

TNO-rapport
TNO-MEP – R 96/

TNO Milieu, Energie
en Procesinnovatie

Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

Telefoon 055 - 549 34 93
Fax 055 - 541 98 37

Oriëntatie op de mogelijkheden van NO_x-emissievermindering bij crematieprocessen

Datum
oktober 1996

Auteur(s)
Ir. L.B.M. van Kessel
Ing. E.R. Smit

Projectnummer
26987

Trefwoorden
– crematorium
– emissie
– NO_x
– emissiereductie

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

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor onder-
zoeksopdrachten aan TNO, dan wel
de betreffende terzake tussen de
partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het
TNO-rapport aan direct belang-
hebbenden is toegestaan.

© 1996 TNO

Het kwaliteitssysteem van TNO Milieu, Energie en
Procesinnovatie voldoet aan ISO 9001.

TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie is een
nationaal en internationaal erkend kennis- en contract-
research instituut voor bedrijfsleven en overheid op het
gebied van duurzame ontwikkeling en milieu- en
energiegerichte procesinnovatie.

Bestemd voor
Ministerie van VROM
Directoraat-Generaal Milieubeheer
Directie Lucht en Energie, Afd. Bedrijven
t.a.v. Ing. H.W. Holtring
Postbus 30945
2500 GX 's-Gravenhage

Nederlandse Organisatie voor toegepast
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

Op opdrachten aan TNO zijn van toepassing de
Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan
TNO zoals gedeponneerd bij de
Arrondissementsrechtbank en de Kamer van
Koophandel te 's-Gravenhage

Samenvatting

In opdracht van de Directie Lucht en Energie, afdeling Bedrijven, van het Ministerie van VROM werd door de afdeling Verbranding en Conversie van TNO-MEP een oriënterend onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden tot vermindering van de NO_x-emissie bij crematoria.

Ten behoeve van dit onderzoek werd een inventarisatie gemaakt van emissiegegevens van diverse crematoria zoals die door TNO in de periode 1990 - 1995 werden bepaald. Deze gegevens betroffen resultaten van metingen na de naverbrander. Het doel hiervan was om te bepalen of er correlaties bestaan tussen de NO_x-emissie enerzijds en andere emissies en verbrandingsparameters anderzijds.

Het onderzoek leverde op dat de NO_x vorming niet kan worden gecorreleerd met enig andere verbrandingsemissie en daarom niet op indirecte wijze kan worden gekoppeld aan de verbrandingsomstandigheden. Informatie over essentiële procesgegevens zoals debieten (primaire en secundaire verbrandingslucht, aardgas), ontbrak. Verbrandingssnelheid en lokale luchtfactoren konden hierdoor niet bepaald worden.

De NO_x-emissie bij crematoria wordt voornamelijk bepaald door de in lichaam en kist aanwezige gebonden stikstof. Om tot vermindering van de NO_x-emissie te komen kunnen primaire of secundaire maatregelen worden toegepast.

Een uitgebreid meetprogramma waarbij essentiële informatie wordt verzameld over de concentraties en debieten in de ovenruimte en naverbrander, is nodig om essentiële grootheden als verbrandingssnelheid en luchtfactoren te bepalen. Op basis van deze grootheden kunnen gerichte uitspraken worden gedaan over de mogelijke NO_x-reductie met behulp van primaire maatregelen.

Te nemen primaire maatregelen zullen zich moeten richten op reductie van de conversie van de stikstof aanwezig in lichaam en kist tot NO_x. Er zijn drie bekende primaire maatregelen: getrapte luchttoevoer, getrapte brandstoftoevoer en rookgasrecirculatie. Getrapte brandstoftoevoer is technisch niet mogelijk en externe rookgasrecirculatie is kostentechnisch oninteressant. Daarom heeft getrapte luchttoevoer de voorkeur. Met deze techniek is het mogelijk de NO_x-emissie, afhankelijk van het initiële NO_x-gehalte, met 20-80% te reduceren.

In het kader van dit onderzoek is een extra meting uitgevoerd naar de omstandigheden in de ovenruimte. De oorzaak van de bij deze meting geconstateerde hoge zuurstofconcentratie in de ovenruimte kan een slechte menging in deze ruimte zijn of een te hoge luchtfactor. Indien de oorzaak een te hoge luchtfactor is, zou getrapte stoken een NO_x-reductie moeten kunnen bewerkstelligen.

Bij toepassen van secundaire maatregelen zijn er twee mogelijkheden nl. katalytische (SCR) en niet-katalytisch reductie (SNCR) van NO_x met behulp van ammoniak. Het verwijderings rendement voor SCR bedraagt ongeveer 97%, voor SNCR is het rendement 30-70%. SCR is ten opzichte van SNCR kostentechnisch niet aantrekkelijk. De investeringskosten van een SNCR proces bij een crematorium worden globaal geschat op Nfl 100.000,= per crematorium. De investeringskosten liggen voor SCR ca. een factor 2-4 hoger. Deze kosten zullen afgezet moeten worden tegen de kosten die primaire maatregelen met zich meebrengen.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Inhoudsopgave	4
1. Inleiding	5
2. Procesbeschrijving	6
2.1 Koude-start proces	6
2.2 Warme-start oven	7
2.3 Procesregeling	9
3. NO _x -vorming en reductie	10
3.1 NO _x -vorming	10
3.2 Mogelijkheden tot NO _x -reductie.....	11
4. Analyse van reeds beschikbare emissiegegevens.....	15
4.1 Emissies en rookgastemperatuur als functie van de tijd	16
4.2 Kruiscorrelatiefuncties.....	18
5. Ovenmeting Koude Start proces	19
6. Leemtes in kennis.....	21
7. Conclusies	22
8. Literatuur.....	24
9. Verantwoording	25
Bijlage A Beschrijving kruiscorrelatiefunctie	
Bijlage B Rookgasemissies koude-start ovens	
Bijlage C Rookgasemissies warme-start ovens	
Bijlage D Grafische voorstelling kruiscorrelatiefuncties bij een warme- en een koude-start oven	

1. Inleiding

In het kader van het Programma “Reductie verzurende luchtmissies bedrijven 1995” van het “Bijdragenbesluit Milieugerichte Technologie” (BMT) is door de Directie Lucht en Energie van het Ministerie van VROM aan TNO-MEP opdracht verleend een oriënterend onderzoek uit te voeren naar de mogelijkheden van NO_x-emissie vermindering bij crematieprocessen.

Crematoria hebben vaak NO_x-emissies die boven de door de vergunningverlener gestelde eisen liggen. Gezien het kleinschalige karakter van crematoria zijn alleen kostengunstige maatregelen ter beperking van de NO_x-emissie, zoals primaire of eenvoudige secundaire maatregelen, mogelijk haalbaar. Er bestond echter onvoldoende inzicht in de mogelijkheden om tot NO_x-emissievermindering bij batchprocessen in het algemeen en bij crematieprocessen in het bijzonder te komen. Het in dit rapport beschreven onderzoek had als doel een eerste indruk te verkrijgen in de mogelijkheden tot kostengunstige NO_x-emissiereductie bij crematoria.

Hiervoor is het nodig te begrijpen welke factoren van invloed zijn op de vorming van stikstofoxyden. Aansluitend hierop diende te worden bepaald in welke mate een aanpassing van een van de factoren invloed heeft op de grootte van de NO_x-emissie. Hierdoor kan een afschatting worden gemaakt van de NO_x-emissie reductie die bereikt kan worden door primaire maatregelen in de procesvoering. De primaire maatregelen worden vergeleken met end-of-pipe technieken.

Het onderzoek bestond uit de volgende onderdelen:

- verzamelen en analyseren van emissie gegevens zoals recentelijk (minder dan 5 jaar geleden) door TNO-MEP bepaald;
- analyse van de procesregeling;
- literatuur onderzoek naar NO_x beperkende maatregelen bij batchprocessen in het algemeen en crematieprocessen in het bijzonder;
- het uitvoeren van een extra praktijkmeting ten behoeve van het verkrijgen van gegevens over de rookgassamenstelling in de ovenruimte;
- bepalen correlaties tussen diverse procesparameters.

Hoofdstuk 2 behandelt de twee verschillende type crematoria. In hoofdstuk 3 wordt een algemene uiteenzetting gegeven aangaande de vorming van stikstofoxyden bij verbrandingsprocessen. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de emissiedata die ten behoeve van dit onderzoek geanalyseerd zijn. Hoofdstuk 5 beschrijft de resultaten van een indicatieve meting in de ovenruimte van een koude start proces. In hoofdstuk 6 zullen de leemtes in de kennis betreffende NO_x bij crematoria worden beschreven en zal worden aangegeven welk aanvullend onderzoek nodig is om te komen tot een beter begrip van de vorming van NO_x bij crematieprocessen. Hoofdstuk 7 bevat de conclusies van dit onderzoek.

2. Procesbeschrijving

In Nederland worden over het algemeen twee typen crematie-processen bedreven, die van elkaar verschillen in de wijze van procesvoering. Deze typen worden aangeduid met de term warme-start proces en koude-start proces. Hieronder staat voor ieder type crematie-oven een beknopte beschrijving van het proces.

2.1 Koude-start proces

De crematie-oven bestaat uit een ovenruimte en een naverbrandingsruimte, ieder voorzien van een aardgas gestookte brander, zie figuur 2.1.

*Figuur 2. **Error! Unknown switch argument.**
oven.*

Schematische weergave koude-start

Voorafgaande aan het eerste crematieproces van de dag wordt de naverbrander gestart. Als de temperatuur van de naverbrandingsruimte 450/C is, wordt de kist met het stoffelijk overschot in de ovenruimte ingevoerd en wordt de hoofdbrander

in de ovenruimte gestart. De naverbrander regelt de naverbrandingstemperatuur modulerend op 850 /C. De hoofdbrander begint terug te regelen als de oventemperatuur 600 /C is en wordt uitgeschakeld op het moment dat de oventemperatuur 950 /C is.

De verbrandingslucht wordt op een aantal plaatsen langs de zijwanden van de ovenruimte toegevoerd. Tevens wordt in de naverbrandingsruimte lucht toegevoerd. De luchtregeling is gebaseerd op een tijdsafhankelijk stappenprogramma. In de modernste ovens van dit type vindt tevens luchtregeling plaats op basis van het gemeten O₂-gehalte van de rookgassen na de naverbrandingsruimte. Van deze ovens is geen informatie omtrent emissiegegevens beschikbaar.

Het crematieproces duurt, afhankelijk van het ingevoerde gewicht en de samenstelling, 1,75 tot 2,5 uur. Na afloop van het proces wordt de hoofdbrander uitgeschakeld en wordt de oven geruimd. De asresten worden in een aslade opgevangen en koelen daarin af tot kamertemperatuur. Een volgend crematieproces wordt gestart als de ovenruimte is afgekoeld tot 300/C.

De na de crematie overgebleven asresten worden met behulp van een magneet ontijzerd. De aslade met daarin de ontijzerde as wordt vervolgens geleege in een hamermolen, waarmee de as wordt verkleind.

De bij de crematie ontstane rookgassen worden vervolgens direct vanuit de naverbrandingsruimte ongekoeld via een 6,9 meter hoge geïsoleerde schoorsteen op de atmosfeer geloosd.

2.2 Warme-start oven

De crematie-oven bestaat uit een ovenruimte en een naverbrandingsruimte, ieder voorzien van een aardgas gestookte brander, zoals afgebeeld in figuur 2.2.

*Figuur 2. **Error! Unknown switch argument.** Schematische weergave warme-start oven.*

Voorafgaande aan de eerste crematie van de dag wordt de ovenruimte opgewarmd tot 700/C en de naverbrandingsruimte wordt verhit tot 850/C. Op het moment dat de gewenste temperaturen zijn bereikt wordt de ovenbrander uitgeschakeld en wordt de kist ingevoerd. Door de stralingshitte van de ovenwanden ontbrandt de kist spontaan. Het crematie-proces wordt geregeld via een stookautomaat, die gedurende het proces een tijdsafhankelijk stappenprogramma uitvoert. De oventemperatuur wordt gedurende het proces geregeld op een aantal vaste waarden variërend tussen 700/C en 950/C. In de praktijk wordt de ovenbrander alleen aan het einde van het proces gebruikt als het verbrandingsproces moeizamer begint te verlopen. De naverbrander wordt geregeld tussen 700 /C en 850 /C.

De hoeveelheid verbrandingslucht wordt geregeld door middel van een zuurstofmeter geplaatst na de naverbrandingsruimte. De hoeveelheid verbrandingslucht is zodanig geregeld, dat het zuurstofgehalte na de naverbrander tussen 8 en 10 vol% ligt.

De benodigde schoorsteentrek wordt opgewekt door een luchtinjector in het schoorsteen kanaal. Deze injector zorgt tevens voor koeling van de rookgassen tot ca. 300/C, waarna deze direct via de schoorsteen op de atmosfeer worden geloosd.

Aan het einde van het crematie-proces, dat circa 1 - 1.5 uur duurt, wordt de oven geruimd en worden de asresten opgevangen in een aslade. Een volgend crematie-proces kan hierna direct worden gestart, mits de ovenruimte een temperatuur heeft

van 700/C. De ovenassen laat men vervolgens afkoelen. Vervolgens wordt de ovenas ontijzerd met behulp van een magneet. De aslade met daarin het ontijzerde as wordt vervolgens in een kogelmolen geplaatst, waarmee de as wordt verkleind. Het verkleiningsproces duurt ca. 20 minuten.

2.3 Procesregeling

De manier van regelen van een crematieproces kan van invloed zijn op de vorming van NO_x. Om inzicht te verkrijgen in de manier van regelen van het proces werden twee typen crematoria bezocht, te weten een warme-start proces en een koude-start proces. Beide typen processen doorlopen een zogenaamd stappenprogramma waarin vooraf gedefinieerde procesinstellingen zijn vastgelegd. Modificaties in dit programma zouden kunnen leiden tot een reductie van de NO_x-emissie.

3. NO_x-vorming en reductie

3.1 NO_x-vorming

NO_x is een notatie voor de som van de stikstofoxyden NO en NO₂. Bij het crematieproces komt het merendeel van de NO_x vrij als NO en ontstaat slechts ca. 5% NO₂. NO wordt in de atmosfeer vrij snel (binnen een aantal dagen) omgezet in NO₂, en deze laatste kan vervolgens als zure regen neerslaan. Naast NO en NO₂ kan bij een verbrandingsproces ook N₂O, het bekende lachgas, ontstaan. N₂O is zeer stabiel en heeft een levensduur van wel 150 jaren. In het algemeen wordt aangenomen dat N₂O verantwoordelijk is voor de aanwezigheid van NO in de hogere atmosfeer (stratosfeer) en zo de ozonlaag kan aantasten. Uit metingen is echter gebleken dat de N₂O-emissies bij crematieprocessen laag zijn.

In het algemeen kunnen drie mogelijke bronnen voor NO onderscheiden worden:

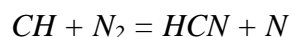
1. Thermische NO,
2. Prompt NO,
3. Brandstof NO.

ad 1. Thermische NO

Thermische NO ontstaat uit de reacties bij hoge temperatuur tussen moleculair N₂ en O₂ zoals die voorkomen in lucht. Bij crematieprocessen zou thermische NO alleen lokaal (in de vlammen) gevormd worden.

ad 2. Prompt NO

Prompt NO kan ontstaan bij de verbranding van koolwaterstoffen onder brandstofrijke condities. Onderzoek heeft aangetoond dat prompt NO ontstaat uit de reactie van koolwaterstofradicalen met moleculair N₂ uit de lucht:



De ontstane HCN kan vervolgens in een meer zuurstofrijke omgeving reageren tot NO. Het reactiemechanisme voor prompt NO is zeer complex.

In een crematie-oven kunnen ook brandstofrijke condities voorkomen. In en direct boven de kist komen tijdens het ontgassen veel koolwaterstoffen vrij in een zuurstofarme omgeving. Het is daarom niet uitgesloten dat in een crematieproces direct boven de kist en het lichaam prompt NO gevormd kan worden. Experimentele informatie is hier echter niet over beschikbaar.

ad 3. Brandstof NO

Verreweg de belangrijkste bron voor NO bij een crematieproces is de stikstof in de kist en het menselijk lichaam. Een menselijk lichaam bevat ca. 3 gew-% stikstof. In aanwezigheid van zuurstof kan deze stikstof oxyderen tot NO. Onder zuurstofarme

condities (tijdens het ontgassen) zal een belangrijk deel van de stikstof vrijkomen als HCN of NH₃ waarna dit in deze reducerende omstandigheden kan reageren tot N₂.

De conversie van N naar NO is in het algemeen afhankelijk van het N-gehalte van de brandstof en van de procescondities, waarbij de zuurstofconcentratie een belangrijkere rol speelt dan de temperatuur.

3.2 Mogelijkheden tot NO_x-reductie

Bij het reduceren van NO_x-emissies zijn de mogelijkheden in te delen in twee klassen: primaire en secundaire maatregelen. Primaire maatregelen zijn maatregelen die zich richten op het verminderen van de NO_x-emissie door in te grijpen in het verbrandingsproces. Secundaire maatregelen zijn maatregelen die gericht zijn op het afbreken van de reeds gevormde NO_x door middel van een procesgeïntegreerde maatregel of een nageschakelde techniek.

Een literatuursearch is uitgevoerd om te zoeken naar informatie betreffende de problematiek rond NO_x-emissie bij crematieprocessen. Doel was te kijken of er in de afgelopen twintig jaar gericht onderzoek naar de vorming van NO_x bij crematies is uitgevoerd en of er informatie bestaat aangaande NO_x-emissiebeperkende maatregelen bij crematoria. Hiertoe zijn de volgende bestanden geraadpleegd: Compendex, Pollution abstracts, Enviro-Line, Waste-info en WPIL. Hierin werden op de trefwoorden NO_x en/of Crematoria gezocht. Deze zoekactie leverde slechts enkele treffers op, waarbij geen relevante informatie met betrekking tot NO_x-reductie bij crematoria zat. Daarom is literatuur geraadpleegd omtrent de NO_x problematiek bij branders in het algemeen. De informatie uit deze literatuur zal worden gebruikt om een voorspelling te doen met betrekking tot mogelijkheden ter vermindering van de NO_x-emissie bij crematieprocessen.

Primaire Maatregelen

De thermische NO_x-vorming wordt beïnvloedt door temperatuurpieken in de verbrandingszone, de zuurstofradicaalconcentratie en de verblijftijd van de verbrandingsprodukten bij de hoge temperaturen (> 1400/C). De meeste primaire maatregelen ter reducering van de NO_x-emissie richten zich dan ook op het reduceren van de temperatuurpieken en de zuurstofconcentratie. In praktijk zijn dan ook de volgende primaire maatregelen ter reducering van de NO_x-emissie mogelijk, te weten:

- a. Rookgasrecirculatie
- b. Getrapte luchttoevoer
- c. Getrapte brandstoftoevoer

ad a Rookgasrecirculatie

Het toepassen van rookgasrecirculatie heeft tot gevolg dat een koeling optreedt in de ovenruimte. Hierdoor wordt de vlamtemperatuur lager en wordt de thermische NO_x-vorming gereduceerd. Daarnaast heeft de bijkomende lagere zuurstofconcentratie in de ovenruimte een extra gunstig effect op de thermische NO_x-vorming en op de conversie van brandstof-N naar NO_x. De rookgasrecirculatie kan zowel intern als extern uitgevoerd worden.

De rookgasrecirculatie heeft invloed op de thermische NO_x, omdat de temperatuur van de rookgassen ten opzichte van de temperatuur van de primaire lucht (900 /C) laag is, wat tot gevolg heeft dat de vlam gekoeld wordt. Verder is er een invloed op de brandstof-NO_x omdat deze afhankelijk is van de zuurstofconcentratie en temperatuur. Uit de branderliteratuur [1,2,3,4,5] is bekend dat bij een externe recirculatie van 15-20 % van de rookgassen een halvering van de NO_x-emissie mogelijk is. Interne recirculatie wordt vooral toegepast bij zogenaamde Low NO_x branders.

ad b Getrapte luchttoevoer

Het toepassen van getrapte luchttoevoer houdt in dat luchttoevoering naar de ovenruimte in twee fasen plaatsvindt. In de eerste fase wordt met een ondermaat zuurstof gestookt. Dit heeft een verlagend effect op de conversie van brandstof-N naar NO_x. Verder reduceert dit ook de piektemperatuur. Bij de tweede fase wordt met een overmaat lucht gestookt om de onverbrande koolwaterstoffen te converteren naar kooldioxyde en water.

Uit de branderliteratuur [1,2,3,4,5] zijn voorbeelden bekend waarbij, afhankelijk van het initiële NO_x-niveau, NO_x-reducties van 20% tot 80% worden bereikt wanneer de primaire lucht zo wordt ingesteld dat onderstoichiometrisch wordt gestookt. Opgemerkt dient te worden dat de literatuurgegevens betrekking hebben op continu processen zijn en niet op batchprocessen zoals een crematorium.

ad c Getrapte brandstoftoevoer

Bij getrapte brandstoftoevoer wordt gestookt volgens hetzelfde principe als bij getrapte luchttoevoer. Alleen wordt in dit geval de brandstof getrapd toegevoerd. De te bereiken reducties liggen in dezelfde orde van grootte als bij getrapte luchttoevoer.

TNO-MEP heeft in het verleden een indicatief experiment bij een crematorium uitgevoerd waarbij - in afwezigheid van kist en lichaam - de NO_x-emissie van de branders gemeten is. De NO_x-emissie die gemeten werd was zo laag dat hieruit geconcludeerd kan worden dat de NO_x-emissie bij crematieprocessen voornamelijk bepaald wordt in de ovenruimte tengevolge van de aanwezigheid van het stoffelijk overschot en de kist.

Omdat de temperatuur in de crematie-oven laag blijft (< 1000 /C) zal waarschijnlijk het grootste deel van de NO_x-emissie afkomstig zijn van de stikstof in de brandstof. Primaire maatregelen zich moeten richten op reductie of voorkoming van deze vorming.

De genoemde primaire maatregelen zijn, naast de reductie van thermische NO_x , tevens geschikt om brandstof NO_x te verminderen. Gezien de aard van het crematieproces lijkt getrapte brandstoftoevoer ethisch niet verantwoord. Externe rookgasrecirculatie vergt nogal wat fysieke aanpassingen aan de oven en daarmee gepaard gaande forse investeringen. Omdat de haalbare NO_x -reductie bij toepassing van externe rookgasrecirculatie in dezelfde orde van grootte ligt als getrapte luchttoevoer wordt de voorkeur gegeven aan deze laatste.

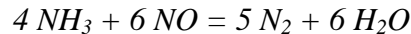
Secundaire maatregelen

Bij reductie van de NO_x -emissie door middel van secundaire maatregelen zijn er twee mogelijkheden:

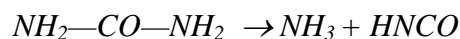
- Selectieve Niet Katalytische Reductie (SNCR)
- Selectieve Katalytische Reductie (SCR)

SNCR

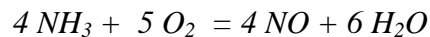
Het principe van SNCR is gebaseerd op het reduceren van de NO met behulp van een reductiemiddel tot stikstof en water. De reductie is gebaseerd op de volgende overall reactie:



De in de literatuur meest besproken reductiemiddelen zijn ammoniak en ureum. Ureum ontleedt in ammoniak volgens:



Het reduceren van de NO is sterk afhankelijk van de temperatuur waarbij het reductiemiddel wordt ingespoten. Wanneer de temperatuur te hoog is wordt er, in plaats van reductie van NO, NO gevormd volgens de volgende reactie:



Bij gebruik van ammoniak als reductiemiddel dient de insputting plaats te vinden tussen 850-1050 /C. Bij gebruik van ureum wordt dit venster breder: 800-1100 /C. Ammoniak heeft het voordeel dat de te bereiken reductie van NO groter is dan bij gebruik van ureum. Het temperatuurvenster kan verbreed worden bij aanwezigheid van een “brandstof”. CO, H₂ en CH₄ worden vaak genoemd.

Bij het toepassen van SNCR treden naast het gewenste stikstof en water ook ongewenste secundaire emissies op. De belangrijkste secundaire emissie is ammoniak dat niet geregeerd heeft met NO. Bij gebruik van ureum is het ontledingsproduct isocyaanzuur een ongewenst bijproduct. Isocyaanzuur kan ook verder reageren tot lachgas (N₂O). Een praktisch voordeel van ureum is dat het gemakkelijker kan

worden opgeslagen dan ammoniak. Toch wordt in praktijk over het algemeen de voorkeur gegeven aan ammoniak bij het gebruik voor SNCR.

Een van de nadelen van SNCR, naast de ammoniak 'slip', is de eventuele vorming van ammoniumzouten. De vorming van deze corrosieve zouten treedt vooral op bij zwavelhoudende brandstoffen, waarbij de vorming van het sterk corrosieve ammoniumbisulfaat (NH_4HSO_4) de belangrijkste is. Omdat het menselijk lichaam zwavel bevat (0.26 %,) zal bij toepassing van het SNCR proces bij crematoria aan dit probleem aandacht geschonken moeten worden.

Met behulp van SNCR zijn rendementen haalbaar van 30-70 % afhankelijk van het initieel NO_x -niveau.

TNO-MEP heeft recent, in het kader van een ander project, offertes aangevraagd voor installatie van het SNCR proces bij stoomketels. Op basis hiervan kan een ruwe schatting gemaakt worden om het NO_x -niveau te reduceren tot minder dan 200 mg/m^3 . De investeringskosten zullen ongeveer Nfl 100.000,= bedragen waarbij nog de jaarlijkse kosten komen voor de benodigde ammoniak (ongeveer Nfl 1.000,= per jaar). De genoemde kosten zijn slechts indicatief van aard. Deze worden hier gegeven om het te kunnen vergelijken met de kosten die getrapte luchttoevoer met zich meebrengt.

SCR

Als het niet mogelijk is om SNCR toe te passen of indien de emissie-eisen niet bereikt kunnen worden bestaat nog de mogelijkheid om SCR toe te passen. Het principe is evenals bij SNCR gebaseerd op het reduceren van NO met behulp van NH_3 . Echter door middel van een katalysator vindt deze reactie bij lagere temperaturen plaats: tussen 175/-600/C, waarbij een reductiegraad van maximaal 97% bereikt kan worden. De ammoniak slip is meestal lager dan 5 ppm. De levensduur van de katalysator is bij gebruik in gasgestookte installaties circa 10 jaar. [VROM, 1995].

Bekend is echter dat SCR circa twee tot vier maal duurder is dan SNCR [VROM, 1995]. SCR zal daarom voorlopig hier buiten beschouwing worden gelaten.

4. Analyse van reeds beschikbare emissiegegevens

Door TNO-MEP zijn in het verleden bij diverse crematoria emissiemetingen uitgevoerd, veelal met als doel de resultaten van deze metingen te toetsen aan voor het desbetreffende crematorium geldende emissie-eisen. Ten behoeve van de representativiteit van dit onderzoek werd slechts gebruik gemaakt van meetresultaten die niet ouder dan vijf jaar waren. In dit onderzoek worden derhalve de resultaten van metingen aan zes verschillende crematoria gebruikt, waarvan drie crematoria van het warme-start type en drie van het koude-start type. Bij deze zeven crematoria werden in totaal de emissies van 25 crematieprocessen bepaald.

De metingen bestonden in alle gevallen uit het vaststellen van de volgende parameters:

- concentratie O_2 , CO_2 , CO , C_xH_y en NO_x in de rookgassen gedurende het proces
- rookgastemperatuur gedurende het proces
- gemiddeld rookgasdebiet
- totale hoeveelheid verstoekt aardgas
- gewicht kist en lichaam

In hoofdstuk 3 is naar voren gekomen dat het brandstof- NO_x mechanisme de belangrijkste bron van de NO_x -emissie is. Dit betekent dat NO_x primair gevormd wordt in de ovenruimte en dat de naverbrandingsruimte de NO_x -emissie nauwelijks beïnvloedt. De in hoofdstuk 3 eventueel geschikt veronderstelde oplossing is getrapte luchttoevoer. Voor deze oplossing is het van belang te weten wat de omstandigheden in de ovenruimte zijn, waarbij de luchtfactor van wezenlijk belang is. De in het verleden uitgevoerde emissiemetingen hebben betrekking op de situatie na de naverbrander. Essentiële gegevens als het primaire en secundaire luchtdebiet, het rookgasdebiet en het aardgasdebiet als functie van de tijd zijn niet bekend. Het is dus niet mogelijk om bijvoorbeeld de verbrandingssnelheid te bepalen.

Omdat de NO_x emissie niet wezenlijk beïnvloed wordt door de naverbranding is getracht om met behulp van de aanwezige meetgegevens verbanden tussen verschillende parameters te vinden.

De analyse bestaat uit een aantal fasen:

- a. Kwalitatieve bestudering van de emissies als functie van de tijd. Daartoe zijn voor alle processen verscheidene grafieken gemaakt. Deze bevatten:
 1. het O_2 percentage, de NO_x concentratie (11% O_2) en de CO concentratie (11% O_2) als functie van de procestijd.
 2. het O_2 percentage, de C_xH_y concentratie (11% O_2) en de CO concentratie (11% O_2) als functie van de procestijd.
- b. Bepaling gemiddelde waarden van de belangrijkste grootheden.
- c. Bepaling kruiscorrelatiefuncties van de belangrijkste grootheden.

In de volgende paragrafen zullen deze fasen achtereenvolgens aan bod komen.

4.1 Emissies en rookgastemperatuur als functie van de tijd

Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van rookgasemissiegegevens afkomstig van 3 warme-start ovens en 3 koude-start ovens. In de bijlagen zijn deze emissies uitgezet als functie van de tijd. Bijlage B.1 tot en met B.3 behandelt de verschillende koude-start processen. Bijlage C.1 tot en met C.3 de verschillende warme start-processen.

In bijlage C.1 tot en met C.3 en B.1 tot en met B.3 is voor alle processen afzonderlijk de gemiddelde NO_x (11% O₂), CO (11% O₂), C_xH_y (11% O₂), O₂ en de temperatuur van de rookgassen na de naverbrander gegeven.

In tabel 4.1 staat de range weergegeven van de per proces gemiddelde NO_x-emissie van de diverse crematoria. In tabel 4.2 wordt de totale massastroom per proces gegeven.

Tabel 4. Error! Unknown switch argument. NO_x emissie; range van gemiddelde emissie per proces

Crematorium	Aantal processen	NO _x -emissie [mg/m ³ ind]	NO _x -emissie betrokken op 11% O ₂ [mg/m ³ ind]
warme-start			
crematorium W1	4	148 - 179	418 - 497
crematorium W2	4	114 - 129	293 - 462
crematorium W3	3	109 - 129	269 - 290
koude-start			
crematorium K1	7	164 - 256	187 - 305
crematorium K2	3	79 - 114	262 - 353
crematorium K3	4	231 - 283	216 - 291

Tabel 4. Error! Unknown switch argument. Massastroom NO_x

Crematorium	Aantal processen	NO _x massastroom [g/proces]
warme-start		
crematorium W1	3 ^{*)}	317 - 392
crematorium W2	4	339 - 579
crematorium W3	2	418 - 441
koude-start		
crematorium K1	7	360 - 630
crematorium K2	2 ^{*)}	294 - 333
crematorium K3	4	388 - 638

*) Bij één proces bij W1 en Jn proces bij K2 ontbraken gegevens.

De volgende conclusies kunnen uit de figuren en tabellen (4.1, 4.2, K1 tot en met K3 en W1 tot en met W3) getrokken worden:

- De processen gedragen zich allen vrij grillig hetgeen ook te zien is aan de standaarddeviatie. Een uitzondering hierop vormt O_2 dat een kleine standaarddeviatie kent.
- De hoogste NO_x -concentraties komen globaal gedurende het eerste half uur van het proces voor.
- Een belangrijke constatering is het temperatuurniveau na de naverbrander. Bij de meeste processen wordt gedurende langere tijd de temperatuur eis van $850\text{ }^\circ\text{C}$ niet bereikt. Dit heeft dan met name bij de warme start processen ook invloed op de CO en C_xH_y concentratie in de rookgassen. Deze is bij de warme processen hoger dan bij de koude processen. Een betere temperatuurregeling zou ervoor kunnen zorgen dat de gewenste temperatuur gehaald wordt. Dit heeft echter geen invloed op de NO_x -emissie.
- Opvallend is dat de C_xH_y -concentratie bij de warme processen hoger is bij lagere naverbrandingstemperaturen, terwijl dit bij de koude processen niet het geval is. Bij deze processen is de C_xH_y ook bij lage temperaturen laag. Dit verschil wordt onder andere veroorzaakt door een verschil in procesvoering van de branders. Een volledige verklaring van deze waarneming is opgenomen in hoofdstuk 5.9 van het TNO-rapport [Massabalans en emissies van in Nederland toegepaste crematieprocessen](#) [7].
- Een duidelijk verschil tussen een koude- en een warme-start proces is het verschil in zuurstofconcentratie. Bij de warme processen is deze hoger dan bij de koude. Uit de tabellen in bijlage B en C is af te leiden dat de NO_x -concentratie hoger is bij hogere O_2 percentages. Dit is in overeenstemming met de beschrijving in hoofdstuk 3 die stelde dat de NO_x -emissie toeneemt met de O_2 -concentratie.
- Opvallend in vergelijking met andere verbrandingsprocessen is de hoge absolute zuurstofconcentratie. Een hoge zuurstofconcentratie heeft een negatieve invloed op de NO_x -emissie zoals reeds in hoofdstuk 3 aan de orde is geweest. In hoofdstuk 2 is de procesregeling besproken. Het proces doorloopt een van tevoren vastgesteld stappenplan. Voor de NO_x -emissie zou het beter zijn om het proces niet volgens een stappenplan te laten verlopen maar te regelen op bijvoorbeeld de zuurstofconcentratie in de oven.
- Uit tabel 4.1 blijkt dat de NO_x -emissie betrokken op 11% O_2 in de rookgassen bij de warme-start oven gemiddeld hoger is dan bij de koude-start oven. De totale NO_x massastroom is bij beide typen processen vergelijkbaar, zoals blijkt uit tabel 4.2.
- De rookgastemperatuur heeft geen invloed op de NO_x -emissie.

Kwalitatieve uitspraken aangaande mogelijke correlaties tussen de NO_x concentratie en gehalten van overige rookgascomponenten zijn op basis van de hierboven vermelde inventarisatie niet te maken. Om eventueel toch bestaande correlaties te ontdekken is gebruik gemaakt van de kruiscorrelatiefunctie. Deze zal in paragraaf 4.2 aan bod komen.

4.2 Kruiscorrelatiefuncties

Omdat de signalen nogal fluctueren als functie van de tijd is het moeilijk om verbanden tussen de verschillende grootheden te ontdekken. Een andere veel in de signaalverwerking gebruikte techniek is het gebruik van kruiscorrelatiefuncties. De kruiscorrelatiefunctie wordt gebruikt om te onderzoeken of twee signalen zijn gecorreleerd [9]. In bijlage A is een gedetailleerde beschrijving opgenomen van de kruiscorrelatie functie.

Van de processen zijn de volgende kruiscorrelaties gemaakt:

- O_2/NO_x
- O_2/CO
- CO/NO_x
- O_2/C_xH_y
- CO/C_xH_y
- $O_2/T_{rookgas}$
- $CO/T_{rookgas}$
- $NO_x/T_{rookgas}$

In bijlage D zijn deze kruiscorrelatiefuncties afgebeeld voor een koude-start en een warme-start proces.

Bestudering van alle beschikbare kruiscorrelatiefuncties leveren weinig eenduidige, voor alle processen geldende, verbanden op. Echter de volgende voor beperkte gevallen geldige conclusies kunnen worden getrokken:

- De NO_x -concentratie correleert met geen enkele parameter. Dit geldt voor zowel de koude als de warme processen.
- Bij de warme processen correleert de O_2 -emissie redelijk positief met de C_xH_y -emissie. Dit geldt voor de crematoria waarbij een relatief hoge C_xH_y concentratie heerst (W1 en W2). Dit betekent dat een hoge O_2 -concentratie bij een hoge C_xH_y -concentratie hoort en dat een lage O_2 -concentratie bij een lage C_xH_y -concentratie hoort.
- Crematorium W-3 heeft een hogere naverbrandingstemperatuur (zie ook Bijlage C) en daardoor een lagere C_xH_y -emissie waardoor er geen correlatie is met de O_2 -concentratie. Deze correlatie wordt ook niet gevonden bij de koude processen omdat daar de C_xH_y -emissie net als bij crematorium W3 laag is.
- Bij crematorium W-1 correleert in navolging van C_xH_y ook CO redelijk goed met de O_2 -concentratie. Verder is er een sterke negatieve correlatie tussen de O_2 -concentratie en de naverbrandingstemperatuur. Dit correlaties is wel te verwachten aangezien C_xH_y en CO beiden in de naverbrander omgezet moeten worden en sterk afhankelijk zijn van de naverbrandingstemperatuur.
- Van crematorium K-1 zijn geen correlaties voor C_xH_y uitgerekend, omdat de C_xH_y -concentratie laag is ($< 2 \text{ mg/m}_0^3$, zie ook bijlage B).

5. Ovenmeting Koude Start proces

Omdat informatie omtrent de procesomstandigheden in de ovenruimte van wezenlijk belang is om de mogelijkheden van NO_x reductie met behulp van primaire maatregelen te bepalen is besloten een beperkte meting uit te voeren. Daartoe werd bij een willekeurig gekozen crematorium (koude-start) een aantal metingen in de ovenruimte uitgevoerd, waarbij gedurende drie processen de onderstaande parameters werden bepaald:

- O_2 -concentratie
- CO-concentratie
- NO_x -concentratie
- temperatuur in ovenruimte.

De metingen werden uitgevoerd met een draagbare analyzer en zijn derhalve indicatief van aard. Het voornaamste doel van deze metingen was niet zozeer de gehalten van een aantal componenten te kwantificeren als wel het verloop van de gehalten in de procestijd vast te stellen. In bijlage B.4 zijn de diverse figuren afgebeeld. Deze bestaan uit de concentraties als functie van de tijd in de ovenruimte en de kruiscorrelaties van diverse grootheden in de ovenruimte.

Wat opvalt in bijlage B.4 is het lage NO_x -niveau en het hoge CO-niveau in de ovenruimte. Dat zou inhouden dat een laag NO_x gehalte bij een hoog CO-gehalte hoort en andersom. Dit wordt niet bevestigd door de kruiscorrelatie van CO en NO_x . Het NO_x -niveau is lager dan bij de andere onderzochte crematoria. Daarbij dient vooropgesteld te worden dat het bij de andere crematoria metingen na de naverbrander betrof. Echter verondersteld was dat de NO_x niet wezenlijk beïnvloed werd door de naverbrander. Ervan uitgaande dat dit koude-start proces niet wezenlijk anders is dan de andere processen houdt in dat toch NO_x wordt gevormd in de naverbrander. Dit zouden nog niet geconverteerde N-verbindingen kunnen zijn die in de ovenruimte uit de brandstof-N zijn gevormd. Een medeoorzaak kan zijn de menging in de ovenruimte. Indien er een slechte menging in de ovenruimte is, kan niet alle brandstof N worden omgezet tot N_2 . In de naverbrander zal tengevolge van de goede menging en de aanwezige zuurstof de resterende brandstof N worden omgezet in NO_x .

Geconstateerd is dat zuurstofconcentratie in de ovenruimte hoog is. In hoofdstuk 3 is reeds vermeld dat dit ongunstig is voor NO_x -vorming. De zuurstofconcentratie ligt in dezelfde orde van grootte als de concentraties gemeten bij de andere processen na de naverbrander. Dit bevestigt de veronderstelling dat de naverbrander stoichiometrisch verbrand.

De hoge concentratie zuurstof kan twee oorzaken hebben. Ten eerste dat er in de ovenruimte overstoichiometrisch gestookt wordt of dat er een slechte menging heerst in de oven.

O₂ en NO_x correleren matig negatief. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door het tweede deel van het proces, waarin is te zien dat de zuurstofconcentratie relatief hoog is en de NO_x-concentratie relatief laag. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat gedurende het tweede deel van het proces het overgrote deel van de kist en het lichaam reeds is verbrand. Omdat de momentane hoeveelheid aardgas niet bekend is, kan dit niet worden gecontroleerd. Indien deze veronderstelling juist is en het eerste gedeelte van het proces beschouwd wordt, dan is er geen correlatie meer tussen O₂ en NO_x.

6. Leemtes in kennis

Op basis van voorgaande hoofdstukken zal hier aangegeven worden welke kennis ontbreekt. Tevens zal aangegeven worden welke inspanning vereist is om deze kennis te verwerven en wat het resultaat hiervan voor de crematoria zal zijn. Deze kennisverwerving heeft tot doel op een goede manier getrapte luchttoevoer toe te kunnen passen bij crematoria. De kosten van deze kennisverwerving en implementatie zal afgezet moeten worden tegen de kosten van de secundaire maatregel SNCR.

Er ontbreekt fundamentele kennis van waarden van de volgende grootheden tijdens het crematieproces:

- primaire/secundaire luchtdebiet
- menging
- aardgasdebiet
- menging
- concentraties O_2 , NO_x , CO , C_xH_y op verschillende plaatsen in de ovenruimte

Deze informatie is noodzakelijk om essentiële grootheden als bijvoorbeeld verbrandingssnelheid en luchtfactoren te kunnen bepalen. Met behulp van deze informatie kunnen gefundeerde uitspraken gedaan worden omtrent de exacte reductiemogelijkheden met behulp van primaire maatregelen.

Een onderzoek waarin de verzameling van bovenstaande grootheden een belangrijk onderdeel vormt zal resulteren in adviezen om met behulp van primaire maatregelen de NO_x te reduceren en welke reductie verwacht mag worden. Indien het advies positief is hangen de kosten af van de aanpassingen die gepleegd moeten worden bij implementatie van de adviezen. Indien bijvoorbeeld alleen de regeling moet worden aangepast zullen de investeringen laag zijn. Bij aanpassing van bijvoorbeeld de luchtkanalen zullen de kosten hoger zijn.

7. Conclusies

- Er is systematisch gezocht naar eventuele verbanden (correlaties) tussen de NO_x emissie en overige rookgascomponenten. Dit heeft opgeleverd dat de NO_x vorming niet is te correleren met enig andere verbrandingsemissie en daardoor niet op indirecte wijze kan worden gekoppeld aan de verbrandingsomstandigheden.
- Uit het onderzoek is gebleken dat de meetdata zoals in het verleden door TNO-MEP verzameld niet toereikend zijn om meer inzicht te verkrijgen in het mechanisme dat verantwoordelijk is voor de vorming van NO_x bij crematoria. Als een duidelijke leemte in de kennis is naar voren gekomen het gemis aan cijfermatige gegevens over de procesvoering en procesregeling van de crematieovens. De kennis zoals aanwezig bij de fabrikanten van de ovens is voornamelijk gebaseerd op ervaringsgegevens en wordt niet ondersteund door systematisch onderzoek.
- Simultane metingen van verschillende debieten (primair, secundair en aardgas), NO_x, O₂, CO en temperaturen in zowel de ovenruimte als de naverbrandingsruimte zijn noodzakelijk om belangrijke verbrandingsparameters zoals verbrandingssnelheid en luchtfactor te bepalen. Deze parameters zijn belangrijk om het verbrandingsproces te karakteriseren en te bepalen wat de mogelijkheden zijn om NO_x te reduceren.
- Het is aannemelijk dat in de ovenruimte een slechte menging en/of een te hoge O₂-concentratie heerst. Een verbetering van beide elementen zou op zich al kunnen leiden tot een verlaging van de NO_x emissie. Het is gebleken dat de huidige luchtregeling van de ovens is gebaseerd op ervaringsgegevens. Een systematisch onderzoek naar de meest optimale instelling van de luchtregeling gebaseerd op luchtdebieten en niet op klepstanden is in dit verband ten zeerste aan te raden. Verder kan door een andere dimensionering van de ovenruimte en/of de luchtinlaten de menging in de oven worden verbeterd.
- Een verlaging van de NO_x emissie kan bereikt worden door het toepassen van getrapte luchttoevoer. Eventueel kan ook rookgasrecirculatie worden toegepast. Echter de hieraan verbonden investeringskosten liggen veel hoger dan bij het implementeren van getrapte luchttoevoer.

- Indien er sprake is van een te hoge luchtfactor in de ovenruimte dan blijkt uit literatuur dat een substantiële NO_x -verlaging mogelijk is bij gebruikmaking van getrappt stoken. Bij een crematieproces moet in dat geval een reductie van 20-80% haalbaar zijn. De exact te behalen NO_x reductie is afhankelijk van de hoogte van de NO_x input. Het proces moet dan tevens worden uitgebreid met een zuurstofregeling in de ovenruimte, zodat in de ovenruimte reducerende omstandigheden gehandhaafd kunnen blijven.
- Indien uit vervolgonderzoek blijkt dat primaire maatregelen onvoldoende effect zullen hebben op de verlaging van de NO_x -emissie, kunnen secundaire maatregelen worden toegepast. Als secundaire NO_x -reductie maatregelen zijn er twee mogelijkheden nl. katalytische (SCR) en niet katalytische (SCNR) reductie van de NO_x -emissie. Bij toepassen van SCR is een emissiereductie van maximaal 97% haalbaar. Toepassing van SCNR levert een emissiereductie van 30-70% op, afhankelijk van de initiële NO_x concentratie. De investeringskosten voor SCNR bedragen ongeveer Nfl 100.000,-. De investeringskosten voor SCR liggen ca. een factor 2-4 hoger.
- De naverbrandingstemperatuur is bij nagenoeg alle processen onder de 850 °C. Vooral bij de warme-start processen zal een betere temperatuurregeling zorgen voor een lagere C_xH_y en CO-emissie.

8. Literatuur

- [1] Scrive L., *Reduction of pollution during combustion in gas-fired process boilers*, pp 259, vol 2, Proc. of the 3rd European Conference, Lisbon, 18-21 April 1995.
- [2] Spliethoff H. et al, Basic effects on NO_x-emissions in air staging and reburning at a bench-scale test facility, *Fuel* vol 75, 560-564, 1996
- [3] Be9r J., Minimizing NO_x-emissions from stationary combustion; reaction engineering methodology, *Chem. Eng. Sci.*, Vol 49, 4067-4083, 1994
- [4] Makansi J., *Reducing NO_x emissions*, *Power* September 1988.
- [5] Hamann R., Stickstoffoxid-Emissionen aus Mineral ĩ raffinerien und ihre Bewertung, *Erd ĩ und Kohle*, Bd. 38, Heft 4, 1985
- [6] TNO-meting bij crematorium K-2, 3-4 oktober 1995
- [7] Smit E.R., Massabalans en emissies van in Nederland toegepaste crematieprocessen, TNO-Rapport 96/059, februari 1996.
- [8] VROM, stand van zaken NO_x-bestrijding USA -reisverslag bezoek maart 1995, 1995
- [9] Van Lunteren T, *Systemen, Signalen, Stochastiek*, TU Delft, juni 1990

9. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Ministerie van VROM
Directoraat-Generaal Milieubeheer
Directie Lucht en Energie, Afd. Bedrijven
t.a.v. Ing. H.W. Holtring
Postbus 30945
2500 GX 's-Gravenhage

Namen en functies van de projectmedewerkers:

dr. ir. G. Brem	wetenschappelijk onderzoeksmedewerker/coördinator
ir. L.B.M. van Kessel	wetenschappelijk onderzoeksmedewerker
ing. E.R. Smit	onderzoeksmedewerker/onderzoekleider

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:
niet van toepassing

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:
februari 1996 - juni 1996

Ondertekening:

Goedgekeurd door:

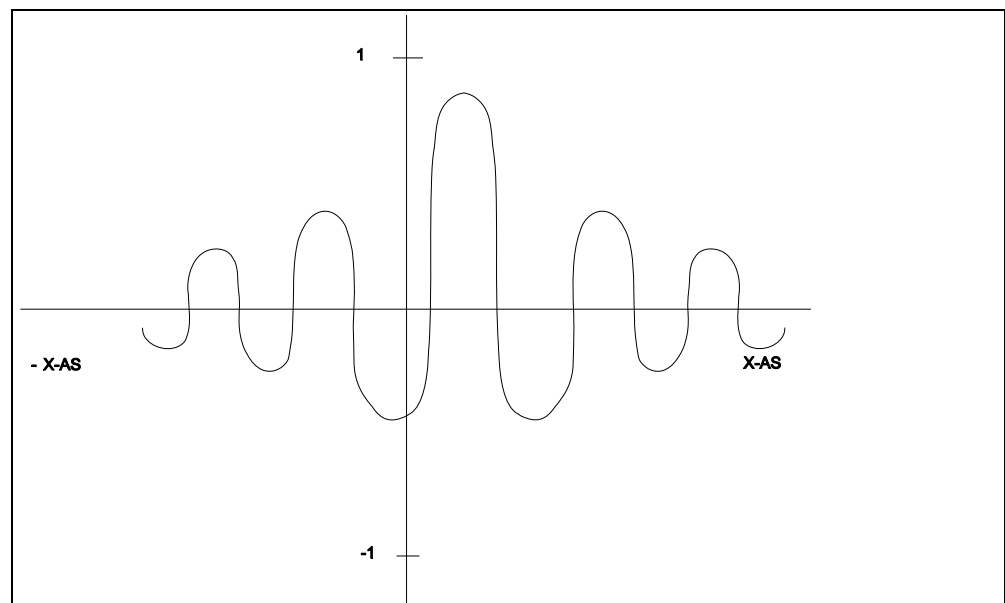
ing. E.R. Smit
onderzoekleider

ir. J. de Koning
afdelingshoofd

Bijlage A Beschrijving kruiscorrelatiefunctie

De kruiscorrelatiefunctie geeft informatie over wat twee signalen aan frequentie-inhoud gemeenschappelijk hebben. Door de waarde van een correlatiefunctie te vergelijken ten opzichte van de waarde 1 kan onderzocht worden of het verband tussen twee processen sterk is of niet. Voor de waarde van de kruiscorrelatiefunctie geldt dat deze kleiner gelijk aan 1 is en groter gelijk aan -1. De kruiscorrelatie tussen twee signalen wordt berekend nadat eerst de gemiddelde waarden van de signalen zijn verwijderd (normeren). Dit is gedaan omdat bij het bepalen van het verband tussen twee signalen de fluctuaties van de signalen ten opzichte van hun gemiddelde waarde interessant zijn. Figuur A.1 geeft schematisch een voorbeeld weer van een correlatiefunctie.

Aan de hand van figuur A.1 zullen de belangrijkste eigenschappen van de kruiscorrelatiefunctie uitgelegd worden. Zoals werd vermeld is de maximum waarde van de correlatiefunctie 1 en de minimum waarde -1. Indien de correlatiefunctie 1 is zijn de signalen volledig gecorreleerd, wanneer de correlatiefunctie 0 is zijn ze volledig ongecorreleerd. Is de correlatiefunctie -1 dan zijn de signalen volledig gecorreleerd, maar reageren ze tegengesteld. Hoe dichterbij 0 ligt, des te minder sterk het verband tussen de signalen is. Op de x-as staat de datareekslengte aangegeven, waarbij zowel links als rechts van nul het aantal bemonsterpunten staat. De verschuiving van het maximum (of minimum) ten opzichte van de 0-as is een maat voor de looptijd die tussen twee processen optreedt. Aan de hand van het aantal bemonsterpunten, waarbij het maximum (of minimum) optreedt en de tijdstapgrootte kan de looptijd bepaald worden. De grootte van de zijlobben en de snelheid waarmee deze uitdempen is een maat voor de correlatie. Indien de zijlobben ten opzichte van het maximum (of minimum) groot zijn en nauwelijks of maar langzaam uitdempen geeft dat aan dat het verband tussen beide processen niet eenduidig is. Een steile piek met snel uitdempende zijlobben daarentegen geeft aan dat bij een bepaalde frequentie een sterk verband aanwezig is. Een aspect dat van belang is bij het berekenen van de kruiscorrelatiefuncties is het aantal monsters van het signaal waarover de kruiscorrelatiefunctie berekend wordt. Indien het aantal monsters van het signaal klein is, zal de berekening van de kruiscorrelatiefunctie over een betrekkelijk kleine tijdspanne van het proces gaan. Dit levert geen erg betrouwbare resultaten op.



Figuur A.1 Voorbeeld kruiscorrelatiefunctie.

Bemonsterfrequentie

Voor de bepaling van de bemonsterfrequentie tijdens data-acquisitie geldt een minimum. De minimale bemonsterfrequentie dient zodanig gekozen te worden, dat het mogelijk is de karakteristieke eigenschappen van het proces door middel van bemonsterde signalen weer te geven. Een vuistregel voor deze ondergrens wordt wel gegeven door

$$\omega_s \geq 2 \omega_b$$

met ω_s de bemonsterfrequentie en ω_b de bandbreedte van het proces [1]. Met $\omega_s = 2\pi / \Delta T$ en $\omega_b = 2\pi / \tau_{set,95}$ kan deze vuistregel ook geformuleerd worden als

$$\Delta T \leq \frac{1}{2} \times \tau_{set,95}$$

Met $\tau_{set,95}$ de 95% settling time van een stapresponsie van het proces en ΔT de bemonstertijd.

Tijdens de in het verleden uitgevoerde metingen aan de verschillende processen is een bemonsterfrequentie gehanteerd van 2 scans per minuut. Omdat de bemonsterfrequentie vastligt is het de vraag of dat deze voldoende groot is om de karakteristieke eigenschappen van het proces vast te leggen. Omdat geen verdere informatie voorhanden is zal worden getracht met de beschikbare informatie correlaties te bepalen.

Gezien de verblijftijd van de gassen in het systeem zullen uit de kruiscorrelatiefunctie geen looptijden gehaald kunnen worden. Dus zal er alleen duidelijkheid komen omtrent de correlatie van verschillende grootheden.

- [1] Ljung L., *System identification - Theory for the user*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.

Bijlage B Rookgas emissies koude-start ovens

In deze bijlage staan de resultaten van metingen uitgevoerd aan koude-start processen zoals in het verleden door TNO-MEP uitgevoerd. De resultaten zijn alle betrokken op 11% O₂.

Voor ieder onderzocht proces staat grafisch het verloop van de concentratie van de volgende componenten in de rookgassen, betrokken op 11% O₂, in de tijd weergegeven:

CO in mg/m³ ind (blauw)

NO_x in mg/m³ ind (groen)

O₂ in vol% (rood)

Tevens is voor ieder onderzocht proces het verloop van de rookgastemperatuur na de naverbrander gedurende de procestijd grafisch weergegeven.

Bijlage B.1

Tabel Rookgasparameters crematorium K1; concentraties betrokken op 11% O₂

Parameter	Eenheid	Proces 1	Proces 2	Proces 3	Proces 4
NO _x	mg/m ³ ind	300 <>	267 <>	187 <>	282 <>
CO	mg/m ³ ind	58	95	44	58
O ₂	vol%	25 <>	95 <>	24 <> 6	25 <> 3
C _x H _y	mg/m ³ ind	11	44	11,9 <>	12,4 <>
T rookgas	/C	11,7 <>	12,0 <>	1,7	2,2
rookgasdebiet	m ³ ind/h	1,4	3,3	1 <>	<1 <> 1
procesduur	min	1 <>	<1 <> 8	0,4	653 <>
aardgas	m ³ /proces	0,3	656 <>	625 <>	31
invoergewicht	kg	638 <>	81	36	857
		30	794	923	127
		1030	134	150	53,7
		150	38,5	83,1	101,7
		100,4	96,4	105,6	
		95,9			

Parameter	Eenheid	Proces 5	Proces 6	Proces 7
NO _x	mg/m ³ ind	293 <> 82	261 <> 96	305 <> 96
CO	mg/m ³ ind	32 <> 5	6 <> 47	5 <> 2
O ₂	vol%	12,9 <> 1,9	12,1 <> 2,4	12,6 <> 2,5
C _x H _y	mg/m ³ ind	<1 <> 0,3	<1 <> 3	<1 <> 1
T rookgas	/C	649 <> 28	628 <> 26	666 <> 45
rookgasdebiet	m ³ ind/h	914	910	876
procesduur	min	130	128	130
aardgas	m ³ /proces	57,0	64,9	51,0
invoergewicht	kg	104,0	94,0	110,7

Bijlage B.2*Tabel Rookgasparameters crematorium K2; concentraties betrokken op 11% O₂*

Parameter	Eenheid	Proces 1	Proces 2	Proces 3
NO _x	mg/m ³ ind	262 <	353 <	286 <
CO	mg/m ³ ind	116	121	156
O ₂	vol%	23 < 15	18 < 6	37 < 16
C _x H _y	mg/m ³ ind	9,0<	13,4<	15,2<
T rookgas	/C	3,1	0,5	0,4
rookgasdebiet	m ³ ind/h	9 < 3	6 < 1	10 < 7
procesduur	min	894 < 84	859 < 63	943 <
aardgas	m ³ /proces	4017	NB	118
invoergewicht	kg	62	76	2749
		43,1	NB	78
		101,1	NB	27,4
				107,1

Bijlage B.3*Tabel Rookgasparameters crematorium K3; concentraties betrokken op 11% O₂*

Parameter	Eenheid	Proces 1	Proces 2	Proces 3	Proces 4
NO _x	mg/m ³ ind	259 \times	291 \times	216 \times 123	252 \times 130
CO	mg/m ³ ind	106	154	48 \times 193	74 \times 297
O ₂	vol%	71 \times	81 \times	11,2 \times 2,7	11,8 \times 2,3
C _x H _y	mg/m ³ ind	385	250	39 \times 30	11 \times 58
T rookgas	/C	12,0 \times 2,2	12,1 \times 2,7	708 \times 83	741 \times 60
rookgasdebiet	m ³ ind/h	22 \times 25	18 \times 76	888	859
procesduur	min	719 \times 63	763 \times 51	151	109
aardgas	m ³ /proces	911	1354	91,3	48,8
invoergewicht	kg	157	99	102,0	87,9
		85,7	83,7		
		111,9	82,8		

Bijlage B.4

De resultaten van de metingen in de ovenruimte bij crematorium K4 staan in onderstaande figuren grafisch weergegeven. In totaal zijn over drie processen metingen uitgevoerd. De eerste figuur van ieder proces geeft het verloop van de CO-concentratie (blauw, mg/m^3 ind), de NO_x -concentratie (groen, mg/m^3 ind), beide betrokken op 11% O_2 , en de O_2 -concentratie (rood, vol%) in de tijd weer. De tweede figuur geeft het verloop van de oventemperatuur per proces aan. De uitgevoerde metingen waren indicatief van aard. Het ging bij deze metingen om het vaststellen van concentratietrends in de ovenruimte.

Bijlage C Rookgas emissies warme-start ovens

In deze bijlage staan de resultaten van metingen uitgevoerd aan warme-start processen zoals in het verleden door TNO-MEP uitgevoerd. De resultaten zijn alle betrokken op 11% O₂.

Voor ieder onderzocht proces staat grafisch het verloop van de concentratie van de volgende componenten in de rookgassen, betrokken op 11% O₂, in de tijd weergegeven:

CO in mg/m³ ind (blauw)

NO_x in mg/m³ ind (groen)

O₂ in vol% (rood)

Tevens is voor ieder onderzocht proces het verloop van de rookgastemperatuur na de naverbrander gedurende de procestijd grafisch weergegeven.

Bijlage C.1*Tabel Rookgasparameters crematorium W1; concentraties betrokken op 11% O₂*

Parameter	Eenheid	Proces 1	Proces 2	Proces 3	Proces 4
NO _x	mg/m ³ ind	497 <	418 <	487 <	482 <
CO	mg/m ³ ind	258	260	198	213
O ₂	vol%	172 <	225 <	100 <	55 <
C _x H _y	mg/m ³ ind	242	789	360	168
T rookgas	/C	17,5 < 1,4	16,9 < 2,3	17,2 < 1,4	17,5 < 1,9
rookgasdebiet	m ³ ind/h	599 <	453 <	104 <	112 < 93
procesduur	min	419	517	210	650 < 77
aardgas	m ³ /proces	565 < 59	697 <	621 < 69	2122
invoergewicht	kg	1818	103	NB	69
		68	1760	55	3,4
		17,3	74	NB	106,6
		93,8	7,0	NB	
			123,9		

Bijlage C.2*Tabel Rookgasparameters crematorium W2; concentraties betrokken op 11% O₂*

Parameter	Eenheid	Proces 1	Proces 2	Proces 3	Proces 4
NO _x	mg/m ³ ind	349 <	462 <	293 <	393 <
CO	mg/m ³ ind	251	330	221	174
O ₂	vol%	283 <	101 <	53 <	102 <
C _x H _y	mg/m ³ ind	474	201	128	285
T rookgas	/C	17,9 < 1,2	18,4 < 1,8	17,2 < 1,2	18,0 < 1,9
rookgasdebiet	m ³ ind/h	41 < 70	36 < 59	7 < 5	10 < 7
procesduur	min	NB	NB	NB	NB
aardgas	m ³ /proces	2579	2994	2396	2181
invoergewicht	kg	95	89	93	72
		27,3	23,5	31,0	9,0
		117	114	139	86

Bijlage C.3

Tabel Rookgasparameters crematorium W3; concentraties betrokken op 11% O₂

Parameter	Eenheid	Proces 1	Proces 2	Proces 3
NO _x	mg/m ³ ind	290 \times 204	277 \times 150	269 \times 184
CO	mg/m ³ ind	32 \times 24	41 \times 128	25 \times 14
O ₂	vol%	8,5 \times 2,8	8,7 \times 2,5	11,1 \times 1,3
C _x H _y	mg/m ³ ind	10 \times 11	6 \times 13	6 \times 3
T rookgas	/C	760 \times 112	826 \times 53	806 \times 33
rookgasdebiet	m ³ ind/h	NB	1751	1914
procesduur	min	114	127	120
aardgas	m ³ /proces	NB	43,3	42,7
invoergewicht	kg	NB	109,5	86,5

Bijlage D Grafische voorstelling kruiscorrelatiefuncties bij een warme- en een koude-start oven

Voor ieder proces zijn de volgende kruiscorrelatie functies bepaald:

- O_2/NO_x
- O_2/CO
- CO/NO_x
- O_2/C_xH_y
- O_2/T_{rookgas}
- CO/T_{rookgas}
- NO_x/T_{rookgas}

Een grafische representatie van deze functies is voor een koude-start en een warme-start proces in deze bijlage opgenomen.

