



SenterNovem

Gasunie

**Voorbeeldimplementatie van
EN 14181 voor PEM systemen:
Deel 1: Rapportage van de uitvoering van de QAL 1 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.0659
Datum : 27 september 2004
Versie : 3.1
Status : **DEFINITIEF**

Bladen inclusief bijlagen: 15

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 1 procedure uitgevoerd aan een reeds geïmplementeerd PEM systeem. Het doel hiervan was te onderzoeken of de in NEN-EN 14181 beschreven QAL 1 procedure niet alleen voor CEM systemen, maar ook voor PEM systemen kan worden toegepast.

De QAL 1 test is uitgevoerd aan een PEM systeem op een gasturbine installatie met stoominjectie. 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.

Zoveel mogelijk conform de methodiek als beschreven in NEN-EN-ISO 14956, is gecontroleerd of de combinatie van de gebruikte meetinstrumenten en het afgeleide model in staat zal zijn de uurgemiddelde emissies met een voldoende kleine onzekerheid te bepalen.

De belangrijkste conclusies uit het verloop van de test en de uiteindelijke resultaten zijn:

1. De QAL 1 procedure kan goed worden toegepast bij PEM systemen;
2. Bij een PEM systeem dienen minimaal de volgende onzekerheidsbronnen te worden beoordeeld
 - Systematische fouten van de gebruikte instrumenten;
 - Toevallige afwijkingen van instrumenten (meetruis);
 - Beïnvloedingsgrootheden op de gebruikte instrumenten én de bedrijfscondities;
 - Afwijking van het model (lack of fit);
 - Variatie in atmosferische condities en/of brandstofsamenstelling.
3. Indien een meetinstrument niet wordt uitgewisseld en ook geen wijzigingen aan het instrument worden aangebracht zal een eventuele systematische afwijking geen bijdrage leveren aan de onzekerheid van de met het model berekende waarden. Indien voldoende metingen zijn uitgevoerd bij het opstellen van het model zal de bijdrage van de toevallige afwijkingen (meetruis) aan de onzekerheid van de berekende waarden te verwaarlozen zijn.
4. Het model dient te zijn opgesteld, voordat de QAL 1 procedure volledig kan worden uitgevoerd;
5. Het effect van de beïnvloedingsgrootheden op de meetonzekerheid van sommige instrumenten is niet altijd goed bekend. Zelfs bij de leveranciers is deze kennis niet altijd aanwezig. In deze gevallen zal een schatting moeten worden gedaan;
6. Het gebruik van standaard rekenbladen voor het berekenen van de samengestelde onzekerheid van het PEM systeem wordt bemoeilijkt door het gegeven dat modellen van verschillende installaties sterk van elkaar kunnen verschillen.

Op grond van het bovenstaande worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Bij de initiële (model)metingen t.b.v. het afleiden van het model dient een voldoende aantal experimenten te worden uitgevoerd onder zo veel mogelijk uiteenlopende instellingen; hierdoor wordt het effect van de toevallige fout van de gebruikte meetinstrumenten zo goed mogelijk in de onzekerheid van het model opgenomen.
Er wordt voorgesteld om als voorwaarde te stellen dat per parameter bij tenminste drie verschillende instellingen moet zijn gemeten.
- Het gebruik van algemeen geldende rekenbladen lijkt te worden bemoeilijkt doordat modellen van verschillende installaties qua gedaante sterk van elkaar kunnen afwijken. Dit beïnvloedt de wijze waarop de samengestelde onzekerheid moet worden bepaald. Het voorstel is dan ook om de onzekerheidsberekeningen niet met rekenbladen uit te voeren, maar deze specifiek voor de diverse installaties af te (doen) leiden.

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
4	DE QAL 1 PROCEDURE	5
4.1	Algemeen	5
4.2	Specifieke aanpak	6
5	UITWERKING VOORBEELD	6
5.1	Meting van het gasverbruik van de gasturbine	7
5.2	Meting van de stoominjectie in de gasturbine	9
5.3	Meting van het gasverbruik van de bijstookbranders	10
5.4	Samengestelde onzekerheid op de uitkomst van het model	12
5.5	Verwachte beïnvloeding door variërende atmosferische condities	13
6	KNELPUNTEN	13
7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	14
8	REFERENTIES	15

2 INLEIDING

Door SenterNovem is aan Gasunie Research opdracht verleend voor het bieden van ondersteuning bij de implementatie van NEN-EN 14181 [Ref. 1, 2] 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 1 procedure, eventueel geconstateerde knelpunten en de gehanteerde oplossingen beschreven.

De QAL 1 procedure (verwijzing naar NEN-EN-ISO 14956) kan worden beschouwd als een vooronderzoek om te bepalen of de specificaties van de gebruikte meetinstrumenten toereikend zijn om de vereiste meetonzekerheid te bereiken.

In het geval van CEM systeem heeft de procedure met name betrekking op de gebruikte verbrandingsgasanalysatoren; bij een PEM systeem dient het onderzoek te worden uitgevoerd op de instrumenten waarmee de emissie relevante invoerparameters van het model worden gemeten en op de afwijking van het afgeleide model ten opzichte van de resultaten van de modelmetingen.

3 BESCHRIJVING VAN HET PEM SYSTEEM

De test is uitgevoerd aan een bestaand PEM systeem voor de emissiebepaling van een gasturbine installatie.

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} (Klasse I). Onder normale bedrijfsomstandigheden wordt de stoominjectie geregeld, opdat ten alle tijde wordt voldaan aan de voorgeschreven emissiegrenswaarde.

3.2 Het model

Het model dat wordt gebruikt is gebaseerd op een bij Gasunie Research ontwikkeld algemeen geldend emissiemodel voor gasturbines met bijgestookte afgassenketel en stoom- of waterinjectie [Ref 5, 6]. Op grond van de resultaten van de modelmetingen (in dit geval met de **Standaard Referentie Methode (SRM)**) is het model voor de specifieke installatie verfijnd.

Het model heeft de volgende gedaante:

$$NOx_m = \frac{(5,4428 \times 10^{-7} \cdot Q_{gt}^3 + 1,8806 \times 10^{-2} \cdot Q_{gt}^2) \cdot e^{-1,3010y} + 22 \cdot Q_{bij}}{Q_{gt} + Q_{bij}} \quad (3.1) \text{ waarin:}$$

NOx _m	=	Momentane berekende NOx-emissie in g/GJ (uitvoerparameter);
Q _{gt}	=	Gasverbruik van de gasturbine in m ³ _n /uur (invoerparameter);
Q _{bij}	=	Gasverbruik van de bijstookbranders in m ³ _n /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.

In het navolgende wordt het resultaat van de QAL 1 procedure beschreven.

4 DE QAL 1 PROCEDURE

4.1 Algemeen

In de QAL 1 procedure dienen volgens NEN-EN-ISO 14956 achtereenvolgens de volgende stappen te worden doorlopen:

- Definieer de output van een instrument en bepaal de analytische functie (relatie tussen de meetwaarde en de input waarden);
- Identificeer de bijdrage van alle belangrijke onzekerheidsbronnen (beïnvloedingsgrootheden) op de inputwaarden van de analytische functie;
- Bepaal de modelfunctie en de variantiefunctie;
- Ga uit van de beschikbare prestatie kenmerken van het meetsysteem;
- Wijs alle (belangrijke) onzekerheidsbronnen toe aan prestatie kenmerken
- Converteer alle onzekerheidscomponenten in standaard onzekerheden van de invoer en beïnvloedingsgrootheden;
- Bereken de gecombineerde standaard onzekerheid en de samengestelde onzekerheid;
- Beoordeel de geschiktheid van de meetprocedure door vergelijking van de samengestelde meetonzekerheid met de eis;
- Verifieer de samengestelde onzekerheid in een veldtest;
- Accepteer of verwerp de geschiktheid van de meetprocedure

Bij gebruik van een CEM systeem kan de bovenstaande procedure worden toegepast op de prestaties van de gebruikte analysatoren.

Voor een PEM systeem kan het afgeleide model als een instrument worden beschouwd, met als invoer de verschillende emissie relevante parameters. De analytische functie is dan het model.

In het geval van een CEM systeem is de absolute onzekerheid van de aanwijzing van de gebruikte instrumenten van belang. Het streven is om de aanwijzing van de individuele instrumenten zo dicht mogelijk de werkelijke waarde te laten benaderen. Hierdoor wordt de totale meetonzekerheid van het systeem tot een minimum beperkt.

Bij gebruik van een PEM systeem is alleen de uitkomst van het model de grootte die zo dicht mogelijk de werkelijke (SRM-)waarde dient te benaderen. Omdat het model met modelmetingen is gekalibreerd op basis van de momentane aanwijzing van de diverse gebruikte meetinstrumenten, is de absolute juistheid van de aanwijzing m.b.t. de QAL 1 procedure niet van belang. Met andere woorden:

De systematische afwijking van de verschillende instrumenten behoeft niet in de onzekerheidsberekeningen te worden meegenomen. Consequentie hiervan is echter wel dat bij het uitwisselen van instrumenten of bij het aanbrengen van wijzigingen in deze instrumenten het bestaande model niet langer geldig is.

Dit geldt ook voor de toevallige afwijking (meetruis) van de diverse instrumenten. Het model wordt meestal afgeleid op grond van een groot aantal metingen, waarbij diverse instellingen van het te modelleren proces worden doorlopen. Niet alleen is de totale tijdsduur van de metingen relatief lang, maar de instellingen worden ook in min of meer willekeurige volgorde aangebracht, waardoor de aanwijzing van de instrumenten zowel van boven naar beneden als van beneden naar boven worden meegenomen. Hierdoor worden bijvoorbeeld eventuele hysteresis effecten in het model verdisconteerd.

Toevallige afwijkingen (meetruis) én systematische afwijkingen van instrumenten dragen mogelijk niet bij aan de onzekerheid in de met het model berekende waarden. Voorwaarde voor de aanname dat de toevallige fout (meetruis) niet hoeft te worden meegenomen is dat een voldoende aantal metingen onder wisselende condities moet zijn uitgevoerd. Het volgende criterium zou bijvoorbeeld kunnen worden gebruikt:

Het geldigheidsgebied van het model wordt bepaald door de procescondities waarbij de modelmetingen zijn uitgevoerd. Als 'voldoende aantal metingen' zou kunnen worden opgevat dat per invoerparameter de modelmetingen bij tenminste drie instellingen (zoveel mogelijk gelijkmatig verdeeld over het uiteindelijke geldigheidsbereik) moeten

zijn uitgevoerd. Indien hieraan niet wordt voldaan moet ook de toevallige afwijking (meetruis) van de betreffende instrumenten in de totale onzekerheid worden meegenomen.

Een systematische afwijking draagt niet bij indien het instrument niet wordt uitgewisseld en indien geen wijzigingen aan het instrument worden aangebracht.

Het is van belang te onderkennen dat de gevoeligheid van de instrumenten voor externe invloeden (druk, temperatuur, variaties in de elektrische voeding etc.) tijdens de initiële metingen t.b.v. het afleiden van het model niet (volledig) worden meegenomen. Hoewel

gedurende de meettijd wel enige variatie van deze beïnvloedingsgrootheden zal hebben plaatsgehad, is het niet zeker dat alle mogelijke situaties zich hebben voorgedaan.

Ook dient de drift van de instrumenten te worden meegenomen.

Anders dan bij CEM systemen hoeft nu geen rekening te worden gehouden met fysisch/chemische gevoeligheden van de gebruikte analysatoren.

4.2 Specifieke aanpak

Om de methodiek van NEN-EN-ISO 14957 zoveel mogelijk te volgen, kan in het geval van de onderhavige voorbeeldimplementatie de volgende werkwijze worden gehanteerd.

Als analytische functie kan het algemeen geldend model voor gasturbine installaties [Ref. 6] worden gebruikt; de gedaante hiervan is:

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

Op grond van de resultaten van de initiële metingen met de SRM worden de coëfficiënten A, B en C geoptimaliseerd en in het model ingevoerd, waarna de uiteindelijke vorm uit 3.1 wordt verkregen. Hiermee is feitelijk de kalibratiefunctie afgeleid.

Uit het verschil tussen de gemeten en berekende waarden kan de variantie worden berekend, waaruit weer de standaard onzekerheid (u_c) van het model kan worden afgeleid.

Door hierbij de meetonzekerheid tengevolge van de diverse, in 4.1 genoemde beïnvloedingsgrootheden op te tellen, wordt de totale samengestelde onzekerheid van het PEM systeem bepaald.

5 UITWERKING VOORBEELD

Zoals vermeld is een voorbeeldimplementatie van een PEM systeem uitgevoerd aan een gasturbine-installatie.

Als invoerparameters voor het model worden drie grootheden gebruikt, te weten:

- Gasverbruik van de gasturbine (Q_{gt});
- Stoominjectie in de gasturbine (Q_{st}).
- Gasverbruik van de bijstookbranders (Q_{bij});

In de uitgevoerde QAL 1 procedure is een inventarisatie gemaakt van de specificaties en kalibratieresultaten van de gebruikte meetinstrumenten.

In de volgende hoofdstukken worden deze specificaties nader beschouwd.

5.1 Meting van het gasverbruik van de gasturbine

Het brandstofgas voor de turbine wordt met een druk van ca. 20 barg aangevoerd vanuit het gasontvangstation. Het gasverbruik van de turbine (Q_{gt}) wordt gemeten met een orifice met een compensatie voor de actuele gasdruk en – temperatuur.

Het gasdebiet wordt met de volgende betrekking berekend:

$$Q_{gt} = C \sqrt{\Delta p \times \frac{p}{p_{ref}} \times \frac{T_{ref}}{T}} \quad (5.1) \quad \text{waarin:}$$

Q_{gt}	=	Te berekenen gasverbruik in m ³ n/h;
C	=	Constante, opgegeven door leverancier op basis van kalibratieresultaten;
Δp	=	Gemeten drukverschil over de meetschijf in bar of mbar;
p	=	Actueel gemeten gasdruk in bar;
p_{ref}	=	Referentiedruk, waarbij de relatie tussen Q_{gt} , C en Δp is afgeleid (opgave leverancier) in bar;
T	=	Gemeten gastemperatuur in K;
T_{ref}	=	Referentietemperatuur, waarbij de relatie tussen Q_{gt} , C en Δp is afgeleid (opgave leverancier) in K.

Voor het meten en corrigeren van het gasdebiet worden dus vier meetinstrumenten met een meetonzekerheid gebruikt, namelijk:

- Orificeplaat (gerelateerd aan constante C);
- Verschildrukmeter;
- Drukopnemer t.b.v. statische druk;
- Temperatuuropnemer.

In de onderstaande tabel zijn hiervan de specificaties (prestatiekenmerken en beïnvloeding grootheden) gegeven.

Tabel 5.1 Specificaties en kalibratieresultaten m.b.t. Q_{gt}

Instrument			
Tagnr.	Turbinegasmeter 21F020	Drukopnemer 21P040	Temperatuuropnemer 21T090
Specificaties			
Merk	Instromet	Rosemount	Ronan
Type	Q75-K-1000-150-25	1144 G	Pt-100
Meetbereik	65 ... 1000 m ³ /h	0 ... 13.8 barg	-20 ... +50 C
Nauwkeurigheid	+/- 1% F.S.	+/- 0.5% F.S.	+/- 0.1% F.S.
Stabiliteit	NVT	+/- 0.1% F.S./6 mnd	+/- 0.1% F.S./6 mnd
Uitgang	imp	4-20 mA	4-20 mA
Resultaten laatste kalibratie			
Datum	24-04-2001	onbekend	onbekend
Methode	5 punten		
Gemiddelde fout	-0.27 %		
Meetonzekerheid (95%)	+/- 0.25 %		
Beïnvloedingsgrootheden			
Druk	+/- 0.05% F.S./bar	NVT	NVT
Drukvariatie	+/- 2 bar	NVT	NVT
Effect drukvariatie	+/- 0.1% F.S.	NVT	NVT
Temperatuur	+/- 0.05% F.S./ K	+/- 1% F.S./56 K	NVT
Temperatuurvariatie	+/- 5 K	+/- 5 K	NVT
Effect temperatuurvariatie	+/- 0.25% F.S.	+/- 0.18% F.S.	NVT
Voedingsspanning	NVT	+/- 0.005% F.S./V	NVT
Spanningvariatie	NVT	+/- 0.1 V	NVT
Effect spanningvariatie	NVT	nihil	NVT
Samengestelde onzekerheid t.g.v. drift en beïnvloeding			
Onzekerheid t.g.v. drift (per jaar)	NVT	0,20% F.S.	0,20% F.S.
Onzekerheid tgv beïnvloeding	0,27% F.S.	0,18% F.S.	NVT
Totaal drift en beïnvloeding	0.27 % F.S.	0.27 % F.S.	0.20 % F.S.

*) De stabiliteit van de gasmeter wordt niet in beschouwing genomen.

Zoals in hoofdstuk 4 is beargumenteerd dragen de systematische en toevallige afwijkingen (meetruis) van de individuele instrumenten mogelijk niet bij aan de totale onzekerheid. Het effect van deze afwijkingen is mogelijk reeds verdisconteerd in de totale onzekerheid van het model. Wél dienen de afwijkingen ten gevolge van drift en beïnvloedingsgrootheden in beschouwing te worden genomen, hoewel hiervan ook reeds een (onbekend) aandeel in de afwijking van het model ten opzichte van de modelmetingen is opgenomen. In tabel 5.2 is het effect van de beïnvloedingsgrootheden op de uitkomst van het model berekend.

Tabel 5.2

Effect van beïnvloedingsgrootheden op de meetonzekerheid van het gasverbruik van de gasturbine

Soort instrument	Orifice met druk- en temperatuurcompensatie		Onzekerheid		Onzekerheid DCS		Totale fout abs	Eenheid
	Meetbereik	Nominaal	rel [%]	abs	rel [%]	abs		
Orificeplaat (C)	25390.9	25390.9	0	0	0	0.00	0	
Verschildrukmeter	0.349	0.1551	0.27	0.0009	0	0.00000	0.0009	mbar
drukopnemer	25	20	0.27	0.068	0	0	0.068	bar
temperaturopnemer	80	10	0.2	0.160	0	0.000	0.16	K

Berekening $\phi_v = C \times \text{wortel}(\Delta p \cdot p / p_{ref} \cdot T_{ref} / T)$
 Waarde (nom) 10000 m3n/h
 Waarde (max) 15000 m3n/h

Samengestelde fout:		Uitkomst	Kwadraat	maal d ²
1e differentiatieterm	df/dC ϕ_v / C	0.3938	0.1551	0
2e differentiatieterm	df/dΔp $\phi_v / 2\Delta p$	32235	1039088142	923
3e differentiatieterm	df/dp $\phi_v / 2p$	250	62500	284.8
4e differentiatieterm	df/dT $\phi_v / 2T$	500	250000	6400
Totaal				7607 (m3n/h) ²
Fout			+/-	87.2 m3n/h
			+/-	0.87 % (95% betrouwbaarheid)

De samengestelde meetonzekerheid op het gasverbruik van de gasturbine tengevolge van drift en beïnvloedingsgrootheden bedraagt dus ± 0,87% (95% betrouwbaarheidsinterval).

5.2 Meting van de stoominjectie in de gasturbine

Ook voor de meting van de hoeveelheid geïnjecteerde stoom wordt gebruik gemaakt van een orifice. De specificaties hiervan zijn als volgt:

Tabel 5.3 Specificaties en kalibraties m.b.t. Q_{st}

Instrument				
Tagnr.	Orificeplaat	Verschildrukopnemer	Drukopnemer	Temperaturopnemer
	21FE201	21F201	21P203	21T205
Specificaties				
Merk	Onbekend	Rosemount	Rosemount	Onbekend
Type	1495	1151 DP (E)	1144	Pt-100
Meetbereik	0 ... 15000 m ³ /h	0 ... 373.6 mbar	0 ... 25 bar	-40 ... +40 C
Nauwkeurigheid	+/- 1% F.S.	+/- 0.5% F.S.	+/- 0.5% F.S.	+/- 0.5% F.S.
Stabiliteit	NVT*	+/- 0.1% F.S./6 mnd	+/- 0.1% F.S./6 mnd	+/- 0.1% F.S./6 mnd
Uitgang	-	4-20 mA	4-20 mA	4-20 mA
Resultaten laatste kalibratie				
Datum		17-04-2004	17-04-2004	17-04-2004
Methode		5 punten op/nee	5 punten op/nee	3 punten op/nee
Gemiddelde fout		-0.08 %	0.08 %	-0.04 %
Meetonzekerheid (95%)		+/- 0.2 %	+/- 0.24 %	+/- 0.1 %
Beïnvloedingsgrootheden				
Druk	gecorrigeerd	+/- 0.25% F.S./69 bar	NVT	NVT
Drukvariatie		+/- 2 bar	NVT	NVT
Effect drukvariatie		+/- 0.01% F.S.	NVT	NVT
Temperatuur	gecorrigeerd	+/- 1% F.S./56 K	+/- 1% F.S./56 K	NVT
Temperatuurvariatie		+/- 5 K	+/- 5 K	NVT
Effect temperatuurvariatie		+/- 0.18% F.S.	+/- 0.18% F.S.	NVT
Voedingsspanning	NVT	+/- 0.005% F.S./V	+/- 0.005% F.S./V	NVT
Spanningvariatie		+/- 0.1 V	+/- 0.1 V	NVT
Effect spanningvariatie		nihil	nihil	NVT
Samengestelde onzekerheid t.g.v. drift en beïnvloeding				
Onzekerheid t.g.v. drift (per jaar)	NVT	0,20% F.S.	0,20% F.S.	0,20% F.S.
Onzekerheid tgv beïnvloeding	NVT	0,18% F.S.	0,18% F.S.	NVT
Totaal drift en beïnvloeding	NVT	0,27% F.S.	0,27% F.S.	0,20% F.S.

*) De stabiliteit van de orificeplaat wordt niet in beschouwing genomen.

Hiermee wordt de volgende samengestelde onzekerheid op Q_{st} verkregen:

Tabel 5.4

Effect van beïnvloedingsgrootheden op de meetonzekerheid van de stoominjectie in de gasturbine

Soort instrument Orifice met druk- en temperatuurcompensatie Eenheid
kg/h

Specificaties:	Meetbereik	Nominaal	Meetfout		Fout DCS		Totale fout abs	Eenheid
			rel [%]	abs	rel [%]	abs		
Orificeplaat (C)	12187.9	12187.9	0	0	0	0	0.00	
Verschildrukmeter	0.9694	0.2876	0.27	0.0026	0	0	0.0026	mbar
drukopnemer	40	30	0.27	0.11	0	0	0.11	bar
temperaturopnemer	400	250	0.4	1.60	0	0	1.60	K

Berekening $\phi_m = C \times \text{wortel}(\Delta p \cdot p / \text{pref} \cdot T_{\text{ref}} / T)$
 Waarde (nom) 6536 kg/h
 Waarde (max) 12000 kg/h

Samengestelde fout:			Uitkomst	Kwadraat	maal d ²
1e differentiatieterm	df/dC	ϕ_v / C	0.536303	0.287621	0.00
2e differentiatieterm	df/dΔp	$\phi_v / 2\Delta p$	11362.88	1.29E+08	884.53
3e differentiatieterm	df/dp	$\phi_v / 2p$	108.9402	11867.97	138.43
4e differentiatieterm	df/dT	$\phi_v / 2T$	13.07282	170.8987	437.50
Totaal					1460.45 (kg/h) ²
Fout				+/-	38.2 kg/h
				+/-	0.58 % (95% betrouwbaarheid)

De samengestelde onzekerheid t.g.v. drift en beïnvloedingsgrootheden is dus $\pm 0,58\%$ (95% betrouwbaarheidsinterval).

5.3 Meting van het gasverbruik van de bijstookbranders

Het gasverbruik van de bijstookbranders wordt bepaald met een turbinegasmeter. Het gemeten verbruik wordt herleid naar normaal condities.

De volumeherleiding wordt als volgt uitgevoerd:

$$V_n = V_b \times \frac{p + 1,01325}{1,01325} \times \frac{273,15}{T + 273,15} \quad (5.2) \quad \text{waarin:}$$

V_n	=	Herleid debiet in m ³ n/h;
V_b	=	Gemeten debiet in m ³ /h;
P	=	Gemeten gasdruk in barg;
T	=	Gemeten gastemperatuur in C.

Bij de volumeherleiding wordt geen rekening met de compressibiliteit van het gas gehouden.

Ook nu is de afwijking van de gebruikte meetinstrumenten verdisconteerd in de onzekerheid van het model. Er behoeft uitsluitend te worden gecontroleerd op de additionele afwijking tengevolge van drift en beïnvloedingsgrootheden.

In onderstaande tabel zijn de specificaties van de gebruikte instrumenten gegeven.

Tabel 5.5 Specificaties en kalibratieresultaten m.b.t. Qbij

	Instrument			
Tagnr.	Orificeplaat Q0100	Verschildrukopnemer 21F204	Drukopnemer 21P270	Temperatuuropnemer 21T255
Specificaties				
Merk	Onbekend	Rosemount	Rosemount	Onbekend
Type	1495	1151 DP (S)	1144	Thermokoppel
Meetbereik	0 ... 12000 kg/h	0 ... 969.4 mbar	0 ... 40 bar	0 ... 400 C
Nauwkeurigheid	+/- 1% F.S.	+/- 0.5% F.S.	+/- 0.5% F.S.	+/- 1% F.S.
Stabiliteit	NVT*	+/- 0.1% F.S./6 mnd	+/- 0.1% F.S./6 mnd	+/- 0.2% F.S./6 mnd
Uitgang	-	4-20 mA	4-20 mA	4-20 mA
Resultaten laatste kalibratie				
Datum		20-04-2004	17-04-2004	17-04-2004
Methode		5 punten op/neer	5 punten op/neer	3 punten op/neer
Gemiddelde fout		0.03 %	0.07 %	-0.03 %
Meetonzekerheid (95%)		+/- 0.28 %	+/- 0.24 %	+/- 0.075 %
Beïnvloedingsgrootheden				
Druk	gecorrigeerd	+/- 0.25% F.S./69 bar	NVT	NVT
Drukvariatie		+/- 2 bar	NVT	NVT
Effect drukvariatie		+/- 0.01% F.S.	NVT	NVT
Temperatuur	gecorrigeerd	+/- 1% F.S./56 K	+/- 1% F.S./56 K	NVT
Temperatuurvariatie		+/- 5 K	+/- 5 K	NVT
Effect temperatuurvariatie		+/- 0.18% F.S.	+/- 0.18% F.S.	NVT
Voedingsspanning	NVT	+/- 0.005% F.S./V	+/- 0.005% F.S./V	NVT
Spanningvariatie		+/- 0.1 V	+/- 0.1 V	NVT
Effect spanningvariatie		nihil	nihil	NVT
Samengestelde onzekerheid t.g.v. drift en beïnvloeding				
Onzekerheid t.g.v. drift (per jaar)	NVT	0,20% F.S.	0,20% F.S.	0,40% F.S.
Onzekerheid tgv beïnvloeding	NVT	0,18% F.S.	0,18% F.S.	NVT
Totaal drift en beïnvloeding	NVT	0,27% F.S.	0,27% F.S.	0,40 % F.S.

*) De stabiliteit van de orificeplaat wordt niet in beschouwing genomen.

In de tabellen 5.6 en 5.7 is het effect van de beïnvloedingsgrootheden op de volumeherleiding, respectievelijk het gasdebiet afgeleid

Tabel 5.6

Effect van beïnvloedingsgrootheden op de meetonzekerheid van de volumeherleiding van het bijstookgas

Soort instrument Volumeherleiding Eenheid
-

Specificaties:	Meetbereik	Nominaal	Meetfout		Fout DCS		Totale fout abs	Eenheid
			rel [%]	abs	rel [%]	abs		
Drukopnemer	13.8	8	0.27	0.037	0	0.000	0.037	bar
Temperatuuropnemer	70	10	0.20	0.14	0	0.000	0.14	°C

Berekening $CF = ((p+1.01325)/1.01325) * (273.15/(T+273.15))$
 Waarde (nom) 8.581

Samengestelde fout:

			Uitkomst	Kwadraat	maal d ²
1e differentiatieterm	df/dp	CF / (p + 1.01325)	0.952068	0.906434	0.00126
2e differentiatieterm	df/dT	CF / (T + 273.15)	0.030306	0.000918	0.00002
Totaal					0.00128 (-)2
Fout				+/-	0.0357 -
				+/-	0.42 % (95% betrouwbaarheid)

Tabel 5.7

Effect van beïnvloedingsgrootheden op de meetonzekerheid van de debietmeting van het bijstookgas

Soort instrument Turbinegasmeter met volumeherleiding Eenheid
m3n/h

Specificaties:	Meetbereik	Nominaal	Meetfout		Fout DCS		Totale fout abs	Eenheid
			rel [%]	abs	rel [%]	abs		
Turbinemeter	1000	466	0.2	2.00	0	0	2.00	m3/h
Herleidingsfactor	8.581	8.581	0.42	0.036	0	0.0000	0.04	

Berekening $V_n = V_b * CF$
 Waarde (nom) 4000 m3n/h

Samengestelde fout:

			Uitkomst	Kwadraat	maal d ²
1e differentiatieterm	df/dVb	CF	8.581	73.63747	294.55
2e differentiatieterm	df/dCF	Vb	466	217280.7	277.34
Totaal					571.89 (m3n/h)2
Fout				+/-	23.9 m3n/h
				+/-	0.60 % (95% betrouwbaarheid)

Uit de berekening in tabel 5.7 blijkt dat de totale samengestelde onzekerheid op de meting van het gasdebiet naar de bijstookbranders tengevolge van drift en beïnvloedingsgrootheden $\pm 0,60\%$ (95% betrouwbaarheidsinterval) bedraagt

5.4 Samengestelde onzekerheid op de uitkomst van het model

Op grond van de voor de individuele meetinstrumenten afgeleide meetonzekerheid tengevolge van drift en beïnvloedingsgrootheden, kan het totale effect hiervan op de onzekerheid van de uitkomst van het model worden berekend. Dit is uitgevoerd in tabel 5.8.

Tabel 5.8

Effect van drift en beïnvloedingsgrootheden op de onzekerheid van de uitkomst van het model

Soort instrument	NOx-model	Meetfout		Fout DCS		Totale fout abs	Eenheid g/GJ
		rel [%]	abs	rel [%]	abs		
Specificaties:	Meetbereik	Nominaal					Eenheid
Qgt	15000	10000	0.87	130.83	0	0.00	130.83 m3n/h
Qstoom	12	6.54	0.58	0.070	0	0.00	0.07 ton/h
Qbij	8581	4000	0.60	51.30332	0	0.00	51.30 m3n/h
Berekening	NOx = ((1.8806x10 ⁻² * Qgt ² + 5.4428x10 ⁻⁷ * Qgt ³) * e ^{-1530*Qst/Qgt} + 22 * Qbij)/(Qgt+Qbij)						
Waarde (nom)	70.0						
Samengestelde fout:				Uitkomst	Kwadraat	maal d ²	
1e differentiatieterm	df/dQgt	Numeriek bepaald (zie onder)		-0.01554	0.0002416	4.136	
2e differentiatieterm	df/dQst	Numeriek bepaald (zie onder)		9.748213	95.027658	0.468	
3e differentiatieterm	df/dQbij	Numeriek bepaald (zie onder)		0.003429	1.176E-05	0.031	
Totaal						4.604 (g/GJ) ²	
Fout					+/-	2.15 g/GJ	
					+/-	3.07 %	(95% betrouwbaarheid)

dQgt	70.0000125
0.01	70.000168
	-0.0001554
dNOx/dQgt	-0.0155449

dQst	70.0000125
0.0001	69.9990377
	0.00097482
dNOx/dQst	9.74821306

dQbij	70.0000125
0.01	69.9999782
	3.4286E-05
dNOx/dQst	0.00342857

In tabel 5.8 is berekend dat de samengestelde onzekerheid op de uitkomst van het model tengevolge van drift en beïnvloedingsgrootheden ± 3,1% (95% betrouwbaarheidsinterval) bedraagt.

Deze onzekerheid dient nog te worden verhoogd met de onzekerheid van het model als afgeleid uit de verschillen tussen de modelmetingen en de uitkomst van het model tijdens de initiële metingen.

Tijdens het afleiden van het model in december 2003 bleek de onzekerheid van de met het model berekende emissies ten opzichte van de modelmetingen ± 7,8% (± 5,86 g/GJ ten opzichte van een jaargemiddelde waarde van 75 g/GJ, 95% betrouwbaarheidsinterval) te bedragen.

De totale onzekerheid op de NOx-bepaling bedraagt derhalve:

$$U_c = 2x \sqrt{\left(\frac{7,8}{2}\right)^2 + \left(\frac{3,1}{2}\right)^2} = \pm 8,4\% \text{ (95\% betrouwbaarheidsinterval)}$$

5.5 Verwachte beïnvloeding door variërende atmosferische condities

In het onderhavige SenterNovem project is ook onderzocht hoe groot de invloed is van de atmosferische condities op de momentane NOx-uitworp van gasturbine installaties [Ref. 8].

Uit het onderzoek is gebleken dat de onzekerheid van de NOx-uitworp volgens de BEES-ISO correctie t.g.v. variërende atmosferische omstandigheden $\pm 10,4\%$, naar boven afgerond $\pm 12\%$ (95% betrouwbaarheids-interval) bedraagt.

Conform het QAL-1 achtergronddocument wordt nu de volgende werkwijze voor het omgaan met de additionele onzekerheid t.g.v. veranderende weerscondities gehanteerd:

De totale onzekerheid van het model wordt uit de volgende grootheden bepaald:

- Onzekerheid van het model (lack of fit);
- Onzekerheid t.g.v. de beïnvloedingsgrootheden op de instrumenten;
- Onzekerheid t.g.v. de atmosferische condities.

Indien de totale onzekerheid groter dan $\pm 20\%$ van de jaargemiddelde emissie uitvalt, dient de onzekerheid t.g.v. de atmosferische condities nader te worden bezien. In dat geval dient aanvullende informatie m.b.t. de werkelijke gevoeligheid van de NOx-uitworp door variatie in de atmosferische condities bij de leverancier van de installatie worden opgevraagd. Indien ook dit nog niet tot een zodanige reductie van de meetonzekerheid leidt dat de 20% toegelaten onzekerheid wel wordt gehaald, dienen de gevoeligheden empirisch te worden bepaald en eventueel in het model te worden meegenomen.

In het geval van de voorbeeldimplementatie op deze gasturbine-installatie bedraagt de totale onzekerheid t.g.v. de eerste twee oorzaken $\pm 8,4\%$ (95% BI, zie hoofdstuk 5.4). Indien hierbij de geschatte onzekerheid t.g.v. de atmosferische omstandigheden volgens de BEES-correctie ($\pm 12\%$) wordt opgeteld, ontstaat de volgende totale onzekerheid:

$$U_{\text{tot}} = 2 \times \sqrt{\left(\frac{8,4}{2}\right)^2 + \left(\frac{12}{2}\right)^2} = \pm 14,6\%$$

Hiermee is aangetoond dat het onderzochte PEM systeem voldoet aan de gestelde eis van $\pm 20\%$ onzekerheid in het 95% betrouwbaarheidsinterval.

6 KNELPUNTEN

Bij de uitvoering van deze voorbeeld implementatie van de QAL 1 procedure voor deze gasturbine-installatie zijn de volgende (potentiële) knelpunten signaleerd:

- 1 De gevoeligheid van instrumenten voor beïnvloedingsgrootheden is vaak niet bekend. Van relatief veel instrumenten is de gevoeligheid voor beïnvloedingsgrootheden, ook bij de leverancier, niet bekend. De in deze situatie gebruikte turbinegasmeter bijvoorbeeld kan gevoelig zijn voor een variërende gasdruk of –temperatuur. Bij de leverancier van deze gasmeter (Instromet, Silvolde) is geen informatie te krijgen omtrent het effect hiervan op de aanwijzing van het instrument. Er is in het verleden wel onderzoek gedaan, maar er is geen eenduidige conclusie te trekken. In het onderhavige geval is op advies van de leverancier een schatting gemaakt. Dit geldt overigens ook voor de gevoeligheid van de C-factor voor wisselende condities van de in dit voorbeeld gebruikte orifice platen.
- 2 De onnauwkeurigheid van instrumenten wordt niet meegenomen. Zoals in hoofdstuk 4 is uiteengezet, is de meetonzekerheid van de gebruikte instrumenten in dit geval niet in de samengestelde onzekerheid opgenomen. Het argument hiervoor is dat de systematische fout van de instrumenten geen invloed heeft op de berekende NOx-uitworp omdat deze afwijking is verdisconteerd in het model. Als uitgangspunt geldt dan wel dat er geen meetinstrumenten worden uitgewisseld of gewijzigd.

Ten aanzien van de toevallige fout (meetruis) van de instrumenten is aangenomen dat, gelet op het aantal uitgevoerde metingen en de duur daarvan, het aantal waarnemingen dermate groot is dat ook de toevallige afwijking in (de onzekerheid van) het model is verdisconteerd. Dit geldt echter alleen als een voldoend aantal metingen is uitgevoerd om het model mee af te leiden. Hiervoor dienen criteria te worden aangelegd.

3 Consequenties voor rekenbladen

De afgeleide modellen zijn qua vorm en gebruikte coëfficiënten tamelijk installatiespecifiek. Een NOx-model van een gasturbine(-installatie) heeft een geheel andere gedaante dan een model voor bijvoorbeeld een ketel of een fornuis. Bovendien is de gekozen vorm van het model veelal afhankelijk van de instantie die het model heeft afgeleid. Het is hierom zeer moeilijk om een algemeen geldend rekenblad te maken, op basis waarvan de resultaten van de QAL 1 procedure kunnen worden beoordeeld.

Het voorstel is om voor de QAL 1 procedure geen rekenbladen te ontwikkelen, maar de berekening van de samengestelde onzekerheid van het model uit te doen voeren door de instantie die het model afleidt, bijvoorbeeld met gebruikmaking van de 'spreadsheet-methode' dan wel door de beheerder van de installatie zelf.

Voor het overige bleek het goed mogelijk om NEN-EN-ISO 14957 toe te passen.

7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Uit de uitgevoerde QAL 1 test kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. De QAL 1 procedure kan goed worden toegepast bij PEM systemen;
2. Bij een PEM systeem dienen de volgende onzekerheidsbronnen te worden beoordeeld:
 - Systematische fouten van de gebruikte instrumenten;
 - Toevallige afwijkingen van instrumenten (meetruis);
 - Beïnvloedingsgrootheden op de gebruikte instrumenten én de bedrijfscondities;
 - Afwijking van het model (lack of fit);
 - Variatie in atmosferische condities en/of bandstofsamenstelling.
3. Indien een meetinstrument niet wordt uitgewisseld en ook geen wijzigingen aan het instrument worden aangebracht zal een eventuele systematische afwijking geen bijdrage leveren aan de onzekerheid van de met het model berekende waarden. Indien voldoende metingen zijn uitgevoerd bij het opstellen van het model zal de bijdrage van de toevallige afwijkingen (meetruis) aan de onzekerheid van de berekende waarden te verwaarlozen zijn.
4. Het model dient te zijn afgeleid, voordat de QAL 1 procedure volledig kan worden uitgevoerd;
5. Het effect van de beïnvloedingsgrootheden op de meetonzekerheid van sommige instrumenten is niet altijd goed bekend. Zelfs bij de leveranciers is deze kennis niet altijd aanwezig. In deze gevallen zal een schatting moeten worden gedaan;
6. Het gebruik van standaard rekenbladen voor het berekenen van de samengestelde onzekerheid van het PEM systeem wordt bemoeilijkt door het gegeven dat modellen van verschillende installaties sterk van elkaar kunnen verschillen.

Op grond van het bovenstaande worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Bij de initiële (model)metingen t.b.v. het afleiden van het model dient een voldoende aantal experimenten te worden uitgevoerd onder zo veel mogelijk uiteenlopende instellingen; hierdoor wordt het effect van de toevallige fout (meetruis) van de gebruikte meetinstrumenten zo goed mogelijk in de onzekerheid van het model opgenomen.
Er wordt voorgesteld om als voorwaarde te stellen dat per parameter bij tenminste drie verschillende waarden moet zijn gemeten.
- Het gebruik van algemeen geldende rekenbladen lijkt te worden bemoeilijkt doordat modellen van verschillende installaties qua gedaante sterk van elkaar kunnen afwijken. Dit beïnvloedt de wijze waarop de samengestelde onzekerheid moet worden bepaald. Het voorstel is dan ook om de onzekerheidsberekeningen niet met rekenbladen uit te voeren, maar deze specifiek voor de diverse installaties af te (doen) leiden.

8 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