

**Voorbeeldimplementatie van
EN 14181 voor PEM systemen:
Deel 2: Rapportage van de uitvoering van een QAL 2 procedure
SenterNovem projectnummer: 3303-04-01-01-004**

Door
R. Mellema
H. Top
A. v.d. Vegt

Voor akkoord:

A. Kiel

GASUNIE RESEARCH, beschikbaar gesteld door SenterNovem en VROM

Part of Gasunie Engineering B.V.

RAPPORT : RE 2004.R.0595
Datum : 27 september 2004
Versie : 3.1
Status : **DEFINITIEF**

Bladen inclusief bijlagen: 11

2004 N.V. Nederlandse Gasunie, Groningen

Dit rapport is opgesteld in opdracht van: SenterNovem

Gasunie accepteert geen enkele aansprakelijkheid met betrekking tot het gebruik van, of voor schade die voortvloeien uit het gebruik van enigerlei informatie, apparatuur of proces die of dat wordt beschreven in dit rapport.

1 SAMENVATTING

Gasunie Research heeft in opdracht van SenterNovem een QAL 2 procedure uitgevoerd aan een reeds geïmplementeerd PEM systeem. Het doel hiervan was te onderzoeken of de in NEN-EN 14181 beschreven QAL 2 procedure niet alleen voor CEM systemen, maar ook voor PEM systemen kan worden toegepast.

De QAL 2 test is uitgevoerd aan een PEM systeem op een gasturbine installatie. De betreffende gasturbine is uitgerust met een inrichting voor het injecteren van stoom in de verbrandingskamers ter vermindering van de NO_x-uitwerp.

Het onderzochte PEM systeem is gebaseerd op een fysisch model dat gebruik maakt van de volgende invoerparameters:

- Gasverbruik van de turbine in m³n/h;
- Gasverbruik van de bijstookbranders in m³n/h;
- Stoominjectie in ton/h.

De QAL 2 test is uitgevoerd op 19, 21 en 22 juli 2004, conform de in NEN-EN 14181 vermelde voorschriften. Er zijn in totaal 15 experimenten van 30 minuten onder normale bedrijfs-condities gedaan. Door de uitkomsten van het model te vergelijken met momentaan gemeten emissiewaarden, kon een oordeel over de werking van het model worden gevormd.

Uit de test kan de conclusie worden getrokken dat het met de in EN 14181 beschreven QAL 2 procedure goed mogelijk is een PEM systeem te kalibreren en de variabiliteit ervan te toetsen.

Wél dient bij de uitvoering van de QAL 2 procedure erop te worden toegezien dat de afgeleide kalibratiefunctie niet bij 'extreme' atmosferische condities is bepaald. Dit zou het model onder normalere condities een grote afwijking kunnen geven.

Ook is het van belang te onderkennen dat een minder nauwkeurige uitvoering van de QAL 2 metingen, invloed kan hebben op de uitkomst van de variabiliteitstest. Het streven zou moeten zijn om QAL 2 metingen met een minstens even grote nauwkeurigheid uit te voeren als de modelmetingen.

I N H O U D

1	SAMENVATTING	2
2	INLEIDING	4
3	BESCHRIJVING VAN HET PEM SYSTEEM	4
3.1	De installatie	4
3.2	Het model	4
3.3	De Standaard Referentie Meting	5
4	DE QAL 2 PROCEDURE	6
4.1	Uitvoering.....	6
4.2	Resultaten	6
4.3	Knelpunten	10
5	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	10
6	REFERENTIES	10

Bijlage A Grafiek berekende versus gemeten emissies

2 INLEIDING

Door SenterNovem is aan Gasunie Research opdracht verleend voor het bieden van ondersteuning bij de implementatie van NEN-EN 14181 [Ref. 1] voor PEM systemen in het kader van de invoering van de (NOx-)emissiehandel. De rapportage die in dit verband door Gasunie Research is uitgebracht bestaat uit drie deelrapporten, waarin per deel één van de in NEN-EN 14181 beschreven QAL procedures wordt behandeld. In het onderhavige deel worden de uitgevoerde QAL 2 procedure, eventueel geconstateerde knelpunten en de gehanteerde oplossingen beschreven.

De QAL 2 procedure kan worden beschouwd als een kalibratie van het geïmplementeerde systeem, waarin de performance van het systeem wordt vergeleken met een **Standaard Referentie Methode** (SRM).

In NEN-EN 14181 is beschreven hoe de QAL 2 procedure dient te worden uitgevoerd. Omdat de betreffende norm in aanleg voor CEM systemen is bedoeld, zou het mogelijk kunnen zijn dat bij het gebruik van PEM systemen de norm niet volledig kan worden gevolgd. Om hierin duidelijkheid te verkrijgen is door Gasunie Research de QAL 2 procedure getest op een operationeel PEM systeem.

3 BESCHRIJVING VAN HET PEM SYSTEEM

De test is uitgevoerd aan een bestaand PEM systeem voor de emissiebepaling van een gasturbine installatie. Het model is in december 2003 afgeleid, maar nog niet geïmplementeerd. Momenteel wordt nog met een oudere versie van het model gewerkt. In 2003, als onderdeel van de nog uit te voeren implementatie van een nieuw model, zijn initiële emissiemetingen met een SRM uitgevoerd bij een aantal instellingen van de installatie, waarbij gelijktijdig bepaalde emissierelevante parameters in het DCS van het bedrijf zijn geregistreerd.

Feitelijk kan op dit moment niet een volledige QAL 2 test worden uitgevoerd, omdat het nieuw ontwikkelde model nog niet fysiek is geïmplementeerd. De uitkomst van het model is niet uit het DCS overgenomen, maar is het resultaat van een handmatige berekening met gebruikmaking van gegevens uit het DCS. Het enige onderdeel dat dus niet kan worden getest is de programmering van het model in het DCS maar voor het overige kan een goed vergelijk met de resultaten van de SRM worden gemaakt. Eén en ander zal geen invloed hebben op de resultaten van de onderhavige test.

3.1 De installatie

De installatie bestaat uit een General Electric Frame Size 6 gasturbine met bijgestookte afgassenketel. Ter beperking van de NOx-uitwerp is de gasturbine voorzien van stoominjectie.

Het totale thermische vermogen van de installatie bedraagt 189 MW_{th}, waarmee de installatie in Klasse I is gekwalificeerd. Onder normale bedrijfsomstandigheden wordt de stoominjectie geregeld, opdat ten alle tijde wordt voldaan aan de door de autoriteiten voorgeschreven emissiegrenswaarde.

3.2 Het model

Het model dat in 2003 is afgeleid is gebaseerd op een door Gasunie Research ontwikkeld algemeen geldend fysisch emissiemodel voor gasturbines met bijgestookte afgassenketel en stoom- of waterinjectie [Ref 5, 6] met de volgende gedaante:

$$NOx_m = \frac{A \cdot Q_{gt} \cdot e^{By} + C \cdot Q_{bij}}{Q_{gt} + Q_{bij}}$$

Op grond van de meetresultaten van de modelmetingen in 2003 is het model voor de specifieke installatie verfijnd door het 'tunen' van de coëfficiënten A, B en C, volgens

$$NOx_m = \frac{\left(5,4428 \times 10^{-7} \cdot Q_{gt}^3 + 1,8806 \times 10^{-2} \cdot Q_{gt}^2\right) \cdot e^{-1,3010y} + 22 \cdot Q_{bij}}{Q_{gt} + Q_{bij}} \quad \text{waarin:}$$

NOx_m	=	Momentane berekende NOx-emissie in g/GJ (uitvoerparameter);
Q_{gt}	=	Gasverbruik van de gasturbine in m ³ /uur (invoerparameter);
Q_{bij}	=	Gasverbruik van de bijstookbranders in m ³ /uur (invoerparameter);
y	=	Stoominjectie in de verbrandingskamers van de gasturbine in ton/uur (invoerparameter).

Als invoerparameters worden dus drie grootheden gebruikt. Ter beoordeling van de geschiktheid van de gebruikte meetinstrumenten is een inventarisatie gemaakt van de specificaties daarvan (QAL 1, Ref 7). Op grond van deze specificaties is de samengestelde meetonzekerheid op de met het model berekende emissies afgeleid.

Tijdens het afleiden van het model in december 2003 bleek de afwijking van de met het model berekende emissies ten opzichte van de SRM ± 8,4% (± 5,9 g/GJ ten opzichte van de jaargemiddelde waarde van 75 g/GJ, 95% betrouwbaarheidsinterval) te bedragen.

De spreiding in de afwijking varieerde hierbij van -5,5 tot +6,7 g/GJ met een gemiddelde waarde van +1,0 g/GJ.

De modelmetingen in december 2003 zijn uitgevoerd met een gemiddelde onzekerheid van ± 4,0 % (95% betrouwbaarheidsinterval, dit ter informatie).

3.3 De Standaard Referentie Meting

De metingen (zowel de modelmetingen in 2003 als de QAL 2 metingen) zijn uitgevoerd met de meetwagen van Gasunie Research. In deze meetwagen bevinden zich de analysatoren waarmee concentraties van diverse verbrandingsgascomponenten kunnen worden gemeten. In het kader van de onderhavige metingen zijn vooral de NOx-metingen (chemoluminescentie) en de zuurstofmeting (paramagnetisme) van belang.

De metingen zijn uitgevoerd conform de procedures en werkinstructies die hiervoor bij Gasunie Research in gebruik zijn. De kwaliteitsborging bestaat uit de volgende handelingen:

- Nul- en spankalibratie van de gebruikte analysatoren (enkele malen per dag);
- Registratie van metingen met kalibratiegassen;
- Testgasmeting en validatie van de analysatoren;
- Lektest op het monsternamesysteem met stikstof;
- Traversemetingen in het verbrandingsgaskanaal en vaststellen van het meest geschikte monsternamepunt;
- Herhaling van de metingen met kalibratiegassen na uitvoering van de metingen om het verschil (drift) met de situatie van vóór de metingen vast te leggen.

De prestaties van de verschillende analysatoren worden op controlekaarten bijgehouden.

4 DE QAL 2 PROCEDURE

Volgens NEN-EN 14181 dient een geautomatiseerd Meet Systeem (AMS) na iedere belangrijke wijziging van de stookinstallatie of het AMS en eenmaal per drie jaar te worden gekalibreerd door middel van de zogenoemde QAL 2 procedure. In deze procedure staat beschreven dat het AMS onder normale bedrijfscondities, gedurende tenminste drie dagen, minimaal 15 keer en tenminste 30 minuten verspreid over de dag met parallelmetingen met een SRM moet worden vergeleken.

De QAL 2 test is op 19, 21 en 22 juli 2004 uitgevoerd. In het navolgende worden de bevindingen besproken.

4.1 Uitvoering

De QAL 2 metingen op 19, 21 en 22 juli zijn conform de norm verspreid over 8 tot 10 uren in drie etmalen uitgevoerd (ook 's nachts), waarbij telkens vijf experimenten van elk tenminste 30 minuten zijn gedaan. De installatie heeft hierbij onder normale bedrijfscondities gewerkt.

Tijdens de metingen zijn de analysatoren iedere 10 seconden elektronisch uitgelezen, en de emissiemetwaarden zijn in een computer opgeslagen.

Simultaan aan dit proces zijn de emissierelevante parameters als genoemd in hoofdstuk 3 gemeten en de resultaten zijn per minuut geregistreerd in het DCS van het bedrijf. Na afloop van de metingen zijn de gegevens uit het DCS gedownload en gesynchroniseerd met de meetresultaten die in de meetwagen zijn vastgelegd.

Van tevoren is de offset tussen de klokken van beide systemen bepaald en bij de verwerking van de gegevens is hiervoor gecorrigeerd.

De samenstelling van het brandstofgas (H-gas) is in beide meetperioden opgevraagd bij Gastransport Services in Groningen. Hieruit zijn de calorische waarde en andere relevante aardgaseigenschappen berekend. Het bleek dat de geleverde aardgaskwaliteit in beide gevallen nagenoeg identiek was (calorische onderwaarde van 39,425 MJ/m³n in 2003 ten opzichte van 39,426 MJ/m³n in 2004).

De onzekerheid in de bepaling van de calorische onderwaarde bedraagt ± 0,1%. Deze waarde is dermate laag dat de invloed hiervan op de emissiewaarde te verwaarlozen is.

Hoewel de emissies van de gasturbine installatie gevoelig zijn voor de kwaliteit van het brandstofgas, is de geleverde samenstelling op de betreffende locatie dermate constant dat hiermee in het model geen rekening behoeft te worden gehouden.

Indien de brandstofkwaliteit sterk varieert, zou de invloed hiervan in het model moeten worden meegenomen.

De emissierelevante parameters uit het DCS zijn in het model ingebracht en de met het model berekende waarden zijn vergeleken met de gemeten emissies. Hiertoe is gebruik gemaakt van de door KEMA ontwikkelde rekenbladen; van het model is een kalibratiefunctie afgeleid.

4.2 Resultaten

Met de resultaten van de 15 parallelmetingen van de QAL 2 test is opnieuw het verschil bepaald tussen de gemeten emissies en de met het model berekende waarden.

De afwijking tussen de uitkomst van het model en de gemeten emissies bedroeg ± 9,2 %

(± 6,9 g/GJ ten opzichte van de jaargemiddelde emissie van 75 g/GJ, 95% betrouwbaarheids-interval).

De spreiding in de afwijking varieerde hierbij van -0,7 tot +8,6 g/GJ met een gemiddelde waarde van +3,1 g/GJ.

In onderstaande tabel zijn de prestaties van het model tijdens de initiële metingen en de QAL 2 metingen kort samengevat.

Tabel 4.1: Afwijkingen van het model t.o.v. de SRM

	Verskil min g/GJ	Verskil max g/GJ	Verskil gem g/GJ	Std.afw verschil* g/GJ
2003 initieel	-5,5	+6,7	+1,0	± 5,9
2004 QAL 2	-0,7	+8,6	+3,1	± 6,5

*) betreft 2-sigma, 95% betrouwbaarheidsinterval

Uit de gegevens in bovenstaande tabel kan worden afgeleid dat de afwijking van het model ten opzichte van de SRM tijdens de QAL 2 test groter was dan tijdens de initiële metingen. Ook is te zien dat een verschuiving van de afwijking naar boven heeft plaatsgevonden. Het model berekende tijdens de QAL 2 test over het algemeen een hogere waarde dan is gemeten.

De spreiding in het verschil is daarentegen iets afgenomen (van 12,2 g/GJ naar 9,3 g/GJ). Hierbij moet worden opgemerkt dat de QAL 2 metingen onder bedrijfsomstandigheden zijn uitgevoerd met een geringe spreiding op de diverse invoerparameters, terwijl tijdens de initiële metingen alle mogelijke combinaties van bedrijfscondities zijn ingesteld, hetgeen per definitie een grotere spreiding in de emissies met zich meebrengt.

De verschuiving van de afwijking in positieve richting is ook zichtbaar in de grafiek in bijlage A. Hierin zijn de gemeten en berekende emissies tijdens de initiële metingen en de QAL 2 test tegen elkaar uitgezet. Er is te zien dat de berekende waarden tijdens de QAL 2 test over het algemeen hoger zijn dan de gemeten waarden, dit in tegenstelling tot de waarden die tijdens de initiële metingen zijn bepaald, en waarbij een meer evenwichtige verdeling van het verschil wordt gevonden.

Het bovengenoemde verschijnsel is waarschijnlijk te verklaren uit het verschil in atmosferische condities tijdens beide metingen. Bij de initiële metingen in 2003 was het betrekkelijk droog, koud weer (ca. 60% relatieve vochtigheid, 2°C), terwijl in 2004 sprake was van een hogere luchtvochtigheid en een hogere temperatuur (ca. 75% relatieve vochtigheid, 20°C).

Eén en ander heeft in 2003 geresulteerd in een vochtgehalte van ca. 2,5 g/kg droge lucht, terwijl in 2004 ca. 11,3 g/kg vocht in de lucht aanwezig was.

Als gevolg van de lage luchtvochtigheid in 2003 berekent het model in principe dus een te hoge waarde bij min of meer gemiddelde condities (zoals tijdens de QAL 2 metingen).

Mogelijk is hiermee de gevoeligheid van de gasturbine voor atmosferische condities beschreven, echter onder een zeer beperkt aantal omstandigheden. Bij een zeer hoge vochtigheid en/of buitentemperatuur, zal de afwijking van het model vermoedelijk groter worden. De verwachting is dat het model nog wel altijd binnen de toegestane 20% afwijking zal blijven functioneren [Ref 7, 8].

Conform EN 14181 is een kalibratie en een validatie uitgevoerd van het AMS. Hiertoe is de in hoofdstukken 6.1 t/m 6.7 van de norm beschreven methode gevolgd (kalibratiefunctie en variabiliteitstest). In tabel 4.1 is de totstandkoming van de kalibratiefunctie beschreven, waarmee de door het PEM systeem berekende emissies moeten worden gecorrigeerd.

Tabel 4.1: Afleiding van de kalibratiefunctie

Monster	SRM g/GJ	AMS g/GJ	y-ygem g/GJ	x-xgem g/GJ	(x-xgem) ²	a*b	cal.functie g/GJ
1	72.4	80.1	3.2	8.3	68.1	26.51	77.1
2	71.0	79.0	1.8	7.2	51.1	12.97	76.1
3	62.8	69.5	-6.4	-2.3	5.3	14.67	67.0
4	63.0	69.2	-6.2	-2.7	7.2	16.62	66.6
5	70.6	76.7	1.4	4.9	24.0	6.93	73.9
6	68.8	68.2	-0.4	-3.6	13.0	1.40	65.7
7	68.8	69.0	-0.4	-2.8	8.1	1.10	66.4
8	66.5	65.5	-2.7	-6.4	40.7	17.14	63.0
9	65.6	64.5	-3.6	-7.3	53.6	26.25	62.1
10	66.9	66.1	-2.3	-5.7	32.9	13.11	63.7
11	70.9	72.0	1.7	0.2	0.0	0.29	69.3
12	72.8	74.4	3.6	2.6	6.5	9.22	71.6
13	72.7	74.4	3.5	2.5	6.4	8.90	71.6
14	72.3	74.4	3.1	2.5	6.4	7.87	71.6
15	72.7	74.6	3.5	2.8	7.7	9.78	71.9
Totaal	1037.8	1077.6	0.0	0.0	331.1	172.7	1037.8
Gemiddeld	69.2	71.8					

Nul-offset	0	g/GJ	b1	0.522
Emissiegrenswaarde	75.0	g/GJ	a1	31.70
y _{max}	72.8	g/GJ	b2	0.963
y _{min}	62.8	g/GJ	a2	0.000
y _{max} - y _{min}	10.0	g/GJ		
d _{y_{max}}	11.25	g/GJ		
b	0.963			
a	0.000			

In tabel 4.2 zijn de resultaten van de variabiliteitstest gegeven

Tabel 4.2: Resultaten van de variabiliteitstest

Nr.	Date	Start	End	AMS(cal)	SRM	$(D_i - D)^2$
1	19-jul-04	08:32	09:04	77.1	72.4	22.5
2	19-jul-04	09:54	10:27	76.1	71.0	25.8
3	19-jul-04	11:15	11:46	66.9	62.8	17.1
4	19-jul-00	13:28	14:05	66.6	63.0	13.3
5	19-jul-04	17:26	18:03	73.9	70.6	10.7
6	21-jul-04	00:36	01:11	65.7	68.8	9.7
7	21-jul-04	02:30	03:02	66.5	68.8	5.5
8	21-jul-04	05:35	06:06	63.1	66.5	11.7
9	21-jul-04	06:10	06:41	62.1	65.6	12.1
10	21-jul-04	07:55	08:26	63.7	66.9	10.5
11	22-jul-04	10:16	10:47	69.3	70.9	2.4
12	22-jul-04	12:58	13:29	71.7	72.8	1.3
13	22-jul-04	14:30	15:00	71.7	72.7	1.1
14	22-jul-04	16:10	17:00	71.7	72.3	0.4
15	22-jul-04	18:01	18:32	71.8	72.7	0.7
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
Total # of measurements				15	15	
Minimum				62.1	62.8	
Maximum				77.1	72.8	
Average				69.2	69.2	
Range (SRM _{max} -SRM _{min})					10.0	
Range / ELV					0.13	
S _D						3.22
σ ₀ k _v						7.5
S _D ≤ σ ₀ k _v						Ja

Bovenstaande resultaten van de variabiliteitstest, afkomstig uit het rekenblad, toont aan dat het PEM systeem voldoet.

4.3 Knelpunten

Tijdens de QAL 2 procedure zijn geen ernstige knelpunten aan het licht gekomen.

Wel moet worden opgemerkt dat in de voorgeschreven meetperiode van drie dagen de variatie in bedrijfscondities niet altijd zodanig zal zijn dat het model tot in alle uithoeken wordt gevalideerd. Omdat de bedrijfsvoering vaak te weinig voorspelbaar is, is het niet mogelijk om (geruime tijd van te voren) een meetplan op te stellen. De aangetroffen omstandigheden berusten min of meer op toeval. Gezien het geringe aantal voorgeschreven experimenten, zal dit aspect met name tijdens de AST's naar voren komen. Dit gegeven is voor PEM systemen echter niet anders dan voor CEM systemen.

Een ander potentieel probleem betreft de herhaalbaarheid van de variabiliteitstest van de QAL 2 procedure. Indien een model is afgeleid op basis van meetgegevens van meetinstantie A, met een bepaalde (onderbouwde) meetonzekerheid, zou het model tijdens de QAL 2 test en de AST's moeten worden gevalideerd met een tenminste even kleine onzekerheid.

Er kan zich anders de situatie voordoen dat het model van instantie A nog juist binnen de toegestane variabiliteit valt, maar dat het op grond van een validatie door instantie B met een minder nauwkeurige SRM (in principe ten onrechte omdat er geen eisen worden gesteld aan de meetonzekerheid van de modelmetingen en/of de SRM) niet slaagt voor de test. Het uitvoeren van de QAL 2 procedure dient bij voorkeur dus met een voldoende hoge nauwkeurigheid te geschieden. Ook dit geldt eveneens voor CEM systemen.

5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Uit de praktijktest kan worden geconcludeerd dat het zonder meer mogelijk is om een PEM systeem te kalibreren en te testen op variabiliteit met de in EN 14181 beschreven QAL 2 procedure.

6 REFERENTIES

1. NEN-EN 14181, Stationary source emissions – Quality assurance of automated measuring systems, NEN, 2003.
2. Programma van Eisen CO₂ en NO_x-monitoringsprotocollen (PvE), VROM, 21 juni 2004.
3. Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), BIPM IEC IFCC ISO IUPAC IUPAP OIML, 1995.
4. Variations in the NO_x-emissions of gas turbines; effects of air temperature, air humidity and natural gas composition, Visser en Bahlmann, NV Nederlandse Gasunie, 1994.
5. Modelling van de effecten van water- en stoominjectie en bijstoken op de NO_x-emissie van gasturbine-installaties (TIS-2), Visser en Bahlmann, NV Nederlandse Gasunie, 1994.
6. ISO 14956, Air quality, evaluation of the suitability of a measurement procedure by comparison with a required measurement uncertainty, ISO, 2001.
7. Voorbeeldimplementatie van EN 14181 voor PEM systemen; Deel 4: Rapportage m.b.t de invloed van atmosferische condities, Gasunie Research RE 2004.R.0660, 2004.
8. Voorbeeldimplementatie van EN 14181 voor PEM systemen, Deel 1: Rapportage van de uitvoering van de QAL 1 procedure, Gasunie Research RE 2004.R.0659, 2004

