

## Effect bijmengen van 0,5% waterstof- en variatie van de weersomstandigheden op de verbrandingssnelheid van G-gassen

Datum: 31 januari 2014  
Opdrachtgever: GTS  
Auteur: Sander Gersen  
Documentnummer: GCS.14.R34100

---

### Inleiding

Een van de doelstellingen van de overheid is het aandeel aan duurzame gassen in het gasnet te vergroten. Een potentiële gasvormige brandstof is waterstof dat duurzaam geproduceerd kan worden uit bijvoorbeeld “overtollige” windenergie of zonenergie (Power to Gas). In Nederland ligt momenteel een voorstel om vanaf 2021 de grens op 0,5 % waterstof te stellen voor af te leveren aardgas Ref. [1].

In het huidige aardgas komt geen waterstof voor. Doordat de verbrandingseigenschappen van waterstofhoudende aardgassen verschillen van de traditioneel gedistribueerde (aard)gassen kan inpassing van waterstof een verandering van de verbrandingseigenschappen tot gevolg hebben, wat mogelijk kan leiden tot ongewenste effecten in eindgebruikersapparatuur. Een van de aspecten waar rekening mee gehouden moet worden is dat waterstof bijmenging de verbrandingssnelheid verhoogt. Een toename van de verbrandingssnelheid kan leiden tot vlaminslag, wat ongewenst is Ref. [2].

Gasunie heeft DNV GL verzocht de invloed van de aanwezigheid van 0,5% waterstof op de verbrandingssnelheid van G-gassen in kaart te brengen onder condities relevant voor huishoudelijk toestellen. Daarnaast is het verzoek om de effecten van variaties in de weersomstandigheden op de verbrandingssnelheid van G-gassen te bestuderen. Dit geeft een beeld van de verbrandingssnelheden waar gastoestellen in de praktijk mee geconfronteerd worden. Hiertoe zijn ter illustratie drie extreme weersomstandigheden met grote verschillen in de luchtdruk, temperatuur en luchtvochtigheid bestudeerd. De effecten van de weersveranderingen op de verbrandingssnelheid zijn in deze studie vergeleken met het effect dat bijmenging van waterstof op de verbrandingssnelheid heeft. Tevens zijn de verbrandingssnelheden van de limiet gassen voor het testen van de betreffende gastoestellen en de verbrandingssnelheden van de distributielimietgassen toegevoegd om een beeld te geven van de onderlinge verschillen en impact.

### Distributie limietgassen

In de Europese normen (EN 437) staat een aantal gastoestelcategorieën gedefinieerd Ref. [3]. Om de veiligheid onder “normale” omstandigheden te waarborgen zijn voor ieder toestelcategorie extreme limietgassen beschreven (ELG) waarmee onder laboratorium omstandigheden toestellen worden

getest voordat deze op de markt worden gebracht. “Normale” omstandigheden hier betekent onderhouden conform de instructies van de fabrikant en binnen de range van gassamenstellingen waarvoor het toestelcategorie bedoeld is. De verbrandingstechnische uitersten van de range van gassamenstelling waarvoor de toestelcategorie bedoeld is, worden door “distributielimietgassen” oftewel DLG’s Ref. [4, 5] aangegeven. Hierbij merken we op dat de DLG’s geen deel uitmaken van de EN437 Ref. [3]. Het testen met een ELG waarborgt dat voor de range aan gassen en bedrijfscondities (zoals weersomstandigheden) waarvoor de toestelcategorie bedoeld is, het toestel gedurende de levensduur goed en veilig blijft functioneren. Derhalve zijn de verbrandingseigenschappen van de ELG’s ‘extremer’ dan de bijbehorende DLG’s. In deze systematiek Ref. [4] dient bij een “nieuw” in te passen gas geen verhoogd risico op te treden in vergelijking met de DLG’s. Het risico op inslag bij gedeeltelijk voorgemengde branders dient derhalve niet groter te zijn dan bij het arm DLG Ref. [4]. Het arm DLG is met stikstof verarmd Slochterengas (tabel 1) met een Wobbe van 43.46 MJ/m<sup>3</sup>(n). In Ref. [4] zijn de 10 aspecten die worden afgedekt met deze veiligheidsmarge tussen de ELG’s en DLG’s weergegeven. Een van de aspecten die grote invloed heeft op het functioneren van toestellen zijn de variaties in de weersomstandigheden; luchtdruk, temperatuur en luchtvochtigheid. De invloed van de weersomstandigheden op de verbrandingssnelheid wordt in deze studie nader onderzocht.

Voor de toestellen in de toestelcategorie I<sub>2L</sub>, de aanduiding voor de Nederlandse toestellen voor de G-band, is G25 het ELG voor inslag (tabel 1). G26 is het ELG om onvolledige verbranding, roetvorming en oververhitting te voorkomen en G27 is het ELG voor afblazen. Het DLG voor onvolledige verbranding, roetvorming en overbelasting is het zogenaamde rijk DLG Ref. [5] met een Wobbe van 44.41 MJ/m<sup>3</sup>(n). De ELG’s en de DLG’s die van toepassing zijn voor de G-gasmarkt staan weergegeven in tabel 1.

**Tabel 1: Gassamenstellingen**

Component	Slochterengas	Arm DLG	Rijk DLG	CH <sub>4</sub> /N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	G-gas/H <sub>2</sub>	G26	G27
CH <sub>4</sub>	81,35	80,9	79,73	85,65	80,97	79,91	74,037
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,87	2,87	2,87	0	2,87	0,00	0,00
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,38	0,38	2,00	0	0,38	7,13	0,00
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,15	0,15	0,15	0	0,15	0,00	0,00
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,04	0,04	0,04	0	0,04	0,00	0,00
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,05	0,05	0,05	0	0,05	0,00	0,00
N <sub>2</sub>	14,29	14,73	14,29	13,85	14,14	12,96	25,96
CO <sub>2</sub>	0,89	0,89	0,90	0	0,00	0,00	0,00
O <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00
W, MJ/m <sup>3</sup>	43,72	43,46	44,41	43,76	43,76	47,26	36,22

### Werking brandstofrijk voorgemengde toestellen en het berekenen van de verbrandingssnelheid

De categorie toestellen waar vlaminslag een potentieel risico is zijn rijk (gedeeltelijk) voorgemengde toestellen zoals, kookbranders, geisers en conventionele CV ketels Ref. [2]. Dit type toestellen bevat "Bunsen achtige " gasbranders. Een deel van de beluchting (primaire beluchting) wordt met een venturi door de brandstofgasstroom aangezogen. Het brandstof/luchtmengsel stroomt vervolgens uit de brander poorten en wordt daar gemengd met secundaire verbrandingslucht. Indien de uitstroomsnelheid in evenwicht is met de verbrandingssnelheid dan is er sprake van een stabiele vlam. Voor dit type branders stabiliseert de vlam zich op de rand van de brander poort. Indien de uitstroomsnelheid groter is dan de verbrandingssnelheid dan blaast de vlam geheel of gedeeltelijk af (flame lift). Als de verbrandingssnelheid groter is dan de uitstroomsnelheid dan slaat de vlam terug in de brander (vlaminslag). De verbrandingssnelheid van een brandstof/luchtmengsel hangt onder andere af van de brandstofsamenstelling, de gas/luchtverhouding, de temperatuur- en druk en hoeveelheid waterdamp in het onverbrande gas/lucht mengsel. Om te bepalen welke invloed de verandering van deze parameters heeft op de verbrandingssnelheid is het van belang het toestel gedrag in beschouwing te nemen.

In de praktijk wordt het toestel bedreven met distributiegassen en weersomstandigheden die afwijken van de laboratoriumtesten. Hierdoor wijkt ook het functioneren van het toestel af ten opzichte van de testcondities. Deze laboratorium test waarborgt wel dat de optredende situaties in de praktijk voldoende veilig afgedekt worden, echter bij verandering van samenstelling met toevoeging van 0,5 % waterstof is het de vraag of dit nog steeds gewaarborgd kan worden. Indien de gassamenstelling en de omgevingsomstandigheden afwijken van de testcondities is de primaire equivalentieverhouding voor gedeeltelijk voorgemengde toestellen zoals kooktoestellen en geisers gelijk aan:

$$\varphi = \frac{n_{b,1} \sqrt{\frac{T_{b1} \cdot \rho_{b,1}(T_1, P_1)}{T_{b,2} \cdot \rho_{b,2}(T_1, P_1)}}}{n_{l,1} \frac{(1-x_{2,H_2O})}{(1-x_{1,H_2O})} \sqrt{\frac{T_{l1} \cdot \rho_{l,1}(T_1, P_1)}{T_{l,2} \cdot \rho_{l,2}(T_1, P_1)}} \cdot x_{zuurstof}} \cdot f_2 \quad (1)$$

Waarin  $n_b$  en  $n_l$  het mol debiet brandstof en lucht is,  $T_b$  en  $T_l$  is de temperatuur van de brandstof en lucht,  $x_{H_2O}$  is de mol fractie water in droge lucht,  $\rho_b(T_1, P_1)$  en  $\rho_l(T_1, P_1)$  zijn de dichtheid van de brandstof en lucht onder de referentie condities ( $T_1, P_1$ ),  $f$  is de stoichiometrische luchtbehoefte en  $\varphi$  is de equivalentieverhouding. In bijlage 1 staat de afleiding van vergelijking (1) weergegeven.

### Berekening laminaire verbrandingssnelheid

De berekeningen van de verbrandingssnelheid zijn uitgevoerd met het programma Premix [6] dat deel uitmaakt van het software pakket CHEMKIN II [7], met gebruik van het chemisch mechanisme GRI Mech 3.0 [8]. In de berekeningen wordt als parameters de omgevingsdruk ( $P_o$ ) en de begintemperatuur ( $T_m$ ) van het brandstof/luchtmengsel en de samenstelling van het brandstof/lucht mengsel als input gebruikt in de berekeningen van de numerieke laminaire vlamnsnelheid.

### Uitgangspunten

#### *Weersomstandigheden*

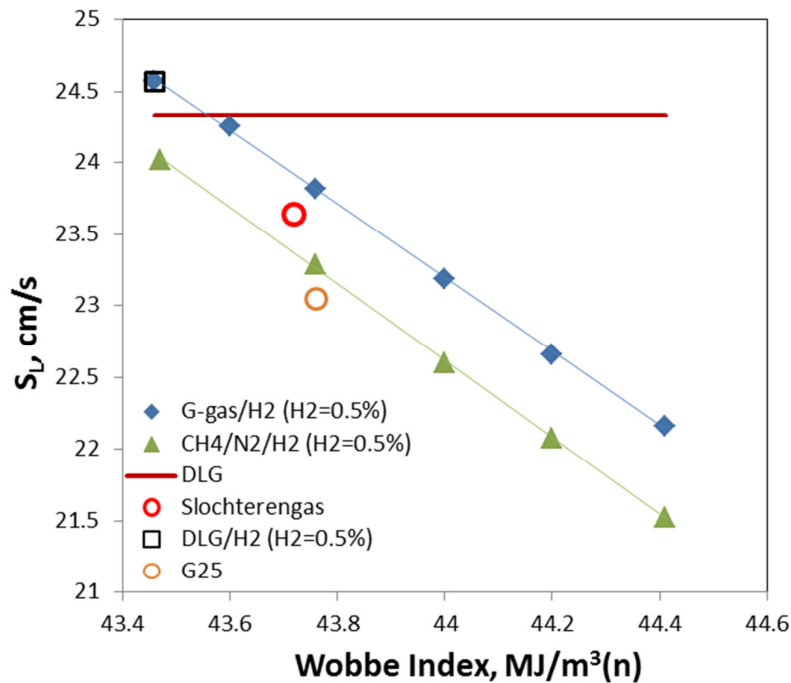
Om de invloed van de weersomstandigheden op de verbrandingssnelheid te onderzoeken zijn ter illustraties drie uiteenlopende realistische weersomstandigheden gedefinieerd; zomer, winter en een gemiddeld situatie. De achterliggende waarden van de temperatuur, druk en luchtvochtigheid voor de drie beschreven weersomstandigheden, weergegeven in tabel 2, staan uitvoerig beschreven in Ref. [9]. De temperatuur van het brandstof/luchtmengsel ( $T_{\text{mengsel}}$ ), weergegeven in tabel 2 is berekend op basis van de temperatuur van de brandstof, lucht en de gas/luchtverhouding (zie ook vergelijking (1)).

**Tabel 2: Worst case uitgangspunten weerscondities Nederland**

	Zomer	Winter	Gemiddeld
$T_{\text{Lucht}}, ^\circ\text{C}$	30	-10	10
$T_{\text{Lucht}}, \text{K}$	303.2	263.2	283.2
$T_{\text{brandstof}}, ^\circ\text{C}$	10.0	3.3	6.7
$T_{\text{brandstof}}, \text{K}$	283.15	276.48	279.82
$T_{\text{mengsel}}, \text{K}$	300.6	264.9	282.7
$T_{\text{mengsel}}, ^\circ\text{C}$	27.5	-8.2	9.6
<b>P (mbar)</b>	980	1030	1015.5
<b>Luchtvochtigheid, %</b>	95	90	83
$P_{\text{sat, antoine eq.}}, \text{Pa}$	4231.7	282.1	1221.1
$P_{\text{H}_2\text{O}}, \text{Pa}$	4020.1	253.9	1013.5
<b>Molfractie water</b>	0.0410	0.0025	0.0100

Bij de berekeningen van de numerieke laminaire verbrandingssnelheid is aangenomen dat het toestel is afgesteld bij een equivalentieverhouding van  $\phi=1.25$  onder de gemiddelde weersomstandigheden, weergegeven in tabel 2. De verandering van de weersomstandigheden ten opzichte van de gemiddelde (afstel)situatie beïnvloed de primaire equivalentieverhouding en wordt in deze studie berekend via vergelijking (1).

Effect 0,5% waterstof in aardgassen op de verbrandingsnelheid



**Figuur 1: Wobbe index als functie van de laminaire verbrandingsnelheid voor CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>, G-gas/H<sub>2</sub> mengsels. Daarnaast is verbrandingsnelheid van DLG, DLG/H<sub>2</sub>, Slochterengas en G25 (tabel 1) weergegeven. Allen onder brandstofrijke ( $\phi > 1$ ) condities**

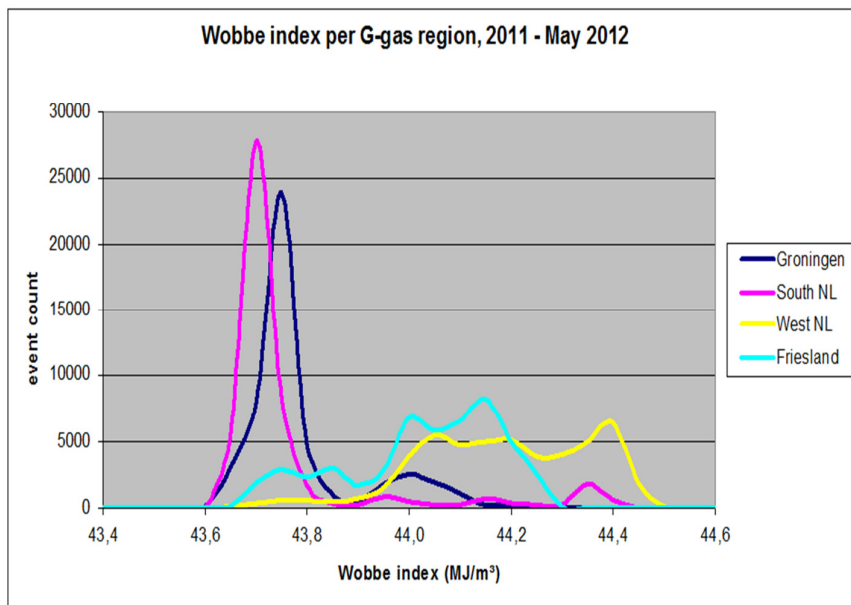
In figuur 1 is de verbrandingsnelheid weergegeven voor een range van “Slochterenachtigen” (hierna “G-gasmengsels” genoemd) met 0,5% waterstof en een range van CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>-mengsels met 0,5% waterstof. De G-gasmengsels zijn gebaseerd op Slochterengas waarvan het stikstofgehalte is gevarieerd om de Wobbe Index van het mengsel over de gehele Wobbeband te variëren. Bij deze procedure wordt het waterstofgehalte constant op 0,5% gehouden. Hetzelfde is gedaan voor de CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>-mengsels. Ter illustratie zijn bij een Wobbe Index van 43,7 MJ/m<sup>3</sup>(n) de gassenstellingen van G-gas/H<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> weergegeven in tabel 1. Ook is de verbrandingsnelheid van het ELG voor inslag G25 (het formele samenstelling in EN437, een CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>-mengsel), het DLG voor inslag (het arm DLG) en Slochterengas weergegeven in figuur 1. De samenstellingen van deze gassen zijn te vinden in tabel 1.

Uit grafiek 1 is duidelijk waar te nemen dat voor de gasmengsels G25 (CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>) en Slochterengas de aanwezigheid van 0,5% waterstof tot gevolg heeft dat de verbrandingsnelheid bij een vaste Wobbe Index toeneemt met ca. 0.25 cm/s. De aanwezigheid van de hogere koolwaterstoffen in de G-gas/H<sub>2</sub> mengsels is de oorzaak dat deze mengsels een hogere verbrandingsnelheid (met ca. 0.6 cm/s) hebben dan CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>-mengsels, figuur 1.

Om geen verhoogd risico van inslag te veroorzaken, boven die van de normale range van aardgassen Ref. [4] hebben wij als uitgangspunt genomen dat de verbrandingsnelheid van de

aardgas/waterstof-mengsels gelijk zijn aan of lager dan het arm DLG. In figuur 1 is te zien dat de CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> mengsels over de gehele Wobbeband een lagere verbrandingssnelheid hebben dan het arm DLG, waaruit volgt dat de aanwezigheid van 0,5% waterstof wat betreft de risico's op vlaminslag binnen de volledige Wobbeband niet tot verhoogd risico voor inslag leidt. Voor de gekozen G-gas/H<sub>2</sub>-mengsels is de verbrandingssnelheid over bijna de gehele Wobbeband lager dan DLG. Alleen aan de onderkant van de Wobbeband (<~43.55MJ/m<sup>3</sup>(n)) is de verbrandingssnelheid voor G-gas/H<sub>2</sub> iets hoger dan het arm DLG.

Uit recente data van de variaties de Wobbe Index over de periode 2011-mei 2012 (figuur 2) en variaties in de Wobbe Index over de periode 2005-2010 weergegeven in Ref. [10] blijkt dat G-gassen met een lagere Wobbe dan 43.6 MJ/m<sup>3</sup>(n) nauwelijks worden gedistribueerd (en daarmee blijft de verbrandingssnelheid over de range van 43,6-44,41 onder de DLG verbrandingssnelheid). Zoals bekend wordt ook zogenaamd Pseudo-G-gas gemaakt door stikstoftoevoeging aan H-gas waarbij niet meer dan noodzakelijk stikstof wordt toegevoegd. Pseudo G-gas heeft hiermee een Wobbe > 44 MJ/m<sup>3</sup>(n).



Figuur 2: G-gas in Nederland Wobbe, data is aangeleverd door GTS.

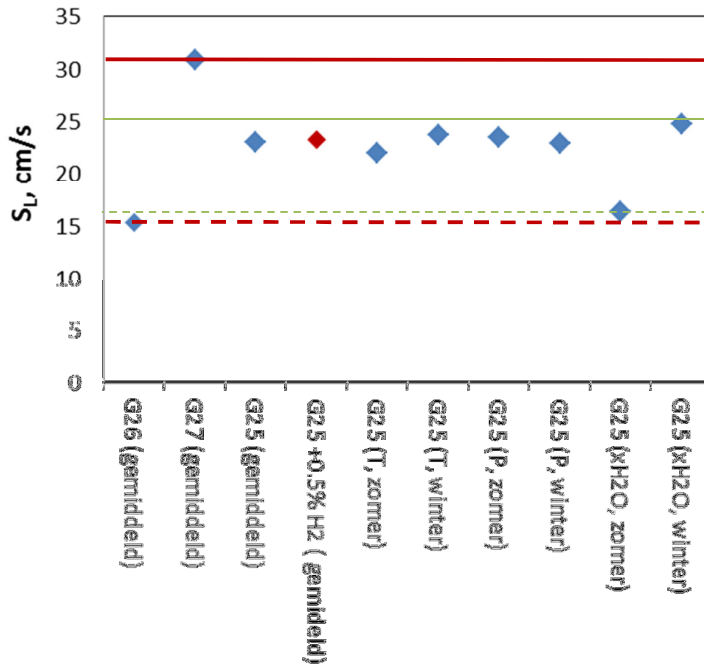
Om de impact van het bijmengen van 0,5% waterstof in perspectief te plaatsen t.o.v. de invloed die de variaties in weersomstandigheden hebben op de verbrandingssnelheid, zijn aanvullend de verbrandingssnelheden bepaald o.b.v. de weerscondities weergegeven in tabel 2.

### **Invloed weersomstandigheden op de verbrandingssnelheid**

Om te bestuderen in hoeverre veranderingen in de weersomstandigheden de laminaire verbrandingssnelheid beïnvloeden, zijn numerieke vlamsnelheden berekend bij de verschillende temperatuur-, druk- en luchtvochtigheidscondities weergegeven in tabel 2. De resultaten in figuur 3, voor G25, zijn verkregen door één van de drie parameters ( $P$ ,  $T_m$ ,  $x_{H_2O}$ ) in tabel 2 te variëren voor de zomer en wintersituatie waarbij de overige parameters constant aan de gemiddelde situatie zijn gehouden.

In figuur 3 is waar te nemen dat verandering van de weersomstandigheden grote invloed hebben op de laminaire verbrandingssnelheid,  $S_L$ . De spreiding waarbinnen de verbrandingssnelheid van G25 ten gevolge van de individuele veranderingen in de weerscondities valt is aangegeven met de groene lijnen. De variatie in luchtvochtigheid heeft de grootste invloed op de laminaire verbrandingssnelheid. Dit wordt hoofdzakelijk veroorzaakt doordat de luchtvochtigheid een belangrijke invloed factor is voor de gas/luchtverhouding; verandering van de luchtvochtigheid heeft een verandering in het zuurstofpercentage in lucht tot gevolg. Het rode punt in figuur 3 geeft de verbrandingssnelheid onder de gemiddelde weersomstandigheden aan voor G25 met daarin 0,5% waterstof. Zoals hierboven al is beschreven leidt de aanwezigheid van 0,5% waterstof tot een toename van de verbrandingssnelheid van ca. 0.25cm/s. Deze toename in de verbrandingssnelheid is een orde van grootte kleiner dan de variaties ten gevolge van de luchtvochtigheid (8.4 cm/s). Hierbij moet worden vermeld dat de toename in  $S_L$  door de aanwezigheid van waterstof altijd bovenop de veranderingen in  $S_L$  ten gevolge van de variaties in de weersomstandigheden komt.

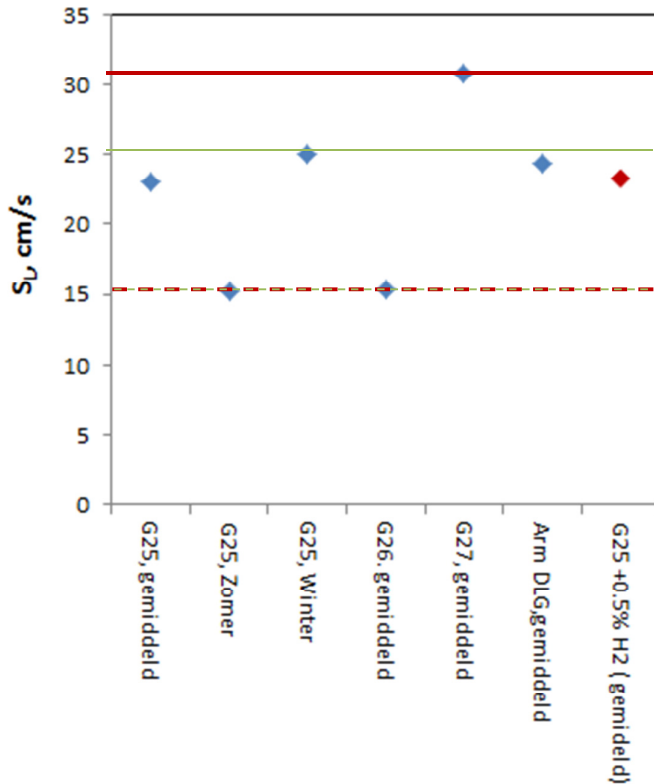
De verbrandingssnelheid van het ELG voor onvolledige verbranding, en overbelasting (G26) en het ELG dat voor afblazen wordt gebruikt (G27) staan ook in figuur 3 weergegeven. De verbrandingssnelheden van de G26 heeft de laagste verbrandingssnelheid en G27 heeft de hoogste verbrandingssnelheid van alle bestudeerde mengsels in figuur 3, de maxima en minima zijn door de rode lijnen aangegeven. Het verschil in de verbrandingssnelheid tussen G26 en G27 is hoofdzakelijk het gevolg van de verschuiving in primaire equivalentieverhouding die door het verschil in de Wobbe Index ontstaat. Hierbij wordt opgemerkt dat het gas G27 niet van toepassing is voor inslag; de keuringstest met G27 wordt bij vollast (maximale uitstroomsnelheid) uitgevoerd en dus is de verbrandingssnelheid niet relevant voor de beschouwing over inslag. Daarentegen wordt de inslag test wel met G25 uitgevoerd onder condities die relevant voor inslag zijn, d.w.z. bij laaglast, omdat bij lage uitstroomsnelheden t.o.v. de verbrandingssnelheid het risico op inslag het grootst is.



**Figuur 3: Effect variatie in omgevingstemperatuur, druk en luchtvochtigheid (tabel 2) op de laminaire verbrandingssnelheid, tevens zijnde  $S_L$  voor de ELG's en G25+0,5% H<sub>2</sub> (tabel 1) weergegeven.**

In figuur 4 staan de verbrandingssnelheden voor de drie gedefinieerde weersomstandigheden in tabel 2 (zomer, winter en gemiddeld) gepresenteerd voor G25. De maximale verbrandingssnelheid wordt verkregen in de winter (groene lijn) en de minimale verbrandingssnelheid (groene stippellijn) wordt verkregen in de zomer. Het verschil tussen de verbrandingssnelheid in de winter en zomer is ca. 9.5 cm/s, waarbij het risico op vlaminslag het grootst is in de winter. Ter illustratie zijn ook de verbrandingssnelheden van G26, G27 en arm DLG weergegeven, berekend bij de gemiddelde weersomstandigheden. De maxima en minima van de ELG's zijn aangegeven met de rode lijnen. Uit figuur 4 is waar te nemen dat het arm DLG een hogere verbrandingssnelheid heeft ( $S_L=24.35$  cm/s) dan G25 ( $S_L=23.05$  cm/s) en G25 met 0.5% waterstof ( $S_L=23.30$  cm/s) onder gemiddelde weersomstandigheden. Doordat de weersomstandigheden een grote invloed hebben op de verbrandingssnelheid is de verbrandingssnelheid voor G25 bij wintercondities hoger dan arm DLG bij de gemiddelde condities. Echter, om te beoordelen of een gas wel of geen verhoogd risico voor inslag met zich meebrengt moeten de verbrandingseigenschappen van het gas onder dezelfde weersomstandigheden met de verbrandingseigenschappen van het DLG's worden vergeleken. De ELG's zijn bedoeld om o.a.de variatie in temperatuur afdekken. Ter verduidelijking, het hierboven beschreven CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> mengsel met 0,5% waterstof leidt binnen de volledige Wobbeband, ongeacht de weersomstandigheden, niet tot verhoogd risico voor inslag (figuur 1).



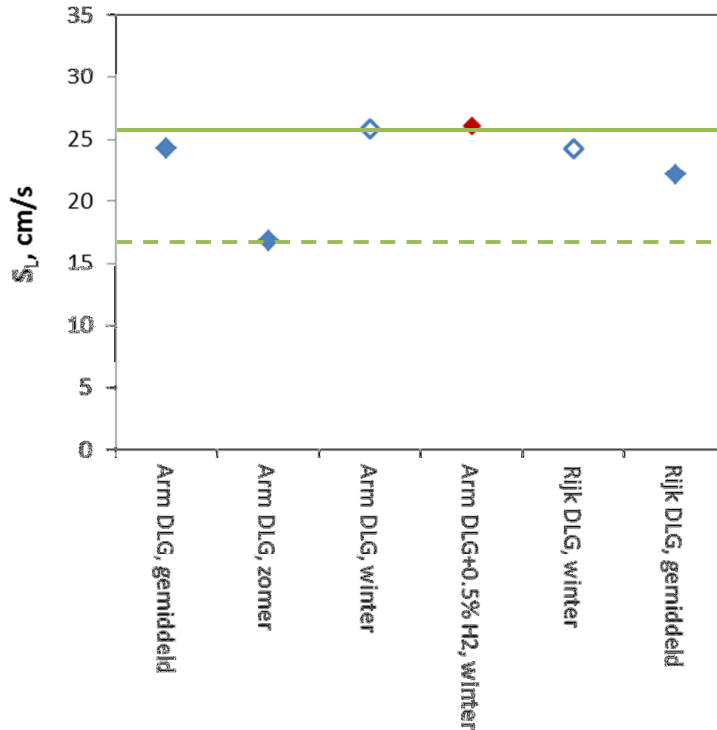


Figuur 4: Effect weersomstandigheden ( tabel 2) op de laminaire verbrandingssnelheid,  $S_L$  voor G25. Tevens is de  $S_L$  voor G26 en G27 weergegeven voor de gemiddelde weersomstandigheden (tabel 2).

De effecten van veranderingen in de weerscondities op de verbrandingssnelheid voor arm DLG is gepresenteerd in figuur 5. Net als voor G25 zijn grote variaties in de verbrandingssnelheid waar te nemen voor de drie verschillende weersomstandigheden; in de zomer is de verbrandingssnelheid 16.9 cm/s en in de winter is de verbrandingssnelheid substantieel hoger,  $S_L$  is 25.9 cm/s. Onder de winter situatie is het risico op vlaminslag het hoogst (groene vaste lijn in figuur 5) en in de zomer is het risico het kleinst (groene stippelijntje in figuur 5). De aanwezigheid van 0,5% waterstof in arm DLG (tabel 1), onder de winteromstandigheden, leidt tot een (geringe) toename in de verbrandingssnelheid van 0.25 cm/s. Deze toename komt dus bovenop de verandering van de verbrandingssnelheid ten gevolge van de variatie in de weersomstandigheden. De verbrandingssnelheid van het arm DLG met 0,5% waterstof is in de wintersituatie (worst case) dus hoger dan het arm DLG in de wintersituatie, zoals aangegeven met het rode symbool in figuur 5.

Ter illustratie is ook de verbrandingssnelheid van rijk DLG (Wobbe is 44.41 MJ/m<sup>3</sup>(n)) weergegeven in figuur 5 voor de winter en gemiddelde situatie. Door hoofdzakelijk het verschil in Wobbe tussen arm en rijk DLG is een substantieel verschil berekend tussen de verbrandingssnelheid van de DLG's; arm DLG heeft een verbrandingssnelheid van 25.9 cm/s en rijk DLG heeft een verbrandingssnelheid van 24.3 cm/s. De variatie in Wobbe en weersomstandigheden zijn dus veel groter dan het effect dat 0,5% waterstof heeft op de verbrandingssnelheid. Ook hier geldt weer dat de toename van de

verbrandingssnelheid als gevolg van de aanwezigheid van 0,5% waterstof bovenop de effecten van het weer komen, arm DLG/H<sub>2</sub> heeft daardoor een hogere verbrandingssnelheid dan arm DLG onder dezelfde weersomstandigheden, zie figuur 5.



**Figuur 5:** Effecten van de weerscondities (tabel 2) op  $S_L$  voor arm DLG. Daarnaast is de verbrandingssnelheid voor arm DLG/H<sub>2</sub> bij een Wobbe van 43.46 MJ/m<sup>3</sup>(n) en rijk DLG weergegeven onder wintercondities. In tabel 1 staan de samenstellingen van de gassen weergegeven.

**Conclusies:**

In dit rapport is het effect van de aanwezigheid van een 0,5% waterstof in G-gassen op verbrandingssnelheid onderzocht onder condities relevant voor gedeeltelijk voorgemengde toestellen zoals geisers, kooktoestellen en conventionele CV ketels. Daarnaast is voor deze toestellen de invloed van variaties in de weersomstandigheden ( $T_0$ ,  $P_0$ ,  $x_{H_2O}$ ) op de verbrandingssnelheid bestudeerd.

*Invloed aanwezigheid van 0,5% waterstof op de verbrandingssnelheid*

- De aanwezigheid van 0,5% waterstof in CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> en op Slochterengas gebaseerd G-gas heeft bij dezelfde Wobbe Index een toename van verbrandingssnelheid tot gevolg van ca. 0.25 cm/s voor beide mengsels.
- De verbrandingssnelheid van het CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> mengsel met daarin 0,5% waterstof is over de gehele Wobbeband lager dan het Distributie Limietgas (arm DLG) dat relevant is voor inslag. Dit betekent dat het CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> mengsel met 0,5% waterstof binnen de volledige Wobbeband,

ongeacht de weersomstandigheden, niet tot verhoogd risico leidt t.o.v. de beoogde range aan gassamenstellingen voor deze toestellen.

- Voor het bestudeerde G-gas met daarin 0,5% waterstof is de verbrandingssnelheid over het Wobbe gebied van 43.55-44.41 MJ/m<sup>3</sup>(n) lager dan de verbrandingssnelheid van het arm DLG (43.46 MJ/m<sup>3</sup>(n)) en dus leidt in dit gebied 0,5% H<sub>2</sub> niet tot verhoogd risico t.o.v. de beoogde range aan gassamenstellingen voor deze toestellen. In het gebied 43.46-43.55 MJ/m<sup>3</sup>(n) is de verbrandingssnelheid hoger dan arm DLG. De samenstellingen van aardgassen lijken echter nauwelijks voor te komen in dit gebied aan de onderkant van de Wobbeband, Ref. [10].

#### *Invloed verandering weersomstandigheden op de verbrandingssnelheid*

Om de invloed van weersomstandigheden (omgevingstemperatuur, gastemperatuur, luchtdruk en luchtvochtigheid) op de laminaire verbrandingssnelheid te onderzoeken zijn ter illustratie drie uiteenlopende weersomstandigheden bestudeerd; winter, zomer en een gemiddelde situatie.

- Uit berekeningen volgt dat veranderingen in de weersomstandigheden grote invloed heeft op de laminaire verbrandingssnelheid; als voorbeeld, voor G25 is het verschil tussen de verbrandingssnelheid in de winter en zomer ca. 9.5 cm/s.
- De verbrandingssnelheid en daarmee het risico tot vlaminslag t.o.v. de gemiddelde situatie is in de gedefinieerde wintersituatie het hoogst.
- Uit de analyse van de resultaten blijkt dat de verandering van de luchtvochtigheid de grootste invloed heeft op de verbrandingssnelheid. Afname van de luchtvochtigheid leidt tot een toename van de verbrandingssnelheid.
- Variatie van de weersomstandigheden bij constante Wobbe Index hebben een veel grotere invloed op de verbrandingssnelheid (~9.5 cm/s) dan de aanwezigheid van 0,5% waterstof (~0.25 cm/s) in de bestudeerde brandstofmengsels. Echter, hierbij moet opgemerkt worden dat de toename van de verbrandingssnelheid door de aanwezigheid van waterstof altijd bovenop de veranderingen in de verbrandingssnelheid ten gevolge van de variaties in de weersomstandigheden komt. De aanwezigheid van 0,5% waterstof in de hier onderzochte G-gassen met een Wobbe tussen 43.55-44.41 MJ/m<sup>3</sup>(n) geeft ongeacht de weersomstandigheden geen verhoogd risico op vlaminslag.

**Referenties**

1. Ministerie van Economische Zaken, De samenstelling van laag-calorisch gas in de verdere toekomst en de eisen aan gastoestellen die onder de Gastoestellenrichtlijn vallen, 12-3-2012
2. V.M. van Essen, H. de Vries, Possibilities for admixing gasification gases: Combustion aspects in domestic natural gas appliances in the Netherlands, IGRC 2011.
3. EN437:300(E). Test gases – Test Pressures – Appliance categories. CEN, Brussels, May 2003.
4. H. B. Levinsky, M.L.D. van Rij, Vlamstabiliteit groengas, Nov. 2012
5. M.L.D. van Rij, EN 15502-2-1:2012
6. R. J. Kee, J. F. Grcar, M. D. Smooke, J. A. Miller, Fortran program for modelling steady one-dimensional premixed flames. Sandia Report SAND85-8240. Sandia National Laboratories, 1985.
7. R.J. Kee, F.M. Rupley, J.A. Miller, "CHEMKIN II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics", Sandia National Laboratories, (1989).
8. G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, N. W. Moriarty, B. Eiteneer, W. Goldenberg, C.T. Bowman, R. Hanson, W.C. Gardiner, V. Lissianski, and Z. Qin, [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
9. B. Slim, Wobberegeling & Rendement, in opdracht van GTS, 18 Juni 2011(GCS 11.R.51874)
10. H.B. Levinsky, M.L.D. van Rij, Deelrapport 1: Technisch/economische inventarisatie van gevolgen gaskwaliteitsvariaties voor eindgebruikers, in opdracht van Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie, 27 januari 2011.

## Bijlage 1: Bepaling van de equivalentieverhouding

### *De brandstof/luchtverhouding*

De categorie toestellen waar inslag een potentieel risico is zijn rijkafgestelde toestellen zoals, kookbranders, geisers en conventionele CV ketels. Voor deze toestellen stroomt het gas in de vorm van een straal uit de brandstofinjecteur. De brandstofstraal wordt in een Venturi gespoten. Door de impulsoverdracht die plaatsvindt tussen de brandstofstraal en omgevingslucht wordt lucht in de venturi gezogen waarna een brandstof/luchtmengsel wordt verkregen en naar de brander wordt getransporteerd. De equivalentieverhouding wordt bepaald door de verhouding van de brandstof/lucht en de stoichiometrische lucht behoefte ( $f$ ) en wordt als volgt uitgedrukt:

$$\varphi = \frac{n_b}{n_l \cdot x_{\text{zuurstof}}} \cdot f \quad (2)$$

Waarin  $x_{\text{zuurstof}}$  de fractie zuurstof in lucht is,  $n_b$  is het aantal mol brandstof en  $n_l$  is het aantal mol lucht.

Volgens de wet van Bernoulli kan het brandstofdebiet dat uit de restrictie van de injector komt beschreven worden aan de hand van de gasdruk ( $\Delta P$ ), de afmetingen van de restrictie ( $A$ ) en de dichtheid ( $\rho$ ) van de brandstofsamenstelling:

$$\Phi_{v,b} = A_{\text{orifice}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_b}} \quad (3)$$

Voor leidingen waar de overdruk (25-30mbar) in de leiding constant wordt gehouden ten opzichte van de atmosferische druk nemen we aan dat de drukval ( $\Delta P$ ) over de injecteur constant blijft. Bij een constante drukval is de verandering van het brandstofdebiet omgekeerd evenredig met wortel uit de dichtheid van de brandstof. De dichtheid van de brandstof wordt bepaald door de atmosferische druk ( $P_0$ ), de temperatuur ( $T_0$ ) van het gas en de gassenstelling. Het functioneren van het toestel is dus afhankelijk van de heersende weerscondities. Als de weersomstandigheden afwijken van de condities waarbij het toestel is afgesteld heeft dit bij constante drukval onderstaand effect op het brandstofdebiet:

$$\frac{\Phi_{b,2}}{\Phi_{b,1}} = \sqrt{\frac{\rho_{b,1}}{\rho_{b,2}}} \approx \sqrt{\frac{P_{0,1}}{P_{0,2}} \cdot \frac{T_{b,2}}{T_{b,1}} \cdot \frac{\rho_{g,1}(T_1, P_1)}{\rho_{g,2}(T_1, P_1)}}} \quad (4)$$

De verandering in het aantal mol/s brandstof ( $n_b$ ) naar de brander kan als volgt worden beschreven:

$$\frac{\dot{n}_{b,1}}{\Phi_{b,1}} = \frac{P_{0,1}}{RT_{b,1}} \quad (5)$$

$$\frac{\dot{n}_{b,2}}{\Phi_{b,2}} = \frac{P_{0,2}}{RT_{b,2}} \quad (6)$$

Substitutie van (3), (4) en (5) geeft;

$$\frac{\dot{n}_{b,2}}{\dot{n}_{b,1}} \approx \frac{\Phi_{b,2}}{\Phi_{b,1}} \cdot \frac{P_{0,2}}{P_{0,1}} \cdot \frac{T_{b,1}}{T_{b,2}} \approx \sqrt{\frac{P_{0,2}}{P_{0,1}} \cdot \frac{T_{b,1}}{T_{b,2}} \cdot \frac{\rho_{b,1}(T_1, P_1)}{\rho_{b,2}(T_1, P_1)}}} \quad (7)$$

### Primaire beluchting

De hoeveelheid primaire verbrandingslucht dat met de brandstof wordt meegezogen in de Venturi wordt bepaald door het impulsmoment van de brandstof bij de injector. Als de drukval ( $\Delta P$ ) constant blijft dan blijft ongeacht de weersomstandigheden het impulsmoment bij de injector constant. Voor een ideale venturi, viscositeitseffecten zijn verwaarloosbaar, geldt dat als het impulsmoment van het brandstofdebiet bij de injector gelijk blijft er ook geen veranderingen plaatsvinden van het impulsmoment van het brandstof/luchtmengsel in de keel van de venturi :

$$\frac{\rho_{m,1} \cdot \Phi_{m,1}^2}{A} = \frac{\rho_{m,2} \cdot \Phi_{m,2}^2}{A} \quad (8)$$

Hieruit volgt dat het impulsmoment van de lucht constant blijft, dus geldt:

$$\rho_{l,1} \Phi_{l,1}^2 = \rho_{l,2} \Phi_{l,2}^2 \quad (9)$$

Uit vergelijking (9) volgt dat verandering van de dichtheid, als gevolg van de omgevingstemperatuur, -druk en/of luchtvochtigheid, leidt tot een verandering in de luchtflow:

$$\frac{\Phi_{l,2}}{\Phi_{l,1}} = \sqrt{\frac{\rho_{l,1}}{\rho_{l,2}}} \approx \sqrt{\frac{P_{0,1}}{P_{0,2}} \cdot \frac{T_{l,2}}{T_{l,1}} \cdot \frac{\rho_{l,1}(T_1, P_1)}{\rho_{l,2}(T_1, P_1)}}} \quad (10)$$

De verandering in het aantal mol/s lucht ( $n_l$ ) naar de brander kan als volgt worden beschreven:

$$\frac{\dot{n}_{l,1}}{\Phi_{l,1}} = \frac{P_{0,1}}{RT_{l,1}} \cdot (1 - x_{1,H_2O}) \quad (11)$$

$$\frac{\dot{n}_{l,2}}{\Phi_{l,2}} = \frac{P_{0,2}}{RT_{l,2}} \cdot (1 - x_{2,H_2O}) \quad (12)$$

Waarin  $x_{H_2O}$  de absolute luchtvochtigheid is. Substitutie van (10), (11) en (12) geeft;

$$\frac{\dot{n}_{l,2}}{\dot{n}_{l,1}} \approx \frac{\Phi_{l,2}}{\Phi_{l,1}} \cdot \frac{P_{0,2}}{P_{0,1}} \cdot \frac{T_{l,1}}{T_{l,2}} \cdot \frac{(1-x_{2,H_2O})}{(1-x_{1,H_2O})} \approx \frac{(1-x_{2,H_2O})}{(1-x_{1,H_2O})} \sqrt{\frac{P_{0,2}}{P_{0,1}} \cdot \frac{T_{l,1}}{T_{l,2}} \cdot \frac{\rho_{l,1}(T_1, P_1)}{\rho_{l,2}(T_1, P_1)}}} \quad (13)$$

Substitutie van vergelijking (7) en (13) in (2) geeft onderstaande uitdrukking voor de verandering in equivalentieverhouding:

$$\varphi = \frac{n_{b,1} \sqrt{\frac{T_{b1} \cdot \rho_{b,1}(T_1, P_1)}{T_{b,2} \cdot \rho_{b,2}(T_1, P_1)}}}{n_{l,1} \frac{(1-x_{2,H_2O})}{(1-x_{1,H_2O})} \sqrt{\frac{T_{l1} \cdot \rho_{l,1}(T_1, P_1)}{T_{l,2} \cdot \rho_{l,2}(T_1, P_1)}} \cdot x_{\text{zuurstof}}} \cdot f_2 \quad (14)$$

Waarin  $x_{\text{zuurstof}}$  de fractie zuurstof in droge lucht is.