

# **AFVAL GESTOOKTE STOOMKETELS**



## Voorwoord

De informatie in dit boek is deels algemeen, voor een deel wordt een willekeurige installatie beschreven.

Het eerste hoofdstuk in dit boek is speciaal bedoeld voor allen die nog nooit met afvalverwerking en afvalverbranding te maken hebben gehad, kortom puur als inleidend opgezet.

De andere hoofdstukken beginnen allemaal met een inleidend gedeelte waarna vervolgens, voor zover mogelijk, overgestapt wordt op de installatie zelf.

Ook zijn vele berekeningen en rekenvoorbeelden opgenomen in de daartoe bestemde hoofdstukken. Voor de liefhebbers zijn er ook wat diepgaande rekenvoorbeelden opgenomen.

Tevens is er een gedeelte warmteleer met daarin het verbranding diagram van Professor A.J. Terlinde, met een praktische toepassing. Aangezien er bepaalde wettelijke regels gewijzigd zijn en we opmerkingen van gebruikers gekregen hebben was dit reden om het boek aan te passen. Bij de tweede druk zijn er een aantal figuren gewijzigd. Op verzoek is er in deze druk een hoofdstuk bedrijfsvoering toegevoegd. Bij de derde druk is er een beschrijving toegevoegd van slibverbranding, houtverbranding en pluimveemest verbranding.

Ondergetekende ontvangt gaarne opbouwende kritiek die de bruikbaarheid van het boek kan vergroten.

Ing. A.J. de Koster

Hoofdplaat, juni 2012.

Afvalgestookte Stoomketels  
Adviesbureau de Koster v.o.f.  
Dorpsstraat 5  
4513 AL Hoofdplaat  
Tel. 0117-348223

ISBN 978-90-78142-22-5

[info@martechopleidingen.nl](mailto:info@martechopleidingen.nl)  
[www.martechopleidingen.nl](http://www.martechopleidingen.nl)

Eerste druk januari 2004

Eerste herziene druk juli 2009

Tweede druk oktober 2010

Tweede herziene druk juni 2011

Derde druk juni 2012

© Adviesbureau de Koster, Dorpsstraat 5, 4513 AL Hoofdplaat. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervoelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Dit is tevens van toepassing op gehele of gedeeltelijke bewerking van deze uitgave.

Hoewel dit boek met veel zorg is samengesteld, aanvaarden wij geen aansprakelijkheid voor schade ontstaan door eventuele fouten en / of onvolkomenheden in dit boek.

## Inhoud

<b>1.0</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Verschil tussen fossiele brandstoffen en afval	8
1.2	De verbranding van afval, algemeen	10
1.3	Extreme situaties	13
1.4	Gevolgen van de verbranding	14
1.5	Nabeschouwing van de verbranding	17
<b>2.0</b>	<b>De Ketel, algemeen</b>	<b>19</b>
2.1	Opbouw ketel	19
2.2	Het ontwerp van de ketel	20
2.3	De stoomdruk en stoom temperatuur	23
2.4	Chloor slecht voor het energetisch rendement	23
2.4.1	Kwaliteit reststoffen	23
2.4.2	Minder rendement	24
2.5	Ontwikkelingen verbrandingsproces	24
2.6	De stoomketel, algemene opmerkingen	25
2.7	De stoomketel met vier trekken	25
2.8	De oven	28
2.9	Het tegenloop overschuifrooster	29
2.10	Verbrandingsoven met walsrooster	32
2.11	Vuilverbrandingsoven met terugschuifrooster	37
2.12	De weerstand van het afval en het rooster	41
2.13	Het stookdiagram of ovedìagram	42
2.14	Rookgasrecirculatie	44
<b>3.0</b>	<b>De natuurlijke circulatie in de ketel</b>	<b>48</b>
3.1	Inleiding	48
3.2	Het ontstaan van natuurlijke circulatie	48
3.3	Enige algemene opmerkingen	50
3.4	Zelfverdamping	51
3.5	Verdampingsverhindering of verdampingsvertraging	51
3.6	Enige algemene beschouwingen betreffende circulatie	51
3.7	Het verloop van de circulatie van opstoken ketel tot werkdruk	51
3.8	Voorbeeld circulatieberekening	53
<b>4.0</b>	<b>De ontgasser</b>	<b>54</b>
4.1	De werking van de ontgasser, algemeen	55
4.2	De Stork voedingwaterontgasser	58
4.3	Gegevens van een willekeurige ontgasser	60
4.4	Wettelijke bepalingen van toepassing op de ontgasser	61
4.5	Theoretische beschouwing van de ontgasser	63
4.6	Rekenvoorbeeld Ontgasser	65
<b>5.0</b>	<b>De benodigde luchthoeveelheden</b>	<b>68</b>
<b>6.0</b>	<b>Verbrandingswaarde en stookwaarde</b>	<b>71</b>
6.1	Verbrandingswaarde	71
6.2	De Stookwaarde	72

<b>7.0</b>	<b>Corrosie</b>	<b>75</b>
7.1	Lage temperatuur corrosie en de beperking van de voedingwater intredetemperatuur bij de eco	75
7.2	Hoge Temperatuurcorrosie, HTC	79
7.2.1	Corrosie aan de oververhitterpijpen	80
7.2.2	Corrosie van 1e schachtpijpen	81
7.2.3	Maatregelen tegen hoge temperatuur corrosie	81
7.2.4	Verdamperbundels	81
7.2.5	Oververhitters	81
7.2.6	Het toevoegen van componenten aan de brandstof	83
7.2.7	Resultaten van de toevoegingen	83
7.2.8	Beschermlagen in hoge temperatuurgebieden	84
7.2.9	Corrosievoorkomende effecten van de bescherm-lagen	84
7.3	Loogcorrosie	85
7.4	Chloorcorrosie	86
7.5	Enkele algemene opmerkingen	88
<b>8.0</b>	<b>Het Ketelrendement</b>	<b>91</b>
8.1	Historie	91
8.1.1	De verbetering van het rendement	91
8.1.2	De stoomketel	92
8.1.3	Rendement verbetering	93
8.2	Theoretische beschouwing van het ketelrendement	93
<b>9.0</b>	<b>Inleiding in de warmteoverdracht</b>	<b>102</b>
9.1	Geleiding	102
9.2	Geleiding door een dikwandige pijp	105
9.3	Stroming (Convectie)	107
9.3.1	Afleiding formule convectie	110
9.4	De warmtewisselaar	112
9.5	Berekeningen warmteoverdracht	115
9.6	Straling	117
<b>10.0</b>	<b>Stikstofoxiden</b>	<b>119</b>
10.1	Vlamtemperatuurverlaging	125
10.2	Koolmonoxide	126
<b>11.0</b>	<b>Vuurvaste steen</b>	<b>128</b>
<b>12.0</b>	<b>Het verbrandingsdiagram van Prof. A.J. Terlinde</b>	<b>138</b>
12.1	Verandering van de belasting met constante luchtfactor	140
12.2	Vergroting van de luchtfactor bij 70 % belasting	141
12.3	Verhoging van de luchtfactor bij volle belasting	142
<b>13.0</b>	<b>Demineralisatie</b>	<b>143</b>
13.1	Inleiding	143
13.2	Kation	145
13.3	CO <sub>2</sub> uitdrijftoren	146
13.4	Anionwisselaar	147
13.5	Regenereren	148

<b>14.0</b>	<b>Ketelwaterbehandeling</b>	<b>149</b>
14.1	De kwaliteit van het ketelwater en het belang hiervan voor de stoominstallatie	149
14.2	Afzettingen aan de waterzijde	149
14.2.1	Voorkoming van ketelsteen	151
14.3	Corrosie aan de water- en stoomzijde	152
14.3.1	Zuurstofcorrosie	153
14.3.2	Zuurcorrosie	154
14.3.3	Alkalische corrosie	154
14.3.4	Metaalbroosheid	156
14.3.5	Invloed pH op corrosie	156
14.4	Het begrip "carry-over"	158
14.5	Condensaatsysteem	159
14.6	Suppletiewater	159
14.7	Waterbehandeling	160
14.7.1	Suppletiewater	160
14.7.2	Condensaat	160
14.7.3	Ketelwater	160
14.8	Controle op de waterkwaliteit	160
14.8.1	Suppletiewater controle	161
14.8.2	Controle condensaat	161
14.8.3	Ketelwater controle	161
14.8.4	Maatregelen bij afwijkingen	161
<b>15.0</b>	<b>Inconel 625</b>	<b>163</b>
15.1	Algemeen	163
15.2	Gebruik en eigenschappen	164
<b>16.0</b>	<b>Veel gebruikte termen en definities</b>	<b>166</b>
<b>17.0</b>	<b>De bedrijfsvoering</b>	<b>170</b>
17.1	Inleiding rookgas en lucht	170
17.1.1	De samenstelling van het afval	170
17.1.2	De samenstelling van de lucht	170
17.1.3	De molmassa	171
17.1.4	De hoeveelheid lucht per ton afval	171
17.1.5	De hoeveelheid rookgas per ton afval	173
17.1.6	Conclusie	176
17.2	De verbranding	178
17.2.1	Inleiding volledige en onvolledige verbranding	178
17.2.2	Volledige verbranding	178
17.2.3	Onvolledige verbranding	179
17.2.4	Het evenwicht	180
17.3	Stoomsnelheid	184
17.4	Rookgassnelheid in het convectiedeel	185
17.4.1	Erosiesnelheid	186
17.5	Gebruik van luchtverhitters	187
17.6	Roetblazen	189
17.7	Rookgasrecirculatie	189
17.8	Rookgastemperatuur en stoomtemperatuur	191
17.9	Afvalsamenstelling, corrosie en slak	193
17.10	Uitgewerkt voorbeeld	195

---

<b>18.0</b>	<b>Slibverbranding</b>	<b>197</b>
18.1	Inleiding	197
18.2	Algemeen	198
18.3	De samenstelling van het slib	199
18.4	Opslag van het slib	200
18.5	Droging van het slib	200
18.5.1	Thermisch conditioneren van zuiveringslib	201
18.6	Energiebehoefte	203
18.7	Volume van het slib	204
18.8	De stookwaarde van het slib	205
18.9	Lijmfase	206
18.10	Condensatie van de ontstane droogdampen	207
18.11	Het proces in de wervelbedoven	207
18.12	Verwijdering van schadelijke stoffen uit het rookgas	208
18.13	SNCR bij slibverbranding	208
18.14	Verwijdering van SO <sub>x</sub> in de oven	209
18.15	Rekenvoorbeeld NO <sub>x</sub>	210
18.16	Acceptatiecriteria	211
<b>19.0</b>	<b>Houtverbranding</b>	<b>213</b>
19.1	Inleiding	213
19.2	Algemeen	213
19.3	De samenstelling van het B-Hout	215
19.4	Opslag van het hout	216
19.5	De stookwaarde van het hout	216
19.6	NO <sub>x</sub> en zure componenten bij houtverbrandingen	218
19.7	Het proces	218
19.8	Massa en energiebalans	220
<b>20.0</b>	<b>Pluimveemestverbranding</b>	<b>221</b>
20.1	Inleiding	221
20.2	De samenstelling en stookwaarde van de kippenmest	222
20.3	Het proces	222
20.4	Opvallende verschillen ten opzichte van afval	223
20.4.1	Dioxinen en Furanen	223
20.4.2	Lage Temperatuur Corrosie	223
20.4.3	Primaire en Secundaire lucht	224
20.5	DeNO <sub>x</sub> bij pluimveemestverbranding	224
<b>21.0</b>	<b>Formuleblad</b>	<b>225</b>
21.1	Grootheden en eenheden	228

### 2.13 Het stookdiagram of ovendiagram

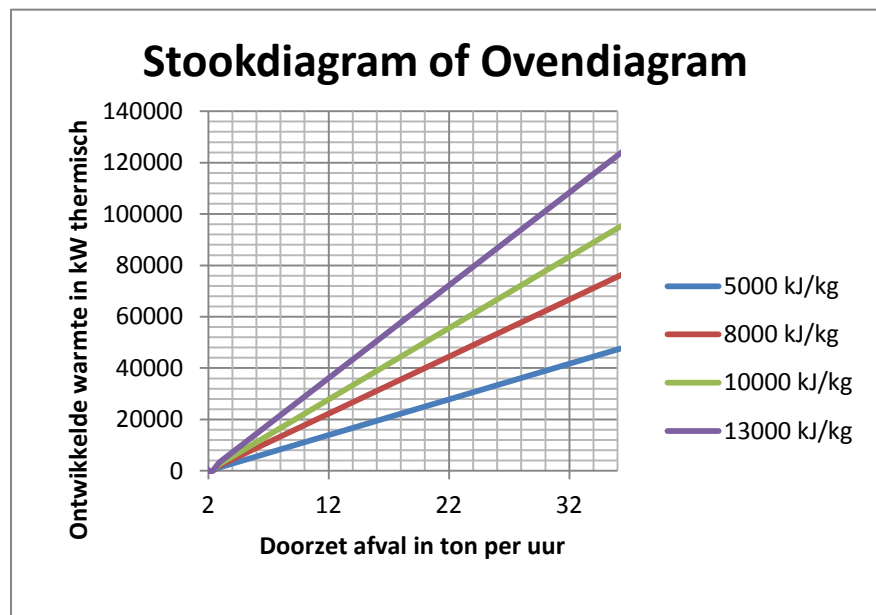
Een stoomketel en de daar voor geplaatste oven worden voor een bepaalde capaciteit ontworpen. Voor de oven geldt meestal een maximale doorzet, dit is de maximale hoeveelheid afval die in tonnen per uur aan de oven wordt toegevoerd en de maximale warmteontwikkeling die in de oven gegenereerd mag worden, dit laatste noemen we de thermische belasting. De thermische belasting is een combinatie van de doorzet en de stookwaarde van het afval. De doorzet bepaald in hoge mate de mechanische slijtage van het rooster.

#### Thermisch

De thermische belasting is veel belangrijker en daar moet de bedrijfsvoering op gericht zijn. Voor een juiste bedrijfsvoering en een lange levensduur van de ketel, dat wil zeggen zo min mogelijk corrosie en slijtage van membraanwanden, verdamperbundels en oververhitterbundels is het van belang om de oven en ketel op een thermische belasting van 100% te bedrijven. De ketel en de oven zijn ontworpen voor 100 % thermische belasting.

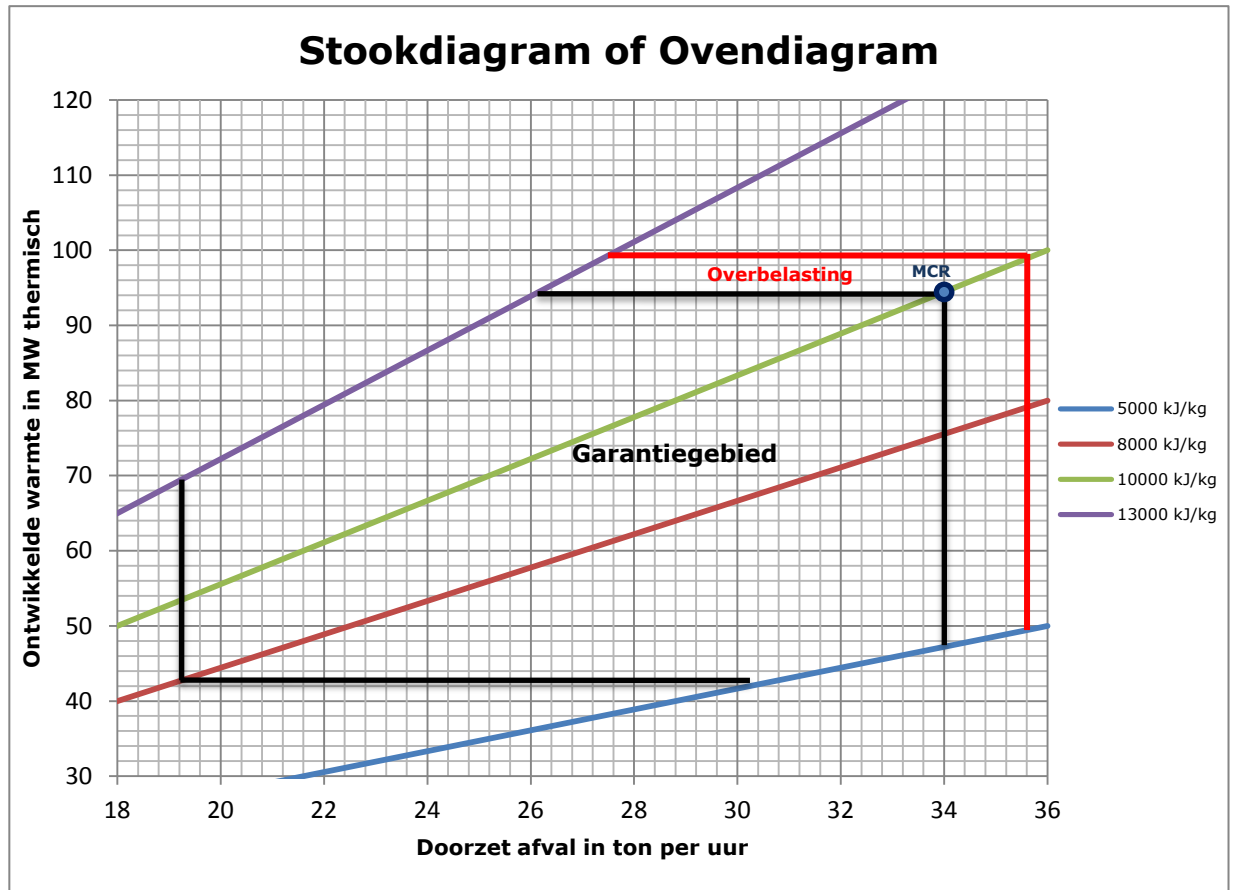
#### Erosie

De rookgastemperaturen zullen in combinatie met de wandtemperaturen zodanig zijn dat de corrosie en slijtage (erosie) minimaal zijn. De erosie is voornamelijk afhankelijk van de rookgassnelheid met de vracht aan vliegias. Hoe hoger de doorzet van een oven is, hoe meer rookgas en hoe meer vliegias er door de trekken van de ketel gestuurd worden met meer slijtage tot gevolg. Om de gebruiker in staat te stellen te zien wat hij aan het doen is, zijn door de ontwerper de zogenaamde ovendiagrammen of stookdiagrammen gemaakt. Deze diagrammen zijn voor elke oven gemaakt en dus voor elke afzonderlijke oven anders. Een voorbeeld van een volledig stookdiagram is weergegeven op afbeelding 18.



Afbeelding 18. Het stookdiagram of ovendiagram.

In de praktijk wordt er slechts een deel van het diagram gebruikt. Het praktische diagram ziet er bijvoorbeeld uit zoals weergegeven op afbeelding 19.



Afbeelding 19. Het stookdiagram in de praktijk.

In dit stookdiagram zien we dat de oven is uitgelegd voor een afval doorzet van 34 ton per uur met een stookwaarde van 10.000 kJ/kg. De ontwikkelde warmte in de oven wordt dan:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{toe} &= \dot{m}_{afval} \cdot H_0 \quad [kW \text{ thermisch}] \\ \dot{Q}_{toe} &= \frac{34.000}{3.600} \cdot 10.000 = 94.444 \quad kW \text{ thermisch} \\ \dot{Q}_{toe} &= 94,4 \quad MW \text{ thermisch}\end{aligned}$$

De hoeveelheid ontwikkelde warmte is nu in het diagram in één oogopslag te zien, we hoeven nu niet meer te rekenen. Als de stookwaarde nu toeneemt en de doorzet blijft gelijk, dan wordt de ontwikkelde warmte in de oven groter en zal de oven thermisch overbelast zijn. Als we ons aan het ovendiagram houden en bijvoorbeeld de stookwaarde toeneemt, dan is het gevolg dat we de doorzet moeten verminderen om dezelfde maximale thermische belasting te houden.

#### Garantiegebied

Het zogenaamde garantiegebied is omkaderd met een zwarte lijn, in dit gebied zal het afval branden zonder ondersteuningsvuur en zonder luchtverwarming. Als we onder de lijn van 5000 kJ/kg komen, dus als we te maken krijgen met afval met een stookwaarde lager dan 5000 kJ/kg dan hebben we een eventuele luvo (luchtverhitter) en ondersteuningsvuur nodig. Het rood omkaderde gebied is het zogenaamde overbelastingsgebied, dit mag bij een juiste bedrijfsvoering slechts kortstondig toegelaten worden.

#### MCR

Het gemerkte punt MCR in afbeelding 19 wil zeggen: Maximum Continuous Rating, ofwel Maximaal Nominaal Vermogen.



## 2.14 Rookgasrecirculatie

### Deellast

Om bij energiecentrales ook bij deellasten de gewenste vuurhaard eindtemperatuur en de gewenste stoom uitlaattemperatuur te bereiken, wordt soms rookgasrecirculatie toegepast. Dit geldt in het bijzonder voor ketels die met een herverhitter uitgerust zijn. Bij AVI's wordt dit om een andere reden toegepast. Bij AVI's wordt rookgasrecirculatie toegepast om de hoeveelheid geproduceerde  $\text{NO}_x$  te beperken. Na de economizer en dan nog na het E-Filter of doekenfilter, wordt een gedeelte van de rookgassen afgevoerd en teruggevoerd naar de vuurhaard met behulp van rookgasrecirculatieventilatoren.

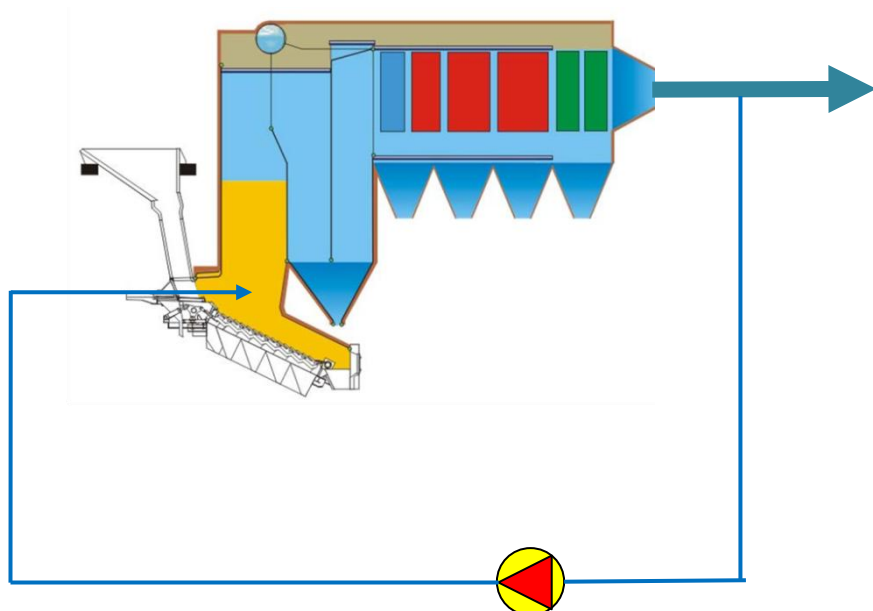
Voor het terugvoeren van deze rookgassen kennen we twee methoden:

- Het terugvoeren beneden in de vuurhaard onder en boven het rooster.
- Het terugvoeren boven in de vuurhaard.

### Rookgasrecirculatie met terugvoering boven het rooster:

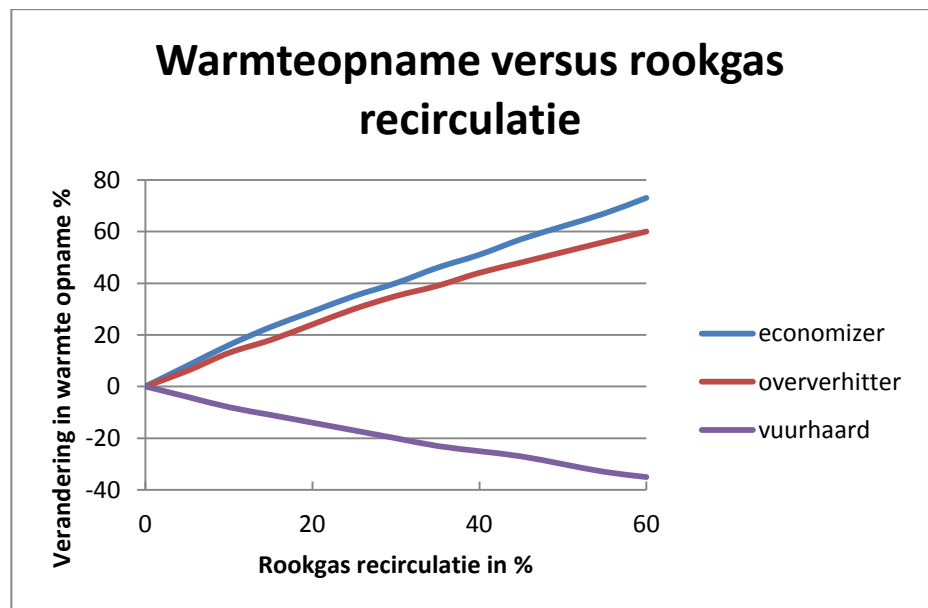
Op afbeelding 20 is een afvalgestookte 4-treks ketel weergegeven. In het convectiegedeelte zien we eerst de verdampersbundel (blauw) gevolgd door drie oververhitters (rood) met daarna twee economizers (groen).

Als de rookgassen de ketel verlaten worden ze eerst door een E-Filter of doekenfilter geleid voordat er rookgas gerecirculeerd wordt. Het rookgas wordt eerst ontdaan van vliegas om erosie van de ventilator te voorkomen. De rookgassen worden boven het rooster gebracht en gemengd met de secundaire lucht. In het rookgas dat gerecirculeerd wordt zit circa 6 vol% zuurstof, in de secundaire lucht bedraagt dit 21 vol% zuurstof. Omdat het rookgas gemengd wordt met de secundaire lucht zal de zuurstofconcentratie hier lager zijn dan 21 vol%. Hierdoor verloopt de verbranding trager en minder heftig. Tevens zal hierdoor de vlamtemperatuur worden gereduceerd waardoor er minder  $\text{NO}_x$  geproduceerd wordt.



Afbeelding 20 Rookgasrecirculatie met terugvoer boven het rooster.

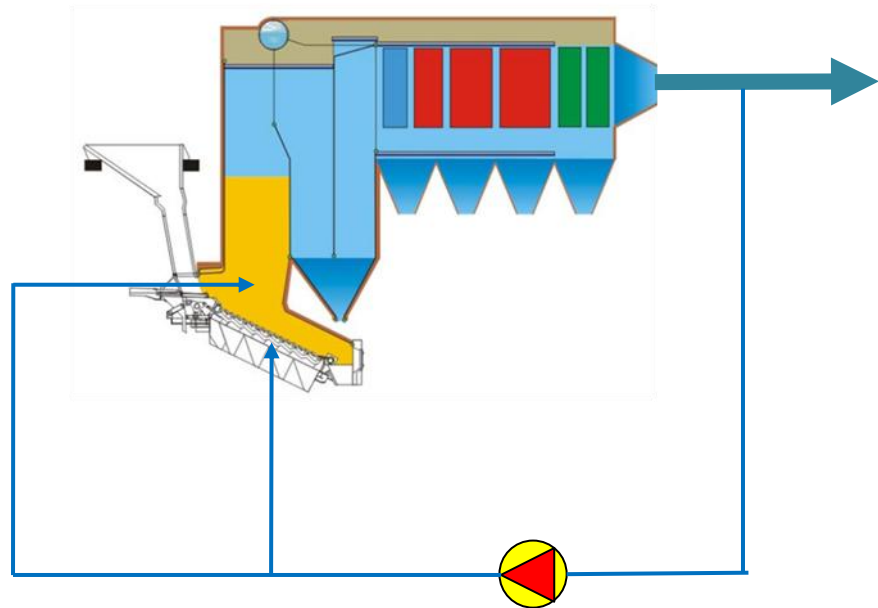
De gemiddelde vuurhaardtemperatuur daalt, waardoor ook de warmteafgifte naar de vuurhaard daalt. Hierdoor blijft er meer warmte in de rookgassen over dat opgenomen kan worden door de oververhitters en de economizers. De verandering van de warmteopname in de genoemde componenten is als functie van de hoeveelheid recirculatie weergegeven op afbeelding 21, bij een keteltype dat schematisch op afbeelding 20 is weergegeven. Hieruit volgt de afname van de warmteopname in de vuurhaard en de toename van de warmteopname in de overige componenten. Uit deze afbeelding blijkt tevens dat de verandering in de economizer het grootst is en in de oververhitter wat minder. Dit kan als volgt verklaard worden. Door het afnemen van de warmteopname in de vuurhaard blijft de vuurhaard eindtemperatuur praktisch ongewijzigd. Ondanks het feit dat de rookgassen gemengd worden met koudere rookgassen.



Afbeelding 21. Warmte opname versus rookgasrecirculatie

#### **Rookgasrecirculatie gemengd met verbrandingslucht:**

Bij moderne ketels wordt het recirculatiestrookgas ook wel toegevoerd in de verbrandingsluchtkanalen onder het rooster. Onder het rooster krijgen we dan warme "lucht" (een combinatie van lucht en rookgas) met een zuurstofpercentage van minder dan 20%. Dit heeft een tragere verbranding tot gevolg en daardoor een lagere gemiddelde vlamtemperatuur met als gevolg een verlaging van de  $\text{NO}_x$ -emissie. Een schets van een dergelijke installatie is weergegeven op afbeelding 22.



Afbeelding 22. Rookgasrecirculatie boven en onder het rooster.

De economizer en de oververhitters hebben een convectiekarakteristiek, waardoor deze gevoelig zijn voor toename van de rookgashoeveelheid.

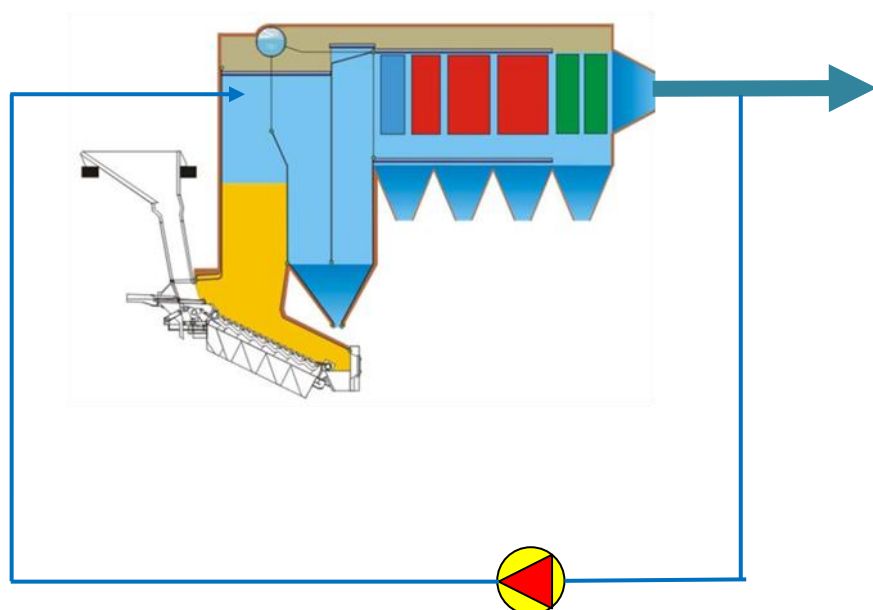
Bij grote ketels kan een combinatie van rookgasrecirculatie en rookgastempering toegepast worden.

**Rookgastempering:**

Een andere vorm van rookgasrecirculatie is rookgastempering, hierbij worden de recirculerende rookgassen niet vlak boven of onder het rooster toegevoerd, maar boven in de vuurhaard, dus in de eerste, tweede of derde trek.

**Warmteafgifte**

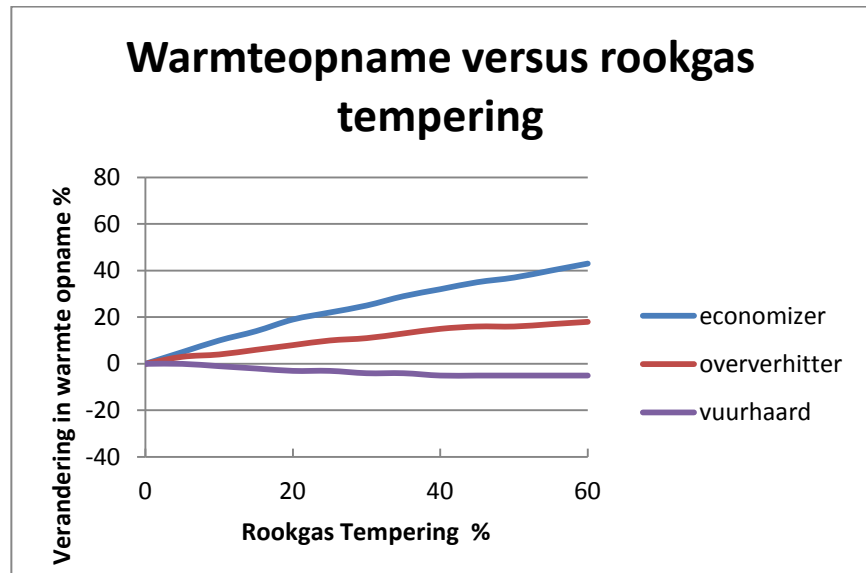
Hiermee wordt bereikt dat de vuurhaardtemperatuur en dus ook de warmteafgifte in de vuurhaard alleen vermindert bij de vuurhaarduitlaat. We bedoelen hiermee dat de rookgastemperatuur bij intrede convectiegedeelte daalt.



Afbeelding 23. Rookgastempering.

**Temperatuur daalt**

De verandering van de warmteopname in de verschillende componenten bij dit systeem is weergegeven op afbeelding 24. Hieruit kunnen we aflezen dat de warmteopname in de vuurhaard slechts weinig daalt, terwijl de rookgastemperatuur sterk daalt, zie het rekenvoorbeeld hier onder. Verder blijkt dat de oververhitter en economizer meer warmte opnemen door hun convectiekarakteristiek.



Afbeelding 24. Warmteopname versus rookgastempering.

In tegenstelling tot rookgasrecirculatie doen bij rookgastempering de rookgassen niet mee aan de verbranding. Met andere woorden het recirculatie rookgas bij rookgastempering koelt het rookgas in de ketel af. Dit is eenvoudig te berekenen met de zogenaamde mengregel.

**Voorbeeld:**

In een ketel wordt tijdens de verbranding 80.000 m<sup>3</sup> rookgas per uur geproduceerd. De temperatuur van de rookgassen bij verlaten eerste trek bedraagt 900 °C. Na het E-Filter wordt door middel van de rookgasrecirculatie ventilator 20.000 m<sup>3</sup> rookgas per uur gerecirculeerd, de temperatuur van deze rookgassen bedraagt 210 °C. Deze recirculatiestrookgassen worden aan het einde van de eerste trek toegevoerd. De dichtheid van het rookgas bedraagt

$$\rho_{\text{rookgas}} = 1,1 \text{ kg/m}^3.$$

De soortelijke warmte van het rookgas stellen we op 1,2 kJ/(kg·K).

We zullen nu uitrekenen wat de rookgastemperatuur aan het einde van de eerste trek wordt met rookgastempering.

We kunnen dan de volgende vergelijking opstellen:

$$\dot{m}_{\text{Rookgas}} \cdot c_{\text{Rookgas}} \cdot t_{\text{Rookgas}} + \dot{m}_{\text{Recigas}} \cdot c_{\text{Rookgas}} \cdot t_{\text{Recigas}} = (\dot{m}_{\text{Rookgas}} + \dot{m}_{\text{Recigas}}) \cdot c_{\text{Rookgas}} \cdot t_{\text{Gas}}$$

$$80.000 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot 900 + 20.000 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot 210 = (80.000 + 20.000) \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot t_{\text{Gas}}$$

Alle termen links en rechts van het is gelijk teken delen door 1,1 en delen door 1,2 levert op:

$$80.000 \cdot 900 + 20.000 \cdot 210 = (80.000 + 20.000) \cdot t_{\text{Gas}}$$

$$t_{\text{Gas}} = 762 \text{ } ^\circ\text{C}$$

We zien dat de rookgastemperatuur bij verlaten eerste trek sterk daalt.