

OML-beregninger på våde røgfaner

Teknisk notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 24. marts 2015

Per Løfstrøm og Helge Rørdam Olesen

Institut for Miljøvidenskab

Rekvirent:

Miljøstyrelsens Referencelaboratorium for måling af emissioner til luften

Antal sider: 18

Faglig kommentering:

Jesper Heile Christensen

Kvalitetssikring, centret:

Vibeke Vestergaard Nielsen



AARHUS
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Tel.: +45 8715 0000
E-mail: dce@au.dk
<http://dce.au.dk>

Indhold

1. Indledning	3
2. Problemstilling	4
3. Brug af dråbekorrigeret røggastemperatur i OML	7
Vandindhold i luft	7
Temperatursænkning ved fordampning	7
Vandindhold og afkøling i skorsten	10
Volumenstrøm i OML og dråbekorrigeret røggastemperatur	11
4. Litteratur	12
Bilag 1.	13
Enheder for volumen	13
Bilag 2.	17
Maksimalt vandoverskud ved OML-anvendelse	17

1. Indledning

DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet har udarbejdet nærværende notat i forbindelse med et projekt udført for Miljøstyrelsens Referencelaboratorium for måling af Emissioner til Luften (RefLab). Notatet indgår i et mere omfattende RefLab-notat, hvis formål er at sikre, at OML-beregninger med våde røggasser udføres korrekt.

OML er udviklet til at beregne spredning af emissioner fra røgfaner. I modellen indgår beregning af røgfanens løft (vertikale opstigning) som følge af røggassens temperatur og den vertikale røggashastighed i skorstenstoppen. Forudsætningerne i OML er bl.a., at temperaturen af røgfanen er større end eller lig med temperaturen af den omgivende luft. Det er implementeret i modellen ved, at røggastemperaturen internt i modellen for hver time sættes til at være mindst lige så høj som omgivelsernes temperatur.

Når der er så meget vand til stede i røggassen, at den relative fugtighed er 100 %, vil eventuel overskydende vanddamp kondensere til dråber. Er dråberne til stede, når røggassen forlader skorstenen, vil dråberne fordampe senere på røgfanens vej, hvilket betyder, at røgfanen afkøles. Denne proces tages der ikke hensyn til i OML. Problemstillingen er kun til stede, hvis dråberne er dannet inden de forlader skorstenen.

I det følgende beskrives problemstillingen mere detaljeret, og der gives en metode til at nedjustere den beregningsmæssige temperatur af røggassen i OML, når der er en begrænset mængde af dråber i røggassen, således at spredningen af røgfaner kan beregnes med OML. Metoden vil blive omtalt som "brug af dråbekorrigeret røggastemperatur". Det skal imidlertid stå klart, at OML ikke kan beregne spredningen af en vilkårligt våd røgfane; grænserne herfor fremgår af notatet.

2. Problemstilling

Det er af væsentlig betydning for koncentrationerne i omgivelserne, om en røgfane har opdrift eller ej. Som udgangspunkt har en varm røgfane opdrift. Imidlertid vil opdriften blive modvirket, hvis røgfanen fra starten indeholder vand i form af vanddråber. Årsagen er, at dråberne fordamper efter at røgfanen har forladt skorstenen. Fordampningen medfører, at røgfanen bliver afkølet, hvilket hæmmer opdriften.

Ydermere vejer vanddråberne noget, hvilket også bevirker ringere løft. Effekten af vanddråbernes vægt er størrelsesmæssigt på $1/8$ af effekten af en koldere røgfane (Briggs, 1984). Denne effekt er i kraft lige fra starten af røgfanens bane og bidrager til at hæmme løftet, men den fortager sig i takt med at dråberne fordamper.

Det tæller i modsat retning, at vanddamp er lettere end atmosfærisk luft, men effekten er forsvindende, og der ses bort fra den.

Det er derfor væsentligt, om røgfanen indeholder vand på dråbeform fra starten, og hvor meget den i givet fald indeholder. Det er også afgørende, om vanddråberne er til stede allerede når røgfanen forlader skorstenen, eller om de først dannes senere på røggasfanens bane. Det sidste er meget almindeligt for røgfaner. I så fald har dråbernes tilstedeværelse imidlertid alt i alt ikke den store betydning, fordi der frigives varme, når dråberne kondenserer (i starten af røggasfanens bane), mens der igen forbruges varme, når de fordamper senere på røggasfanens bane. For sådanne normale røggasfaner er nettoeffekten således beskeden og OML-beregninger vil i så henseende være konservativ ("på den sikre side").

En typisk røgfane f.eks. fra kraftværker, vil ikke være synlig på det første korte stykke vej efter, at den har forladt skorstenen. Efter at have tilbagelagt et kort stykke vej er det imidlertid meget almindeligt, at røgfaner bliver synlige, fordi vanddampen i røgfanen kondenserer til dråber.



Figur 1. Røgfanen indeholder øjensynlig vanddråber allerede i skorstensmundingen.

Derimod indeholder en såkaldt 'våd røgfane' vanddråber straks, når den kommer ud af skorstenen. Eksempler på dette er vist i Figur 1. Fanen syner ganske massiv straks fra skorstensmundingen.

Hvis en røgfane indeholder vanddråber, vil den normalt være synlig. Dog kan man ikke være helt sikker på, at en ikke synlig røgfane er fri for vanddråber, med mindre man har konstateret, at der ikke er vand på siderne i toppen af skorstenen. Grunden til usikkerheden er, at det ved en mindre overmætning på 0,3-3 g/m³ (som i skyer), muligvis kan være vanskeligt at se dråberne i en kun 1-2 m bred røgfane. Endvidere kan det tænkes, at der er dråber, som stammer fra en mekanisk proces som afrivning fra skorstenens inderside. Sådanne dråber vil være relativt store, måske 0,1-1 mm, men vil muligvis ikke være synlige.

Mængden af vanddråber afgør, om røgfaneløftet bliver mindsket, elimineret eller ligefrem bliver til et negativt "løft".

OML-modellen er umiddelbart i stand til at regne med positivt løft eller et løft på nul. Ganske vist kan modellen ikke direkte bruge mængden af dråber som input, men man kan "snyde" den til at regne med tilnærmelsesvis korrekt løft ved at angive en anden, lavere røggastemperatur end den faktiske, så længe løftet ikke er negativt - og under den forudsætning, at man har tilstrækkelige oplysninger til at estimere løftet.



Figur 2. Våd røgfane som når hurtigt til jorden.

I tilfælde af negativt "løft" er det nødvendigt at ændre i selve OML-modellen, hvis man skal kunne foretage en præcis beregning. Grundlaget for modelændringer er p.t. ikke undersøgt og umiddelbart ikke særlig solidt underbygget.

Når røgfanen fordamper, vil den kunne blive noget koldere end omgivelserne. Den vil dog aldrig kunne nå en lavere temperatur end atmosfærens vådtemperatur (wet bulb temperature). Hvis atmosfæren er relativt tør (skyfri eller letskyet dag om sommeren) giver det de bedste betingelser for fordampning og dermed afkøling af røgfanen. På sådanne

dage kan der altså forventes nedslag ret tæt ved en skorsten med våd røgfanen. Figur 2 viser et eksempel.

På mere fugtige dage vil røgfanen ikke slå så hurtigt ned. Den vil til gengæld være synlig på et ganske langt stykke, fordi vanddråberne i røggasfanen kun fordamper langsomt. Figur 3 viser et eksempel.

Der er beskrevet tilfælde med våde røgfaner, hvor problemet er mest markant på fugtige dage. I sådanne situationer må der være andre mekanismer på spil end afkøling af røgfanen på grund af fordampning. Det kan tænkes, at indholdet af vand er så betydeligt, at røgfanen indeholder store dråber med stor faldhastighed, og at disse store dråber giver anledning til problemet. Metoden med dråbekorrigeret røggastemperatur tager ikke hensyn til en sådan mekanisme, men den vil næppe være relevant inden for gyldighedsområdet for metoden med dråbekorrigeret røggastemperatur.



Figur 3. Våd røgfanen fotograferet en fugtig oktoberdag. Fanen er synlig over en stor strækning, fordi der kun langsomt sker fordampning. Det indebærer også, at der ikke straks er nedslag af røgfanen.

3. Brug af dråbekorrigeret røggastemperatur i OML

Vandindhold i luft

Der er en øvre grænse for, hvor meget vanddamp luft kan indeholde. Ved denne øvre grænse er den relative luftfugtighed 100 %, og luften siges at være mættet. Tilføres der mere vand vil der dannes dråber. Den mængde vanddamp luften maksimalt kan indeholde, Q_{max} , afhænger af temperaturen (og trykket). I Figur 4 viser den blå kurve den maksimale vanddampmængde (g/m^3) i våd luft (røggas) som funktion af temperaturen ved normalt atmosfærisk tryk. Under kurven er luftfugtigheden under 100 %, og der er kun vanddamp tilstede. Over kurven vil der også være dråber tilstede. Q_{max} er vist i tabelform i Tabel 1 i forskellige enheder.

Som eksempel til at forklare enhederne kan man betragte situationen ved en temperatur på 60 °C. Det fremgår af tabellens række for våd luft, at hvis man har en kubikmeter luft, der er mættet med vanddamp, kan den indeholde 131 g vanddamp. Noget af denne "våde luft" udgøres af vanddamp – nemlig 19,8 volumenprocent (tabellens nederste linje). Når vanddampmængden sættes i forhold til mængden af tør luft kan der være 163 g i en kubikmeter (tabellens øverste linje).

Tabel 1. Den maksimale mængde vanddamp luft kan indeholde ved 1 atm fra standarden EN 14790.

Temperatur (°C)	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
g/m^3																
tør luft	17,8	23,9	31,9	42,2	55,5	72,7	95,0	124	163	215	287	392	553	827	1382	3067
g/m^3																
våd luft	17,4	23,2	30,5	39,8	51,4	65,7	83,3	105	131	162	198	242	293	352	421	499
% volumen																
vanddamp	2,32	3,14	4,21	5,58	7,33	9,52	12,3	15,7	19,8	24,9	31,0	38,3	47,1	57,4	69,6	83,7

Temperatursænkning ved fordampning

For en given mængde dråber/flydende vand kan det beregnes, hvilken energi der skal anvendes til at fordampe vandet. Hvis ΔQ kg vand fordamper, skal der anvendes en energi på $L \cdot \Delta Q$, hvor L er vands fordampningsvarme på $2,5 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$. Hvis fordampningsvarmen alene tages fra 1 m^3 dampmættet røggas (våd luft) ved en temperatursænkning, ΔT , vil energien ændres med:

$$\begin{aligned}
 & C_p \cdot (1 - \text{vol\%/100\%}) \cdot \rho(T) \cdot \Delta T + C_{p_d} \cdot \text{Vol\%/100\%} \cdot \rho_d(T) \cdot \Delta T \\
 &= C_p \cdot \rho(T) \cdot ((1 - \text{vol\%/100\%}) + C_{p_d} / C_p \cdot \text{Vol\%/100\%} \cdot M_d / M) \cdot \Delta T \\
 &= C_p \cdot \rho(T) \cdot (1 + 0.154 \cdot \text{Vol\%/100\%}) \cdot \Delta T \\
 &= C_p \cdot P / (R \cdot T) \cdot (1 + 0.154 \cdot \text{Vol\%/100\%}) \cdot \Delta T \\
 &= 3,55 \cdot 10^5 \cdot (1 + 0.154 \cdot \text{Vol\%/100\%}) \cdot \Delta T / T,
 \end{aligned}$$

hvor $Vol\%$ er volumen af vanddamp i procent af den mættede luft (Tabel 1), C_p og $C_{p,d}$ er den specifikke varmekapacitet for luft og vanddamp på henholdsvis 1005 og 1864 J kg⁻¹ K⁻¹, $\rho(T)$ og $\rho_d(T)$ er lufts og vanddamps massefylde ved en temperatur, T (K), M og M_d er molvægt for luft og vanddamp på henholdsvis 28,966 og 18,016, R er gaskonstanten for luft på 287 J kg⁻¹ K⁻¹ og P er trykket, som er antaget til 1 atmosfære (1,013 10⁵ Pa). Den krævede energi vil svare til en teoretisk temperatursænkning på:

$$\begin{aligned}\Delta T &= \Delta Q \cdot L \cdot T / (3,55 \cdot 10^5 \cdot (1 + 0.154 \cdot Vol\%/100\%)) \\ &= 7,047 / (1 + 0.154 \cdot Vol\%/100\%) \cdot T \cdot \Delta Q\end{aligned}\quad (1)$$

I praksis vil vanddråberne gradvist fordampe i takt med at den omgivende tørrere luft indblandes. Men den temperatur røgfanen vil have, når alle dråber er fordampet, vil være lig med den temperatur en tilsvarende røgfane uden dråber vil have, hvis røggastemperaturen i skorstenstoppen havde haft den teoretiske temperatursænkning, ΔT .

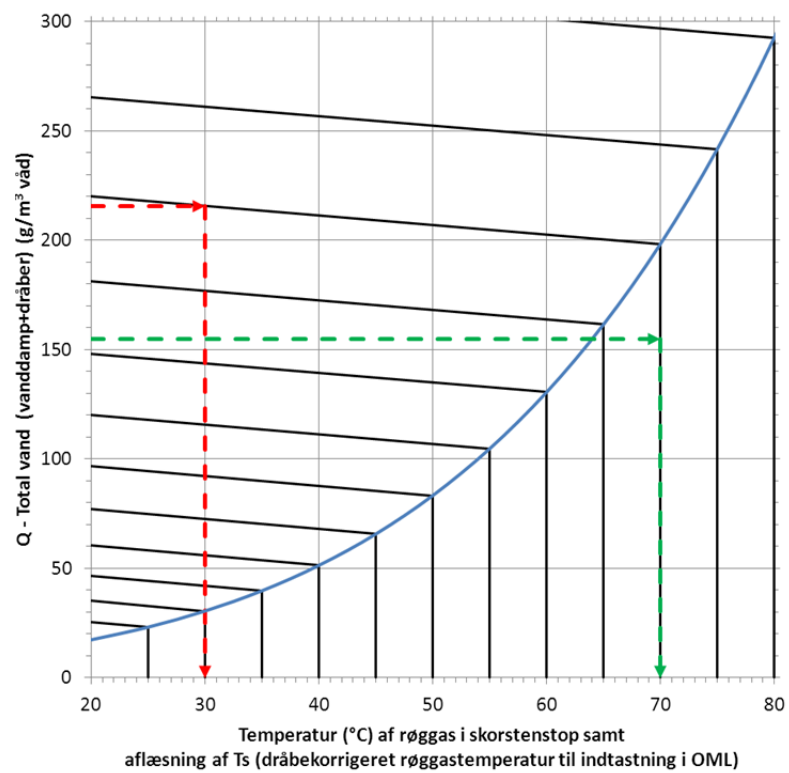
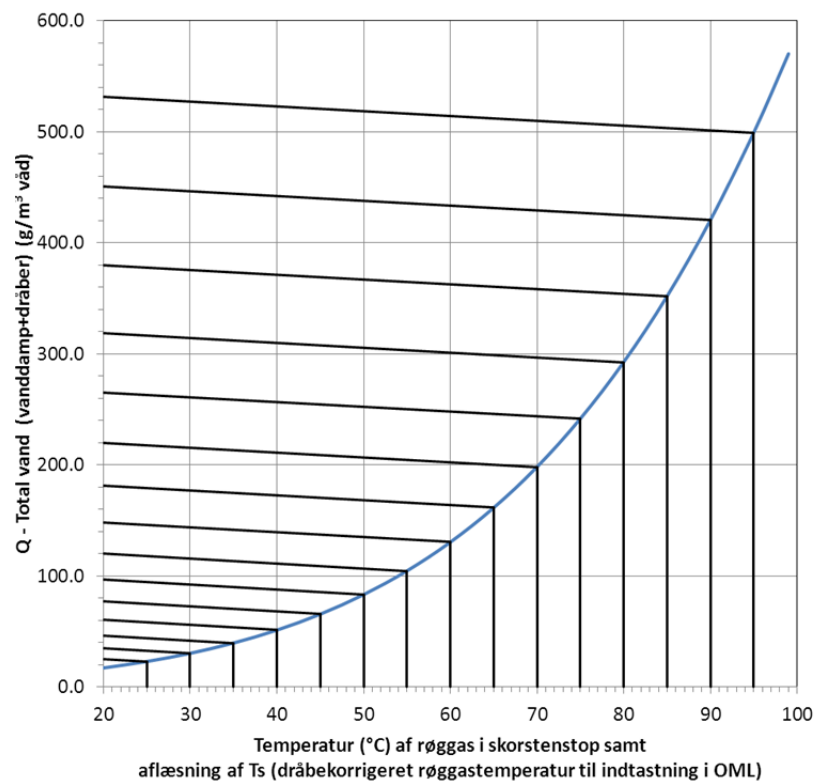
Hvis temperaturen, T , af røggasen i toppen af skorstenen sænkes til den teoretiske temperatur, $T_s = T - \Delta T$, og den er over omgivelsernes temperatur, så vil der kunne foretages en OML-beregning med den teoretiske temperatur. Denne sænkede temperatur T_s betegnes herefter som den *dråbekorrigerede røggastemperatur*.

I praksis skal $T_s \geq 20\text{ °C} = T_{s,min}$ for at modelberegninger med OML kan anvendes i sommerperioden, hvilket forudsættes i det følgende.

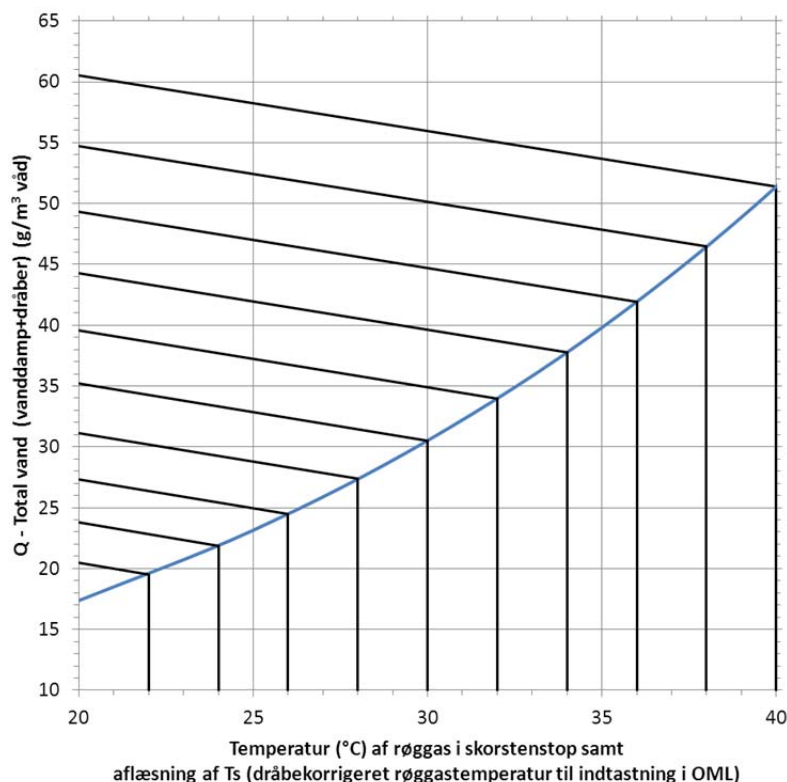
Hvorvidt vandindholdet (totalvand = damp + dråber) er tilstrækkeligt lavt til, at man kan anvende OML, kan man aflæse i Figur 4 ved hjælp af de 'knækkede' temperaturkurver, således som forklaret i det følgende. De 'knækkede' kurver er de fuldt optrukne sorte kurver med et forløb noget nær en ret vinkel. Kurverne relaterer til forskellige målte temperaturer i skorstenstoppen, og temperaturerne er angivet der, hvor kurverne skærer x-aksen. Alle knæk-kurver forudsætter, at den dråbekorrigerede røggastemperatur, T_s , ikke må blive mindre end 20 °C. Det skal bemærkes, at enheden "m³ våd" skal fortolkes som det fysiske volumen (sum af tør luft og vanddamp). Det indebærer, at eventuelle dråber ikke indgår med deres dampvolumen i volumenenheden i figuren.

T_s til brug ved en OML-beregning bestemmes for et givet målt vandindhold, Q , og en given målt temperatur i skorstenstoppen, T , ved først at finde Q -værdien på y-aksen, og derefter følge en linje parallelt med x-aksen ind i grafen til skæring med knæk-kurven for T (T -kurven); herfra følges en 'lodret' linje parallel med y-aksen ned til x-aksen, hvor den dråbekorrigerede røggastemperatur, T_s , aflæses. Hvis T -kurven for den målte temperatur ikke skæres, er vandindholdet, Q , for stort til OML-beregning.

Figur 4 (nederst) viser to eksempler på vandindhold på 216 og 155 g/m³ (våd) begge ved en røggastemperatur på 70 °C. For 216 g/m³ (våd) skæres 70 °C-kurven ved den dråbekorrigerede temperatur 30 °C, som er temperaturen, der skal anvendes i OML (stiplet rød pil).



Figur 4 (fortsættes på næste side)



Figur 4. Relationer mellem totalt vandindhold i røggassen, temperaturen i skorstenstoppen og T_s (dråbekorrigeret røggastemperatur). De to sidste figurer er et udsnit af den øverste. Den blå kurve viser det maksimale indhold af vanddamp (gram/m^3 våd). De sorte 'knækkede' temperaturkurver viser relationer mellem vandindhold, røggastemperatur (under den blå kurve) og dråbekorrigeret røggastemperatur (over den blå kurve). Se teksten for forklaring på eksemplerne vist med de stiplede røde og grønne pile.

NB! " m^3 våd" er det fysiske volumen, dvs. dråber er ikke omsat til dampvolumen.

For $155 \text{ g}/\text{m}^3$ (våd) skæres 70°C -kurven under den blå mætningskurve, og den dråbekorrigerede temperatur er derfor lig den faktiske temperatur på 70°C (stiplet grøn pil), som skal anvendes i OML. Havde vandindholdet være over $220 \text{ g}/\text{m}^3$ (våd), fx $225 \text{ g}/\text{m}^3$ (våd), vil en vandret linje ikke skære 70°C -kurven, og dermed er vandindholdet for stort til at kunne anvende OML med en dråbekorrigeret røggastemperatur.

I Bilag 1 er vist figurer svarende til de to øverste i Figur 4, men med vandindholdet angivet i andre enheder for volumen.

Bilag 2 viser betingelserne for, hvornår OML-modellen kan benyttes. Bilaget viser kurver for det maksimale mulige vandoverskud i røggassen under forudsætning af, at der stadig kan foretages OML-beregninger med den mindste anvendelige dråbekorrigerede røggastemperatur, T_s , på 20°C .

Vandindhold og afkøling i skorsten

Vandindholdet anvendt i Figur 4 gælder for forholdene i toppen af skorstenen. Hvis vandindholdet, Q_f (g/m^3 våd), kun kendes ved skorstenens fod ved temperaturen T_f (K), og der sker en afkøling af røggassen i toppen af skorstenen til temperaturen, T (K), vil der ske en ændring af volumenet, og dermed vil Q være forskellig fra Q_f . Omregningen til vandindhold i skorstenstoppen foretages ved:

$$Q = Q_f \cdot T/T_f.$$

Volumenstrøm i OML og dråbekorrigeret røggastemperatur

Når der foretages OML-beregning med dråbekorrigeret røggastemperatur, T_s , har det (udover det tilsigtede mindre termiske løft) en indflydelse på modellens interne beregninger af røggashastigheden, som påvirker røgfanens mekaniske (momentum) løft. Derfor bør den røggasmængde (volumenstrøm), der indtastes i OML, angives i normale kubikmeter (Nm^3), hvorved beregningerne bliver en smule konservativ (på den sikre side), idet modellens røggashastighed bliver lidt mindre. Dermed bliver det mekaniske løft mindre, og der kan eventuelt blive lidt større skorstensnedsug end det faktiske. Hvis volumenstrømmen derimod angives i m^3 bestemt ved røggassens faktiske temperatur vil man opnå korrekt røggashastighed, men for stor masse (vægt), og det mekaniske løft vil blive beregnet for stort, og dermed bliver koncentrationerne i omgivelserne beregnet for lavt.

4. Litteratur

Briggs, G.A., 1984: Plume rise and buoyancy effects. I: Atmospheric Science and Power Production (D.Randerson, Ed.), Chapter 8. DOE/TIC-27601, DE84005177. U.S. Dept. of Energy Office of Sci. and Tech. Information, Springfield, VA, p. 327-366.

EN 14790, 2005: Stationary source emissions - Determination of the water vapour in ducts.

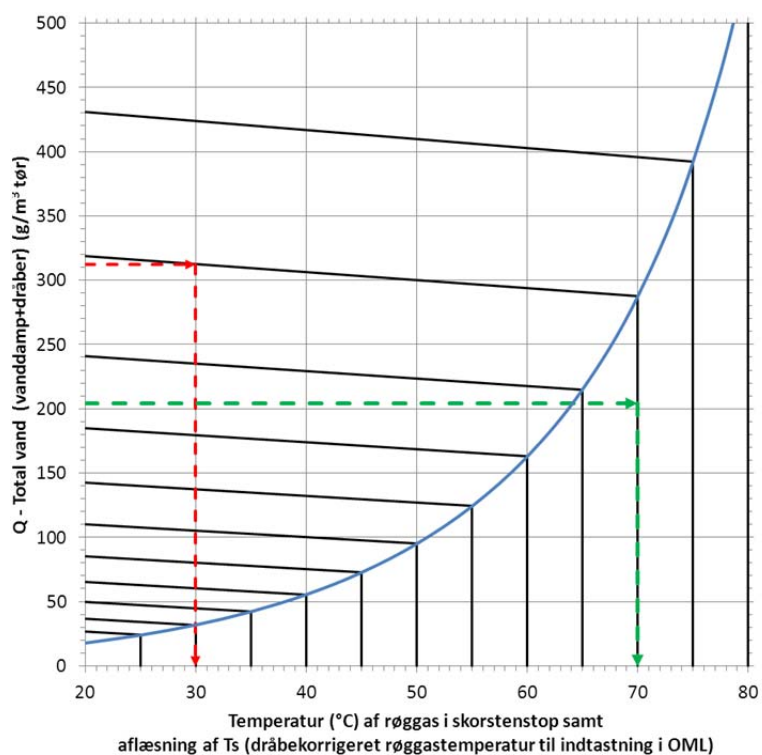
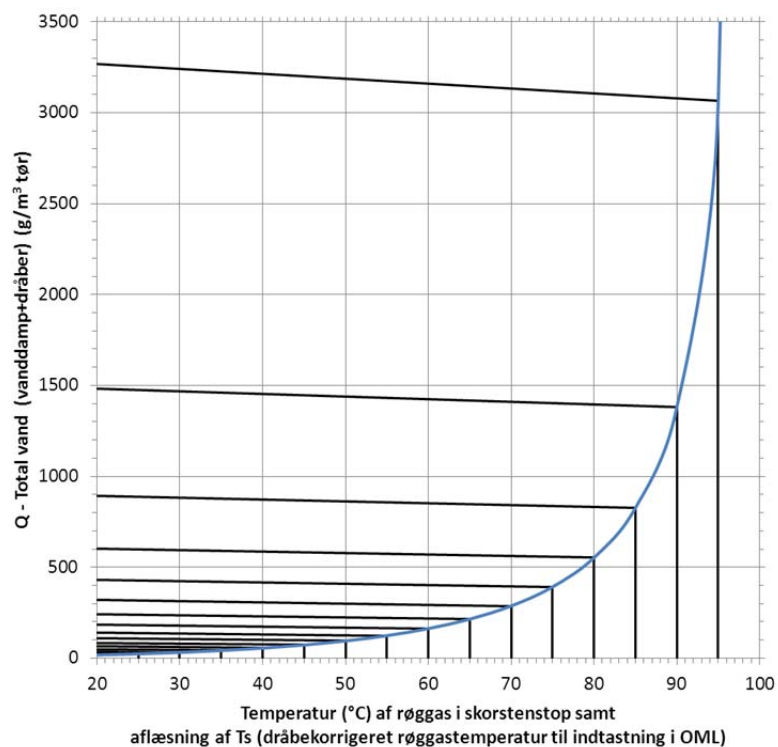
Bilag 1.

Enheder for volumen

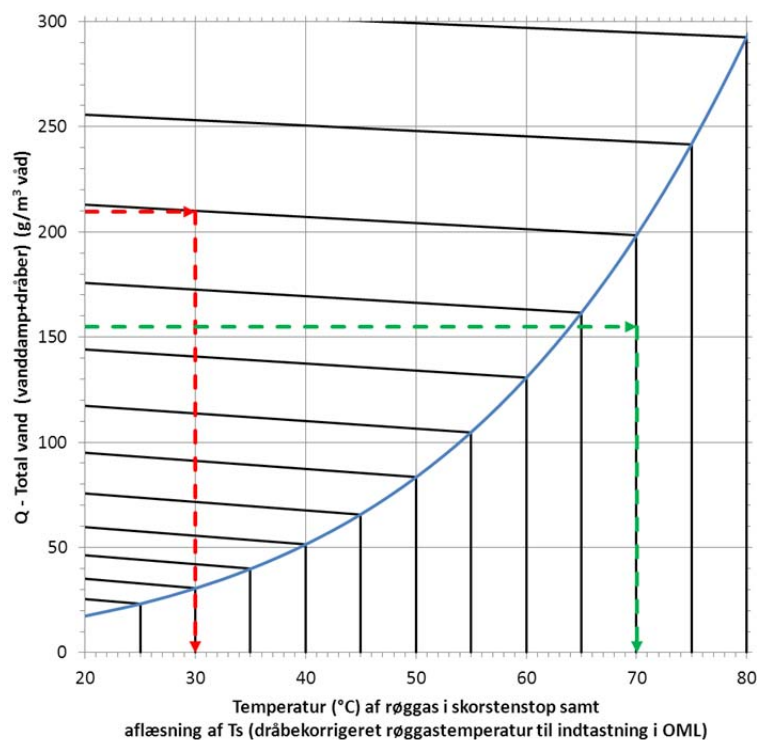
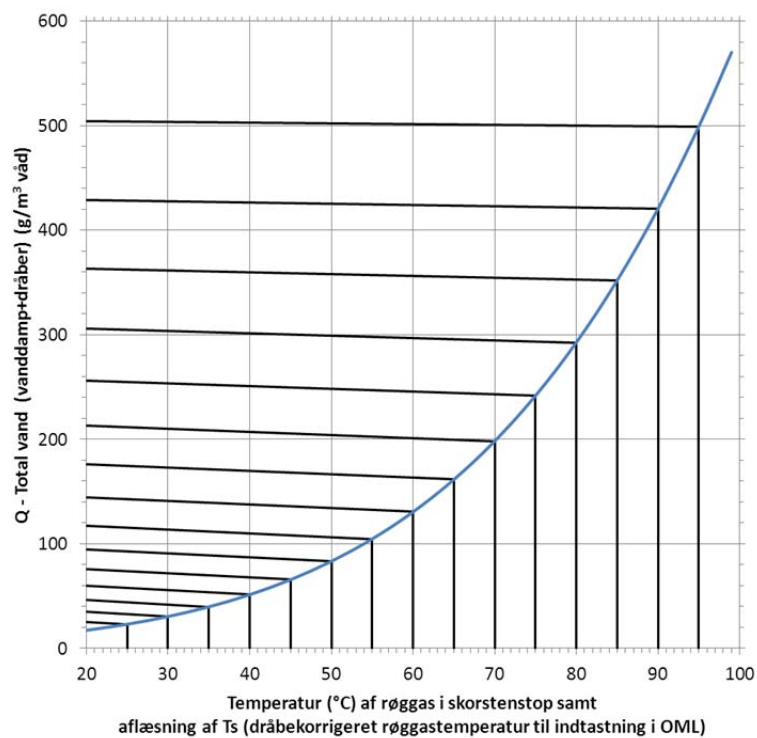
I notatet og Figur 4 er anvendt enheden g/m^3 (våd). Her er volumen det fysiske volumen, som er en blanding af luft og vanddamp. Men der kan også anvendes andre enheder for volumen. Nedenfor er Figur 4 vist med anvendelse af 3 andre almindeligt anvendte enheder for volumen.

De 3 enheder er " m^3 tør luft", " m^3 våd luft", hvor dråberne er omregnet til volumen vanddamp samt % volumen. Den første enhed er ikke fysisk, idet vanddampvolumen ikke indgår. De to sidste enheder er heller ikke fysiske ved overmætning, idet dråberne indgår med deres dampvolumen.

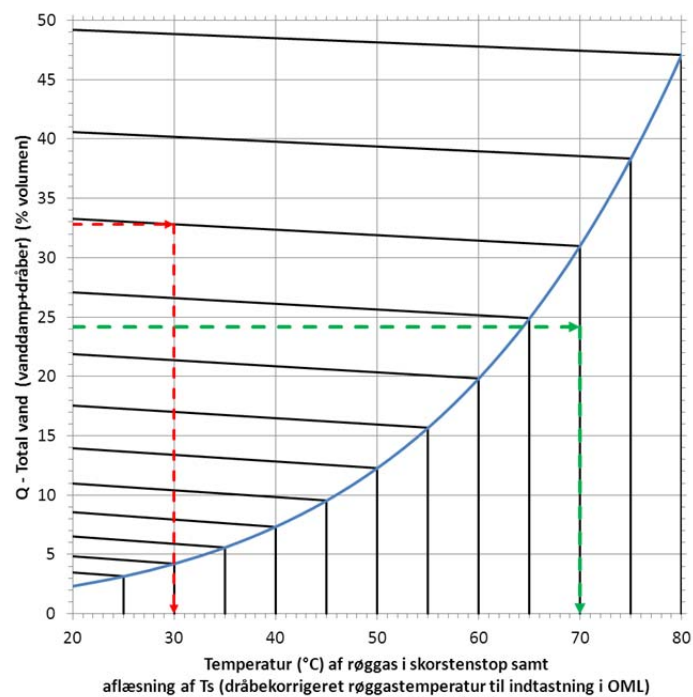
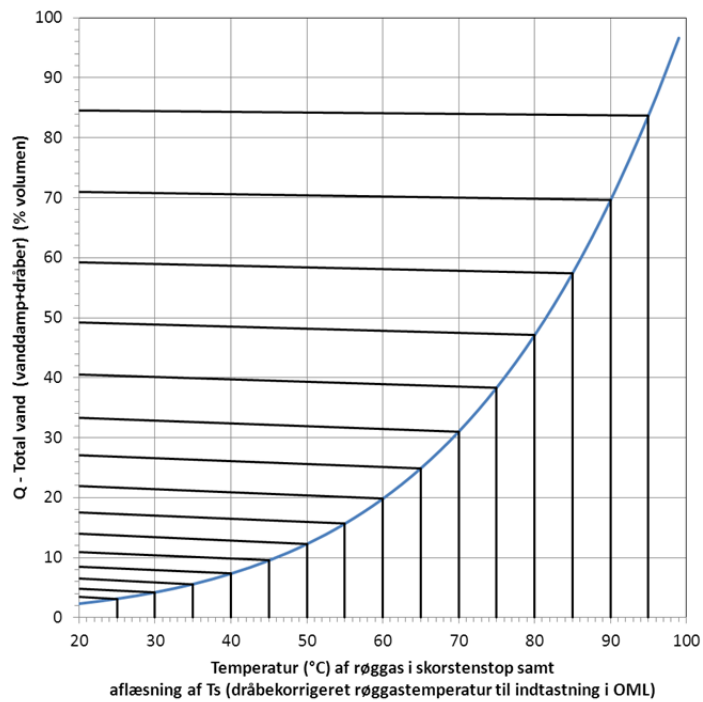
For yderligere forklaring se Kap. 3.



Figur A1. Relationer mellem total vandindhold i røggassen, temperaturen i skorstenstoppen og T_s (dråbekorrigeret røggastemperatur). Den nederste figur er et udsnit af den øverste. Den blå kurve viser det maksimale indhold af vanddamp pr. m^3 **tør røggas**. De sorte 'knækkede' temperaturkurver viser relationer mellem vandindhold, røggastemperatur (under den blå kurve) og T_s (over den blå kurve). De stiplede røde og grønne pile er to eksempler med vandindhold på 313 og 205 g/m^3 (tør) begge ved en røggastemperatur på 70 $^{\circ}\text{C}$, hvilket medfører T_s på 30 respektive 70 $^{\circ}\text{C}$ (svarer til figur 4).



Figur A2. Relationer mellem totalt vandindhold i røggassen, temperaturen i skorstenstoppen og T_s (dråbekorrigeret røggastemperatur). Den nederste figur er et udsnit af den øverste. Den blå kurve viser det maksimale indhold af vanddamp pr. m^3 våd røggas (hvor eventuelle dråber indgår med deres dampvolumen). De sorte 'knækkede' temperaturkurver viser relationer mellem vandindhold, røggastemperatur (under den blå kurve) og T_s (over den blå kurve). De stiplede røde og grønne pile er to eksempler med vandindhold på 210 og 155 g/m^3 begge ved en røggastemperatur på 70 °C, hvilket medfører T_s på 30 respektive 70 °C (svarer til figur 4).



Figur A3. Relationer mellem totalt vandindhold i røggassen, temperaturen i skorstenstoppen og Ts (dråbekorrigeret røggastemperatur). Den nederste figur er et udsnit af den øverste. Den blå kurve viser det maksimale indhold af vanddamp i % volumen af fugtig røggas (hvor eventuelle dråber indgår med deres dampvolumen). De sorte 'knækkede' temperaturkurver viser relationer mellem vandindhold, røggastemperatur (under den blå kurve) og Ts (over den blå kurve). De stiplede røde og grønne pile er to eksempler med vandindhold på 32,83 og 24,23 % volumen begge ved en røggastemperatur på 70 °C, hvilket medfører Ts på 30 respektive 70 °C (svarer til figur 4).

Bilag 2.

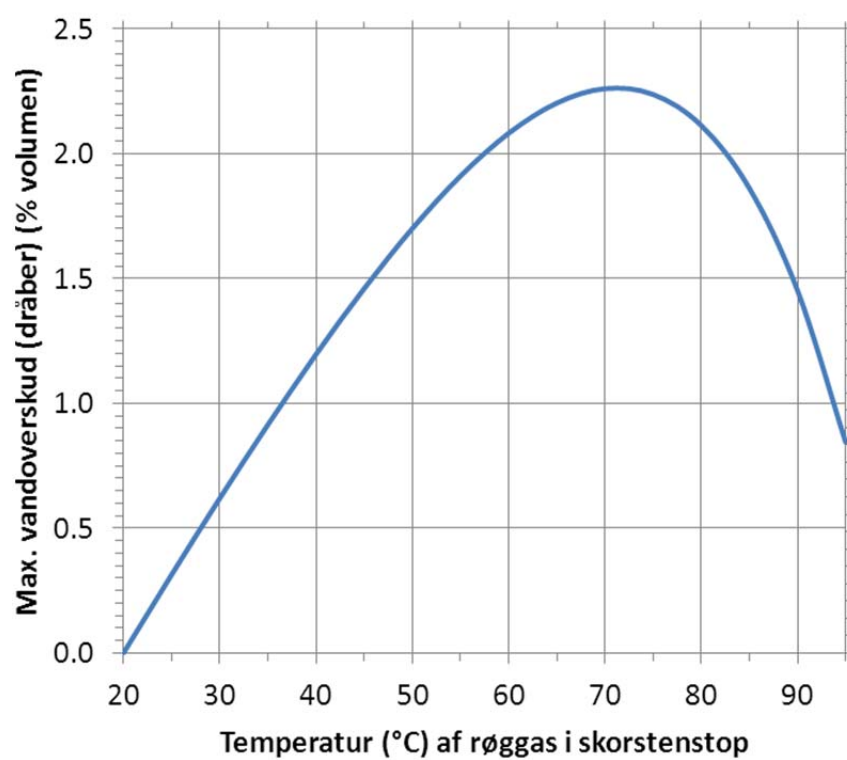
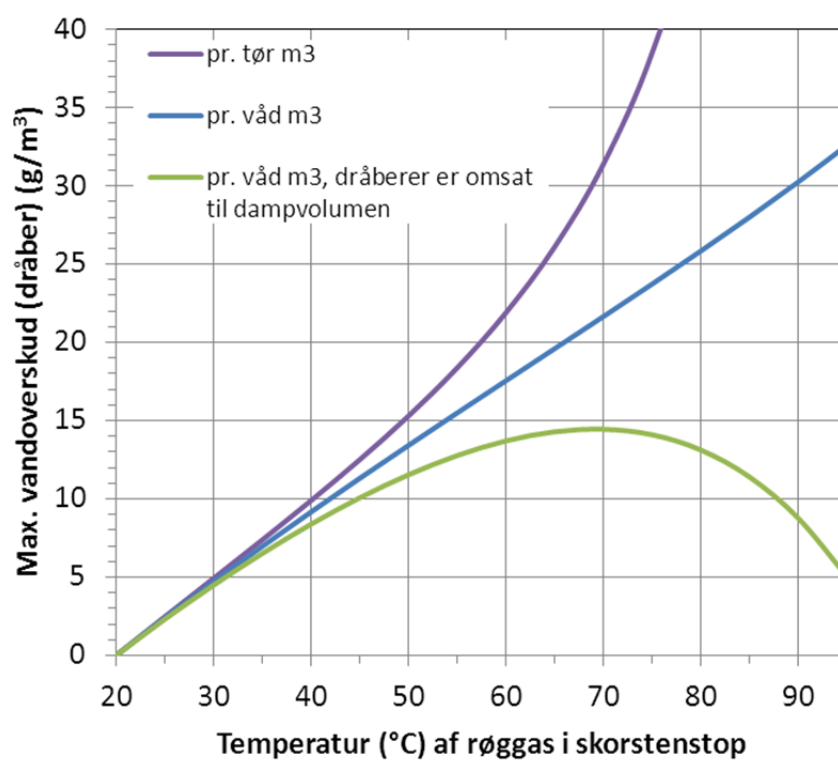
Maksimalt vandoverskud ved OML-anvendelse

Der kan fastlægges et kriterium for det maksimale vandoverskud (dråbemængde) ΔQ_{max} , i røggassen, hvorunder OML-modellen kan anvendes med en mindste tilladte dråbekorrigerede røggastemperatur, T_{smin} , på 20 °C. Det maksimale vandoverskud (g/m³ våd) ved forskellige temperaturer i skorstenstoppen kan beregnes ud fra formel (1):

$$\Delta Q_{max} = 0,1419 \cdot (1 + 0,154 \cdot Vol\%/100\%) \cdot (T - 293,15) / T$$

Det maksimale vandoverskud er vist i Figur A4, sammen med andre enheder for volumen. En beskrivelse af de andre enheder findes i Bilag 1.

Det maksimale vandoverskud kan også findes ud fra Figur 4. Ved en røggastemperatur på for eksempel 70 °C er vandindholdet ved mætning 198 g/m³ (våd), hvilket også kan aflæses i Tabel 1, og ved den dråbekorrigerede røggastemperatur på 20 °C er indholdet 220 g/m³ (våd). Dermed er den maksimale mængde overskydende vand (dråber) 22 g/m³ (våd), hvilket også kan aflæses af den blå kurve i øverste figur A4.



Figur A4. Det maksimale tilladte vandoverskud (dråbemængde) ved forskellige temperaturer i skorstenstoppen, hvis OML-beregninger skal kunne anvendes med den mindste værdi for dråbekorrigeret røggastemperatur på 20 °C. Kurverne afhænger af den anvendte enhed for volumen.