

Technisch Bulletin 82

Concentratiemeting proefblussing CO₂-blusgassystemen

INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding	4
	1.1 Algemeen	4
	1.2 Leeswijzer	4
2	Onderwerp en toepassingsgebied	5
	2.1 Algemeen	5
	2.2 Normatieve verwijzingen	5
3	Prestatie-eisen	6
4	Controle parameters	8
	4.1 Prestatie-eisen & parameters	8
	4.2 Omrekenmodel	8
	4.3 Conclusie van de proefblussing	9
	4.3.1 Afblaastijd	9
	4.3.2 Minimale ontwerpconcentratie	9
	4.3.3 Standtijd	9
5	Bijlage (Theoretisch Kader)	10
	5.1 Toepassing algemene gaswet	10
	5.2 Toepassing van de vigerende normen	10
	5.2.1 NEN 15004-1	10
	5.2.2 NFPA 12	10
	5.3 Fysische eigenschappen CO ₂	11
	5.4 Validiteit en betrouwbaarheid	11
	5.5 Afleiding van het omrekenmodel	12
	5.5.1 Specifiek volume	12
	5.5.2 Hoeveelheid blusgas	12
	5.5.3 Gecorrigeerde Concentratie	13
	5.5.4 Omrekenmodel	14

Werkgroep G

Dit Technisch Bulletin is opgesteld door de Werkgroep G van het Deskundigenpanel VBB-systemen. Het deskundigenpanel werkt in opdracht van en onder verantwoordelijkheid van de Commissie van Belanghebbenden Brandbeveiliging van het Centrum voor Criminaliteitspreventie en Veiligheid (CCV).

1 INLEIDING

1.1 ALGEMEEN

In dit Technisch Bulletin zijn de uitgangspunten vastgelegd met betrekking tot de metingen en correcties van de CO₂-proefblussingen.

Niet alle normen voor blusgasbeveiliging eisen een proefblussing. Daarom is destijds besluit 11.1 genomen door het Deskundigenpanel VBB-systemen. Conform dat besluit is een proefblussing in één van de grootste ruimten bij een 'total flooding' CO₂-blusgassysteem verplicht, dit in combinatie met een doorfantest in alle andere ruimten. In de verschillende ontwerpnormen worden hieraan ook eisen gesteld maar zijn ook andere interpretaties mogelijk.

Een 'total flooding' blusgassysteem is ontworpen om brand te blussen. Het blussen van een brand gebeurt als volgt. Als eerst moet het blusgas zijn ingebracht in een bepaalde ruimte (binnen een bepaalde tijd (afblaastijd), vervolgens moet een bepaalde concentratie gas in een omsloten ruimte zijn gerealiseerd (minimale ontwerp concentratie). Daarnaast dient deze concentratie voor een bepaalde duur gehandhaafd te zijn, zodanig dat een herontsteking niet kan plaatsvinden (standtijd).

Om de doelmatigheid van het blusgassysteem aan te tonen wordt er een proefblussing geëist, de meetresultaten van deze proefblussing moeten overeenkomen met de vooraf gedimensioneerde parameters in relatie tot de beschermingshoogte, namelijk:

- de afblaastijd;
- de minimale ontwerpconcentratie;
- de standtijd.

In de praktijk blijkt dat deze criteria niet worden gemeten tijdens een proefblussing, ofschoon de installaties conform de richtlijnen zijn ontworpen en geïnstalleerd.

Uit proefblussingen met CO₂ blijkt dat er een aantal verschijnselen optreden, waardoor de meetresultaten afwijken van de ontwerpcriteria. Door dit effect kunnen er binnen projecten discussies ontstaan over de doelmatigheid van de blusgasbeveiliging.

In dit Technisch Bulletin is een methode beschreven voor evaluatie van de bij een proefblussing gemeten blusgasconcentraties in relatie tot de omgevingstemperatuur door middel van een omrekenmodel.

1.2 LEESWIJZER

Allereerst wordt in hoofdstuk 2 omschreven wat het onderwerp en het toepassingsgebied van dit Technisch Bulletin. In hoofdstuk 3 zijn de prestatie-eisen vastgelegd. In hoofdstuk 4 zijn de controle parameters omschreven. Hoofdstuk 5 betreft een bijlage en omschrijft het theoretisch kader van het omrekenmodel.

2 ONDERWERP EN TOEPASSINGSGBIED

2.1 ALGEMEEN

Uit proefblussingen – in relatief lege ruimten – met CO₂ blijkt aan dat er een aantal verschijnselen optreden, waardoor de meetresultaten afwijken van de ontwerpcriteria. Zo wordt de vereiste afblaastijd, noch de vereiste ontwerpconcentratie gemeten. In tegenstelling tot gemeten waarden is de hoeveelheid blusgas, die is afgeblazen in de ruimte, wel voldoende ten aanzien van de ontwerphoeveelheid vanuit het betreffende voorschrift. De vereiste standtijd is wel in overeenstemming met de meetresultaten. Hieruit kan worden opgemaakt dat de ruimten over het algemeen voldoende luchtdicht zijn uitgevoerd.

Het in de meting niet kunnen vaststellen van de vereiste afblaastijd en ontwerpconcentratie is mogelijk te wijten aan de temperatuurdaling, veroorzaakt door de expansie van het CO₂ blusgas. Dit is een fysische eigenschap kenmerkend voor het CO₂ blusgas.

Doordat de temperatuur in de ruimte daalt van de omgevingstemperatuur tot ver onder de 0 °C (tot ca. -80 °C) wordt de afblaastijd en ontwerpconcentratie niet gehaald. Het betreft meestal een lege ruimte waarin de proefblussing plaatsvindt, als gevolg van de beperkte aanwezigheid van objecten c.q. opslag kan het CO₂ blusgas niet opwarmen en dus niet voldoende expanderen voor het behalen van een concentratie. In de blusgascalculaties wordt van een omgevingstemperatuur van gemiddeld 20 °C uitgegaan.

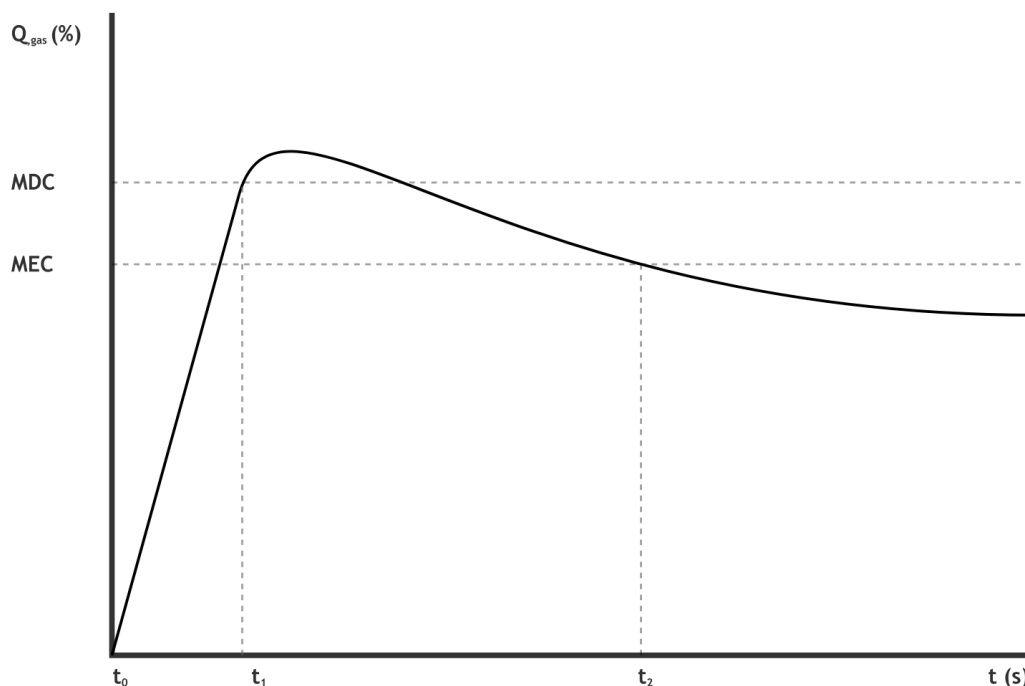
Technisch Bulletin 82 geeft een handreiking om de meetresultaten in relatie met de temperatuurdaling te kunnen interpreteren om zodoende te kunnen bepalen of er sprake is van een doelmatige blusgasbeveiliging.

2.2 NORMATIEVE VERWIJZINGEN

Voor de verschillende (typen) VBB-systemen zijn diverse normen en voorschriften van toepassing. Het CCV heeft ervoor gekozen om alle normen en voorschriften te bundelen in het document “CCV- Inspectieschema Brandbeveiligingssysteem” en “CCV-Inspectieschema Brandbeveiliging Opslag Gevaarlijke Stoffen PGS” en in de inspectie- en certificatieschema’s die onder andere naar dit document te verwijzen. De in het document genoemde normen vormen de basis voor het beoordelen van de brandbeveiliging en zijn onmisbaar voor de toepassing van dit Technisch Bulletin.

De van toepassing zijnde normen en de uitgave van de norm moeten herleidbaar zijn vanuit het uitgangspuntendocument.

3 PRESTATIE-EISEN



Figuur 1: Grafiek van de hoeveelheid gas ten opzichte van de tijd.

Afblaastijd ($t_0 - t_1$)

De afblaastijd is het tijdsverschil tussen de eerste verhoging in gemeten CO_2 concentratie en het behalen van de minimale CO_2 ontwerpconcentratie.

Toelichting

In de praktijk blijkt dat deze afblaastijd tijdens een proefblussing regelmatig wordt overschreden, hoewel de hydraulische calculaties aantonen dat deze wel wordt behaald. Dit is inherent aan de minimale ontwerpconcentratie en de omvang van de te blussen ruimte.

Minimale blusconcentratie (MEC)

De minimale blusconcentratie is de concentratie van het blusmedium die noodzakelijk is om een brand te blussen.

Minimale ontwerpconcentratie (MDC)

De minimale ontwerpconcentratie is het product van de minimale blusconcentratie en de veiligheidsfactor conform de vigerende norm.

Toelichting

Het doel van de proefblussing is dat wordt aangetoond dat de minimale ontwerpconcentratie in de ruimte wordt behaald, echter blijkt uit de meetgrafieken die gemaakt worden bij een proefblussing dat de maximale gemiddelde concentratie (laag, midden en hoog) niet overeen komt met de minimale ontwerpconcentratie. Dit verschijnsel is te wijten aan onder andere de relatie tussen de concentratie CO_2 en de temperatuur in de ruimte.

Standtijd ($t_1 - t_2$)

De standtijd is de tijd waarin de minimale blusconcentratie gehandhaafd moet blijven gedurende een vooraf bepaalde periode over de beschermingshoogte. De standtijd start wanneer de minimale ontwerpconcentratie is bereikt.

Toelichting

Bij proefblussingen die in het verleden zijn uitgevoerd is gebleken dat in veel gevallen een (veel) langere standtijd is gerealiseerd dan minimaal is vereist.

De beschermingshoogte is het hoogste punt van de opgeslagen producten/stoffen. De beschermingshoogte moet in het uitgangspuntendocument zijn vermeld zodat men weet waar het hoogste meetpunt van de blusconcentratie aanwezig moet zijn tijdens het uitvoeren van de proefblussing. De beschermhoogte heeft een directe relatie met de onderstaande ontwerpcriteria:

- behalen van de ontwerpconcentratie;
- behalen afblaastijd;
- behalen van de standtijd.

4 CONTROLE PARAMETERS

In het theoretisch kader (hoofdstuk 5) is beschouwd welke factoren invloed kunnen hebben op de meetresultaten bij een proefblussing. Dit hoofdstuk beschrijft een geharmoniseerde, alternatieve wijze waarop de meetresultaten kunnen worden geïnterpreteerd.

4.1 PRESTATIE-EISEN & PARAMETERS

In tabel 1 en 2 moet worden ingevuld en worden gebruikt voor het toetsen van de gecorrigeerde concentratie aan de minimale ontwerp concentratie.

Tabel 1

Prestatie-eisen		
Grootheid	Afkorting	Eenheid
Minimale ontwerp concentratie; Minium Design Concentration	MDC [...]	%
Minimale blusconcentratie; Minium Extinguishing Concentration	MEC [...]	%
Afblaastijd (eis)	D _t [...]	Seconden
Afblaastijd (manometer)	D _{t,m} [...]	Seconden
Afblaastijd (hydraulische berekening)	D _{t,c} [...]	Seconden
Standtijd (eis)	H _t [...]	Minuten
Standtijd (meting)	H _{t,m} [...]	Minuten

Tabel 2

Relevante parameters ¹⁾ omrekenmodel		
Grootheid	Afkorting	Eenheid
Volume ruimte (bruto)	V [...]	m ³
Volume inventaris	V _i [...]	m ³
Temperatuur gemiddeld (ruimte) ²⁾	T _y [...]	K
Bedrijfstemperatuur	T _x [...]	K ⁵⁾
Concentratie ³⁾	C _{gem} [...]	%
Gecorrigeerde concentratie ⁴⁾	C _c [...]	%

Toelichting

- 1) Dynamische parameters veranderen gedurende de meting van de proefblussing en zijn op ieder tijdstip anders.
- 2) $T_y = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{n}$ het betreft de gemeten temperaturen op laag, midden en hoog niveau.
- 3) $C_{gem} = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{n}$ het betreft de gemeten concentratie op laag, midden en hoog niveau.
- 4) De gecorrigeerde concentratie kan worden berekend middels vergelijking (25)
- 5) Zie Tabel 3 voor de temperatuurwaarden van °C naar Kelvin.

4.2 OMREKENMODEL

In de bijlage (hoofdstuk 5) is de afleiding van het omrekenmodel omschreven. Het omrekenmodel dat gebruikt kan worden om een gecorrigeerde concentratie te berekenen op basis van meetresultaten is vergelijking (25).

$$C_c = 100 \left(1 - \left(\frac{100 - C_{gem}}{100} \right)^{\frac{(V - V_i) \cdot T_x}{V \cdot T_y}} \right) \quad (25)$$

4.3 CONCLUSIE VAN DE PROEFBLUSSING

Op basis van drie prestatie-eisen moet worden vastgesteld of de proefblussing geslaagd is, namelijk: (1) de afblaastijd, (2) de minimale ontwerpconcentratie en (3) de standtijd.

4.3.1 AFBLAASTIJD

De hoeveelheid blusgas moet conform de voorgeschreven norm binnen een bepaalde tijd zijn afgeblazen. Dit moet allereerst terug te herleiden zijn in de hydraulische berekeningen ($D_{t,c}$) en daarnaast kan dit bij een lagedruk CO_2 blusgasinstallatie zijn af te lezen op de inhoudsmeter op de tank ($D_{t,m}$). De inhoudsmeter op de tank moet dan wel af te lezen zijn gedurende de proefblussing. Qua veiligheid kan deze worden gefilmd om afstand te houden van de tank tijdens de proefblussing of een schrijvende inhoudsmeter toepassen zodat achteraf de info is af te lezen voor wat betreft de afblaassnelheid.

Toelichting

Wanneer een blussing plaatsvindt en het blusmedium in de ruimte wordt gebracht, dan zal het CO_2 verdampen bij de nozzles. Een verdamping is een endotherme faseovergang waardoor er warmte uit de omgeving wordt onttrokken om van vloeibare fase naar gas fase over gaan. Doordat de omgeving bij een proefblussing over het algemeen leeg is er niet genoeg warmte aanwezig om het CO_2 volledig te verdampen. Bij temperaturen onder -78°C verkeert CO_2 zelfs bij een atmosferische druk in vaste toestand. Wanneer dit gebeurt tijdens een proefblussing zal dit een vertraagde opbouw van de concentratie als gevolg hebben.

4.3.2 MINIMALE ONTWERPCONCENTRATIE

Indien de gecorrigeerde concentratie in relatie tot de omgevingstemperatuur en beschermhoogte (CC) gelijk of groter is dan de minimale ontwerpconcentratie (MDC) dan is aan de prestatie-eis minimale ontwerpconcentratie voldaan.

4.3.3 STANDTIJD

De prestatie-eis minimale standtijd kan als voldaan worden beschouwd als de gecorrigeerde concentratie (C_c) voor de duur van de standtijd hoger is dan minimale blusconcentratie (MEC). De MEC is benodigd voor het blussen van het brandrisico, deze concentratie is bepaald aan de hand van de zogenaamde “cup-burner test” of “room scale test”.

5 BIJLAGE (THEORETISCH KADER)

In dit hoofdstuk is het theoretisch kader vastgelegd en zijn de berekeningen omschreven waarop het omrekenmodel is gebaseerd.

5.1 TOEPASSING ALGEMENE GASWET

De algemene gaswet (01) wordt als volgt geformuleerd.

$$pV = nRT \quad (01)$$

Hierin staan p, T en V respectievelijk voor de druk, absolute temperatuur (Kelvin) en volume (m³); n (mol) voor de hoeveelheid gas en R voor de gasconstante (-). Omdat een met blusgas beveiligde ruimte is voorzien van over- en onderdrukvoorzieningen en om de berekeningen niet te gecompliceerd te maken wordt ervan uitgegaan dat het drukverschil in tegenstelling tot de realiteit 0 pascal is. Met dit uitgangspunt kan er gebruik gemaakt worden van de algemene gaswet bij constante druk, ofwel de eerste wet van Gay-Lussac (02).

$$\frac{V}{T} = Constant \quad (02)$$

De bovenstaande vergelijking (02) omvat twee parameters namelijk V en T, respectievelijk het volume en de temperatuur. De verhouding in de vergelijking blijft constant, dat impliceert dat volume x bij temperatuur x gelijk is aan volume y bij temperatuur y, ofwel vergelijking (03)

$$\frac{V_x}{T_x} = \frac{V_y}{T_y} \quad (03)$$

Voor de eenvoud wordt het volume gebruikt per massa-eenheid, ook wel het specifiek volume S (m³/kg) genoemd. Vervolgens veranderd vergelijking (03) in vergelijking (04).

$$\frac{S_x}{T_x} = \frac{S_y}{T_y} \quad (04)$$

5.2 TOEPASSING VAN DE VIGERENDE NORMEN

Voor het bepalen van de benodigde hoeveelheid blusgas in een besloten ruimte wordt gebruik gemaakt van een vergelijking waarin de hoeveelheid gas wordt uitgedrukt in de concentratie. Deze vergelijking kan aan diverse normen worden ontleend, namelijk de NEN 15004-1 en de NFPA 12. In de onderstaande paragrafen zijn deze vergelijkingen beschouwd.

5.2.1 NEN 15004-1

Deze vergelijking (05) is ontleend aan de NEN 15004-1, waarin Q, V, S en C respectievelijk staan voor massa (kg), volume (m³), specifiek volume (m³/kg) en concentratie blusmedium (vol%).

$$Q = \frac{V}{S} \ln \left(\frac{100}{100-C} \right) \quad (05)$$

5.2.2 NFPA 12

De vergelijking (06) welke is ontleend aan de Amerikaanse norm, waarin X en C respectievelijk staan voor een verhouding (volume toegevoegd blusmedium (m³) / volume ruimte (m³)) van en de concentratie blusmedium (vol%).

$$e^X = \left(\frac{100}{100-C} \right) \quad (06)$$

$$X = \frac{V_{\text{volume toegevoegd blusmedium}}}{V_{\text{volume ruimte}}} \quad (07)$$

Echter, na het toepassen van substitutie op grootheid X is, vergelijking (06) gelijk aan vergelijking (05). Het volume van het toegevoegde blusmedium mag gelijk worden gesteld aan het product van de massa en het specifiek volume van het blusmedium, dit resulteert in vergelijking (08). Vergelijking (09) bewijst deze stelling. In vergelijking (10) is de substitutie van X toegepast op vergelijking (06). Na substitutie is de massa uitgedrukt in de functie van de concentratie wat resulteert in vergelijking (05).

$$X = \frac{Q \cdot S}{V} \quad (08)$$

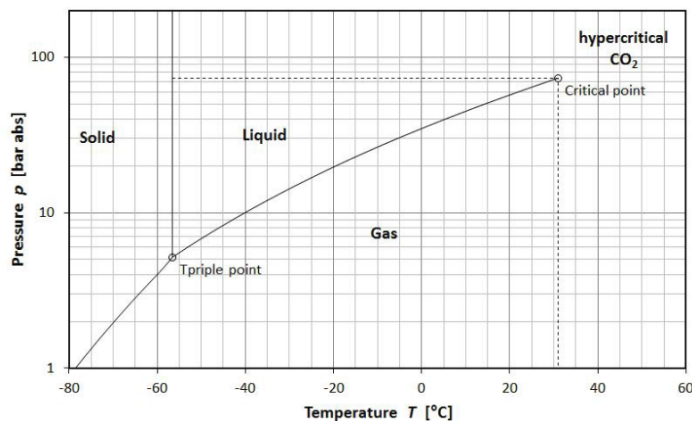
$$m^3 = \cancel{\text{kg}} * \frac{m^3}{\cancel{\text{kg}}} = m^3 \quad (09)$$

$$e^{\frac{Q \cdot S}{V}} = \left(\frac{100}{100-C} \right) \quad (10)$$

5.3 FYSISCHE EIGENSCHAPPEN CO₂

De stof die wordt gebruikt als blusmedium is CO₂, deze stof kan zowel in gasvormige, vloeibare en vaste aggregatietoestand verkeren. Wanneer CO₂ als blusmedium fungeert kan deze in zowel hogedruk als lage druk containers worden opgeslagen. Voor de opslagvoorzieningen met een groot volume, zoals omschreven in de scope, worden normaliter lagedruk CO₂ tanks gebruikt voor de opslag van het blusmedium. Het blusmedium wordt dan gekoeld om zo de druk in de opslagtank te verlagen. De tank heeft dan een druk van ongeveer 19 bar.

In figuur 2 hieronder is de dampdruk tegenover de temperatuur weergegeven van CO₂, met de bijhorende aggregatietoestand.



Figuur 1

5.4 VALIDITEIT EN BETROUWBAARHEID

Door het toepassen van de bovenstaande wiskundige regels is bewezen dat zowel de vergelijkingen conform de Europese en Amerikaanse norm gelijkwaardig aan elkaar zijn. Hiermee is aannemelijk gemaakt dat de vergelijking van het omrekenmodel betrouwbaar is. Beiden normen zijn opgesteld door experts binnen het vakgebied blusgasinstallaties, daarom is het aannemelijk om de vergelijkingen als voldoende valide te beschouwen.

5.5 AFLEIDING VAN HET OMREKENMODEL

5.5.1 SPECIFIEK VOLUME

Het specifiek volume voor CO₂ is conform NFPA 12 bij een temperatuur T_x van 30 °C ofwel 303K het specifiek volume S_x 0,56 m³/kg. Hiermee kan gebruik worden gemaakt van de gaswet, vergelijking (04) kan worden toegepast om een onbekend specifiek volume te berekenen bij een bekende temperatuur.

$$\frac{S_x}{T_x} = \frac{S_y}{T_y} \quad (04)$$

In tabel 3 zijn een aantal waardes berekend voor wat betreft de specifiek volumes.

Tabel 3

Temperatuur (T)				Specifiek volume (S)	
-80	°C	193	K	0,3567	m ³ /kg
-70	°C	203	K	0,3752	m ³ /kg
-60	°C	213	K	0,3937	m ³ /kg
-50	°C	223	K	0,4121	m ³ /kg
-40	°C	233	K	0,4306	m ³ /kg
-30	°C	243	K	0,4491	m ³ /kg
-20	°C	253	K	0,4676	m ³ /kg
-10	°C	263	K	0,4861	m ³ /kg
0	°C	273	K	0,5046	m ³ /kg
10	°C	283	K	0,5230	m ³ /kg
20	°C	293	K	0,5415	m ³ /kg
21	°C	294	K	0,5434	m ³ /kg
30	°C	303	K	0,5600	m ³ /kg
<u>Toelichting</u> Indien de juiste waarde niet in de grafiek staat kan deze worden berekend met vergelijking (04)					

5.5.2 HOEEVEELHEID BLUSGAS

Tijdens een proefblussing wordt er in de ruimte onder andere de temperatuur en de concentratie CO₂ gemeten op 3 verschillende hoogtes. Op een bepaalde tijd wordt er na het inbrengen van het CO₂ een maximale concentratie bereikt, deze kan worden berekend conform vergelijking (11).

$$C_{gem} = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{n} \quad (11)$$

Het specifiek volume berekend met vergelijking (04) en de hoogst gemeten gemiddelde concentratie CO₂ kunnen worden ingevuld in vergelijking (05), dit resulteert in een getal wat de representatief is voor de massa CO₂ gemeten in de ruimte.

Toelichting

Tijdens het meten zit er een vertraging op de concentratie CO₂ in de lucht en wat er wordt gemeten. Deze vertraging is te wijten aan de lengte van het bemonsteringsslangetje. Bij de temperatuurmeter is dit verschijnsel niet aanwezig, daarom moet te allen tijden worden gecontroleerd of de correctie is verwerkt door het meetbureau.

$$Q_m = \frac{V - V_i}{S_y} \ln \left(\frac{100}{100 - C_{gem}} \right) \quad (12)$$

5.5.3 GECORRIGEERDE CONCENTRATIE

De concentratie is vervolgens te berekenen door vergelijking (05) te converteren, namelijk in een vorm waarin C, wordt uitgedrukt in Q. Hieronder zijn in vergelijking (13 t/m 16) de stappen omschreven van de conversie.

$$Q = \frac{V}{S} \ln \left(\frac{100}{100-C} \right) \quad (05)$$

$$\frac{Q \cdot S}{V} = \ln \left(\frac{100}{100-C} \right) \quad (13)$$

$$e^{\frac{Q \cdot S}{V}} = \left(\frac{100}{100-C} \right) \quad (14)$$

$$\left(\frac{100}{e^{\frac{Q \cdot S}{V}}} \right) = 100 - C \quad (15)$$

$$C = - \left(\frac{100}{e^{\left(\frac{Q \cdot S}{V} \right)}} - 100 \right) \quad (16)$$

Vergelijking (16) kan worden ingevuld met de berekende massa Q_m , het specifiek volume S_x en het bruto volume van de ruimte V. Dit resulteert in de gecorrigeerde concentratie bij de bedrijfstemperatuur, namelijk vergelijking (17).

$$C_c = - \frac{100}{e^{\left(\frac{Q_m \cdot S_x}{V} \right)}} + 100 \quad (17)$$

5.5.4 OMREKENMODEL

Het toepassen van substitutie op de gecorrigeerde concentratie (17) en de berekende hoeveelheid blusgas (12), resulteert in het omrekenmodel dat gebruikt kan worden om een gecorrigeerde concentratie te berekenen op basis van meetresultaten. De afleiding van het omrekenmodel betreft vergelijking (18) t/m (25), waarbij vergelijking (25) het vereenvoudigde omrekenmodel betreft.

$$C_C = -\frac{100}{e^{\left(\frac{\left(\frac{V-V_i}{S_y} \ln\left(\frac{100}{100-C_{gem}}\right)\right) \cdot S_x}{V}\right)}} + 100 \quad (17)$$

$$C_C = -\frac{100}{e^{\left(\frac{\left(\frac{V-V_i}{\left(\frac{S_x}{T_x} \cdot T_y\right)} \ln\left(\frac{100}{100-C_{gem}}\right)\right) \cdot S_x}{V}\right)}} + 100 \quad (18)$$

$$C_C = -\frac{100}{e^{\left(\frac{\left(\frac{V-V_i}{\left(\frac{S_x}{T_x} \cdot T_y\right)} \ln\left(\frac{100}{100-C_{gem}}\right)\right) \cdot S_x}{V}\right)}} + 100 \quad (19)$$

$$C_C = -\frac{100}{e^{\left(\frac{\left(\frac{V-V_i}{T_y} \cdot T_x \ln\left(\frac{100}{100-C_{gem}}\right)\right)}{V}\right)}} + 100 \quad (20)$$

$$C_C = -\frac{100}{e^{\left(\frac{(V-V_i) \cdot T_x}{V \cdot T_y} \ln\left(\frac{100}{100-C_{gem}}\right)\right)}} + 100 \quad (21)$$

$$C_C = -\frac{100}{\left(\frac{100}{100-C_{gem}}\right)^{\frac{(V-V_i) \cdot T_x}{V \cdot T_y}}} + 100 \quad (22)$$

$$C_C = -100 \left(\frac{100-C_{gem}}{100}\right)^{\frac{(V-V_i) \cdot T_x}{V \cdot T_y}} + 100 \quad (23)$$

$$C_C = 100 - 100 \left(\frac{100-C_{gem}}{100}\right)^{\frac{(V-V_i) \cdot T_x}{V \cdot T_y}} \quad (24)$$

$$C_C = 100 \left(1 - \left(\frac{100-C_{gem}}{100}\right)^{\frac{(V-V_i) \cdot T_x}{V \cdot T_y}}\right) \quad (25)$$