getrapte verbranding is in vele uitvoeringsvormen realiseerbaar (bijvoorbeeld figuur 3.4 en 3.5); daarom is voor dat type verbranding geen brandstofafmeting aan te geven.

²⁾ Het vochtgehalte is slechts tot op zekere hoogte gerelateerd aan het type verbranding. Veel hangt af van de specifieke uitvoeringsvorm van de installatie.

3.3 Milieuaspecten

Bij de verbranding van schoon hout kunnen de volgende verontreinigende componenten worden verwacht:

In rookgassen:

- Kooldioxyde (CO_2);
- Koolmonoxyde (CO);
- Onverbrande koolwaterstoffen (C_xH_y , PAK's),
- Stikstofoxiden (NO_x);
- Vaste deeltjes, waaronder stof en teerachtige substanties;
- Waterdamp.

In residuen:

- as (met anorganische materialen zoals zware metalen);
- residuen (met onverbrande koolstof, teerachtige componenten).

Kooldioxyde

Vanwege het broeikaseffect wordt CO_2 de laatste jaren beschouwd als een voor het milieu schadelijke emissie. Echter, in tegenstelling tot het verbranden van andere fossiele brandstoffen zoals olie, steenkool en aardgas, draagt het verbranden van biomassa (onder andere hout) niet wezenlijk bij tot de toename van de kooldioxide in de atmosfeer. De voorwaarde die daarbij wordt gesteld, is dat productie en consumptie gelijke tred houden. In dat geval wordt evenveel CO_2 door planten gebonden als bij de verbranding van biomassa vrijkomt.

Koolmonoxyde (CO)

De concentratie van koolmonoxyde is een belangrijke maatstaf voor de kwaliteit van het verbrandingsproces. Hoge CO-concentraties zijn het gevolg van onvolledige verbranding, die veroorzaakt kan worden door een ondermaat lucht, door slechte menging en door snelle sterke afkoeling van de gassen nadat ze uit het hout zijn getreden. Emissie van CO draagt indirect bij tot het broeikaseffect¹⁾

Onverbrande koolwaterstoffen (C_xH_y)

Evenals CO is C_xH_y een produkt van onvolledige verbranding; het ontstaat tijdens de ontgassingsfase van de brandstof. Een groep die hier met name van belang is zijn de Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAK's). Enkele verbindingen worden als zeer schadelijk beschouwd in verband met hun carcinogene eigenschappen [10].

¹⁾ Dit komt doordat OH^- -ionen de oxydatie van CO bewerkstelligen. Dit verlaagt de OH^- -concentratie in de atmosfeer, waardoor vervolgens de oxydatie van methaan en koolwaterstoffen wordt vertraagd. In aanwezigheid van NO en NO_2 draagt CO bij tot de vorming van troposferische ozon [44]. Uiteindelijk (in enkele maanden) oxydeert CO tot CO_2 . Gezien de geringe hoeveelheden waar het hier om gaat is dit directe effect echter verwaarloosbaar (CO bezit zelf geen broeikaseigenschappen).

Stikstofoxiden

Bepalend voor de NO_x -emissie bij houtverbranding is het N-gehalte van de brandstof, alsmede het O_2 -gehalte, de temperatuur en de verblijftijd van de gassen in de verbrandingszone. Thermische NO_x (uit stikstof in de verbrandingslucht) wordt nagenoeg niet gevormd omdat de temperatuur daarvoor te laag is: beneden 1400°C is de reactiesnelheid gering.

Deeltjes

Hieronder worden verstaan as en residuen die met de rookgasstroom worden meegevoerd. Vermindering van deeltjesemissie kan worden bereikt door verbetering van de verbrandingskwaliteit.

Door afkoeling kunnen PAKs gedeeltelijk op de deeltjes condenseren.

3.4 Rookgasreinigingstechnieken

Emissiebeperking kan worden bereikt door het nemen van:

1. primaire ("procesgeïntegreerde") maatregelen, waarmee het ontstaan van verontreinigende componenten wordt voorkómen, en
2. secundaire maatregelen ("end of pipe" technieken), waarmee de verontreinigende componenten in de rookgassen achteraf worden verwijderd.

3.4.1 Primaire maatregelen

Primaire maatregelen hebben tot doel de verbranding te optimaliseren en tegelijkertijd de uitstoot van de in 3.3 genoemde schadelijke emissies te minimaliseren.

Als primaire maatregelen kunnen worden genoemd:

- beïnvloeding vochtgehalte van de brandstof;
- aanpassing stukgrootte van de brandstof;
- keuze type verbrandingsinstallatie;
- vermogenskeuze (aanpassing aan de warmtevraag);
- verbetering constructie van de verbrandingsinstallatie;
- optimalisatie procesregeling.

Deze maatregelen kunnen uiteraard niet los van elkaar worden gezien; zij beïnvloeden elkaar in hoge mate.

Hierna wordt op elk van deze aspecten kort nader ingegaan.

Beïnvloeding van het vochtgehalte van de brandstof

Het vochtgehalte van hout kan, afhankelijk van de voorbehandeling, variëren tussen 0 en 60 gew.%, voor respectievelijk ovendroog en vers hout. Is het vochtgehalte circa 50% of hoger, en wordt de verbrandingslucht niet voorverwarmd, dan ontstaan problemen bij het bereiken van de gewenste verbrandingstemperatuur van 850°C . Dit gaat gepaard met een slechte verbranding, en daardoor met hoge emissies.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Drogen alvorens te verbranden is dus in principe gunstig. Dit is echter niet altijd mogelijk en kost bovendien extra energie, wanneer daarvoor externe warmte (warmte die niet uit het verbrandingsproces afkomstig is) wordt gebruikt, tenzij de droging langs natuurlijke weg plaatsvindt. Er zijn installaties op de markt, die voorzien zijn van een voordroogzone (bijvoorbeeld bij typen met een bewegend schuin rooster). Voor dezelfde capaciteit zijn deze installaties groter en daardoor ook duurder.

Aanpassing stukgrootte van de brandstof

De stukgrootte van de brandstof is, evenals het vochtgehalte, van belang bij de keuze van de installatie. Gaat het om een brandstofaanbod van homogene samenstelling of varieert de samenstelling voortdurend? Indien dit laatste het geval is, is het in principe aan te bevelen de brandstof te verkleinen met behulp van een brekerinstallatie (shredder). Op deze manier wordt het brandstofaanbod tot één stukgrootte teruggebracht hetgeen de verbrandingskwaliteit ten goede komt (betere menging brandstof/lucht door kleinere brandstofdeeltjes). Daarnaast worden hierdoor de opties met betrekking tot de installatiekeuze vergroot.

Uiteraard kost dit shredderen geld en energie; kosten en baten moeten dus tegen elkaar worden afgewogen.

Type verbrandingsinstallatie

Uit de twee voorgaande punten is het reeds duidelijk geworden dat de eigenschappen van de brandstof de keuze van de installatie sterk beïnvloeden.

Hout met hoge vochtgehalten wordt normaliter verbrand in installaties met een hoog warmteaccumulerend vermogen (ovens met een beklede vuurhaard). Een dergelijke zware oven functioneert het beste bij continu bedrijf (goede verbranding, lage emissies). Bij de keuze dient men er dan rekening mee te houden dat snelle vermogenswisselingen niet gewenst zijn (vanwege de grote eigen warmtecapaciteit). Gestreefd dient te worden naar een goed geïsoleerde oven met een eigen warmtecapaciteit die de gewenste vermogenswisselingen niet vertraagt.

Bepaling van het benodigd vermogen

De keuze van het vermogen wordt bepaald door de warmtebehoefte van een gebouw of proces. In het ideale geval is het warmteaanbod in balans met de vraag. Theoretisch is de installatie dan continu in bedrijf; hij functioneert dan beter dan een installatie die periodiek aan- en uitgeschakeld wordt. Dit laatste gebeurt wanneer het warmteaanbod groter is dan de vraag. Een installatie die doorlopend aan/uit schakelt heeft een lager rendement (onder andere door de stilstandsverliezen) maar geeft ook aanzienlijk hogere emissies. Uit onderzoek is gebleken [10], dat vooral bij het inschakelen de emissies hoger zijn dan in continubedrijf. Figuur 3.8 toont een registrogram van de emissies van een installatie die continu in bedrijf is, en waarvan het warmteaanbod in evenwicht is met de vraag. Figuur 3.9 toont het effect van het verstoren van dat evenwicht.

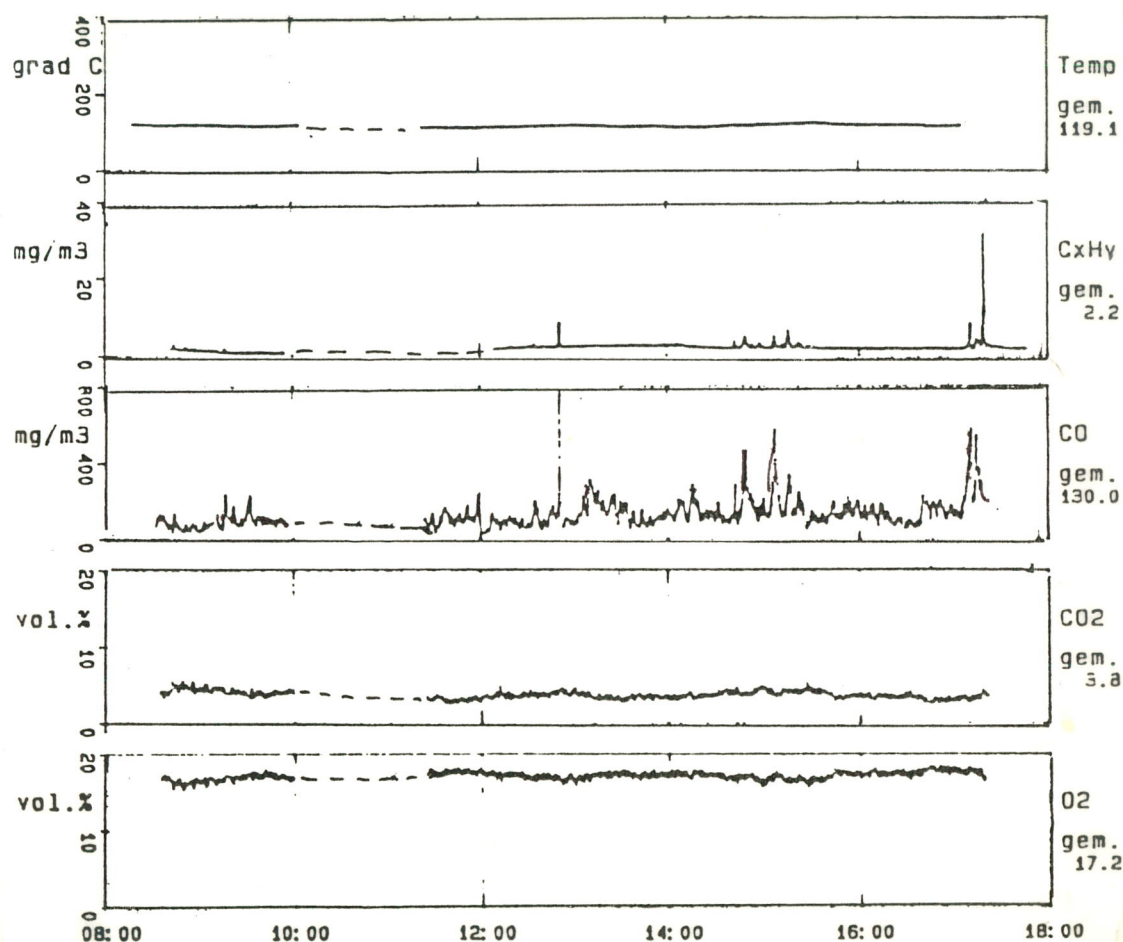
Om de in figuur 3.9 getoonde situatie te vermijden wordt door enkele fabrikanten aanbevolen, de installatie te dimensioneren op een warmteaanbod dat 25 tot 40% lager ligt dan de berekende gemiddelde warmtebehoefte. Een alternatief is, de installatie te ontwerpen op basislast, en de pieklast op te vangen.

Optimalisatie procesregeling

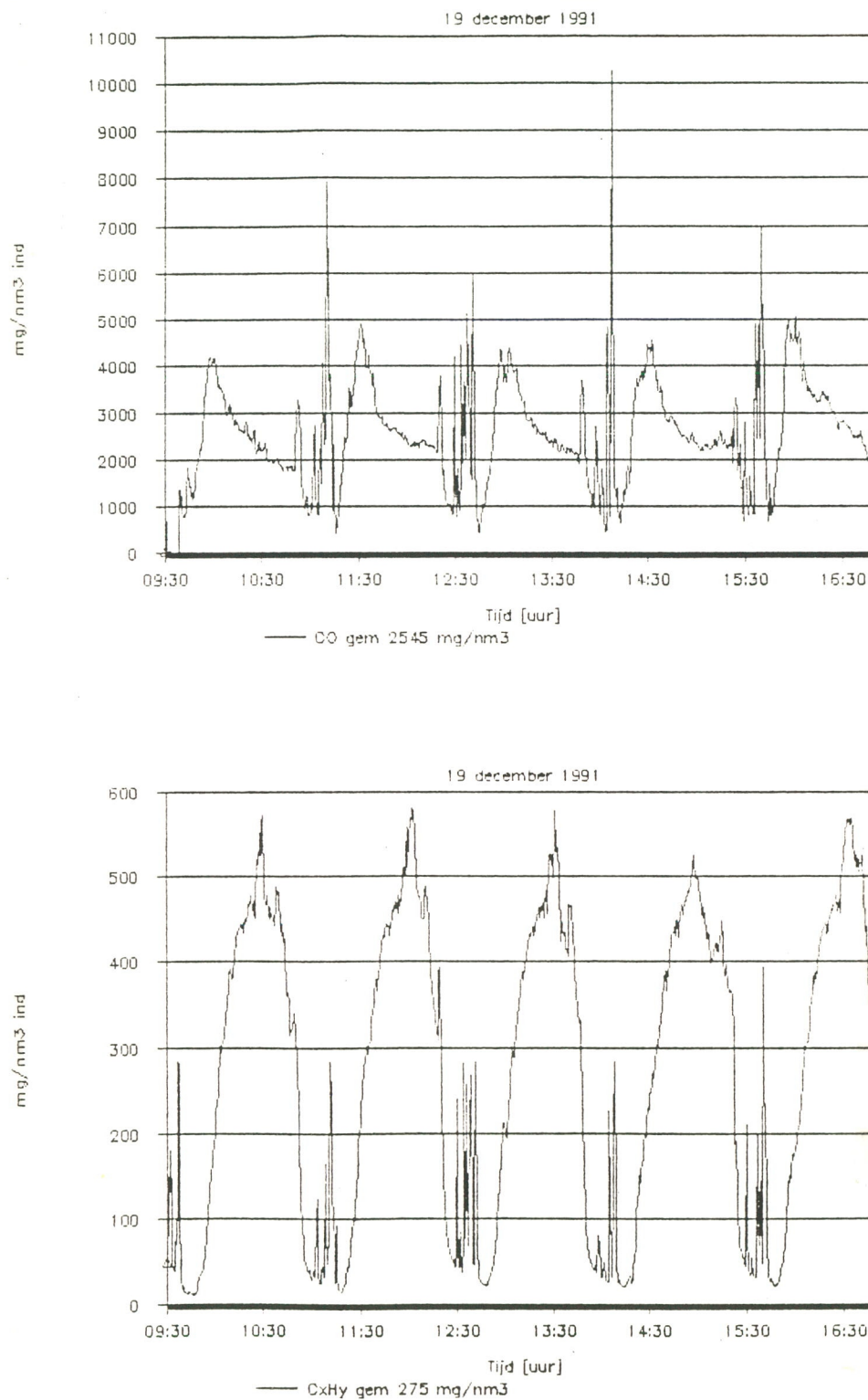
Regelsystemen van installaties worden veelal nog steeds van ondergeschikt belang geacht en pas in de laatste fase, bij wijze van sluitpost, behandeld. Ook bij houtgestookte verbrandingsinstallaties werd hier tot voor kort weinig aandacht

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

aan besteed. In dit verband zijn vooral de vermogensregeling en de regeling van de verbrandingskwaliteit belangrijk. Automatisch gestookte installaties zijn hoogstens uitgerust met een automatische brandstoftoevoer; de terugkoppeling naar primaire en secundaire luchtinstellingen wordt buiten beschouwing gelaten. Regelingen ten behoeve van de optimalisatie van de verbrandingskwaliteit werden tot nu toe nog niet toegepast; ontwikkelingen op dit gebied zijn pas recentelijk van de grond gekomen. Vervanging van aan-uit regelsystemen door een integrale proportionele regeling is daarbij belangrijk. Op dit punt zijn verdere verbeteringen mogelijk.



Figuur 3.8 Voorbeeld van emissies van een houtverbrandingsinstallatie bij continubedrijf

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Figuur 3.9 Voorbeeld van emissies van een houtverbrandingsinstallatie bij intermitterend bedrijf (periodieke aan/uitschakeling doordat vraag en aanbod niet met elkaar in evenwicht zijn)

Verbetering constructie verbrandingsinstallatie

De bovengenoemde punten (regeling, stukgrootte van de brandstof en type verbrandingsinstallatie) hangen samen met de constructie en de afwerking van de verbrandingsinstallatie. Voorts bepaalt de constructie in hoge mate de bedrijfszekerheid van de installatie. Door de (ondanks de eerder genoemde maatregelen) variërende warmteafname wordt de installatie aan sterke temperatuurschommelingen blootgesteld. Daarom dienen hoogwaardige materialen voor de constructie te worden toegepast. De lektheid van een installatie beïnvloedt bijvoorbeeld de regeling van de installatie; lektheid en isolatiegraad bepalen mede het rendement.

Procesoptimalisatie

Zoals reeds eerder gesteld, staan de hierboven genoemde punten nauw met elkaar in verband. De randvoorwaarden voor een goede verbranding, waardoor tevens emissies zoals CO, C_xH_y en stof teruggedrongen worden zijn:

- een voldoende hoge temperatuur in de vuurhaard (~850 °C);
- voldoende verblijftijd van de verbrande gassen in de vuurhaard (> 1,5 sec.);
- aangepaste brandstof-luchtverhouding, ook bij vermogensveranderingen;
- goede menging van brandstof en lucht.

De eerder genoemde maatregelen vormen de basis voor het realiseren van zo'n optimale situatie.

3.4.2 Secundaire maatregelen

Secundaire ("end-of-pipe") maatregelen houden in dat achteraf maatregelen worden genomen voor verdere emissiereductie. Bij verbranding van schoon hout is in dit verband vooral het terugdringen van de stofemissie van belang. Daarvoor zijn verschillende apparaten in de handel. De meest gangbare technieken zijn:

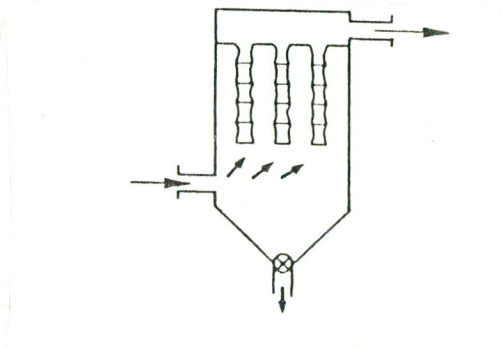
- doekfilters;
- elektrostatische filters;
- wassers;
- mechanische afscheiders.

Hierna worden deze reinigingsprincipes kort besproken en schematisch weergegeven.

Doekfilters (figuur 3.10 en 3.11)

Een doekfilter bestaat in principe uit een omkasting waarin een filtermedium (het doek) is aangebracht. Door dit doek wordt de ruimte binnen de omkasting verdeeld in een "vuil" en een "schoon" deel.

De gasstroom wordt door het filterend medium geleid. Door de deeltjes die door het medium worden afgevangen raakt het filtermateriaal na verloop van tijd verstopt. Het reinigen van de doeken kan dan worden uitgevoerd door middel van een schudmachine, perslucht, een terugblaassysteem of door een combinatie van deze systemen.



Figuur 3.10 Schema van een zogenaamd slangenfilter, een uitvoeringsvorm van een doekfilter

Het filtermedium is doorgaans opgebouwd uit textielvezels. Het kan echter ook van een kunststof, zoals teflon, zijn vervaardigd (langdurig bestand tegen temperaturen tot 240 °C).

Voordelen

- Een van de belangrijkste voordelen van doekfilters is het hoge verwijderingsrendement, dat ruim boven de 95% ligt; 99.9% is zelfs mogelijk. Bij lage stofbelasting is een deeltjesconcentratie van 5 mg/m³ onder standaardcondities haalbaar (standaardcondities: 273 K, 101.3 kPa en 11% O₂).
- Lage drukval (0.6 tot 1 kPa.).

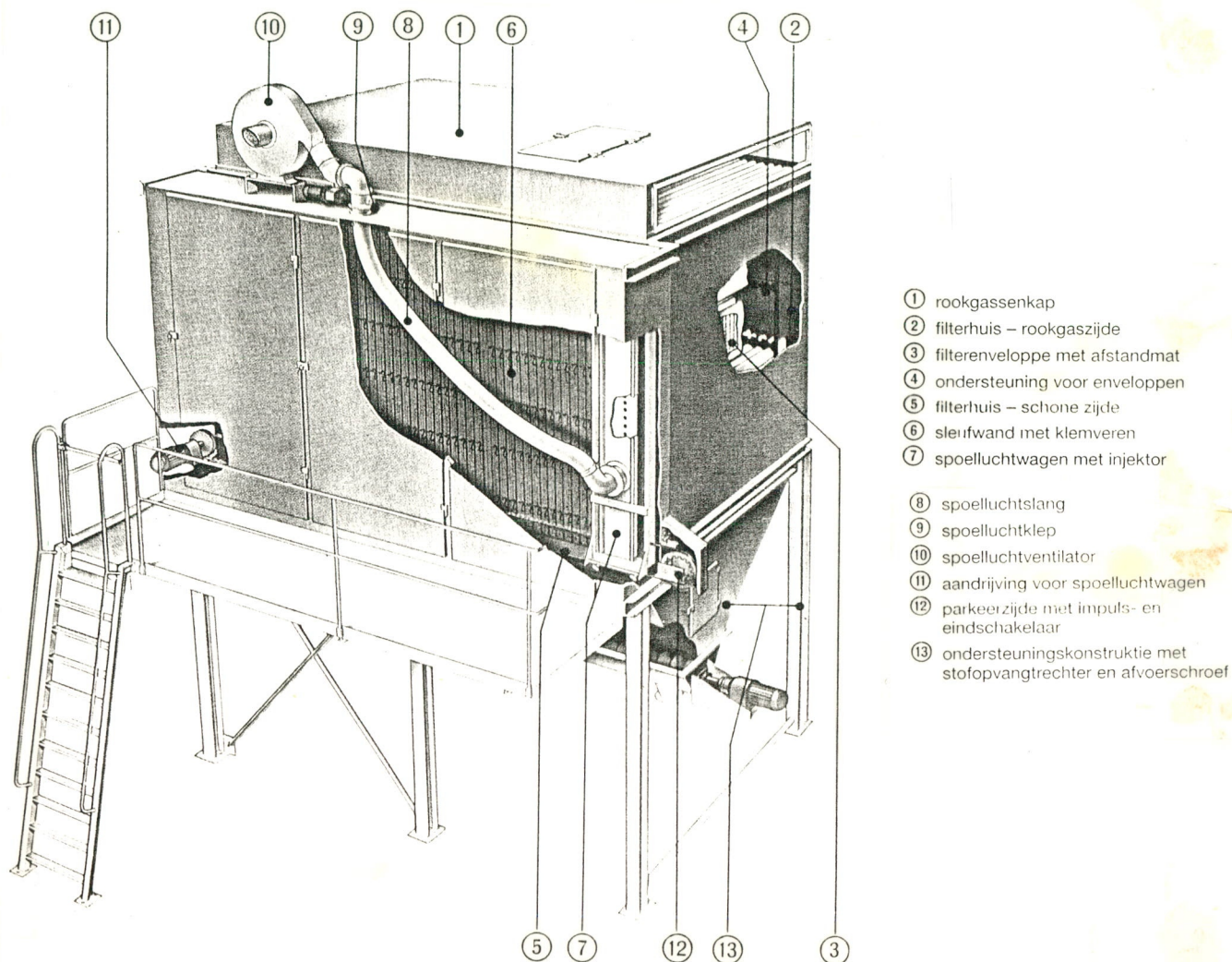
Nadelen

- Als nadeel geldt voornamelijk de gevoeligheid voor te hoge temperaturen en voor vonken. Om het filter tegen vonkinslag te beschermen wordt vaak een vonkenvanger stroomopwaarts van het filter toegepast.
- Geringe standtijd van de doeken (2 à 3 jaar).

Energieverbruik

De energiekosten zijn laag (0,2 tot 0,4 kWh per 1000 m³ gas). Het gaat daarbij om de energiekosten voor de ventilator, die de te reinigen gassen door het doek trekt, en eventueel om het persluchtsysteem voor de reiniging van het filter.

Doekfilters worden onderscheiden naar de vorm van het filterdoek in slangenfilters en enveloppenfilters. In figuur 3.11 is een voorbeeld van een enveloppenfilter weergegeven.



Figuur 3.11 Technische uitvoeringsvorm enveloppenfilter

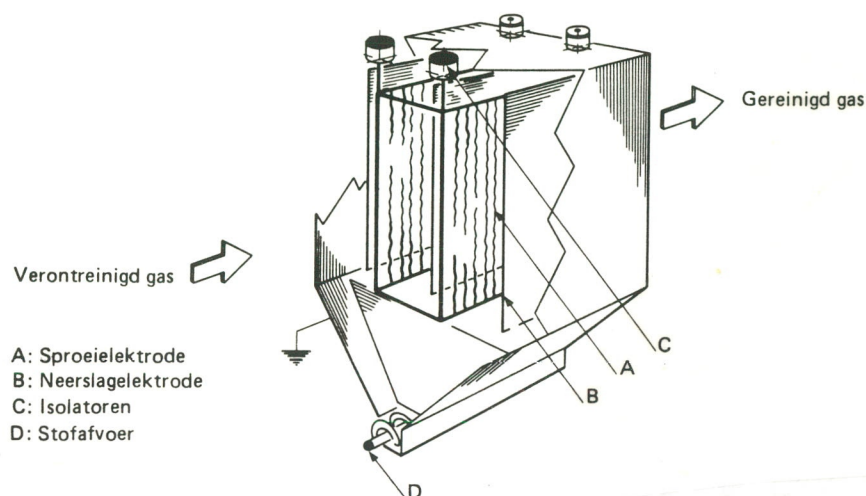
Elektrostatische afscheiders (figuur 3.12)

Het werkingsprincipe van de elektrostatische afscheider (ook wel elektrofilter of electrostatic precipitator genoemd), berust op het principe dat elektrisch geladen deeltjes in een elektrisch veld een kracht ondervinden, waardoor ze uit de gasstroom kunnen worden afgescheiden; ze worden op een elektrode neergeslagen en vervolgens afgevoerd. De werking is dus in een aantal fasen te onderscheiden:

- het laden van de deeltjes;
- het neerslaan van de deeltjes;
- de afvoer van de neergeslagen deeltjes.

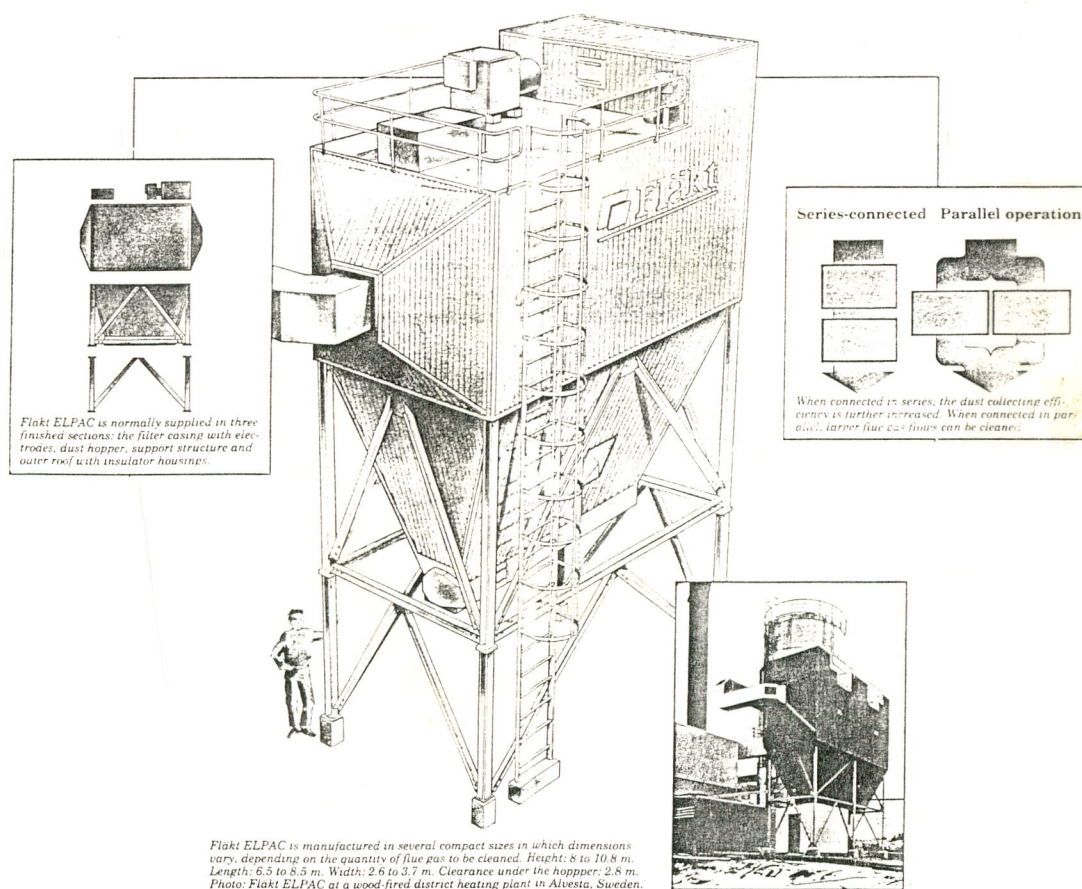
Het reinigen geschiedt door de neerslagelektroden periodiek in trilling te brengen, door een hamermechanisme of door een vibrator. De aangehechte stoflaag laat daardoor los van de elektroden en valt naar beneden via een trechter, in de container.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland



Figuur 3.12 Schema van een elektrostatische afscheider

ABB FLAKT Industrie heeft momenteel elektrofilters op de markt die geschikt zijn voor installaties met een vermogen tussen 1 en 10 MWth (figuur 3.13).



Figuur 3.13 Voorbeeld van een elektrofilter (Fläkt)

Voordelen

Enkele in het oog springende voordelen van een elektrostatische afscheider zijn:

- Hoog rendement (~95%);
- Bestandheid tegen hoge gastemperaturen (300 °C);
- Laag drukverlies in de gasstroom (0.2 tot 0.4 kPa).

Het rendement van een elektrostatisch filter is echter lager dan dat van een doekfilter. Een deeltjesconcentratie van circa 20 mg/m³ is onder standaardcondities haalbaar.

Nadelen

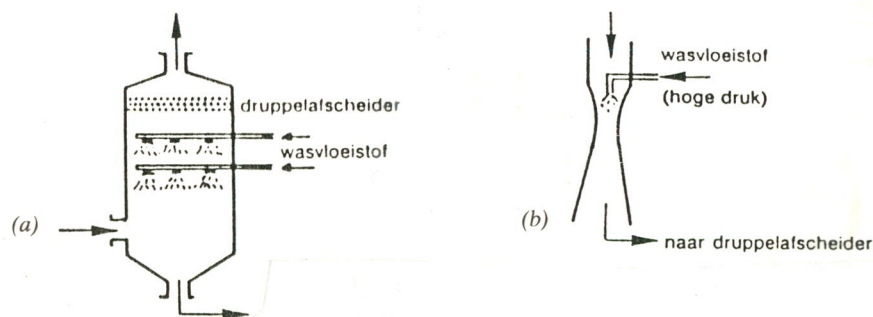
- Restemissie is sterk afhankelijk van het stofaanbod;
- Er is hoogspanning nodig; dit is vrij kostbaar (vooral de trafo).

Energieverbruik

Het energieverbruik is afhankelijk van de deeltjesgrootte van de verontreinigingen, de stofbelasting van het inkomend gas, de spanningen in en de afmetingen van het elektrofilter. Het energieverbruik ligt in dezelfde grootteorde als die van het doekfilter, namelijk 0.2 tot 0.4 kWh per 1000 m³ gas [8] (het drukverlies is lager dan bij het doekfilter, maar nu is elektrische energie nodig voor het opladen van het filter).

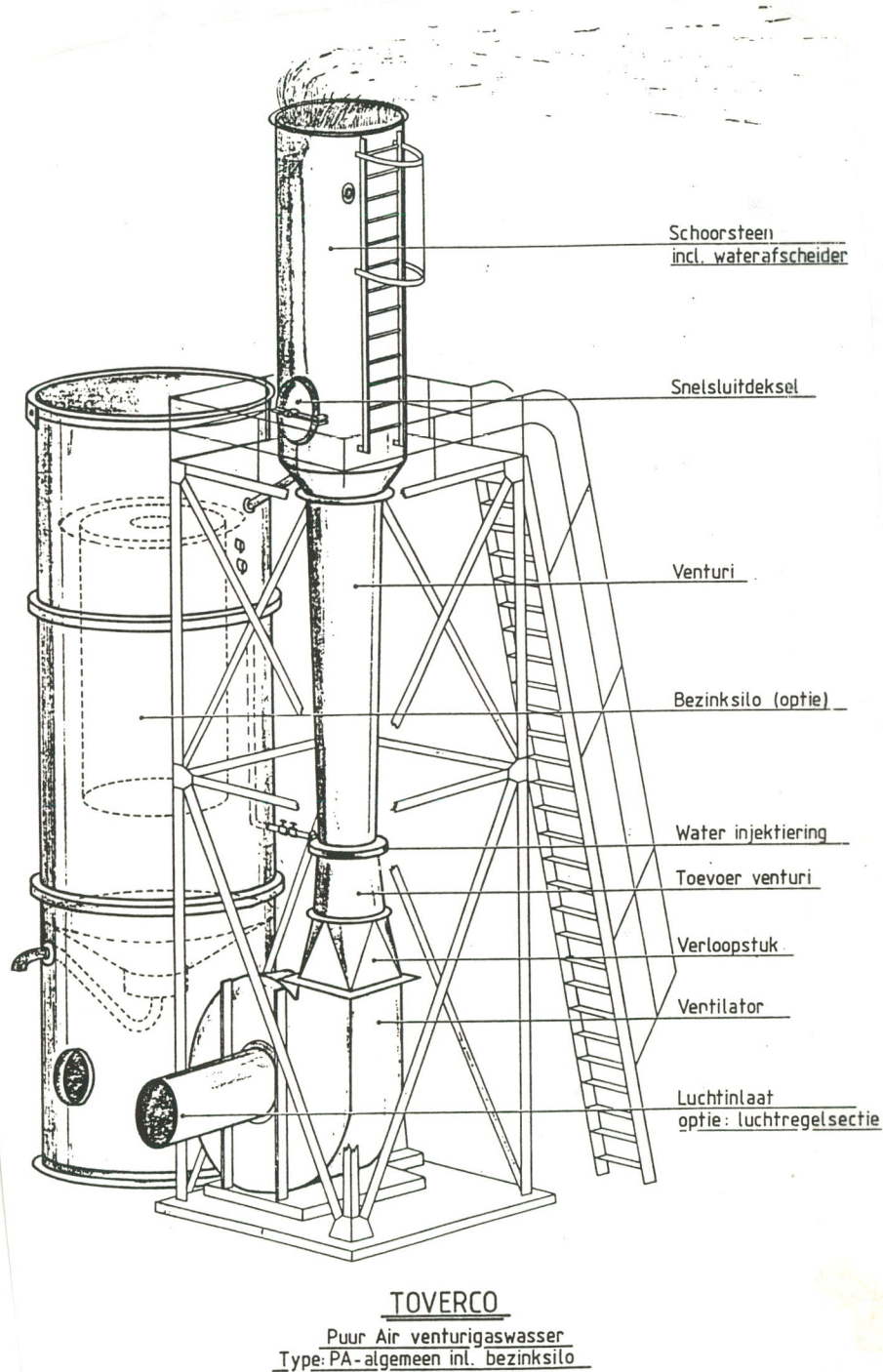
Natte stofvangers (figuur 3.14)

De natte stofvanger is een reinigingsinstallatie waarin een gasstroom in intensief contact wordt gebracht met een vloeistof met als doel, stofdeeltjes uit het gas naar de vloeistof te laten overgaan.



Figuur 3.14 Werkingsprincipe van een hogedruksproeier (a) en een venturiwasser (b)

Figuur 3.15 toont een industriële uitvoeringsvorm van een venturiwasser.



Figuur 3.15 Voorbeeld van een industriële venturiwasser (Toverco)

*Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland**Voordelen*

- De restemissie is instelbaar; naarmate meer stof wordt afgevangen zal de drukval groter worden. Bij een grotere drukval kunnen ook kleinere deeltjes worden afgevangen.
- Verontreinigde gasstromen met een hoge temperatuur kunnen gemakkelijk in natte stofvangers worden gekoeld en gereinigd.
- Bij natte stofvangers bestaat geen brandgevaar.
- De restemissie is $< 50 \text{ mg/m}^3$ onder standaardcondities voor hogedrukwassers, zoals bijvoorbeeld een venturiwasser.

Nadelen

- Hoog energieverbruik door het benodigde pompvermogen. Drukval ligt tussen 2 en 5 kPa (middendruk) en 5 tot 20 kPa (hogedruk).
- Het rendement van natte gaswassers is wat lager dan dat van doek- en elektrofilters en is afhankelijk van de drukval.
- Het luchtverontreinigingsprobleem wordt omgezet in een waterverontreinigingsprobleem. Er zullen soms aanzienlijke kosten moeten worden gemaakt voor water- en slibbehandeling, om het waswater milieuhygiënisch verantwoord te kunnen lozen. Dit is speciaal een nadeel, wanneer het afgescheiden stof geen restwaarde bezit.

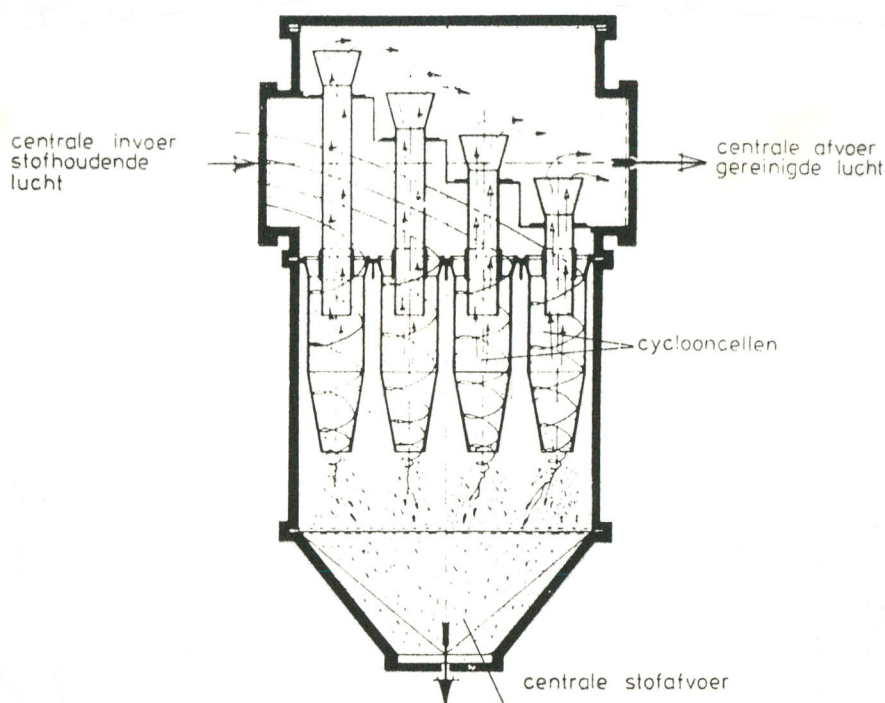
Energieverbruik

Voor hogedrukwassers is het energieverbruik hoog; het ligt tussen de 3 en 10 kWh per 1000 m³ behandeld gas [8].

Mechanische afscheiders (figuur 3.16)

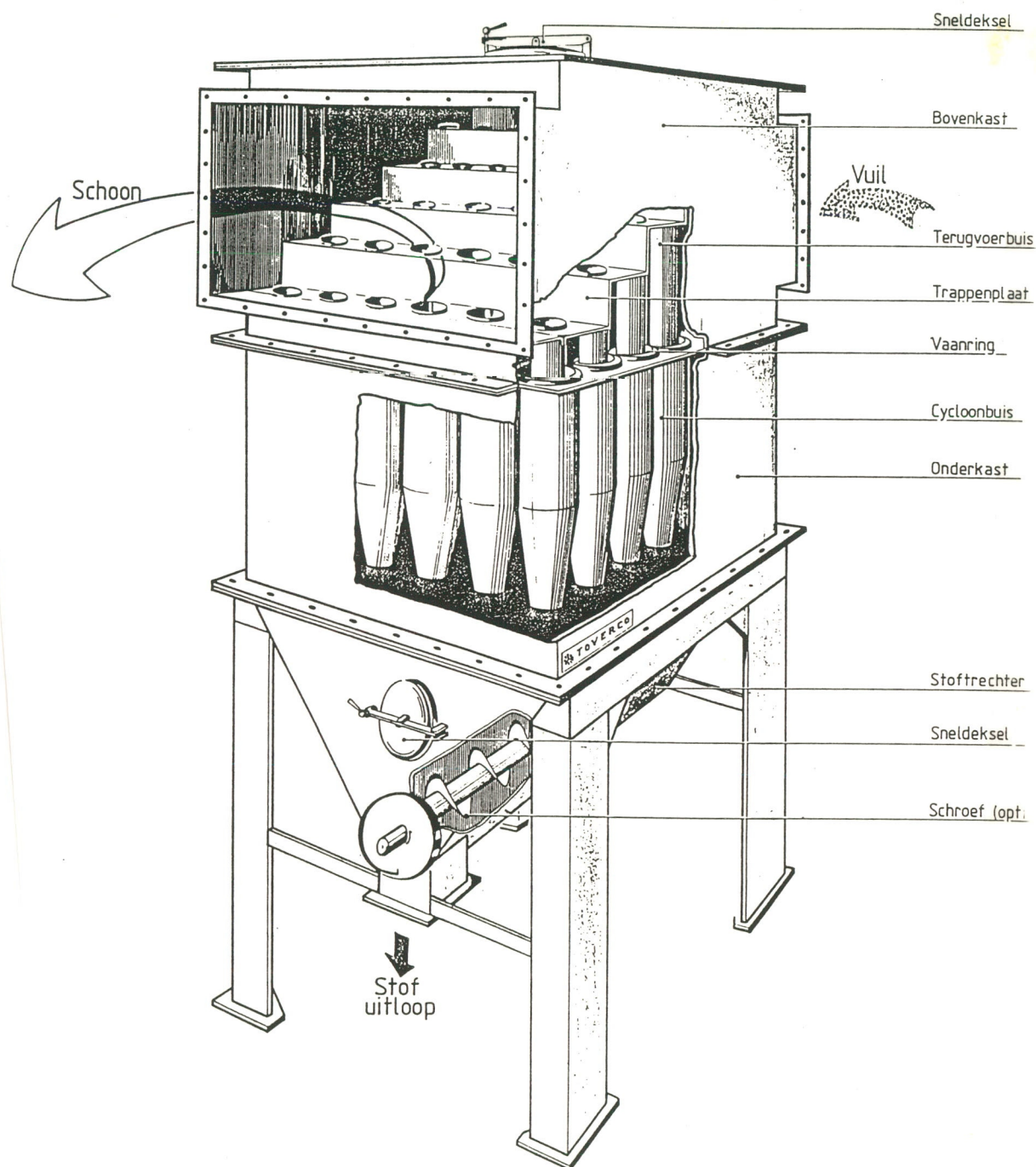
Van de mechanische afscheiders wordt de cycloon het meest toegepast. "Cycloon" is een verzamelnaam voor een bepaald type centrifugaalafscheider, waarbij de verontreinigde lucht van opzij (tangentiaal) danwel van boven (axiaal) in de afscheidingsruimte wordt gebracht. De intredende verontreinigende lucht wordt gedwongen om een snel ronddraaiende dubbele spiraalbeweging aan te nemen, een zogenaamde "double-vortex". De stofdeeltjes worden daardoor uit de gasstroom afgescheiden onder invloed van centrifugale krachten.

Bij een multicycloon vindt de afscheiding plaats door een aantal parallel geschakelde kleine cycloontjes, waardoor een hoger stofvangstrendement wordt bereikt.



Figuur 3.16 Werkingsprincipe van een multicycloon

Figuur 3.17 geeft een voorbeeld van een multicycloon van Toverco.



TOVERCO
 Multicycloon droge ontstopping
 Type: MC-algemeen met uitvoerschroef

Figuur 3.17 Voorbeeld van een multicycloon (Toverco)

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Voordelen

- Lage drukval (1 tot 3 kPa voor een multicycloon);
- Grote bedrijfszekerheid;
- Hoge toelaatbare temperaturen;
- Compacte bouw;
- Lage aanschaf- en bedrijfskosten.

Nadelen

- Het rendement is sterk afhankelijk van het aanbod aan stof.
- Constante afgascondities zijn noodzakelijk voor een goede verwijdering.
- De restemissie is hoog; hij ligt onder standaardcondities in de ordegrootte van 100 tot 150 mg/m³.

Energieverbruik

Het energieverbruik is laag, en wordt hoofdzakelijk bepaald door de afzuigventilator (circa 0,2 kWh per 1000 m³ behandeld gas).

4 Verbranding van schoon houtafval (huidige situatie)

Ten behoeve van het inventariseren van het in Nederland geïnstalleerde vermogen zijn contacten gelegd met fabrikanten van verbrandingsinstallaties in binnen- en buitenland. De door de fabrikanten verstrekte gegevens zijn aangevuld met informatie uit de databestanden van het project emissieregistratie, derde ronde.

De installaties die in Nederland zijn geïnstalleerd beginnen bij 20 kWth. Toestellen voor huishoudelijke verwarmingsdoeleinden vallen buiten deze studie.

4.1 Verbrandingsinstallaties in Nederland

De voor Nederland belangrijkste leveranciers van houtgestookte verbrandingsinstallaties zijn:

- **Reinders Almelo Groep/KARA engineering (Nederland);**
- **Vyncke N.V. (België);**
- **Wirtschaftliche Verbrennungs-Technik (WVT Duitsland);**
- **PASSAT (Denemarken);**
- **Weiss (niet meer op de Nederlandse markt na 1985);**
- **Nolting (Duitsland);**
- **Heizomat (Duitsland).**

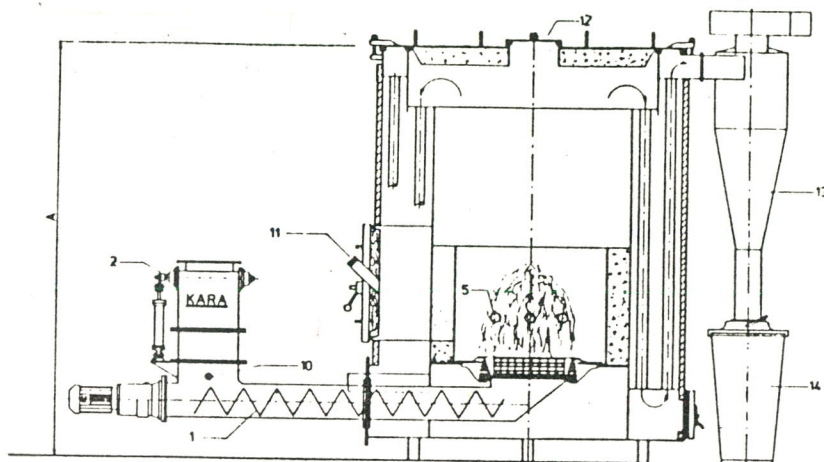
Incidenteel komen ook merken als Conus, DSV, Spanix, en MBK voor.

De Reinders Almelo groep

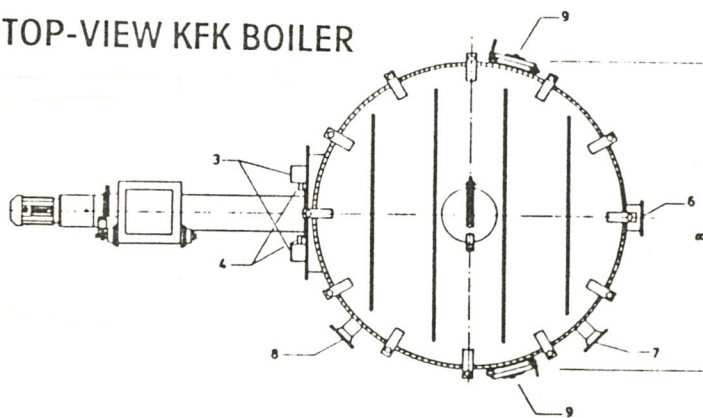
De Reinders Almelo groep, bestaande uit Reinders Lucht- en Milieutechniek en Kara Engineering, heeft in Nederland 43 met schoon hout gestookte verbrandingsinstallaties geplaatst. Het geïnstalleerd vermogen van KARA verbrandingsinstallaties bedraagt 49 MWth.

Van het geïnstalleerde vermogen bestaat voor 80% (35 stuks) uit onderschroef installaties (figuur 4.1). De overige betreffen inblaassystemen (8 stuks).

A. CROSS-SECTION KFK BOILER



B. TOP-VIEW KFK BOILER



1. stoker screw
2. fire valve
3. primary air inlet
4. secondary air inlet
5. secondary air inlets
6. flue gas outlet
7. water supply
8. water return
9. ash door
10. sprinkler connection
11. inspection hatch
12. explosion valve and connection
13. flue gas cleaning filter
14. ash bucket

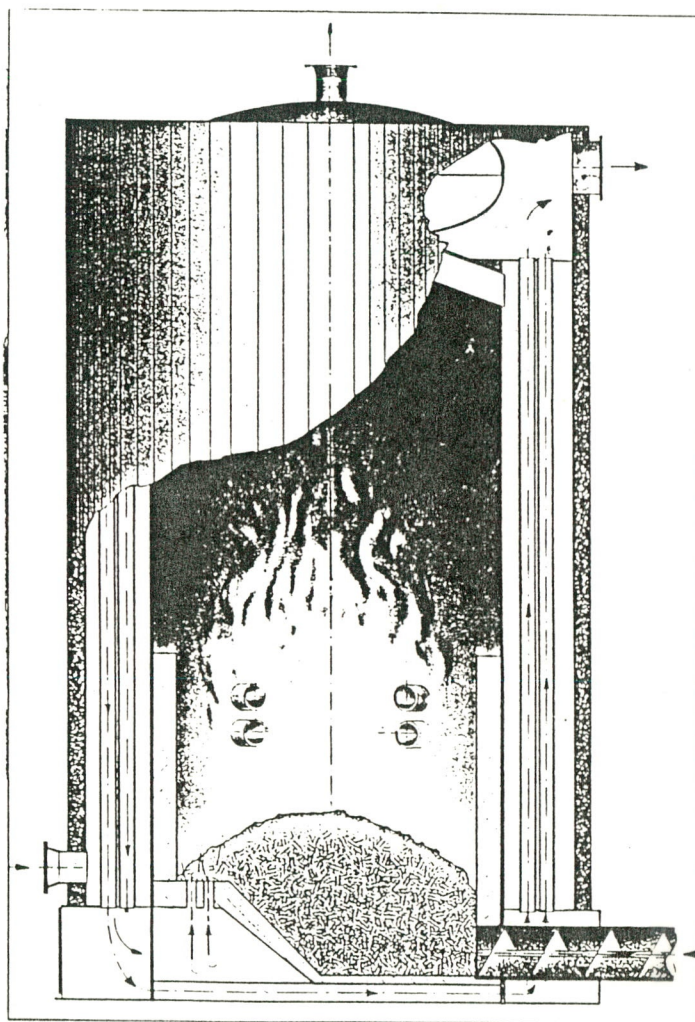
Figuur 4.1 Een KARA-verbrandingsinstallatie, gebaseerd op het onderschroefprincipe

*Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland**Vyncke B.V.*

Door Vyncke B.V., gevestigd te België, zijn in Nederland 8 verbrandingsinstallaties geïnstalleerd die met schoon hout worden gestookt. Het geïnstalleerde vermogen daarvan bedraagt 15 MWth.

De installaties die in Nederland staan opgesteld zijn eveneens van het onderschroeftype (figuur 4.2).

Vyncke levert installaties tot vermogens van 30 MWth; indien gewenst ook hoger.



Figuur 4.2 Schets van een Vyncke-installatie, gebaseerd op het onderschroefstelsel

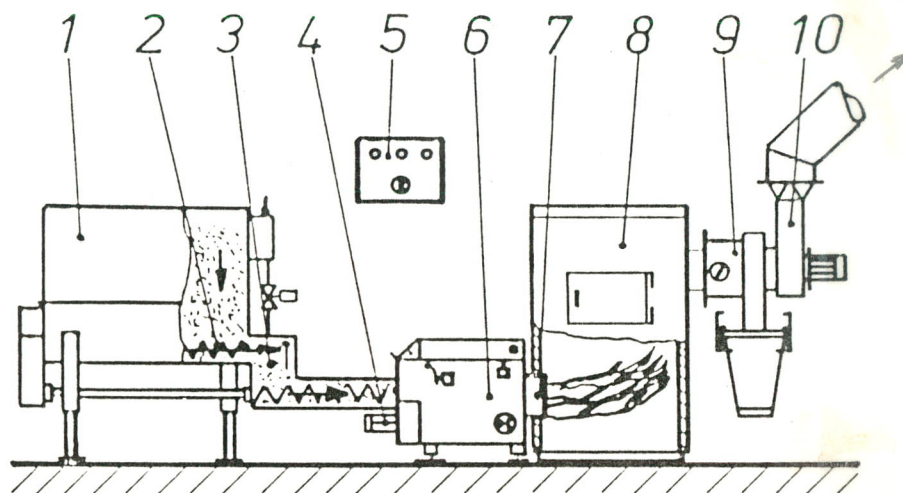
*Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland**Wirtschaftliche Verbrennungs-Technik*

Wirtschaftliche Verbrennungs-Technik (WVT Duitsland) heeft in Nederland 11 verbrandingsinstallaties die met schoon hout worden gestookt. Het geïnstalleerd vermogen bedraagt 10 MWth.

De installaties werken alle volgens het tweetraps verbrandingsprincipe; andere verbrandingssysteem worden door de fabriek niet geleverd. Vermogens tot 10 MWth kunnen door WVT worden geleverd. Figuur 4.3 toont een Bioflamm verbrandingsinstallatie van WVT.

Verklaring

- 1 Voorraadsilo
- 2 Roerwerk met uitschroefing
- 3 Valkast met terugbrand-beveiliging en bluswatertankje
- 4 Verbrandingslucht-ventilator(en)
- 5 Schakelkast
- 6 Pyrolysekamer
- 7 Vlamhuis
- 8 Ketel (warmtewisselaar)
- 9 Ontstopping met stofzuiger
- 10 Rookgasventilator



Figuur 4.3 De Bioflamm houtverbrandingsinstallatie van WVT

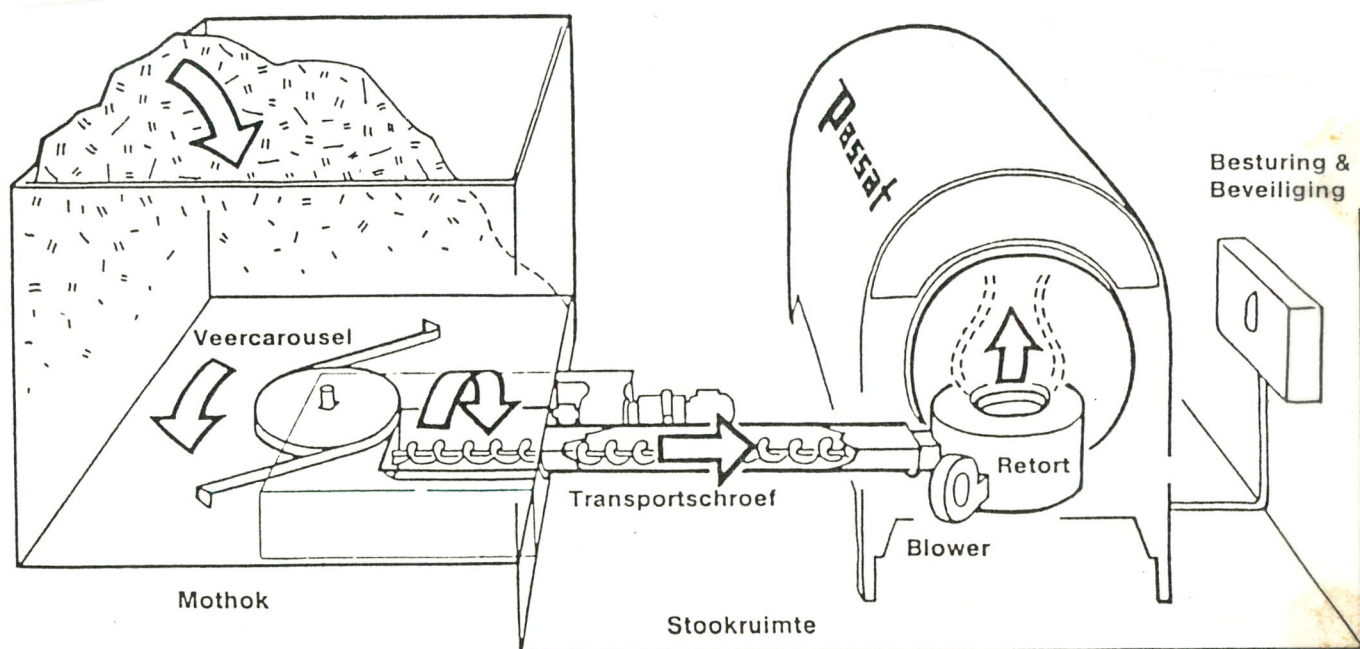
*Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland***PASSAT**

De Passat verbrandingsinstallatie is van Deense makelij; zij wordt in Nederland vertegenwoordigd door Stienstra B.V. De in Nederland geïnstalleerde verbrandingsinstallaties zijn van een relatief laag vermogen (15 tot 150 kWth). Van de 520 geïnstalleerde installaties betreft het overgrote deel (circa 500) handgestookte typen, met een statisch rooster, die meestal staan opgesteld bij eenmansbedrijfjes, of in huishoudens waar geen gasvoorziening is.

Verder zijn er nog enkele grotere, automatisch gevoede onderschroefstokers. Deze liggen qua vermogen in de ordegrootte van 100 kWth; zij zijn voorzien van een cycloon of multicycloon.

Het geïnstalleerde vermogen van Passat installaties bedraagt 29 MWth.

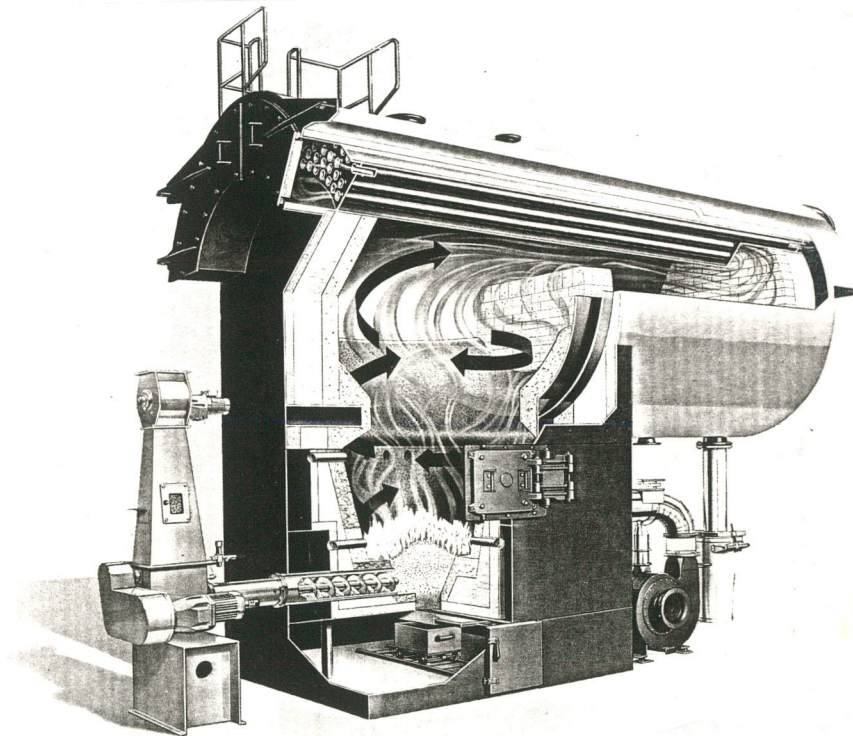
Het werkingsprincipe van zo'n grotere onderschroefstoker is in figuur 4.4 weergegeven.



Figuur 4.4 De Passat onderschroefverbrandingsinstallatie voor schoon afvalhout

*Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland***WEISS**

Door de Duitse firma Weiss, Kessel- Anlagen- und Maschinenbau GmbH is medegedeeld dat circa 30 verbrandingsinstallaties in Nederland staan opgesteld. Weiss opereert momenteel niet actief op de Nederlandse markt. Van voornoemde installaties zijn 13 achterhaald; 12 daarvan zijn van vóór 1975. De meest recente betrof een installatie van 1985. De kans is groot dat van de genoemde 30 installaties een aantal vervangen zijn of niet meer bestaan. Bij de 13 achterhaalde installaties ging het in alle gevallen om de verbranding van schoon hout. Het geïnstalleerd vermogen bedraagt 26 MWth. 5 installaties zijn uitgevoerd met een inblaas/schuinrooster verbrandingssysteem en 8 voor inblaas/vlakrooster verbranding. De combinatie van inblazen met een schuin of vlak rooster geeft de mogelijkheid ook grotere stukken hout te verbranden. Weiss behoort tot een van de grotere leveranciers van verbrandingsinstallaties en kan installaties leveren tot boven de 50 MWth. Figuur 4.5 toont een Weiss verbrandingsinstallatie volgens het onderschroefprincipe.



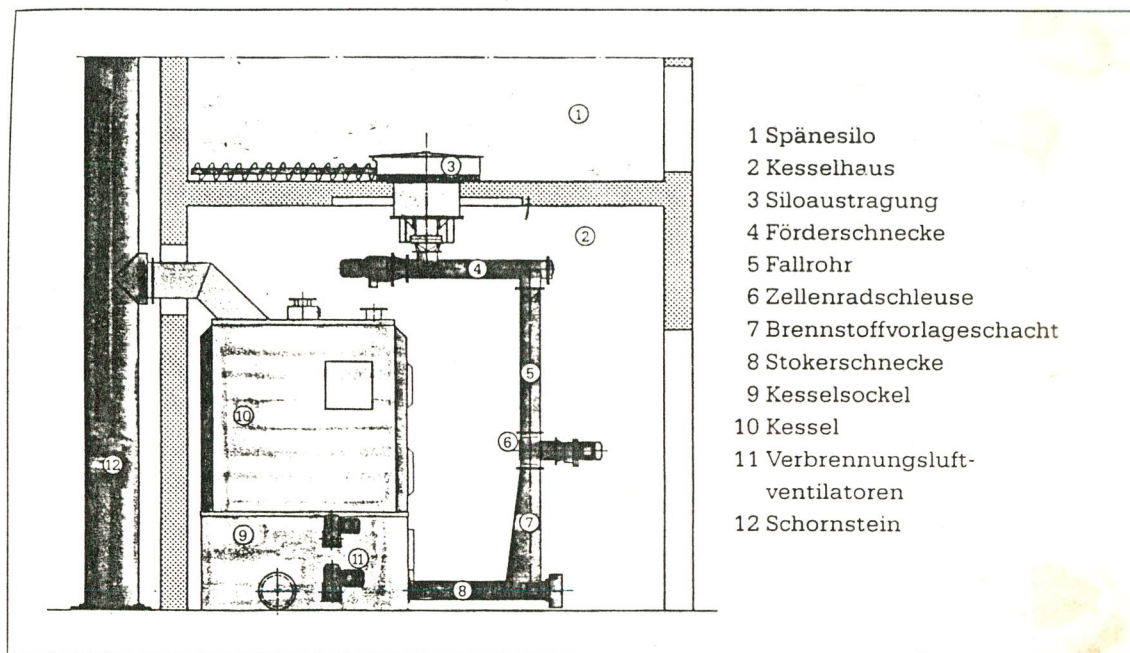
Figuur 4.5 Schets van een Weiss verbrandingsinstallatie, werkend volgens het onderschroefprincipe

*Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland***NOLTING**

Van Nolting Feurungs-Technik GmbH, Duitsland, is bericht ontvangen dat 150 installaties, in vermogen variërend tussen 233 kWth en 1 MWth, in Nederland in bedrijf zijn. Een referentielijst is door Nolting niet afgegeven.

Van deze installaties zijn er circa 30 installaties handbediend; de resterende 120 installaties zijn automatisch gestookte onderschroefstokers. Door Nolting is opgegeven dat circa 90 installaties in het vermogensbereik van 233 tot 466 kWth liggen; de overige 60 installaties liggen in het bereik van 466 kWth tot 1 MWth. In alle gevallen gaat het om de verbranding van schoon hout.

Figuur 4.6 toont een Nolting installatie.

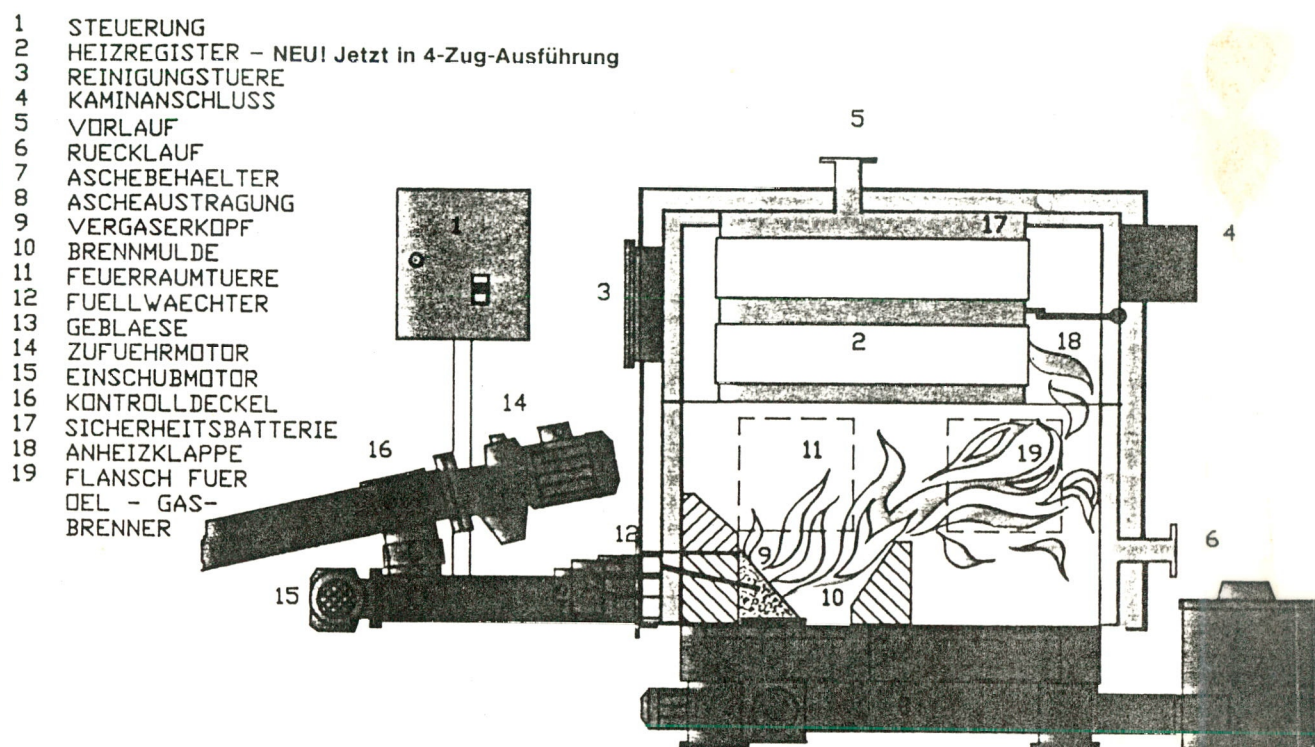


Figuur 4.6 Schets van een Nolting onderschroefinstallatie

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

HEIZOMAT

Het Duitse bedrijf HEIZOMAT GmbH, Gunzenhausen, wordt in Nederland vertegenwoordigd door TUBRO Filter- en Luchttechniek, Enschede. Momenteel zijn er 12 installaties in Nederland geïnstalleerd met een totaal vermogen van 2,25 MWth. In alle gevallen gaat het om het stoken van schoon houtafval in een doorschroefstoker. De installaties worden volautomatisch bedreven. Zie figuur 4.7.



Figuur 4.7 Schets van een Heizomat doorschroefstoker

Overige installaties

Naast de voornoemde installaties voor het verbranden van schoon afvalhout zijn er nog enkele, die in Nederland minder gangbaar zijn. Dit zijn alle onderschroefstokers, en wel van

— Justsen, Denemarken	— 5 stuks, totaal 8,5 MWth	
— DSV	— 1 stuks	} totaal 6 MWth
— Lambion	— 1 stuks	
— Conus	— 1 stuks	
— DSV	— 1 stuks	
— Spanix	— 1 stuks	

Derde ronde emissieregistratie (ER 3)

Zoals reeds eerder is vermeld, is bij de inventarisatie gebruik waar mogelijk gemaakt van referentielijsten die beschikbaar zijn gesteld door de leveranciers. Aan de hand daarvan kon worden nagegaan of de betreffende installaties reeds voor-

kwamen in de databestanden van de emissieregistratie derde ronde (ER 3). Na verificatie, met behulp van bekende plaatsnamen en soort bedrijf, zijn 14 installaties toegevoegd aan de inventarisatielijst, met een vermogen tussen 0,5 en 10 MWth. Het totale geïnstalleerde vermogen daarvan bedraagt 35 MWth.

De inventarisatielijst is verder aangevuld met de installaties die in de databestanden van ER 3 staan vermeld en voorkomen in de metaal- en de voedings- en genotmiddelenindustrie. Dit betreffen vooral installaties met lage vermogens; in totaal 121, tussen 30 en 60 kWth, met een gezamenlijk vermogen van 5 MWth. Daarbij kon niet worden vastgesteld om wat voor soort installaties en fabrikaat het ging.

Uit de voorgaande informatie blijkt dat in Nederland zes verschillende verbrandingsprincipes worden toegepast, en wel in de volgende aantallen:

— Statisch rooster	:	530;
— Inblaas/schuinrooster	:	8;
— Inblaas vlakrooster	:	13;
— Onderschroef	:	185;
— Doorschroef	:	20;
— Tweetraps verbranding	:	11.

(De typen installaties van ER 3 zijn onbekend en worden daarom niet in bovenstaande lijst vermeld).

Installaties werkend volgens het wervelbedprincipe, het moffelinblaasprincipe en zogenaamde tunnelbranders komen in Nederland niet voor.

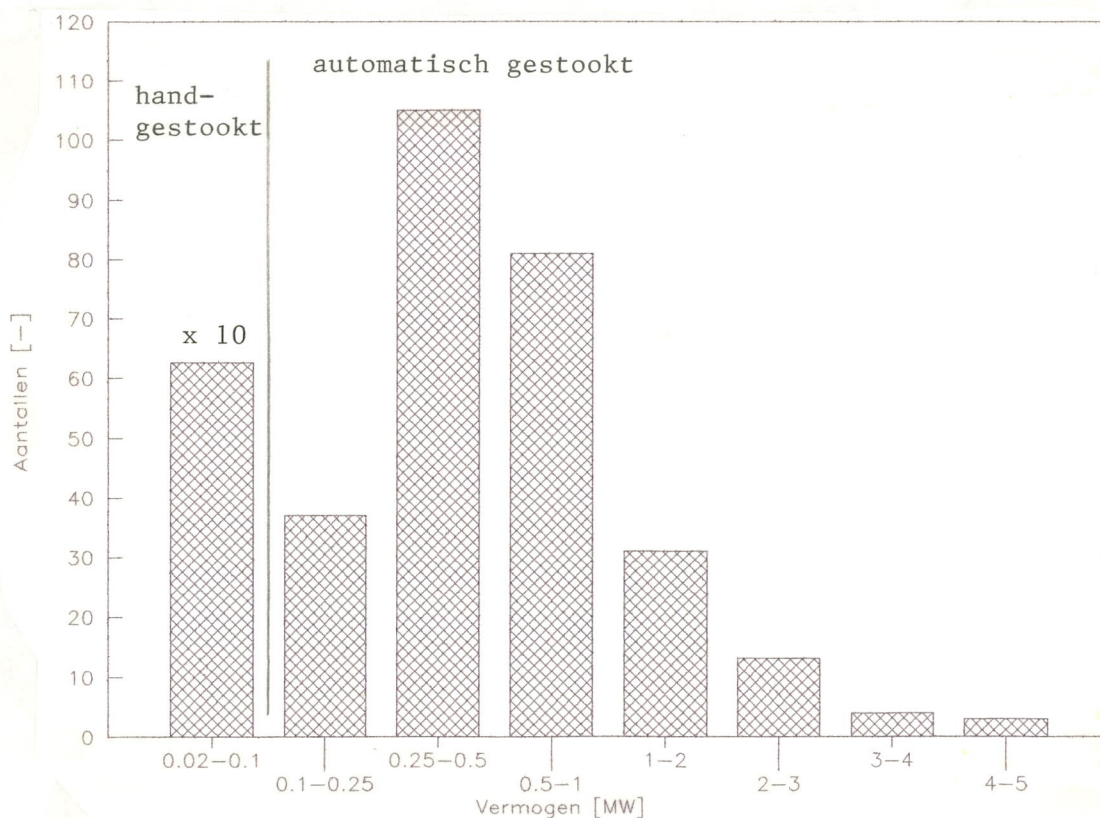
4.2 Totaal geïnstalleerd industrieel vermogen

In tabel 4.1 is samengevat in welke vermogensrange de industriële installaties voorkomen, en ook het aantal installaties en het geïnstalleerde vermogen per merk; in figuur 4.8 is de vermogensverdeling in een staafdiagram weergegeven.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Tabel 4.1 Aantallen en geïnstalleerde vermogens van de industriële verbrandingsinstallaties voor schoon hout

Range: [MWth]	Fabrikanten										
	Reinders	Vyncke	WVT	Weiss	Justsen	Passat	Heizomat	Nolting	ER 3	Overige	Totaal
0.02 - 0.1						500	3		123		626
0.1 - 0.25	7	-	4	-	-	20	6			-	37
0.25 - 0.5	9	-	1	-	-	-	3	90	2	-	105
0.5 - 1	9	1	5	2	1	-		60		3	81
1 - 2	10	6	1	7	2	-			4	1	31
2 - 3	6	-	-	1	2	-			3	1	13
3 - 4	2		-	1	-	-			1	-	4
4 - 5	-	1	-	2	-	-				-	3
Totaal	43	8	11	13	5	520	12	150	133	5	900
Geïnstalleerd vermogen [MWth]	49	15	10	26	8.5	29	2.25	~50	22	6	218



Figuur 4.8 Vermogensindeling van de in Nederland geïnstalleerde installaties

Om te berekenen hoeveel PJ het totale vermogen van 218 MWth uit tabel 4.1 vertegenwoordigt, moet onder andere het aantal bedrijfsuren bekend zijn. Gedetailleerde gegevens hierover ontbreken. Op basis van schattingen van fabrikanten wordt aangenomen dat gemiddeld circa 3000 bedrijfsuren per jaar aan vollast-equivalenten (actuele uren omgerekend naar vollasturen) wordt gestookt. Dit leidt tot een totale energieopbrengst van 2,36 PJ/jr aan hout. Stellen we het gemiddelde installatierendement op 75%, dan betekent dit een beschikbare hoeveelheid warmte van 1,77 PJ/jr. Gaat men uit van een calorische waarde van hout van 16 MJ/kg, dan betekent dit een hoeveelheid hout van 0,148 Mton/jr (namelijk de post "industriële verbranding; schoon" in tabel 2.2).

4.3 Toegepaste rookgasreiniging

In tabel 4.2 is een overzicht gegeven van de toegepaste rookgasreinigingstechnieken. Deze tabel is tot stand gekomen op basis van de door de fabrikanten verstrekte informatie. Het blijkt, dat 21 installaties zijn voorzien van een cycloon en 56 van een multicycloon. Er is één doekfilter toegepast; 539 installaties zijn niet voorzien van enige rookgasreinigingsinstallatie. Elektrofilters komen, voor zover kon worden nagegaan, niet voor. Van bijna 300 installaties is onbekend of zij met een rookgasreiniging zijn uitgerust.

Vooraf toestellen in de lage vermogensrange zijn niet voorzien van enige rookgasreiniging. Het vermoeden bestaat echter dat juist in deze vermogensklasse (20 tot 100 kWth) rekening moet worden gehouden met hoge emissieconcentraties, met name voor wat betreft stof (zie hoofdstuk 4.6). Toepassing van een katalysator (met een edelmetaal gecoat keramisch materiaal) zou hier kunnen leiden tot vermindering van de meeste bij hout voorkomende emissies (de mate waarin de emissies op deze wijze worden verlaagd dient nog te worden onderzocht).

Tabel 4.2 Overzicht van de toegepaste typen rookgasreiniging

Merk	Cycloon	Multi-cycloon	Doekfilter	E filter	Geen
KARA-Reinders	12	25	1		5
Vyncke		8			
WVT	5	6			
Weiss	2	10			1
Justsen	2	3			
Passat					520
Heizomat					12
Nolting	onbekend				
Overig		4			1
Totaal	21	56	1	-	539

4.4 Toepassingsgebieden

De installaties in de vermogensklasse boven de 100 kWth komen voor in de hout/meubelbranche, tuinderijen en voedingsmiddelenindustrie. Aan de hand van de referentielijsten van Reinders, Vyncke, Weiss en WVT kan voor wat betreft de toepassingsgebieden het volgende overzicht worden gegeven:

- 7 installaties voor hoge druk stoom;
- 8 installaties voor lage druk stoom;
- 121 installaties voor rokerijen in de voedingsindustrie;
- 101 installaties voor warm water, waarvan,
 - 15 voor droogdoeleinden;
 - 61 voor verwarmingsdoeleinden;
 - 25 voor tapwater.

De installaties in de lage vermogensrange (< 100 kWth) die door Passat zijn geplaatst, staan ondermeer opgesteld bij particulieren voor aanmaak van warm water, maar komen ook veel voor bij éénmans timmerbedrijfjes en kleine houtverwerkende industriën zoals klompenmakerijen, schoenen- en sandalenfabrikanten, tuinderijen en hoveniers. Het doel van deze installaties is over het algemeen het vernietigen van het houtafval, met benutting van de vrijgekomen warmte in de wintermaanden.

4.5 Brandstofdosering en -voorbehandeling

4.5.1 Brandstofdosering

Bij automatisch gestookte verbrandingsinstallaties dient men, behalve in de verbrandingsinstallatie, ook nog te investeren in een silo voor de opslag van de brandstof, en in een brandstofdoseerinrichting voor het uitschroeven van de daarin opgeslagen brandstof. De meeste leveranciers van verbrandingsinstallaties hebben een dergelijk pakket van systeemcomponenten in hun programma. Schematisch wordt in figuur 4.9 [LAMBION-GmbH] weergegeven welke systemen kunnen worden toegepast om brandstof in zijn verschillende vormen te transporteren.

In Nederland komen onderschroef- en doorschroefinstallaties het meeste voor. Wat betreft de brandstofdosering wijken deze niet veel van elkaar af. Figuur 4.11 3.6, 4.1, 4.2 en 4.4 tonen installaties werkend volgens het onderschroefprincipe, inclusief de opslag- en doseerapparatuur voor het hout.

4.5.2 Voorbehandeling

Wanneer hout in de vorm waarin het wordt aangevoerd, of vrijkomt, ongeschikt is om direct te worden verbrand, dient het een voorbehandeling te ondergaan. Die voorbehandeling kan bestaan uit drogen, verkleinen en briketteren, respectievelijk uit combinaties daarvan.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

In figuur 4.12 worden enkele vormen van voor verbranding bewerkt afvalhout getoond.



Figuur 4.12 Enkele vormen van voor verbranding bewerkte biomassa

4.6 Emissies

Door TNO zijn emissiemetingen verricht aan een aantal houtgestookte installaties, met vermogens tussen 1 en 3 MWth. De resultaten van deze praktijkmetingen zijn samengevat in tabel 4.3. Hiermee wordt een beeld gegeven van de emissies die verwacht kunnen worden uit de huidige conventionele installaties. In de tabel is onderscheid gemaakt tussen handgestookte installaties (meting 1 tot en met 3) en automatisch gestookte (meting 4 tot en met 12). Wat opvalt is het hoge CO gehalte van meting 7 en 12. Dit wordt veroorzaakt door de slechte voorbehandeling van het hout (te grote stukken). De slechte verbranding van meting 1 ($\text{CO} = 11000 \text{ mg/m}^3 \text{ ind}$) wordt veroorzaakt door het hoge vochtgehalte van de brandstof (50%) en het door het feit dat de verbrandingsinstallatie niet is ingericht voor dit soort brandstoffen.

De stofconcentraties van meting 4, 7 en 11 uit tabel 4.3 zijn aanmerkelijk lager dan die van de andere metingen. Van meting 4 is het volgende bekend: In eerste instantie bedroeg de stofconcentratie $228 \text{ mg/m}^3 \text{ ind}$. Na stevig kloppen op de multicycloon bleek de concentratie nog slechts $78 \text{ mg/m}^3 \text{ ind}$. te bedragen. Dit is een verhoging van het vangstrendement met 35%. Waarschijnlijk was er brugvorming ontstaan, waardoor de in- en uitgaande afgasstromen gedeeltelijk werden kortgesloten. Deze ervaring geeft aan dat de constructie van multicyclonen, vermoedelijk in meer gevallen, nog voor verbetering vatbaar is. Voor de lage stofconcentraties in metingen 7 en 11 kan geen plausibele verklaring worden gegeven.

Uit tabel 4.3 kan verder worden afgeleid, dat de installaties meestal gestookt worden met een luchtvermaat van 2 à 2,5; dit betekent dat voldoende verbrandingslucht werd toegevoerd. Van cruciaal belang is echter ook, of dit op de juiste plaatsen en in de juiste verhouding heeft plaatsgevonden.

Voor automatisch gestookte installaties blijkt dat de CO concentraties variëren tussen 56 en 1425 mg/m^3 , de C_xH_y concentraties tussen 1 en 585 mg/m^3 en de stofconcentraties tussen 78 en 349 mg/m^3 (alleen met cycloon). Het bijzonder lage NO_x gehalte uit meting 5 niet meegerekend, varieert de NO_x concentratie tussen 97 en 249 mg/m^3 . Aangezien het om verschillende installaties en vermogens gaat, is een vergelijking moeilijk te maken. In een enkel geval is aan te tonen wat de oorzaak van de hoge emissies is (meting 7 en 12).

Om de oorzaak te vinden van de lage emissies die bij een aantal andere metingen werden geconstateerd, is verdergaande studie nodig. Het vermoeden bestaat dat ook bij "oudere" installaties ook nu reeds procesomstandigheden voorkomen die de emissies gunstig beïnvloeden.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Tabel 4.3 Gemiddelde emissies van een aantal installaties voor het verbranding van schoon hout in Nederland (gecorrigeerd naar 11% O₂ behalve bij CO₂)

Meting	CO ₂	CO	C _x H _y	NO _x	Stof	λ ¹⁾	Brandstof ⁴⁾	Type ⁵⁾	Vochtgehalte brandstof	Rookgas-reiniging	Rookg. zijdig rend.	Lit.
	[%]	[mg/m ³ ind. ³⁾]				[-]			[%]	[-]	[%]	
Handgestookt												
1	7	10913	1756	201	503	2.8	2	OSB	50	cycloon	60	[20]
2	8	3011	514	94	809	2.7	2	OSB	11	cycloon	67	[21]
3	5	2545	245	217	—	4.6	4	OS	11	cycloon	84	[22]
Automatisch gestookt												
4	10	370	29	99	78	2.0	1	OS	26	cycloon	91	[23]
5	12	420	1	2	230	2.8	1	OS	11	cycloon	79	[14]
5a	9	525	1	200	160	2.2	1	OS	11	cycloon	82	[14]
6	4	144	2	—	—	5.6	5	OS	11	cycloon	75	[2]
7	9	1425	— ²⁾	97	84	2.4	1	OS	25	cycloon	68	[9]
8	12	249	18	249	111	1.8	1	TV	11	cycloon	84	[25]
9	10	294	10	226	129	2.1	1	TV	11	cycloon	81	[25]
10	8	56	63	—	—	2.8	1	TV	11	geen	80	[26]
10a	9	140	50	186	—	2.3	1	TV	11	geen	—	[26]
11	10	175	2	—	64	2.1	1	TV	11	geen	—	[26]
12	13	3727	585	130	349	1.6	3	OSB	11	cycloon	—	[20]

1) λ = luchtvermaat

4) 1 = spaanders

5) OS = onderschroef

2) — = niet gemeten

2 = grof hout

TV = tweetrapsverbranding

3 = mot

OSB = onderschroef met bovenlader

4 = multiplex

5 = hout/isolatiemateriaal

3) ind. = in normaal droog (273,15 K, 101,3 kPa)

Door ETH, Zürich, Zwitserland zijn aan 11 installaties emissiemetingen uitgevoerd [16]. De resultaten, zoals in tabel 4.4 weergegeven, betreffen de gemiddelde waarden van vol- en deellastmetingen.

De keuze van de brandstof (ook de vochtigheid) is op aanwijzing van de installatieontwerper, danwel van de gebruiker tot stand gekomen.

De experimenten 1 tot en met 6 betreffen handgestookte kachels met vermogens tussen 15 en 30 kWth. De experimenten 7 tot en met 11 betreffen automatisch gestookte installaties met vermogens tussen 116 en 600 kWth.

Vooraf deze hogere vermogens zijn van belang om een indruk te krijgen van het emissieniveau van houtgestookte installaties zoals die in Zwitserland worden gebruikt. In hoofdstuk 5 wordt schematisch de constructie van enkele ovens uit deze laatste categorie weergegeven.

Uit tabel 4.4 blijkt dat de emissies, met name die van CO, hoog zijn. Dit is niet alleen te wijten aan het vochtgehalte maar ook aan het ontwerp van de installatie, zoals uit [16] kan worden opgemaakt. Meting 10, met een CO concentratie van 325 mg/m³ind. springt er ten opzichte van de andere metingen in positieve zin uit. De betreffende installatie is voorzien van een met (schamotte) vuurvast materiaal beklede verbrandingsruimte.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Opmerkelijk is dat de stofemissies van de handbediende kachels over het algemeen laag zijn.

Een verklaring daarvoor zou kunnen zijn dat met blokken wordt gestookt waardoor minder stof zou kunnen vrijkomen.

De Zwitserse meetresultaten laten zien dat, met uitzondering van stof en NO_x , handgestookte installaties over het algemeen hogere emissies vertonen. Mede vanwege het geringe aantal gegevens omtrent handgestookte installaties is deze uitspraak echter verre van "hard".

Tabel 4.4 Gemiddelde emissies van verbrandingsinstallaties voor schoon hout in Zwitserland (gecorrigeerd naar 11% O_2) (ETH, Zürich, [16])

Meting	CO ₂	CO	C _x H _y	NO _x	Stof	λ ¹⁾	Brandstof ³⁾	Type ⁴⁾	Vochtgehalte brandstof	Rookgas-reiniging	Rookg. zijdig rend.
	[%]	[mg/m ³ ind. ²⁾]						[-]	[%]	[-]	[%]
Handgestookt											
1	—	1100	78	218	48	2	2	O	12-30	nee	75-85
2	—	1319	41	165	24	2	2	O	12-30	nee	85-90
3	—	4300	360	263	80	4	2	O	12-30	nee	57-72
4	—	1308	48	162	50	2	2	O	12-30	nee	80-85
5	—	7912	143	181	270	7	2	B	20	nee	70
5	—	11354	385	174	187	7	2	B	20	nee	75
6	—	2271	614	152	36	5	2	B	20	nee	75
6	—	4508	1073	180	15	6	2	B	20	nee	—
Automatisch gestookt											
7	—	7534	731	126	142	2	2	T	12-20	nee	77-84
8	—	1493	91	228	174	2	5	S	50	ja	70
9	—	990	9	227	95	3	1	OS	9-50	ja	70-78
10	—	325	2	181	133	2	1	OS	15-45	ja	85-90
11	—	2026	>100	351	283	5	1	OS	12-30	ja	75-80

1) λ = luchtvermaat
C = continu regeling
— = onbekend

3) 1 = spaanders
2 = grof hout
3 = mot
4 = multiplex
5 = schors

4) OS = onderschroef
O = onderafbrand
B = bovenafbrand
T = tunnelbrander
S = schuinrooster

2) ind. in normaal droog (273,14 K, 101,3 kPa)

De rookgaszijdige rendementen van de experimenten uit tabel 4.3 en 4.4 zijn berekend uit de schoorsteenverliezen van de installatie, met name het vochtgehalte van de brandstof (in verband met de calorische waarde) en de luchtvermaat (in verband met het rookgasdebiet) zijn hiervoor bepalend.

In tabel 4.3 komt dit vooral tot uiting in experiment 1, waarin het vochtgehalte van de brandstof circa 50% bedroeg. De proeven door ETH-Zürich (tabel 4.4) leiden door het variërende vochtgehalte van de brandstof ook verschillende rendementen. Het gemiddeld rookgaszijdig rendement ligt voor automatisch gestookte installaties in de ordegrrootte van 80%. Voor handgestookte installatie kan een rookgaszijdig rendement van 70 à 75% worden aangehouden.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Om, voor zover mogelijk, de resultaten van TNO en ETH Zürich te kunnen vergelijken is uit tabel 4.3 en 4.4 tabel 4.5 samengesteld.

Tabel 4.5 Vergelijking meetresultaten ($\text{mg}/\text{m}^3 \text{ ind}$) automatisch en handgestookte installaties, TNO ten opzichte van ETH Zürich (betrokken op 11% O_2)

Component	TNO	ETH Zürich
	Automatisch gestookt	Automatisch gestookt
CO	56 - 370	325 - 7534
C_xH_y	1 - 63	2 - 731
NO_x	99 - 249	126 - 351
Stof ¹⁾	78 - 230	95 - 283
	Handgestookt	Handgestookt
CO	2545 - 3011	1100 - 11354
C_xH_y	245 - 514	48 - 1073
NO_x	94 - 217	162 - 263
Stof ²⁾	- 809	15 - 270

¹⁾ Alleen met cycloon.

²⁾ Zonder cycloon.

Indien bij de verbranding van schoon hout de emissiebestrijding niet verder gaat dan de toepassing van een cycloon of multicycloon impliceert dit over het algemeen dat de stofemissie groter zal zijn dan $100 \text{ mg}/\text{m}^3 \text{ ind}$. (11% O_2).

4.7 Economische aspecten

Na de selectie op basis van technische randvoorwaarden zal de uiteindelijke keuze van een installatie meestal door de kosten worden bepaald. Daarbij dient onderscheid te worden gemaakt tussen investeringen en jaarlijkse kosten. De investeringen betreffen apparaat en randapparatuur, zoals regelingen, beveiligingen, afgaskanalen, schoorsteen, etc. De jaarlijks terugkerende kosten betreffen brandstof (p.m.), onderhoud en bediening, verzekeringskosten, verwijderings- en reinigingskosten voor de emissies.

4.7.1 Prijsindicaties verbrandingsinstallaties en componenten

Volgens opgave van Vyncke kost een 2 MWth basisinstallatie circa 150 kfl.

Onder basisinstallatie wordt in dit verband begrepen:

- ketel;
- verbrandingskamer;
- schroefstoker;
- ventilator.

Uit [25] volgt dat voor de aanschaf van een complete installatie bovendien de volgende componenten dienen te worden aangeschaft:

- | | |
|----------------------------------|----------------|
| — houtverspaner (shredder) | 78 kfl; |
| — houtsilo (180 m ³) | 90 kfl; |
| — vonkenvanger | 25 kfl; |
| — doekfilter | 160 kfl; |
| — schoorsteen | 17 kfl; |
| — leidingen | 5 kfl; |
| — meet- en regelapparatuur | <u>25 kfl.</u> |

Totaal 400 kfl.

Een complete verbrandingsinstallatie uitgerust met de bovenstaande componenten komt derhalve neer op 550 kfl.

In [25] volgt dat voor een 1,3 MWth Bioflamm-installatie van WVT, voorzien van de hierboven genoemde componenten, de totale kosten 556 kfl bedragen. Dit is f430 per kWth.

Een Vyncke multicycloon kost 34 kfl. Een installatie die is uitgerust met een multicycloon in plaats van vonkenvanger en doekfilter kost dan $150 + 400 - 160 - 25 + 34 = 399$ kfl (f 200 per kWth).

Op basis van deze cijfers is in tabel 4.6 een globale berekening van de totale exploitatiekosten weergegeven van drie installaties: installatie A uitgerust met een doekfilter; B met een metaalfoliefilter; C met een multicycloon.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Tabel 4.6 Globale exploitatiekosten berekening van 3 installaties (1,3 MWth)

Investeringskosten		A met doekfilter	B met metaalfoliefilter	C met multicycloon
Voorzien van:				
Doekfilter	[kfl]	556		
Metaalfoliefilter	[kfl]		531,-	
Multicycloon	[kfl]			399,-
Vaste kosten				
Rentekosten (8%)	[kfl/jr]	44,5	42,5	31,9
Afschrijving (20 jr)	[kfl/jr]	27,8	26,5	20,0
Variabele kosten				
Arbeidskosten	[kfl/jr]	10	10	10
Onderhoudskosten	[kfl/jr]	7	7	7
Vervanging doekfilter-set/jaar	[kfl/jr]	10	—	—
Energiekosten	[kfl/jr]	7	7	5
Onvoorzien	[kfl/jr]	5	5	5
Totale exploitatiekosten	[kfl/jr]	111	98	79

Het houtverbruik van een 1,3 MWth installatie is circa 1000 ton/jr (stookwaarde 16 MJ/kg).

Een vergelijkbare aardgasinstallatie kost f 69.000,- [20]. Bij een stookwaarde van aardgas van 31,5 MJ/m³ zou voor eenzelfde energieopbrengst 508.000 m³ aardgas worden verbruikt. Bij een prijs van f 0,25 per m³ komt dit overeen met f 127.000,-. Arbeids- en onderhoudskosten zijn bij een aardgasinstallatie naar verhouding klein.

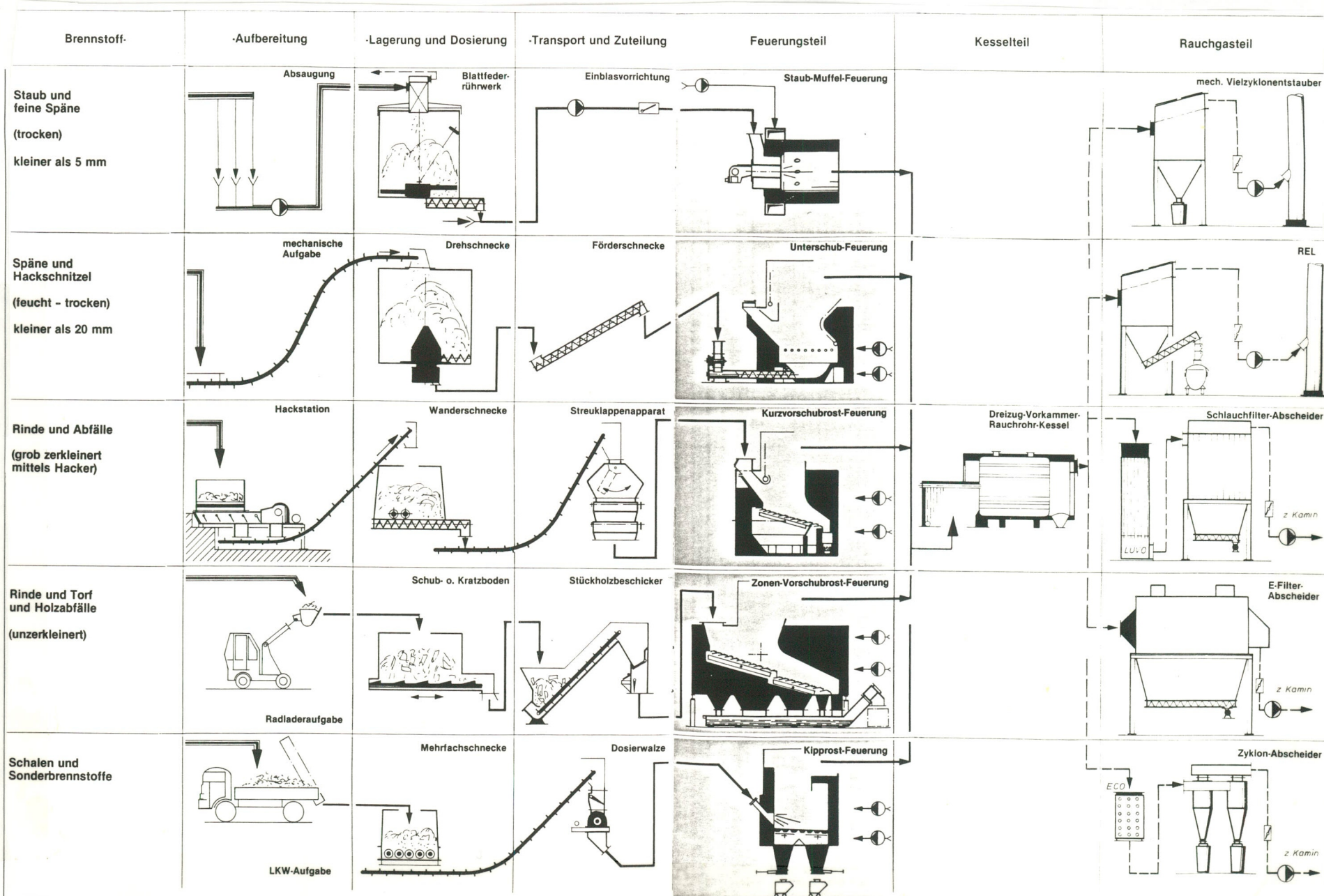
Bij een afschrijving van 15 jaar¹⁾, en 8% rente bedragen de exploitatiekosten voor een aardgasinstallatie dan circa $(0,147 \times 69) + 127 = 10 + 127 = 137$ kfl.

Bovendien kunnen door verbranden in plaats van storten van (schoon) houtafval stortkosten voor circa 90% worden vermeden. Stelt men deze vermeden kosten op f 90,-/ton, dan betekent dit nog eens een besparing van 90 kfl/jaar.

De kosten bedragen bij het gebruik van een aardgasinstallatie dus circa 227 kfl per jaar (namelijk 10 kfl afschrijving, 127 kfl aardgas, 90 kfl stortkosten); bij een houtinstallatie slechts 80 à 110 kfl (uitgangspunt is daarbij, dat de kosten van het afvalhout als brandstof worden verwaarloosd).

In tabel 4.7 is een indicatie gegeven van prijzen van verbrandingsinstallaties die in Duitsland voorkomen. In figuur 4.13 is dit te zamen met gegevens uit tabel 4.8 nog eens grafisch weergegeven. Voor vermogens tussen 1 en 3 MWth ligt de prijs tussen 110 en 160 kfl. Een installatie met een vermogen van 15 MWth komt op 1100 kfl.

¹⁾ Verondersteld wordt dat een aardgasinstallatie iets minder lang meegaat dan een houtinstallatie, omdat een aardgasinstallatie wat minder robuust van bouw is.



Figuur 4.9 Enkele voorbeelden van verbrandingsinstallaties voor schoon afvalhout, inclusief de aanvoer- en doseerapparatuur (uit brochure Lambion GmbH)

*Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland**Voordrogen*

Hout met een hoog vochtgehalte brandt zonder maatregelen te treffen slechter dan droog hout. Daarom is voordrogen van belang bij hout met een hoog vochtgehalte, zoals afvalhout uit plantsoenen, bossen etc.). Bij houtresten (afval uit de meubelfabrieken, houtbewerkingsinrichtingen) is drogen niet nodig omdat het hout in dat geval reeds eerder een droogbehandeling heeft ondergaan. Men heeft dan voornamelijk te maken met aan de lucht gedroogd hout met een vochtgehalte van circa 15%.

De goedkoopste manier van drogen, voor bijvoorbeeld resthout, is het drogen langs natuurlijke weg. Het hout wordt dan onder een afdak geplaatst en door de wind gedroogd. Dit is alleen mogelijk wanneer de stukgrootte zodanig is dat het hout niet wegwaait. Bij kleinere stukgrootte, bijvoorbeeld spaanders, krullen of zaagsel, kan kunstmatig worden gedroogd door warme lucht of rookgas geforceerd door het te drogen produkt te leiden.

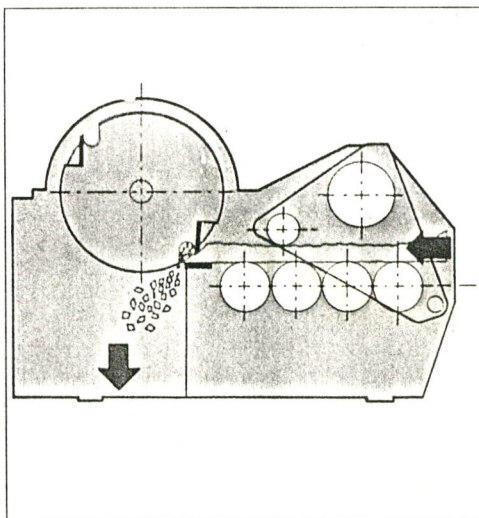
Verkleinen

Indien het hout niet op de gewenste grootte beschikbaar is, kan dit worden verkleind met behulp van verspaningsmachines. Daarbij kan onderscheid worden gemaakt in

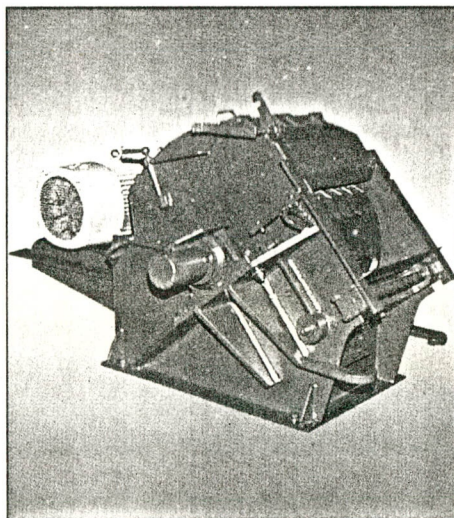
- a. verchippen, en
- b. vershredderen van het houtafval.

ad a.

Bij verchippen wordt het massieve houtafval door een roterend beitelblok, eventueel voorzien van verwisselbare beitels, tot chips verspaand. Het verkleiningsprodukt, de chip, heeft een vrij constante vorm, en afmetingen in de orde van $10 \times 10 \times 0,5$ cm. Een verchipper (trommelhakker) wordt in figuur 4.10 getoond.



Type CM function sketch



Type CS drum chipper

Best possible pulp chips from mixed material

Type CM chippers are designed with load-controlled feedworks, Type CS chippers have drop feed. The chippers produce 15-300 m³ chips/hour and have extra wide throats for smooth feeding of bulky, mixed material, such as slabs, edgings, roundwood, trim ends, veneer, plywood, joinery waste. One drum chipper can handle it all and turns it into best possible pulp chips.

The machines are designed for low maintenance and long knife life. Exchangeable wear plates protect the knife seats, the exchangeable anvil holder prevents damage by foreign objects.

Figuur 4.10 Voorbeeld van een chipper (merk Bruks)

ad b.

Naast verchippers komen ook verkleiners voor die het afvalhout “breken” en “kragen”, de zogenaamde shredders. Het apparaat bestaat uit twee tegen elkaar indraaiende assen met versprongen aangebrachte schijven met “snijkanten” (zie figuur 4.11). De deeltjesgrootte van het eindprodukt is onder andere afhankelijk van de breedte van de “snijkanten”, de vorm van de platen en het toerental van de assen. Het verkleiningsprodukt is groter en veel onregelmatiger van vorm dan bij verchippers. Deze techniek heeft echter als voordeel dat men niet gebonden is aan bepaalde afmetingen en vorm van het aangeboden hout.

Briketteren of pelleteren

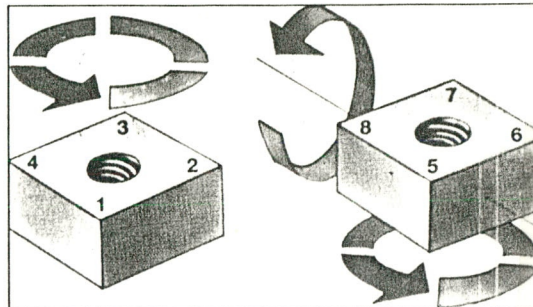
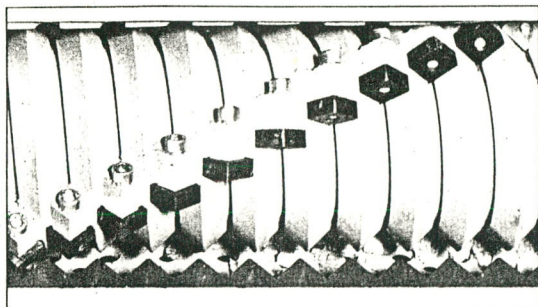
Om fijn hout (bijvoorbeeld zaagsel) tot een compactere, grotere vorm samen te voegen, kan men tot briketteren of pelleteren overgaan. Het hout wordt dan verwarmd, en met behulp van de bindmiddelen die daardoor uit het hout vrijkomen tot briketten (of pellets) geperst. Het vochtgehalte is daarbij aan vrij nauwe grenzen gebonden; bij te droog hout kan verkoling van het oppervlak en onvoldoende binding ontstaan. Bij te nat hout ontstaat te veel waterdamp die niet kan ontsnappen en zwelling van het produkt veroorzaakt. Ook dit beïnvloedt de binding nadelig. Optimaal is een **homogeen** vochtgehalte van 15 à 20%.

Briketteren of pelleteren kost vrij veel (elektrische) energie. Men gaat hier toe over, wanneer de installatie niet geschikt is voor het verbranden van fijn hout (zoals bijvoorbeeld bij doorschroefstokers het geval is), of wanneer de brandstof moet worden vervoerd. Op deze wijze wordt fijn hout ook geschikt gemaakt voor verkoop aan derden.

Pellets zijn in feite kleine briketten (briketten: circa $\varnothing 5 \times 7$ cm; pellets circa $\varnothing 2 \times 4$ cm).

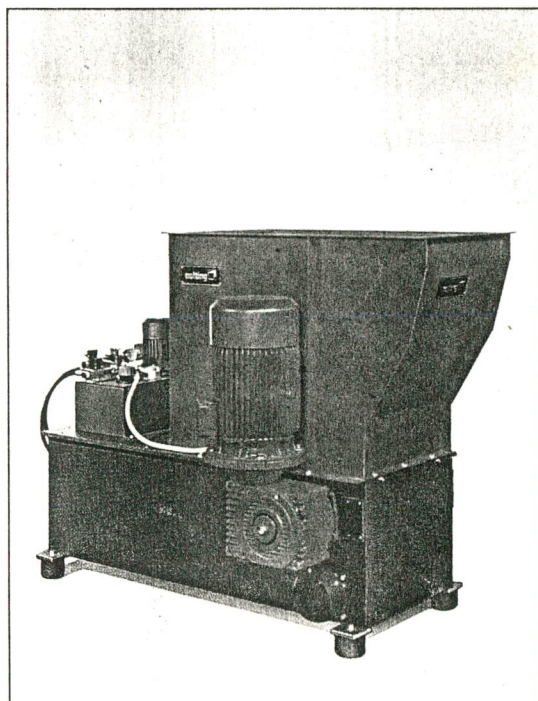
Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Die Walzenfräse mit hydraulischem Vorschub. Profil-Rotor mit Wende-Brechplatten. Ziehender Schnitt – geringer Kraftaufwand. Hohe Wirtschaftlichkeit durch Mehrfachverwendung der Wende-Brechplatten. Leicht und schnell austauschbar.

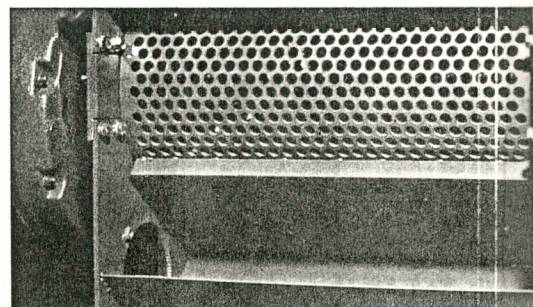


Die Maschine für den Klein- und Mittelbetrieb. WFH 100.
Speziell für Schreinereiabfälle:

Die Maschine mit der Bullenkraft. Speziell für Hartholz-Abfälle wie Buche, Eiche und Esche. WFH 150.



WFH 100



Der Lochdurchmesser des Lochsiefs bestimmt die Schnittzelgröße.



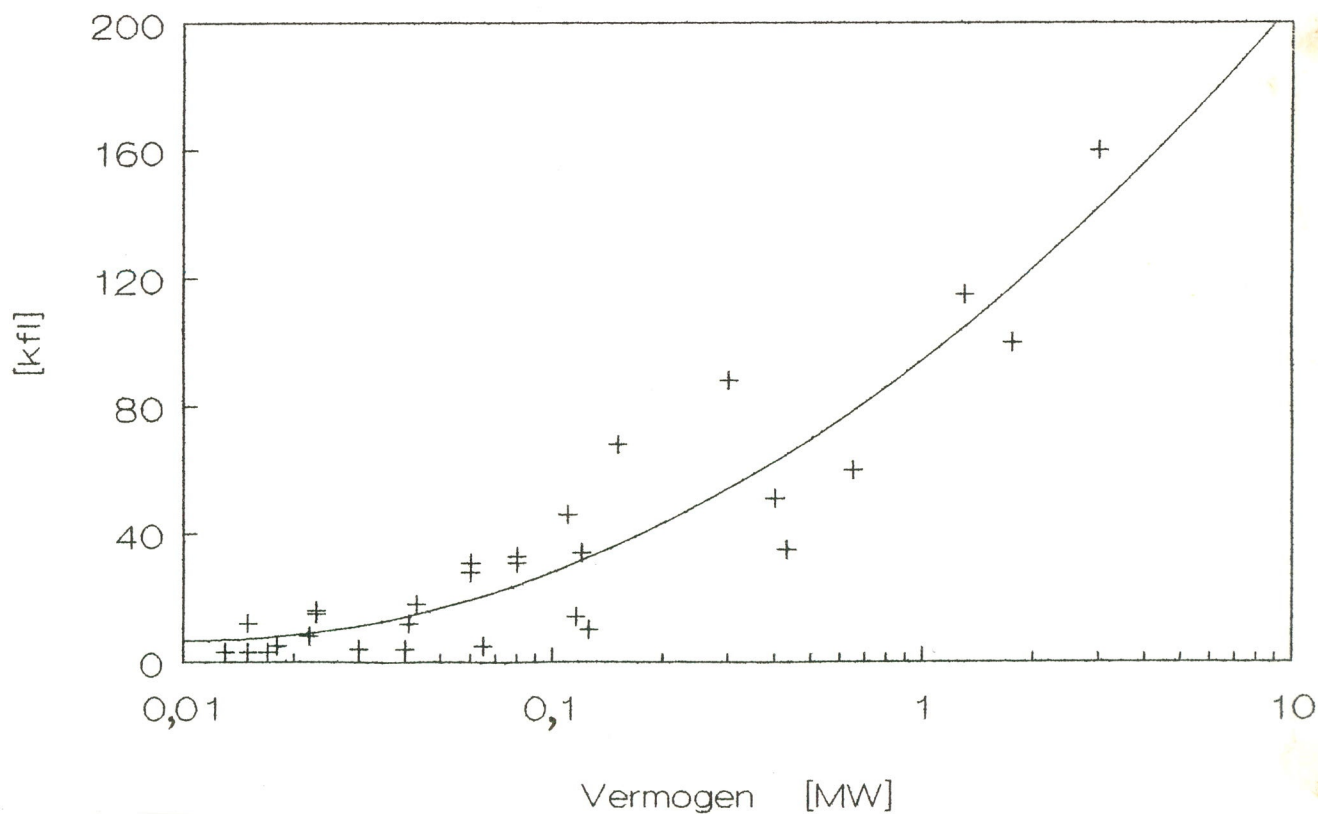
Innenliegende Vollkunststoffführungen. Kein Verklemmen von Material (wie bei Außenführungen). Kein Herausfallen von Material.

Figuur 4.11 Voorbeeld van een shredder (merk Nolting)

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Tabel 4.7 Prijsindicatie van verbrandingsinstallaties zonder bijkomende componenten [30, 31]

Merk	Type	Vermogen [kWth]	Prijsindicatie [kfl]
Duitsland			
BHSR (Sponex)	Onderschroef	22 - 430	8 - 35
	Statisch rooster	41 - 650	12 - 60
	Onderschroef	120 - 3000	34 - 160
CTC GmbH	doorschroef	13 - 65	3 - 5
	Statisch rooster	17 - 40	3 - 4
	Onderschroef	18 - 116	5 - 14
	Onderschroef	15 - 30	3 - 4
Dan Trim Maschienen	Schuinrooster	1750	100
WVT Bioflam	Tweetrapsprincipe	300 - 1300	88 - 115
Spanex	Onderschroef	126 - 928	10 - 50
Weiss	Onderschroef	400 - 15000	51 - 1100
Nolting	Inblaas	80 - 1200	46 - 110



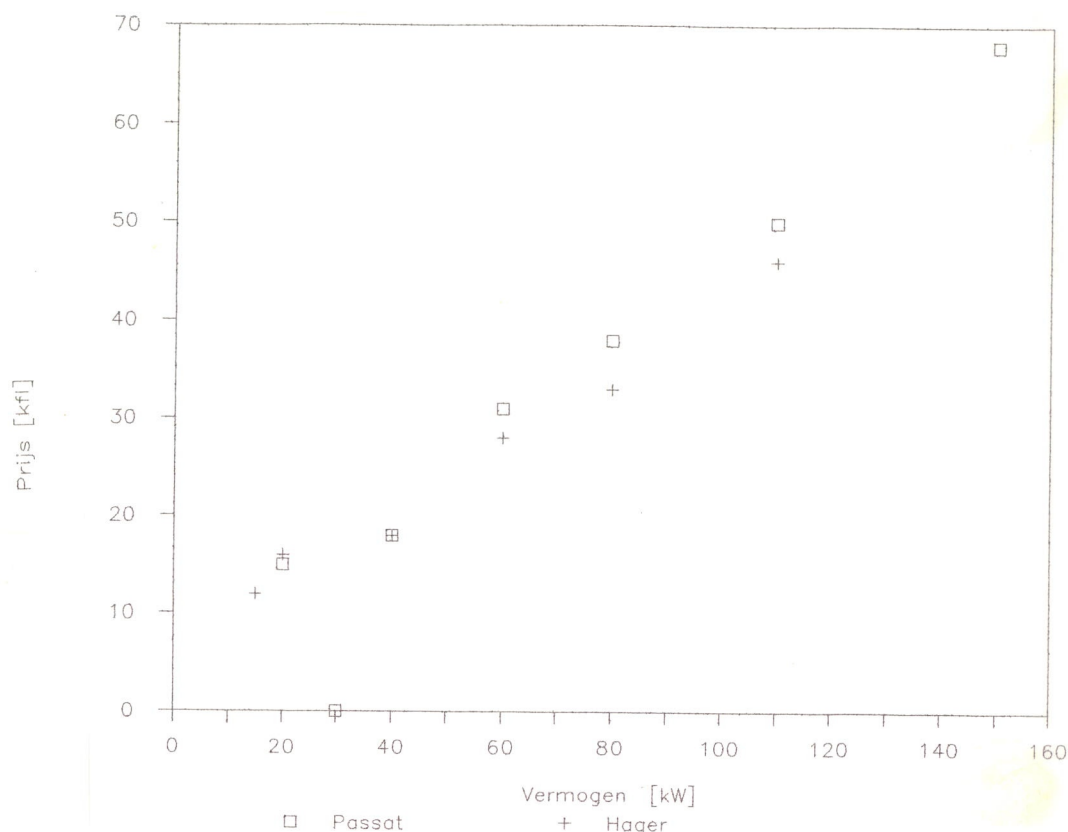
Figuur 4.13 Basisprijsindicatie verbrandingstoestellen

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Tabel 4.8 geeft prijzen van een aantal handgestookte installaties. Deze tabel is grafisch weergegeven in figuur 4.14.

*Tabel 4.8 Prijsindicatie Passat en Hager compact ketels [42]
(handgestookt met voorraad bunker)*

Type	Vermogen [kWth]	Prijs [kfl]
Passat		
C2	23	15
C1	43	18
C6	60	31
C8	80	38
C11	110	50
C15	150	68
Hager		
15	15	12
23	23	16
40	43	18
60	60	28
80	80	33
110	110	46

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Figuur 4.14 Prijsindicatie voor handgestookte installaties (exclusief schoorsteen)

Recentelijk heeft DHV [11] een studie uitgevoerd naar de kosten van rookgasreiniging bij kleine installaties. Omdat deze kosten niet specifiek betrekking hebben op het verbranden van schoon afvalhout zijn ze bij de voorgaande berekeningen niet gebruikt; ter vergelijking zijn ze echter wel relevant. Enkele gegevens uit [11] zijn als **bijlage 1** opgenomen.

4.7.2 Terugverdiertijden

Op basis van gegevens uit tabel 4.6 kunnen, in vergelijking met kosten van aardgasgestookte installaties, terugverdiertijden van houtverbrandingsinstallaties worden berekend.

In dit verband moet worden opgemerkt dat in hoofdstuk 6 en 7 zal worden uiteengezet, dat emissieverlaging goed realiseerbaar is, maar wel met extra kosten gepaard gaat. Dit betreft vooral ontwikkelingskosten; vooral wanneer sprake is van procesgeïntegreerde maatregelen behoeven de installaties niet veel duurder te worden. Het lijkt daarom reëel om bij commercialisering te denken aan prijsverhogingen in de orde van 20 à 30%. Om deze reden wordt hierna een berekening gegeven voor de situatie zoals in tabel 4.6 is gegeven, en daarnaast voor een situatie met 25% meerinvestering.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Tabel 4.9 Globale terugverdientijden van enkele verbrandingsinstallaties voor schoon afvalhout (1,3 MWth) ten opzichte van vergelijkbare aardgasgestookte installaties

	Investerings	Kosten per jaar	Terugverdientijd
A Installatie met doekfilter	556	39	$\frac{556 - 69}{227 - 39} = 2,6 \text{ jr}$
B Installatie met metaalfoliefilter	531	29	$\frac{531 - 69}{227 - 29} = 2,3 \text{ jr}$
C Installatie met multicycloon	399	27	$\frac{399 - 69}{227 - 27} = 1,4 \text{ jr}$
A' als A, met 25% meerinvestering	695	39	$\frac{695 - 69}{227 - 39} = 3,2 \text{ jr}$
B' als B met 25% meerinvestering	664	29	$\frac{664 - 69}{227 - 29} = 3,0 \text{ jr}$
C' als C met 25% meerinvestering	499	27	$\frac{499 - 69}{227 - 27} = 2,2 \text{ jr}$
D Aardgas	69	217	

Uit deze tabel volgt dus dat, zelfs bij een meerinvestering van 25%, de terugverdientijden onder de 4 jaar zullen blijven (rente en afschrijving zijn bij deze globale berekening niet meegenomen).

5 Verbranding van schoon hout in het buitenland

Het is duidelijk dat een min of meer compleet overzicht van de wijze van gebruik van biomassa voor energetische doeleinden in het buitenland niet binnen het kader van deze studie kan worden gegeven.

Om toch enige indruk te verkrijgen van de wijze waarop men met deze optie omgaat, met name in een aantal geïndustrialiseerde landen, volgt hierna (5.1) een summier uittreksel van de resultaten van een onderzoek dat in het kader van een IEA Implementing Agreement plaatsvond.

Het doel hiervan is slechts, om een globaal beeld te schetsen van de plaats die Nederland op dit gebied inneemt in vergelijking tot enkele andere landen.

Vervolgens wordt, in 5.2, een beeld gegeven van enkele installaties die in het buitenland in gebruik zijn, maar in Nederland niet. Daarbij gaat het echter niet altijd om afvalhout, maar ook om vers (hak)hout dat gekapt wordt met het doel de energie-inhoud direct te benutten.

5.1 Energie uit biomassa in het buitenland; enige gegevens

Recentelijk is in het kader van de IEA-activiteiten op het gebied van Biomass Conversion het "End of Task Report" verschenen van de "Combustion Activity" [1]. Het rapport geeft onder meer informatie omtrent het biomassaverbruik in een aantal IEA-landen (totaal 8).

In tabel 5.1 wordt getoond welke hoeveelheden biomassa in deze landen als potentieel beschikbaar zijn, respectievelijk worden gebruikt. De tabel is voor wat Nederland betreft aangevuld met resultaten uit de onderhavige studie en met resultaten uit een onlangs bij het ECN verschenen rapport [18].

Tabel 5.1 Verbruik van energie uit biomassa in 8 Europese landen [4]

Land	Biomassaverbruik: [PJ]		Biomassa potentieel: [PJ]
Canada	605	(6%)	11892
Denemarken	30	(4%)	126
Finland	156	(9.2%) ¹⁾	—
Italië	151	(3%)	641
Nederland	20	(0.9%)	31
Noorwegen	36	(3.6%)	505
Zweden	234	(11.3%)	540
Engeland	13	(0.1%)	54

¹⁾ met turf 17%

De tussen haakjes geplaatste cijfers geven de percentages weer van de bijdrage aan de totale energieconsumptie in het betreffende land.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Het blijkt dat, normaal gesproken, de energie uit biomassa slechts enkele procenten van het totale energieverbruik bedraagt. Alleen voor bekende “houtlanden” als Zweden, Finland en Canada is het percentage hoger. Nederland komt met 0.9% op de één na laatste plaats. Alleen de UK is nog lager. Bezien we echter het potentieel, dan zijn de groeimogelijkheden in Nederland veel kleiner dan in de UK.

Tabel 5.2 geeft een indruk welke biomassasystemen in de betreffende IEA landen zoal worden gebruikt. Opvallend in deze lijst is de kennelijke populariteit van houtkachels voor huishoudelijk gebruik. Het geïnstalleerd thermisch vermogen is echter relatief laag.

Tabel 5.2 Overzicht van typen op biomassa werkende energiesystemen in acht IEA-landen

	Canada		Denemarken		Italië		Nederland		Noorwegen		Zweden		Engeland		Finland	
	Thermisch vermogen [MW]	Aantal [-]	Thermisch vermogen [MW]	Aantal [-]	Thermisch vermogen [MW]	Aantal [-]	Thermisch vermogen [MW]	Aantal [-]	Thermisch vermogen [MW]	Aantal [-]	Thermisch vermogen [MW]	Aantal [-]	Thermisch vermogen [MW]	Aantal [-]	Thermisch vermogen [MW]	Aantal [-]
Districtverwarming	10	1	0.6-9	72	**	**	**	**	2-10	2-3	1-70	85	*	*	0.5-10	140
Installaties in de pulp- en papierindustrie	0.5-3 3-100	30 89	40	2	5-15	20	*	*	2-30	30	30	54	30	1	50-200	20
Installaties in houtzagerijen	0.5-3 3-30	2 19	** **	** **	** **	** **	** **	** **	0.5-10 *	300 *	1.5-5 *	200 *	0.5-6 *	6 *	** **	** **
Installaties in de hout-industrie	**	**	0.2-3	100	1-5 0.5-1	40 100	0.1-5	237	0.05-1	500	**	**	0.25-6	50	**	**
Andere met biomassa gestookte installaties	0.5-30	70	**	**	**	**	*	*	0.05-1.5	10	1.5-5	25	1.5-60	10	10-200	20
Chips gestookte installaties op boerderijen	0.01-0.15	10	**	**	0.05-0.1	800.000	**	**	0.02-0.15	800	0.01-0.05	130.000	0.02-0.15	2.000	0.02-0.1	150
Installaties t.b.v. verwarmingsdoeleinden	0.01-0.08	10.000	**	**	0.01-0.5	6.000	0.02-0.15	663	0.01-0.05	5.000	>0.01	50.000	**	**	**	**
Open haarden en houtkachels	0.005-0.02	2.000.000	**	**	0.01	2.800.000	0.005-0.01	900.000	0.005-0.01	2.000.000	0.01-0.05	480.000	0.005-0.01	10.000	0.005-0.01	1.000.000
Kook/verwarmings-toestellen	**	**	**	**	0.01-0.05	1.500.000	**	**	**	**	**	**	*	*	**	**

* = waarschijnlijk nihil

** = onbekend

5.2 Enkele verbrandings- en reinigingsinstallaties in het buitenland

In deze paragraaf worden enkele verbrandings- en rookgasreinigingsinstallaties die thans op de markt zijn, en in het buitenland operationeel zijn, weergegeven.

5.2.1 Verbrandingsinstallaties

Coen Biomass Combustion Systems (Nederlands fabrikaat)

Door de Jong Coen B.V. te Schiedam wordt een brander geleverd onder de naam "Coen Dual Air Zone (DAZ) scroll feed burner". Het betreft een brander waarbij de biomassa (chips) aan de zijkant wordt toegevoerd (figuur 5.1). Als ondersteunings- of als hoofdbrandstof kan zowel aardgas als olie dienst doen¹⁾. In het branderhuis wordt de brandstof met de lucht gemengd; de primaire lucht wordt aan de achterkant van de brander ingeblazen. Indien nodig kan bovendien secundaire lucht aan de voorkant worden ingeblazen. Om de menging te bevorderen draaien de primaire en secundaire aanzuigschoppen voor verbrandingslucht tegengesteld aan elkaar.

Momenteel staan systemen opgesteld in Zweden, België, Ierland, Wales en Frankrijk. Het totaal geïnstalleerd vermogen bedraagt 22 MWth; het is verdeeld over slechts 4 installaties; het gaat hier dus om relatief grote dual-fuel systemen. Van Coen Biomass combustion systems staan in Nederland geen installaties.

De toepassingen betreffen het leveren van energie voor:

- luchtverwarmer en droger;
- stoomketel;
- warmwater;
- stoomketel met generator.

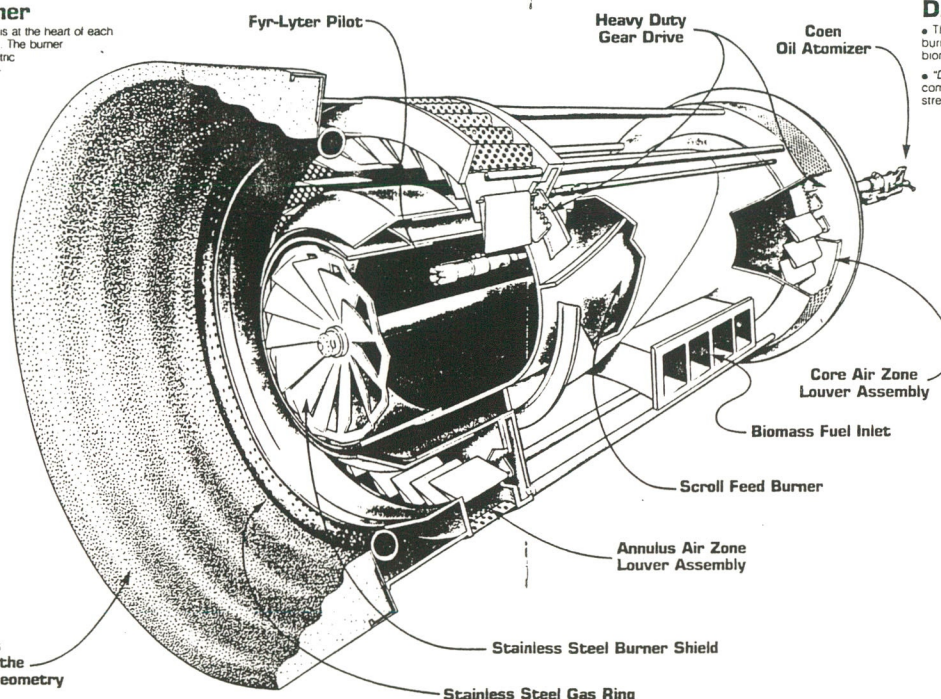
¹⁾ In de praktijk wordt olie als hoofdbrandstof gebruikt en hout als hulpbrandstof; het omgekeerde is echter ook mogelijk.

...with Coen's DAZ Scroll Feed Burner...

Coen Dual Air Zone (DAZ) Scroll Feed Burner

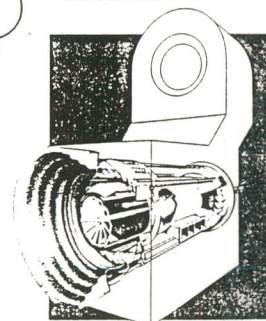
The Coen DAZ Scroll Feed Burner is at the heart of each Coen Biomass Combustion System. The burner is two registers in one, with concentric louver zones which divide the combustion air stream into two counter rotating concentric streams. As these air streams scrub against each other, they provide a turbulent mixing action without the net rotative effect found in single louver zone registers. The result is a compact and controllable flame pattern. This burner has proved in operation to be remarkably effective in burning the problem fuels utilized in the Biomass Combustion System.

Coen Throat Tiles are shaped to fit the specific furnace geometry



Features of the Coen DAZ Scroll Feed Burner

- The DAZ register is multi-fuel allowing other fuels to be burned in addition to or in combination with the solid biomass fuel.
- "Dual Air Zone" with concentric louvers divide the combustion air stream into two counterrotating concentric streams.
- By being based on Coen's standard DAZ register, solid fuel performance is similar to the fossil fuels it replaces.
- The Adjustable flame pattern is advantageous in fitting industrial furnace configurations, especially tight package boiler furnaces.
- Air streams scrub against each other providing a turbulent, controllable mixing action with fuels.
- Biomass scroll is designed to allow solid fuels to enter uniformly into an annulus between the two counterrotating air streams.
- Combustion originates well back in the throat of the burner allowing a hot refractory flame base to be maintained.



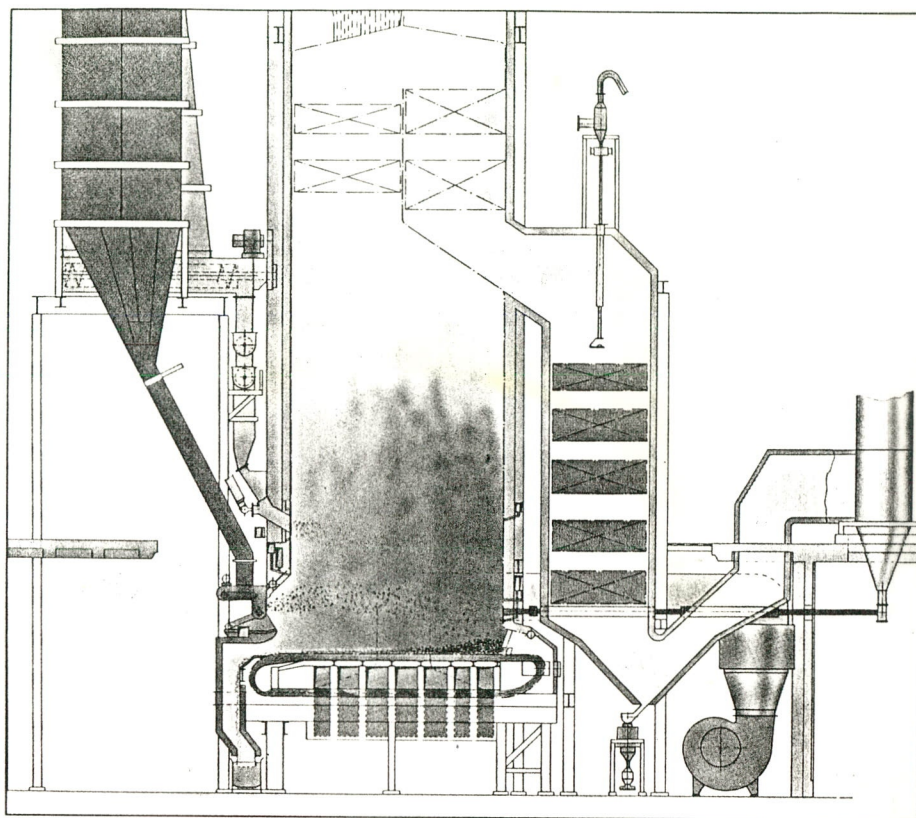
Figuur 5.1 Coen's biomassa verbrandingssysteem

Vølund (Denemarken)

Vølund Ecology systems A/S, Brøndby, Danmark is gespecialiseerd in de bouw van zogenaamde "Multi Fuel Plants"; Vølund levert vooral grootschalige installaties. Multi Fuel installaties kunnen zowel stro, hout, turf, schors als huishoudelijk afval verbranden.

Figuur 5.2 toont schematisch een uitvoeringsvorm van een Vølund systeem. In dit geval gaat het om een installatie die is uitgerust met een bewegend vlak rooster (kettingrooster).

Vølund installaties (> 3 MWth) zijn standaard voorzien van doekfilters of elektrostatische filters.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Figuur 5.2 Schets van een Vølund "Multi fuel plant"

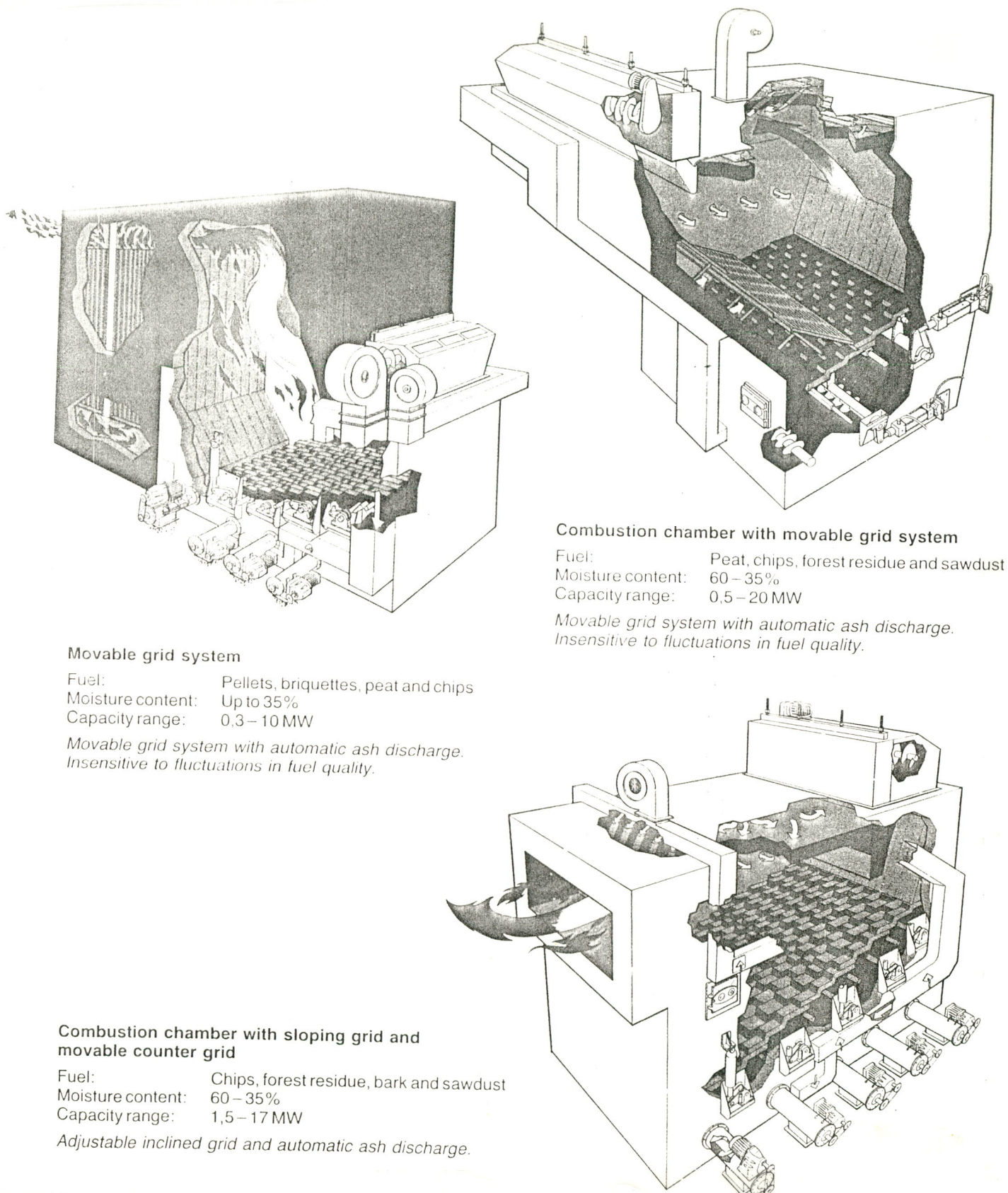
KMW Energi (Noorwegen)

In figuur 5.3 wordt een drietal verbrandingsinstallaties van KMW getoond die werken met een schuin bewegend rooster. Figuur 5.4, 5.5 en 5.6 tonen drie installaties werkend volgens het onderschroefprincipe met statisch rooster.

ETH-studie (Zürich, Zwitserland) [16]

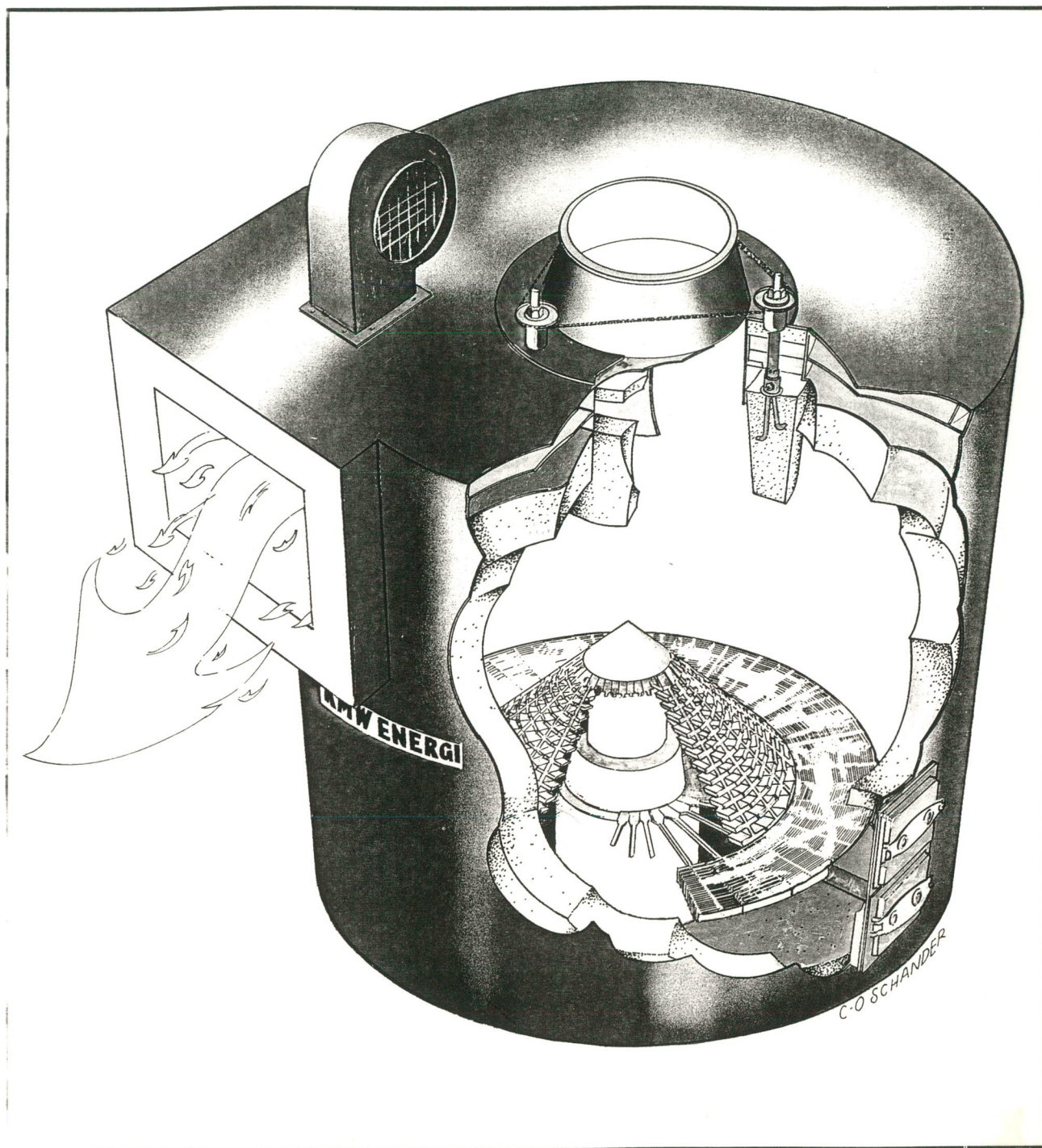
In Zwitserland is eveneens een grote ervaring op het gebied van energiewinning uit hout. Figuur 5.7 tot en met 5.10 geven enkele voorbeelden van aldaar toegepaste installaties.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland



Figuur 5.3 Enige uitvoeringsvormen van verbrandingsinstallaties met een schuin bewegend rooster (KWI, Noorwegen)

Vorofen Type CKF

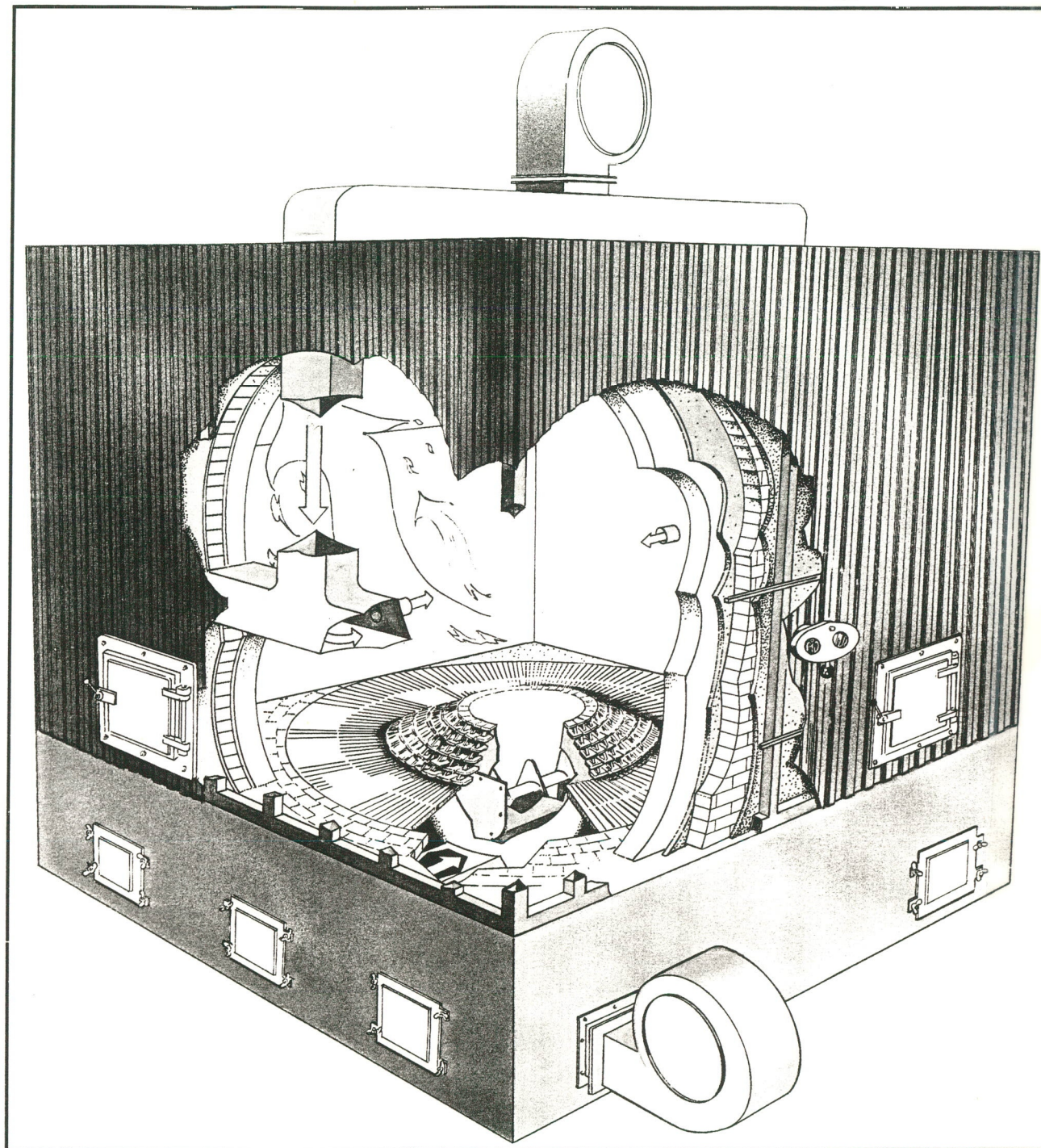


Vorofen mit Kon- und Planroost

Brennstoff: Hackschnitzel, Grünschnitzel, Rinde und Späne
 Feuchtigkeit: 30–60% (45–150% atro)
 Leistungsbereich: 0,2–6 MW (170–5100 mcal/h)

Figuur 5.4 Verbrandingsinstallatie met een statisch conisch rooster (KMW)

Vorofen Type TF

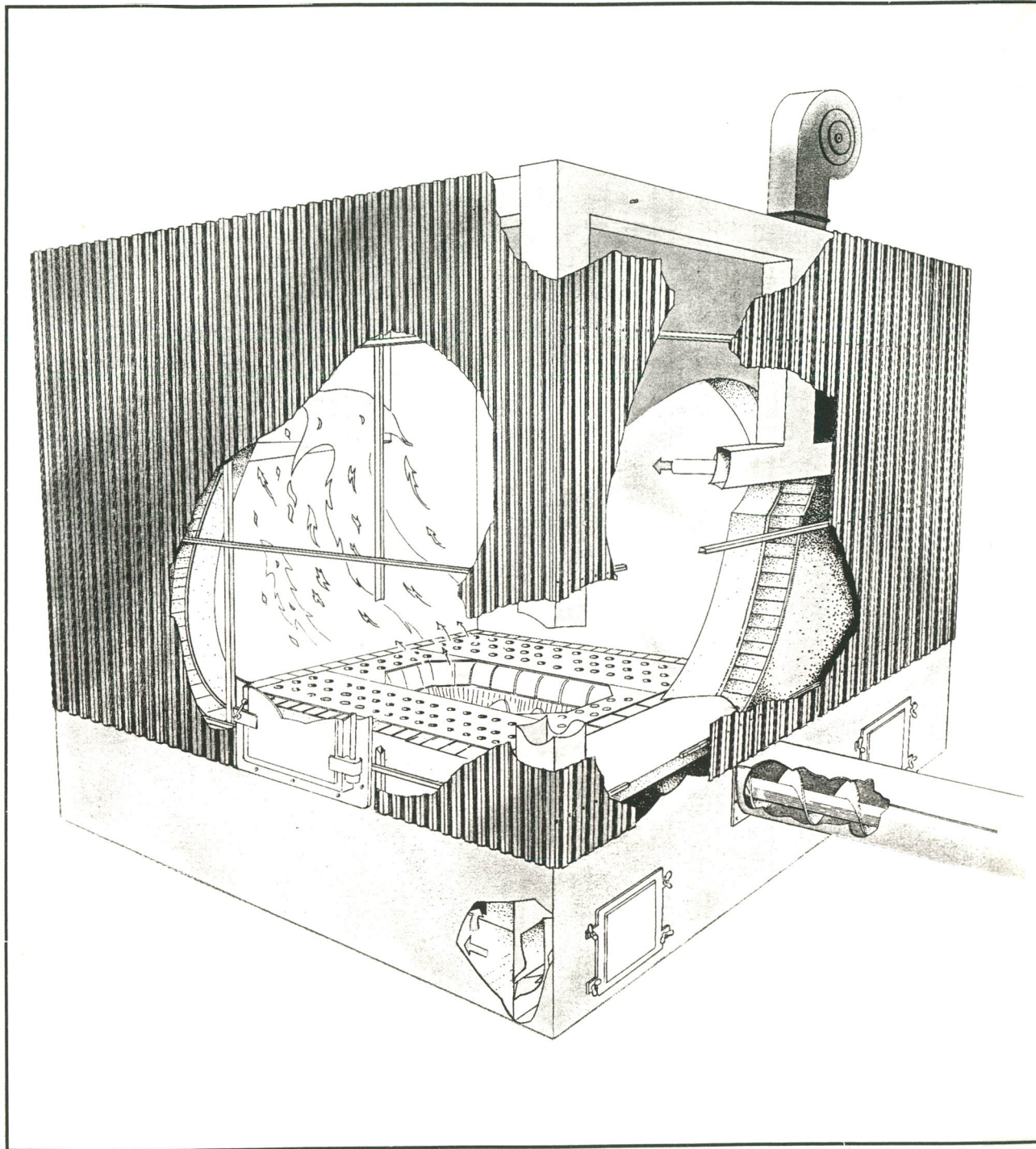


Vorofen mit Retorte, Stufen- und Planrost

Brennstoff: *Hackschnitzel, Grünschnitzel, Rinde und Späne*
Feuchtigkeit: *30–60% (45–150% atro)*
Leistungsbereich: *0,5–10 MW (430–8600 mcal/h)*

Figuur 5.5 Onderschroefstoker (KMW)

Vorofen Type PF



Vorofen mit Retorte und Planrost

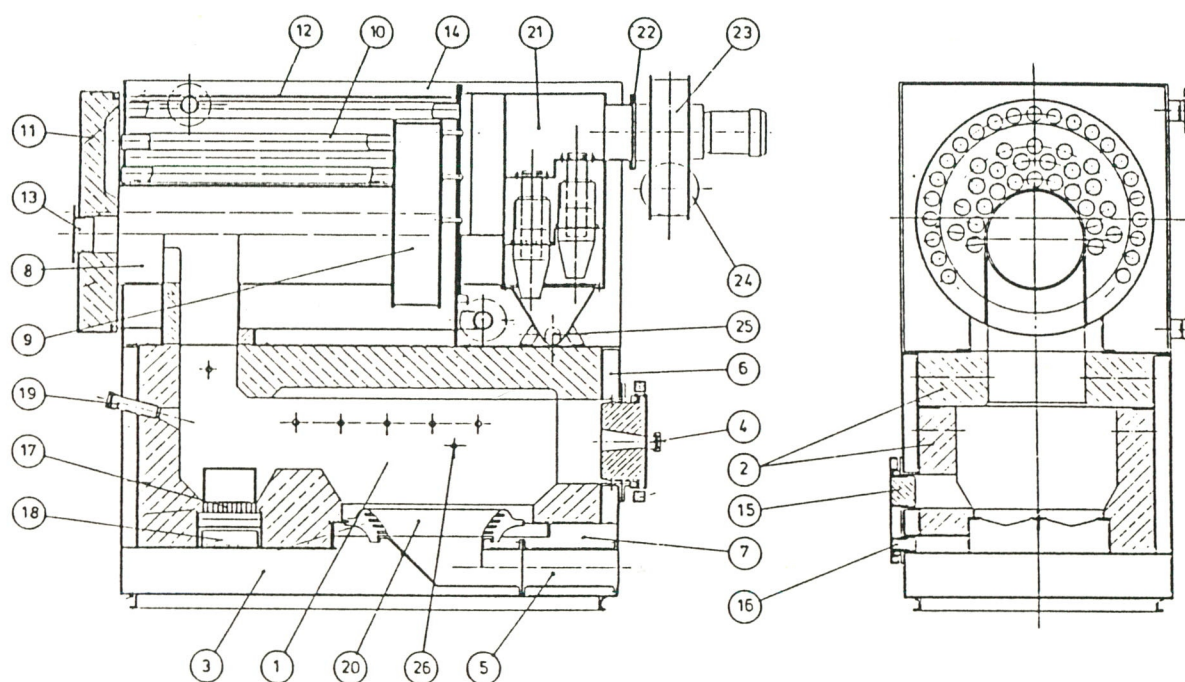
Brennstoff: Hackschnitzel, Grünschnitzel und Späne
Feuchtigkeit: 30–55% (45–120% atro)
Leistungsbereich: 0,2–1,5 MW (170–1290 mcal/h)

Figuur 5.6 Onderschroefstoker (KMW)

Anlagenbeschreibung

Typ.....: Schnitzelfeuerung, auch für waldfrische
 Schnitzel ("Grünschnitzel") geeignet
 Bauart.....: Unterschubfeuerung mit Multizyklon
 zur Staubabscheidung
 Leistung.....: 400 KW
 Beschickung....: Förderschnecke
 Luftzufuhr.....: 2 Ventilatoren (Zuluft) für
 Primär- und Sekundärluft

Schnittbild:



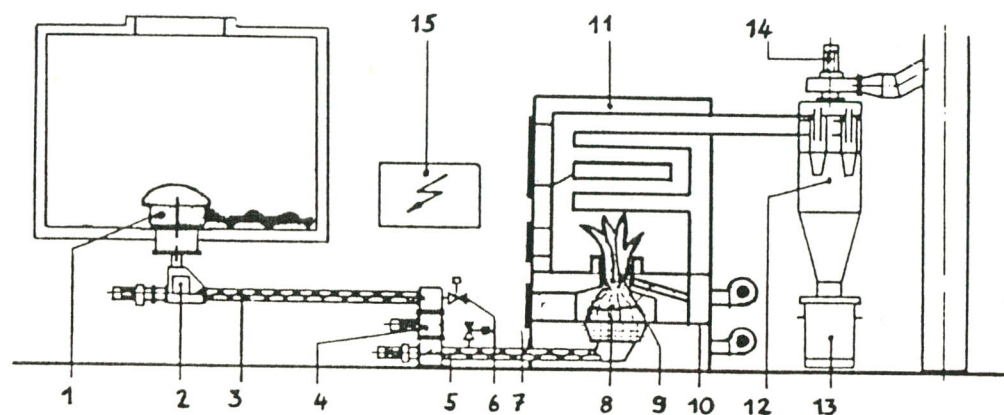
Pos	Gegenstand		
1	Brennkammer	13	Anschlussflansch für Oelbrenner
2	Ausmauerung	14	Isolation mit Blechverschalung
3	Rost	15	Rosttür
4	Reinigungstür mit Schauloch (ausgemauert)	16	Russtür
5	Materialzufuhr	17	Ausbrandrost
6	Sekundärluftkanal	18	Aschenschublade
7	Primärluftkanal	19	Schauglas
8	Kesselflammrohr	20	Rostgarnitur mit Feuermulde
9	Wendekammer	21	Rauchgasentstauber
10	Rauchrohr	22	Unterdruckregulierung
11	Reinigungstür mit schamottierter Wendekammer	23	Rauchgasventilator
12	Kesselmantel	24	Rauchgasabgang
		25	Aschentransportschnecke
		26	Feuerraumtemperatur-Ueberwachung

Figuur 5.7 Verbrandingsinstallatie voor (onder andere) houtchips, met ingebouwde cycloon (Zwitserland)

Anlagenbeschreibung

Typ.....: Schnitzelfeuerung, auch für waldfrische
 Schnitzel ("Grünschnitzel") geeignet
 Bauart.....: Unterschubfeuerung mit Multizyklon zur
 Staubabscheidung
 Leistung.....: 250 KW
 Beschickung....: Förderschnecke
 Luftzufuhr.....: 2 Ventilatoren (Zuluft) für Primär-
 und Sekundärluft

Schnittbild:



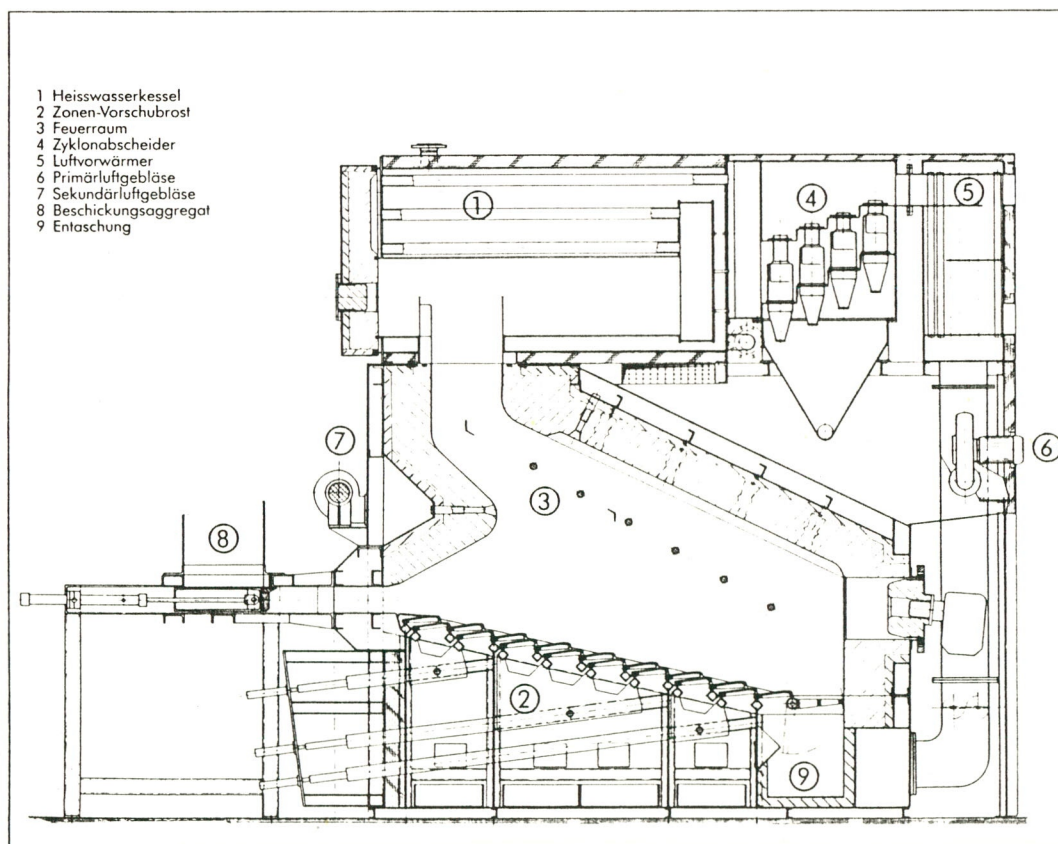
- | | | |
|----------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1 Siloaustragung | 6 RÜchbrandsicherung | 11 Vierzug - Heizkessel |
| 2 Dosierkasten | 7 Verbrennungsluftventilator | 12 Multizyklon-Aschenabscheider |
| 3 Dosierschnecke | 8 Vergaserraum | 13 Aschebehälter |
| 4 Zellenradschleuse | 9 Gashals m. Sekundärluftrohre | 14 Rauchgasventilator |
| 5 Unterschubschnecke | 10 Hochfuerfeste Ausmauerung | 15 Elektrischer Schaltkasten |

Figuur 5.8 Onderschroefstoker voor (onder andere) houtchips (Zwitserland)

Anlagenbeschreibung

Typ.....: Rindenfeuerung
 Bauart.....: Vorschubrostfeuerung mit Multizyklon zur
 Staubabscheidung
 Leistung.....: 600 KW
 Beschickung....: Schiebend (Bewegung eines Kolbens)
 Luftzufuhr.....: 2 Ventilatoren (Zuluft) für Primär-
 und Sekundärluft

Schnittbild:

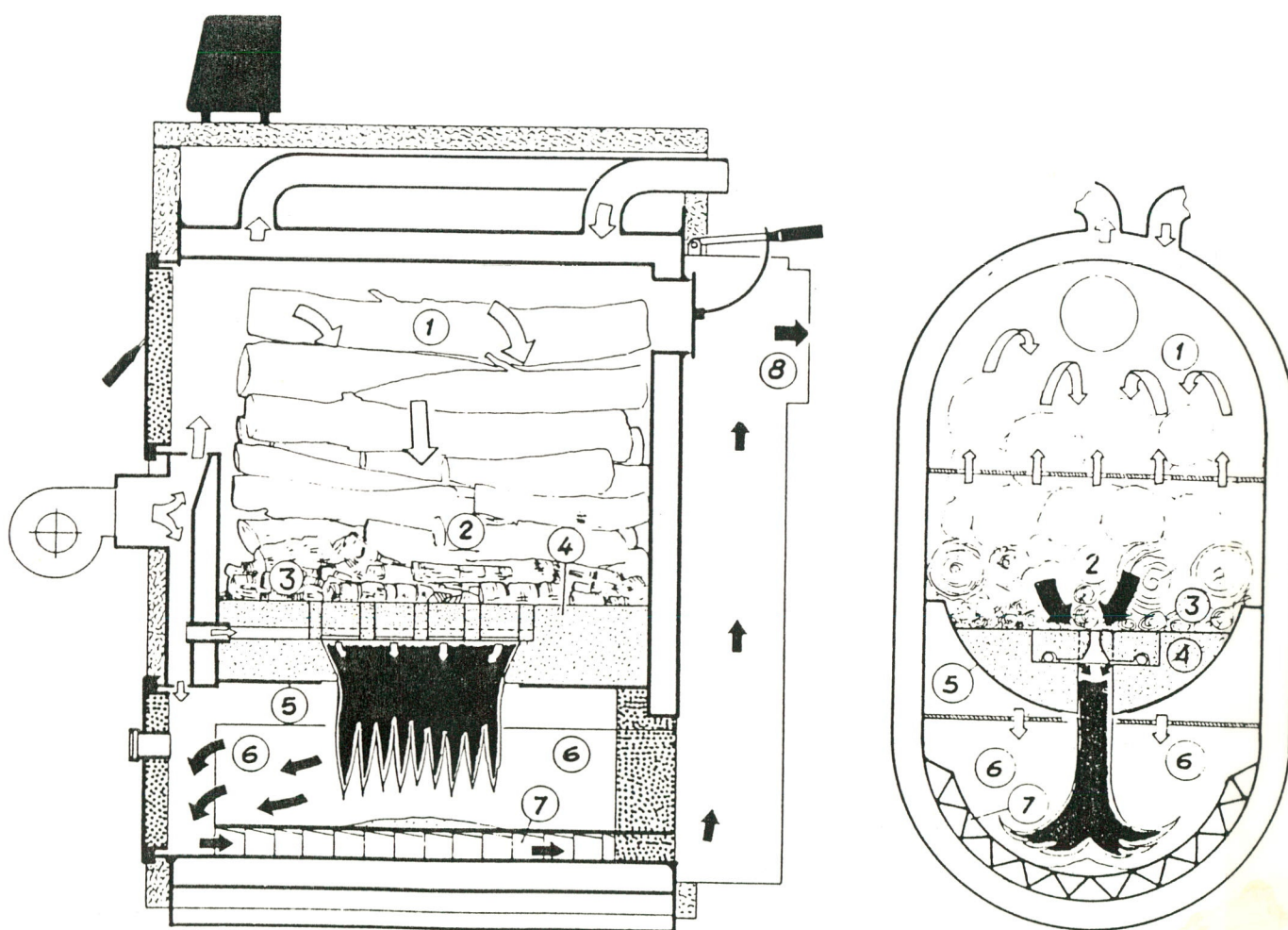


Figuur 5.9 Installatie met bewegend schuin rooster en geïntegreerde multicycloon (Zwitserland)

Anlagenbeschreibung

Typ.....: Handbeschickter Stückholzkessel
 Bauart.....: Unterer Abbrand
 Leistung.....: 20 KW
 Luftzufuhr.....: 1 Ventilator (Zuluft), Auftrennung in
 Primär- und Sekundärluft

Schnittbild:



- 1 Brennholzraum
- 2 Vergasungszone
- 3 Glutzone
- 4 Feuerfeste Schamottierung
- 5 Trockenzone
- 6 Brennkammer
- 7 Heizflächen
- 8 Rauchrohranschluss

Figur 5.10 Handgestookte installatie voor grote stukken hout, werkend volgens het principe van omgekeerde verbranding (Zwitserland)

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

In landen waar meer hout beschikbaar is dan in Nederland zijn de ovens vaak wat geavanceerder. Gemiddeld zijn de vermogens echter niet groter dan in Nederland. Dat installaties in typische “houtlanden” wat beter van constructie zijn, kan mede worden veroorzaakt doordat de energie-opwekking met hout daar al lange tijd aandacht heeft. Bij het verbranden van afvalhout is energiewinning niet het enige doel; ook het vermijden van stortkosten is van belang. Hierdoor is de aandacht voor vergaande optimalisatie van de energie-opwekking minder.

Wanneer dit inderdaad het geval is, biedt dat aanknopingspunten voor reële verbetering van de situatie in Nederland.

6 Nieuwe ontwikkelingen

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op nieuwe ontwikkelingen bij houtverbrandings- en rookgasreinigingsinstallaties. Daarbij gaat het om een signalering van werkelijke toegepaste (deel)systemen, danwel om pilotsystemen juist vóór hun toepassingsfase. Indien bekend, zijn tevens emissies en prijsindicaties van de installaties opgenomen. Prijsvergelijkingen zijn daarbij meestal niet mogelijk, omdat het soms alleen gaat om de brandermodule en soms om complete installaties, inclusief rookgasreiniging.

6.1 Verbrandingssystemen

Uit deze paragraaf zal duidelijk worden dat op het gebied van verbrandingssystemen nog veel kan worden verbeterd. Dit is belangrijk, omdat dit bijna de enige manier is om zonder grote kostenverhogingen verbeteringen tot stand te brengen. Het gaat dan namelijk vaak vooral om beter doordachte constructies, waarbij vooral kennis en inzichten op het gebied van chemische en fysische processen die zich tijdens het verbranden afspelen, inclusief stromingstechniek, beter worden benut. De belangrijkste nieuwe ontwikkeling op dit gebied betreft die van getrapte verbranding.

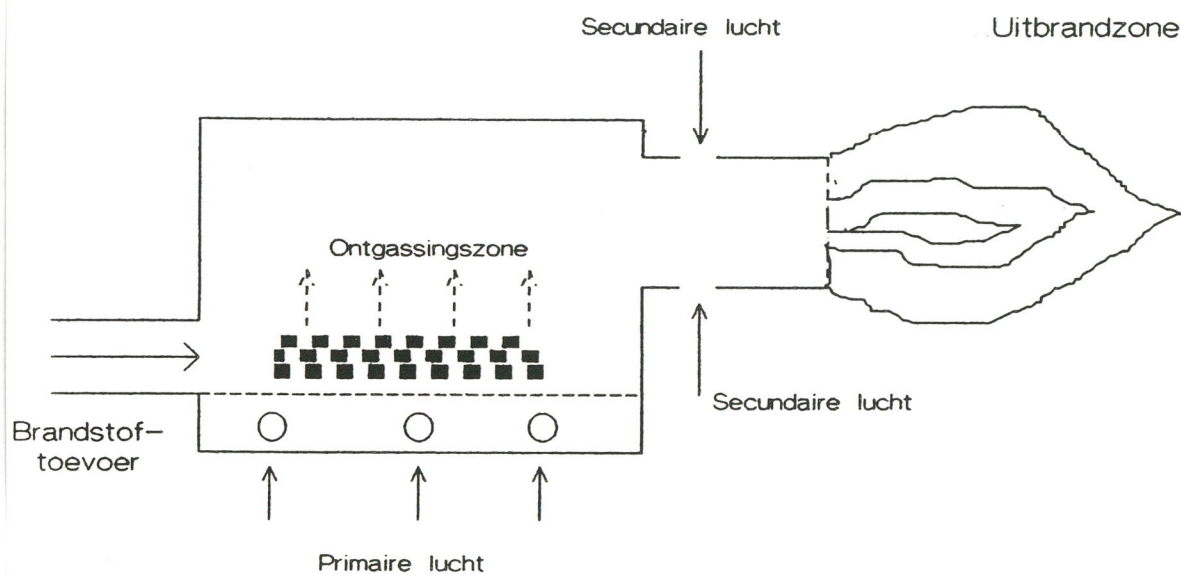
6.1.1 Getrapte verbranding

Getrapte verbranding is een techniek om vaste stoffen beter gecontroleerd te kunnen verbranden. In de eerste trap wordt de vaste stof in contact gebracht met een ondermaat lucht ($\lambda \approx 0,5$ à $0,8$). Deze hoeveelheid lucht zorgt ervoor dat het niet-vluchtige gedeelte van de brandstof verbrandt; daardoor wordt tevens voldoende warmte opgewekt om de stof te ontgassen. De ontstane gassen worden in de tweede trap door extra luchttoevoeging verbrand ($\lambda_{\text{tot}} \approx 1,5$). Doordat de menging in de tweede trap goed kan worden beheerst (beter dan wanneer de vaste stof in één stap wordt verbrand) kan een goede verbranding worden bereikt. Verder bestaat in principe de mogelijkheid, de tweede verbrandingsstap eveneens getrap uit te voeren, bijvoorbeeld om de NO_x -productie te beperken (op deze wijze ontstaat een drie- (of meer-)trapsverbrandingssysteem).

Voor optimale procesbeheersing moeten de verschillende trappen ruimtelijk gescheiden worden uitgevoerd. Dit is echter niet strikt noodzakelijk.

Door de betere beheersing van het verbrandingsproces kunnen lagere emissies en hogere rendementen worden gerealiseerd dan bij conventionele technieken. De constructie van de installatie is wat complexer, echter in beperkte mate.

Figuur 6.1 geeft een schema van een installatie die volgens dit principe werkt.

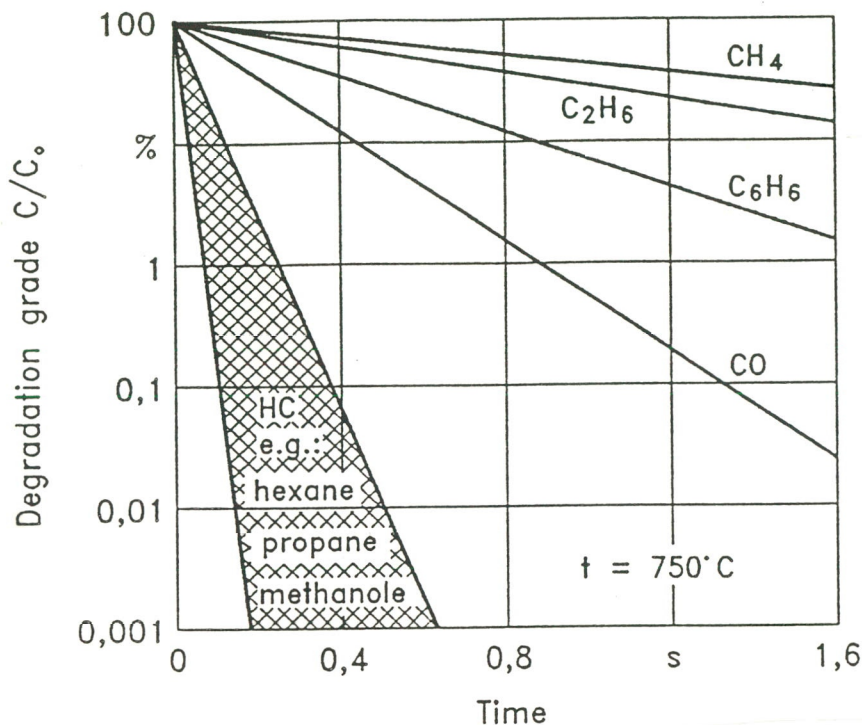


Figuur 6.1 Principeschema tweetrapsverbranding; de compartimenten voor de verschillende verbrandingsstappen zijn hier ruimtelijk gescheiden

Een technische uitvoeringsvorm van getrapte verbranding is gerealiseerd door **Rainer Marutzky**, Fraunhofer Institut, Braunschweig, Duitsland [43].

Ten aanzien van getrapte verbranding merkt Marutzky op, dat een stabiele vergassing kan worden bereikt door het realiseren van een constante brandstofstroom, in combinatie met een constante en geoptimaliseerde primaire luchttoevoer. Om instabiliteit van het verbrandingsproces bij vermogensveranderingen te vermijden, moet de verbrandingsruimte niet te groot zijn.

De nog te oxyderen gassen bevatten een hoge concentratie aan CO, koolwaterstoffen en aromaten. De thermische stabiliteit van deze componenten is hoog. Daarom zijn hoge oxydatietemperaturen en voldoende lange reactietijden nodig (figuur 6.2). Voortijdige afkoeling van deze gassen moet worden voorkómen.



Figuur 6.2 Thermische stabiliteit van een aantal gascomponenten

De reacties in de oxydatiezone kunnen worden gevolgd door het meten van temperatuur, CO, en O₂ of CO₂. Aanbevolen wordt om tenminste twee van deze parameters te meten ter observatie van het verbrandingsproces.

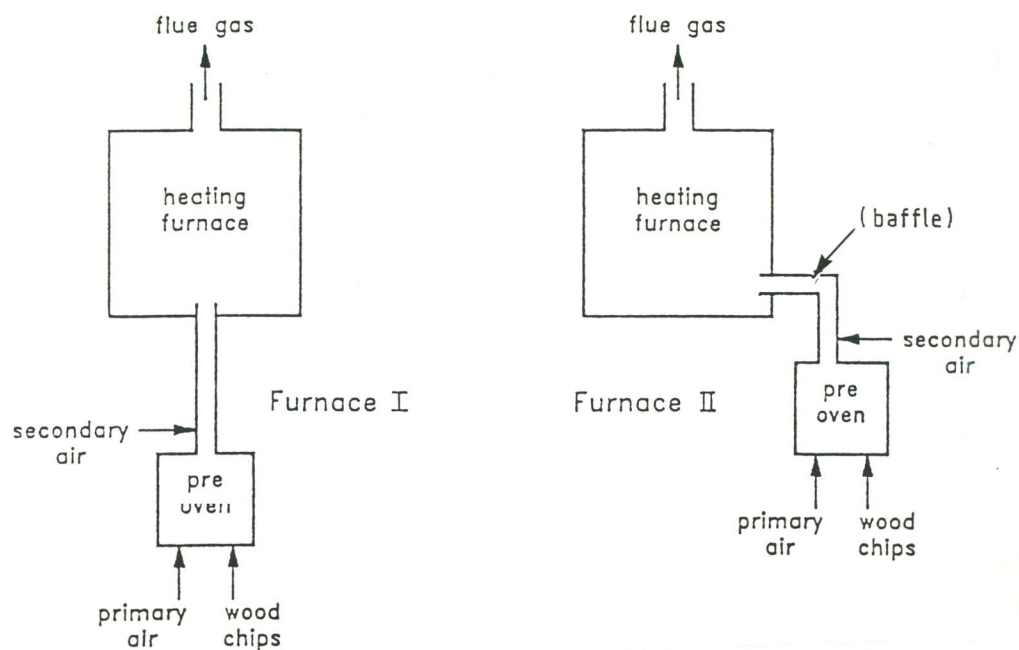
De viscositeit van gassen neemt toe met de temperatuur. Dit verschijnsel vraagt om speciale voorzorgsmaatregelen in de tweede (en hogere) trap. Turbulentiezones zijn noodzakelijk om een intensieve menging van gas en verbrandingslucht te verkrijgen. Dit kan tot stand komen door het plaatsen van baffels (keerschotten) of door de verbrandingsruimte als wervelkamer te ontwerpen (figuur 6.4 en 6.5). Tabel 6.1 geeft een voorbeeld van wat een verbeterde menging kan opleveren; figuur 6.2 geeft summier aan op welke wijze deze verbetering is gerealiseerd.

Tabel 6.1 Emissies van een twee-traps verbrandingsinstallatie
Brandstof: naaldhout chips met een vochtigheid van 60 à 70%

		Installatie I ²⁾	Installatie II ²⁾	
Carbon monoxide	CO	2420	89	mg/m ³ ¹⁾
Hydrocarbons	HC	98	15	mg/m ³
Nitrooxides	NO _x	231	225	mg/m ³

¹⁾ gecorrigeerd voor een emissieconcentratie van 13%

²⁾ voor specificaties, zie figuur 6.2



Figuur 6.3 Schematische weergave van een tweetraps installatie
 Installatie I met een recht oxydatiekanaal
 Installatie II met een oxydatiekanaal voorzien van een 90° keerschot

6.1.2 Cyclonic ("cyco") Combustor van D&C Engineering B.V. te Alblasterdam

De cycloon brander is ontworpen voor het verbranden van allerlei afval, waaronder biomassa. Wat betreft de afmetingen van de brandstof moet gedacht worden aan stukken hout tot br. 40 x 10 x 10 cm.

Werking

Verbranding vindt plaats in drie trappen, in een dubbelwandige, geïsoleerde verbrandingsruimte vervaardigd van hittebestendig metaal.

De eerste trap betreft vergassing in een kuipvormig rooster. Deze wordt gevolgd door de tweede trap: verbranding van de ontstane gassen. Dit laatste vindt plaats boven het rooster plaats, onder toevoeging van secundaire verbrandingslucht. De derde trap van de verbranding vindt tenslotte plaats in een zogenaamde wervelkamer onder toevoeging van tertiaire lucht.

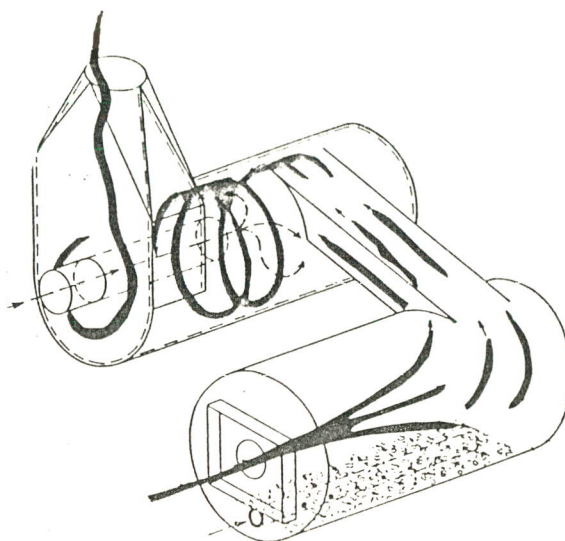
In deze derde trap kan de temperatuur lokaal oplopen tot 1600 °C. De constructie van de wervelkamer zorgt voor rotatie van de rookgassen, waardoor vaste deeltjes worden gescheiden en afgevangen in de verbrandingsruimte. Asresten vallen door het verbrandingsrooster en worden automatisch afgevoerd.

De primaire lucht wordt onder het rooster aangevoerd en is continu instelbaar. De secundaire en tertiaire verbrandingslucht wordt voorverwarmd in de dubbele wand.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

De installatie kan geleverd worden tot een capaciteit van 15 MWth; het systeem bevindt zich nog in de beproevingsfase (juli 1992).

In figuur 6.4 is schematisch het werkingsprincipe van de cyclone brander weergegeven.



Figuur 6.4 Principeschema van de cyclonische verbrander van D&C Engineering, Alblasterdam

Emissies

Aan de proefinstallatie van de Cyco combustor zijn door Intronplan emissiemietingen uitgevoerd.

Het ingesteld vermogen bedroeg 4 MWth.

De gemiddelde waarden van de emissies [9], gemeten over twee dagen, kunnen als volgt worden weergegeven:

- CO₂ 7,6 [%];
- O₂ 13 [%];
- CO 32 [mg/m³ ind. 11% O₂];
- C_xH_y 2,8 [mg/m³ ind. 11% O₂];
- NO_x 192 [mg/m³ ind. 11% O₂];
- stof ~ 55 [mg/m³ ind. 11% O₂].

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

De prijs van een installatie van 5 MWth wordt door D&C geschat op circa kfl 1.000 exclusief BTW [7].

In deze prijs is ingecalculeerd:

- Cyco verbrander;
- aanvoerband met hopper;
- SDF stoomketel 7.5 t/h verzadigd;
- rookgasreiniging;
- ventilator;
- rookgaskanalen + schoorsteen;
- regelapparatuur, montage en in bedrijf stellen.

De energiekosten betreffen voornamelijk het elektriciteitsverbruik van circa 75 kWth geïnstalleerd vermogen, en enig gasverbruik van de ondersteuningsbrander totdat de ketel op temperatuur is gebracht.

Evaluatie

De werking van de Cyco brander is gebaseerd op getrapte verbranding. Nieuw is de constructie van de verbrandingsruimte, met name de cyclonische uitbrandkamer die een werveling van de afgassen teweeg brengt. De temperatuur in de kern van deze kamer kan volgens de fabrikant tot 1600 °C oplopen¹⁾. Door deze hoge temperatuur en de goede menging in de cyclonische verbrandingskamer treedt een goede verbranding op.

De verblijftijd is minder dan de 1,5 seconde, die in het algemeen nodig wordt geacht [7]. Bij voornoemde hoge temperatuur zou dat echter geen bezwaar zijn.

De installatie is overigens niet specifiek voor houtverbranding ontworpen.

De ontwikkeling van een geheel uit metaal opgebouwde verbrandingsinstallatie kan als bijzonder worden beschouwd. Welk technische of economische voordelen hieraan verbonden zijn is onbekend. De levensduur van zo'n constructie zal in de praktijk moeten blijken.

De emissies van CO en C_xH_y, respectievelijk 32 en 2,8 mg/m³ ind. zijn voor houtverbranding bijzonder laag; zij liggen factoren (gemiddeld een factor 10) lager dan wat bij de conventionele installaties tot nu toe werd gevonden. De stofemissie (55 mg/m³ ind.) is, zeker gezien de afwezigheid van enige rookgasreiniging, eveneens laag.

Hoewel deze emissiewaarden laag zijn, worden nu al nog verdergaande verbeteringen gerealiseerd. Bij proeven in een installatie van 7,5 MWth worden thans CO en C_xH_y emissies bereikt van ca. 1 mg/m³ ind (11% O₂) [46].

Of dergelijke lage waarden ook in een praktijkinstallatie zullen worden gerealiseerd, zal nog moeten blijken.

Het NO_x-gehalte van de rookgassen ligt in dezelfde orde van grootte als bij conventionele installaties.

¹⁾ De auteur acht deze temperatuur uitzonderlijk hoog. Denkbaar is dat het hier slechts een lokaal optredende temperatuur in de uitbrandzone betreft.

6.1.3 Biocomb Cyclone burner

De Biocomb cyclone brander is een op zichzelf staande brandermodule; in principe is hier voortgeborduurd op de reeds bestaande moffelbrander. De installatie wordt geleverd door het Zweedse bedrijf Biocomb Limited. Dit bedrijf heeft een vertegenwoordiging in Engeland, Biocomb International. Momenteel zijn in Engeland en Zweden een aantal installaties met een Biocomb brandermoduul in gebruik [38].

Werking

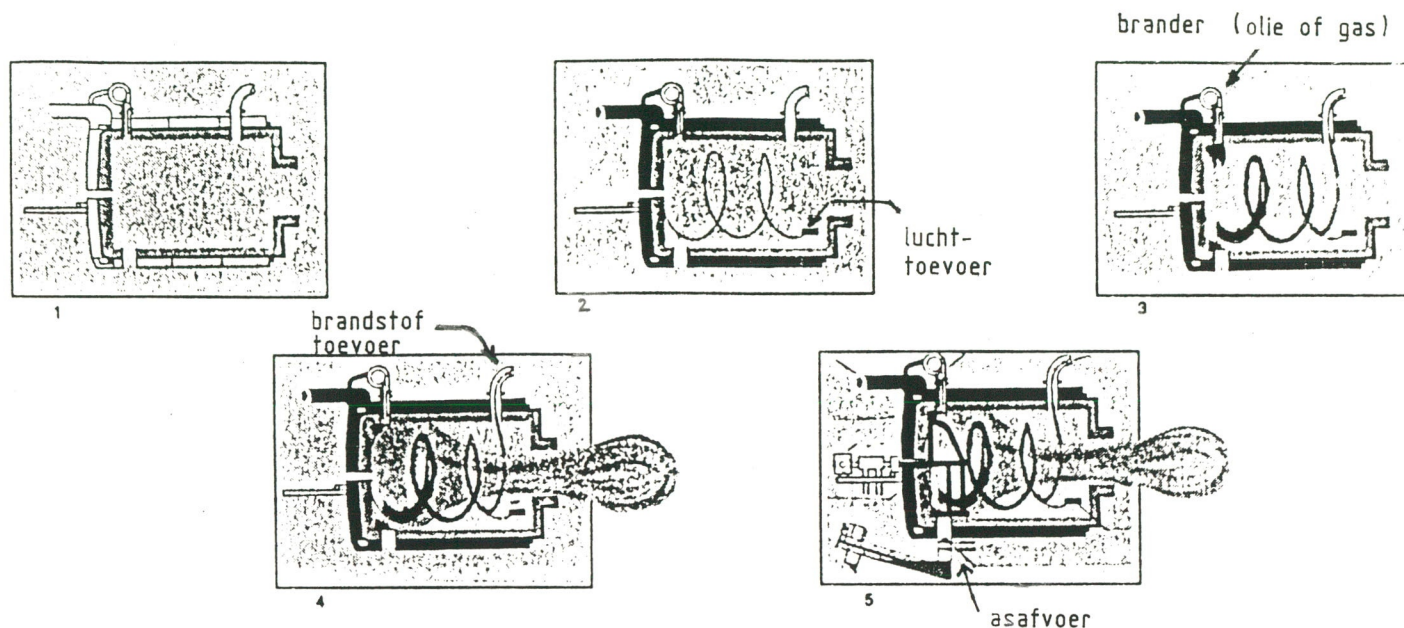
De brandermodule bestaat uit een cylinder, die voorzien is van een keramische bekleding. Bovenop, aan de voorzijde van de brander, is een ontstekingbrander aangebracht. De brandstof wordt eveneens aan de bovenzijde, aan de achterkant van de brander, tangentiaal ingeblazen.

De verbrandingslucht wordt aan de onderkant, aan de achterzijde van de brander, tangentiaal toegevoerd. Brandstof en verbrandingslucht mengen en bewegen zich naar de voorzijde van de brander, waar de verbranding plaatsvindt. De afgassen bewegen zich door het midden van de spiraal naar de uittredeopening van de brander. Door een nauwkeurige lucht- en brandstofregeling is een terugregeling tot 30% van de max. capaciteit mogelijk.

De as wordt automatisch afgevoerd.

In figuur 6.5 is de werking van de brandermodule schematisch weergegeven.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland



1 De verbrandingskamer is dubbelwandig en van staal vervaardigd met een binnenzijde van vuurvaste bemetseling.

2 De verbrandingslucht wordt toegevoerd via de omkasting van de verbrandingskamer en tangentiaal ingebracht. Voor de regeling van de hoeveelheid lucht zijn twee kleppen aangebracht. Door de luchtregeling ontstaat een krachtige spiraalvormige beweging langs de binnenzijde van de wand van de verbrandingskamer.

3 Het in gebruik nemen van de brander vindt plaats door ontsteking van een aangebouwde olie of gasbrander, waarbij de capaciteit wordt opgevoerd tot ongeveer 1/3 - 1/2 van het vermogen van de BIOCOMB brander.

4 Na enige tijd op olie te hebben gebrand, wordt het afvalproduct toegevoegd door een eveneens tangentiaal geplaatste aansluiting. In de verbrandingskamer komen de spiraalvormige luchtstroom en de afvalstroom samen en bewegen naar de achterzijde van de brander waarna verbrandingsgassen zich door het midden van de spiraal naar de uitreedopening van de brander verplaatst. Door de hoge snelheid van zowel lucht als brandstof is een goede menging verzekerd.

5 De as die tijdens de verbranding vrijkomt, slaat neer op de achterzijde van de brander. Door middel van een watergekoelde schrapper wordt de as van dit branderdeel verwijderd en naar buiten afgevoerd. Een kleppensysteem zorgt ervoor dat de as periodiek in een waterslot komt en vandaar via een schroeftransport in een opslagvat.

Figuur 6.5 Werkingsprincipe van de Biocomb Cycloonbrander

Het systeem is volgens opgave geschikt voor een vochtgehalte van de brandstof tot 30%; bij hogere vochtgehaltes is een ondersteuningbrander nodig.

De lengte van de toegepaste stukken brandstof mag ten hoogste 25 mm bedragen; de diameter circa $\varnothing$ 5 mm.

De Biocomb branders worden geleverd met een vermogen van 0,8, 1,25, 2,0, 3,0, 4,0, 5,0 en 6,0 MWth.

Door Biocomb zijn emissiecijfers verstrekt. Gezien de grote spreiding van de CO en stofemissie en ontbreken van gegevens over de procesomstandigheden zijn deze cijfers niet in het rapport opgenomen. Als richtgetal voor de emissie van NO_x kan ten hoogste 160 mg/m^3 ind. 11% O_2 worden aangehouden [38].

Prijsindicatie

De prijs voor een 3 MWth, Biocomb brandermoduul alléén ligt tussen de kfl 300 en 400 exclusief BTW [Björn Vall, Biocomp International Limited England].

Voor de toevoer van brandstof en lucht is elektrische energie nodig; tevens zal de ondersteuningbrander kleine hoeveelheden olie of gas verbruiken.

Evaluatie

De Biocomb brander is een vrij nieuwe ontwikkeling. Dit betreft met name het idee van het toevoeren van brandstof en lucht in een schroefvormige beweging (cycloon) rondom de vlamkern (figuur 6.5.4 en 6.5.5). Welke verbrandingstechnische eigenschappen dit systeem bezit kan vooralsnog niet worden beoordeeld. Uit [7] is op te maken dat de verblijftijd in het verbrandingsgedeelte minder dan 1 s bedraagt, bij een temperatuur van 1000 °C¹⁾. Deze verblijftijd is vrij kort; desgewenst bestaat echter de mogelijkheid om de verbrandingskamer te verlengen.

Een voordeel van deze installatie is de grote regelbaarheid van het vermogen²⁾ en de door zijn compactheid snel te realiseren vermogensveranderingen. Het is niet bekend of de brandstof wordt ingeblazen danwel geïnjecteerd. Door injecteren voorkomt men dat extra verbrandingslucht met de brandstof meekomt; verbrandingslucht wordt dan alleen via de luchtventilator toegevoerd.

Samenvattend kan worden gesteld dat de Biocomb een compacte brandermodule is. Het verbrandingsprincipe kan voor een voldoende hoge temperatuur in de verbrandingsruimte (> 850 °C) zorgen; de menging zal naar verwachting goed zijn. Vraagtekens kunnen worden geplaatst met betrekking tot de verblijftijd van de afgassen in de verbrandingsruimte. Het valt te betwijfelen of de voor volledige verbranding vereiste verblijftijd van 1,5 seconden, ook na verlenging van de verbrandingskamer, gehaald kan worden. De schetsjes tonen een ideale situatie; in de praktijk zal de brandstof gedeeltelijk recht door de vlam vallen, wat zal resulteren in een kortere verblijftijd, een hoger percentage onverbrand en hogere emissies.

De onderhoudskosten zullen laag zijn door de afwezigheid van draaiende delen.

6.1.4 Verbrandingsinstallatie van The Belgian Incinerator Company

The Belgian Incinerator Company N.V., in Nederland vertegenwoordigd door Handelmaatschappij Steven & Co. B.V., brengt een installatie op de markt die bestemd is voor het verbranden van afvalstoffen, variërend van ziekenhuisafval tot kunststof-, hout- en rubberafval. In België en Engeland zijn reeds een aantal installaties in bedrijf.

¹⁾ De auteur acht dit een nogal hoge schatting van de temperatuur.

²⁾ Volgens opgave van de fabrikant met een factor 3.

*Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland***Werking**

De installatie (figuur 6.6) bestaat uit een verbrandingskamer in een draaiende trommel (4) en ascontainer (5), een uitbrandkamer (6), scrubber (7), decanteertank (8), filterpers (9) en schoorsteen (10). De componenten 7, 8 en 9 behoren niet tot de standaarduitrusting.

Het systeem berust op het principe van getrapte verbranding.

Voordat de brandstof in de roterende trommel terechtkomt, vindt pyrolyse/vergas-sing plaats in een stationaire pyrolyseruimte. Vervolgens komt de ontgaste brandstof in de roterende trommel, waar verdere verbranding plaatsvindt. De primaire verbrandingslucht en de rookgasstroom zijn tegengesteld aan de brandstofstroom (De warmte, nodig voor pyrolyse en ontgassing wordt aan de rookgassen onttrokken). De gassen uit het pyrolyse/vergasingsproces verbranden, onder toevoeging van secundaire lucht, in de naverbrandingskamer. De rookgassen stromen vervolgens in een scrubber waarin ze worden gereinigd; daarna stromen de rookgassen in de schoorsteen. Het door de scrubber verwijderde vuil wordt afgevangen in een decanteertank en vervolgens tot een compacte massa geperst.

De asresten worden door de schuine opstelling van de draaiende trommel naar een ascontainer afgevoerd.

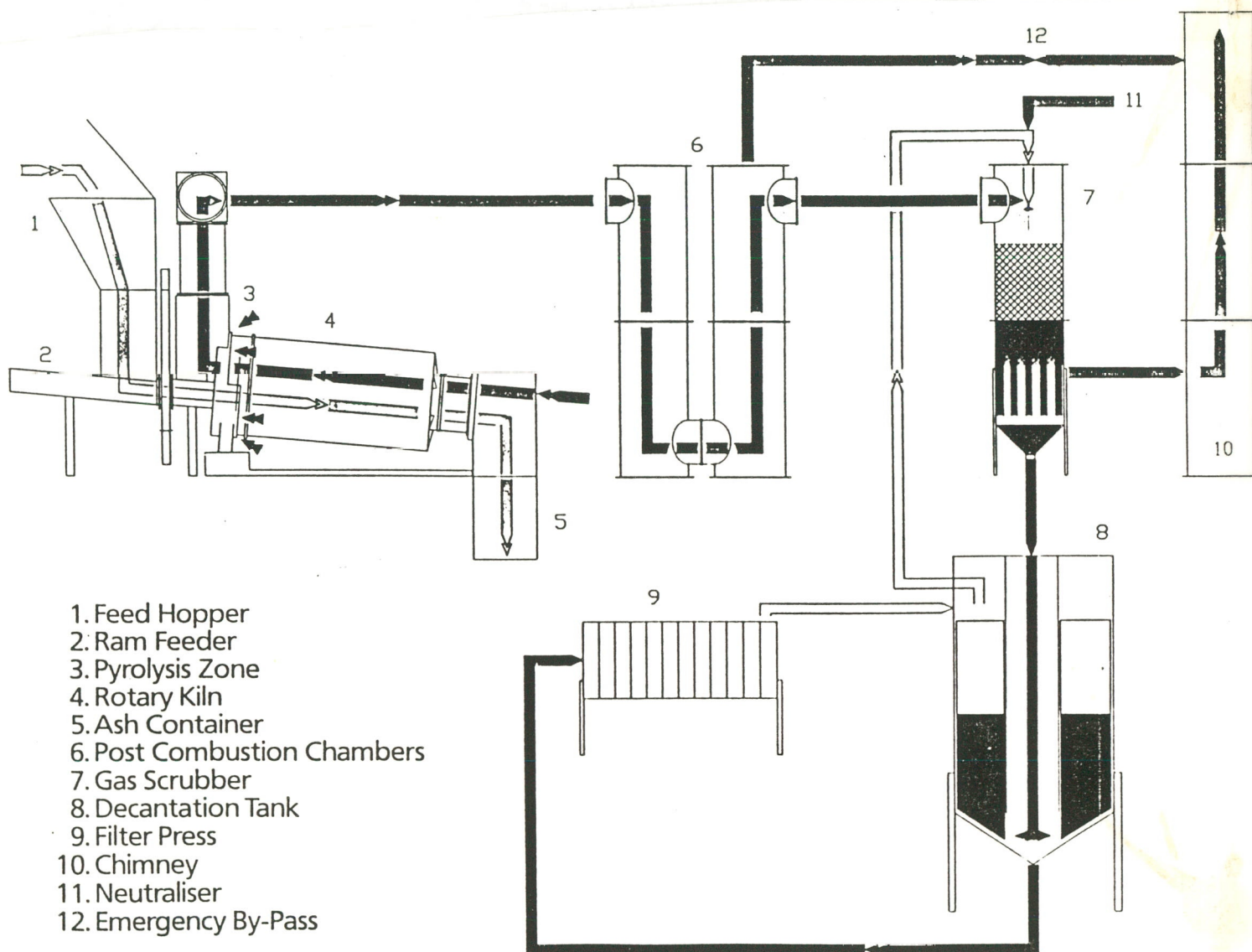
Over emissies zijn door de fabrikant geen gegevens verstrekt.

Kosten

De kosten voor een complete 3 MWth installatie (van brandstofvoeding tot schoorsteen) zijn circa kfl 3500. Dit is aan de hoge kant en voor kleinschalige verbranding zeer waarschijnlijk onhaalbaar.

Stand der techniek

De installatie is **niet** nieuw op de markt, maar staat nog niet in Nederland. Hij wordt tot nu toe echter veelal toegepast voor de verbranding van onder andere ziekenhuisafval. Verbranding van hout in een dergelijke verbrandingsinstallatie is wél nieuw. Over de verbrandingskwaliteit en emissies bij houtverbranding is voor deze installatie niets bekend. Een voordeel ten opzichte van andere getrapte verbrandingssystemen is vermoedelijk de betere menging van brandstof en lucht, door de draaiende trommel. Belangrijk is hierbij wáár de lucht wordt toegevoerd. Geschat wordt, dat het rookgaszijdig rendement in de orde grootte ligt van 80%.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland


Figuur 6.6 Principeschets verbrandingsinstallatie Belgian Incinerator Company

Omdat de installatie vooral bestemd is voor vernietiging van stationaire stromen afval zijn de mogelijkheden tot vermogensregeling beperkt. Elektriciteits- en onderhoudskosten kunnen hoog uitvallen, respectievelijk vanwege het motorvermogen van de draaiende trommel en de bewegende delen.

Samenvattend kan gesteld worden dat de installatie vooral bij constante warmtevraag geschikt kan zijn voor de verbranding van houtafval.

6.1.5 De Vyncke verbrandingsmodule

Speciaal om tot lagere emissies te komen wordt thans door Vyncke B.V. een verbrandingsmodule ontwikkeld, en wel onder de naam "Combi-Turbox-Combustor" (CTC). De module kan zonder meer onder een bestaande dretreks-vlampijpketel worden geïnstalleerd (figuur 6.7).

Werking van de CTC brandermodule

Het werkingsprincipe berust op een combinatie van onderschroeven en inblazen (injecteren) van de brandstof, en wel onderschroeven voor de grove delen en inblazen voor de fijnere fractie. Door een speciale constructie (onbekend welke) komt bij het inblazen van een brandstof slechts weinig lucht mee. Eveneens onbekend is, hoe scheiding van grove en fijne fractie plaatsvindt.

Het systeem berust op getrapte verbranding. De ingeschroefde brandstof komt uit in een kuipvormig rooster. In de eerste fase wordt een ondermaat aan voorverwarmde primaire verbrandingslucht boven de brandstofkuip toegevoerd, waardoor de brandstof ontgast en onvolledig verbrandt. Daarna worden, onder toevoeging van voorverwarmde secundaire en tertiaire lucht, de gassen volledig verbrand. De CO katalysator geldt voorlopig als een optie; hier wordt nog onderzoek aan uitgevoerd. De rookgassen worden gerecirculeerd om de lucht voor te verwarmen.

Ontassing vindt nu nog handmatig plaats; men zoekt naar een methode voor automatisering.

Emissies

Aan de nieuwe CTC installatie zijn emissiemetingen uitgevoerd. Voor een installatie van 2 MW_{th}, gestookt met beuken of eiken met een vochtigheid van circa 10%, zijn de volgende emissies gemeten:

(gecorrigeerd voor 11% O₂):

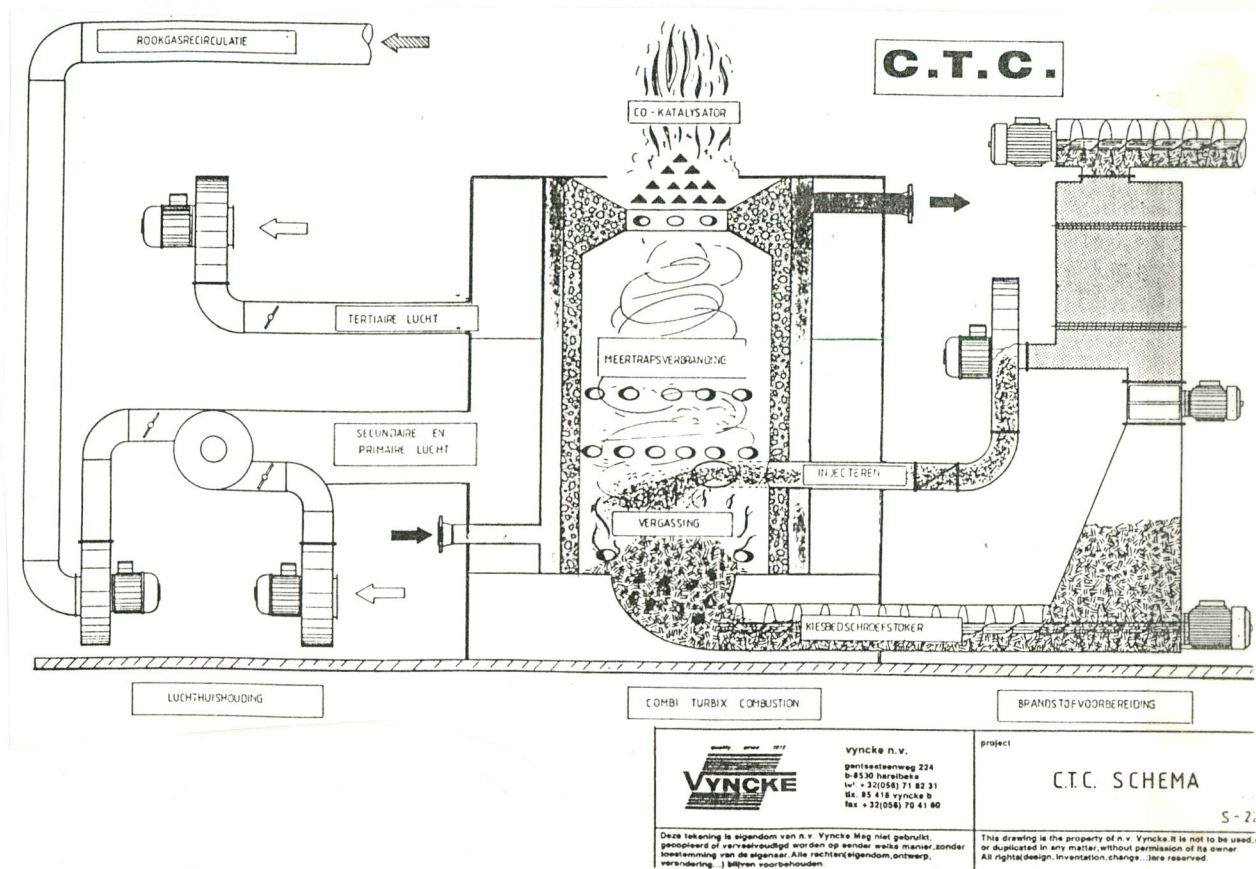
— CO	31	mg/m ³ ind.;
— C _x H _y	10	mg/m ³ ind.;
— NO _x	259	mg/m ³ ind.;
— stof	117	mg/m ³ ind.

Meting, sturing en regeling

Te zamen met deze nieuwe ontwikkeling op brandergebied heeft Vyncke een aantal afzonderlijke meet-, stuur- en regelmodulen op de markt gebracht. Daarbij bestaat de keuze van uitsluitend registratie tot en met volledige computergestuurde regeling, sturing van vermogen en verbrandingskwaliteit.

Informatie over de terugregelmogelijkheden is nog niet beschikbaar.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland



Figuur 6.7 Werkingsschema Vyncke-verbrandingsinstallatie

Prijsindicatie

Basisinstallatie 2 MWth	kfl. 150
ketel,	
verbrandingskamer,	
schroefstoker,	
ventilator.	
Multicycloon	34
Controlekast	18
	kfl. 202

Optie:

CTC module (watergekoeld)	kfl. 95
meet-stuur-regelgedeelte	kfl. 29

Evaluatie

Ook bij deze installaties valt de ontwikkeling van de richting van getrapte verbranding op.

Een voordeel van deze brandermodule is de mogelijkheid van onderbouw bij bestaande Vyncke ketels. Ditzelfde geldt ook bij andere fabrikanten (onder andere Biocomb).

De verwijdering van as die nu nog handmatig plaats vindt kan als een nadeel worden beschouwd; verbetering op dit punt is gewenst.

De emissies van CO en C_xH_y zijn laag ten opzichte van conventioneel gestookte installaties. NO_x en stof zijn niet beduidend lager. Het voordeel van onderschroeven en inblazen ten opzichte van onderschroeven alléén komt niet direct tot uiting in emissievermindering. Installaties met rookgasrecirculatie ten behoeve van voorverwarming van de verbrandingslucht zijn, voor zover bekend, elders nog niet beschikbaar.

Evenals bij de CYCO-combustor van D&C worden aan de CTC-installatie thans proeven uitgevoerd om tot verdere emissieverlaging te komen.

Op dit moment zijn 4 installaties in België operationeel; verder zijn 3 installaties aan Duitsland en 1 aan Nederland (Hoechst Holland N.V.) verkocht [40].

6.1.6 PYROS verbrandingsinstallatie

Door het Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich en de Zwitserse firma HOVAL is een prototype van een automatische houtverbrandingsinstallatie ontwikkeld, waarbij de pyrolyse-, reductie- en verbrandingszone consequent gescheiden zijn uitgevoerd ("Schnitzelfeuerung") ([6], figuur 6.8).

Bij het ontwerp zijn de volgende criteria in acht genomen:

- een terugregelbaarheid van het vermogen met circa een factor 5 (voor het prototype tussen 20 en 100 kWth);
- een kleine thermische traagheid ter bevordering van een snelle vermogensaanpassing;
- lage produktiekosten (onder andere zelfdragende constructie).

Voor regeling van de verbrandingskwaliteit is de Pyros voorzien van een zogenaamde oxisonde, die de secundaire en tertiaire lucht afhankelijk van belasting en verbrandingskwaliteit regelt.

Bij de Pyros spelen de processtappen drogen, pyrolyse/vergassen, ontsteken en verbranden zich af in separate ruimten (kamers). Deze bevinden zich in een metalen cylinder, die bekleedt is met keramisch materiaal.

De metalen cylinder bevat (zie figuur 6.8):

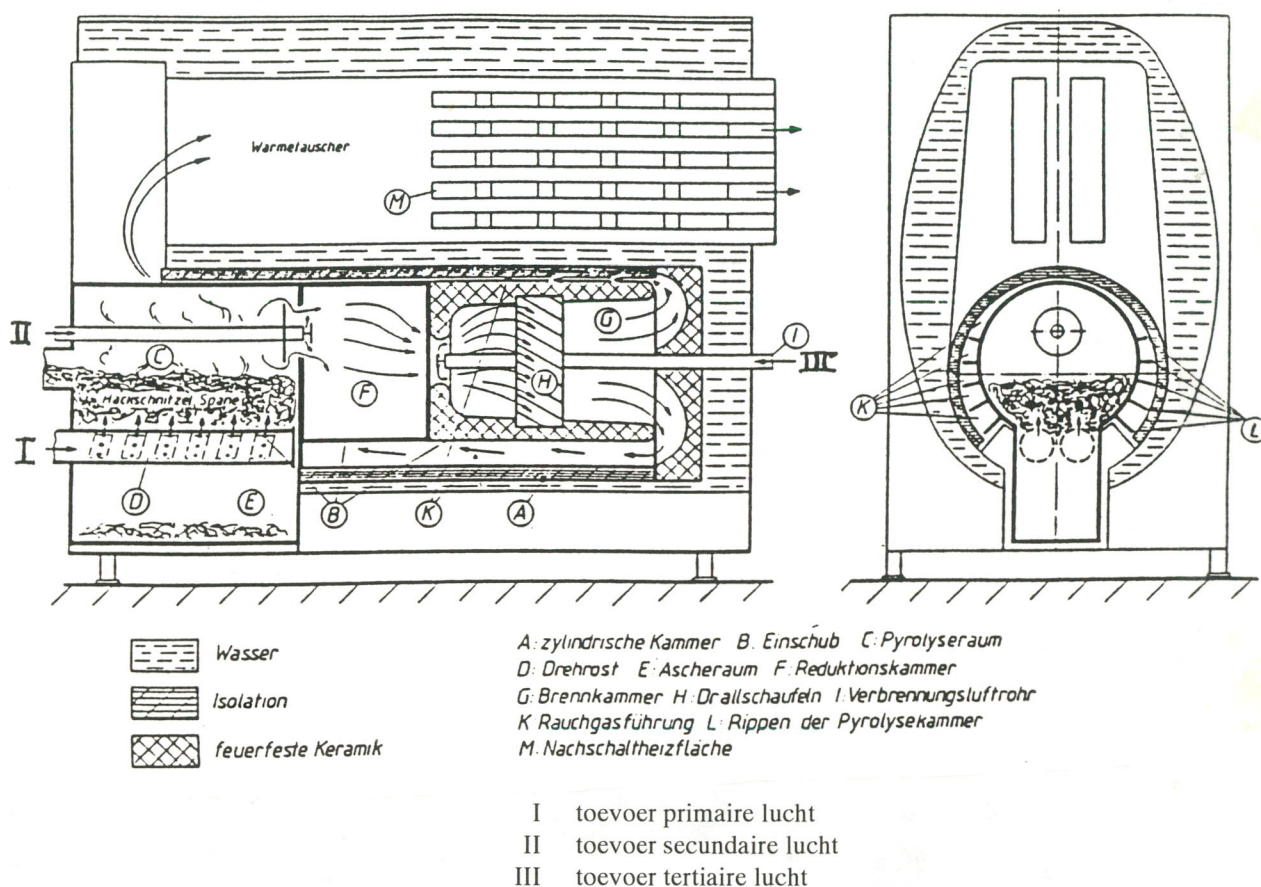
- de pyrolyse/vergassingskamer (C);
- de reductiezone (F), gericht op reductie van NO_x ¹⁾;
- de verbrandingskamer (G).

¹⁾ De werking daarvan is tot nu toe bij de PYROS-installatie niet bevredigend aangetoond (tabel 6.2); in andere gevallen echter wel [45, 46].

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

De pyrolysekamer is door een speciaal rooster (D) nagenoeg gasdicht afgescheiden van de asruimte (E). Het rooster bestaat uit tegen elkaar indraaiende buizen die aan de bovenkant zijn voorzien van een asschraper.

Deze constructie dient om het aandeel onverbrand te beperken. De luchtdosering voor de vergassing van het resterende houtskool vindt plaats door de buizen. Tijdens bedrijf wordt de pyrolysekamer verwarmd door de afgassen afkomstig uit de verbrandingskamer (G). Teneinde de warmteoverdracht naar de pyrolysekamer te bevorderen is de buitenkant van de installatie voorzien van ribben (L).



Figuur 6.8 Principeschema "Pyros" verbrandingsinstallatie

Emissies

De emissies, die met de Pyros prototype-installatie werden bereikt, zijn weergegeven in tabel 6.2. Blijkens deze tabel kunnen CO-emissies worden bereikt van $< 10 \text{ mg/m}^3$ ind. en stofemissie variërend van 0 tot 5 mg/m^3 ind ($11\% \text{ O}_2$). De installatie was **niet** uitgerust met een cycloon of andere reiniger.

C_xH_y en PAK's zijn niet gemeten maar kunnen, gezien de lage CO-emissies, eveneens laag uitvallen.

De NO_x emissie is echter niet lager dan bij conventionele toestellen. Mogelijkerwijs komen lokaal temperaturen voor boven de 1400°C , waardoor de vorming van thermische NO_x mogelijk wordt. Op dit punt wordt door ETH Zürich verder onderzoek uitgevoerd. Onder meer zal de verblijftijd verlengd worden door het tussenbouwen van een extra kamer [6].

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Tabel 6.2 Emissies van de "Pyros" verbrandingsinstallatie
(lab. opstelling, 100 kWth)

P [kWth]	CO [mg/m ³ ind]	NO _x [mg/m ³ ind]	Stof [mg/m ³ ind]	λ ¹⁾	Vocht [%]
100			6		38
70	≤10	~280		~2	38
40	≤10	~250		~2	38
20			4		38
10	~50	~150		~2	38
100			1		14
70	≤10	~290	0	~1,8	14
40	≤10	~180		~2	9
20			5		14
10	≤1000	~140		~2,3	9

¹⁾ λ = luchtvermaat

Evaluatie

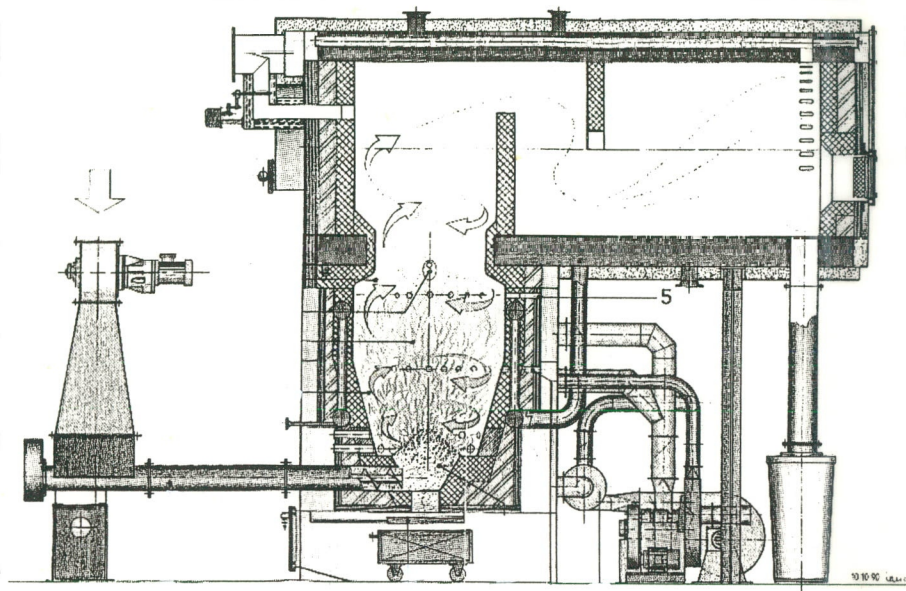
Vooral de emissie van stof is extreem laag; mede omdat geen stofafvangst wordt toegepast, is dit een opvallende prestatie. Ook de CO-emissie is laag. De Pyros is nog niet produktierijp; het is een prototype met beperkte capaciteit. Opschaling zal mogelijk nog de nodige problemen met zich meebrengen; de emissieresultaten moeten daarom voorzichtig worden geïnterpreteerd.

Met de Pyros proefinstallatie is aangetoond dat ook met houtverbranding lage emissies haalbaar zijn.

6.1.7 Moffel-inblaasvuurhaarden

Moffel-inblaasvuurhaarden zijn een jaar of 20 bekend; zij worden vooral gebruikt als het stofaandeel van de brandstof minstens 50% bedraagt en de grootte van de deeltjes ligt tussen 10 en 30 mm. Draaglucht fungeert als transportmiddel van de brandstof. Een olie- of gasbrander is nodig om de temperatuur in de verbrandingskamer in stand te houden. De installaties worden meestal toegepast voor grotere vermogens (> 5 MWth).

Hoewel dit principe allang bestaat, is het in feite nooit goed ontwikkeld op het punt van energie-optimalisering. Daarom zijn nu in Duitsland een aantal installaties gebaseerd op dit principe als demonstratieprojecten opgezet.



Figuur 6.9 Verticale moffel-cycloon inblaasvuurhaard (Weiss) [33]

Bij de fa. Schaffitzel Küchenmöbelwerke in Schwäbisch Hall-Sulzdorf is door Weiss een moffel-cycloon verbrandingsinstallatie (circa 1 MWth) opgesteld (figuur 6.9). Nieuw aan deze installatie is de verticale verbrandingskamer. Deze zou tot betere uitbrand moeten leiden dan een horizontale. Voorts wordt bij dit ontwerp de brandstof niet ingeblazen maar ingeschroefd, waardoor geen overtollige lucht wordt meegevoerd.

De tangentielle primaire luchttoevoer geeft een roterend effect van lucht en brandstof in de vuurhaard, hetgeen tot een goede menging leidt. De brandstof hoopt zich in de brandstofkorf op tot een omgekeerde afgeknotte kegel. Op het hoogste punt daarvan bevinden zich primaire luchtinlaten.

Bij deze installatie worden rookgassen eveneens gerecirculeerd - maar nu voor koeling van de vuurhaard en om slakvorming te voorkómen. Dit laatste omdat de temperatuur in de verbrandingskamer hoog is.

De installatie is volgens [33] voorzien van geavanceerde meet- en regelapparatuur (geen details bekend) en is computergestuurd.

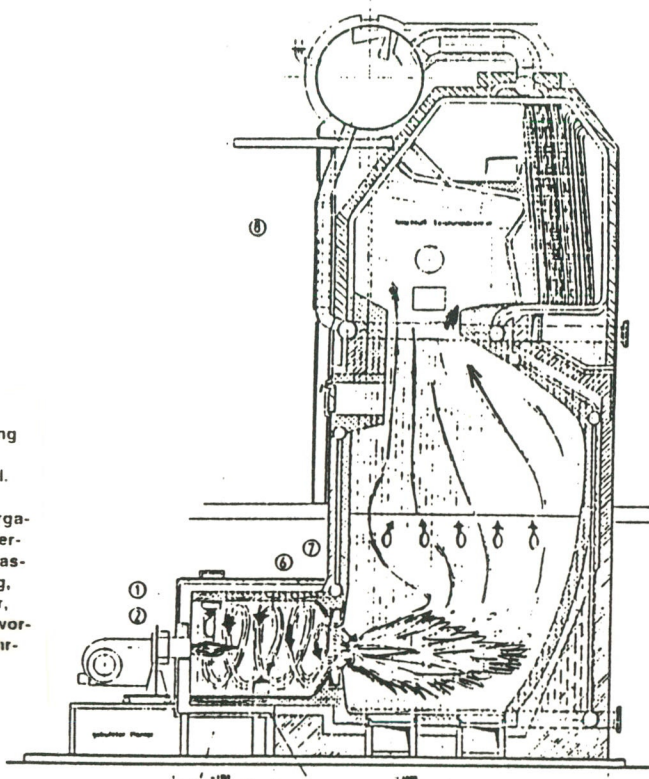
Emissiecijfers van deze installatie ontbreken. Volgens [33] bedraagt de zuurstofconcentratie van de afgassen 4%. Daaruit kan worden afgeleid dat de installatie wordt bedreven met een luchtvermaat van ongeveer 1,2. Dit is voor houtverbranding zeer laag. Het behaalde rendement ligt op circa 90% ([33]).

De installatie is uitgerust met een elektrofilter.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Lambion figuur 6.10 [34] heeft een horizontale cycloonbrander op de markt gebracht die onder bestaande ketels gebouwd kan worden. De primaire lucht wordt tangentiaal ingebracht; de brandstof wordt ingeblazen aan het begin van de vuurhaard. Secundaire en tertiaire lucht worden radiaal ingeblazen. Ook bij deze installatie worden de rookgassen teruggevoerd om de vuurhaard te koelen, teneinde slakvorming te voorkómen.

Muffeleinblasfeuerung
In Kombination mit
einem Wasserkessel.
1 Primärluftzufuhr,
2 Spänezufuhr, 3 Vergasung
und partielle Verbrennung,
4 Rauchgaszufuhr, 5 Entschung,
6 Sekundärluftzufuhr,
7 Tertiärluftzufuhr, 8 vorhandener
Wasserrohrkessel



Figuur 6.10 Horizontale moffel-cycloon inblaasvuurhaard (Lambion)

Een installatie als hierboven omschreven (8 MWth) staat opgesteld bij de fa. Alnö-Möbelwerke, Pfullendorf. Oberschwaben, Duitsland. Hieraan zijn de volgende emissies gemeten:

- O₂ 5-7%;
- CO 50-100 mg/m³ ind.;
- C_xH_y 0-10 mg/m³ ind.;
- NO_x 350-450 mg/m³ ind.;
- stof 5 mg/m³ ind. (doekenfilter).

Pilot Plant Cycloon moffel-inblaas, Bad Tolz

In Bad Tolz is door Tischlerplatwerk van de Pfeider Industrie recentelijk een stoomketelinstallatie in gebruik genomen met twee horizontale, parallel opgestelde cycloon moffel-inblaas verbrandingsmodulen (merk onbekend). De installatie is voorzien van 3 silo's [34].

De turn down ratio ligt in de orde grootte van 1:3; bij gebruik van één brander 1:8 (regelprincipe niet bekend).

Bij gebruik van twee silo's met spaanplaatafval en de derde met schoon naald- en loofhout zijn de volgende emissies gemeten:

- O₂ 9 %;
- CO 11 mg/m³ ind.;
- NO_x 309 mg/m³ ind.

Evaluatie moffelovens

Gezien de onbekendheid met moffelovens in Nederland kan slechts een voorzichtig oordeel worden gegeven. De emissies, zoals gemeten in Bad Tolz zijn vrij laag. Het NO_x gehalte bij zowel de Lambion als Bad Tolz is hoger dan normaal en wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het hogere gehalte aan gebonden stikstof in de brandstof (spaanplaat!).

De turndown ratio bedraagt 1:3. Bij uitschakelen van een brander kan een turn-down van 1:8 worden gehaald.

6.1.8 Awina Industrie Anlagen GmbH, Gmunden (Oostenrijk)

Door Awina Industrie Anlagen GmbH, Gmunden (Oostenrijk) is een verbrandingsinstallatie ontwikkeld (getrapte verbranding) waarbij de brandstof (chips) door een vleugelrad wordt aangevoerd. Hierdoor wordt de brandstof gelijkmatig verdeeld over een keramisch rooster. Bij dit systeem komt slechts weinig transportlucht mee.

Een luchtdoseersysteem zorgt voor een gelijkmatige verdeling van de primaire verbrandingslucht. Tevens wordt op verschillende posities boven het brandstofbed secundaire en tertiaire lucht ingeblazen.

Voor regeling van de verbrandingslucht wordt een oxisonde gebruikt, die de zuurstofconcentratie in de rookgasstroom meet. Op basis daarvan wordt de toevoer van verbrandingslucht geregeld. Dit meetprincipe zal zich, aldus de fabrikant, nog moeten bewijzen. Volgens Stürmer [28] is de oxisonde nog niet betrouwbaar. Momenteel wordt geëxperimenteerd met meting van meer dan één component; op deze basis zijn betere functionerende regelprincipes mogelijk.

Nieuw is ook de vermogensregeling van deze verbrandingsinstallatie (hetzelfde principe als bij Pyros). Dit meetprincipe is gebaseerd op het temperatuurverschil tussen in- en uitlaat van de ketel, en debiet. Het daaruit berekende vermogen fungeert als meetgrootte voor de brandstofdosering (het principe is vrij duur).

Volgens Awina kan dit systeem tot 3.5 MW_{th} worden gebouwd, desgewenst met een stappenloze vermogensregeling van 1:5. Praktische ervaring met dit regelprincipe is nog niet opgedaan.

Emissies zijn momenteel nog niet bekend.

6.2 Verbrandingsinstallaties met een vergassingsstap

In het voorgaande is herhaaldelijk sprake geweest van getrapte verbranding - waarbij eerst pyrolyse en ontgassing plaatsvindt en vervolgens verbranding van de char en van de gassen. Die getrapte verbranding kon eventueel in verschillende ruimten plaatsvinden, maar het verbrandingsproces was toch één onlosmakelijk geheel.

In deze paragraaf worden systemen besproken, waarin de brandstof, voor zover mogelijk, vergast wordt; daarna wordt het aldus geproduceerde stookgas verbrand. Het essentiële verschil is dus dat de vergassingsstap ruimtelijk is losgekoppeld van de verbrandingsstap. Het stookgas kan dus worden afgevoerd om het elders, bijvoorbeeld in een verbrandingsmotor, te gebruiken. Dit laatste gebeurt (nu nog) niet, omdat de daarvoor benodigde reinigingsstap te duur is.

Het gaat hier dus om volwaardige vergassingsinstallaties, gevolgd door een verbrandingssysteem.

Door de Duitse firma's Arcus-Recycling-System GmbH (in Nederland vertegenwoordigd door Labshop) en Wamsler Umwelttechnik GmbH, worden verbrandingsinstallaties met een vergassingsstap op de markt gebracht (figuur 6.10 en 6.12).

Werking

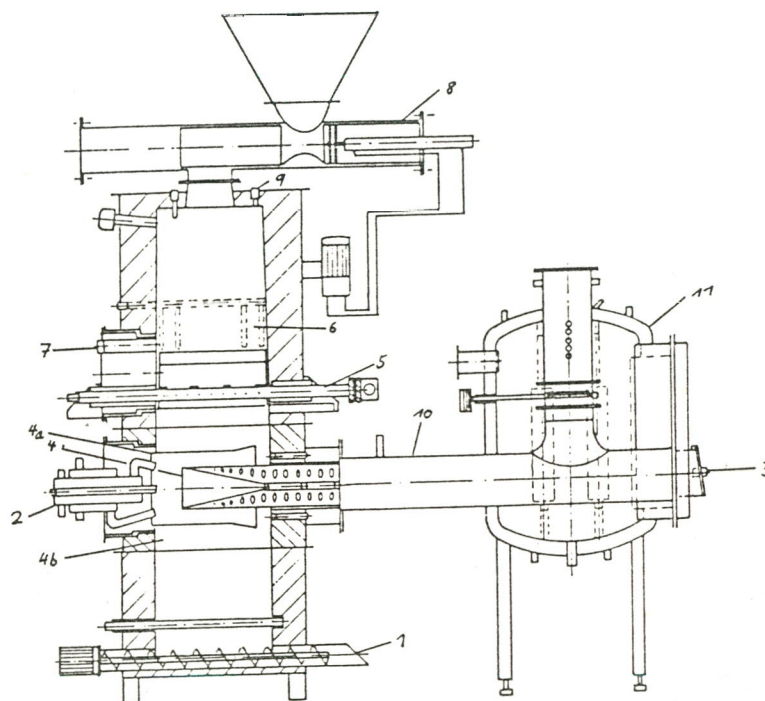
De vergassers zijn beide uitgevoerd volgens het meestroomprincipe, en zijn onderverdeeld in:

1. *Drogingszone*
In deze fase wordt de brandstof voorverwarmd tot 100 à 250 °C.
2. *Ontgassingszone*
Met een ondermaat lucht wordt de brandstof thermisch ontleed in vaste en gasvormige componenten. De temperatuur varieert daarbij tussen de 250 en 400 °C.
3. *Vergassingszone*
Onvolledige oxydatie van de koolstof tot CO met een ondermaat lucht bij een temperatuur tussen 400 en 800 °C.
4. *Oxidatiezone*
Oxideren van de gassen met een overmaat lucht bij 1000 à 1400 °C.

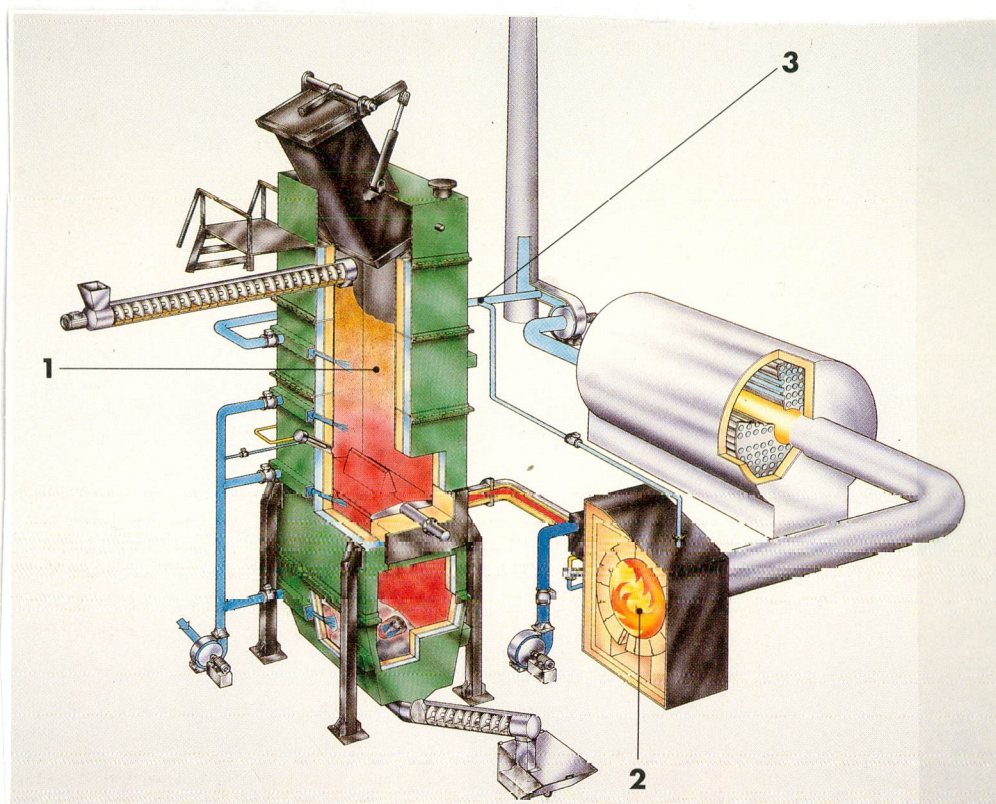
Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

1. Entaschung
2. Stützbrenner
3. Explosionsklappe
4. Inneres Flammrohr
- 4a. Äußeres Flammrohr
- 4b. Brennkammer
5. Rüttelrost
6. Vergasungsraum
7. Zündbrenner
8. Beschickungsanlage
9. Druckausgleichsrohr
10. Abgasrohr
11. Wärmeaustauscher

1. Ash removal
2. Auxiliary burner
3. Explosion door
4. Internal flame tube
- 4a. External flame tube
5. Vibrating grate
6. Gasification chamber
7. Ignition burner
8. Feed system
9. Pressure equalising tube
10. Flue gas pipe
11. Heat exchanger



Figuur 6.11 Verbrandingsinstallatie met vergassingsstap (Arcus)



Figuur 6.12 Verbrandingsinstallatie met vergassingsstap (Wamsler)

Bij de Arcus wordt het geproduceerde gas direct in de installatie geoxydeerd, terwijl dit bij de Wamsler in een cycloonbrander buiten de installatie plaatsvindt. Dit laatste biedt de mogelijkheid om vaste deeltjes door de centrifugaalwerking van de brander uit de gasstroom te verwijderen. Voorts bestaat ook de mogelijkheid de rookgasstroom vooraf, door tussenbouw van een filter, van deeltjes te ontdoen. Zowel bij Arcus als bij Wamsler wordt de as automatisch verwijderd.

Emissies

Wamsler claimt [19] dat door dit principe toe te passen lagere emissies kunnen worden bereikt dan bij het conventionele verbranden (tabel 6.3).

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Tabel 6.3 Gemiddelde waarden Wamsler vergasser (11% O₂ ind) [19]

P [MWth]	CO ₂ [%]	CO [mg/m ³]	C _x H _y [mg/m ³]	NO _x [mg/m ³]	Stof [mg/m ³]
0.35	9.8	< 10	< 1	circa 150	70-130

6.3 Kleinschalige opwekking van elektriciteit

In Nederland leidt verbranding van afvalhout vooral 's zomers tot een warmteoverschot. In dat geval kan elektriciteitsproductie interessant zijn. Opwekken via stoom/turbine/generator is bij de kleine vermogens waar het hier om gaat economisch echter niet aantrekkelijk.

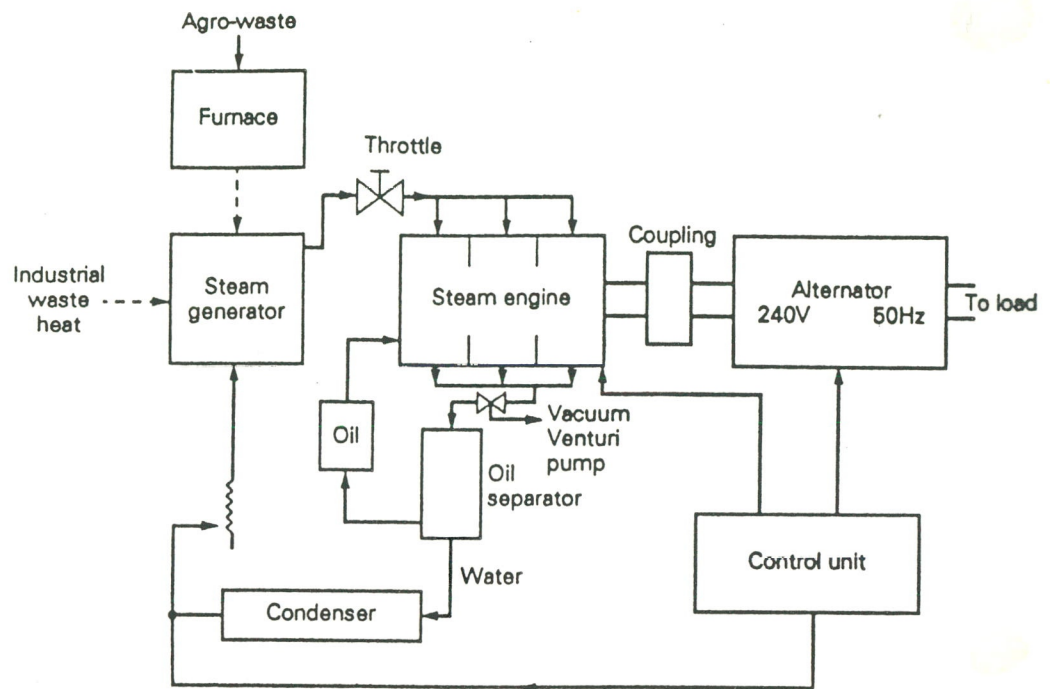
Op het gebied van kleinschalige elektriciteitsopwekking spelen thans echter de introductie van de stoommotor en de Stirlingmotor. Deze technieken zijn niet nieuw; door de toegenomen behoefte aan diversificatie van energiebronnen krijgen zij echter hernieuwde aandacht.

Stoommotor [35]

De stoommotor is in feite een stoommachine met een toerental boven 500 omw./min; overigens zijn er geen kenmerkende verschillen. De techniek is reeds vele jaren bekend en uitontwikkeld. Door het lage rendement van de stoommotor was toepassing bij elektriciteitsopwekking tot nu toe niet interessant.

Het "Energy Research Centre, Research School of Physical Sciences, Australian National University, Canberra" heeft deze techniek echter weer opgepakt en maatregelen genomen om het rendement te verbeteren. Door onder andere het verbeteren van de smering zijn de wrijvingsverliezen verlaagd; tevens is het rendement verbeterd door toepassing van een verbeterd zuigerontwerp. Verder wordt economisch met afgewerkte stoom (condensor) omgegaan. Voorts is het gebruik van de installatie geoptimaliseerd door toepassing van moderne regeltechnieken (welke technieken zijn gebruikt is niet aangegeven).

De installatie zoals in figuur 6.13 is weergegeven is in principe ontworpen voor het opwekken van elektriciteit met vermogens tot 500 kW.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland


Figuur 6.13 Principeschema kleinschalige elektriciteitsopwekking met stoommotor

Voor al door de lage onderhoudskosten en de goede beschikbaarheid van onderdelen (onderdelen van dieselmotoren zijn te gebruiken) blijken derde wereldlanden interesse te tonen voor dergelijke installaties. Echter ook voor ontwikkelde landen kan de installatie van betekenis zijn.

Volgens [35] is het volgende onderhoud nodig:

- elke 1000 uur controle en eventueel bijstelling kleppen;
- elke 6000 uur vervanging van de klepzittingen.

De totale levensduur van de stoommotor wordt geschat op 30 jaar.

Enkele kenmerken van de installatie zoals in figuur 6.13 is weergegeven:

— aantal cilinders	3	4	[-]
— as-vermogen	39	52	[kWth]
— netto vermogen	32	43	[kWth]
— verbranding zaagsel	100	120	[kg/h]
— thermisch vermogen	~400	~530	[kWth]
— prijs	90	110	[\$ *10 ³]
— gewicht (plant+container)	2750	3000	[kg]

Hier blijkt uit, dat het rendement ook nu nog slechts in de orde van 10% ligt. Hoewel niet in de publikatie vermeld, zal de stoommotor met oververhitte stoom moeten worden bedreven. Dit brengt hoge temperaturen met zich mee; daardoor kan carterolie gaan verkoken, en dit kan onder andere tot zuiger- en cilinderschade

leiden. De gegevens over de maatregelen voor rendementsverbetering zijn overigens summier; meer informatie is nodig alvorens uitspraken te doen over concrete toepasbaarheid.

Stirlingmotor

De Stirlingmotor is een heteluchtmotor; hij stamt al uit 1816. In de motor zelf vindt geen verbrandingsproces plaats. Door extern opgewekte warmte (hoe die wordt opgewekt doet in eerste instantie niet ter zake) wordt gas in een cylinder van de Stirlingmotor verwarmd. Het zet dan uit, waardoor de zuiger in beweging wordt gebracht en bewegingsenergie vrijkomt, die onder andere voor het opwekken van elektriciteit kan worden gebruikt.

De praktische toepassing van de Stirlingmotor is aanzienlijk vertraagd door afdichtings- en materiaalproblemen. Het ziet er naar uit dat deze problemen nu op zijn gelost.

In Nederland wordt de motor vertegenwoordigd door Stirling Motors Europe (SME), Den Haag. SME onderwerpt thans een aantal van deze motoren aan een testprogramma.

Volgens SME (Ir. P. Verheij), wordt momenteel in samenwerking met een Duits bedrijf (ARCUS) gewerkt aan een afvalvergassings/-verbrandingsinstallatie die gekoppeld is aan een Stirlingmotor, ten behoeve van warmte-krachtopwekking).

Door het Center for Appropriate Technology and Social Ecology, Langenbruck, Switzerland (Christian Gageauf) wordt momenteel op laboratoriumschaal een Stirlingmotor beproefd. Doel is de opwekking van elektriciteit. Als warmtebron fungeert een met houtchips gestookte verbrandingsinstallatie van circa 40 kWth. De resultaten zijn volgens Gageauf zeer bevredigend.

Gezien het vroege stadium van ontwikkeling is nu nog niets te zeggen over de economische haalbaarheid.

6.4 Rookgasreiniging

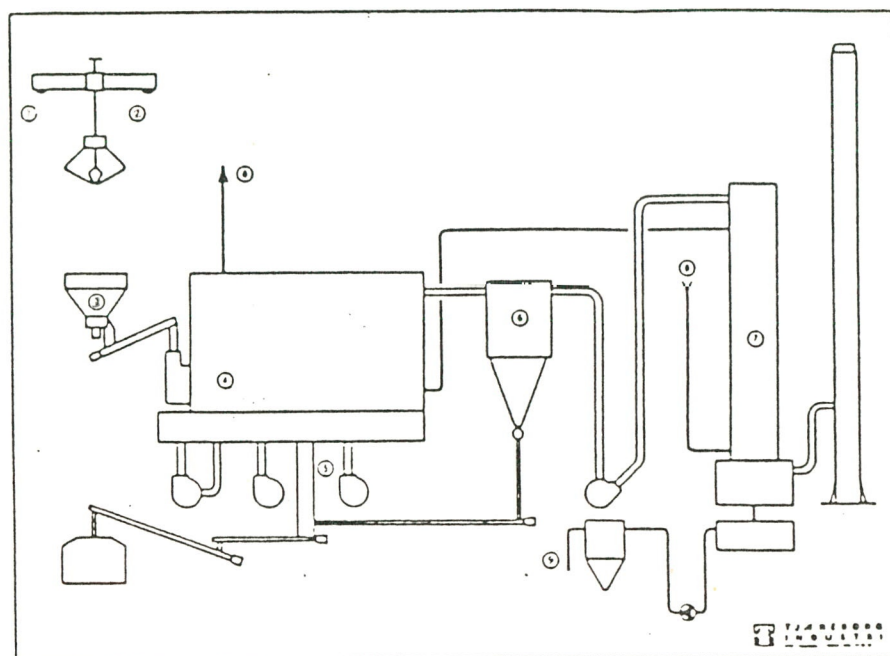
6.4.1 Rookgascondensatie

Door het Danish Institute of Forest Technology [12] is gedurende 7 maanden een met chips gestookte verwarmingsinstallatie gevolgd (figuur 6.14). Het bijzondere van deze installatie is dat de latente warmte in de rookgassen door condensatie wordt teruggewonnen (Het principe kan worden vergeleken met dat van de moderne HR-ketel). Dit heeft geleid tot rendementsverhoging; bovendien is een reductie van de stofemissie bereikt. Het nominaal geïnstalleerd vermogen van de installatie is 4,65 MWth (4 MWth boiler, 0,65 MWth koeler).

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

Aan de installatie zijn emissiemetingen uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn:

— O ₂	12	%;
— CO	500	mg/m ³ ind. 11% O ₂ ;
— NO _x	200	mg/m ³ ind. 11% O ₂ ;
— stof	17	mg/m ³ ind. 11% O ₂ .



TECHNICAL DESCRIPTION

1. Chips delivered by trucks and unloaded in a closed building.
2. Automatic crane.
3. Duct for transporting chips to the feeder.
4. Chips fed onto the boiler grid to burn out.
5. Slug duct.
6. Multicyclone cleaning the flue gas.
7. The heating energy of the flue gas is used in the flue gas cooler. The flue gas is simultaneously cleaned for dust and other particles.
8. Heated water to and from the consumers.
9. Condensate to sewer system.

The entire plant is operated via an electronic control panel.

Figuur 6.14 Systeem voor biomassaverbranding met stoomproductie, met rendementsverhoging door rookgascondensatie

De rookgassen werden afgekoeld tot 50 °C; het rendement berekend op de onderste stookwaarde (8.107 MJ/kg, bij 51% vocht op gew. basis) bedraagt 105% voor de totale meetperiode.

De bereikte jaarlijkse besparing (bij een stookperiode van 9 maanden) bedraagt ongeveer f 6,-/MWh. De terugverdientijd bedraagt circa 4 jaar.

Evaluatie

De toepassing van rookgascondensatie werkt rendementsverhogend; bovendien worden stofemissies er door verlaagd. De emissies van CO en NO_x zijn niet lager dan bij de conventionele installaties.

6.4.2 Stoffiltering

Wirtschaftliche Verbrennungstechnik (WVT) heeft onlangs twee typen stoffilters op de markt gebracht: een metaalfoliefilter en een keramisch filter. Nieuw aan deze filters zijn de toegepaste materialen; de werking is gelijk aan die van de conventionele textielfilters.

Het *microgeperforeerde metaalfoliefilter* is vervaardigd van chroomnikkelstaal. De aanbevolen bedrijfstemperatuur ligt in de orde van 400 °C en de hoeveelheid reststof wordt gegarandeerd op < 50 mg/m³ ind. Filterinstallaties tot rookgasdebieten van 30.000 m³/h kunnen worden geleverd.

Voordelen van het metaalfoliefilter ten opzichte van doekfilters zijn:

- hoge temperatuurbestendigheid (400 °C); kortstondige overschrijding met 50 à 100 °C is toegestaan;
- geen vonkenvangers nodig;
- geringe drukverliezen;
- ongevoeligheid voor condensatie (komt voor bij de start en bij opnieuw aanslaan van de installatie);
- lage voor reiniging benodigde persluchtdruk door glad filteroppervlak;
- lange standtijd (levensduur circa 5 jaar).

De prijs van een compleet metaalfoliefilter voor een 1,2 MWth installatie ligt op circa kfl 170.

Bruynzeel Potloden B.V. heeft als eerste in Nederland het metaalfoliefilter aangeschaft. Ingebruikname zal op korte termijn plaatsvinden.

Momenteel wordt door WVT gewerkt aan een filter dat gemaakt wordt van een metaal genaamd INOX. Het is bestendig tegen agressieve rookgassen en bezit dezelfde reinigende eigenschappen als het metaalfoliefilter; de prijs zou echter lager komen te liggen.

Het *keramisch filter* heeft een temperatuurbestendigheid tot 850 °C; de stofvangst is gegarandeerd tot < 10 mg/nm³. Het filter is speciaal ontwikkeld voor hoge temperatuur reiniging en voor gebruik bij agressieve stoffen.

Voordelen van het keramisch filter:

- temperatuurbestendigheid tot 850 °C;
- chemische bestendigheid;
- ongevoeligheid voor vonken;
- geen voorafvang of vonkenvanger nodig;
- ondersteuningskorf is niet nodig;
- eenvoudige constructie;
- lage weerstand.

De prijs van het filter is voorlopig nog niet bekend en zal per geval worden beoordeeld. Het wordt thans (juli 1992) nog nergens toegepast.

Evaluatie

Met de introductie van het metaalfoliefilter is een stap in de goede richting gedaan op het gebied van goedkope rookgasreiniging voor stofconcentraties van $< 50 \text{ mg/m}^3$ ind. De bestendigheid tegen hoge temperaturen en de lange standtijd van het filter is ten opzichte van doekfilters het grootste voordeel. De aanschafprijs zal in eerste instantie hoger liggen dan die van een doekfilter. Een doekfilter gaat echter hoogstens twee jaar mee. De praktijk zal echter nog moeten uitwijzen hoe het metaalfoliefilter zich gedraagt.

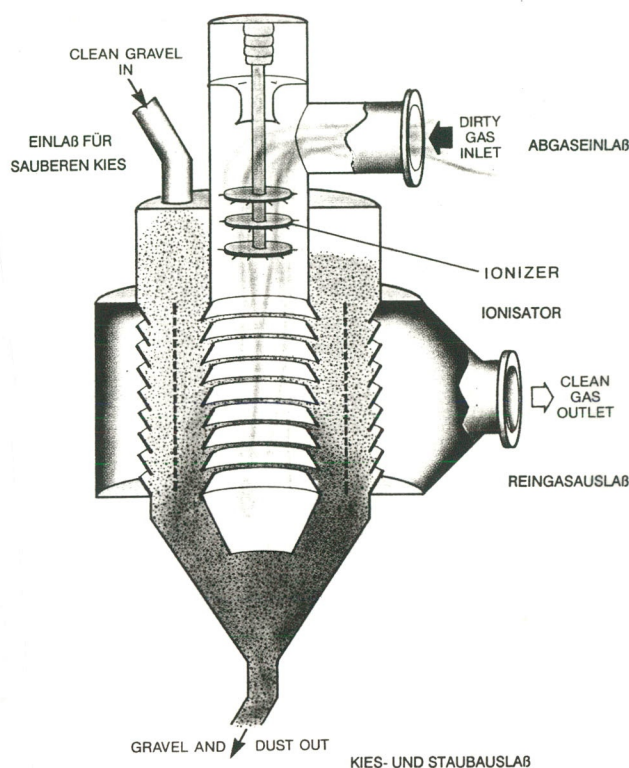
Het keramisch filter kan goede mogelijkheden bieden wanneer lage stofconcentratie ($< 10 \text{ mg/m}^3$ ind.) worden vereist en bij hoge temperaturen. Speciaal voor kleinschalige verbrandingsinstallaties kan de prijs een bezwaar gaan vormen.

Elektro-grindbedfilter

Dit filter is door EFB INC. USA en door Fritz Luftreinhalte-technik GmbH, Duitsland ontwikkeld. Het is bestemd voor met vaste brandstof gestookte installaties met rookgasdebieten tussen de 4.000 en 60.000 m^3/h (actuele kubieke meters). Figuur 6.15 toont schematisch de werking van het filter.

Het filter is gebaseerd op een combinatie van drie afscheidingsprincipes. Het basisprincipe berust op de reinigende werking van een circulerend kiezelbed. Hierdoor worden de rookgassen voor 50 tot 60% van stofdeeltjes ontdaan. Als tweede optie kunnen de kiezels (met behulp van een zich in het bed bevindende hoogspanningselektrode van 10 kV) statisch worden geladen. Die statische lading induceert tegengestelde ladingen in de stofdeeltjes, waardoor deze zich aan het grind vasthechten. Hierdoor wordt nog eens 20 tot 30% punten van de stof afgevangen.

De beide voorgaande opties kunnen worden uitgebreid met het ioniseren van de rookgassen. Dit vindt plaats in het geaarde rookgas-inlaatkanaal. In dit cilindrische kanaal bevinden zich elektroden in de vorm van metalen schijven, die van naalden zijn voorzien. Op deze elektroden wordt een hoge negatieve gelijkspanning aangebracht (30-40 kV) waardoor bij de naaldpunten een corona-ontlading ontstaat. De ionen die daarbij ontstaan laden de stofdeeltjes en aerosolen elektrostatisch op.



Figuur 6.15 Elektro-grindbedfilter

De volgende stofgaranties worden afgegeven:

- grindbedfilter (basisuitvoering) $< 150 \text{ mg/nm}^3$;
- met statisch opladen van het grind $< 50 \text{ mg/nm}^3$;
- met statisch opladen + ioniseren $< 30 \text{ mg/nm}^3$.

Elke volgende stap brengt uiteraard een prijsverhoging met zich mee, zowel in aanschaf als in bedrijfsvoering.

Voor een 1 MWth installatie kost de basisuitvoering circa 100.000 DM. Elke volgende stap kost circa 50.000 DM extra [40].

Evaluatie

Dit is een uitvoeringsvorm van een elektrofilter, waarbij niet, zoals bij een conventioneel elektrofilter, de platen, maar het grind het stof opvangt. Dit brengt een sterke oppervlaktevergroting met zich mee.

Qua vangstrendement is het grindbedfilter in zijn meest uitgebreide vorm vergelijkbaar met een elektrofilter. De claim van de fabrikant, dat minder installatieruimte nodig is, gaat slechts ten dele op, omdat het grindbedfilter in de hoogte is gebouwd. Bovendien is voor vervanging van het gesleten grind in het bed opslagruimte nodig.

Om een stofemissie van 150 mg/m^3 ind. te bereiken is men zowel voor investering als voor onderhoudskosten goedkoper uit met een multicycloon.

7 Mogelijkheden tot emissievermindering

In tabel 7.1 is een samenvatting gegeven van de emissies die respectievelijk met conventionele en met nieuw ontwikkelde installaties worden gehaald. Daarbij gaat het vooral om emissies van automatisch gestookte installaties, omdat die de beste toekomstperspectieven bieden. (Voor zover kon worden nagegaan, zijn er op het gebied van handgestookte installaties nauwelijks nieuwe ontwikkelingen; de informatie over emissies van dit type installaties is schaars).

Tabel 7.1 Vergelijking conventionele en nieuw ontwikkelde rookgasreinigingsinstallatie (concentraties in mg/m^3 ind, gecorrigeerd naar 11% O_2)

Component	Conventioneel		Nieuwe ontwikkelingen (metingen fabrikanten)
	TNO-metingen automatisch gestookt (tabel 4.3)	ETH-metingen automatisch gestookt (tabel 4.4)	
CO	56 - 370	320 - 7500	circa 30
C_xH_y	1 - 65	2 - 730	3 - 10
NO_x	99 - 249	130 - 350	200 - 260
Stof ¹⁾	78 - 230	95 - 280	20 - 100

¹⁾ met cycloon

Uit deze tabel blijkt dat de emissies van de prototypen van nieuwe installaties, met uitzondering van NO_x , lager zijn dan die van conventionele. Globaal geldt:

- CO : verlaging met een factor 10 à 100;
- C_xH_y : verlaging met een factor 5 à 50;
- NO_x : geen verlaging;
- stof : verlaging met een factor 2 à 3.

Hierbij is het Pyros systeem (figuur 6.5) buiten beschouwing gelaten, omdat het daarbij vooralsnog om een prototype gaat en de experimenten zijn uitgevoerd onder ideale laboratoriumomstandigheden. Daarom kunnen deze waarden nog niet als representatief worden beschouwd. De emissies van deze installatie liggen voor CO en stof (zonder cycloon) in de ordegrootte van respectievelijk 10 en 2 mg/m^3 ind. bij 11% O_2 . Voor houtverbranding is dit zeer laag. De NO_x emissie vertoont echter ook bij de Pyros geen noemenswaardige verbetering.

7.1 Technologisch realiseerbare minimum-emissies

De maximaal toelaatbare rookgasemissies van verbrandingsprocessen in het algemeen, dus ook die tengevolge van het verbranden van schoon hout, zijn doorgaans aan grenzen gebonden op grond van door overheidsinstanties gestelde

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

emissie-eisen. Voor de verbranding van schoon houtafval zijn tot dusver geen centrale richtlijnen opgesteld. De Algemene Maatregel van Bestuur voor stookinstallaties noch de Richtlijn Verbranden gelden voor met schoon hout gestookte verbrandingsinstallaties. Per provincie kunnen derhalve emissie-eisen op dit gebied verschillen. Als leidraad werd tot op heden door de provincies in het algemeen de TA-Luft gehanteerd. De criteria [41] die vaak mede bepalend zijn voor de te stellen eisen zijn:

- nieuwe of oude installatie;
- geografische ligging;
- economische overwegingen;
- belasting van het milieu door andere industrieën in de regio.

Het kan dus vóórkomen, dat zelfs de eisen binnen één regio onderling verschillen. Vaak behoeven in het geheel geen emissiemetingen plaats te vinden aan de te beoordelen verbrandingsinstallatie, soms wordt dit wel vereist. Deze onduidelijke situatie is onbevredigend, zowel voor leveranciers als voor gebruikers van houtverbrandingsinstallaties.

In de onlangs verschenen NER (Nederlandse Emissie Richtlijnen [36]) zijn enkele algemene richtlijnen gesteld voor de emissie van stof en NO_x ; deze zijn (m^3 ind; 11% O_2):

Stof: 50 mg/m^3 bij een massastroom $< 0,5$ kg/h; daarboven 25 mg/m^3 ;
10 mg/m^3 als (doek)filters worden toegepast, voor alle
massastromen;
 NO_x : 200 mg/m^3 (bij een massastroom > 5 kg/h).

Vertaalt men deze algemene richtlijn naar de schaalgrootten van houtgestookte installaties dan betekent dit, dat zonder stoffilter een stofemissie tot 50 mg/m^3 is toegestaan voor een vermogen < 5 MWth; bij een hoger vermogen mag de stofemissie slechts 25 mg/m^3 bedragen. De werkelijke stofemissies van houtgestookte installaties zonder filter zullen echter altijd hoger liggen. Wel is met een goedkope reinigingstechniek (multicycloon) een emissie van 100 à 150 mg/m^3 realiseerbaar.

Verder dient, bij alle vermogens, de stofemissie bij aanwezigheid van een stoffilter kleiner te zijn dan 10 mg/m^3 . Deze emissie-eis is technisch goed realiseerbaar. Een filter vereist echter een belangrijke investering.

Vertaling van de algemene NER-richtlijn ten aanzien van NO_x betekent dat geen NO_x -eisen worden gesteld bij een vermogen < 12 MWth; daarboven geldt een maximumgrens van 200 mg/m^3 . De in dit rapport beschouwde installaties voor het verbranden van schoon afvalhout zijn kleiner dan 12 MWth; op grond van genoemde algemene richtlijn zou voor deze categorie dus geen beperking gelden voor de NO_x -concentratie in de rookgassen.

Discussie is gaande [45] om houtverbranding als “bijzondere regeling” in hoofdstuk 3 van de NER op te nemen. In dat kader is het van belang te weten, welke emissiewaarden bij het verbranden van schoon hout realiseerbaar lijken. Onder “realiseerbaar” wordt in dit verband verstaan: bereikbaar met de nieuwste ontwikkelde verbrandingssystemen, met alleen een stofvanger als reinigingstechniek. Wanneer verdergaande rookgasreiniging wordt vereist zijn kleinere verbrandingssystemen vrijwel altijd onrendabel. Verder wordt in dit kader aangenomen dat de installatie modulerend is geregeld, overwegend continu in werking is (zie

ook 3.4.1) en automatisch wordt gestookt. (Hierdoor is tevens aangenomen dat de installatie een grootte heeft van meer dan circa 0,1 MWth, want dat is ongeveer het vermogen waarboven men overgaat op automatisering).

Op basis van de in deze studie verzamelde gegevens worden onder genoemde voorwaarden bij het verbranden van schoon (afval)hout de volgende emissies goed realiseerbaar geacht (tabel 7.2).

Tabel 7.2 Naar verwachting (technisch en economisch) realiseerbare emissies bij industriële verbranding van schoon (afval)hout¹⁾ (in mg/m³ ind; 11% O₂)

CO	< 100	
C _x H _y	< 20	
NO _x	< 250	
Stof {	< 10	met filter (bijvoorbeeld doek of metaalfolie)
	< 125	met multicycloon

¹⁾ in automatisch gestookte installaties (0,1 tot 5 MWth)

De hier ingeschatte “technisch en economisch realiseerbare emissies” zijn hoger ingeschat dan die, welke in tabel 7.1 onder “nieuwe ontwikkelingen” werden genoemd, omdat de laatste aan prototypen zijn bepaald. Bij tabel 7.2 gaat het echter om toekomstige in de praktijk functionerende industriële installaties.

Bovengenoemde haalbaar geachte emissie-eisen gelden alleen voor nieuwe, moderne installaties. In hoeverre bestaande systemen kunnen worden aangepast zal doorgaans per type installatie moeten worden bestudeerd. Ook de mogelijkheden en consequenties van het vermijden van aan-uitschakelen dienen vaak per geval te worden nagegaan.

Verder is het duidelijk dat de emissies van handgestookte installaties hoger zullen zijn dan die van automatisch gestookte installaties.

7.2 Kosten van emissieverlaging

Met de ontwikkeling van nieuwe installaties is duidelijk een verlaging van de emissies ten opzichte van de huidige situatie bereikt. Vooral nog is het moeilijk aan te geven welke kosten hieraan verbonden zijn. Enerzijds komt dit doordat men met verschillende systemen te maken heeft; anderzijds zou men over veel meer informatie moeten beschikken om tot verantwoorde uitspraken te komen. In één geval is een redelijke vergelijking mogelijk. Door Vyncke is een betrouwbare indicatie gegeven waar men met een onderschroefstoker op uit zou komen indien deze vervangen zou worden door een nieuwe installatie met lagere emissies. Uit 4.7.1 blijkt dat een conventionele Vyncke installatie kfl 200 kost. Volgens Vyncke kost een soortgelijke verbeterde, nieuw ontwikkelde installatie

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

kfl 300. Dit betekent een prijsverhoging van 50%, die in feite alleen verbetering van verbrandingssysteem en regeling inhoudt. Rookgasreiniging is daar dus niet bij. Deze schatting is echter aan de conservatieve kant, omdat commercialisering van de nieuwe ontwikkelingen nog niet heeft plaatsgevonden. Op langere termijn acht de auteur daarom een prijsverhoging van ca. 25%, zoals aangegeven in tabel 4.9, waarschijnlijker.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

1. Nederland heeft tot nu toe aan energiewinning uit schoon hout minder aandacht besteed dan typische "houtlanden" als bijvoorbeeld Noorwegen en Zwitserland. De technologie staat daardoor bij ons op een wat minder hoog niveau.
2. Momenteel bestaat tussen de onderzoeken die in Nederland zijn uitgevoerd op het gebied van de houtbalans een aanzienlijke discrepantie; de schattingen variëren van circa 2 tot 3 Mton/jr. Met name de post resthout is niet eenduidig.
3. Het totale potentieel aan schoon + verontreinigd brandhout in Nederland wordt voorlopig geschat op 1,56 Mton/jr, overeenkomende met 25 PJ/jr (0,77 mld m³ aardgas/jr). Dit vertegenwoordigt circa 0,9% van het primaire energieverbruik in Nederland.
4. Het totaal geïnstalleerde vermogen van met schoon hout gestookte installaties in de industrie bedraagt 218 MWth. De hoeveelheid hout die daarin wordt verbrand bedraagt 0,15 Mton/jr (2,4 PJ/jr, of 75 mln m³ aardgas/jr) aan primaire energie. Dit gebruik kan met ca. 0,1 Mton/jr worden vergroot tot ca. 4 PJ/jr met schoon hout dat thans wordt gestort.
5. De hoeveelheid schoon + verontreinigd brandhout die momenteel in Nederland wordt gebruikt ligt in de ordegrootte van 1,3 Mton/jr (20 PJ/jr, 620 mln aardgas/jr); ca. 1 Mton/jr schoon hout daarvan wordt benut in houtkachels in huishoudens.
6. Voor de vermogensrange 0,1 - 5 MWth zijn in de Nederlandse industrie circa 900 met schoon hout gestookte verbrandingsinstallaties geïnstalleerd. Hier van hebben circa 600 installaties een vermogen tussen 0,1 en 0,3 MWth. Boven de 5 MWth wordt geen schoon hout verstoekt.
7. Van de geïnstalleerde installaties in Nederland komen de handgestookte installaties met statisch rooster het meeste voor (600 stuks, in totaal 32 MWth). Van de automatisch gestookte komt het type onderschroefstoker en inblaasverbranding met vlakrooster het meest voor.
8. Belangrijke leveranciers van houtgestookte installaties voor Nederland zijn Vyncke, Kara, WVT, Passat, Weiss, Nolting en Heizomat.
9. Als rookgasreiniging van de verbrandingsinstallaties worden vooral cyclonen toegepast. Behalve cyclonen zijn thans geen andere goedkopere ontstof-fingssystemen ter beschikking. De kleine handgestookte verbrandingsinstallaties zijn niet voorzien van enige rookgasreiniging.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

10. Nieuwe ontwikkelingen bij automatisch gestookte verbrandingsinstallaties zijn voornamelijk gebaseerd op de getrapte verbranding. De ervaringen wijzen erop, dat dit principe mogelijkheden biedt om, ook bij kleinere installaties, vergaande emissievermindering te realiseren. De constructie van dit soort verbeterde installaties is anders, maar niet veel complexer dan die van de thans gangbare.
11. Nieuwe ontwikkelingen op rookgasreinigingsgebied, die perspectieven bieden, zijn:
 - rookgascondensatie (tevens rendementsverbetering);
 - nieuwe doekfiltermaterialen, zoals metaalfoliefilters;
 - kleine elektrofilters of grindbedfilters;
 - katalysatoren.
12. Een juiste regeling van de verbrandingsinstallaties heeft een zeer gunstige invloed op de emissies. Hoewel op dit gebied door fabrikanten reeds onderzoek wordt uitgevoerd, staat dit onderwerp nog in de kinderschoenen.
13. Ontwikkeling naar lagere emissies zal kostenverhogend werken. Omdat de meeste verbeteringen in het proces plaatsvinden zal deze verhoging beperkt kunnen zijn (waarschijnlijk tot 25%).
14. Ten opzichte van een gelijkwaardige gasinstallatie is de terugverdientijd van een houtgestookte installatie thans 2 à 3 jaar. Emissieverlaging als hiervoor aangeduid zal leiden tot terugverdientijden van 3 à 4 jaar.
15. De emissies van de huidige in Nederland aanwezige houtverbrandingsinstallaties, automatisch gestookt, zijn globaal (11% O₂):

CO	60 - 370	mg/m ³ ind;
C _x H _y	1 - 65	mg/m ³ ind;
NO _x	100 - 250	mg/m ³ ind.
Stof	80 - 230	mg/m ³ ind;

Voor handgestookte installaties zijn nauwelijks emissiemetingen bekend; ook zijn daarbij weinig nieuwe ontwikkelingen gesignaleerd.
16. Op basis van de in deze studie verzamelde gegevens worden bij het verbranden van schoon (afval)hout de volgende emissies in principe realiseerbaar geacht (bij 11% O₂).

CO	< 100	mg/m ³ ind;
C _x H _y	< 20	mg/m ³ ind;
NO _x	< 250	mg/m ³ ind.
Stof	{	< 10 mg/m ³ ind met filter;
		< 125 mg/m ³ ind met multicycloon;

Aan emissie van PAK's is tot nu toe geen aandacht besteed.
17. Voor het kleinschalig opwekken van kracht zijn de stoommotor en Stirling motor in de toekomst mogelijk interessant.

8.2 Aanbevelingen

1. Over de hoeveelheid schoon hout die vrijkomt in Nederland bestaat onduidelijkheid. Schattingen variëren tussen 2 en 3 Mton/jr. Het opstellen van een goede houtbalans is in dezen van belang.
2. De stand der techniek bij het verbranden van schoon hout ligt in Nederland gemiddeld iets lager dan in de typische “houtlanden” als bijvoorbeeld Noorwegen en Zwitserland. Hoewel deze achterstand niet zo groot is, verdient de introductie van verbeterde technologie wel aandacht, omdat deze kan leiden tot rendementsverbetering en emissievermindering.
3. Het komt veelvuldig voor dat bij een eenmaal geplaatste installatie door de fabrikant nauwelijks meer zorg wordt besteed aan het goed blijven functioneren daarvan. Vooral omdat dat de meeste beheerders van stookinstallaties niet over voldoende kennis beschikken om de verbrandingskwaliteit van de installatie te beoordelen, is een adequaat servicesysteem onontbeerlijk. In de vergunningverlening zou dit aspect mede aan de orde dienen te komen.
4. Onderzoek naar PAK-emissies en de bestrijdingsmogelijkheden daarvan heeft bij houtverbranding nog nauwelijks plaatsgevonden en verdient aanbeveling. In dit kader is tevens onderzoek naar de grootte van emissies uit rokerijen in de voedingsmiddelenindustrie belangrijk. En wel omdat de emissies daar juist worden *bevorderd*.
5. Ontwikkeling van eenvoudige kostentechnisch gunstige stofvangstechnieken dient te worden gestimuleerd.
6. Met betrekking tot regelsystemen van verbrandingsinstallaties is het aan te bevelen een studie uit te voeren naar het realiseren van een optimaal werkend concept.
7. Er is op korte termijn een grotere duidelijkheid gewenst aangaande de komende regelgeving met betrekking tot toelaatbare emissies uit deze klasse van verbrandingsinstallaties. Een discussie met alle betrokken partijen over dit onderwerp, mede aan de hand van dit rapport, is van belang.
8. Onderzoek naar de emissiewaarden van kleine (< 100 kWth) handgestookte installaties wordt aanbevolen. Onderzoek naar de mogelijkheden tot emissievermindering, waaronder experimenteel onderzoek naar het omzettingsrendement van katalysatoren voor de diverse voorkomende emissies, is gewenst.
9. Samenwerking tussen bedrijven om tot schaalvergroting van verbrandingsinstallaties voor schoon afvalhout te komen dient te worden bevorderd. Een inventarisatie van de mogelijkheden hiertoe wordt aanbevolen.
10. Er zou experimenteel onderzoek moeten worden opgezet om na te gaan of de lage emissies, zoals die bij prototypen werden gerealiseerd, bij praktijkinstallaties kunnen worden verwezenlijkt.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

11. Getrapte verbrandingssystemen leveren lagere emissies dan conventionele installaties. Via kennisoverdracht aan producenten dient de implementatie van deze systemen te worden gestimuleerd. Bovendien dient te worden nagegaan hoe invloed kan worden uitgeoefend om de reeds in het buitenland lopende ontwikkelingen versneld in Nederland te implementeren. Een workshop waarin dit onderwerp bij alle betrokken partijen aan de orde wordt gesteld zou in dezen een goede eerste stap kunnen zijn.

9 Referenties

- [1] IEA Biomass Agreement
Task VII-Improvement of Methods for Conversion of
Biomass Fuel Stocks;
End of Task Report, 1989-1991 Program;
The Norwegian Institute of Technology, Trondheim Norway.
Mai 1992.
- [2] Dupuis. B.C.;
Emissiemetingen en Rendementsbepaling aan de houtgestookte
ketelinstallatie van de Fa. Boekesteijn te De Lier;
IMET-TNO, 1982.
- [3] Dielen, L.J.M., Sikkema, R.;
Resthout en oud hout in Nederland (concept rapport);
Stichting Bos en Hout;
Wageningen, 1992.
- [4] Esmeijer, F.G., Ruiten, L.H.A.M. van;
Toepassingsmogelijkheden van Resthout, Beplantingen en bouw- en
Sloopafval;
IMET-TNO, Broers & Partners B.V.
- [5] FEC Consultants LTD;
Forestry Waste Firing Of Industrial Boilers
Etsu, Department of Energy;
Etsu B 1178, 1990.
- [6] Graf, S.;
Emissionsarme Holzschnitzelfeuerung;
Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich;
1991.
- [7] Heesink, A.B.M.;
Studie naar de haalbaarheid van kleinschaligeafvalverbranding;
IMET-TNO, oktober 1990.
- [8] Handboek Modelvoorschriften, deel I, band 3
1990.
- [9] Intronplan;
Instituut voor emissiemetingen;
CYCO, SDF 60 Combustor;
Rapport no. 91016;
Mei 1991.
- [10] IMET-TNO, januari 1992 (interne informatie).

- [11] Jol, A., Post, J.G.;
Kies de juiste Afscheider;
DHV studie;
Milieu Markt, maart 1992.
- [12] Jakobsen, H.H.;
Condensing Flue Gas cooling At Chip Heating Plants;
Flue Gas Condensation Of Chip Fired At Gording District Heating Plant;
IEA Bioenergy Report 1991.
- [13] Koning, J. de;
Onderzoek Stofbestrijding;
Intern rapport;
IMET-TNO, maart 1987.
- [14] Kiers, A., Poot, F.C.;
Metingen van de Roetuitworp van Bakkerij Harmsen te Loenen;
IMET-TNO, 1982.
- [15] KNCV
Chemische feitelijkheden ('89).
- [16] Nussbaumer, T.;
Emissionen von Holzfeuerungen;
Institut für Energietechnik;
Laboratorium für Energiesysteme;
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich 1988.
- [17] Obering, von, Wagner, W.;
Berechnung von Holzfeuerungen für Wärmeträgeranlagen;
Wärme Band 85, Heft 4/5.
- [18] Okken et al.
Houtkachels in Nederland (concept rapport);
ESC/Energiestudies;
ECN, januari 1992.
- [19] Pröll, M., Brunner, W.;
Der Wamsler-Thermo-Prozessor;
Ein zukunftssicher Weg zur schadestoffarmen Verbrennung;
Wamsler Umwelttechnik GmbH, München 1992.
- [20] Poot, F.C.;
Afvalhout voor de glastuinbouw.
Een energetische, economische en milieuhygienische analyse van een
gerealiseerde toepassing;
IMET-TNO, 1989.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

- [21] Poot, F.C.;
Energie en Milieutechnische metingen aan de houtverbrandingsinstallatie van de Firma Huijgen;
IMET-TNO, 1985.
- [22] Poot, F.C.;
Onderzoek naar de emissies van de Firma Oerlemans te Schijndel;
IMET-TNO, 1986.
- [23] Poot, F.C.;
Onderzoek naar de emissie en de procesvoering van een houtgestookte warmwaterketel van de Firma Witte B.V.;
IMET-TNO, 1985.
- [24] Renia, H.M., Sikkema, R.;
Houtbijprodukten in Nederland;
Stichting Bos en Hout;
Wageningen, 1991.
- [25] Sulilatu, W.F.;
Hergebruik van sloophout bij het Aannemingsbedrijf P.G Vissers & Zn.;
IMET-TNO, april 1990.
- [26] Sulilatu, W.F.;
Drogen van kippemest met warmte, verkregen uit verbranding van schoon houtafval;
IMET-TNO, 1991.
- [27] Stienstra.;
Passat Energie B.V.;
Persoonlijke communicatie, januari 1992.
- [28] Stürmer
WVT
Persoonlijke Communicatie, april 1992.
- [29] Stassen, H.E.M.;
Energie uit hout en houtafval; technologieën en perspectieven;
Energieproductie uit hout, 831.1.
- [30] Strehler, A., et al;
Verfeuerung von Stroh als Brikets in Kleinanlagen (Hausbrand) und über Grossballen in Grossanlagen;
Technische Universität München, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising-Weihenstephan, juli 1987.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

- [31] Strehler, A.;
Biomass Combustion Technologies;
Heat From Straw and Wood;
Technical University Munich
Landtechnik Weihestephane, Freising;
1988.
- [32] Wees, F.G.H. van, Volkers, C.H.;
Brandstofverbruikende Installaties bij de Nederlandse Industrie;
ECN, november 1990.
- [33] Holz-zentralblatt, 7. Dezember 1990.
- [34] Holz-zentralblatt, 8. Dezember 1989.
- [35] Kaushika, N.D. en S. Kaneff;
Heat Recovery Systems and CHP. vol. 11, No. 5, 16 januari 1991.
- [36] Nederlandse Emissie Richtlijnen Lucht,
mei 1992.
- [37] Persoonlijke informatie:
Hr. Luttikhuisen (Kara Engineering),
Hr. Wermer (WVT), mei 1992.
- [38] Biocomb Limited (Sweden),
Bengt Hansson (april 1992).
- [39] Tauw Infra Consult;
Verbranding van Afvalhout B.V.;
juni 1987.
- [40] P. Gouwy (Vyncke), persoonlijke communicatie (mei 1992).
- [41] Min. van VROM.
(mei 1992).
- [42] Passat (Hr. Strienstra) persoonlijke informatie, december 1991.
- [43] Marutzky, R.;
Concept for an ideal wood waste and wood residue combustion system;
Wilhelm-Klauditz-Institute, Fraunhofer Working Group for Wood
Research;
Energy from Biomass Conference, Interlaken, mei 1992.
- [44] Wuebbles, D.J. and J. Edmonds;
Primer on Greenhouse Gases;
Lewis Publ., Inc., Michigan, USA, 1991.

Kleinschalige verbranding van schoon afvalhout in Nederland

- [45] Proceedings mini-symposium "NO_x-reductie bij stationaire verbrandingsinstallaties";
NPT-vereniging Lucht;
Nijmegen, 29 september 1998.
- [46] Eskinazi, D. e.a.;
Stationary Combustion NO_x Control – A summary of the 1989 Symposium;
Journal of the Air Pollution Control Association (JAPCA), volume 39,
no. 8, augustus 1989.
- [47] Ing. H. Holtring;
Min. van VROM, oktober 1992.
- [48] Van Eck, E.;
Emissiemetingen aan een met keijako afval gestookte SDF 100 CYCO combustor;
Intronplan, concept-rapport augustus 1992.

10 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever

NOVEM B.V.

Drs. G. Smakman

St. Jacobsstraat 61

3503 RE Utrecht

Namen en functies van de medewerkers

Dr.ir. E. Mot - stafingenieur afdeling AVT

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed

—

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad
december 1991 tot en met oktober 1992

Ondertekening



W.F. Sulilatu
onderzoekleider

Goedgekeurd door



Ir. J. de Koning
werkgroep leider

Bijlage 1 Prijsindicaties van rookgasreinigungsapparatuur

Recentelijk heeft DHV [11] de kosten van een aantal reinigings-technieken doorgerekend voor diverse situaties, voor verschillende debieten, met als randvoorwaarde de emissiegrenswaarde voor fijn stof van 10 mg/m^3 ind., gecorrigeerd voor een 11% O_2 .

De resultaten daarvan worden hier kort samengevat.

Investeringskosten:

- venturiwasser 5 tot 15 gulden per m^3/h ;
- doekfilters 10 tot 30 gulden per m^3/h ;
- elektrofilters 15 tot 60 gulden per m^3/h .

De investeringskosten voor de venturiwasser zijn het laagst; gemiddeld liggen de investeringskosten van het doekfilter wat lager dan die van het elektrofilter (Cyclonen zijn veel goedkoper, maar vangen stof af tot hoogstens $100 \text{ à } 150 \text{ mg/m}^3$).

Jaarlijkse kosten:

Daarnaast is door DHV berekend wat de jaarlijkse kosten zijn voor een doekfilter en elektrofilter tot een debiet van $100.000 \text{ m}^3/\text{h}$:

Jaarlijkse kosten per 1000 m^3 afgas:

- venturiwassers 1,3 tot 1,7 gulden per 1000 m^3 ;
- doekfilters 0,6 tot 1,2 gulden per 1000 m^3 ;
- elektrofilters 0,5 tot 1,8 gulden per 1000 m^3 .

De jaarlijkse kosten voor venturiwassers zijn nu het hoogst; dit wordt veroorzaakt door het hoge energieverbruik.

Bij elektrofilters dalen de jaarlijkse kosten naarmate het debiet toeneemt sneller dan bij doekfilters. Dit komt doordat de kosten voor nieuwe filterdoeken bij grotere debieten relatief zwaarder wegen.

Bovenstaande berekeningen zijn globaal, omdat vergelijking alleen mogelijk was door in alle gevallen dezelfde uitgangspunten te kiezen voor gemiddelde bedrijfstijd, standtijd, voorbelasting, deeltjesgrootte enzovoort.

Zoals uit de inventarisatie is gebleken worden elektrofilters en doekfilters voor houtgestookte installaties in Nederland tot nu toe weinig toegepast. Meest voorkomend is het gebruik van een cycloon of multicycloon. De restemissie bij toepassing van een multicycloon, uitzonderingen daargelaten, ligt in de orde van 150 mg/m^3 ind. Cyclonen zijn echter niet geschikt voor de vangst van fijn stof.