



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R54:1973

TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND
SEKTIONEN FOR VÄG- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET

Stoftbildning vid olje- eldningsanläggningar

Folke Peterson & Kurt Skoog

Byggforskningen

Stoftbildning vid oljeeldningsanläggningar

Folke Peterson & Kurt Skoog

Med ekonomiskt stöd från Statens råd för byggnadsforskning har en serie mätningar av stoftbildningen från olika eldningsoljor genomförts. Mätningarna har utförts i stora och medelstora värmecentraler och vid drift med olika brännartyper. Syftet med undersökningarna har varit att närmare studera stoftemissionen från de olika oljorna under varierande betingelser, men i samband med provningarna har även en rad viktiga iakttagelser beträffande mätförfarande gjorts. Ett förslag till provningsmetodik för bestämning av oljors stoftbildning har framlagts. Vidare diskuteras olika möjligheter att minska stoftbildningen vid oljeeldning.

Oljekvalitetens inverkan på stoftbildningar har visat sig vara av vida större betydelse än vad som tidigare varit känt. I FIG. 1 visas resultat från drift med tre olika oljor under identiska förhållanden. Mätningarna har utförts vid en mindre anläggning. Samtliga oljor faller under samma SIS-standard (eldningsolja EO 4) men de uppvisar sinsemellan helt olika stoftbildning. Kvoten mellan sämsta och bästa oljans stoftbildning är så hög som 30! I rapporten redovisas liknande resultat både från andra fältanläggningar och från laboratorieundersökningar.

Brännarens förstoftningsegenskaper inverkar även, om än i mindre grad. Skillnaden mellan olika brännare är knappast större än att den möjliggör en sänkning av stoftbildningen med en faktor 2 å 3 vilket skall jämföras med ovan

angivna värden för skillnaden mellan olika oljor. I FIG. 2 visas försöksresultat med en och samma olja i olika brännare men i övrigt under lika betingelser. Det bör påpekas att olika brännare synes ge större skillnader än de här nämnda vid drift utanför det normalt avsedda belastningsområdet.

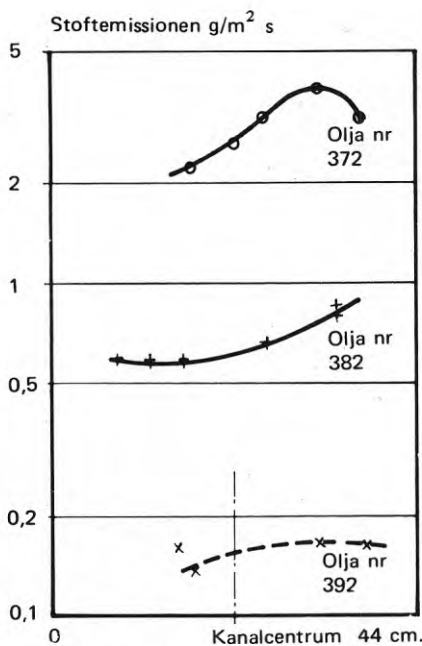


FIG. 1. Stoftbildningen från tre olika oljor fallande inom klass EO 4. Som framgår av bilden kan stoftbildningstendensen för olika oljor variera inom vida gränser.

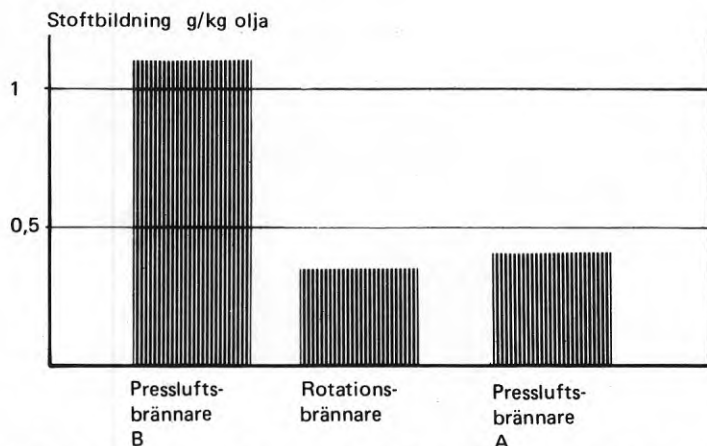


FIG. 2. Stoftbildning från en olja (EO 4) vid drift i tre olika brännare. Olja 411, CO₂ = 10 %, lådpanna märkeffekt 3,5 MW (3000 Mcal/h), oljeflöde = 250 l/h.

Byggnadsforskningen Sammanfattningar

R54:1973

Nyckelord:

oljeeldning, oljekvalitet, brännartyper, stoftemission, provningsmetodik

Rapport R54:1973 avser anslag D 585 från Statens råd för byggnadsforskning till tekn. dr Folke Peterson, institutionen för uppvärmnings- och ventilationsteknik, KTH, Stockholm.

UDK 662.75
628.511:697:32
SfB A
ISBN 91-540-2180-4

Sammanfattning av:

Peterson, F & Skoog, K, 1973, *Stoftbildning vid oljeeldningsanläggningar*. (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Rapport R54:1973, 222 s., ill. 33 kr.

Rapporten är skriven på svenska med svensk och engelsk sammanfattning.

Distribution:

Svensk Byggtjänst
Box 1403, 111 84 Stockholm
Telefon 08-24 28 60

Grupp: installation

Belastningens inverkan, se FIG. 3, vid en bestämd panna-brännare-kombination har i allmänhet visat sig följa en exponentialfunktion. Detta innebär att stoftbildningen, S g/kg olja, kan approximeras med $S = S_0 \exp(P - P_0)$ där P är den aktuella effekten, P_0 pannans märkeffekt och S_0 stoftbildningen vid märkeffekten. För stoftemissionen, E , som kan skrivas $E = \text{konst} \cdot S \cdot P$, blir därmed $E = \text{konst} \cdot P \cdot S_0 \exp(P - P_0)$.

Inverkan av lufttillförsehn har även undersökts, varvid det visat sig att stoftbildningen för en given panna-brännare-kombination får ett minimum för ett luftöverskott av 30 à 40 %, se

FIG. 4.

Undersökningen har omfattat oljor från samtliga större oljebolag, vilka i vissa fall bidragit med bestämning av oljornas sammansättning och egenskaper.

De genom sådana analyser erhållna resultaten pekar på att oljor med höga halter av högmolekylära föreningar ger väsentligt högre stoftbildning än andra. Ett samband mellan oljornas asfaltenhalt och deras stoftbildningstendens har även angivits.

Möjligheterna till en minskning av stoftbildningen vid oljeeldning har diskuterats, och sammanfattningsvis

kan fyra vägar till en förbättring anvisas:

- Förbättrade oljebrännare, varvid bl.a. mindre droppstorlekar är ett primärt krav.
- Förbättrad sampassning mellan panna och brännare, varvid flamform och kastlängder är av största betydelse.
- Förändring av oljornas sammansättning.
- Hänsyn till kundens möjlighet att handha och förbränna olja med kritiska egenskaper på ett tillfredsställande sätt.

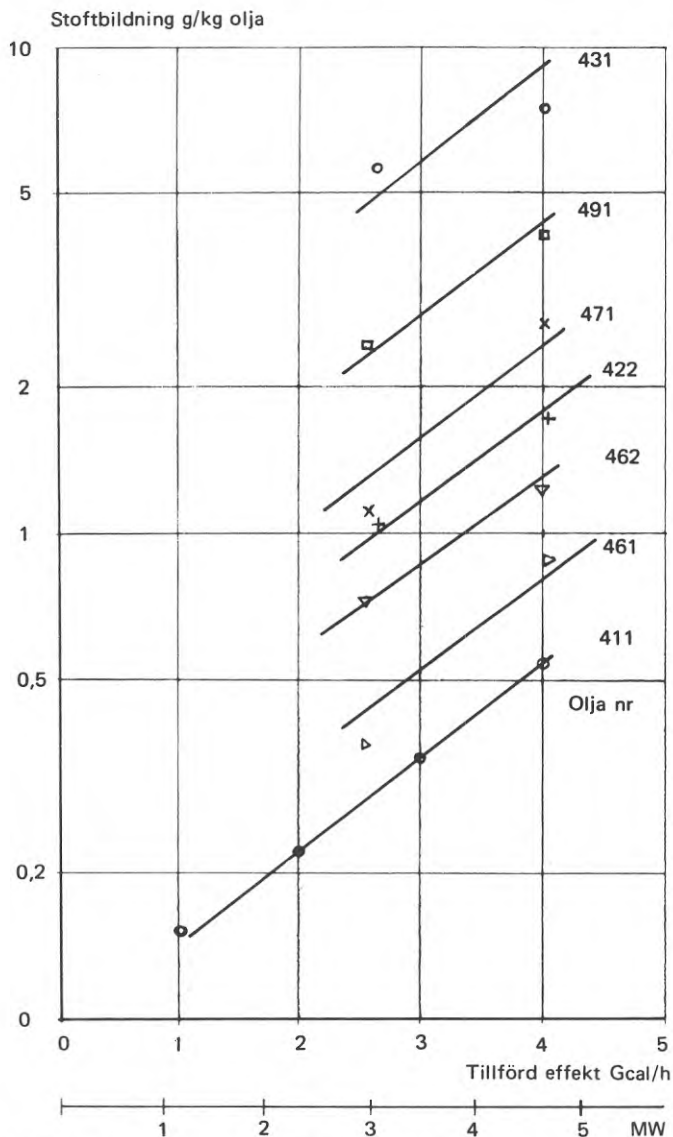


FIG. 3. Stoftbildningen som funktion av tillförd effekt (oljaflöde) vid en anläggning. Pannans märkeffekt 4 MW (3500 Mcal/h).

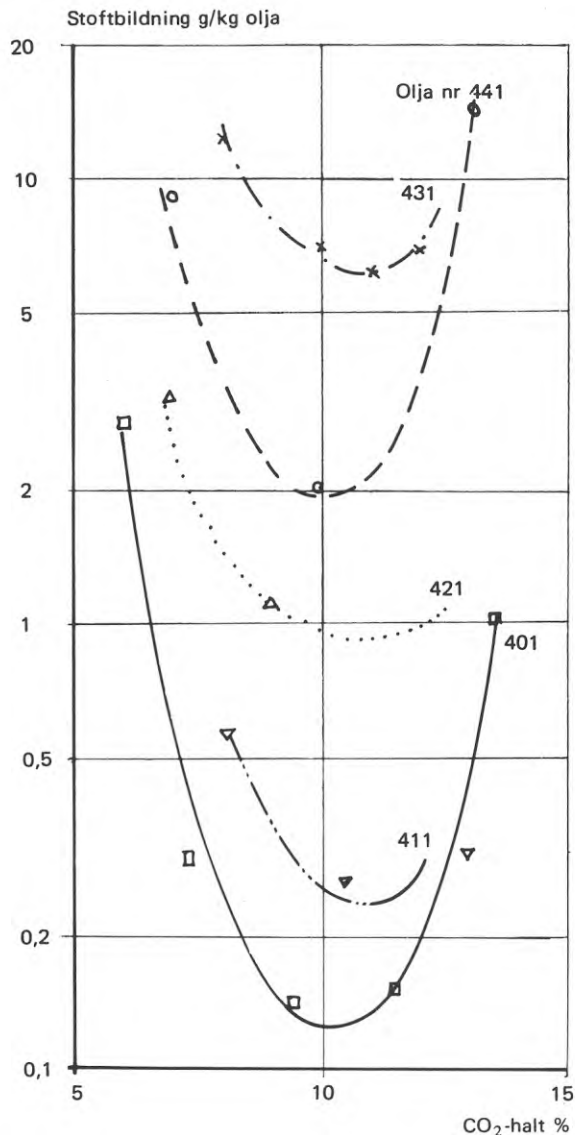


FIG. 4. Stoftbildningen uppvisar vanligen ett minsta värde vid ett luftöverskott av ca 40 % motsvarande en CO_2 -halt av omkring 11 %.

Formation of solid matter in oil-fired plants

Folke Peterson & Kurt Skoog

With financial support from the Swedish Council for Building Research, a series of measurements have been carried out to determine the quantities of dust formed from various fuel oils. These measurements have been performed in large and medium-sized boilers operating with different types of burners. The object of the studies has been to examine in detail the dust emission from the different oils under variable conditions, but a number of important observations have also been made during tests concerning the measurement procedure. A proposal has been put forward regarding the testing method to be used in determining the dust formation in oils. The various ways of reducing dust formation in oil-fired installations are also discussed.

It has been found that oil quality has a far greater influence on the formation of solid matter than had been thought before. FIG. 1 shows the results of operational tests with three different oils under identical conditions. These measurements were made in a small plant. All the oils conform to the same Swedish Standard (Fuel Oil EO 4) but their dust formation characteristics are quite different, the ratio of the dust formed in the worst oil to that in the best being as much as 30! The report describes similar results from other field tests and also from laboratory tests.

The atomization characteristics of the burner also exert an influence, although this normally is of lesser importance. The difference between burners is only enough to enable dust formation to be cut by a factor of 2-3, which is much less than the effect due to the quality of

the oil. FIG. 2 shows the results of tests on one and the same oil using different burners, conditions being otherwise identical. It must be pointed out that different burners seem to cause greater differences than the ones described in the report when the plant is operating at loads outside the normal range.

Generally speaking, it has been found that the influence of the load for a given

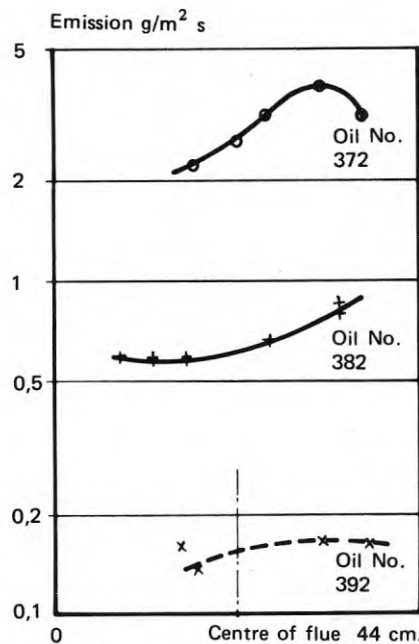


FIG. 1. Quantities of solid matter formed from three oils which come within Class EO 4. As may be seen, the dust formation tendency of different oils may vary within broad limits.

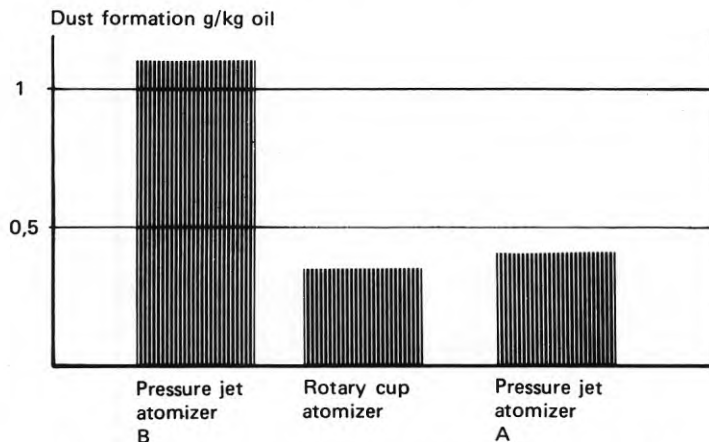


FIG. 2. Quantities of dust formed from an oil (EO 4) when atomized in three different burners. Oil 411; CO₂ = 10 %; Packaged boiler, rated output 3.5 MW (3000 Mcal/h); Oil supply 250 l/h.

National Swedish Building Research Summaries

R54:1973

Key words:

oil-fired plants, oil quality, type of burner, dust emission, test method

Report R54:1973 refers to Grant D 585 from the Swedish Council for Building Research to Dr. Folke Peterson, Dept. for Heating and Ventilating, The Royal Institute of Technology, Stockholm.

UDC 662.75
628.511:697.32
SfB A
ISBN 91-540-2180-4

Summary of:

Peterson, F & Skoog, K, 1973. *Stoftbildning vid oljeeldningsanläggningar*. Formation of solid matter in oil-fired plants. (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Report R54:1973, 222 p., ill. 33 Sw. Kr.

The report is in Swedish with Swedish and English summaries.

Distribution:

Svensk Byggtjänst
Box 1403, S-111 84 Stockholm
Sweden

boiler-burner combination is in the form of an exponential function. See FIG. 3. This means that the quantity of dust formed, S g/kg of oil, may be *approximately* expressed by $S = S_0 \exp(P - P_0)$, where P is the actual output, P_0 the rated output of the boiler, and S_0 the quantity of dust formed at the rated output. The expression for dust emission E , which may be written as $E = \text{constant} \cdot S \cdot P$, therefore becomes $E = \text{constant} \cdot P \cdot S_0 \exp(P - P_0)$.

The influence of *air supply* has also been studied, and it has been found that dust formation for a given boiler-burner combination has a minimum value when

there is 30–40 % excess air. See FIG. 4.

The investigation has comprised oils from all the major oil companies which have in some cases assisted in determining the compositions and properties of the oils. The results obtained by means of such analyses indicate that oils which contain large proportions of compounds of high molecular weight produce considerably larger quantities of cenospheres than others. An empirical relationship between the asphalt content of the oils and their tendency to form dust is also given.

The ways in which the formation of solid matter may be reduced have also

been discussed, and it is suggested that an improvement can be accomplished by the following four methods:

- Improvement of atomizers, smaller droplets being one of the primary requirements.
- Improved fit between boiler and burner, in which connection the shape and throw of the flame are of the greatest importance.
- Changes in oil composition.
- Consideration of the facilities which the customer has for handling and burning oil of critical characteristics in a satisfactory manner.

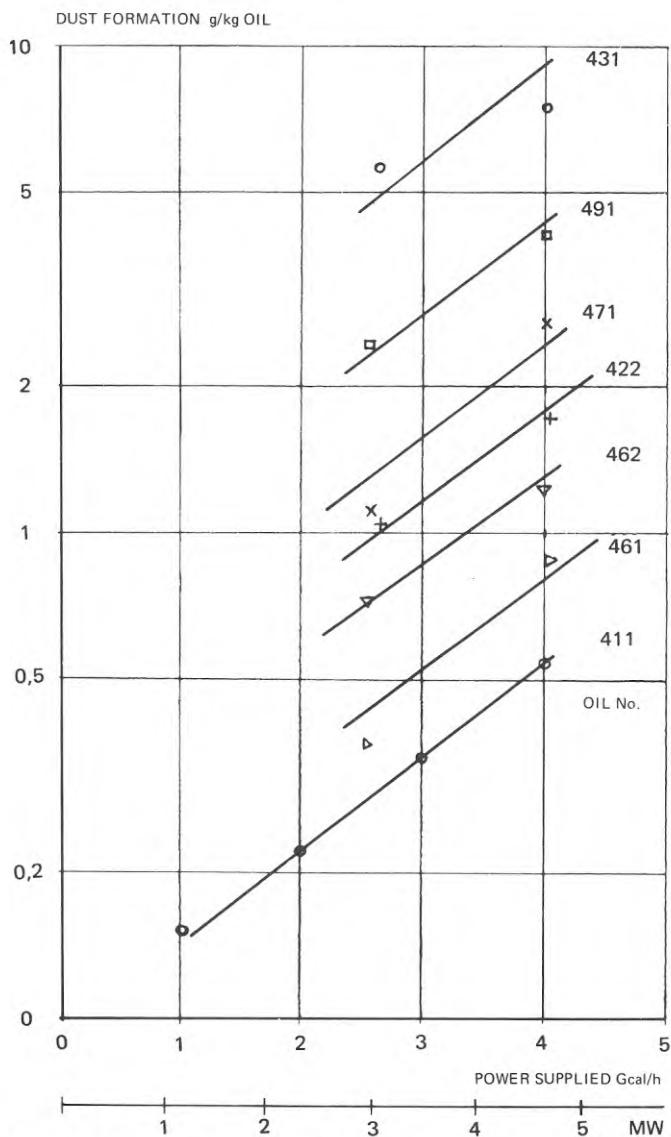


FIG. 3. Quantity of dust formed as a function of the power supplied (oil supply) in a plant. Rated output of boiler 4 MW (3500 Mcal/h).

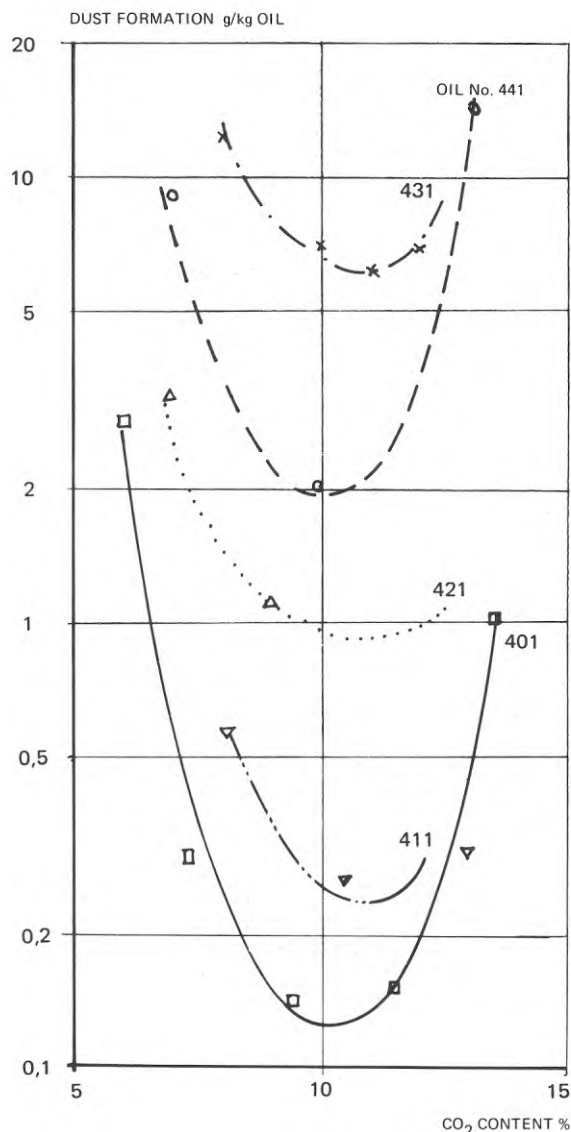


FIG. 4. The quantity of dust formed usually has a minimum value for excess air of approximately 40 %, corresponding to a CO₂ content of about 11 %.

Rapport R54:1973

STOFTBILDNING VID OLJEELDNINGSANLÄGGNINGAR

FORMATION OF SOLID MATTER IN OIL-FIRED PLANTS

av Folke Peterson & Kurt Skoog

Denna rapport hänför sig till anslag D 585 från Statens råd för byggnadsforskning till tekn.dr Folke Peterson, institutionen för uppvärmnings- och ventilationsteknik, KTH, Stockholm. Författare är tekn.dr Folke Peterson och ingenjör Kurt Skoog, Svenska Nu-way AB, Stockholm. Försäljningsintäkterna tillfaller fonden för byggnadsforskning.

Statens institut för byggnadsforskning, Stockholm
ISBN 91-540-2180-4

Rotobekman AB, Stockholm 1973

FÖRORD

Föreliggande arbete avser att belysa de faktorer som påverkar och bestämmer stoftemissionen vid oljeeldningsanläggningar. För att ge en från början oinitierad läsare den nödvändiga bakgrunden har i några avsnitt stoftets egenskaper, droppbildning, förbränningsmekanism och oljebrännarens egenskaper berörts. De läsare vilka är väl förtrogna med dessa egenskaper och företeelser torde utan olägenhet kunna hoppa över avsnitten 1 - 3.

Beträffande nomenklaturen vill vi påpeka att ordet "stoftbildning" i allmänhet då det gäller mätresultat i det följande avser nettobildningen, således i oljeflamman bildat stoft minus det i flammen förbrända stoftet, således ungefär "stoftemissionen". Termen "sotbildning" syftar således på den tekniskt, miljöhygieniskt intressanta delen av det vid förbränningen bildade stoftet.

F Peterson
tl Institutionen
för uppvärmnings-
och ventilatgions-
teknik, KTH, Stock-
holm.

K Skoog
ing Svenska Nu-Way AB
Stockholm

INNEHÅLL

1.	STOFT FRÅN VÄRMECENTRALER	7
1.1	Hygientiska risker	9
1.2	Smutsande effekt	11
1.3	Korrosionseffekt	13
1.4	Myndigheternas krav	13
1.5	Olika oljor - olika stoftbildning	18
1.6	Äldre undersökningar rörande stoftbildning från olika oljor	19
2.	FINFÖRDELNING AV OLJAN	27
2.1	Droppbildning - förbränningstid	27
2.2	Droppbildningsmekanismer	31
2.3	Tryckoljebrännare	33
2.4	Rotationsbrännare	39
2.5	Pressluftbrännare	45
2.6	Sammanfattning	47
3.	STOFTBILDNINGSMEKANISMER	50
3.1	Olika slag av sot	50
4.	LABORATORIEEXPERIMENT	65
4.1	Provuppställning	65
4.2	Experimentpannan	67
4.3	Brännaren vid experimentpannan	69
4.4	Förvärmning, oljedistribution	71
4.5	Avgassystem, mätställen	71
5.	MÄTTEKNIK	75
5.1	Mätmetodik	75
5.2	Stoftfördelning	76
5.3	Val av mätplan	77
5.4	Val av mätpunkter	81
5.5	Isokinetisk provtagning	85
5.6	Provtid	86
5.7	Apparatfel	89
5.8	Sottalsmätning	97
6.	STOFTBILDNING FRÅN OLJEBLANDNINGAR	101
6.1	Stoftbildningen är ej en additiv egenskap	101
6.2	Stoftbildningen från olika oljeblandningar	103
6.3	Undersökningar av blandningar mellan destillatoljor och tjockolja	105
6.4	Undersökning av olika tjockoljeblandningar	107
6.5	Undersökning av specialoljor	109
6.6	Empirisk-matematisk behandling av stoftbildningen för oljeblandningar	113
6.7	Sammanfattning	116

7.	FÄLTMÄTNINGAR	117
7.1	Inledande försök	117
7.2	Mätningar vid central A	123
7.3	Mätningar vid central B	125
7.4	Mätningar vid central C	127
7.5	Mätningar vid central P	130
7.6	Mätningar vid central F	142
7.7	Mätningar vid central S	149
8.	STOFTBILDNING FRÅN LÅGSVAVLIGA OLJOR (LS-OLJOR)	165
8.1	Problem i samband med LS-olja	165
8.2	Försöksresultat	165
8.3	Nya oljekvaliteter	169
8.4	Möjligheten att påverka stoftbildningen	169
8.5	Användningsområde	171
9.	STOFTBILDNING SOM FUNKTION AV DROPPSTORLEK, FÖRBRÄNNINGSRUMMETS STORLEK OCH LUFTÖVERSKOTT	173
9.1	Inverkan av oljetryck vid tryckolja	173
9.2	Atomiseringsluftens tryck vid pressluft- brännare	179
9.3	Inverkan från rotationshastigheten vid rota- tionsbrännare	179
9.4	Inverkan av oljans viskositet	179
9.5	Förbränningskammarens längd	183
9.6	Luftflödets betydelse	193
10.	ANLÄGGNINGSSKÖTSELNS BETYDELSE FÖR STOFT- BILDNINGEN	196
10.1	Minskat primärluftflöde vid pressluftbrännare	196
10.2	Munstycksförslitning	199
10.3	Oljeförvärmning	201
10.4	Luftöverskott	201
11.	FÖRSLAG TILL MÄTMETODIK FÖR BESTÄMNING AV OLJORS STOFTBILDNINGSEGENSKAPER	205
	REFERENSER	207
	CAPTIONS (FIGURTEXTER ÖVERSATTA TILL ENGELSKA)	212

I rapporten har det äldre sortsystemet med Mcal/h, l/h och kg/h använts. Enligt beslut av Sveriges Standardiseringskommission bör numera det internationella SI-systemet användas och motsvarande sorter vara kW, m³/s och kg/s. Följande omräkningsfaktorer gäller ungefärligen.

$$1 \text{ Mcal/h} = 1,16 \text{ kW}$$

$$1 \text{ l/h} = 16,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 16,7 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$1 \text{ kg/h} = 16,7 \times 10^{-3} \text{ kg/s} = 16,7 \text{ g/s}$$

1. STOFT FRÅN VÄRMECENTRALER

Vid förbränningsprocesser där olja eller fasta bränslen används erhåller man förbränningsprodukter, vilka naturligt ej ingår i atmosfärisk luft - "luftföroreningar"- och som följer förbränningsgaserna ut i lufthavet. Föroreningarna kan vara *gasformiga* eller partikulära, *fasta*. Gaserna, främst svaveldioxid, SO_2 , men även kväveoxider, NO och NO_2 , verkar kraftigt förgiftande på såväl djur som växter. Med anledning härav har numera de flesta länder maximerande gränser för de utsläpp - *emissioner* - som tillåts.

För partikelformade föroreningar har även sådana gränser, vilka avser att minska risken för ohälsa i allmänhet, föreslagits. Det stoft man i första hand riktat uppmärksamhet mot är "sot" från värmecentraler och industri. Detta "sot" är sammansatt av rena kolpartiklar, oförbrända kolväten, och mineraliska produkter. De sistnämnda härrör från oljans halt av metaller och består huvudsakligen av metalloxider se tabell 1:1.

TAB 1:1 Sammansättning av några oljeaskor^{a)} i mg/kg bränsle enligt Hansen (1959)

	Ursprungsland			
	Venezuela	Texas	Californien	Mellersta östern
SiO_2	2,3	16,0	27,0	10,3
Fe_2O_3	1,5	43,0	3,6	2,6
$Na_2O + K_2O$	12,4	305,0	6,6	1,5
V_2O_5	63,2	7,0	3,6	6,5
NiO	6,4	13,0	3,1	3,2
Övrigt	13,2	616,0	26,1	5,9

^{a)} Askkan förekommer ej som fasta partiklar i oljan. Den har därför ej någon skadlig inverkan på pumpar eller andra delar i systemet. Här inverkar istället oljans halt av fasta föroreningar vilka ej får förväxlas med "askhalten".

Vi kan konstatera att av de fyra angivna oljorna ger den första den minsta emissionen av mineraliska partiklar, medan texasoljan ger kraftigast emission. Man får dock observera att tabellen ej ger anledning till någon generell bedömning eftersom askhalten

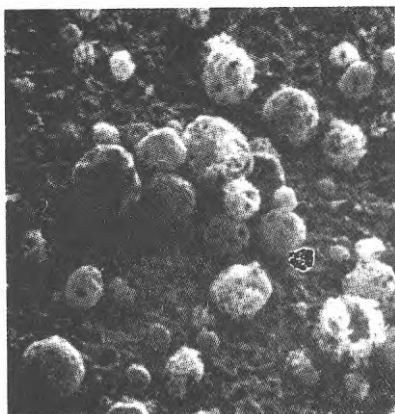


BILD 1:1 Cenosphärer från oljeeldning.

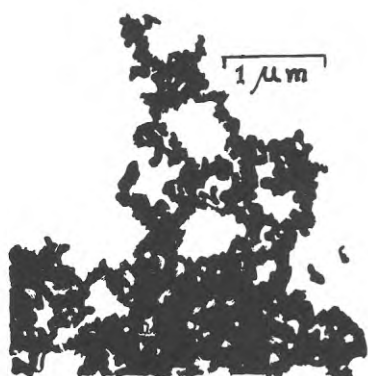


BILD 1:2 Flamsotpartiklar.

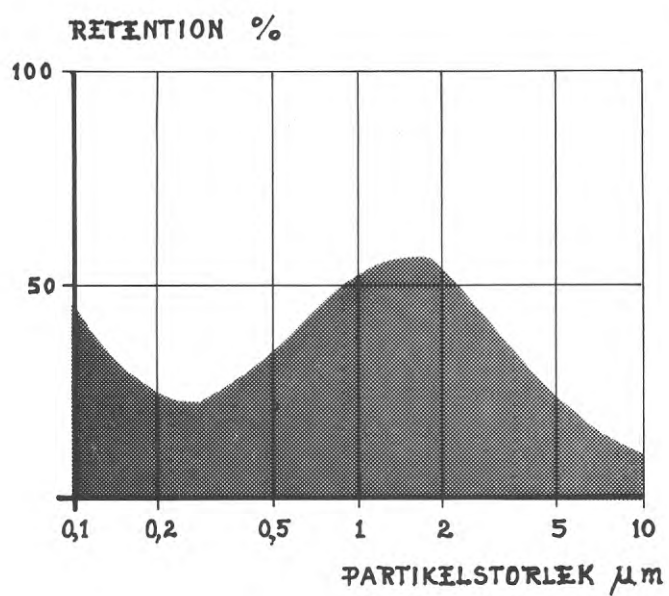


BILD 1:3 Retention av partiklar i alveolerna.

kan variera inom vida gränser och eftersom dessutom stoftet i förbränningsgaserna endast till en ringa del härrör från aska.

1.1 HYGIENISKA RISKER

De oförbrända kolvätena i "sotet" härstammar från oljedroppar, vilka ej hunnit slutförbrännas. De har istället bildat kokskulor med en storlek av 0,02-0,1 millimeter, se bild 1:1. Partiklar av denna storlek spelar en underordnad roll från hygienisk synpunkt eftersom de avskiljs i näsan och övriga övre luftvägar och således knappast tränger ned i lungorna. De kan dock verka irriterande. Dessutom förorsakar de korrosion exempelvis på lacker, varför man i största möjliga mån bör styra förbränningen så att de ej uppstår.

Det tredje slaget av partiklar - kolpartiklarna - har mycket små dimensioner, se bild 1:2 och kan därför tränga ned i lungorna, där de avsätts. Huruvida de avsätts eller ej, beror i hög grad på storleken, se bild 1:3.

Av bilden framgår att partiklar med diametrar mellan 1-2 mikrometer avsätts mycket lätt i lungorna, och man kan i detta intervall räkna med att ca 50-60 % av partiklarna utfälls i alveolerna.

I bild 1:4 visas exempel på partikelfördelningen för några hälsofarliga stoft. Som framgår av bilden faller både sot och flygaska inom det farliga området.

Det kan vara av värde att här också översiktligt studera de hygieniska konsekvenserna av luftens stofthalt. Statens Naturvårdsverk har angivit vissa riktvärden över sambandet mellan stofthalten i inandningsluft och hygien, se tabell 1:2.

TAB 1:2 Hygieniska konsekvenser av luftens stofthalt

Stofthalt i utomhusluft mg/m ³	Hygienisk effekt
25- 50	Bakgrundsnivå
75-100	Tillfredsställande för de flesta människor.
> 100	Överdödlighet (för personer med kroniska luftvägssjukdomar) i kroniska luftvägssjukdomar.

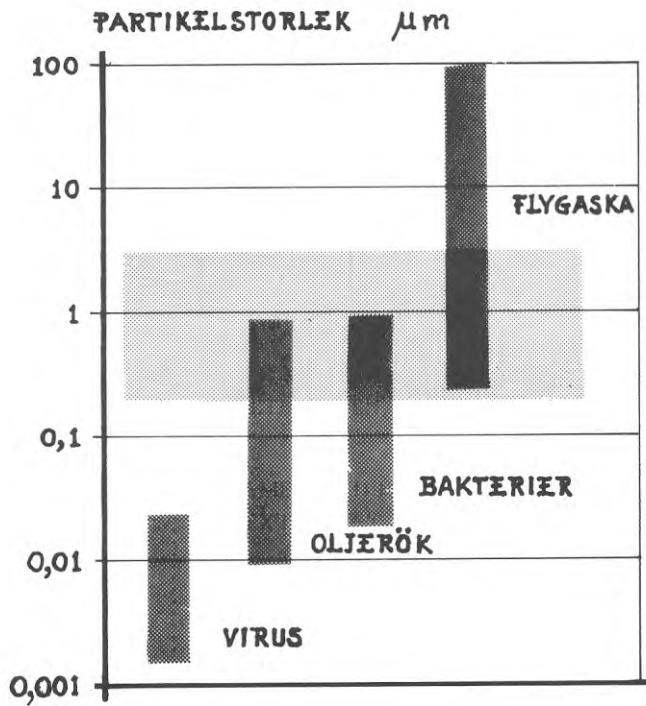


BILD 1:4 Storleksområden för olika stoft. Det markerade centrala området avser partikelstorlekar som i hög grad avsätts i lungan. Inom detta område faller bl a partiklar från värmecentraler.

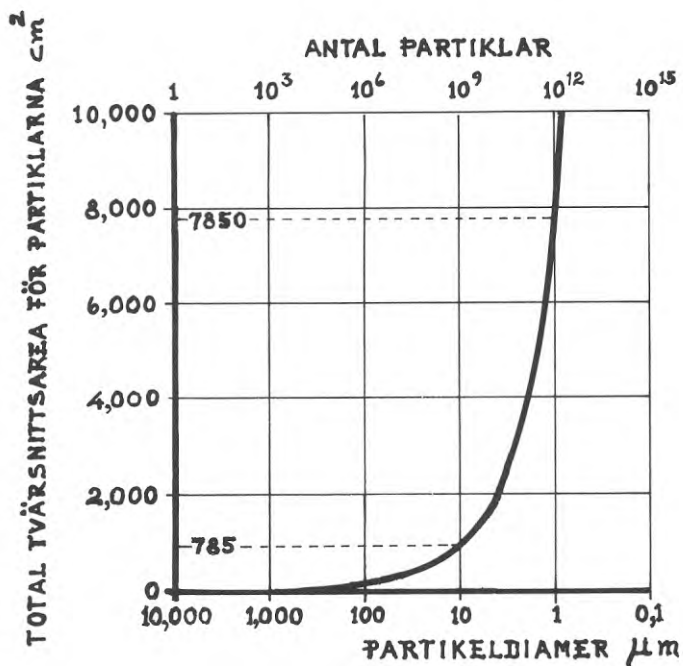


BILD 1:5 Sambandet mellan antal partiklar, partikeldiameter och partiklarnas totala tvärsnittsarea. Partiklarna, som antas vara sfäriska och totalt omfatta 1 g, har densiteten 2 g/cm^3 .

Man får dock ej förledas att tro att enbart partikelhalten har betydelse. Flera faktorer inverkar: *partikelslag, partikelstorlek och interferens med andra ämnen* t.ex. SO_2 i luften.

1.2 SMUTSANDE EFFEKT

Sotpartiklarna har en påtaglig smutsande effekt. Denna ökar ju finare sotet är, se bild 1:5. I bilden anges den yta som kan täckas av 1 g sot vid olika partikeldiametrar och av bilden framgår den avgörande inverkan partikelstorleken har för sotets smutsande effekt: 10^9 partiklar med diametern $10\mu\text{m}$ täcker en yta av 785 cm^2 , medan 10^{12} partiklar med diametern $1\mu\text{m}$ (men med samma massa) täcker en yta av 7850 cm^2 ($0,8\text{ m}^2$) dvs. 10 gånger mer trots den lika stoftmängden.

Det förtjänar här påpekas att svärtningen till följd av partiklar - det må **vara i en gasfana eller vid en sottalsmätning** - knappast ger någon uppfattning om partikelmängden så länge partikelstorleken ej är känd se Peterson (1969a) - appendix I - och Sjøgren (1971a).

Nedsmutsningen måste ses mot bakgrunden av de enorma stoftutsläpp som sker från de oljeeldade anläggningarna. Med ett beräknat utsläpp av 1,5 g stoft per kg olja och med en total oljeförbrukning i Sverige - se T.Waldenby (1971) - av $17 \cdot 10^9$ kg olja per år erhålls en total emission av ca 25 000 ton sot per år. Redan från en större värmecentral om 50 MW och med en överslagsmässig oljeförbrukning av ca $15 \cdot 10^6$ kg olja per år erhålls ett utsläpp av omkring 20 ton sot per år, och i ett villaområde med 200 villor, en oljeförbrukning av 4000 kg per år och anläggning, och med en så låg stoftemission som 0,3 g/kg olja, erhålls en total stoftproduktion av 250 kg/år.

En uppskattning av nedsmutsningsgraden hos nedfallande stoft (i stort sett med partikelstorlek över 10 mikrometer) har gjorts av Statens Naturvårdsverk (tabell 1:3). Givetvis får man se de angivna värdena som överslagsmässiga, men de torde ändå överensstämma rätt väl med en allmän uppfattning om nedsmutsningens olägenheter.

Det kan tilläggas att de i tabell 1:3 angivna värdena överensstämmer med angivelser från andra länder och städer med olika hög grad av luftförsmutsning.

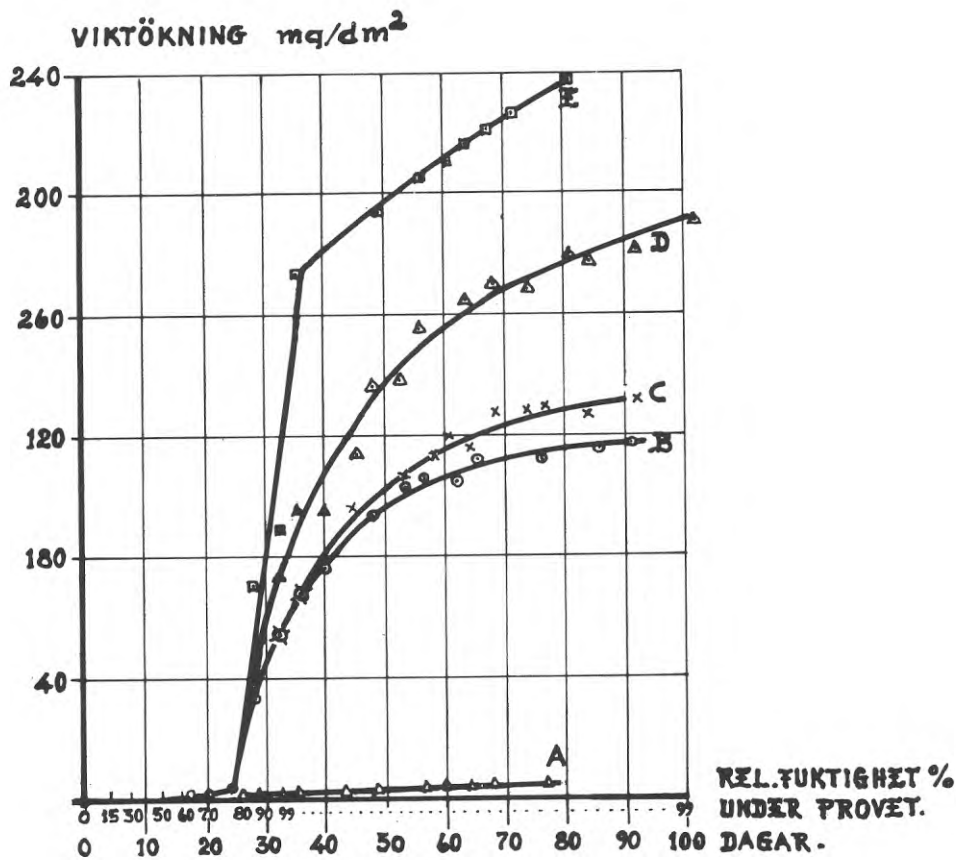


BILD 1:6 Korrosion av järn i fuktig luft. Fukthalten har under provet ökat från 0 % till 99 % relativ fuktighet. Det senare värdet uppnåddes därvid efter ca 35 dagar. Sedan fukthalten nått 99 % RF hölls den konstant under återstående delen av försöket. I bilden markerar A-E förhållandena enligt:

- A: Kolpartiklar och partiklar av natriumsulfat på metallytan. Ren luft.
- B: Utan partiklar men med SO_2 i luften.
- C: Med kiseldioxidpartiklar på metallytan och med tillsats av SO_2 i luften.
- D: Med ammoniumsulfatpartiklar på metallytan och SO_2 i luften.
- E: Med kolpartiklar på metallytan och SO_2 i luften.

TAB 1:3 Nedsmutsning till följd av fallande sot

Nedfallande stoft g/m ² månad	Smutsningseffekt
2	Bakgrundsnivå
5	Tillfredsställande även i bostadsområden.
10	Smutsande och otillfredsställande i bostadsområden.
15	Starkt smutsande och mycket otillfredsställande i bostadsområden.

1.3 KORROSIONSEFFEKT

Korrosionen i samband med partiklar har bl.a. undersökts av H J Vernon (1935). I bild 1:6 visas resultatet av korrosionsförsök med järn. Resultaten avser dels försök i ren fuktig luft, dels resultat i fuktig luft med 0,01 % SO₂ och med olika partikeltyper.

I bilden är även inlagt resultat för korrosionen utan närvaro av svaveldioxid men med kolpartiklar. Som visas i bilden föreligger här knappast någon korrosion alls - vilket visar att partiklarna i sig själva ej ger korrosion men att man efter absorption av svaveldioxid och vatten erhåller en våldsam ökning av korrosionshastigheten. Peterson (1967) har påpekat att denna typ av korrosion kan förstärkas om partiklarna fått uppehålla sig i förbränningsgaserna vid låg temperatur t.ex. i en skorsten och därefter förts ut i atmosfären. Skadorna från sådana korrosiva partiklar är i huvudsak lackskador på bilar - se även Peterson (1967a, 1971b) - **skador på textilier, färger** och andra ytbehandlingsmaterial. Även skador i värme pannorna försvåras dock p.g. av stoftavsättningarna se Peterson, Hecktor (1968b).

1.4. MYNDIGHETERNAS KRAV

1.4.1 Krav enligt Statens Planverk

Statens Planverk har angivit krav på maximalt acceptabla emissionen av stoft i SBN-S68:14, Skydd mot luftföroreningar, varifrån tabell 1:4 är hämtad.

TAB 1:4 Högsta godtagbara värden ifråga om sottal och stoftemission vid oljeeldning. Källa SBN-S68 (1968)

Emission	Gränsvärde	Anm.
Sottal enligt Bacharach-skalan	Högst 3	Vid starter och belastningsändringar godtas sottal 5 under högst 15 minuter.
Emission av oförbrända partiklar	Högst 1 g per kg olja	Emissionen räknas som medelvärde över 30 minuter och förutsätts mätt med kemisk metod enligt Shell eller likvärdig.
Total stoftemission	Högst 1,5 per kg olja	Emissionen räknas som medelvärde över 30 minuter. Om mätning sker skall denna utföras enligt BP-metoden eller därmed likvärdig metod.

I tabell 1:4 angivna emissionsvärden förutsattes **uppmätta vid mindre luftöverskott** än de i tabell 1:5.

TAB 1:5 Högsta acceptabla luftöverskott vid bestämning av emissioner enligt SBN-S68:14 (1968)

Maximal brännarkapacitet kg olja/h	Luftöverskott %		CO ₂ -halt %	
	vid högsta belastning	vid lägsta godtagbara belastning	vid högsta belastning	vid lägsta godtagbara belastning
< 5	70	-	9	-
5 - 20	40	-	11	-
20 - 50	40	70	11	9
51 -150	30	55	12	10
>150	20	40	13	11

Som vi senare skall finna innebär detta avsevärt större krav för större brännare än för små brännare. Vid högre CO₂-halter - motsvarande lägre luftöverskott försvåras inblandningen av luft i oljedimman vilket medför risk för lokala luftunderskott och därmed hög sotbildning i vissa delar av flammen.

1.4.2 Krav enligt förslag till normerad mätmetod för Sverige

I förslaget till normerad mätmetodik för stoftmätning-Peterson (1968a) - har ovan angivna värden ändrats något. Tabell 1:5 har således förslagits ändrad till:

TAB 1:6

Maximal kapacitet /brännare kg/h	CO ₂ -halt %
< 5	9 - 10
5 - 20	10 - 11
21 -150	11 - 12
> 150	12 - 13

Orsakerna till ändringen är dels att det vid fältprovningar kan visa sig svårt att hålla exakt de i tabell 1:5 angivna värdena dels att anpassa värdena närmare de normalt använda driftsvärdena.¹⁾

1.4.3 Lokala bestämmelser

Lokala bestämmelser utfärdade av hälsovårdsmyndigheten kom relativt snabbt efter utgivandet av SBN-S68. Bestämmelserna överensstämde i huvudsak med vad som angavs i SBN-S68 med vissa undantag. Även om de lokala bestämmelserna har mindre principiellt intresse för denna undersökning, kan det vara värt att notera att man i Göteborgs stad mildrade de av Statens Planverk föreslagna normerna enligt tabell 1:7.

Vissa av de i tabell 1:7 givna reglerna kan diskuteras. Vid eldning av sopor eller ved föreslås ett maximal sottal, vilket ej får anses lämpligt, se Appendix I. Vidare anges ej någon bestämd CO₂-halt vid vilken mätning skall utföras vilket naturligtvis medför en viss osäkerhet vid eventuell mätning. Slutligen är det väl tveksamt om det finns någon praktisk möjlighet att bibehålla sottal 6 under sotning av en värmepanna.

1) Vid leveransen av en värmeanläggning krävs ofta garantiprov vid CO₂-halten omkring 14 - 15 %. Endast i undantagsfall kommer värmecentraler av typen kvarterscentraler eller större värmecentraler (effekt under 50 MW) att sedan drivas med så låga luftöverskott som detta motsvarar. I stället drivs vanligen centralen med ca 30 - 40 % luftöverskott motsvarande 11 - 12 % CO₂.

TAB 1:7 Emissionsnormer för Göteborgs Stad - se Dirke (1968)

Typ av anläggning	Emission	Gränsvärde	Anm.
Alla uppvärmningsanordningar	Sottal enligt Bacharachskalan	Högst 4	Vid starter, belastningsändringar och sotning godtas sottal 6 under högst 15 minuter.
	Total stoftemission	Högst 0,2 g/Nm ³	Emissionen räknas som medelvärde över 30 minuter. Om mätning sker skall denna utföras enligt BP-metoden eller likvärdig metod.
Oljeeldade uppvärmningsanordningar	Emission av oförbrända partiklar (sot)	Högst 1,5 g/kg olja	Det tredje slaget av partiklar - kolpartiklarna - har mycket små dimensioner, se bild 1:2 och kan därför tränga ned i lungorna, där de avsätts. Huruvida de avsätts eller ej beror i högsta grad på deras storlek se bild 1:3.
	Total stoftemission	Högst 2 g/kg olja	Det bör även konstateras att askan ej förekommer som fasta partiklar i oljan. Den har därför ej någon skadlig inverkan på pumpar eller andra delar i systemet. Här inverkar istället oljans halt av fasta föroreningar vilka ej får förväxlas med "askhalten".

1.4.4 Statens Naturvårdsverk: Riktlinjer för emissionsbegränsande åtgärder vid luftförorenande anläggningar.

I Statens Naturvårdsverks Publikation 1970:2 (1970a) har angivits flera riktvärden beroende av värmeanläggningens storlek. För värmeanläggningar med en maximal effekt understigande 50 MW anges för nya enheter en gräns för total stoftemission av 1,5 g/kg olja (1,0 g sot per kg olja) och sottal 3 enligt Bacharach ¹⁾. För äldre enheter har kraven mildrats till 2,0 g/kg olja (1,5 g sot per kg olja) och sottal 4.

1) Man ansluter sig här således till SBN-S68. Liksom i denna anvisning accepteras sottal 5 under kortvariga starter och belastningsändringar.

Även om förhållande vid anläggningar större än 50 MW ej skall behandlas senare kan det dock vara av intresse att notera att man för sådana anger samma regler som för de mindre med vissa tillägg, nämligen beträffande stofthalten vid sotning. Här accepteras att stofthalten får uppgå till 200 mg/m^3 torr gas (vid NTP) mätt som medelvärde under 30 minuter. Mätning under sotning har utförts av Svenska Fläktfabriken vid Öresundsverket, se tabell 1:8.

TAB 1:8 Stofthalten i avgaserna under sotning av ett kraftverk

CO ₂ -halt %	Stofthalt vid sotning ^{a)} mg/m ³	Anm.
14,5	42	Enligt Statens Naturvårdsverk Publikationer 1970:5. Luftvårds- problem vid oljeeldade kraft- verk (1970b)
14,5	29	

^a Anläggningen är utrustad med stoftavskiljare av småcyklontyp.

Som synes av tabellen har stofthalten vid de två proven legat väsentligt lägre än kraven från myndigheterna.

1.4.5 Luftvård vid befintliga värmeanläggningar (1971)

I Statens Naturvårdsverk Publikationer 1971:8 anges de ovan under 1.4.4 angivna värdena utom ifråga om sotal. I denna publikation anges även vissa krav på mätningen, som i de tidigare nämnda publikationerna endast angavs som BP- eller Shellmetoden.¹⁾

1) De i Statens Planverks publikation, Panncentraler, SBN-S68 (1968) angivna "mätmetoderna" är ej definierade och utgör i realiteten beskrivningar framtagna vid BP- respektive Shell-laboratorierna i England.

Kraven på mättingsförfarande har däremot angivits av Peterson (1968a) och omfattar noggrannhetskrav, angivelser om val av mätpunkter m.m.

1.5 OLIKA OLJOR - OLIKA STOFTBILDNING ¹⁾

Normalt anses stoftbildningen vid förbränning av eldningsolja vara en storhet som är nära nog enbart beroende av *brännarens utformning, flamrummets storlek, anpassningen mellan panna och brännare, samt strömningsförhållanden i och lufttillförsel till flamrummet.*

Upprepade mätningar vid en och samma värmecentral utförda under 1968 - 1969 visade dock på högst uppseendeväckande och, mot bakgrunden av att ovan angivna storheter hölls konstanta, även oförklarliga skillnader. I tabell 1:9 visas några mätresultat från de aktuella mätningarna.

TAB 1:9 Mätresultat från central SH

Tillfälle	CO ₂ -halt %	Stoftbildning g/kg olja	Olja
1968 mars	12,0	0,40	A (Eo 4 LS)
	12,0	0,32	A (Eo 4 LS)
1969 febr	12,0	1,58	B (Eo 4 LS)
	12,0	1,11	B (Eo 4 LS)

Som framgår av tabellen hade stofthalten stigit från 0,35 g/kg olja till 1,35 g/kg motsvarande 300 %. Någon möjlighet att nedbringa stofthalten genom sedvanlig injustering av brännaren fanns ej heller. Förnyad mätning visade samma resultat.

De möjliga orsakerna till förändringen kan vara flera och vi skall här inledningsvis se närmare på några av dem:

- o Ändring av brännarkarakteristiken, genom igensättning av primärluftkanalen med åtföljande försämrade fördelning av oljan.
- o Felmätning vid något av eller vid samtliga mättillfällen.
- o Variationer i oljans stoftbildande egenskaper.

Den förstnämnda orsaken förefaller mindre trolig; inte ens en genomgripande service gav någon väsentlig förbättring. Felmätning kan givetvis ej uteslutas. Vid tidpunkten för proven fanns ej någon mätmetodik fastlagd, mätningen företogs blott i en punkt i kanalen (kanalcentrum) och ett flertal numera väl kända

1) Här och i fortsättningen avses nettobildningen, se förord.

felkällor beaktades ej. *Mot* en felmätning talar att ommätningen vid eldning med olja A gav samma resultat som de första mätningarna med blott en ringa avvikelse. *För* ett beroende av oljekvaliteten talar att den höga stoftbildningen uppnåddes i samband med oljebyte.

Som en följd av bl.a. ovan relaterade praktikfall startades föreliggande arbete med syfte att undersöka stoftbildningen från olika oljor. I första hand har av flera skäl målsättningen varit att undersöka stoftbildningen från lågsvavliga oljor. Användningen av denna oljetyp får sin tyngdpunkt i tätbebyggda samhällen med en hög bakgrundsbelastning vad gäller luftföroreningar. Framställningen ¹⁾ av oljorna liksom en ändamålsenlig lagring av dem är skild från den för **andra typer av oljor**. **Sammansättningen av oljorna skiljer sig från den vid normalsvavliga oljor m.m.** I samband med undersökningen har dock även ett stort antal normalsvavliga oljor provats. Härvid har de **vanna erfarenheterna för de lågsvavliga oljorna kunnat ställas i relation till resultat för oljor vilka är mer välkända för branschen.**

1.6 ÄLDRE UNDERSÖKNINGAR RÖRANDE STOFTBILDNING FRÅN OLIKA OLJOR

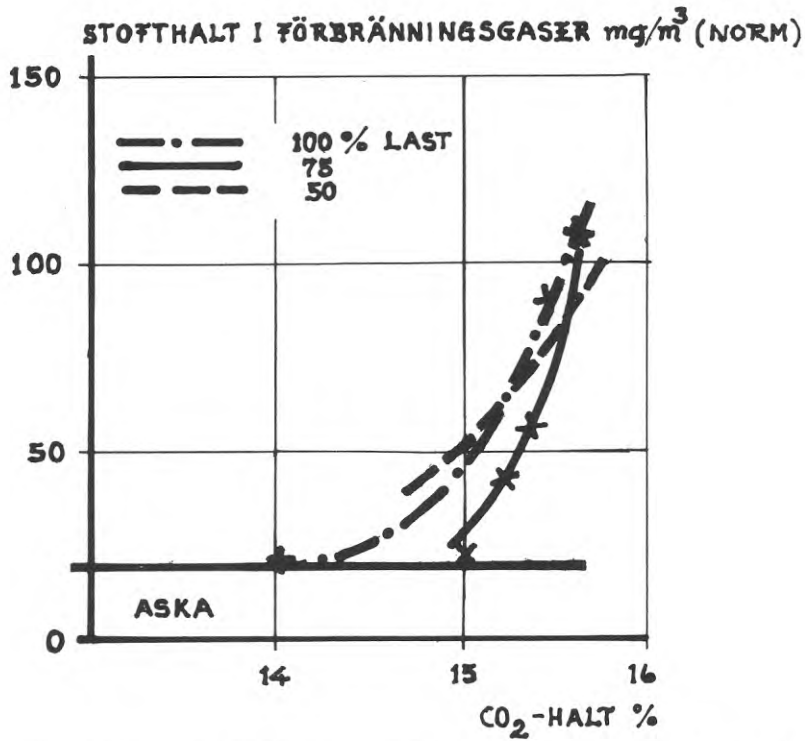
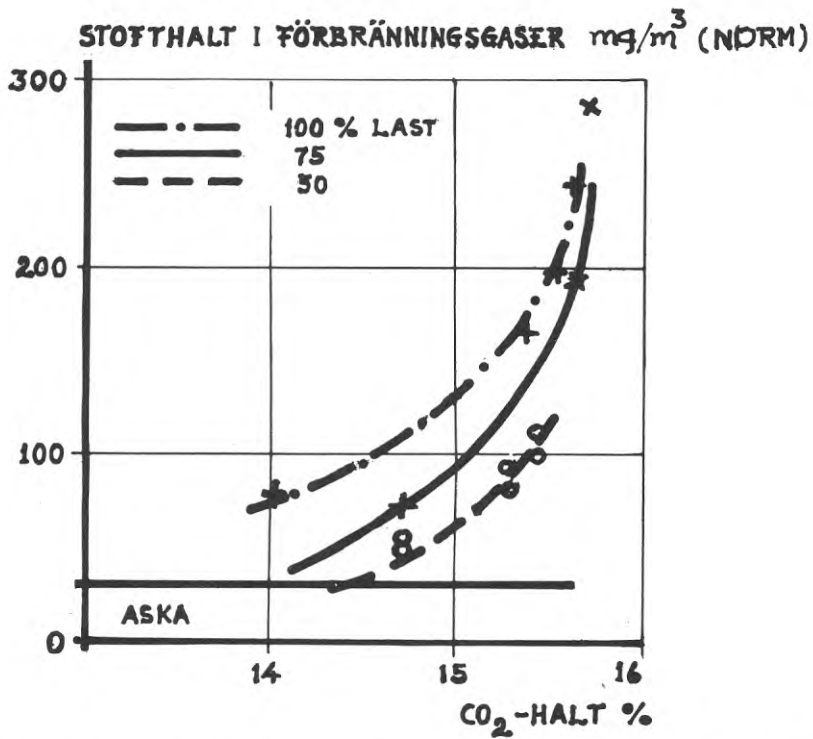
Tanken att olika oljor kan uppvisa olika sotbildning under i övrigt lika förbränningsbetingelser är ingalunda ny. Det kan därför vara av intresse att se närmare på några tidigare försök att bestämma de uppträdande skillnaderna.

Bild 1:7 visar sotbildningen vid förbränning av två olika oljor vid drift av en ångpanna ²⁾. Oljornas egenskaper framgår till viss del av tabell 1:10. Försöken med olja Q_1 visar att man vid en belastning av 75 % (100 % motsvarar en produktion av 32 ton ånga per timme vilket var den ekonomiska belastningen för anläggningen) erhöll en väsentligt lägre stoftbildning än vid 100 % last. Sänktes belastningen ytterligare - till 50 % - samtidigt som CO_2 -halten minskades erhöills en än mer gynnsam förbränning ³⁾.

1) Här bör nämnas att avsvavlade oljor tyvärr ej kunnat medtagas i undersökningen.

2) Driftsdata: maximal ångproduktion 40 ton/h vid 68 bar, 500°C.

3) Det bör tilläggas att (Bünz (1967))endast ger ett fåtal uppgifter varför denna iakttagelse kan bero på mätosäkerhet.

BILD 1:7a Stofthalt i förbränningsgasen vid drift med olja Q₁BILD 1:7b Stofthalt i förbränningsgasen vid drift med olja Q₂.

Tab 1:10 Fysikaliska och kemiska uppgifter för två oljor enligt
Bünz m.fl. (1967)

	Olja		Enhet
	Q_1	Q_2	
Kol	85,7	85,6	mass-%
Väte	11,5	11,8	mass-%
Svavel	2,2	1,9	mass-%
Aska	0,02 (0,2)	0,03 (0,3)	mass-% (g/kg)
Värmevärde	41,5 (9 925)	41,5 (9 920)	MW/kg (Kcal/kg)
Asfaltenhalt	1,8	2,0	mass-%
Kokstal ^{a)}	7,1	8,8	mass-%
Lägsta flyt- temperatur	24	8	°C
Densitet	950	938	kg/m ³
Kinematisk viskositet vid 50°C	167	100	cSt

^aMätt enligt Conradsson.

Vid användning av olja Q_2 se bild 1:7 b erhöles en avtagande stofthalt med avtagande belastning inom ett belastningsområde av 50 - 100 %. Vid 75 % last och 14 % CO_2 motsvarade stoftemissionen praktiskt taget endast askhalten medan man vid lägre luftöverskott (d.v.s. högre CO_2 -värden) får en betydande sotbildningen vid båda oljorna.

Den erhållna skillnaden verkar överraskande mot bakgrunden av att exempelvis kokstalet och halten asfaltener för oljorna är relativt lika. Asfaltenerna **anses nämligen ge höga bidrag** till sotbildningen från oljorna. Större skillnad uppvisar de båda oljorna med avseende på lägsta flytpunkt. Det höga värdet för olja Q_1 tyder på att man här har att göra med en mycket paraffinrik olja, vilket skulle kunna förklara skillnaderna i sotbildning.

Även för destillatolja har liknande resultat erhållits. I bild 1:8 visas stoftbildningen för sex olika oljekvaliteter (data enligt tabell 1:11). Sotbildningen mättes med en optisk metod

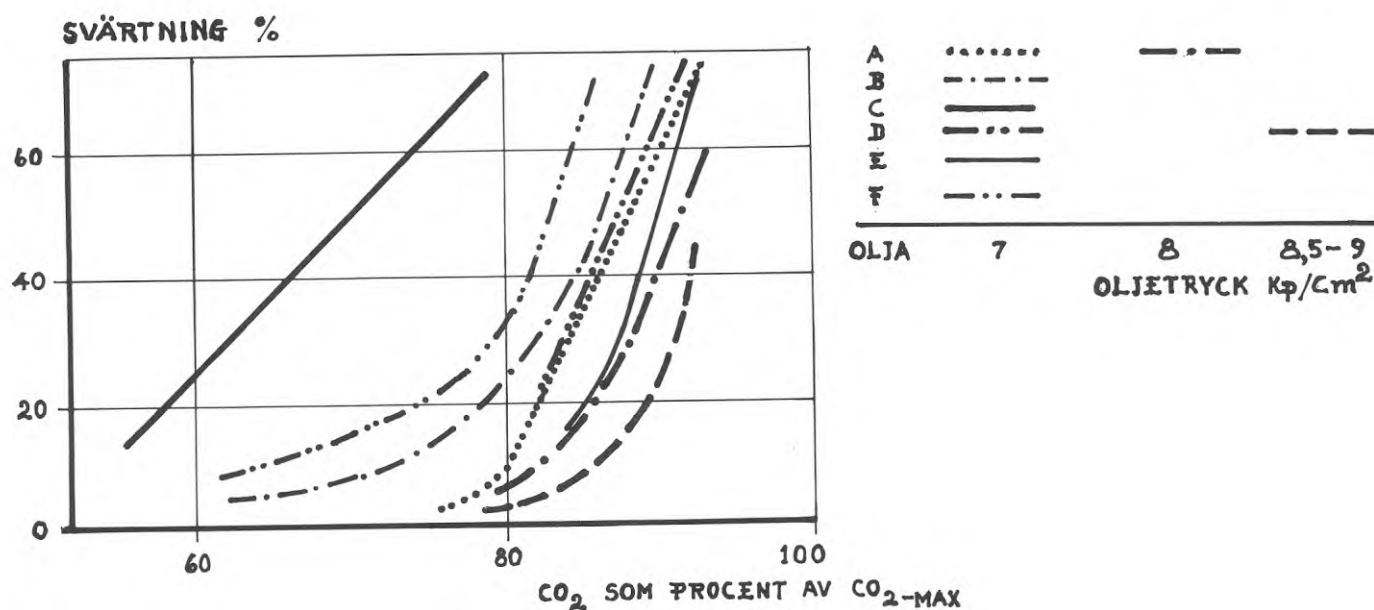


BILD 1:8 Resultat av sotmätningar vid drift med sex destillatoljor i en tryckoljebrännare. Som framgår av bilden sker en viss förändring av stoftbildningen vid ändring av förstoftningstryck. Data enligt Locklin m fl (1951). Data för oljorna anges i tabell 1:11

TAB. 1:11 Analysdata för oljorna A-F, se bild 1:8.

Storhet/Enhet	O l j a enl bild 1:8					
	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	E ₁	F ₁
Densitet kg/m ³	830	890	920	800	960	900
Viskositet vid 20°C cSt	2,1	2,4	2,2	3,1	2,7	2,7
Lägsta flyt- temperatur °C	-29	-	-43	-18	-20	-29
Svavelhalt %	0,59	0,88	0,28	0,11	0,25	0,36
Destillation						
0 %	171	246	192	177	187	215
10	202	266	213	190	223	235
50	230	287	249	218	260	260
90	293	320	286	263	305	297
100	324	350	321	270	332	338

- motsvarande Bacharachmetoden - vilket kan accepteras vid de aktuella oljetyperna.

Oljan förstoftades med hjälp av en tryckoljebrännare - oljetryck ca 70 N/cm^2 - med en kapacitet av 1 ghp (3,78 liter per timme).

Liksom i de tidigare redovisade försöken sker en stark stegring av sotbildningen vid CO_2 -halter i närheten av CO_2 -max. Vid CO_2 -halter omkring 10 - 11 % erhöles en minsta sotbildning. Bestämningen av stoftbildningen medels optisk mätning är - se bild 1:5 - tveksam, annat än som jämförelse vid "lika partikelstorlek," hos soten. Det kan därför vara av intresse att se närmare på sambandet mellan stoftbildningen från destillatoljor mätt som stoft per kubikmeter förbränningsgas och sottalet. I bild 1:9 visas detta samband för tre oljor (de senares egenskaper angivna i tabell 1:12).

Som framgår av bilden föreligger ett visst statistiskt samband mellan sotal och stofthalt. Orsakerna härtill har berörts av Peterson (1969a) och Sjögren (1971a).

Här skall konstateras att olja 1 ger väsentligt högre stofthalt än olja 3 vid samma sotal. Olja 2 ger approximativt samma stoftbildning som olja 1. Sambanden mellan oljekvalitet och stoftbildning har undersökts speciellt vad gäller destillatoljor avsedda som bränsle för flygmotorer. Här skall endast nämnas några samband som påvisats för denna typ av bränslen. Främst har undersökningarna av bränslena inriktat sig mot ett klarläggande av sotbildning/huvudkomponenter.

1.6.1 Inverkan av aromater

Flera undersökningar - t.ex. Cornet m.fl. (1953) - pekar på att stoftbildningen ökar med ökande aromathalt i bränslet, se bild 1:10.

1.6.2 Inverkan av asfaltener

Egna försök har visat en kraftig inverkan av asfaltener på sotbildningen. I ett senare avsnitt redogörs närmare för försöksresultaten i detta avseende.

1.6.3 Sotbildning vid förbränning av olika oljetyper

Oljor indelas ofta i aromatiska, nafteniska och paraffiniska

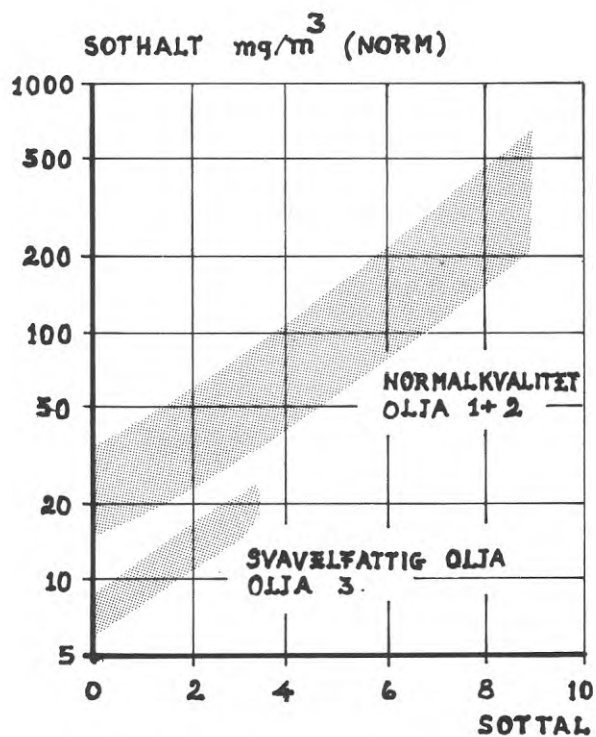


BILD 1:9 Sothalten vid förbränning av tre olika destillatoljor (se tabell 1:12) enligt Faut m fl (1967).

TAB. 1:12 Analysdata för de i bild 1:9 avsedda oljorna.

Storhet	Enhet	Olja		
		1	2	3
Densitet	kg/m ³	823	841	825
Värmevärde	Kcal/kg	10240	10200	10270
	kWs/kg	43	43	43
Vätehalt	mass-%	13,5	13,2	13,8
Kolhalt	mass-%	85,4	85,8	85,7
Svavelhalt	mass-%	0,69	0,57	0,14
Kinematisk visk.	cSt (20°C)	3,43	4,34	3,52

oljor. Indelningsgrunden är missvisande **så tillvida att t.ex. en naftenisk olja ej nödvändigtvis innehåller väsentligt högre halter av naftener än av paraffiner, se t.ex. tabell 1:13.**

Tab 1:13. Sammansättning (och partikelavsättningar) för fyra olika bränslen enligt Starkman m.fl. (1951)

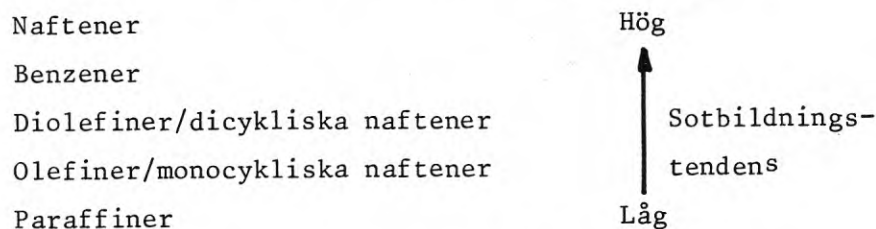
Bränslen	Sammansättning		mass-% Paraffiner	Relativ sotavsätt- ning
	Aromater	Naftener		
Aromatiskt	75,2	11,4	13,4	7
Nafteniskt	1,4	51,9	46,7	0,7
Paraffi- niskt	2,6	5,2	92,2	0,1
Flygfoto- gen	19,4	39,2	41,4	1

Sotbildningen (mätt som avsättning i en förbränningskammare) anges i relation till den vid förbränning av flygfoto-gen och som visas i tabellen föreligger här skillnader från 1 - 70 ifråga om sotbildning och skillnaderna hänför sig till bränslets sammansättning.

1.6.4 Sotbildning vid förbränning av rena kolväten

Ett flertal undersökningar syftande till att klarlägga sotbildningsmekanismerna vid förbränning av rena kolväten har utförts. I bild 1:11 visas resultat för olika kolväten enligt en undersökning av Clarke m.fl. (1953).

Som visas i bilden gäller för sotbildningstendensen:



Samma tendens har Meier zu Köcker (1968) funnit.

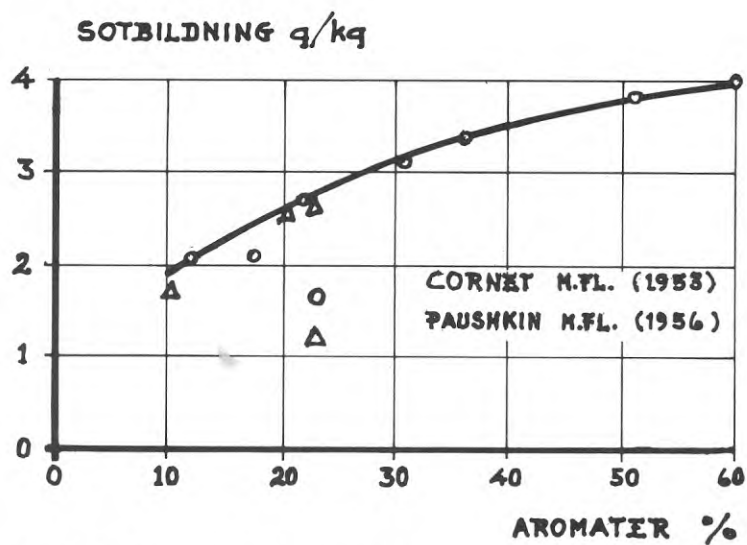


BILD 1:10 Sotbildning som funktion av aromathalten i dieselbränslen.

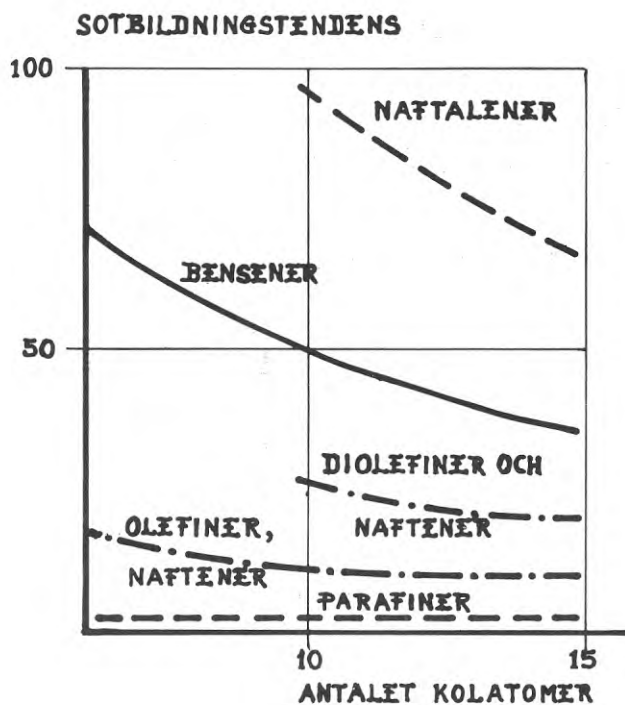


BILD 1:11 Sotbildningstendens för rena kolväten vid förbränning i diffusionsflamma.

2. FINFÖRDELNING AV OLJAN

Det finns skäl att förmoda att förstoftningssättet och sättet för luftens inblandning i flammen vid en oljebrännare i hög grad påverkar stoftbildningen i flammen. I SBN S6-68 anges som exempel härpå att tryckoljebrännare ej är lämpliga¹⁾ för eldning med tjockolja vid kapaciteter under 50 kg/h och att **brännare ej** bör användas för större kapacitetsvariation än 1:3. Orsakerna till de angivna begränsningarna har i vissa sammanhang anförts vara bl.a. att stoftbildningen erfarenhetsmässigt blir hög vid låga kapaciteter. Vid tryckoljebrännare har detta vanligtvis samband med svårigheten att effektivt blanda in luft i flammen vid höga och låga kapaciteter utan att samtidigt byta brännarinsatser m.m. Är brännaren välkonstruerad synes dock inga skäl föreligga för restriktionerna i SBN S6-68.

I föreliggande undersökning har försök utförts med tre olika brännartyper - *tryckolja*-, *rotations*- och *pressluftbrännare*. Av tryckolja- och pressluftbrännare har flera olika fabrikat ingått i proven och vid central S - se avsnitt 7.7- har olika brännare jämförts vid drift med en och samma panna. Syftet med denna del av proven var att undersöka eventuella stoftbildningsvariationer till följd av brännarnas olika konstruktion. De faktorer som spelar in vad gäller stoftbildningen har berörts något i föregående avsnitt. *Förstoftningen*²⁾ droppbildningen - kan sägas vara en brännaregenskap som, i någon mån påverkas av oljans egenskaper. *Luftinblandningen* bestäms däremot av brännarens och pannans konstruktiva utformning. Kombinationen panna/brännare är med andra ord av central betydelse, se avsnitt 9.

Vi skall i det följande se närmare på den inverkan droppbildningen har, samt på droppbildningen vid de tre undersökta brännartyperna.

2.1 DROPPBILDNING - FÖRBRÄNNINGSTID

En oljedroppe som utsätts för uppvärmning avtar i massa enligt

$$\frac{dm}{dt} = \rho_o \frac{\pi d^2}{2} dd \quad (2:1)$$

1) Enligt här redovisade undersökningar finns dock ej tekniskt belägg för detta.

2) Orden förstoftning och atomisering anses i det följande synonyma med det svenska uttrycket finfördelning.

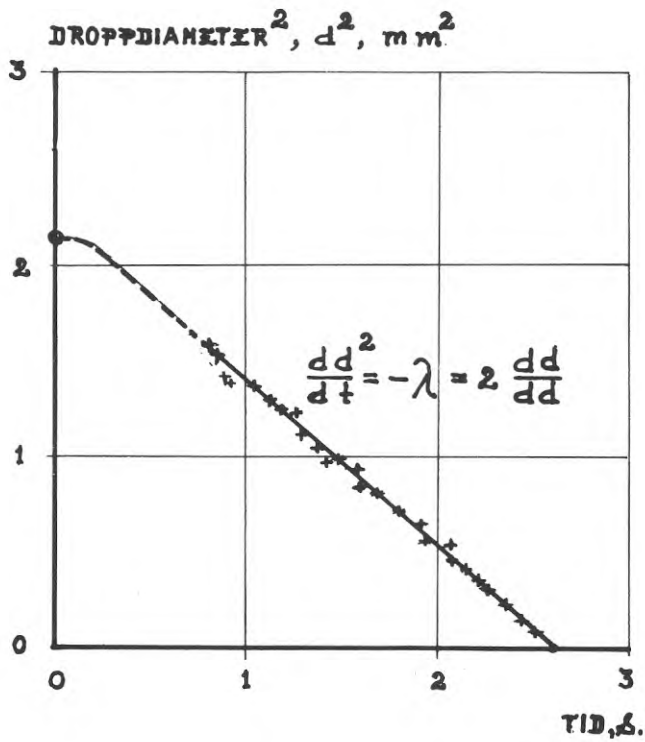


BILD 2:1 Droppdiameter som funktion av tiden för en brinnande droppa av etylalkohol. Data efter Kobayasi (1955).

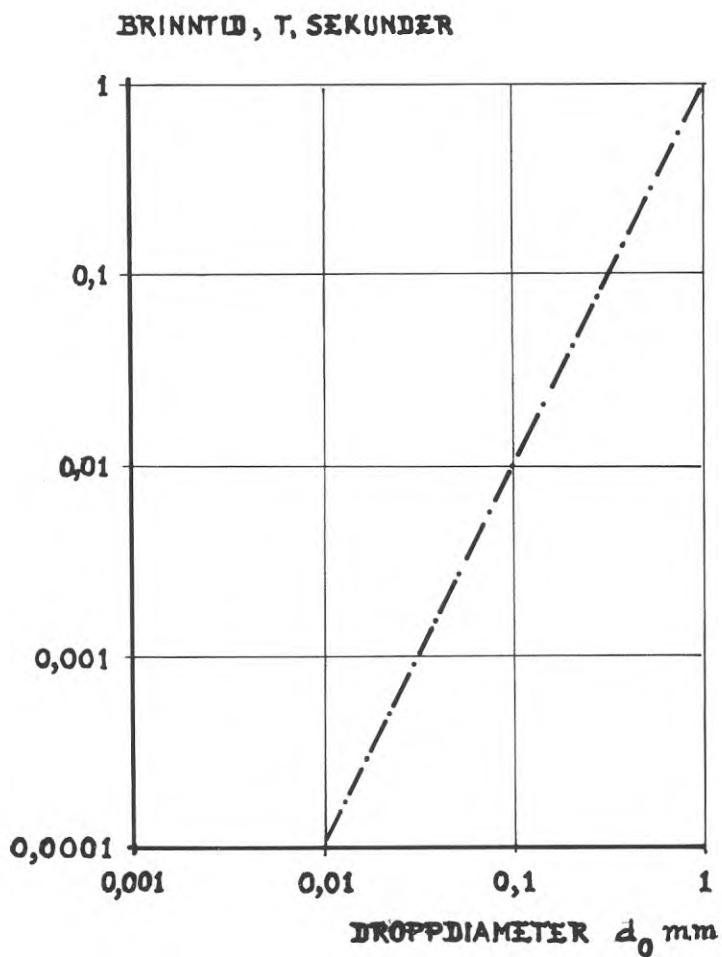


Bild 2:2 Brinntid som funktion av ursprunglig droppdiameter, d_0 .

där m är droppens massa (kg)

d " " diameter (m)

ρ_o " oljans densitet (kg/m³)

t " tiden, varvid $t=0$ motsvarar tiden för antändning (för en brinnande droppe) eller avdunstningens början.

Experiment med brinnande droppar visar att (se bild 2:1)

$$\frac{dm}{dt} = - \frac{\lambda}{4\rho_o} d \quad (2:2)$$

där λ är en konstant vars storlek (0,16 à 1,6) $\cdot 10^{-6}$ varierar med oljans kemiska och termiska egenskaper.

Tillsammans ger (2:1) och (2:2)

$$2d\dot{d} = - \lambda \quad (2:3)$$

som, integrerat från $t = 0$ (motsvarande $d = d_o$) till t , ger

$$2 \int_{d_o}^d d\dot{d} = -\lambda \int_0^t dt \quad (2:4)$$

eller

$$d_o^2 - d^2 = \lambda t \quad (2:5)$$

För en droppe destillatolja sker en minskning av droppdiametern - se bild 2:1. - medan man för en droppe härrörande från återstodsolja i stort sett har samma droppdiameter under hela förbränningsförloppet se bild 3:11.

För destillatolja är det därför naturligt att anta att en droppe's brinntid, T , bestäms av

$$T = d_o^2 / \lambda \quad (2:6)$$

eller om man vill uttrycka brinntiden som funktion av droppens ursprungliga massa, m_o :

$$T = \frac{m_o^{2/3}}{\lambda_1} \quad (2:6)$$

där

$$\lambda_1 = \lambda \{ \pi \rho_o / 6 \}^{2/3} \quad (2:7)$$

Ekvation (2:6) visar tydligt på vilka vinster i brinntid - och därmed i stoftbildning, jämför avsnitt 9 - som kan vinnas genom

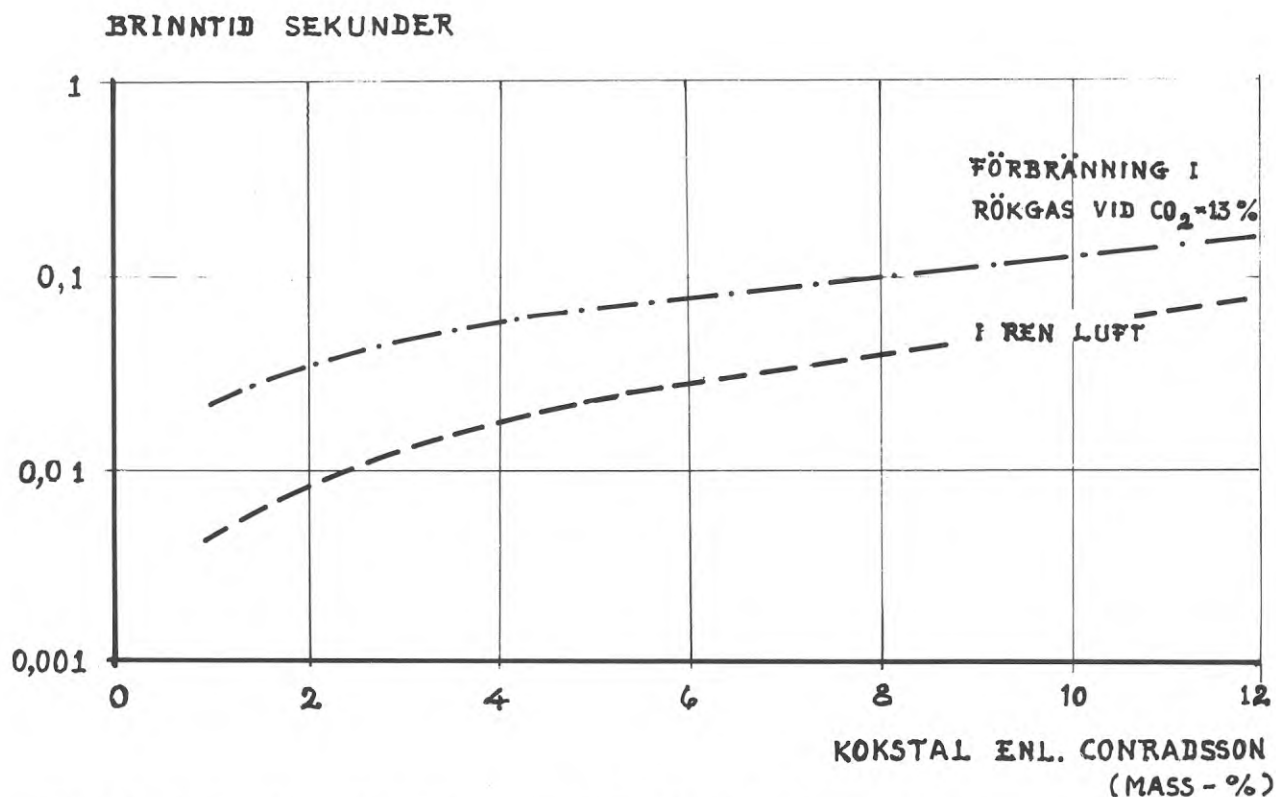


BILD 2:3 Brinntiden för oljedroppar som funktion av oljans sammansättning (Uttryckt med Conradssontalet) och sammansättningen av omgivande atmosfär. Bilden avser förbränningstiden för droppar med diametern ca 100 μm .

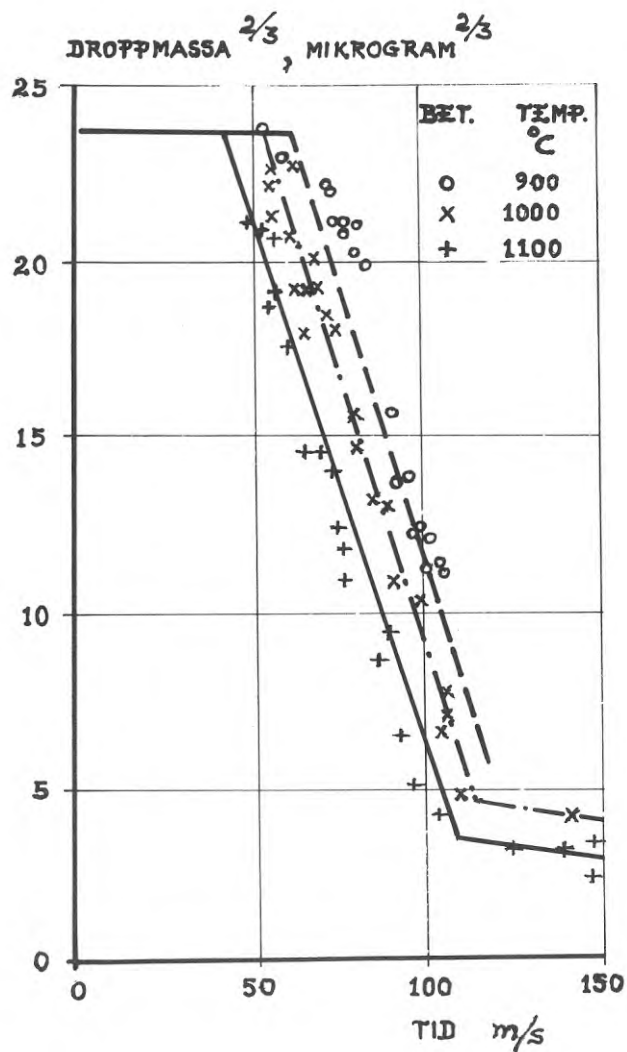


BILD 2:4 Förändringen i massa hos droppar av återstodsolja vid förbränning i atmosfär av olika temperatur.

en minskning av droppdiametern. I bild 2:2 visas sambandet (2:6) grafiskt för

$$\lambda = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (2:8)$$

Medan man för droppar om 1 mm har en brinntid som är ca 1 sekund blir brinntiden för en droppe om 0,3 mm ca 1/10 sekund.

Brinntiden är dessutom beroende av bl.a. oljans kemiska sammansättning och sammansättningen av den omgivande atmosfären. Att brinntiden för droppar av återstodsolja avviker från den för destillatolja beror bl.a. på närvaron av tyngre kolväten hos återstodsoljan. I bild 2:3 visas som exempel härpå brinntiden för oljedroppar som funktion av oljans Conradssontal. I bilden ges förbränningstider i två olika atmosfärer - dels ren luft, dels i en förbränningsgas med ca 13 % CO₂. Som framgår av bilden ligger förbränningstiderna väsentligt högre i det senare fallet vilket motsvarar en längre förbränningstid för droppar i en oljeflammas centrum (där CO₂-halten är hög) än i flammans yttre delar.

Ekvation (2:6), som härletts från förhållandena vid förbränning av destillatolja, äger giltighet även för återstodsolja, se t.ex. Hottel (1955), bild 2:4. Sambandet mellan risk för ökad stoftbildning och ökad droppstorlek skall senare behandlas i avsnitt 3. Vi skall här ej gå närmare in på dessa förhållanden utan blott konstatera att de ovan angivna sambanden för brinntiderna pekar på kravet om små droppar vid förstoftningen.

2.2 DROPPBILDNINGSMEKANISMER

Droppbildningen vid tryckolje- och rotationsbrännare sker genom att det i brännaren bildas en tunn oljefilm, vilken genom flera mekanismer sönderfaller i trådar. Vid pressluftbrännaren bildas de trådformade fragmenten redan i ett första steg. Trådarna är instabila - se Rayleigh (1878) - och sönderfaller i droppar vars storlek är den dubbla av tråddiametern, se bild 2:5. Tråddiametern, som är en funktion av den förutnämnda oljefilmens dimensioner kan påverkas såväl av driftsförhållandena som av förstoftarens konstruktion. Det finns således tekniskt utrymme för en minskning av droppstorlek och stoftbildning. I ett senare avsnitt skall vi se närmare på kostnaderna för sådana förbättringar.

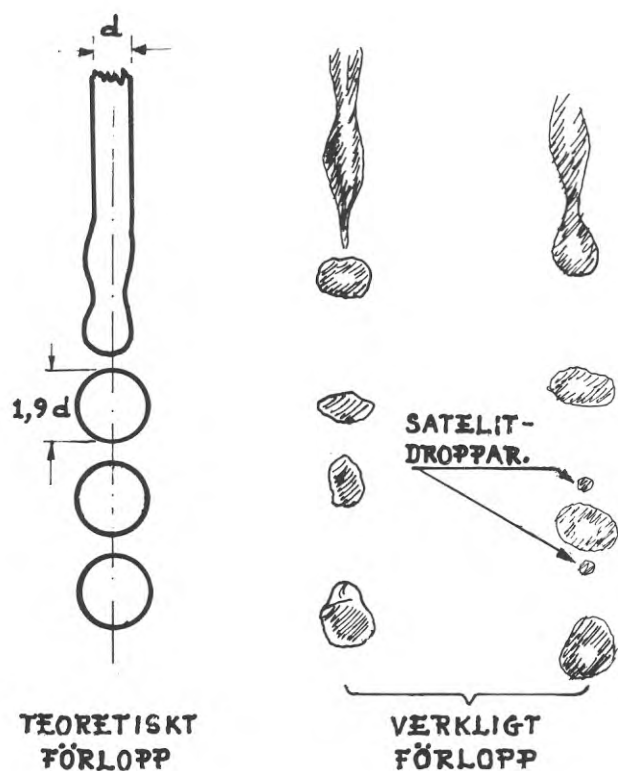


BILD 2:5 Sönderfall av en oljetråd. Teoretiskt förlopp enl Rayleigh (1878), verkliga förlopp efter Marshall (1954).

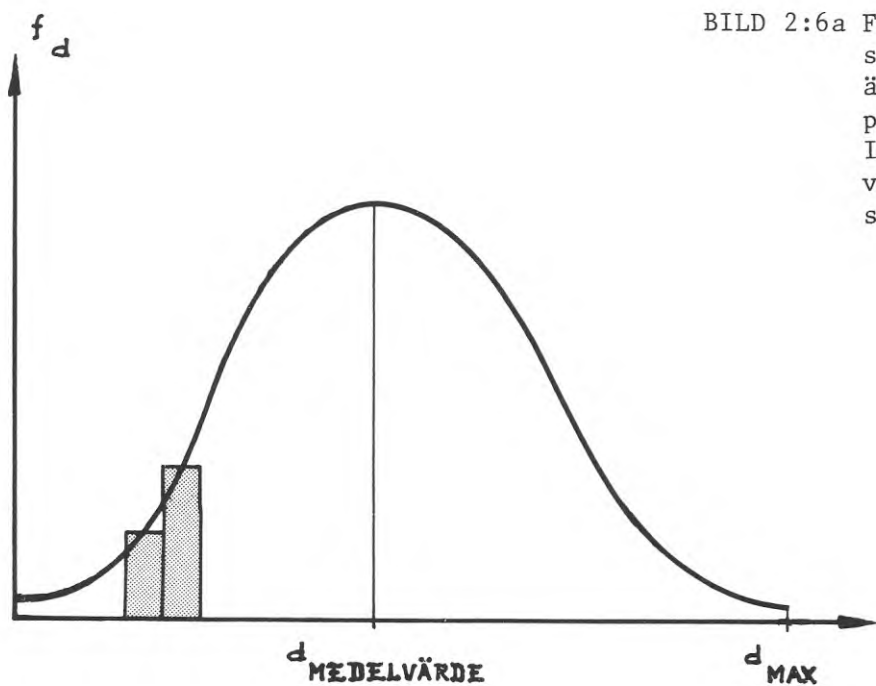


BILD 2:6a Frekvenskurva för droppstorlek. I bilden visas även frekvensen av droppar i två fraktioner. I detta fall har frekvensen angivits med staplar.

Översiktsmässigt kan man konstatera att de bildade dropparna ej är av en och samma storlek utan varierar i antal inom ett stort område, se bild 2:6a. Vid varje brännartyp och för varje driftsfall finns således en droppfördelning, $f(d)$, se bild 2:6. Droppfördelningen kan vara beräknad med droppdiametern som variabel (heldragen kurva) eller med droppens area (streckprickad kurva) eller volym (streckad kurva) som variabel. Beroende på vilken av de olika variablerna man använt får man olika medeldiametrar. Här skall vi huvudsakligen intressera oss för den s.k. Sauter-mean diametern (SMD) bestämd av

$$\bar{d}_{area} = \frac{\int_0^{d_{max}} d^3 f(d) dd}{\int_0^{d_{max}} d^2 f(d) dd} \quad (2:9)$$

Av stor betydelse är - se avsnitt 9 - den uppträdande maximala diametern d_{max} i dessa båda formler. Denna är som senare skall visas avgörande för den större delen av stoftbildningen och vi skall för de olika brännartyperna även se närmare på storleken av de största förekommande dropparna.

2.3 TRYCKOLJEBRÄNNARE

2.3.1 Droppbildning vid tryckoljebrännare

I tryckoljebrännaren bildas oljefilmen från ett munstycke vars konstruktion visas i bild 2:7. Genom de tangentiellt ställda slitsarna får oljan en roterande rörelse i munstycket, varvid (vid friktionsfri strömning) den i bild 2:8a visade tangentiella hastigheten bestäms av

$$v_t = C/r \quad (2:11)$$

där r är avståndet från centrum och C en konstant.

I centrum gäller således

$$v_{t(\text{centrum})} \rightarrow \infty \quad (2:12)$$

vilket är fysikaliskt omöjligt. I den punkt där hastigheten över-skrider den som bestäms av totala trycket i oljan

$$v_{t(\text{max})} = \sqrt{\Delta p / \rho_o} \quad (2:13)$$

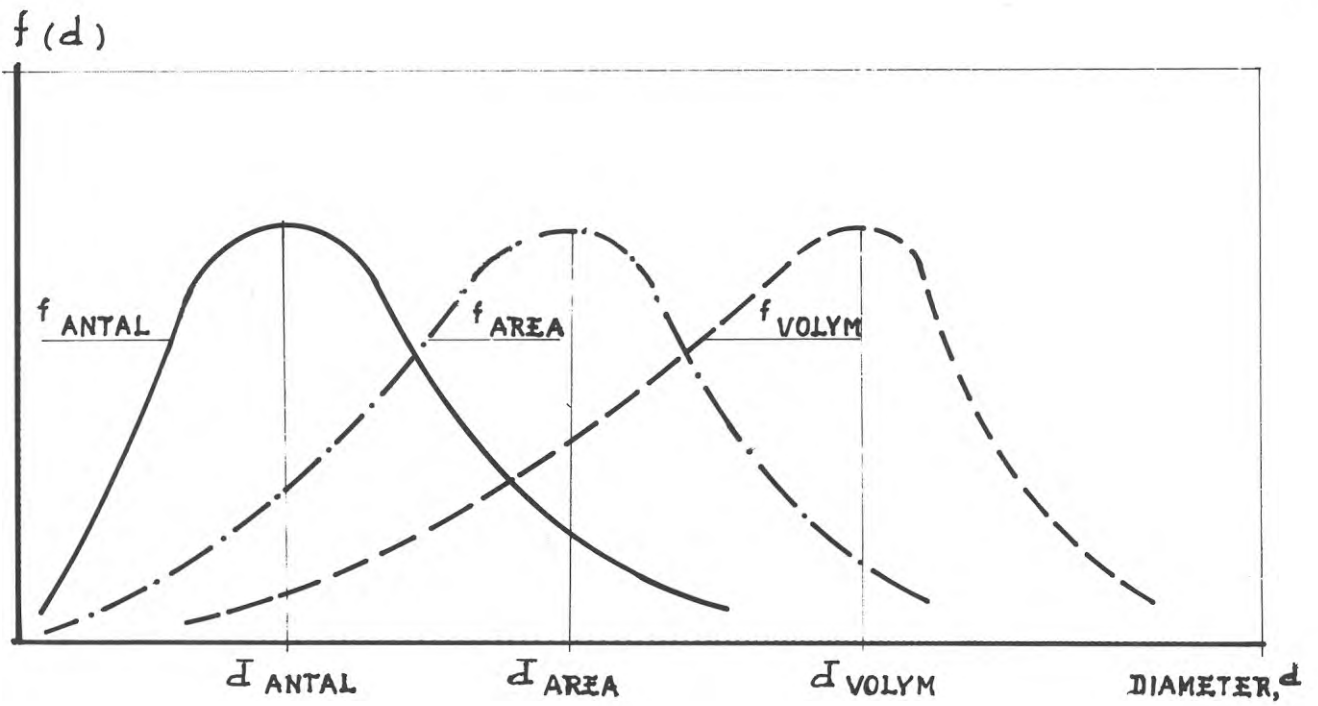


BILD 2:6b Fördelningskurvor för oljedroppar (schematiskt).

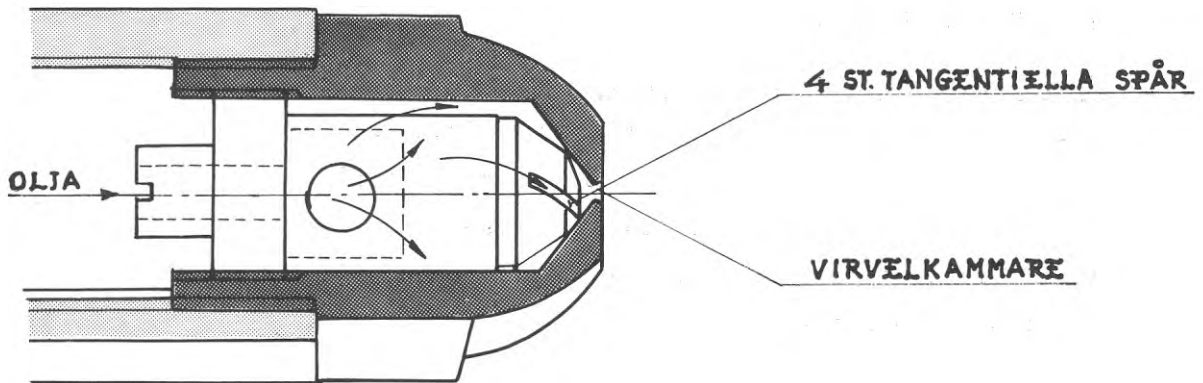


BILD 2:7 Förstoftningsdelen av en tryckolja-brännare. Oljans väg fram till virvelkammaren markeras med pilar.

uppträder nämligen kavitering i oljan och en konisk oljefilm utbildas - se bild 2:8b. Tjockleken av oljefilmen bestäms härvid av *håldiametern i munstycksutloppet, oljeflödet, avståndet från munstycket och spridningsvinkeln*. Oljeflödet och spridningsvinkeln bestäms bl.a. av oljans viskositet och oljetrycket.

2.3.1.1 Dropparnas medeldiameter SMD vid tryckoljebrännare.

För praktiska ändamål kan sambandet mellan de inverkanse faktorerna skrivas i **potensform**

$$\bar{d}_{area} \approx konst \cdot d_h^n \cdot v^s \cdot \Delta p^k \quad (2:14)$$

där d_h är håldiametern (m)

v är oljans kinematiska viskositet cSt och

Δp är tryckfallet i munstycket

För exponenterna gäller

$$k = 0,35 \text{ enligt Joyce (1949)}$$

$$n = 1,00 \text{ enligt Longwell (1943)}$$

$$s = 0,2 \text{ med smärre variationer}$$

Det kan vara av intresse att se att en ändring av viskositeten med en faktor 2 motsvarar en ändring av droppstorleken med ca 14 % medan samma ändring endast kräver en tryckökning med faktorn 1,4.

Den tidigare angivna ekvationen (2:14) för droppdiameters medelvärde (SMD) har i bild 2:9 ¹⁾ utvärderats för

$$n = 1$$

$$s = 0,2$$

$$k = 0,35$$

1) I bild 2:9 har även oljeflödets variation med trycket införts varvid ekvationen

$$\text{använts.} \quad \dot{q}_{olja} = konst \cdot \Delta p^{0,5} \quad (2:15)$$

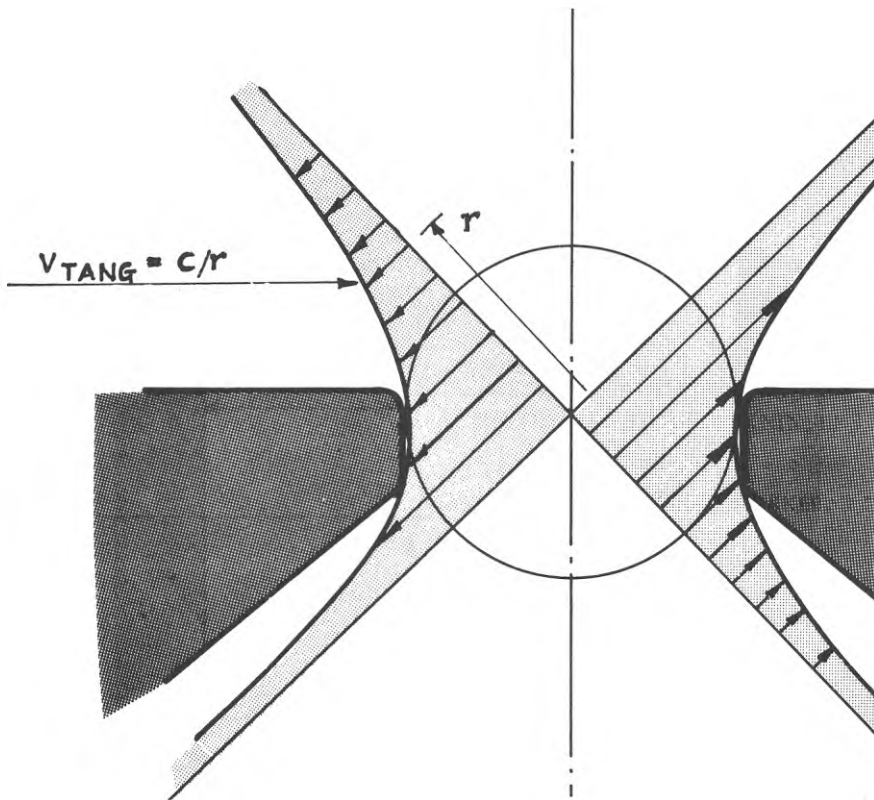
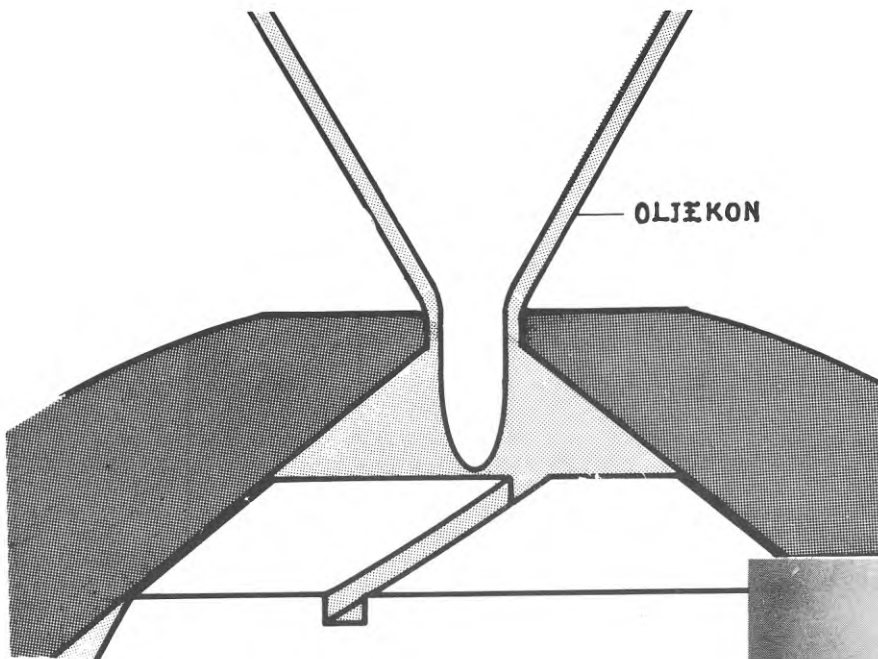


BILD 2:8a Tangentialhastigheten, v_{tang} , vid friktionsfri strömning i ett tryckoljemunestycke.

BILD 2:8b Utbildad oljekon vid ett tryckoljemunestycke



för en olja med kinematiska viskositeten 21 cSt och vid $d_h = 0,5$ mm. Oljeflödet vid 70 N/cm^2 är 50 kg/h. Värdena kan jämföras med de i bild 2:10 efter Joyce (1949). Vid utvärderingen av ekvation (2:14) har konstanten satts till 270 vilket värde antagits gälla för den aktuella munstyckstypen.

Tabell 2:1 ger en uppfattning om droppstorlekens variation vid olika munstycksfabrikat.

TAB 2:1 Droppdiameter för olika munstycksfabrikat enligt Pigford m.fl. (1951)

Munstycke	Tryck N/cm^2	d_h mm	\bar{d}_{area} mm
Hel kon			
Spray Eng Co 3 B	35	0,20	0,14
Spray Eng 5B	35	0,32	0,20
Spray Syst.Co 1/4G10	35	0,32	0,27
Spray Syst.Co 3/8G15	35	0,40	0,36
Öppen kon			
Spray Eng Co T-30128	35	0,325	0,27
Spray Eng Co T-45086	18	0,22	0,38
Spray Eng Co T-45086	35	0,22	0,25
Spray Syst.Co 3/8A10	35	0,48	0,27
Monarch Mfg Co	35	0,32	0,22
	35	0,72	0,47

Av tabellen framgår att även för samma håldiameter och samma tryck, olika fabrikat ger olika medeldroppstorlek. Detta beror på flera faktorer:

- o Spridningen mellan munstycken inom samma fabrikat är stor och dimensionerna hos ett munstycke kan variera avsevärt från de nominella.
- o Tillverkningsfel t.ex. orundhet i munstycksöppningen spelar *en* avgörande roll för droppstorleken, se t.ex. Tate m.fl. (1953).

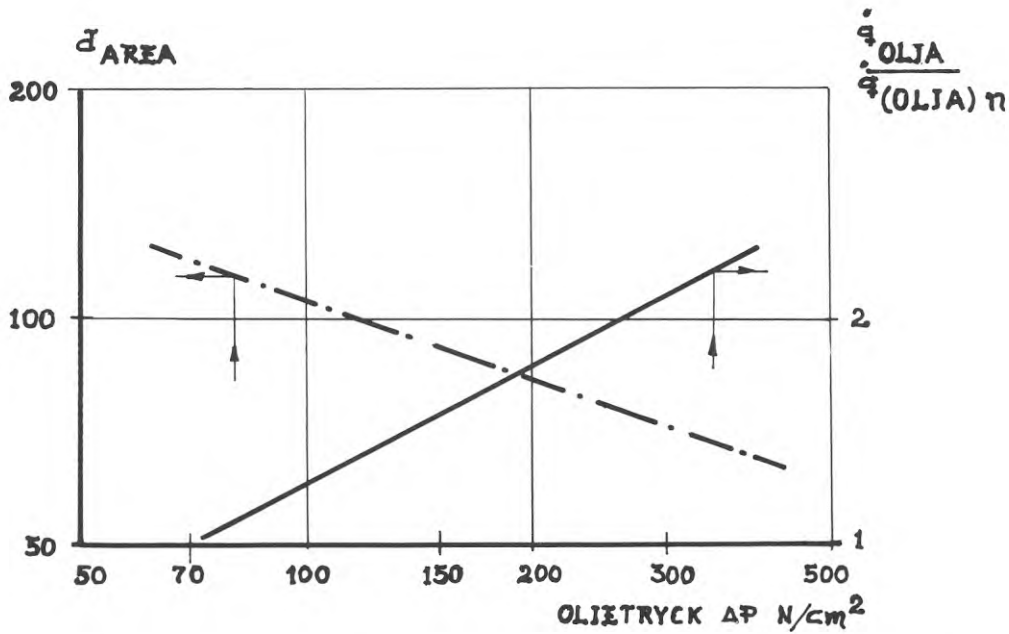


BILD 2:9 Droppstorlek, \bar{d}_{area} , som funktion av oljetrycket vid förstoftning med ett tryckoljemunestycke, samt oljeflödet (uttryckt som relativt flöde $q_{olja}/q_{(olja)n}$, där $q_{(olja)n}$ är oljeflödet (50 kg/h) vid oljetrycket 70 N/cm^2 .

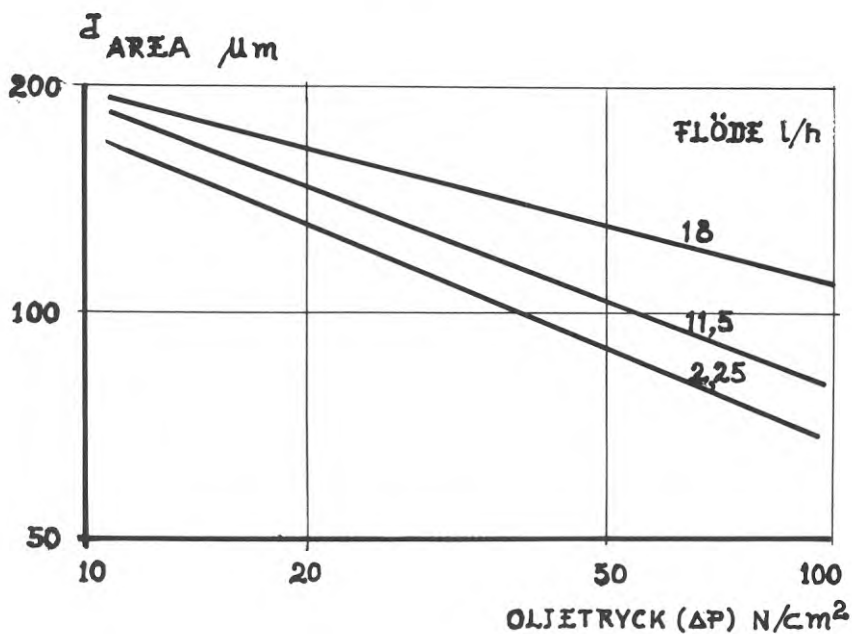


BILD 2:10 Uppmätta droppdiametrar, \bar{d}_{area} , som funktion av oljeflöde och oljetryck vid förstoftning med ett tryckoljemunestycke.

2.3.1.2 Maximala diametern hos dropparna vid tryckolja-brännare.

Maximistorleken av de erhållna dropparna har, som vi senare skall finna, ett mycket starkt inflytande på stoftbildningen. Tate m.fl. (1962) har undersökt droppbildningen för brännarmunstycken och för brännolja vid trycket 70 N/cm^2 och funnit de i bild 2:11 angivna värdena.

(Vid utvärderingen av data har ej den ursprungliga utvärderingen följts helt.)

I bilden har även inlagts värden för \bar{d}_{area} (SMD) och man finner att den maximala droppstorleken är ca 2,2 gånger större än medeldroppdiametern (SMD).

2.4. ROTATIONSBRÄNNARE

2.4.1 Droppbildning vid rotationsbrännare

Vid rotationsbrännare erhålls oljans strömning och bildningen av en oljefilm genom centrifugalverkan, se bild 2:12. Oljeskiktets tjocklek som är avgörande för storleken hos de bildade trådarna, se bild 2:13 bestäms här av:

- o oljeflödet q (kg/s)
- o diametern hos den roterande koppen d_k (m)
- o varvtalet, hos koppen, n (r/s)
- o den vättas omkretsen $L = d_k \pi$ (m)

Allmänt gäller att en ökning av oljeflödet vid i övrigt konstanta förhållanden ger en ökning av droppstorleken, medan en ökning av koppers varvtal, n , ger en minskning av droppstorleken.

2.4.1.1 Dropparnas medeldiameter vid rotationsbrännare.

För den tidigare använda (SMD) Sauter-mean diametern gäller enligt Friedman m.fl. (1952) uttrycket

$$\bar{d}_{area} \approx \text{Konst} \cdot d_k \left\{ \frac{q}{L \rho} N d_k^2 \right\}^r (\mu/q)^s \left\{ \sigma \rho L / q^2 \right\}^t \quad (2:16)$$

där σ är ytspänningen hos oljan

r, s och t konstanter med värdena

$$r = 0,6$$

$$s = 0,2$$

$$t = 0,1$$

(2:17)

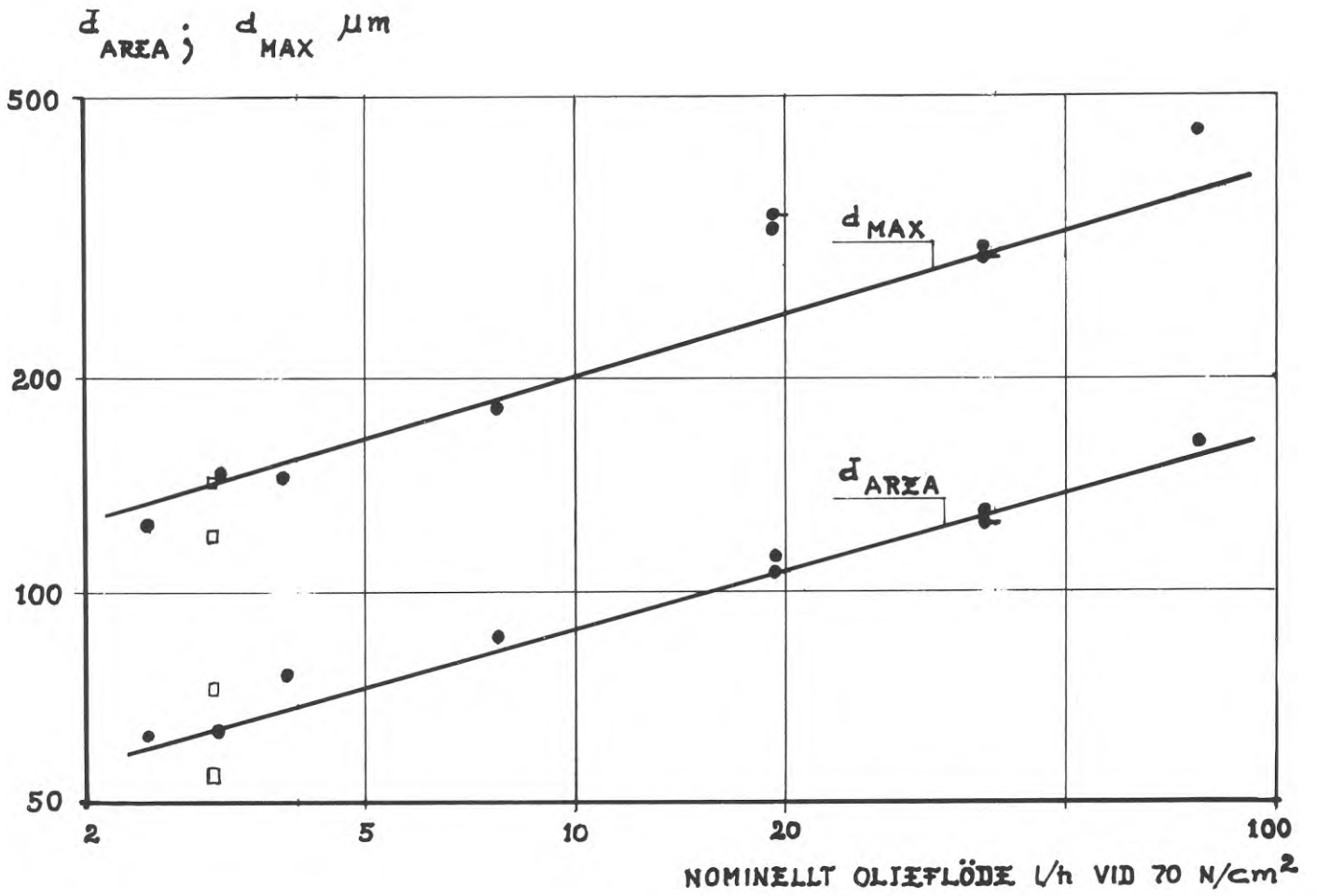


BILD 2:11 Droppfördelning enligt Tate et al (1962) för tryck-
oljemunstycken.

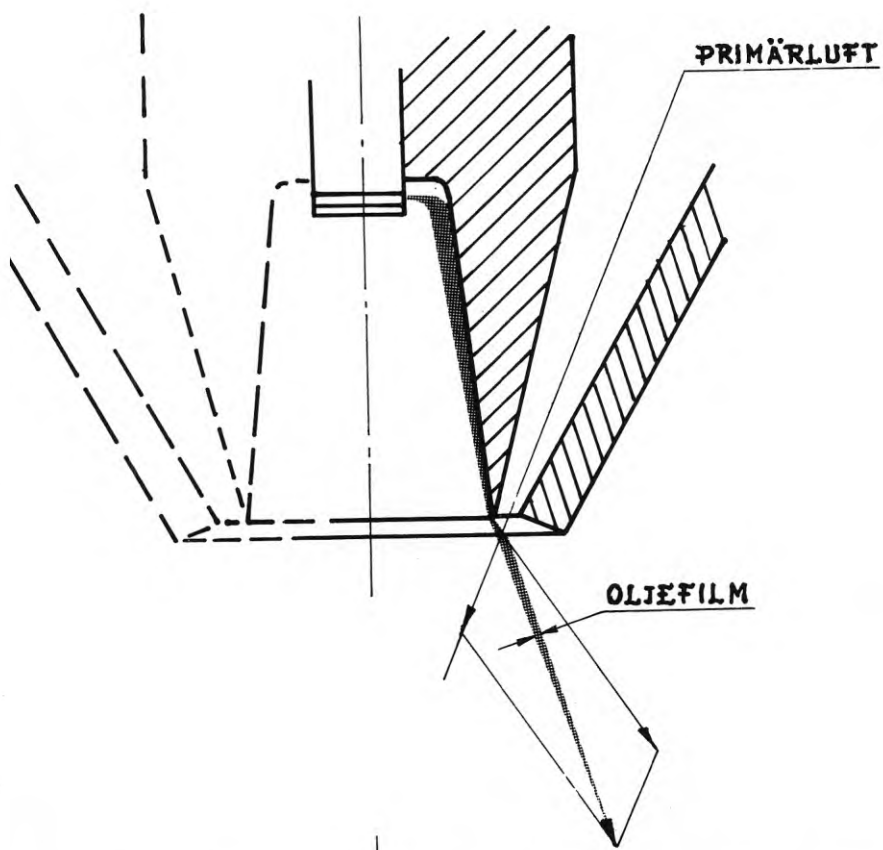


BILD 2:12 Utbildning av oljefilm vid rotationsbrännare.

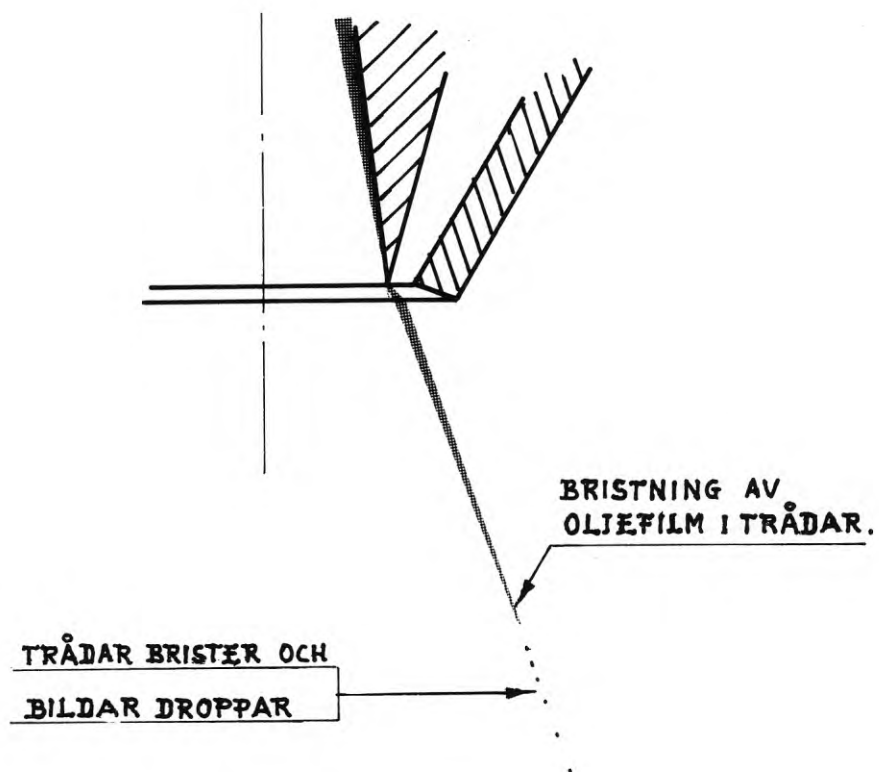


BILD 2:13 Bildning av oljedroppar vid rotationsbrännare.

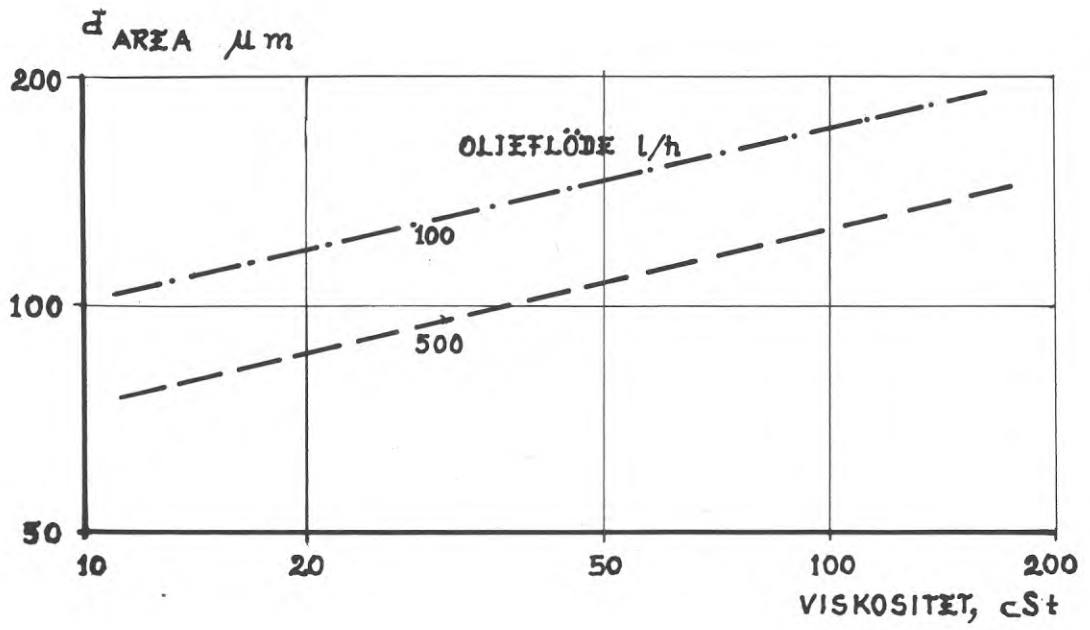


BILD 2:14 Droppdiameter, \bar{d}_{area} , som funktion av oljans viskositet, ν , vid två oljeflöden. Data enligt Fraser (1963).

Ekvation (2:16) ger efter förenkling

$$\bar{d}_{area} \approx \text{konst} \cdot \dot{q}^{0,2} r^{-1,3} \nu^{0,2} n^{-0,6} \quad (2:18)$$

varvid de väsentligaste parametrarnas inverkan framgår (oljans densitet och ytspänning har satts till konstanta värden och ingår i C). En faktor som ej tagits med i ekvationen men som påverkar droppstorleken är lufthastigheten runt den utbildade oljefilmen. Antalet variabler stiger därmed ytterligare och ekvationen blir obekvämt att analysera. Vi skall därför nöja oss med att här peka på betydelsen av de olika faktorerna,

- o Inverkan av viskositeten är som vid tryckoljebrännare relativt liten speciellt om den överstiger 40 å 50 cSt, se bild 2:14.
- o Inverkan av ökande flöde har redan tidigare berörts. I bild 2:15 visas hur en flödesökning vid höga lufthastigheter ger en relativt blygsam ändring av droppstorleken, medan det vid låga lufthastigheter är helt dominerande.
- o Inverkan av lufthastigheten, som ej ingår i Friedmans ekvation, framgår även av bild 2:15. Vid höga lufthastigheter kan inverkan försummas. Gränsen är enligt Fraser m.fl. (1963) ca 100 m/s.
- o Rotationshastighetens inverkan är stor och av samma storleksordning som lufthastighetens. Detta tyder på att man i ekv. (2:16) och (2:18) snarare borde ha förhållandet mellan de båda hastigheterna än enbart varvtalet. I bild 2:16 visas inverkan av rotationshastigheten och lufthastigheten.
- o Spridningsvinkeln, spelar här (liksom vid andra brännartyper) en viss roll vad gäller de erhållna förbränningsresultaten. Spridningsvinkeln varierar vid rotationsbrännare bl.a. med massförhållandet luft - olja och förhållandet mellan luftens och oljans hastigheter, se Fraser (1963).

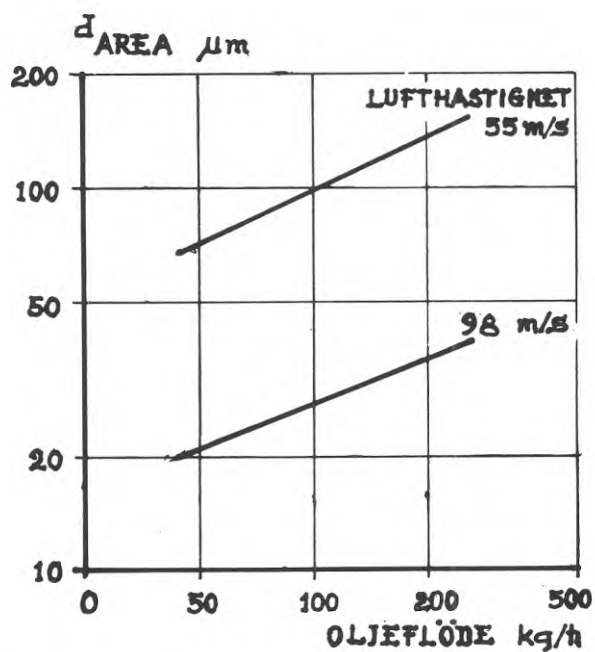


BILD 2:15 Droppdiametern, \bar{d}_{area} , för en rotationsbrännare som funktion av olje- flöde och lufthastig- het. Efter Fraser (1963).

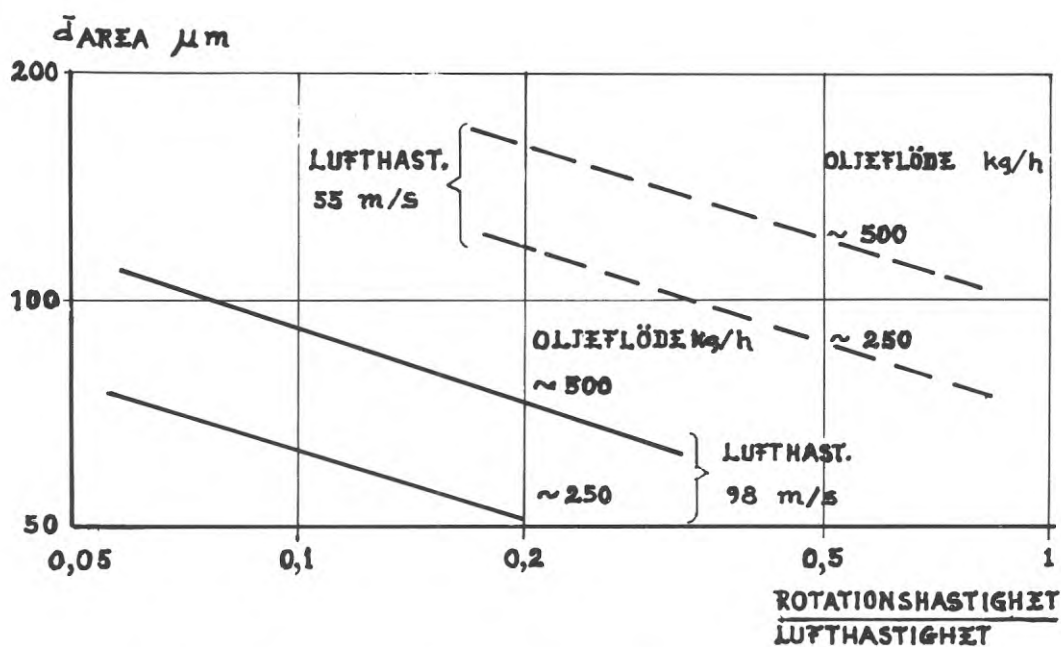


BILD 2:16 Variationer i droppdiametern, \bar{d}_{area} , som funktion av rotations- hastigheten vid varierande lufthastigheter och olje- flöden. Data enligt Fraser (1963).

För kommersiella brännare har Fraser m.fl. (1963) angivit de i tabell 2:2 angivna värdena.

TAB 2:2 Data för kommersiella¹⁾ oljebrännare av rotationstyp vid en lufthastighet av 60 m/s resp. 98 m/s.

Luft- hastig- het m/s	Koppdia- meter mm	Varv- tal r/min	Max.olje flöde kg/h	Olja/luft flödesförh. kg/kg	Droppstor- lek μm vid 33 cSt	
					me- del	max
60	32	2850	85	2,4	96	330
	44	3600	150	1,9	99	335
	44	4500	150	2,7	91	324
	57	4660	185	5,0	87	316
	102	5600	400	1,5	79	305
98	60	3500	230	2,6	60	276
	60	3500	170	3,3	49	258
	75	7500	220	2,0	44	251

2.4.1.2 Maximala droppdiametern vid rotationsbrännare

Fraser m.fl. (1963) har undersökt sambandet mellan medeldroppdiametern \bar{d}_{area} och den största droppens diameter, d_{max} se tabell 2:2. I bild 2:17 visas sambandet mellan de båda och vi kan konstatera att vid stora diametrar gäller att förhållandet mellan d_{max} och \bar{d}_{area} är ca 2 å 3. Fraser anger uttrycket

$$d_{max} \sqrt{\bar{d}_{area}} \approx 0,6 + 43(\bar{d}_{area}^{-11,5})^{-0,612} \quad (2:19)$$

om diametrarna båda anges i mikrometer.

2.5 PRESSLUFTBRÄNNARE

2.5.1 Droppbildning vid pressluftbrännare

I bild 2:18 visas konstruktionen av ett munstycke för en pressluftbrännare. Oljeströmmen i munstyckscentrum sönderdelas vid kontakten med den omgivande primärluften vars relativhastighet, v (m/s) blir avgörande för finfördelningen av oljan. Förutom

1) Fraser m.fl. (1963) anger kompletterande data.

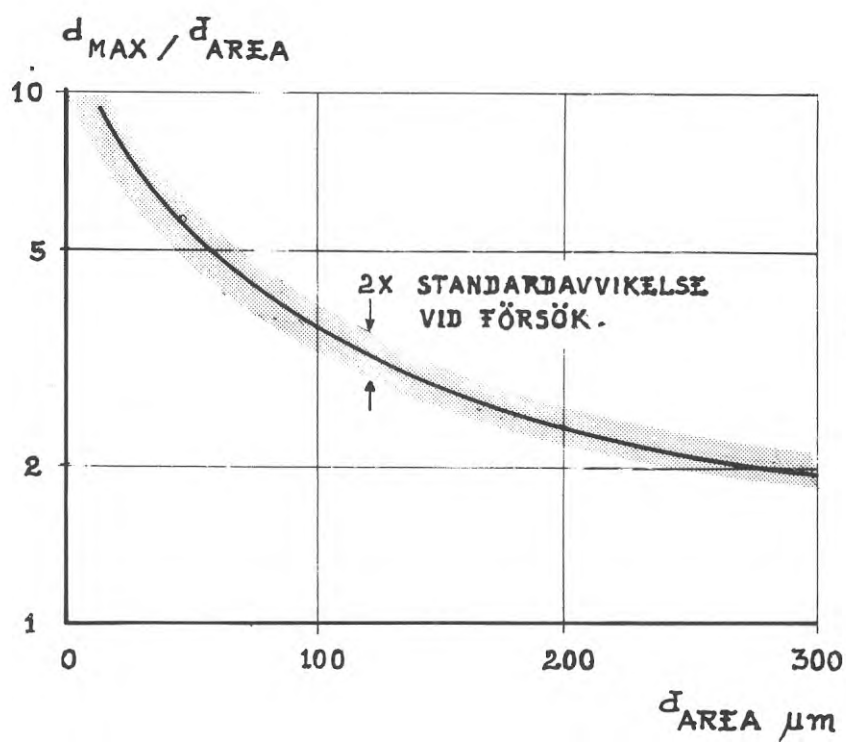


BILD 2:17 Sambandet mellan medeldroppdiameter och den i oljedimman största uppträdande droppens diameter.

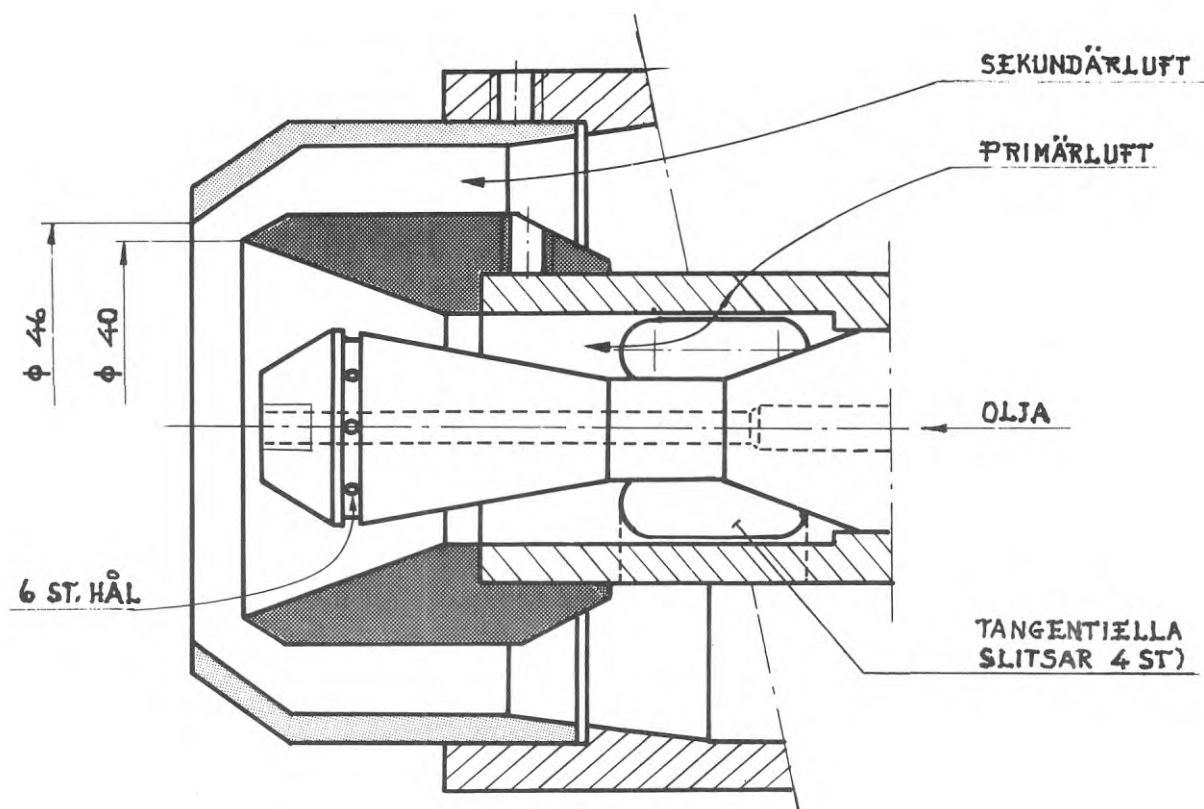


BILD 2:18. Uppbyggnaden av munstycksdelen till en pressluftbrännare.

luftens relativa hastighet spelar munstycksöppningen en viss roll liksom massförhållandet luft/olja. Givetvis betyder även oljans fysikaliska data en del, men vid höga lufthastigheter är oljans egenskaper helt underordnad relativhastigheten.

2.5.1.1 Dropparnas medeldiameter vid pressluftbrännare

Medeldroppstorleken vid pressluftbrännare har undersökts av bl.a. Nukiyama m.fl. (1938-40) som för olja erhåller ett uttryck

$$\bar{d}_{area} \approx 2840/v + 0,45/(q_{luft}/q_{olja})^{1,5} \quad (2:20)$$

där q_{luft}/q_{olja} är det förutnämnda massförhållandet och v primärluftens hastighet. I bild 2:19 visas droppstorleken enligt ekvation (2:20) för olja vid olika massflödesförhållanden och lufthastigheter, v . Som framgår av bilden blir vid höga värden på flödesförhållandet inverkan av viskositeten försumbar och endast värdet på relativhastigheten v avgörande för droppdiametern. Undersökningar av Wetzell m.fl. (1954) ger ej fullständig överensstämmelse med ekv. (2:20) om ej relativhastigheten överstiger 120 m/s, varför diagram 2:19 endast får anses ge approximativa värden inom det streckade området. Det bör dock noteras att man för obetydligt lägre hastigheter får en relativ blygsam avvikelse mellan experimentella värden och beräknade.

2.5.1.2 Maximala droppdiametern vid pressluftbrännare

Fraser (1956) har angivit samhörande data för SMD-värden och maximala droppdiametern, se bild 2:20, för denna typ av förstoftningsmekanism. I bilden är även inlagt data från Edeling (1950). En ekvation för sambandet \bar{d}_{area} och d_{max} kan uppställas

$$d_{max} \approx 13,8 \cdot \bar{d}_{area}^{0,6} \quad (2:21)$$

2.6 SAMMANFATTNING

Avslutningsvis skall här sammanfattas de ovan angivna översikterna över droppbildningen, vid de tre brännartyperna. De experimentella värdena pekar på att man vid de tre brännartyperna

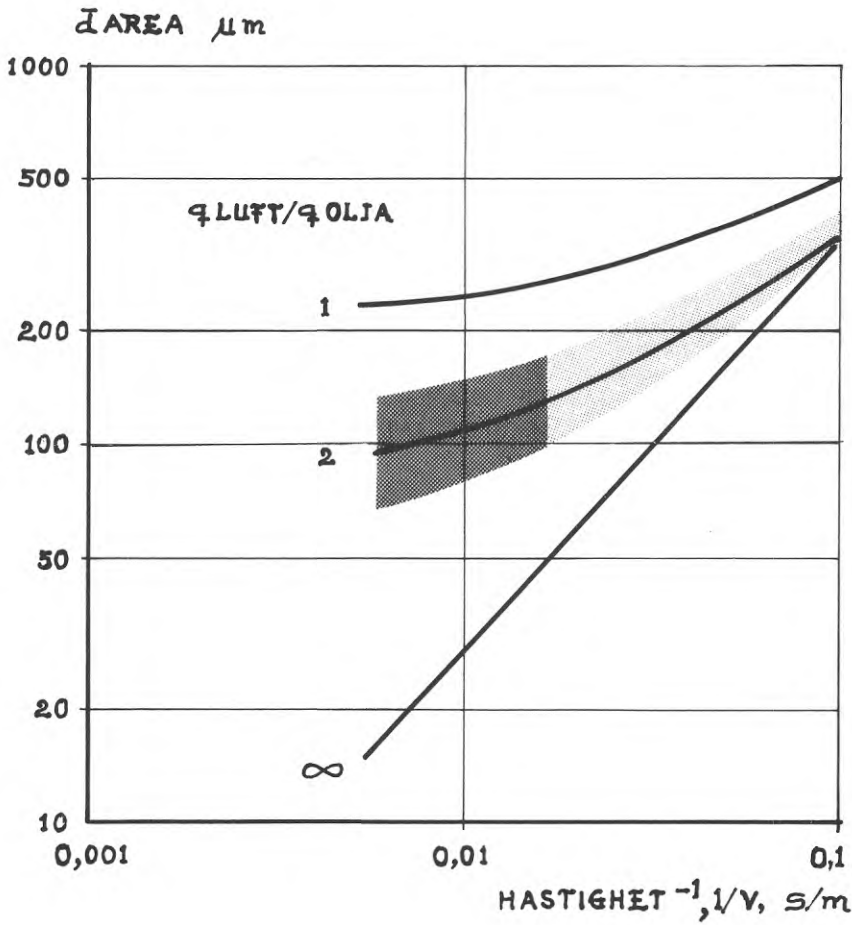


BILD 2:19 Droppdiametern, \bar{d}_{area} , som funktion av kvoten mellan luft- och oljeflödenas massa, samt som funktion av förstoftningsluftens hastighet, v .

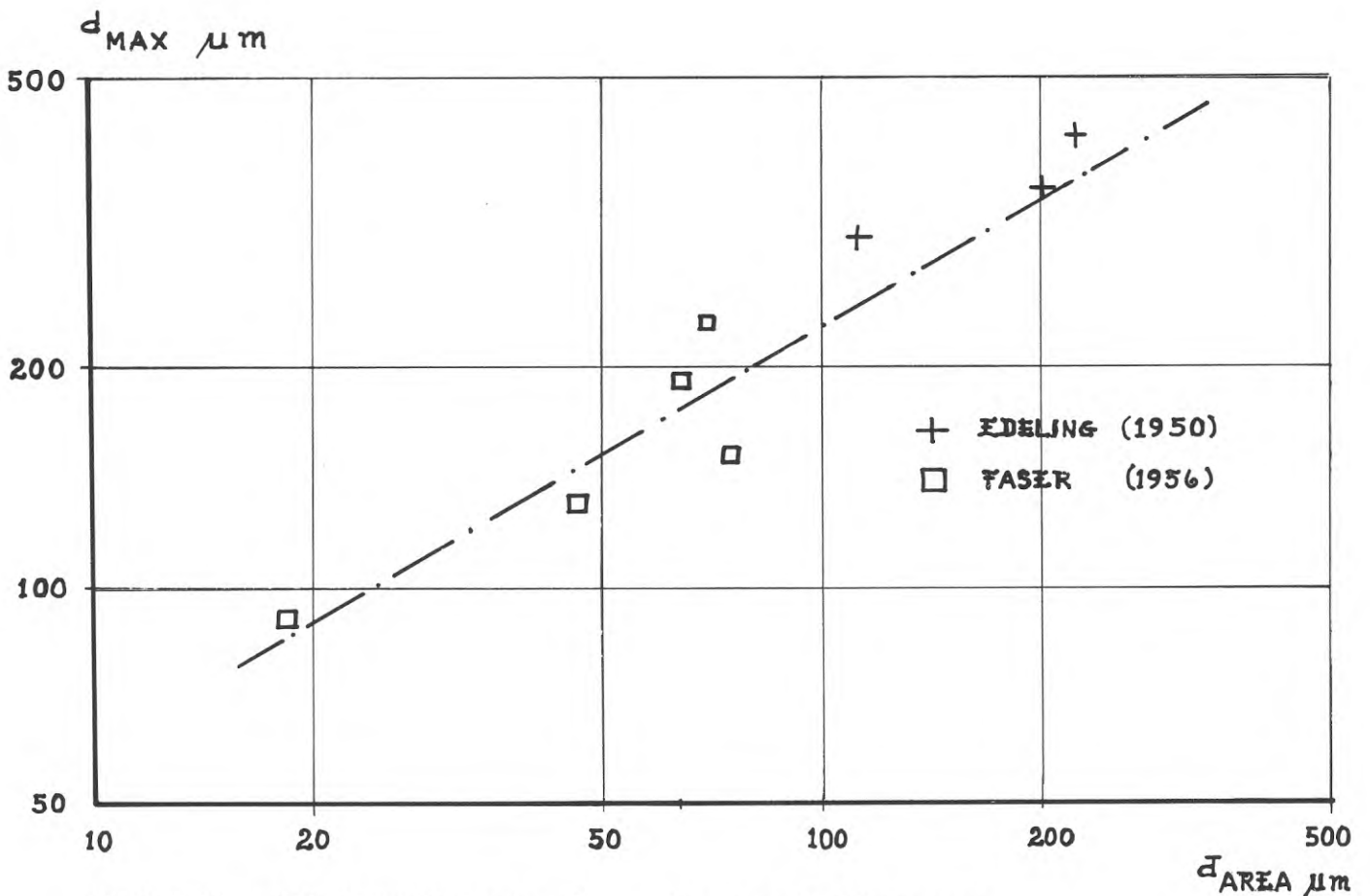


BILD 2:20 Oljedroppdiameter, d_{max} , för pressluftbrännare.

får följande droppstorlekar (normalvärden)¹⁾:

o tryckoljebrännare för 50 kg/h

drifttryck N/cm ²	medeldiameter mikrometer	maximal diameter mikrometer
7	130	260
15	100	220
30	70	150

o rotationsbrännare för 50 kg/h, 3000 r/m $d_{kopp} = 100$ mm

lufthastig- het m/s	medeldiameter mikrometer	maximal diameter mikrometer
60	50	270
90	30	270
120	25	240

o pressluftbrännare för 50 kg/h, $q_{luft}/q_{olja} = 2$ kg/h

lufthastig- het v, m/s	medeldiameter mikrometer	maximal diameter mikrometer
25	200	350
50	100	200
100	50	150
200	25	100

Rotationsbrännaren ger således de minsta medeldroppstorlekarna inom det för oljeeldning aktuella driftsområdet medan pressluftbrännaren ger de minsta maximivärdena. Tryckoljebrännaren ger höga maximivärden men normala medelvärden vid låga tryck. Vid höga oljetryck är den fullt likvärdig de övriga typerna vad gäller den maximala diametern men ger då relativt höga medelvärden.

1) Valet av kapacitet är godtyckligt. Förhållandena vid andra kapaciteter kan lätt uppskattas ur tidigare angivna ekvationer.

3. STOFTBILDNINGSMEKANISMER

Redan enkla experiment med förbränning visar att olika ämnen har väsentligt skilda sotbildningsegenskaper. Så kan exempelvis metylalkohol knappast bringas att ge sotande låga medan stearin ger en gul flamma innehållande glödande sotpartiklar även vid riklig lufttillförsel och bensen vid öppen förbränning ger en kraftigt sotande flamma.

Innan vi går närmare in på sotbildning under olika förhållanden kan det finnas skäl att stanna något inför de olika slag av sot och oförbrända partiklar som bildas vid oljeeldning.

3.1 OLIKA SLAG AV SOT.

Vid förbränning av olja uppkommer sot av olika slag. Man brukar skilja mellan:

- o Flamsot
- o Oljekoks
- o Cenofärer

3.1.1 Flamsot

I bild 3:1 visas förbränningen av en oljedroppe. I diffusionsflamman runt droppen förekommer sotpartiklar - flamsot - med en partikeldiameter som avsevärt understiger 1 mikrometer, se bild 1:2.

Sotets kornstorleksfördelning varierar med bildningssättet, och även om oljesot ej direkt har undersökts kan det vara av intresse att närmare studera partikelstorleken av *flamsot*. Som vi senare skall finna bildas flamsotet genom kracknings-, polymerisations- och kondensationsprocesser i förångningszonen mellan droppen och flammen - se bild 3:1 -, d.v.s. i en zon som påminner om den man erhåller vid förbränning i en gasflamma strax före flamzonen. Undersökningar över förhållandena i sådana flammor pekar mot en ytterligt liten partikelstorlek och mycket höga partikelantal/volymsenhet, se tabell 3:1. I bild 3:2 visas partikeldiameterens fördelning för ett flamsot. Som framgår av bilden är diameterens **storlek approximativt normalfördelad**.

BILD 3:1 Förbränning av en oljedroppe - schematiskt.

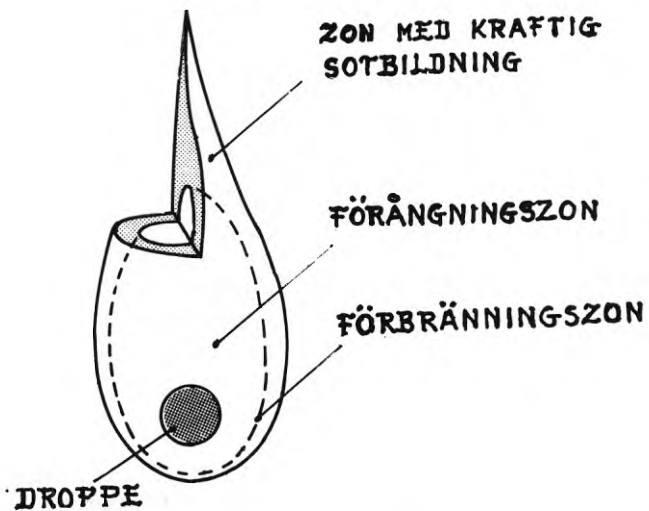
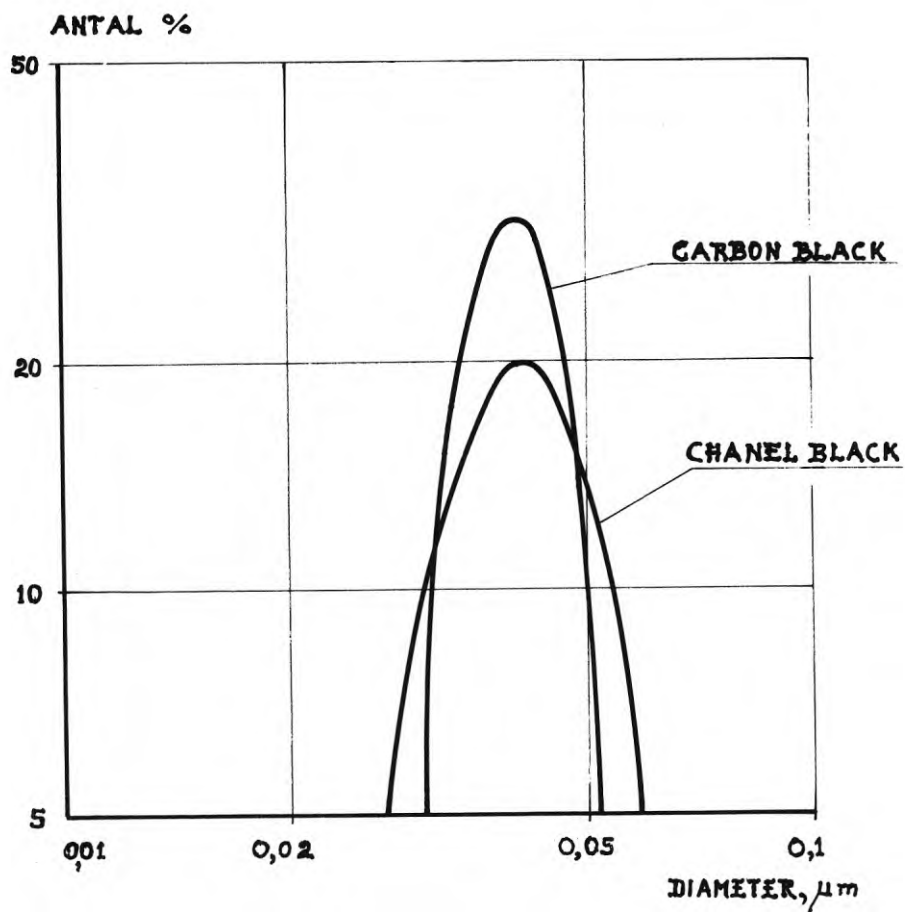


BILD 3:2 Kornstorleksfördelning för flamsot. Data efter Tesner (1958).



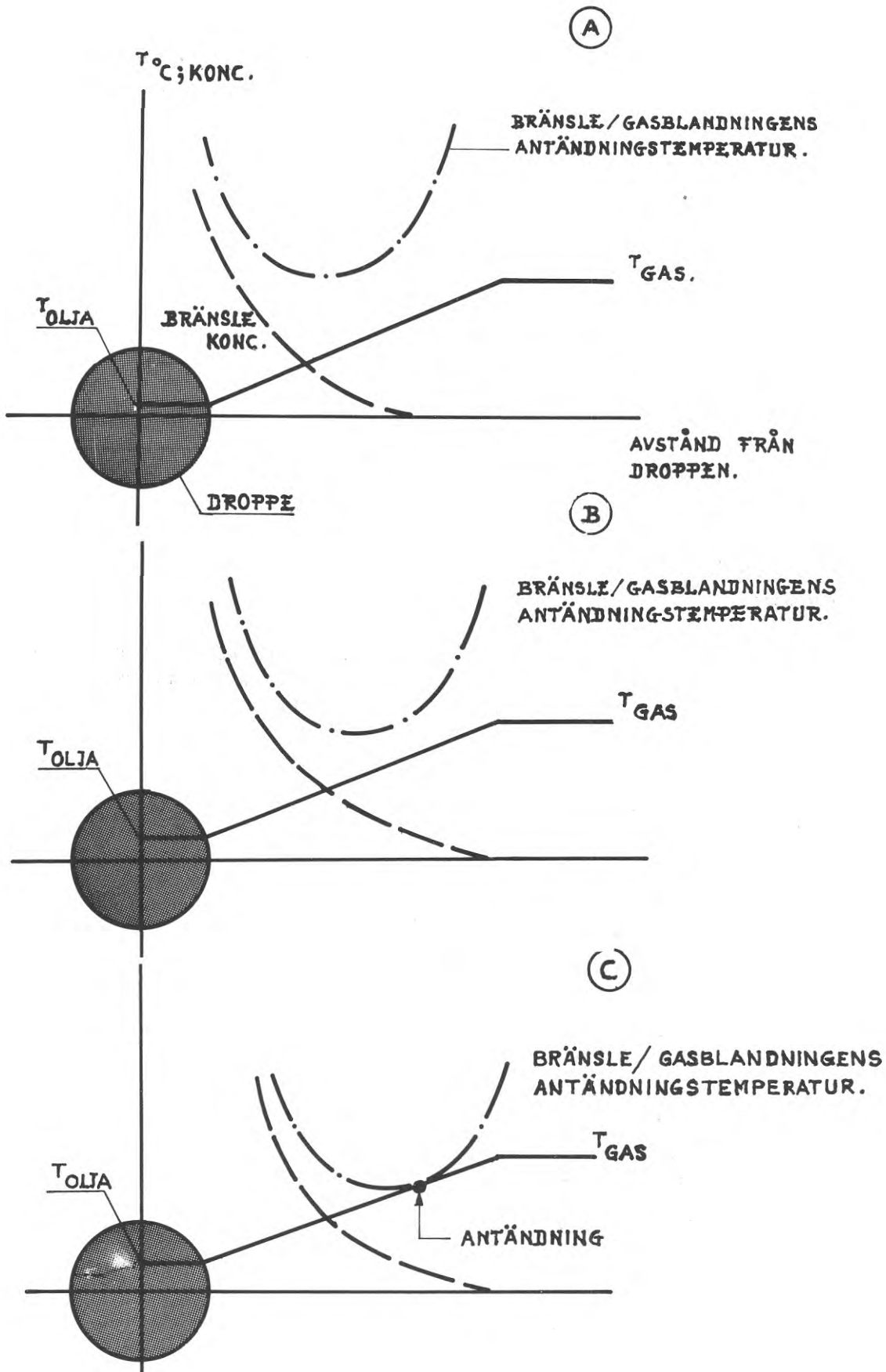


BILD 3:3 Temperatur och koncentrationsförhållanden kring droppen strax efter insprutning i förbränningsrummet (A), efter en tids uppvärmning, men före antändning (B) och i antändningsögonblicket (C).

TAB 3:1 Sot i flammor

Flamma	Antal partiklar per g sot	Antal partiklar per cm ³ flamvolym	Partikel-diameter mikrometer	Sot i flamma g/cm ³	Källa
<u>Nyare mätningar</u>					
Carbon black	$11,9 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{10}$	0,0432	$5 \cdot 10^{-6}$	Tesner (1958)
Channel black	$12,8 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{12}$	0,0431	$6 \cdot 10^{-4}$	Tesner (1958)
Hefner-flamma			0,025		Pepperhoff (1962)
Lysgas			0,0175		
Stearin-flamma			0,0125		
Acetylen			0,006		
Stearin-flamma			0,0125		Pepperhoff (1952)m.fl.
<u>Äldre mätningar</u>					
Hefner-flamma	10^{14}	10^9	0,175	10^{-5}	Sentfleben (1917)
Gasflamma			2,6		

Förångningen från en oljedroppe som införs i ett kraftigt upphettat förbränningsrum startar redan innan droppen nått "olje-flamman". Sedan förångningen nått en sådan omfattning att blandningen "oljeånga"/luft i droppens omgivning fått en antändningstemperatur som överensstämmer med den lokala gastemperaturen antänds droppen, se bildserie 3:3.

Mellan droppytan och den utbildade flamman finns en förångningszon i vilken ingen förbränning, men väl andra kemiska reaktioner äger rum. Temperaturen är här relativt hög, se bild 3:4 och stora och relativt instabila molekyler kommer här att brytas ned till mindre och vanligen mer stabila produkter bl.a. rent kol. Reaktionerna kan även bestå av kondensationer och polymerisationer, då mindre molekyler eller molekylidelar (radikaler) slår

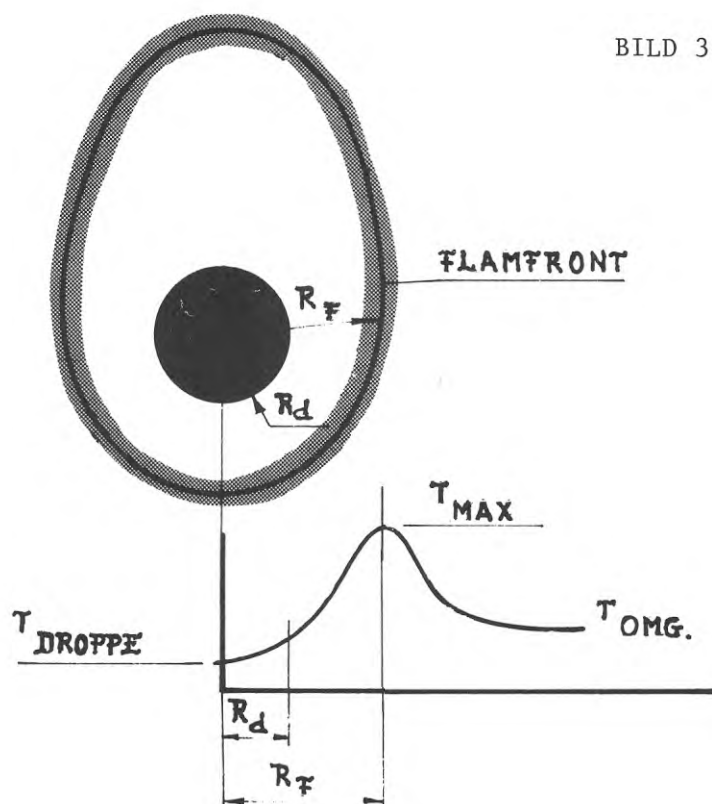
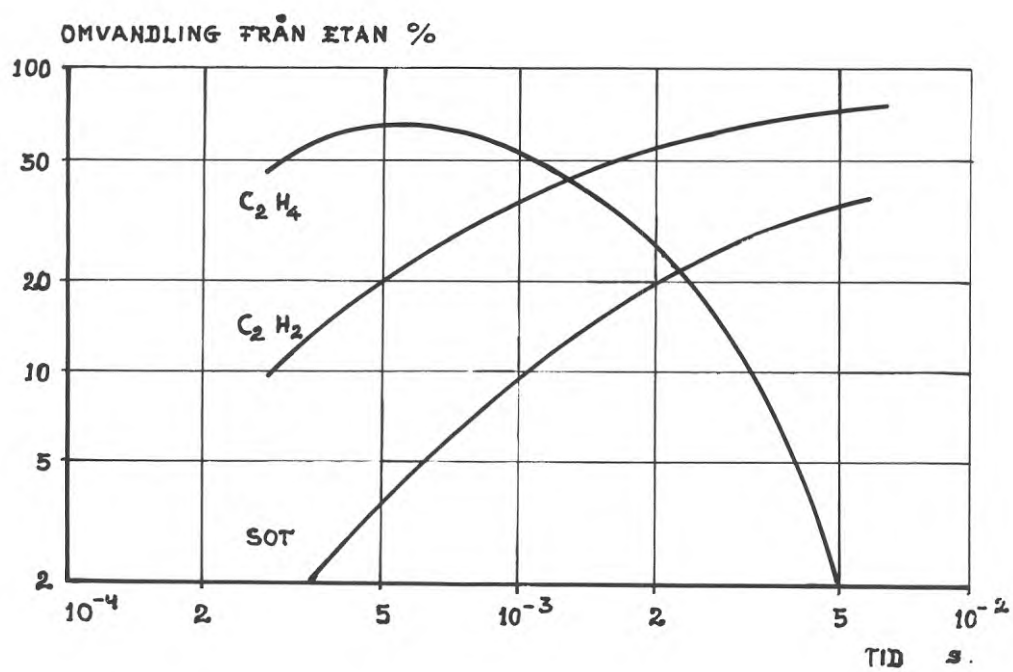
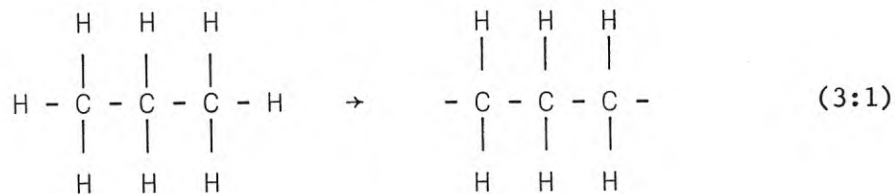


BILD 3:5 Sönderdelning av etan



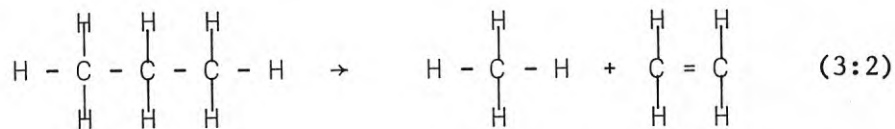
sig samman och bildar större, ofta mer "svårbrännbara", produkter. I det följande skall vi se närmare på några olika typer av kolväten och de reaktioner som i varje särskilt fall är aktuella.

Alkaner (paraffiner) är mättade kolväten bestående av raka eller grenade kedjor. Normalt är paraffinerna stabila, men vi uppvärmning kan de sönderfalla varvid vanligen fria radikaler bildas i ett första sönderdelningssteg:



Samtidigt avspjälkas vätgas.

I vissa fall sker även en bildning av omättade kolväten - framförallt acetylen, C_2H_2 - vilket ämne antas svara för en stor del av sotbildningen i flammor.



Vid sönderdelningen bildas ej blott acetylen utan även metan, CH_4 . Den termiska omvandlingen av metan sker troligen i flera steg:



varvid etan, C_2H_6 bildas.

Av etan sker sedan en termisk sönderdelning varvid sönderfallsprodukterna kan vara etylen, acetylen och sot, se bild 3:5.

Det är av intresse att se på uppehållstiden för oljeånga i förångningszonen. Man kan då överslagsmässigt utgå från att en olje-

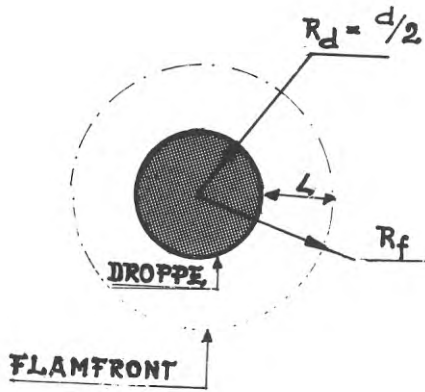


BILD 3:6 Beteckningar för flam- och droppdimensioner.

BILD 3:7 Sotbildning i flamtoppen. Efter Masdin (1960a)



BILD 3:8 Brytning av värmestrålning till droppens inre.

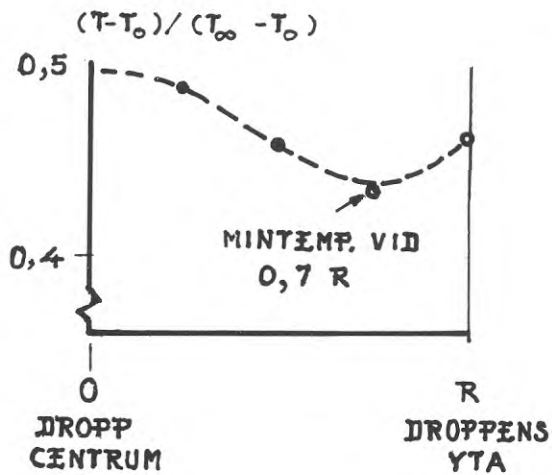
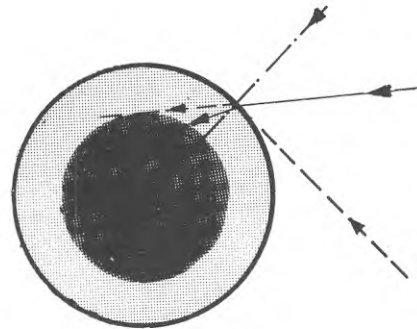


BILD 3:9 Lokala temperaturer i oljedroppen.

Använda beteckningar:
 t tid efter antändning
 a oljans temp. ledn. tal
 T ursprunglig temp.
 T^0 omgivningens temp.
 T lokal temperatur

Bildens data gäller för $kR = 1$, där k är absorptionsfaktorn för värme-strålning.

droppe med diametern d (meter) förbrinner på

$$10^6 \cdot d^2 \quad \text{sekunder}$$

Hela droppens massa - $\pi d^3 \rho_0 / 6$ kg - förångas under denna tid vilket innebär att den bildade ångmängden är

$$\rho_0 \frac{\pi d^3}{6} \frac{22,4 T}{M 273} \quad (\text{m}^3) \quad (3:4)$$

där M är medelmolekylvikten (ca 100 u) och T ångans temperatur. Är avståndet mellan oljedroppens yta och flammzonen L (meter) se bild 3:6 kommer ångans uppehållstid i förångningszonen att approximativt vara

$$t = 7000 d L (1 + L/d)^2 \quad (3:5)$$

där ρ_0 satts till 900 kg/m^3

M till 100 u och

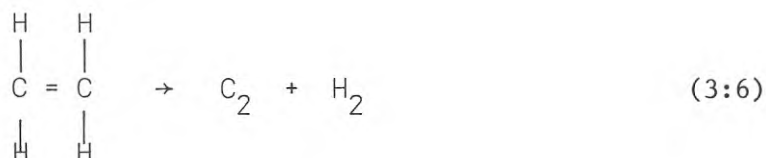
T till $1200 \text{ }^\circ\text{K}$

Oljedroppar har normalt en diameter av 25 - 100 mikrometer och avståndet mellan droppen och flammen är i medeltal ca 200 mikrometer. För en droppe med diametern $d = 100$ mikrometer erhålls därmed en uppehållstid av $1 \cdot 10^{-4}$ sekunder. För $L = 400$ mikrometer erhålls däremot ca $7 \cdot 10^{-4}$ sekunder. Som framgår av bild 3:5 blir sotbildningen i det senare fallet ca 5 % av den omvandlade etanens massa medan den i förra fallet är försumbar. I bild 3:7 visas den praktiska konsekvensen av det sagda. Sotbildningen i flammen runt droppen är relativt låg medan sotbildningen i flammans topp är väsentligt högre. A. Sjøgren (1970) har påpekat att den relativa strömningshastigheten mellan droppen och gasen påverkar den lokala flammans läge i förhållande till droppen så att en hög relativhastighet (vare sig den beror på hög dropphastighet eller hög lufthastighet) medför en ändring av flamformen mot ett längre avstånd L enligt ovan. Härvid kan

som vi sett en sönderdelning av exempelvis etan (eller andra likartade kolväten) ske i högre grad med sotbildning som följd.

Olefiner finns ej i råoljorna, men bildas vid raffineringprocesserna. Vid pyrolys av dessa kolväten bildas samma produkter som vid pyrolys av alkaner, men dessutom i hög grad kondenserade kolväten, s.k. diolefiner, eller aromatiska kolväten. Diolefiner och aromater har betydligt högre sotbildningstendens än olefiner och paraffiner, se bild 1:11.

Acetylen, som bildas vid sönderdelning av andra kolväten har av flera forskare angetts som den huvudsakliga komponenten vid bildning av flamsot. Porter (1953) har pekat på att den polymerisation som sker vid temperaturer över 1000°C och som leder till bildning av aromater eller andra tyngre kolväten under 1000°C kastas om och leder till en ökning av halten lättare kolväten. Acetylen spjälkas därvid till kol och väte:



Den uppmätta bildningen av C₂ är emellertid ej tillräckligt hög för att motsvara sotbildningen. Denna sker således på ett mer komplicerat sätt (samtidig polymerisation och avgivande av väte) varvid stora molekyllängder med hög kolhalt bildas.

3.1.2 Oljekoks

En viss del av det bildade "stoftet" härrör från droppar som mer eller mindre oförbrända passerat flammen (bild 3:13c).

Flera orsaker medverkar till detta förhållande:

- o Vissa oljedroppar har en olämpligt hög hastighet i förhållande till gasmassan i förbränningsrummet och antänds följaktligen ej. De undergår en viss förångning vilken dock blir relativt liten med hänsyn dels till den korta uppehållstiden, dels till den avsevärt lägre värmeöverföring som erhålls från

gasmassan än från en närliggande flamma.

- o Vissa droppar som antänds har så hög hastighet att de med hänsyn till den låga syrehalten i flammans slut kommer att slockna där.
- o Droppar kan träffa kylta ytor och därmed slockna med stora mängder oförbränt som följd. Detta är förhållandet vid för trånga pannor där flamrummets dimensioner ej avpassats till flaman.

Det kan här vara lämpligt att påpeka att man på grund av de senare faktorerna får en *ökning av stoftbildningen med minskande luftöverskott* (lägre CO_2 -halt) och med *hög eldstadsbelastning* (högre tillförd effekt) men också med *alltför hög lufttillförsel* (ökande hastighet).

3.1.3 Cenofärer

Vid förbränning av tyngre oljor bildas även s.k. cenofärer, se bild 1:1. Cenofärerna bildas som vi senare skall få se på droppens yta och är därför av samma storleksordning som de enskilda dropparna.

Cenofärernas storlek avhänger i hög grad av droppstorleken vid atomiseringen samt av oljeslaget.

Droppen har under tiden från införandet i förbränningsrummet och fram till antändningen uppvärmts dels till följd av ledning dels genom strålning från flaman. Strålningen leder till en ökad uppvärmning av droppens inre, där temperaturen kan stiga över kokpunkten för de lättare kolvätena, se bild 3:9 .

Detta medför att droppens volym ökar - ofta i högre grad än vad den rena volymutvidgningen vid uppvärmning till kokpunkten kan svara för - vilket åskådliggörs i bild 3:10.

Den ökade volymen medför att - speciellt större oljedroppar - ger upphov till cenofärer med större diameter än den ursprungliga droppens.

Försök - se tex.Masdin (1960)- pekar på att man kan approximerade cenofärdiametern med en potensfunktion av den ursprungliga droppdiametern:

$$d_{\text{cenofär}} \approx \text{konst} \cdot d_{\text{droppe}}^n \quad (3:7)$$

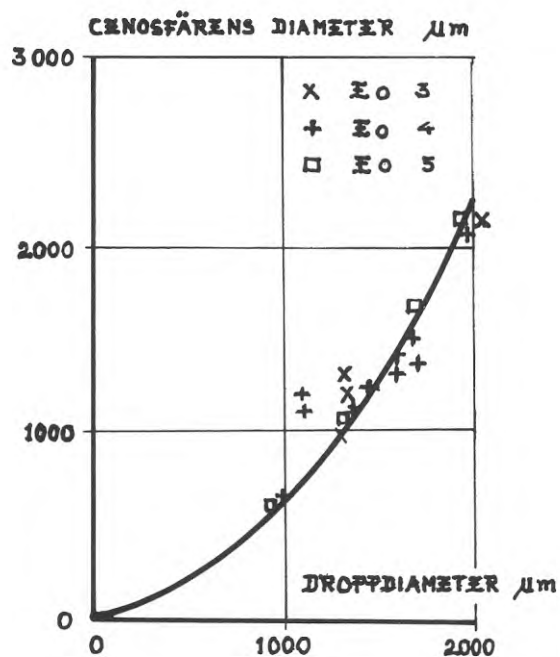


BILD 3:10 Cenosfärernas diameter som funktion av droppdiametern.
(Diagr återgivet efter Peterson (1970) efter rättelse av tryckfel)

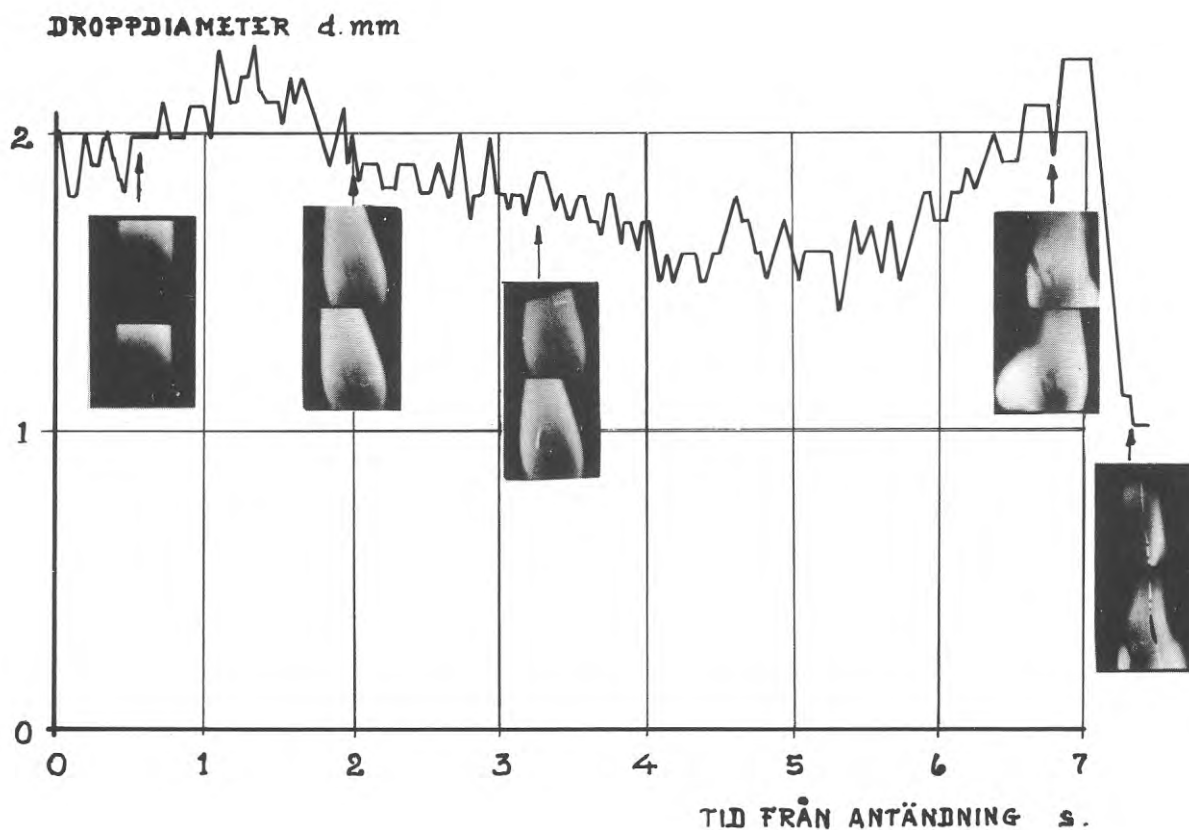


BILD 3:11 Droppdiameterens variation under förbränningen. I bilden visas även flammans utseende vid några tillfällen. Man bör observera att det även efter förbränningens slut (sista infällda bilden) får kvar en partikel med relativt stor diameter.

där d **droppe** är oljedroppens diameter och

$d_{cenosfär}$ är den bildade cenosfärens diameter

I bild 3:10 visas resultat av några försök med olika oljor, se Peterson (1967).

Som framgår av bilden gäller (för EO)

$$n = 2 \quad (3:8)$$

Detta överensstämmer helt med försöksresultat av Masdin (1960). Masdin använde andra bränsletyper, varför sambandet verkar relativt generellt.

Ett närmare studium av droppdiameterns storlek under hela förbränningsprocessen pekar även på den förut omtalade ökningen i droppdiameter, se bild 3:10 och 3:11. Sedan ökningen skett - det handlar här om en relativt liten del av droppens totala livslängd - sker förbränningen under i stort sett konstant diameter, se bild 3:11. Här skiljer sig förbränningen av återstodsolja från den vid destillatolja, som (se bild 2:1) sker under en ständig minskning av droppdiametern. Vid destillatolja erhålls ej heller cenosfärer utan här har man endast att göra med det förutnämnda flamsotet. Vid förbränning av eldningsolja innehållande högmolekylära komponenter - asfaltener - sker samtidigt en termisk omvandling - koksbildning - i de yttre skikten av droppen. Efter det att 30 - 40 % av oljedroppen har avgått har således ett ofta relativt fullständigt koksskal utbildats, se bild 3:11. Koksskalet kan under den fortsatta förbränningen sprängas på grund av inre ångtryck. Vid sådana sprängningar sker en utströmning av gas och olja från det inre av droppen och det bildas en extra flamma intill den ursprungliga.

Under senare delen av droppens livslängd ökar sprängningstendenserna ytterligare, vilket kan leda till deformationer av cenosfären, se bild 3:12.

En närmare undersökning av de bildade cenosfärerna visar att de består av ett ytterst tunt skal, se bild 3:13. Skalet upptar

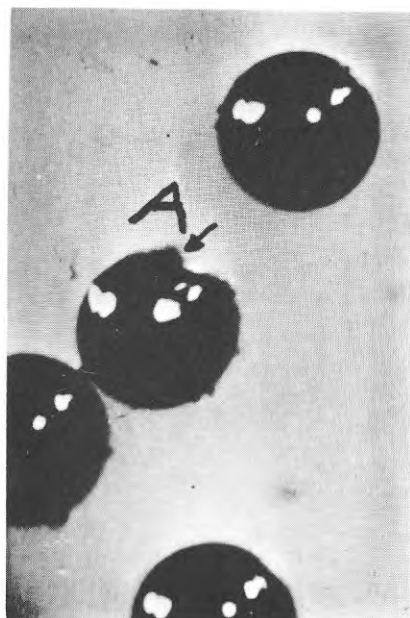
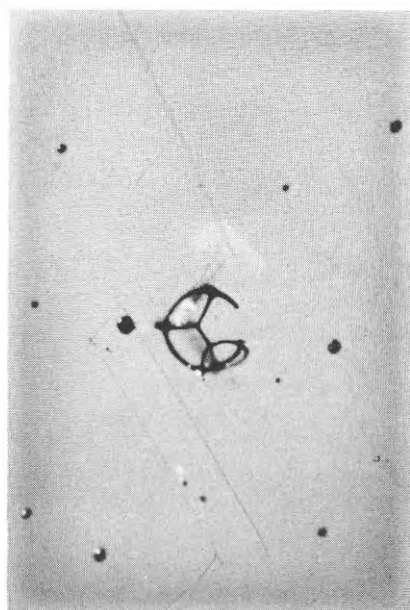


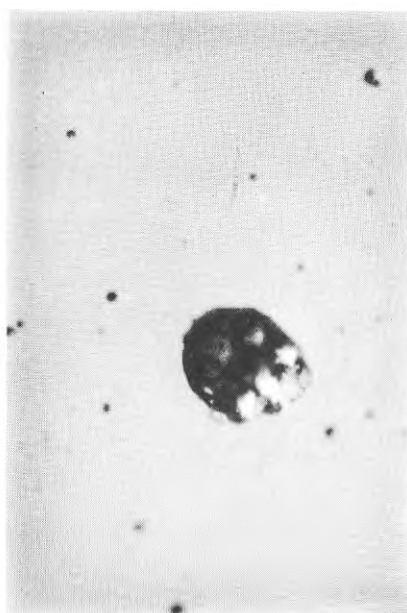
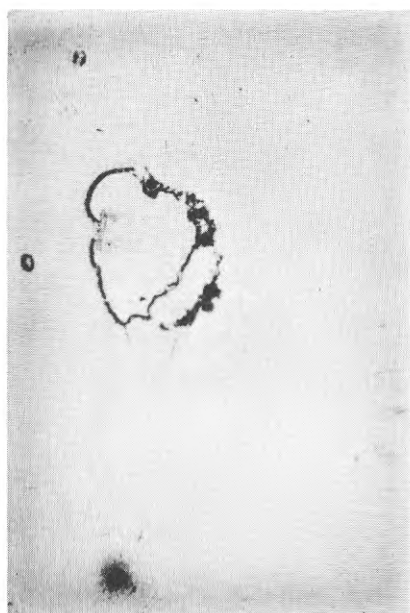
BILD 3:12 Cenosphärerna kan, som här vid A i bilden, få deformationer och skador vid sprängningarna under förbränningen.



- a) BILD 3:13 a) Cenosphär bestående av ett tunt genomsynligt skal.
- b) Skuren cenosphär. Man kan observera det ytterst tunna skallet. Cenosphärens diameter är ca 100 mikrometer.
- c) Cenosphärerna måste skiljas från de oförbrända oljedroppar som kan passera flammen.

b)

c)



endast några få procent av droppens diameter, och den inre hålligheten medför att cenosfärerna är mycket lätta i förhållande till den relativt stora volymen, och därmed svåra att omhänderta i cykloner.

I cenosfärer finner man ofta, se Peterson (1971) en förtjockning, se bild 3:14 vilken svarar för ca 90 - 95 % av hela cenosfärens massa. Denna del av cenosfären tycks härröra från de högmolekylära komponenterna i oljan - t.ex. asfaltener.

Cenosfärbildningen, som är en följd av den termiska omvandlingen i oljan avhänger av dropptemperatur och uppehållstid i flammen. Kvalitativt kan effekterna sammanfattas till

- o Lång uppehållstid - t.ex. vid stora droppdiametrar - medför en ökning av cenosfär- och koksbildningen.
- o Hög värmeöverföring till droppen - t.ex. som en följd av att avståndet mellan flamma och droppyta är litet (strömningseffekter) - medför en ökning av koksbildningen.

Bildningen av cenosfärer och oförbrända oljekoks avhänger av oljans kemiska sammansättning. Vissa oljor uppvisar således en kraftig tendens till snabb förkokning, vilket medför en kraftigare tendens till cenosfärbildning och därmed en våldsamt stegrad sotbildning vid förbränningen i jämförelse med den hos andra oljor. Det förtjänar här påpekas att cenosfärerna, tillsammans med de förutnämnda oförbrända droppresterna, svarar för den ojämförligt största delen av sotbildningen; flamsotet ger 0,2 à 0,5 g/kg olja, cenosfärer och oljekoks ger upp till 5 g/kg olja och askan svarar för ca 0,1 - 0,3 g/kg olja.

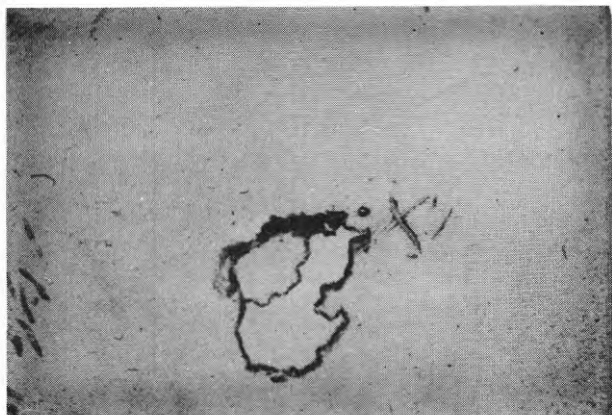


BILD 3:14 En serie försök avseende att belysa cenosfärernas uppbyggnad har visat att cenosfären består av ett tunt skal, vanligen med en inre förtjockning, se även bild 3:13. Förtjockningen svarar för ca 90 % av cenosfärens massa.

3.1.4 Förbränning av stoft

Det kan här vara på sin plats att något beröra det tidigare introducerade begreppet nettobildning av stoft. Som visats ovan sker en bildning av tre olika stoftslag (flamsot, oljekoks och cenosfärer). Det bildade stoftet reduceras dock i viss grad genom förbränning i flammen. Redan av bild 3.7 framgår detta i och med att flammen är lysande (förbränning av flamsot). Förbränningen av flamsot och cenosfärer, som undersökts av Masdin (1960) har här ej beaktats av praktiska skäl. I stället har den för luftvården väsentliga stoftemissionen (nettobildningen), som utgör differensen mellan bildad stoftmängd och förbränd stoftmängd, beaktats. Inledningsvis har nämnts att i denna skrift beteckningen stoftbildning ersatt det längre, men kanske mer adekvata begreppet, nettobildning av stoft.

Praktiskt är den ursprungliga stoftbildningen svår att uppskatta vid fältförsök, och även laboratoriemätningar av bruttobildningen uppvisar en rad felkällor. Den är dock ej ointressant, och i ett kommande arbete skall vissa beräkningsvägar för bedömning av den påvisas. En kännedom om bruttobildningen öppnar nämligen möjligheter till konstruktiva åtgärder för att minska stoftemissionen från anläggningar. I det följande skall en rad sådana åtgärder anvisas varvid bedömningen av lämpligheten och effektiviteten skett med nettobildningen som utgångspunkt.

4. LABORATORIEEXPERIMENT

4.1 PROVUPPSTÄLLNING

Som vi flera gånger haft tillfälle konstatera kan stoftbildningen från olika oljor vara väsentligt olika, bl.a. beroende på den använda råoljans *sammansättning, behandling* (speciellt om krackning eller annan mer omild behandling görs) och dess *termiska historia* före förbränningen. Dessa och andra faktorers inverkan på stoftbildningen har hittills ej räknemässigt kunnat bestämmas med någon större grad av noggrannhet. Vissa enkla regler av typen "lågsvavliga oljor har generellt en lägre sotbildning än normalsvavliga" har även kunnat vederläggas i denna studie. Regler av denna typ kan dock användas med viss säkerhet för destillatolja, som kemiskt och fysikaliskt sett är en betydligt mer väldefinierad produkt än blandningsolja av återstodsoljor och destillatoljor. För sådana oljor måste stoftbildningen bestämmas genom försök, varvid en normal värmecentral kan användas vid försöken.

Försök vid en sådan anläggning ger dock upphov till stora problem, bl.a. på grund av följande:

- o Brännaren kan vara känslig för små variationer i oljeviskositet. I ett sådant fall kan en minskning i oljetemperaturen ge en sämre sönderdelning av oljan och därmed en ökning av stoftbildningen.
- o Pannan och installationen är ofta så utförd att en god mätpunkt för stoftmätningen ej finns, se t.ex. avsnitt 7. Mätningar vid förbränning av olika oljor kan i ett sådant fall ge olika stoftfördelning i kanalen och därmed felaktig jämförelse mellan oljorna, såvida ej mätningen vidtas under iakttagande av speciella försiktighetsåtgärder.
- o Belastningen på värme pannan är ej konstant vid en normalt använd central. Ibland kan belastningen dock vara konstant speciellt då *flera pannor finnes, värmeeffektbehovet är större än vad en panna ger, men ej så stort att alla pannor (inkl. experimentpannan) berörs* och dessutom *installationen gjorts så att den använda pannan kan arbeta under konstanta förhållanden.*

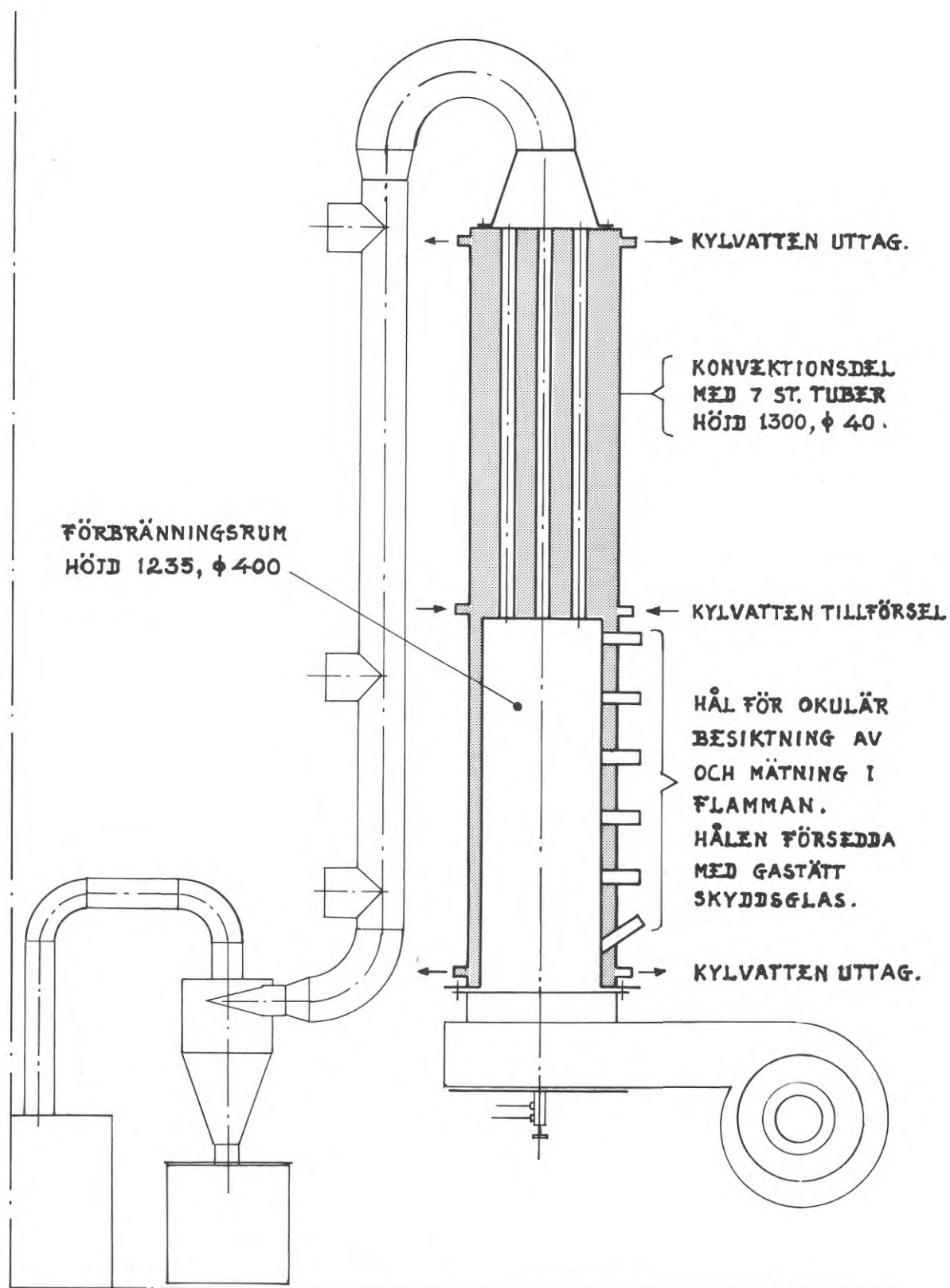


BILD 4:1 Laboratoriepannan.

De ovannämnda exemplen på de svårigheter som är förbundna med provningar utförda vid en för värmeproduktion avsedd anläggning tyder på att alla försök lämpligen bör utföras på en experimentpanna, speciellt konstruerad med hänsyn till de mättekniska problemen och vilken kan drivas oberoende av krav på värmeproduktion.

En sådan värmepanna kan dock sällan ges de proportioner - och därmed exempelvis samma uppehållstid för oljedropparna - som föreligger vid en normal installation. Den bör därför lämpligen "kalibreras" mot olika panninstallationer så att ett samband mellan resultat med experimentpannan och sotbildning vid andra värmepannor kan erhållas.

4.2. EXPERIMENTPANNAN

Vid institutionen för uppvärmnings- och ventilationsteknik vid KTH har en sådan experimentpanna uppställt. Pannan är speciellt konstruerad för mätning av stoftbildning från oljor och har använts för detta ändamål sedan mitten av 1969. Värmepannans konstruktion visas i bild 4:1.

Pannan består av en dubbelmantlad stående cylinder vars nedre del bildar förbränningsrummet och vars övre del utgör ett konvektionsparti. Utmed brännarkammaren finns inspektionsfönster varigenom flamlängd samt flammans karaktär och form har studerats.

Brännarkammarens längd är 1,235 m och dess inre diameter 0,400 m. Den upptagna värmeeffekten P i brännarkammaren har bestämts till

P gasstrålning	= 19 kW
P partikelstrålning	= 4 kW
P konvektion	= 15 kW

Gastemperaturen vid inloppet till konvektionsdelen är för den aktuella belastningen 5,5 kg olja/h ca 800° C och den upptagna värmeeffekten i konvektionsdelen kan vid denna belastning bestämmas till totalt ca 17 kW fördelade enligt:

P konvektion	= 10 kW
P gasstrålning	= 7 kW

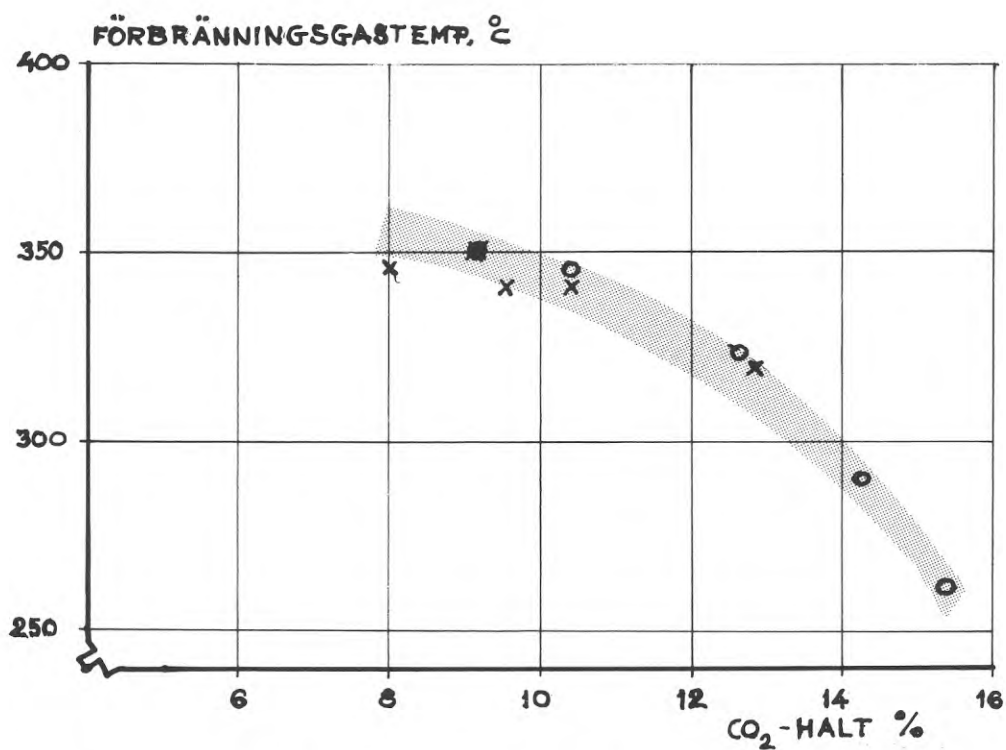


BILD 4:2 Förbränningstemperatur som funktion av CO₂-halt vid laboratoriepannan.

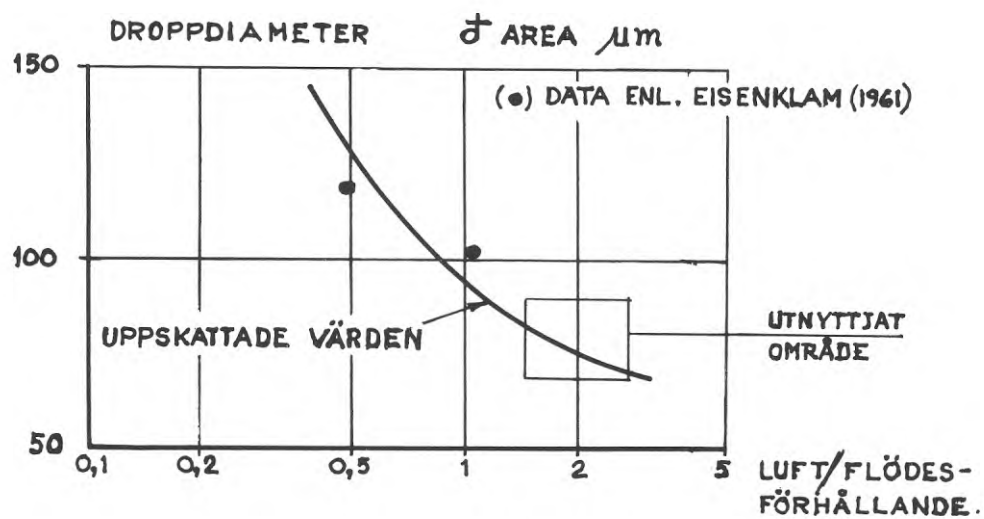


BILD 4:3 Uppskattad droppstorlek för laboratoriebrännaren.

Förlusterna i fritt värme blir därmed av storleksordningen 6 kW (= 5 Mcal/h) eller ca 10 % av tillfört värme. Givetvis så varierar de olika nämnda effekterna med driftsförhållandena såsom t.ex. använt luftöverskott.

Som exempel på dessa variationer kan diagrammet i bild 4:2 tjäna. Bildens värden gäller för den normalt använda belastningen 5,5 kg olja/h och vid en pannvattentemperatur av 80° C.

4.3. BRÄNNAREN VID EXPERIMENTPANNAN.

Vid undersökning av en oljas förbränningsegenskaper - och då speciellt vid mätning av stoftbildningen - finns stor risk att de erhållna resultaten innefattar effekter härrörande från mätupställningen. Som exempel på sådana effekter förorsakade av mätupställningen kan pekas på den tidigare nämnda *uppehållstiden för droppar*, d.v.s. *förbränningsrummets längd*, *för kraftig kylning* (för snävt förbränningsrum) samt *brännarens atomiseringssegenskaper*. I avsnitt 2 har redovisats olika brännarens atomiseringssegenskaper, bl.a. uttryckta såsom medeldroppdiametrar, och hur dessa varierar med olika variabler. Vissa brännare visade sig härvid vara känsliga för variationer i oljeviskositet, vilket medför höga krav på att oljans temperatur hålls konstant.

Den i detta avseende bäst lämpade brännaren synes vara en pressluftbrännare se bild 2:18 och för ändamålet valdes en s.k. Y-brännare - arbetande med ett lufttryck av ca 10 N/cm² (= 1 kp/cm²) och med ett oljetryck av samma storlek.

Medeldiametern hos oljedropparna för brännare av detta slag (se avsnitt 2) är endast svagt beroende av oljans viskositet inom intervallet 20 - 40 cSt. Diametern beror huvudsakligen av förhållandet luft/olja vid atomiseringen. I bild 4:3 visas delvis efter Eisenklam (1961) mätdata för medeldroppdiametern som funktion av massförhållandet luft/olja.

För konstanta tryckförhållanden på luft och oljesidan ändrar sig förhållandet primärluft/oljeflöde mycket litet med icke kontrollerade variabler som *lufttemperatur*, *oljetemperatur*, *oljedensitet* och *viskositet*. Vid försöken varierar därför droppstorleken föga från olja till olja och speciell uppmärksamhet behöver därför ej riktas mot de ovan angivna faktorerna. Oljetemperaturen får dock hållas konstant (med en tolerans av +5° C)

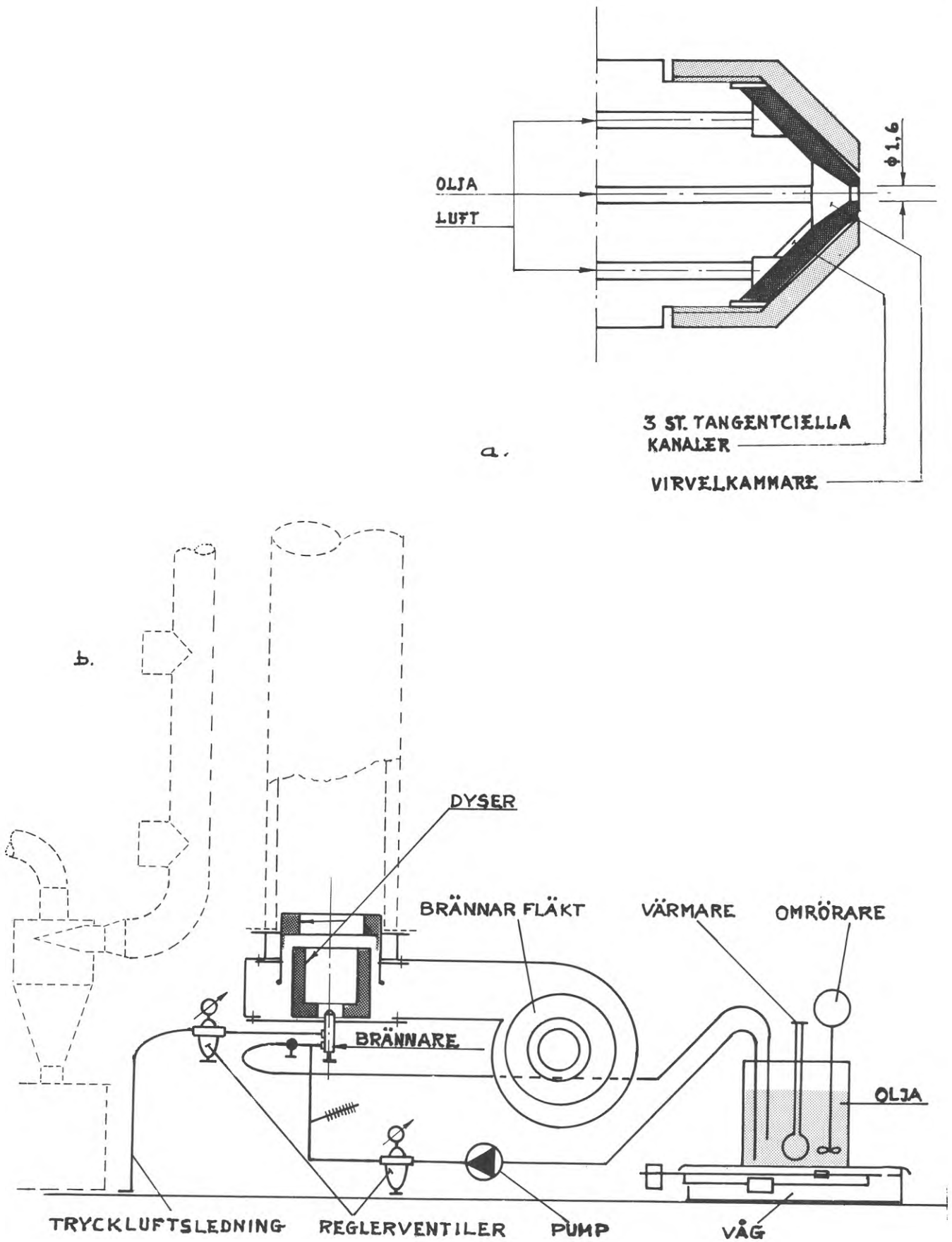


BILD 4:4 a) använd pressluftbrännare b) brännar- och oljedistr.system.

och vid en nivå som ger viskositeten 20 cSt (3°E) vid försök med tjockoljor.

Brännarens uppbyggnad framgår av bild 4:4 i vilken även en principskiss för munstycket visas.

Till brännarinstallationen hör även fläkt, tryckluftanläggning (för primärluften) en regleringsventil för luftflödet och sedvanliga övervakningsorgan.

Inställning av CO_2 -halt sker genom en spjällreglering på brännarfläkten.

4.4. FÖRVÄRMNING, OLJEDISTRIBUTION.

Förvärmningen av oljor sker dels i en utjämningscistern, som dessutom användes för utvägning av oljeförbrukningen, se bild 4:4, dels i en elektrisk förvärmare.

Oljedistributionssystemet, som visas schematiskt i bild 4:4 är uppbyggt av s.k. oljerör och omfattar en pump med arbetstrycket 150 N/cm^2 , och en ventil för reglering av oljeflödet. Vid varje försök regleras oljeflödet till samma värde, normalt $5,5 \text{ kg/h}$, genom utvägning. Under försöken upprepas utvägningen vanligen 2 - 3 gånger och ev. avvikelse åtgärdas. Avvikelser kan uppkomma genom variation i oljetemperatur och vid ändring från en olja till en annan genom skillnaden i densitet. Genom den omsorgsfulla flödesinställningen har förhållandet primärluftflöde/ oljeflöde kunnat hållas konstant med mycket snäva toleranser.

4.5. AVGASSYSTEM, MÄTSTÄLLEN

Avgassystemet visas i bild 4:5.

Efter pannan förs gasen via en böj med 250 mm radie över till en vertikal kanal. Mätningarna företogs vid de aktuella försöken vid det mittersta mätstället - se bilden. Det övre respektive undre mätstället är avsedda för en närmare undersökning av ev. störande inverkan av böjningen av gasströmmen på stofffördelningen. Avståndet mellan det använda mätplanet och böjen på avgaskanalen är ca 10 rördiametrar och det har således ett från mätsynpunkt relativt tillfredsställande läge.

Det alstrade stoftet uppsamlas i en cyklon med hög avskiljningsgrad. Avskiljningsgraden har mätts med såväl kvartsstof som med sot. I bild 4:6 visas uppmätta avskiljningsgrader för de två stoftslagen. I bilden visas två kurvor för kvartsstof mot-

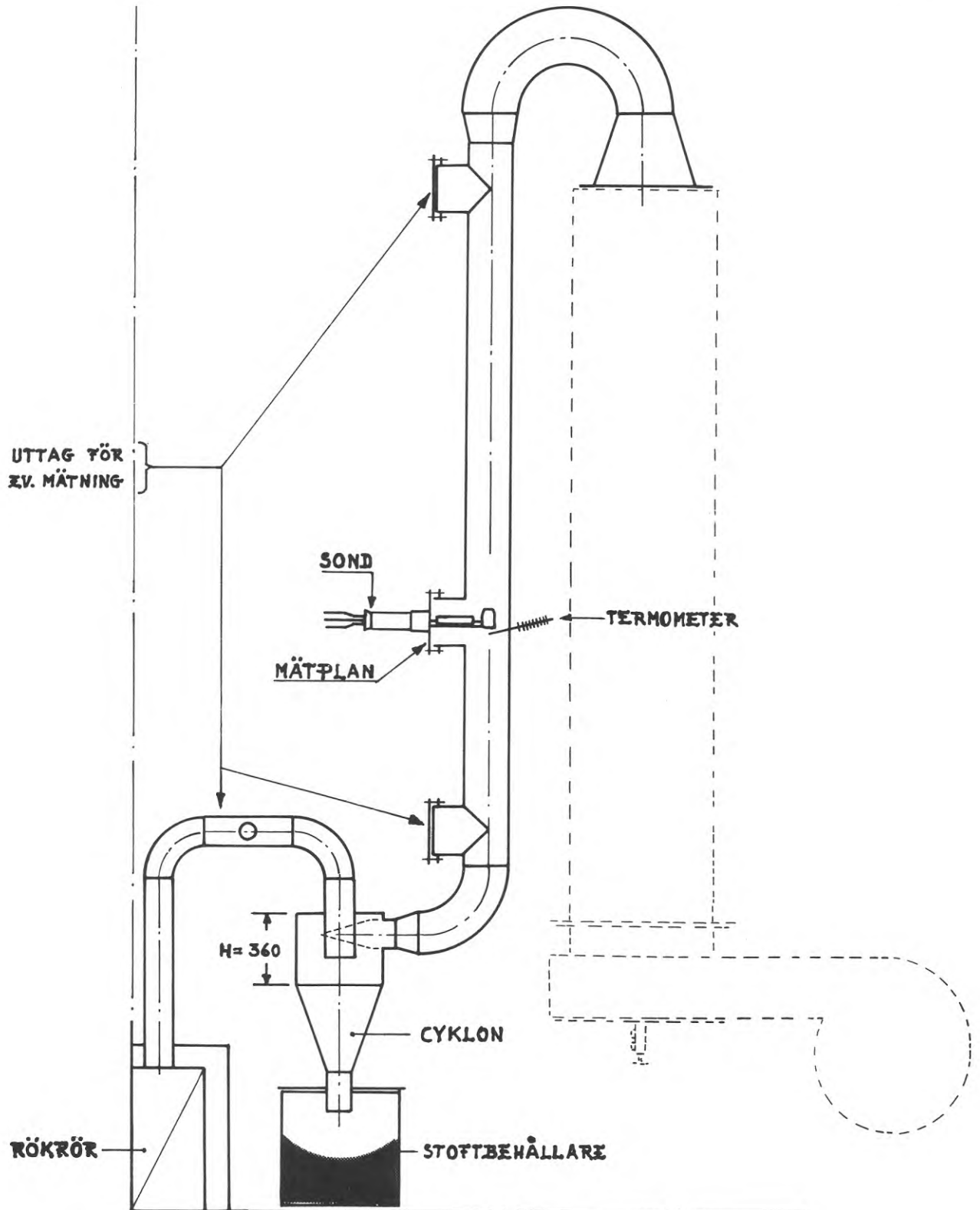


BILD 4:5 Uppbyggnad av avgassystemet vid experimentpannan.

svarande olika cyklonhöjder. Vid stoftproven har cyklonhöjden varit 380 mm, se bild 4:5. Mätvärdena för sot har erhållits från mätning av stoftkoncentration före och efter cyklon vid varierande temperatur och CO₂-halt.

Cyklonen har vid höga inloppshastigheter en mycket god avskiljningsgrad även för små partiklar, se bild 4:6. För lätta sotpartiklar har den givetvis sämre avskiljningsgrad än för kvartsstoft vilket senare använts vid bestämmingar enligt bild 4:7. Tryckfallet över cyklonen är relativt lågt¹⁾. Mätningar har visat en tryckfallskoefficient

$$\zeta = 2\Delta p / \rho v^2 \approx 10 - 0,01H \quad (4:1)$$

där Δp är tryckfallet (N/m²) över cyklonen
 H cyklonens höjd (mm)
 v inloppshastigheten (m/s) i cyklonen
 ρ gasens densitet kg/m³

Tryckfallet blir (för $v = 10$ m/s och $\rho = 0,9$ kg/m³) ca 400 N/m², vilket vid ett så pass lågt flöde (ca 0,03 m³/s) får anses normalt.

Anläggningen betjänas därför som nämnts av en förbränningsgasfläkt som tillsammans med brännarfläkten ombesörjer gasströmningen.

1) Vanligtvis gäller att cyklonens avskiljningsgrad och tryckfall följas åt.

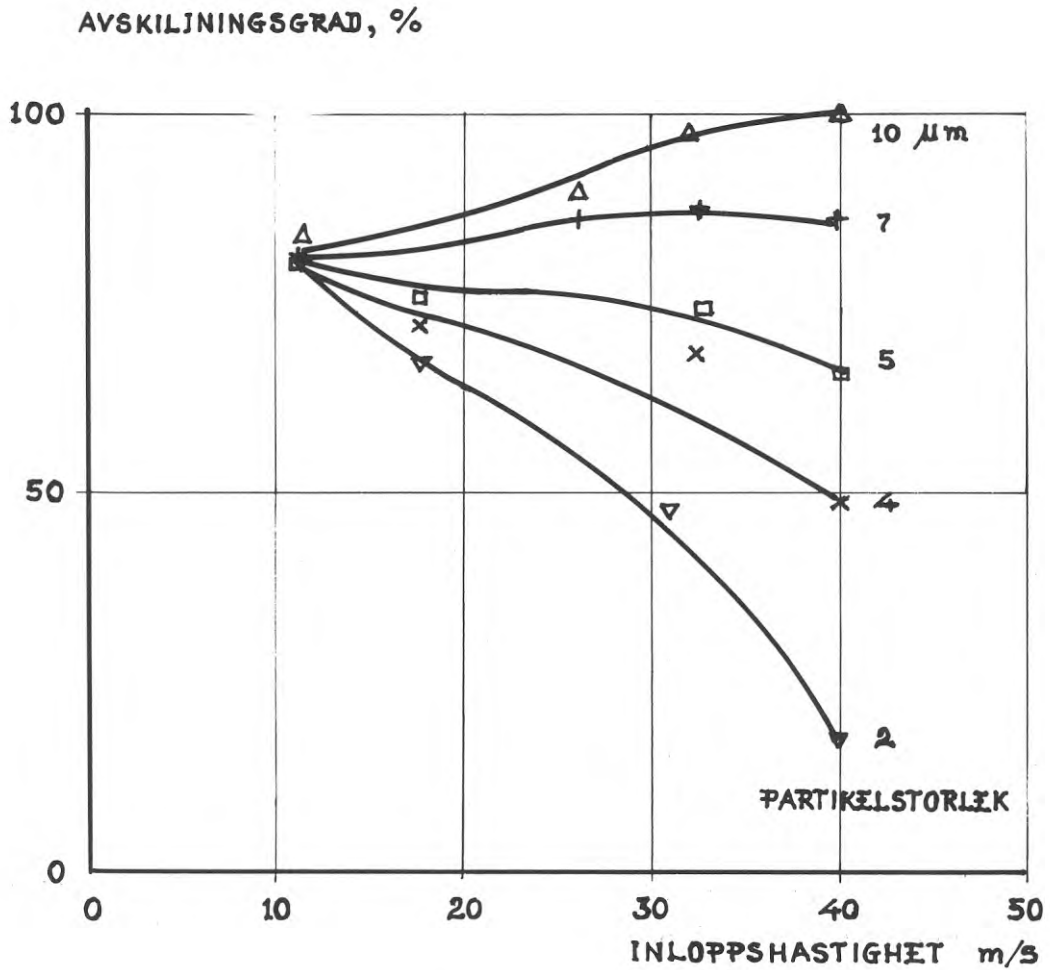


BILD 4:6 Cyklonens avskiljningsgrad för små partiklar. Mätresultat vid prov med kvartsdamm. Efter Peterson (1963).

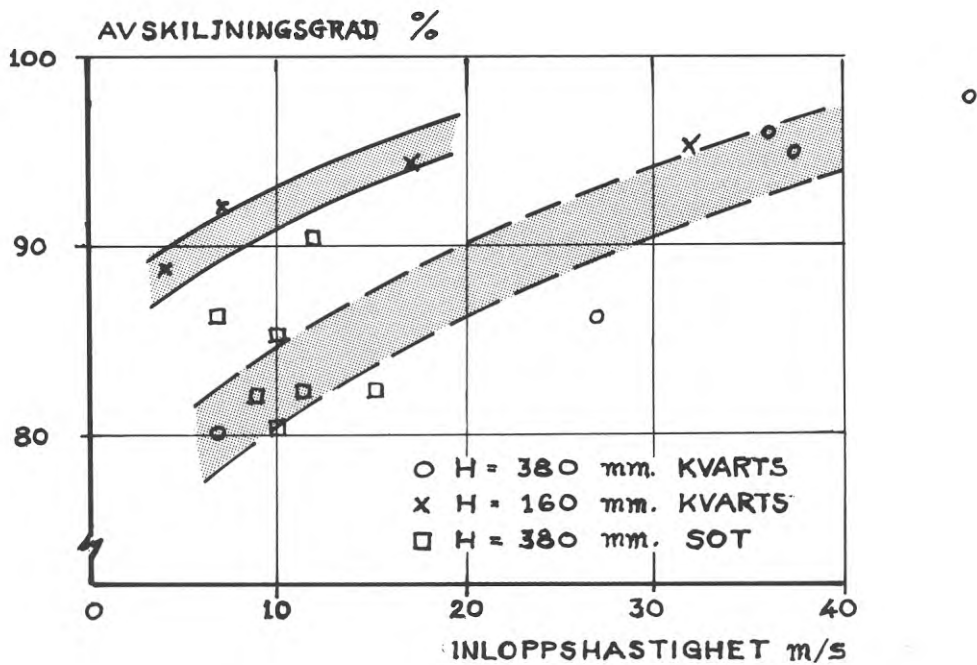


Bild 4:7 Avskiljningsgraden för stoft från oljeeldning och kvartsdamm med partikeldiameter mindre än 50 mikrometer. Värdena avser totalavskiljningsgraden.

5. MÄTTEKNIK

Bestämningen av stoftalstringen från en oljefflamma innebär i allmänhet ett svårt mätproblem, speciellt då mätningen skall utföras på fältanläggningar. Här kan sällan de med hänsyn till mätnoggrannheten uppställda minimikraven innehållas, se t.ex. Peterson 1968a). I detta avsnitt skall vi se närmare på hur stor noggrannheten kan bli med hänsyn till olika felkällor. Dessutom skall den använda mättekniken exemplifieras med praktiska mätningar från den aktuella forskningsuppgiften.

5.1 MÄTMETODIK

För bestämning av stoftemissionen från en värmecentral utgår man från s.k. delgasprov, vilka uttas i en lämplig del av rökkanalen se bild 5:1. Vid *större anläggningar* antar man att delgasprovet är representativt för en viss del av kanaltvärsnittet och man kan således genom ett flertal prov erhålla en uppfattning om det totala stoftutsläppet.

Vid *mindre anläggningar* antar man - åtminstone vid rutinmässiga undersökningar - att delgasprovet är representativt för hela gasflödet. Här nöjer man sig således med ett enda gasprov vars stofthalt läggs till grund för en bedömning av stofthalten från hela anläggningen. Båda antagandena är i många fall dåligt underbyggda ¹⁾.

Vid noggranna mätningar t.ex. för garantibesiktningar eller besiktningar med hänsyn till risken för luftföroreningar måste därför standardiserad mätmetodik användas. Förslag till sådan för Sverige finns utarbetad sedan 3 år (Peterson 1968a) och har till stor del kommit till användning vid de här aktuella provningarna. Provningsmetodiken bygger på att de tidigare omnämnda delgasproven uttas på en sådan plats, och i ett sådant antal att bestämningen av gasernas stofthalt kan ske med delgasproven som utgångspunkt och med ett maximalt fel av $\pm 25\%$ vid en emissions-

1) Speciellt är detta fallet om det förekommer tillfälliga variationer i stoftbildningen från flammen. Vid eldning med fasta bränslen förekommer sådana variationer till följd av bränslets varierande sammansättning - både ursprungliga variationer och sådana som uppkommer under förbränningen. Vid eldning med flytande bränslen kan fluktuationer i t.ex. förvärmning vara av betydelse.

bestämning. I de angivna 25 % innefattas därvid samtliga fel av slumpkaraktär. Mätningarna i sig själva skall göras så att de systematiska felen undertrycks så långt möjligt är.

Mätningarna är utförda med ett fel som i de flesta fall kan anses ligga långt under ovan angivna - och allmänt vedertagna-maximala. Detta har åstadkommit genom

- o att uttagningen av mätplan (bild 5:2) och av mät-punkter i detta har gjorts med stor omsorg - se t.ex. Peterson (1970b) och (1971d),
- o att mätningarna fortlöpande har kontrollerats för undvikande av oregelbundenheter till följd av instabil drift,
- o att kontrollmätningar över kanaltvärsnittet utförts i större omfattning än som förutsattes i ovan nämnda förslag.

Även med de här berörda åtgärderna stöter fältmätningar av stoftemissionen från värmecentraler på betydande svårigheter. I det följande skall erfarenheter från de metoder som kommit till användning vid denna undersökning ges.

5.2 STOFFFÖRDELNING

Som nämndes inledningsvis tillgår stoftmätningen så att ett visst antal delgasprov uttas från förbränningsgaserna. Provtagningarna fördelas över kanalytan på ett sådant sätt att man får en uppfattning om eventuella oregelbundenheter i stofffördelningen.

Från delflödenas stofthalter, p g/m³, och gashastigheten v m/s, i provpunkten kan det totala flödets stofthalt bestämmas som

$$p_{\text{tot}} = \frac{\int_A p v dA}{\int_A v dA} \quad (5:1)$$

där A är kanalens totala öppning, m².

För det fall att stofffördelningen är jämn - d.v.s. $p = \text{konstant}$ - reduceras uttrycket givetvis till

$$p_{\text{tot}} = p \quad (5:2)$$

d.v.s. alla mätpunkter är lika bra. Villkoret härför - $p = \text{konstant}$ - inträffar dock sällan i praktiken. I stället erhålls vanligen en ojämn stofffördelning över tvärsnittet, se t.ex. bild 5:3 - 5:5.

Bild 5:4 visar resultat av mätningar i ett fall där man trots att mätningen försigått i en från mättekniska synpunkter lämplig kanaldel fått en ojämn stofffördelning. Vid kanalväggarna har uppmätts höga stoffkoncentrationer i de långsamtgående skikten nära kanalväggen och i centrum av kanalen har ett lågt värde på stoffemissionen uppmätts.

Bild 5:4 uppvisar resultat av en mätning utförd under ogynnsamma förhållanden, se bildtexten. Stoffhalten varierar här kraftigt över tvärsnittet och uppvisar - som en följd av den i bildtexten omnämnda böjen - ej någon symmetri.

I bild 7:11 visas resultat från mätningar vid central C. De angivna värdena uttrycker stoffbildningen (g/kg olja) över kanal-tvärsnittet. Mätningen, som är vidtagen i ett relativt ogynnsamt tvärsnitt - se avsnitt 7 - tyder på att partikelfördelningen i kanalen är mycket jämn. Detta beror på att stoffet har mycket liten kornstorlek. De enskilda partiklarna underkastas därför vid riktningsändringar i kanalen en liten inverkan av tröghetskrafter och fördelning ej tenderar till att öka i skevhet som följd av en krök e.d. Speciellt vid eldning med oljor vilka ej ha benägenhet att ge cenosfärer, eller tunga askrika partiklar oförbrända oljedroppar med hög densitet e.d., erhålls denna ojämna partikelfördelning.

I bild 5:5 visas resultat från mätningar i central S. Samtliga data är här angivna som mg/m^3 torr gas. Fördelningen var i samtliga fall uppmätt med olja 401 och även i detta fall var fördelningen relativt jämn.

Ytterligare exempel på stofffördelningar skall ges i avsnitt 7.

5.3 VAL AV MÄTPLAN

Oregelbunden stofffördelning i närheten av ett spjäll, en krök e.d. kan ge upphov till stor osäkerhet i stoffmätningarna. Även blygsamma krav på mätnoggrannhet leder till en kraftig ökning av mätkostnaderna i det fall mätning måste företas i ett olämpligt mätplan.

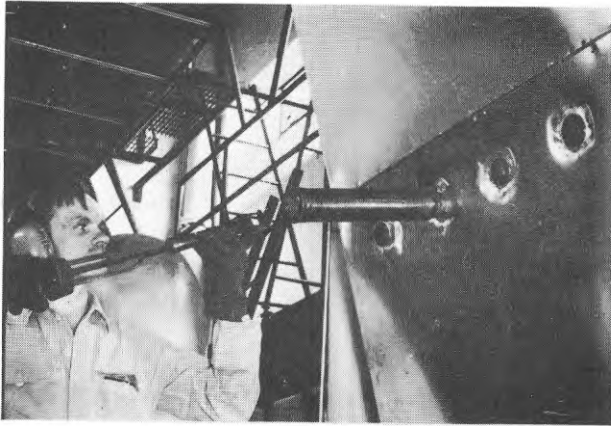


BILD 5:1 Provtagning vid central S, se avsnitt 7.7.

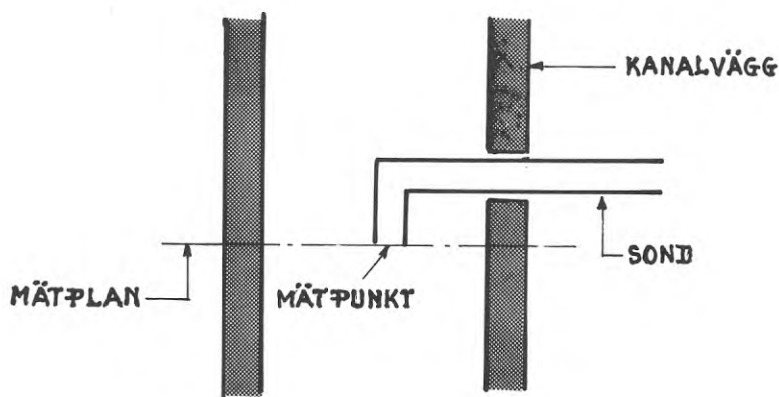


BILD 5:2 Mätplan

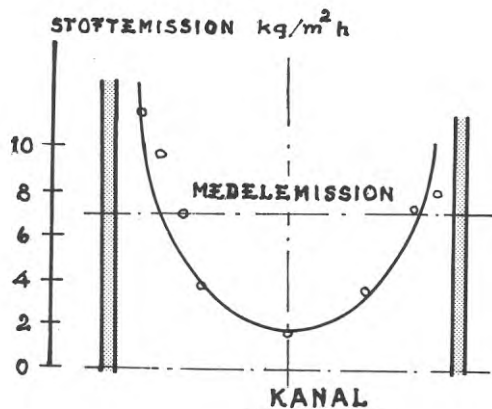


BILD 5:3 Stoffemissionen över en cirkulär kanal. I kanalcentrum är stoffhalten lägst med ett flöde av endast $2 \text{ kg/m}^2\text{h}$. Vid kanalväggarna är den betydligt högre. Det högre stoffflödet är här (jämför strömningsförhållandena i en cirk.kanal) orsakat av mycket höga stoffhalter. Efter Linden(1935).

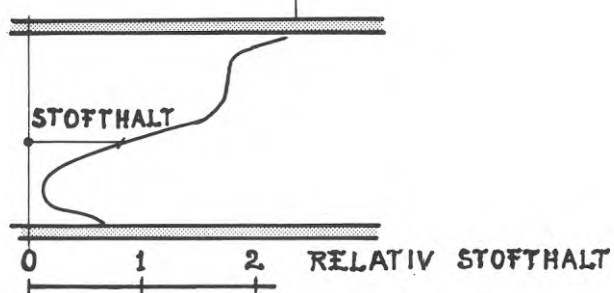


BILD 5:4 Stoffhalten i en gasström (5 kanaldiametrar efter en böj). Efter Narjes (1965).

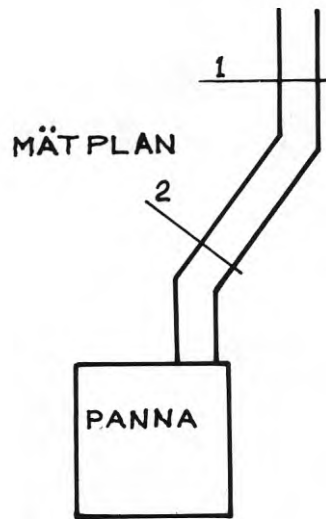
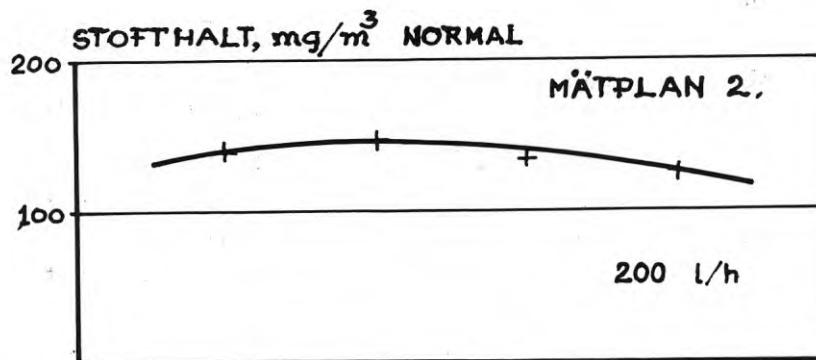
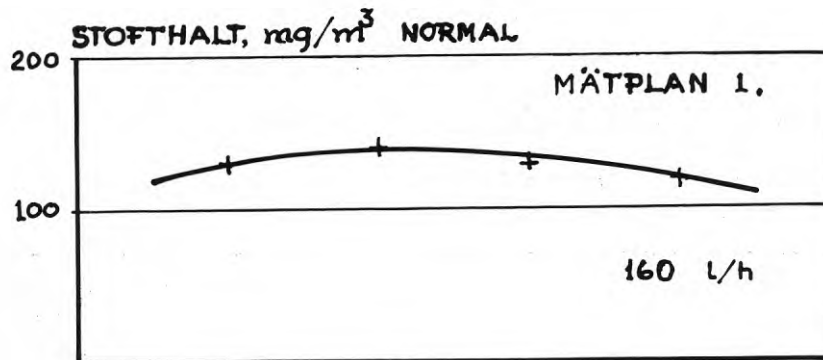


BILD 5:5

Vid central S gjordes en förberedande mätning i två mätplan.

I bilden visas mätresultat (stofthalten över kanaltvårsnittet) för plan 1 och 2 vid två olika oljeflöden. CO_2 -halten vid mätningarna var 14 %.



Som exempel på olämpliga ställen kan nämnas:

- o mätplan beläget efter, men för nära krök i förbränningskanalen
- o mätplan beläget för nära spjäll eller dragreglerande element
- o mätplan beläget för nära fläkt eller gasutlopp till kanalen.

I tabell 5:1 nedan har sammanställts olika förslag till lämpliga avstånd mellan mätplanet och uppströms belägna mät hinder. I tabellen är även avstånd enligt det ovannämnda normförslaget - se avsnitt 1.4.2 - medtagna för jämförelse.

TAB 5:1 Minsta acceptabla avstånd mellan mätplan och uppströms beläget hinder enligt olika källor.

Minimialavstånd mellan mätplan och				Källa	Anm
rundad krök (90°)	skarp krök (90°)	spjäll (+krök)	fläkt avskiljare		
D + 1,5	D + 1,5			BS893 1940	D i meter efter krök
D	D	D	4D	BS3405 1961	Efter krök
5D	5D	5D	5D	CA Gallauer (1957)	Efter krök
6D	6D	6D	6D	L.Brasser (1953)	Efter krök
3D	D	6D	6D	L.Brasser (1953)	Före krök
D	D	D		Grit and Dust(1967)	Efter krök
2D ¹	5D ¹	3D ¹	5D ¹	Peterson (1968a)	Påg. normarb.
5D			5D	C.Stairmand(1951)	Efter krök
5D			3D	C.Stairmand(1951)	Före krök

Redan tidigare (bild 5:4) visades att en kraftigt oregelbunden stoftfördelning kunde uppstå efter en kanalböj. Givetvis utjä-

1) D avser vid kanaler med rektangulärt tvärsnitt, sidolängdernas aritmetiska medelvärde.

nas den erhållna skeva fördelningen på större avstånd från böjen, se bild 5:6. Väljs mätplanet därför på ett avstånd av den storleksordning som framgår av förslaget i tabell 5:1, kan en relativt jämn fördelning påräknas. Mätningar på äldre anläggningar är följaktligen svåra att utföra eftersom man här normalt får arbeta med korta avstånd mellan strömningshindren och mätplanet. Vid de här redovisade mätningarna har centralerna utvalts så att lämpliga mätsträckor kunde erhållas i de flesta fall.

I bild 7:7 visas som exempel härpå mätvärden från central A. Kvoten mellan mätvärden (C_{11}) i mätpunkt 0,11 m från kanalväggen och centrumvärdena (C_{22}) var för de tre redovisade oljorna:

Olja	C_{11} vid yttre delen av böjen	C_{22} vid inre delen av böjen
372	1,5	0,8
382	1,3	1,0
392	1,1	0,8

Som framgår av värdena stiger asymmetrin kraftigt med mängden bildat stoft, d.v.s. med mängden bildade tunga partiklar.

5.4 VAL AV MÄTPUNKTER

Integration av stofthalten över hela mätplanet enligt ekvation (5:1) för bestämning av den totala stofthalten p_{tot} i gaserna är endast möjlig om ett analytiskt uttryck för stoftfördelningen över tvärsnittet kan ställas upp. Detta är emellertid inte möjligt. Stofthalten p_{tot} måste därför bestämmas approximativt genom mätningar i ett antal - n st - punkter. Med utgångspunkt från mätvärdena p_i i resp. punkt erhålls - analogt med (5:1)

$$p_{\text{tot}} = \frac{\sum p_i v_i A_i}{\sum v_i A_i} \quad (5:3)$$

Normalt sker uttagningen av mätpunkterna över tvärsnittet efter någon i förväg bestämd regel - i DIN anges t.ex. att kanaltvärsnittet skall indelas i lika stora delar, varefter mätning sker

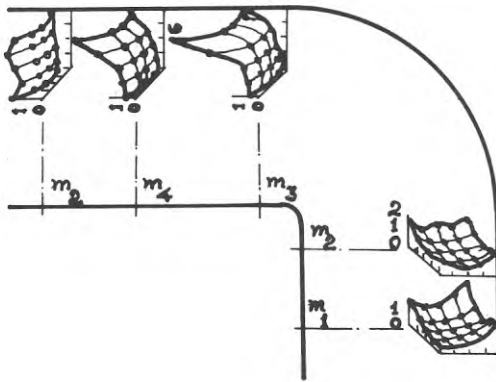
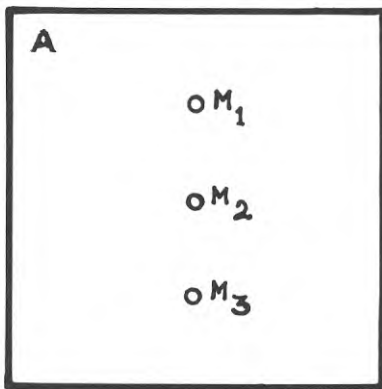


BILD 5:6 Stofffördelning före och efter en böj. Data efter Zimmermann (1931).

KANAL MED MÄTPUNKTER M



GASHASTIGHET v .

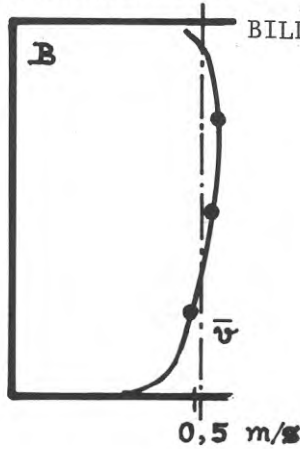
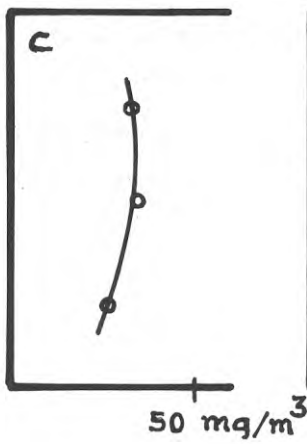
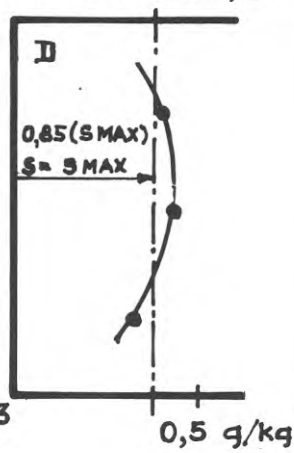


BILD 5:7 Resultat av en förberedande mätserie vid central P. För stoffemissionen erhöles korrektionsfaktorn 0,85 för mätning i kanalcentrum.

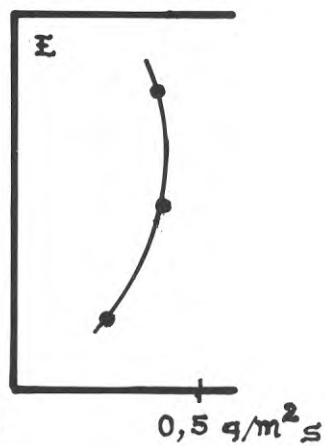
STOFFHALT



STOFFBILDNING, S



STOFFEMISSION



i delarnas centra. Bestämningen av stoftemissionen kan därefter ske genom medelvärdesbildning av stoftflödet

$$p_{tot} = \text{stoftflöde/gasflöde} \quad (5:4)$$

där stoftflödet anges i g/s och gasflödet i m³/s. Stoftflödet p_{tot} kan även bestämmas enligt (5:4) med utgångspunkt från specifika stoftflödet - bestämt som g/m² s - och gashastigheten. I de här föreliggande mätningarna har den i DIN anbefallda metoden inte använts. Orsaken härtill är bl.a. att man kan visa att - se t.ex. Peterson (1971d) - väsentligt bättre indelningsgrunder än en indelning av kanalvärsnittet i lika stora delareor finnes. Även det orimligt stora mätarbete som måste läggas till grund för en tillfredsställande bestämning enligt DIN är avskräckande. Vid de här redovisade försöken har i stället stoftfördelningen över kanalsektionen vid respektive central undersökts i en serie inledande prov. Sedan hastighetsfält, stofthaltens fördelning och stoftemission enligt ovan bestämts, har medelvärdet p_{tot} av stofthalten i kanalen bestämts genom grafisk integration. Sedan man således utifrån ett tillräckligt stort antal mätpunkter fastlagt ett värde på p_{tot} har man för varje pannenhet med tillhörande kanal bestämt en koefficient

$$k = p_{tot}/p_{mät} \quad (5:6)$$

$p_{mät}$ är stofthalten i den mätpunkt som i fortsättningen avses använd. Förfarandet bygger på iakttagelsen att stoftfördelningen ej essentiellt ändras vid ändringar i lufttillförseln, använd olja m.m. - jämför bildserie 5:5. Från senare mätningar och med de här bestämda konstanterna k - se avsnitt 7- kan ur enstaka mätningar eller medelvärden av mätningar i den förut bestämda punkten p_{tot} bestämmas som

$$p_{tot} = k p_{mät} \quad (5:7)$$

I bild 5:7 visas resultatet av förberedande mätningarna vid central P. Stofthalten är som framgår av bild c hyggligt jämn,

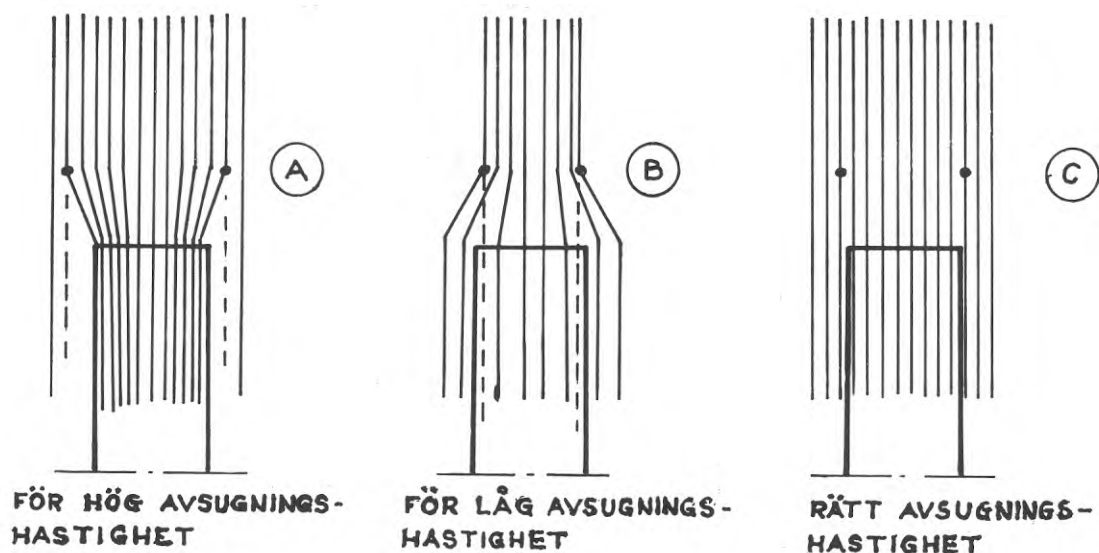


BILD 5:8 Strömbanor för gas och partiklar vid a) för snabb b) för långsam och c) korrekt avsugning. I fallet a) erhålls för låg i fallet b) för hög uppmätt stoftkoncentration.

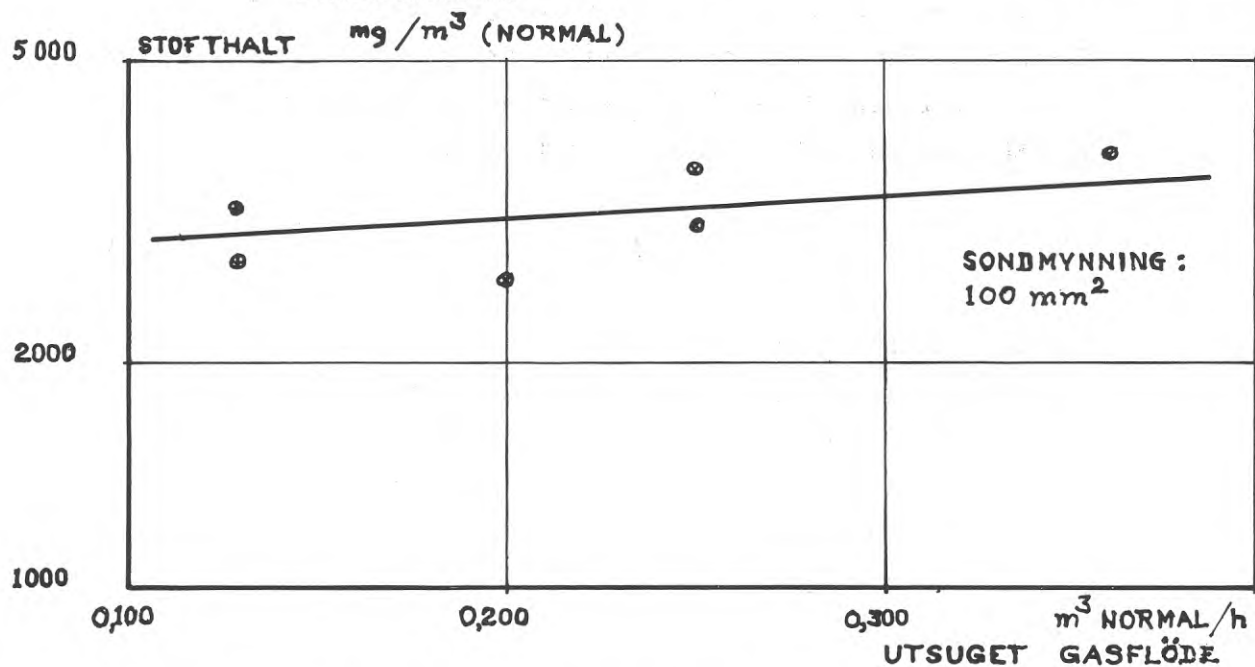


BILD 5:9 Vid bestämning av stofthalten i det fall endast lätta partiklar förekommer inverkar ej avsugningshastigheten. Partiklarna följer i detta fall strömbanorna för gasen. Jämför bild 5:8.

vilket även gäller för den uppmätta gashastigheten i kanalen. Som vi funnit från försöken vid central A - jämför bild 5:7 - skulle en ojämn stofffördelning visserligen ge ett bestämt värde på k enligt ekvation (5:7) men detta värde skulle kunna variera med stoftpartiklarnas storlek och massa. Mätningen av stofffördelningen skall därför normalt upprepas med olika oljor eller utföras med en kraftigt sotbildande olja.

I en mätserie vid central S har detta genomförts. Någon skillnad i k -värde (inom ramen för mätosäkerheten) för de två oljorna erhöles ej.

5.5 ISOKINETISK PROVTAGNING

För att delprovets stofthalt skall vara densamma som stofthalten i gasströmmen krävs att avsugningen sker på ett sådant sätt att stoftpartiklarnas strömbanor överensstämmer med gasströmmen i sondens närhet, se bild 5:8. En för snabb avsugning leder till en för låg stofthalt.

Vissa avvikelser från den ideala gashastigheten i sonden - som normalt antas vara lika med gashastigheten i mätpunkten och vid ostörd strömning - kan dock accepteras. Bild 5:9 visar exempel härpå. Mätningarna har i de redovisade fallen gällt två oljor med hög respektive låg stoftbildningstendens och någon signifikant skillnad mellan uppmätta stofthalten vid olika avsugning kunde ej påvisas ¹⁾. Man bör dock ej draga för generella slutsatser av detta. Endast i det fall partiklarna följer gasens strömbanor erhålls med säkerhet korrekta delgasprover. Gashastigheten i sondmynningen bör så noga som möjligt avpassas till den aktuella strömningshastigheten. Skulle man vilja utföra mätningar med speciella typer av apparater där kravet på stor avsugningshastighet finns, måste korrigerings av erhållna mätdata normalt göras med hänsyn till den isokinetiska avsugningen.

Vid de här aktuella mätningarna har nästan undantagslöst använts isokinetisk avsugning. I enstaka fall har mätvärdena avsedda för

1) Sjøgren (1971b) har påpekat att detta speciellt gäller vid stoft från destillatolja vilket också anges i Peterson (1968a) där även andra fall t.ex. vid mätning efter stoftavskiljare påtalas.

interpolering eller i något fall extrapolering av en erhållen kurva dock av tidshänsyn framtagits med överisokinetisk avsnigning.

5.6 PROVTID

Provtidens längd har en betydelse för den uppnådda mätnoggrannheten. Som tidigare nämnts sker utvärderingen av stofthalten genom en vägning av utfällt stoft, vilket vanligen sker genom två vägningar av filteranordningen. Stoftvikten utgörs av skillnaden mellan filtrets massa med stoft och den ursprungliga massan¹⁾. Antas felen vid varje mätning vara 0,0001 g kan det relativa felet i stoftmängdsbestämningen uppgå till de värden som anges i tabell 5:2.

TAB. 5:2 Relativa fel i hela % vid stoftmängdsbestämningar, där utvägning skett med ett fel av $\pm 0,0002$ g (fältförsök). Mätningen antas ske vid 11 % CO₂.

Olja	Sotbildning g/kg	Provvolymer liter			
		200	500	1000	2000
Eo 1	0,05	67	25	12	6
	0,1	31	12	6	3
	0,5	7	3	1	1
Eo 3	0,5	7	3	1	1
Eo 5	1	3	1	1	0
	2	2	1	0	0
	5	1	0	0	0
	10	0	0	0	0

Som framgår av tabellen måste gasprovet vid undersökning av förbränningen av Eo 1 ges en volym av ca 600 liter för att felet skall bli mindre än 20 %. Vid undersökning av en dålig förbränning med Eo 1 kan dock lägre gasvolym accepteras. En minimigräns av 500 liter bör dock normalt innehållas.

Detta innebär en normal provtagningstid av ca 30 minuter, ibland något längre beroende på vilken avsnigningshastighet som kan hållas i mätpunkten. Givetvis är så långa provtagningstider till

1) Torkning av filtret måste ske mellan de båda vägningarna.

stort besvär inte bara genom de höga personalkostnader de automatiskt medför, utan även på grund av risken för instabil drift medan provtagning pågår - t.ex. till följd av varierande belastning.

Problemet har vid ifrågavarande mätningar lösts genom lämpligt val av centraler samt, i fall varierande stoftbildning kunde misstänkas t.ex. vid längre avbrott i mätningarna, genom återkommande kontroller av stoftnivåerna - se bild 5:10. Vid fältmätningar i kontrollsyfte blir problemen stora, varför snabbare mätmetoder och mätapparatur bör användas ¹⁾. Det kan i detta sammanhang vara av intresse att se närmare på vilka krav som uppställts på provtagningstidens längd i olika länder, se tabell 5:3.

TAB. 5:3 Provtagningstider för delgasprov

Land	Källa/År	Provtid min.
Danmark	K.Hansen (1950)	10
England	BS 893 (1940)	10
	BS 3405 (1961)	1
	Grit and (1967)	15 ^a
	Dust	30 ^b
Frankrike	Soc. Francaise des Petroles BP (1962)	15
Italien	Regolamente per l'esecuzione della legge 13 luglio 1966 n 615 (1966)	10
Tyskland	-VDI Leitungsmessungen an Eutstaubern (1936) (1966) VDI 2066.	5
USA	Power Test Codes (1941)	10
	IGCI (1964)	5

a) Värdet ang. för fasta bränslen.

b) Värdet ang. för oljeeldning.

En för kort provtagningstid är således ej heller önskvärd, främst eftersom man vid kontroller önskar ett genomsnitt under

1) Sjøgren (1971^b) har presenterat en ny apparat för stoftmätning.

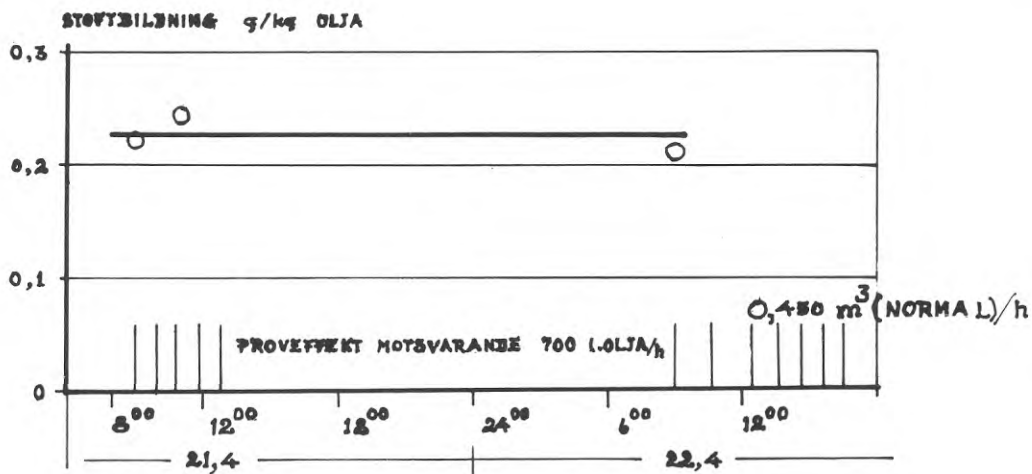


BILD 5:10 Exempel på kontrollmetodik vid stoftmätning, central C. Mätningarna påbörjades kl 9⁰⁰ den 21.4, varvid mätning i mätpunkt 5 (se bild 7:10) gav en stoftalstring av 0,22 g/kg olja. Provets nr var 53, se bilden. Kl 11⁰⁰ gjordes (efter en mellanliggande mätning) en kontroll av stofthalten i mätpunkten 5. Det erhållna värdet visade sig vara något högre än det ursprungligen uppmätta.

Då mätserien fortsattes påföljande dag, startades den med en kontroll i mätpunkt 5 (prov 95) varvid det erhållna mätvärdet visade på en tillfredsställande stabilitet för anläggningen.

De redovisade värdena avser olja 411. Kapaciteten vid tillfället motsvarade ett oljeflöde av 0,7 m³(normal)/h. CO₂-halt vid proven var 11 %.

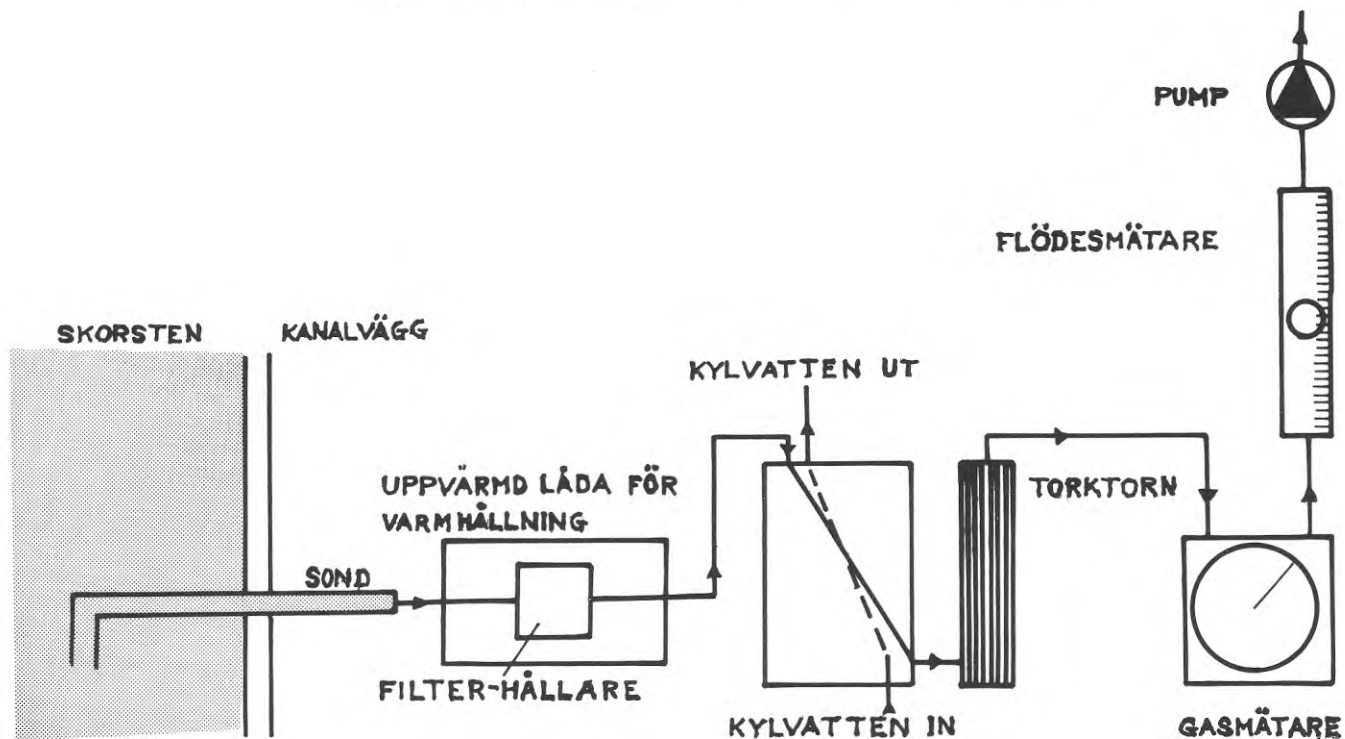


BILD 5:11 Mätapparatur - principskiss.

tillräckligt lång tid. I de av Statens Naturvårdsverk uppgivna normvärdena för emissioner brukar anges att man avser halvtimmesmedelvärden.

5.7 APPARATFEL

Den använda apparaturen (se bild 5:11 och 5:12) för stoftmätningen kan under vissa omständigheter ge upphov till avsevärda fel. De faktorer som i första hand måste beaktas är *sondens utförande*, *risken för stoftavsättning* i sondrör, *risken för stoftgenomsläpp* i filter och *risken för viktminskning* hos filter och filterhållare som följd av materialförluster.

Någon systematisk undersökning av dessa felkällor har ej ingått i arbetsuppgiften och ej heller varit tidsmässigt eller ekonomiskt möjlig att genomföra. I det följande omnämns summariskt de olika felens storlek, samt de åtgärder som vidtagits för att eliminera eller minska dem.

5.7.1 Sondutförande

Sondens utförande påverkar mätningen på flera sätt och vi skall i det följande se närmare på några av dem.

5.7.1.1 Sondlängd.

För kort sond medför en strömningsstörning från sondröret, se bild 5:13. I det tidigare nämnda förslaget till mätmetodik har Peterson (1968a) angivit att förhållandet L/d bör vara ca 2,5 se bilden. Uppgiften bygger på en försöksserie - där sonder med olika relativ längd undersökts varvid gällde att

$$0 < L/d < 4,3 \quad (5:8)$$

Som framgår av bild 5:14 gav en kort sond ett lägre mätvärde än en längre. Den sond som använts för flertalet av fältmätningarna har ej uppfyllt villkoret $L/d \geq 2,5$. Orsakerna härtill är att de på marknaden nu saluförda apparaterna för stoftmätning ej har anpassats till detta villkor. Den i samband med forskningsuppgiften framtagna konstruktionen har dock bättre anpassats vad gäller sondens relativa längd.

För en jämförelse har mätningen med den marknadsförda apparaten och den nykonstruerade utförts. I bild 5:15 visas de erhållna resultaten, och som synes finns en viss systematisk avvikelse.

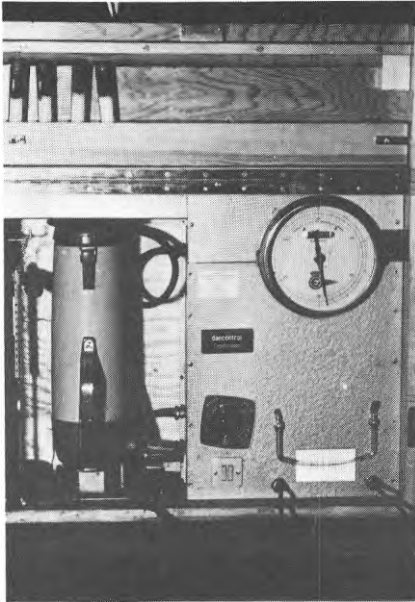


BILD 5:12 Använd mätapparatur. "BP-apparaten"

BILD 5:13 Vid för kort sond finns risk för störning från sondröret.

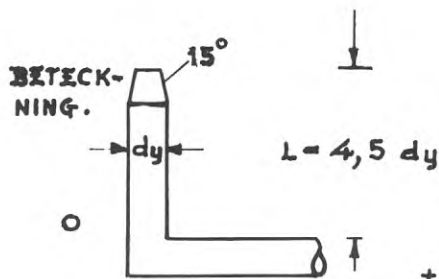
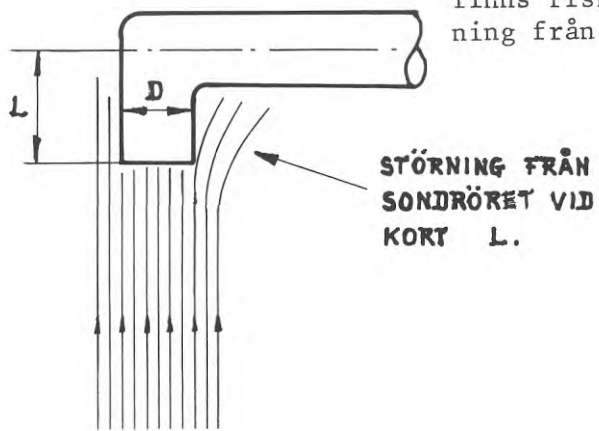
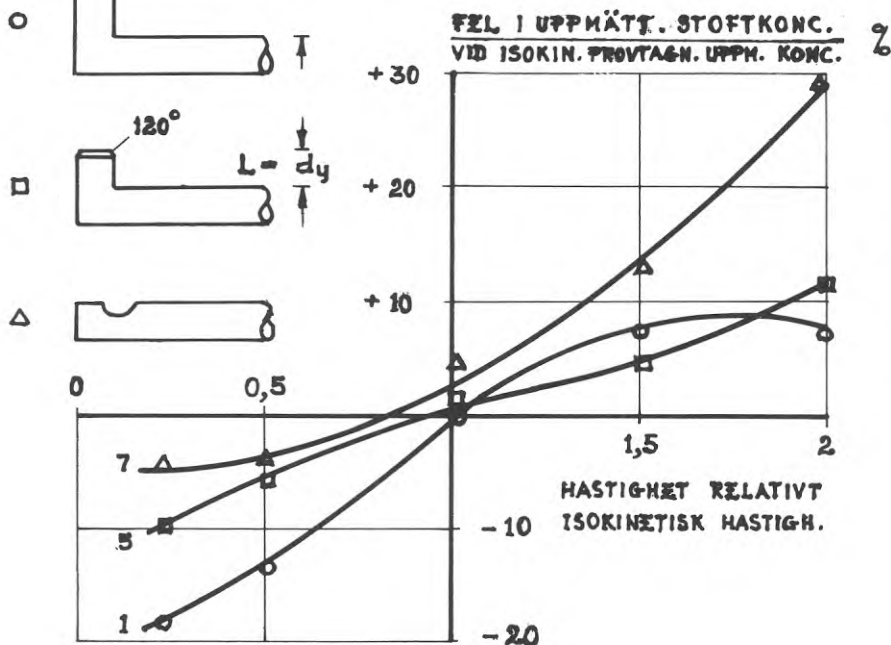


BILD 5:14 Exempel på inverkan av sondlängden. I bilden visas resultat för tre olika sondtyper.



De i bilden redovisade värdena har beräknats från uppsamlade stoftmängden och ett gasflöde bestämt av provtagningstiden och gashastigheten i kanalen (således ej den verkliga avsugningshastigheten).

Efter Whiteley m.fl. (1959).

Fortfarande kan det dock ej anses helt klarlagt vilken av de två apparaterna som ger "korrekt" resultat, eftersom stofthaltens absoluta värde vid jämförelsen ej var känd. Som tidigare nämnts ligger en sådan apparatkontroll långt utanför den aktuella uppgiften men torde, som framgår av här gjorda översiktliga försök visar, vara en angelägen forskningsuppgift. Både BP-apparaten och den egna apparaten arbetar med s.k. nollsond. Nollsondsapparaterna hänför sig till äldre konstruktion och syftar till att ge en möjlighet att innehålla s.k. isokinetisk avsugning utan att någon speciell hastighetsmätning utförs. Nollsondens principiella utförande visas i bild 5:15. a. Det statistiska trycket i och utanför sonden jämförs under hela avsugningen och avsugningshastigheten avpassas så att de båda trycken är lika. Vid lika strömningsfall - t.ex. fullt utbildad turbulent strömning i och utanför sonden - innebär lika statistiskt tryck att de båda hastigheterna är lika om tryckförlusterna vid utströmningen och friktionsförlusterna i sonden är försumbara. Det senare är approximativt fallet, medan däremot strömningen i sonden endast i undantagsfall är fullt utbildad turbulent och strömningsförhållandena utanför sonden sällan är kända ¹⁾. Det kan vara av intresse att närmare studera storleken av felet på grund av det uppträdande gränsskiktets tjocklek. Vid fullt utbildad strömning gäller approximativt för hastighetsprofilen i sonden

$$v = v_{\max} \left\{ \frac{R-r}{R} \right\}^n$$

där v_{\max} är centrumhastigheten
 n en exponent
 R sondens innerradie och
 r avståndet från centrum till den punkt där hastigheten är v , se bild 5:16.

1) Man bör här varna för mätning med nollsond i närheten av ett strömningshinder i eller omedelbart efter en kanalböj m.fl. ställen. Risken för strömning vinkelrätt mot sondriktningen är i sådana fall överhängande, och speciellt om sonden endast har ett enstaka tryckuttag kan en oförsiktighet vara ödesdigert för mätresultatet.

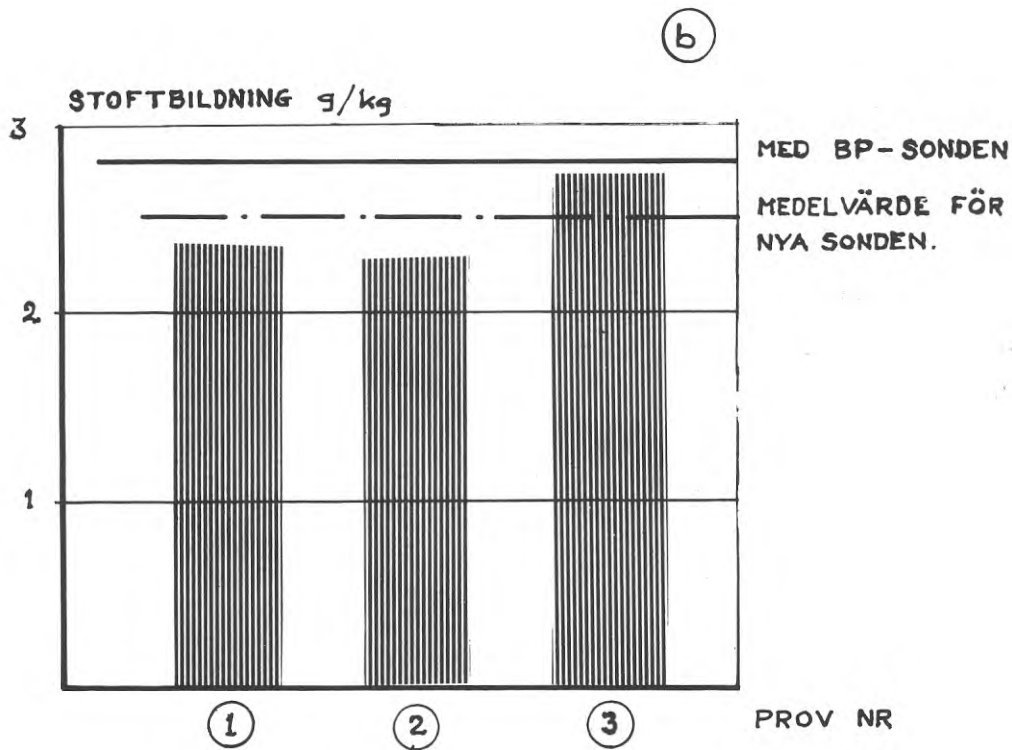
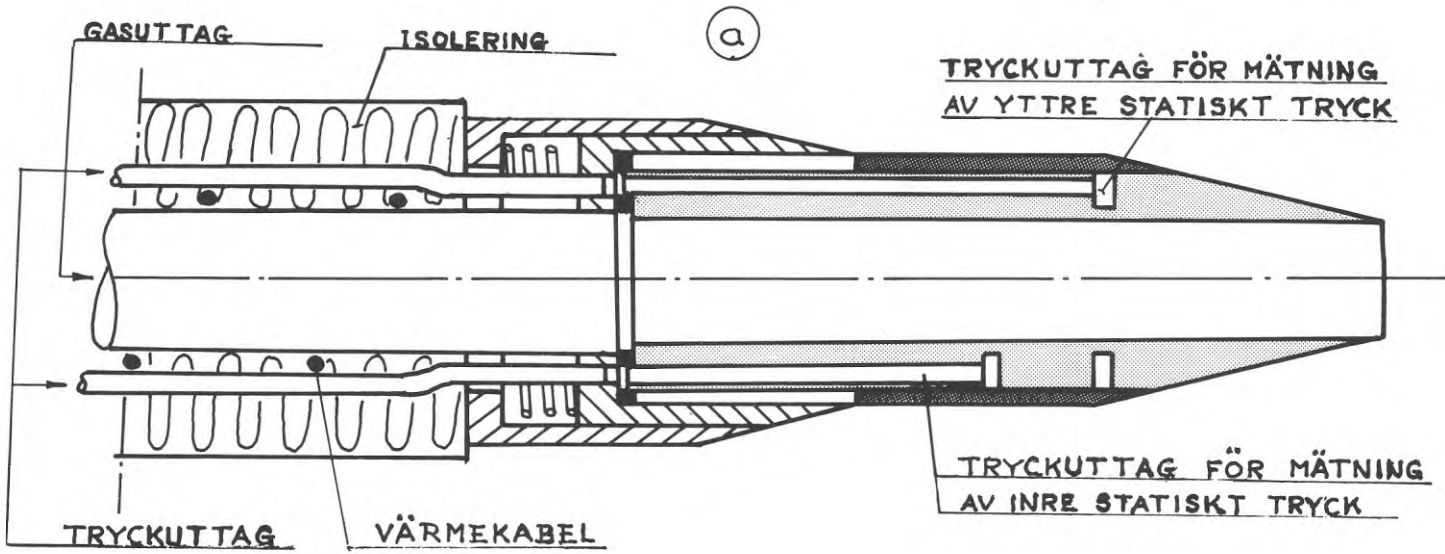


BILD 5:15a Den nykonstruerade nollsonden.

b Resultat av jämförande mätning mellan nya sonden och "BP-sonden"

För flödet Q gäller således

$$\dot{Q} = \int v dA = 2v_{\max} \cdot \pi R^2 \int_0^R (1 - r/R)^n r dr \quad (5:9)$$

där A är sondens tvärsnittsarea.

Flödet blir härmed

$$\dot{Q} = \pi R^2 v_{\max} \frac{2}{(1+n)(2+n)} \quad (5:10)$$

d.v.s. för $n > 0$ blir $Q < \pi R^2 \cdot v_{\max}$.

Det statiska trycket i sonden hänför sig emellertid till v_{\max} ,
d.v.s. till flödet

$$\dot{Q}_s = \pi R^2 v_{\max} \quad (5:11)$$

Förhållandet mellan det verkliga flödet (5:10) och detta (5:11) blir

$$\psi = \frac{2}{(1+n)(2+n)} \quad (5:12)$$

Storleken av flödeskorrektionen beror på värdet av n . Denna exponent heter i sin tur Reynolds tal, Re :

$$Re = 2\bar{v}R/\nu \quad (5:13)$$

där \bar{v} är medelhastigheten i sondröret och

ν är gasens kinematiska viskositet. För förbränningsgaser, med en strömningshastighet \bar{v} av

$$5 < \bar{v} < 25 \quad \text{m/s} \quad (5:14)$$

och med sonddiametern

$$2R = 0,01 \text{ m} \quad (5:15)$$

erhålls för

$$\nu = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (5:16)$$

$$5000 < Re < 25\ 000 \quad (5:17)$$

I detta intervall gäller

$$n \approx \frac{1}{7} \quad (5:18)$$

och enligt (5:12)

$$\psi = 0,82 \quad (5:19)$$

För höga gastemperaturer kan ν stiga till ca 10^{-4} vilket ger laminär strömning och därmed

$$\psi = 0,5 \quad (5:20)$$

I det förra fallet blir felet i avsugningshastighet således maximalt ca 18 % vid fallet utbildat flöde, medan man i det senare fallet får väsentligt större fel. Avsugningsfelet påverkar dock felet i erhållen stofthalt i mindre grad, bild 5:16. Felen i stofthalt blir för de två exemplen ca + 10 % resp. + 40 %, d.v.s. en avsevärd för hög stofthalt erhålls.

Den utvecklade apparaten - se Björkesson(1970)- har utvecklats med hänsyn till det fel som ändliga värden på n ger upphov till. Sonden har, se bild 5:15, utförts så att någon fullständigt utbildad strömningsbild ej erhållits.

Härmed gäller

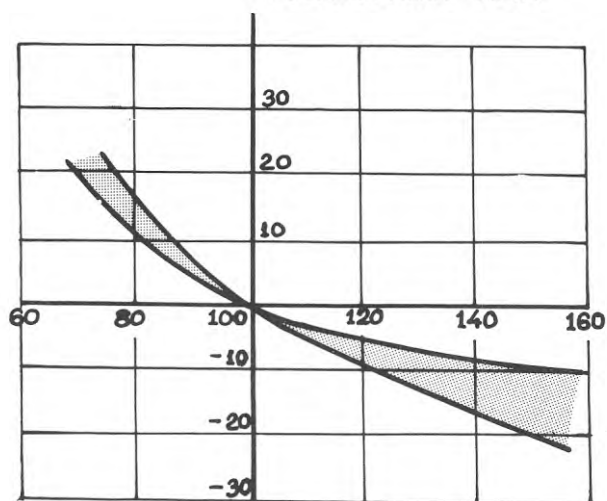
$$n = 1 \quad (5:21)$$

och enligt (5:12)

$$\psi = 1 \quad (5:22)$$

Den tidigare påvisade mätdifferensen mellan den nya och äldre apparaten kan i viss mån hänföras till de visade förhållandena.

PROCENTUELLT FEL.



HASTIGHET I SOND
SOM PROCENT AV HASTIGHET I KANAL.

BILD 5:16 Fel p g av icke isokinetisk avsugning. Diagrammet gäller för relativt stora partiklar. För stoft från EO 1 blir felet försumbart.

5.7.1.2 Sondrand

Vid nollsonden är *sondrandens* utförande av ytterst stor betydelse. En avplattning av sondranden, se bild 5:17, medför en väsentligt försämrad känslighet vid tryckmätningen. Med stöd av denna mätning kan man annars lätt anpassa avsugningshastigheten till fluktuationer i gasflödet utanför sonden. En trubbig sondrand medför även ett relativt stort mätfel på grund av instudsande partiklar, se bild 5:17.

5.7.1.3 Stoftavsättning i sondrör

Risken för stoftavsättning före filtret ökar om kondensering ¹⁾ uppstår i sond eller sondrör. Sonden måste därför värmas över förbränningsgasernas daggpunkt (vid normalsvavliga oljor ca 150°C) vilket sker genom anvärmning vid BP-sonden eller vid den nya apparaten genom värmning med elektrisk kabel. I båda fallen är det av väsentlig betydelse att förbränningsgaserna har temperatur över 180°C vid mätstället, se tabell 5:4.

TAB. 5:4 Förbränningsgasernas temperatur under mätningar vid några centraler.

Central	Förbränningsgasernas temperatur °C vid mätstället			
	1/3 last	1/2 last	3/4 last	1/1 last
C	-	150	170	210
P	-	190	210	260
S	160	180	230	265
F	130	150		245

5.7.2 Stoftgenomsläpp i filter

Risken för stoftgenomsläpp i filter ökar vid dålig packning av filtermaterialet, se bild 5:18.

Det bör emellertid observeras att felet ovan - upptill 25 % vid mätning på Eo 1 - motsvarar en stoftgenomgång av 0,05 g/kg olja vilket vid mätning på en normal tjockolja motsvarar ca 1 - 2 %. Mätfelet är således i detta senare fall utan betydelse jämfört med andra fel.

1) I förekommande fall måste korrigeringsfaktor för kondenserad svavelsyra göras.

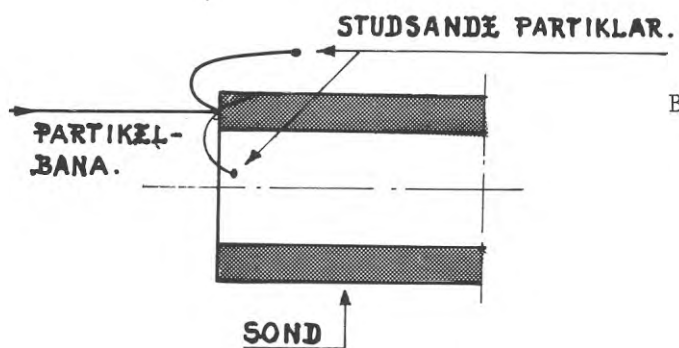


BILD 5:17 Vid trubbig sondrand erhålls fel bl a p g av instudsande partiklar.

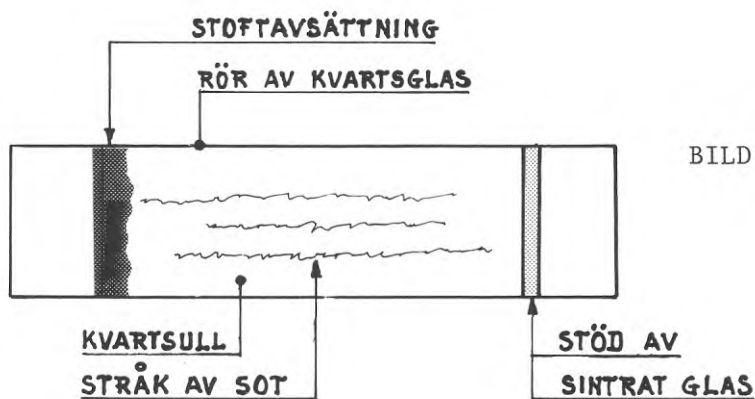


BILD 5:18 Vid dåligt packat filter erhålls stoftgenomsläpp, vilket kan ses som svarta stråk genom filtret.

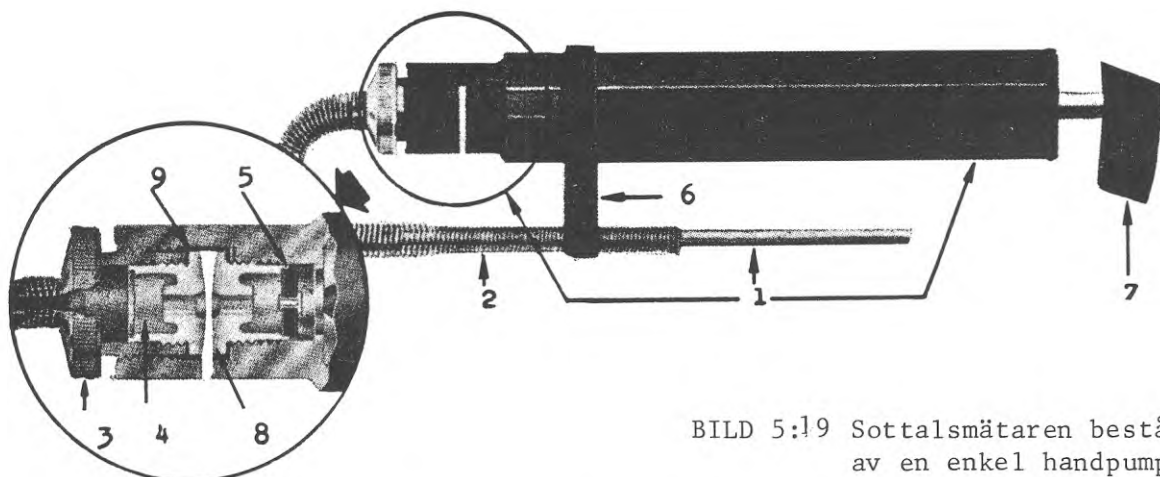


BILD 5:19 Sottalsmätaren består av en enkel handpump.

1. Pump
2. Sondrör
3. Klämskruv
4. Fuktventil
5. Backventil
6. Fästanordning
7. Handtag
8. Filtrets läge
9. Fästtapp.

5.7.3 Viktminskning

På grund av viss viktminskning från filtermaterial eller filterhållare av glas, kan vid låga stoftkoncentrationer t.o.m. negativa stofthalten uppmätas. Felkällan kan undertryckas genom lämplig utformning av filterhållaren (användning av rundsmälta kanter) och försiktighet vid packning av kvartsfiltret. Före invägning bör filtret även genomspolas av ren luft så att ev. löst filtermaterial kan bortgå.

Det har även visat sig vara av väsentlig betydelse att packningarna vid filterhållaren är rena och att ej hårda partiklar fastnat på dem.

5.8 SOTTALSMÄTNING

Sottalsmätning, som utförs med en enkel handpump, se bild 5:19, är en enkel metod för bestämning av stoftemissionen från oljeeldade värmeanläggningar. Tyvärr avspeglar mätvärdena knappast stofthalten i förbränningsgasen annat än i samband med tunnoljeeldning, se t ex Peterson (1969a). Även här finns dock ett antal felkällor vilka måste beaktas vid mätningen:

o Provvolymen - som skall vara $5,75 \text{ liter gas/cm}^2$ effektiv filteryta (se bild 5:20) kan vara felaktig till följd av:

otät pump

felkonstruerad pump eller felaktigt föreskrivet antal pumpsdrag

för hög gastemperatur vid provtagningsstället

för låg gastemperatur i pumpen till följd av för långt driven kylning i sondröret

o Missfärgning av filterpappret kan ske till följd av

avsättning av färgad aska eller oförbränd oljeånga

"bränning" av pappret p g av för hög gastemperatur

o Utvärderingen av sottalet är felaktigt gjord p g av

felaktig (vanligen för svag) belysning vid provtagningsstället

felaktigt utförd jämförelseskala

felaktigt val av "medelvärde" vid flera gånger upprepade prov

felaktigt (för tätt eller för poröst) filterpapper

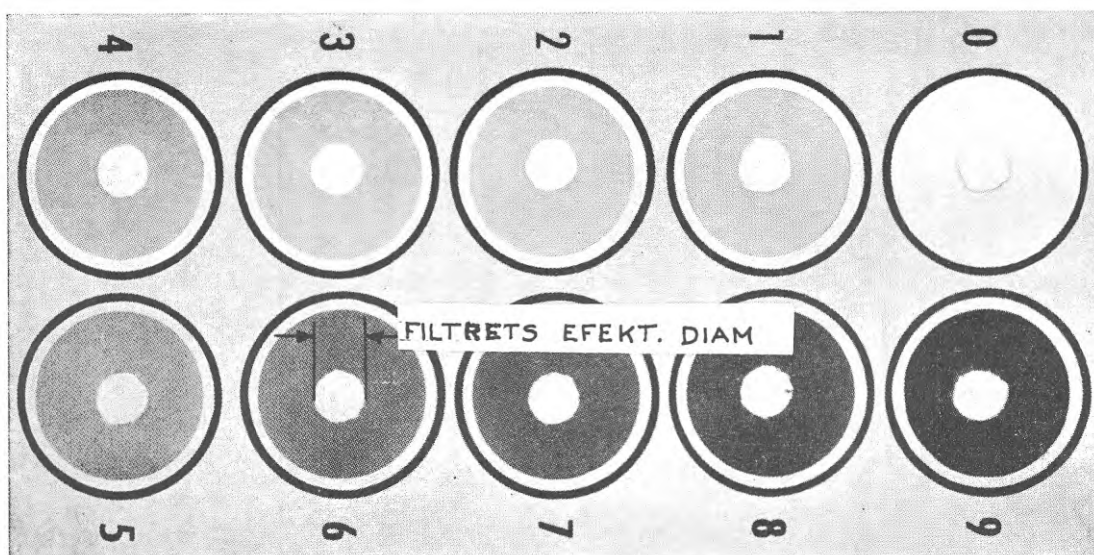


BILD 5:20 Bacharachskalan.

SOTTAL .

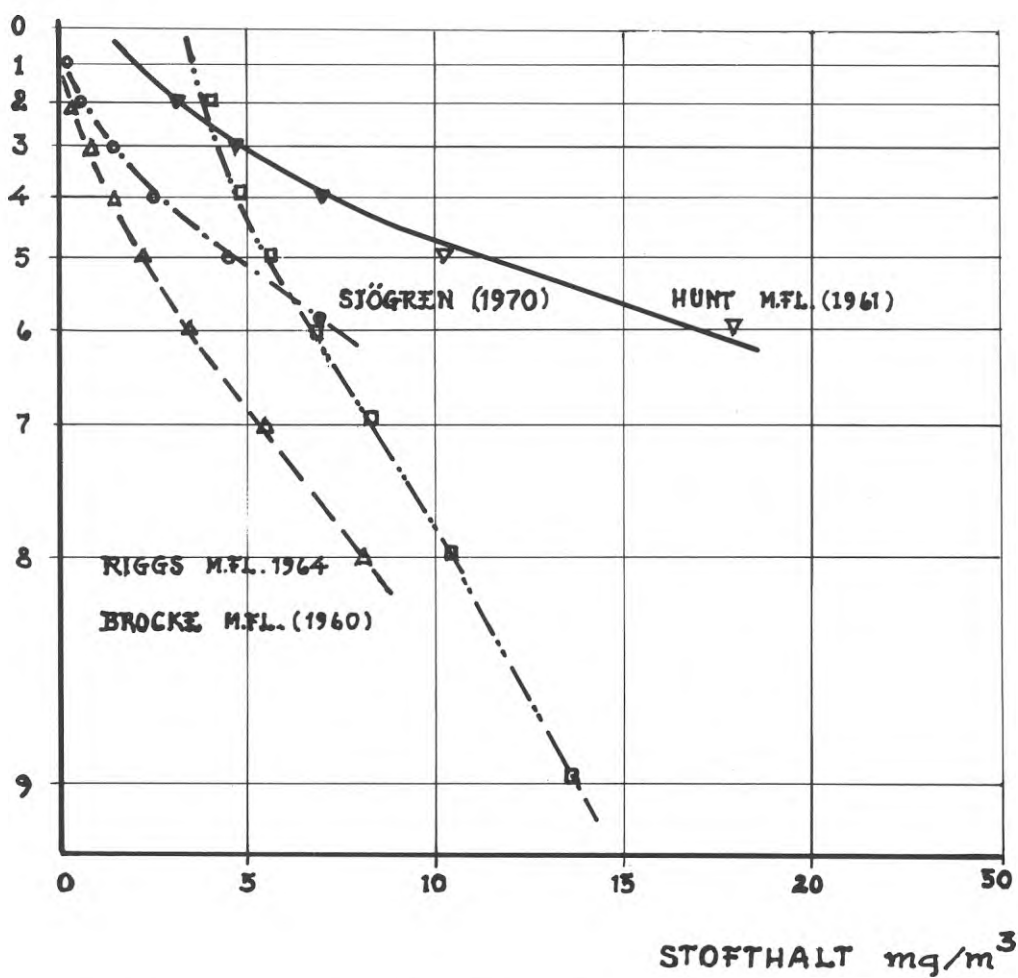


BILD 5:21 Sambandet stofthalt/sottal för destillatolja enligt olika källor.

5.8.1 Teorin för sottalsmätning

Flera teorier för sambandet mellan stofthalt och sotal har uppställts. Peterson (1969a) behandlar matematiskt den s k "yt-teorin", som leder till svärtningen från det utfällda stoftet kan beskrivas av

$$k_1(10 - S) = \exp -k_2(C - C_0) \quad (5:23)$$

där C är stofthalten (mg/m^3) i gasen

C_0 är halten ej färgande stoft

k_1, k_2 är konstanter och S svärtningen (Bacharachtalet).

Sjøgren (1971a) har senare framställt en s k "tratt-teori", som bygger på att stoftet samlas i felaktigheter i filtrerpappret och där ansamlas i "trattformiga" pelare. Sambandet mellan stofthalten och svärtningen beskrivs i detta fall av

$$S = k_3 C^{1,5} \quad (5:24)$$

där k_3 är en konstant.

Det kan vara av intresse att konstatera att ekv (5:24) skall ge en linjär framställning i ett dubbellogaritmiskt nät så snart $C \gg C_0$, vilket vanligen, för destillatolja, inträffar vid

$$C > 5 \text{ mg}/\text{m}^3 \quad (5:25)$$

I bild 5:21 och 5:22 visas resultaten av ett antal försök i de båda diagramtyperna.

Som visas i bilderna ger Brockes (1963), Riggs (1964) och Hunts (1961) värden med betydande avvikelser från "tratt-teorin" men bättre anpassning till "yt-teorin". Sjøgren (1971a) förklarar detta med att sotpelarna trycks samman vid provtagningen, varför potenslagen (5:24) endast skulle gälla under första delen av provtagningen (sotal < 3). Sanningen torde vara att ingendera av de båda teorierna är tillräckligt skarp för att helt förklara uppkomsten av sottalet och samtidigt ge ett gott kvantitativt samband mellan sotal och stofthalt. "Yt-teorin" synes dock ha fördelen att kvalitativt ta hänsyn till partikelstorlek, provtagningsvolym, stoftets densitet osv, medan "tratt-teorin" i hög grad avhänger av den ovannämnda hoptryckbarheten av stoftet.

5.8.2 Sottalsmätning vid fältförsöken

Sottalsmätningar utfördes vid de flesta fältförsök, bl a som en viss kontroll av att förbränningen var "normal". Av ovan angivna skäl skall de här redovisas endast i undantagsfall.

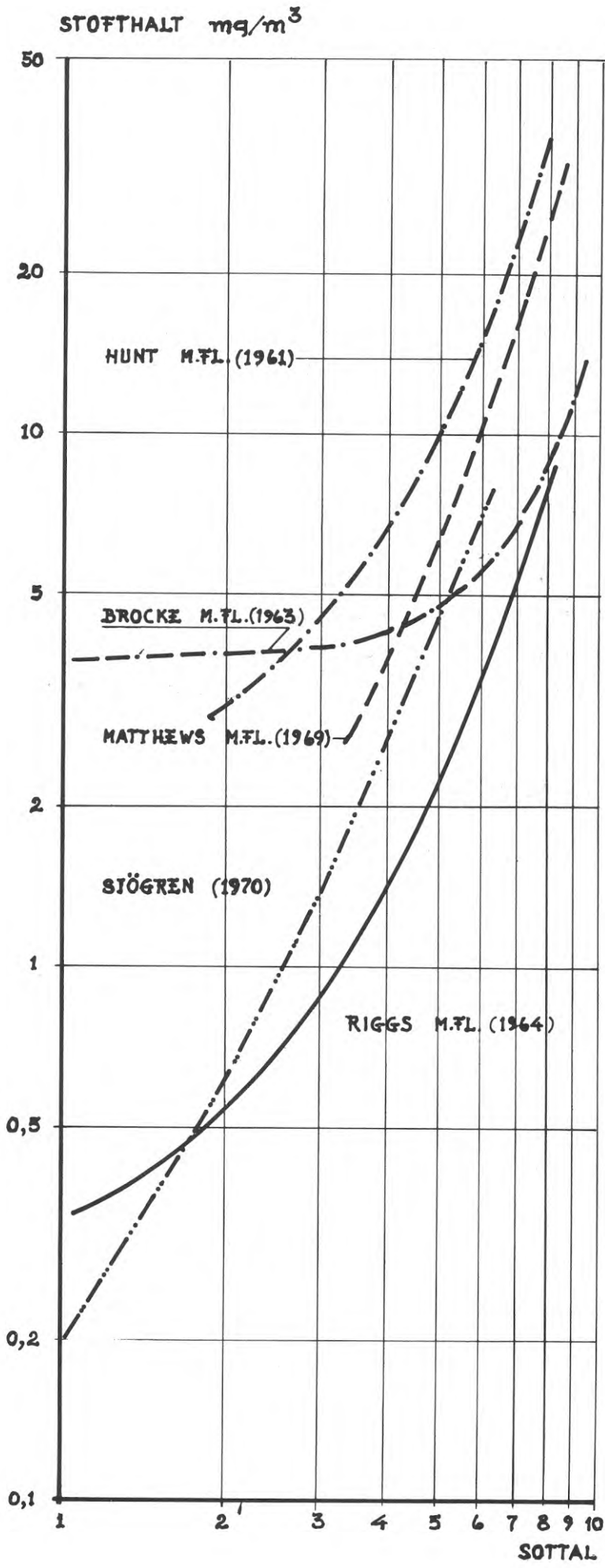


BILD 5:22 Sambandet sot-tal-stofthalt för lätta eld-ningsolja.

6. STOFTBILDNING FRÅN OLJEBLANDNINGAR¹⁾

6.1 STOFTBILDNINGEN ÄR EJ EN ADDITIV EGENSKAP.

Vätskors egenskaper är sällan additiva. En blandning av alkohol och vatten har exempelvis mindre volym än de ursprungliga beståndsdelarna och en lösning av ättiksyra i vatten uppvisar en specifik värmekapacitet som ej kan beräknas genom proportionering. Även stoftbildningen från en blandning av två olika oljor kan skilja sig väsentligt från vad en enkel proportionering ger.

Det kan vara av intresse att se närmare på ett slående exempel på denna senare effekt. I tabell 6:1 visas mätvärden för stoftbildningen från tre oljor vid eldning i experimentpannan.

TAB 6:1

Egenskap	Olja			Enhet
	I	II	III	
Densitet (15°C)	934	941	936	kg/m ³
Viskositet (50°C)	80	80	80	cSt
Kokstal	4,0	6,9	4,8	Ramsbotten %
Stoftbildning 13 % CO ₂	0,49	4,12	0,55	g/kg

Olja I ger ett mycket gott förbränningsresultat med en stoftbildning av 0,49 g/kg olja. Askhalten för denna och de övriga oljorna är uppgiven till ca 0,03 % och spelar således ej någon avgörande roll i sammanhanget.

Olja II är däremot en relativt dålig olja, med en stoftbildning av över 4 g/kg olja, d.v.s. ungefär 8 gånger högre än vad föregående olja gav.

Den tredje oljan är återigen en bra olja, som med 0,55 g/kg ger ett från luftvårdssynpunkt gott förbränningsresultat. Denna olja är en blandning av olja I och II, och man skulle här vara benägen att tro att denna blandning till 90 % skulle bestå av olja I. En enkel proportionering utförd som

$$S_1 P_1 + S_2 P_2 = S_b \quad (6:1)$$

där S_1 och S_2 är stoftbildningen (g/kg) för resp. olja.

1) Här och i fortsättningen avses nettobildning, se förord..

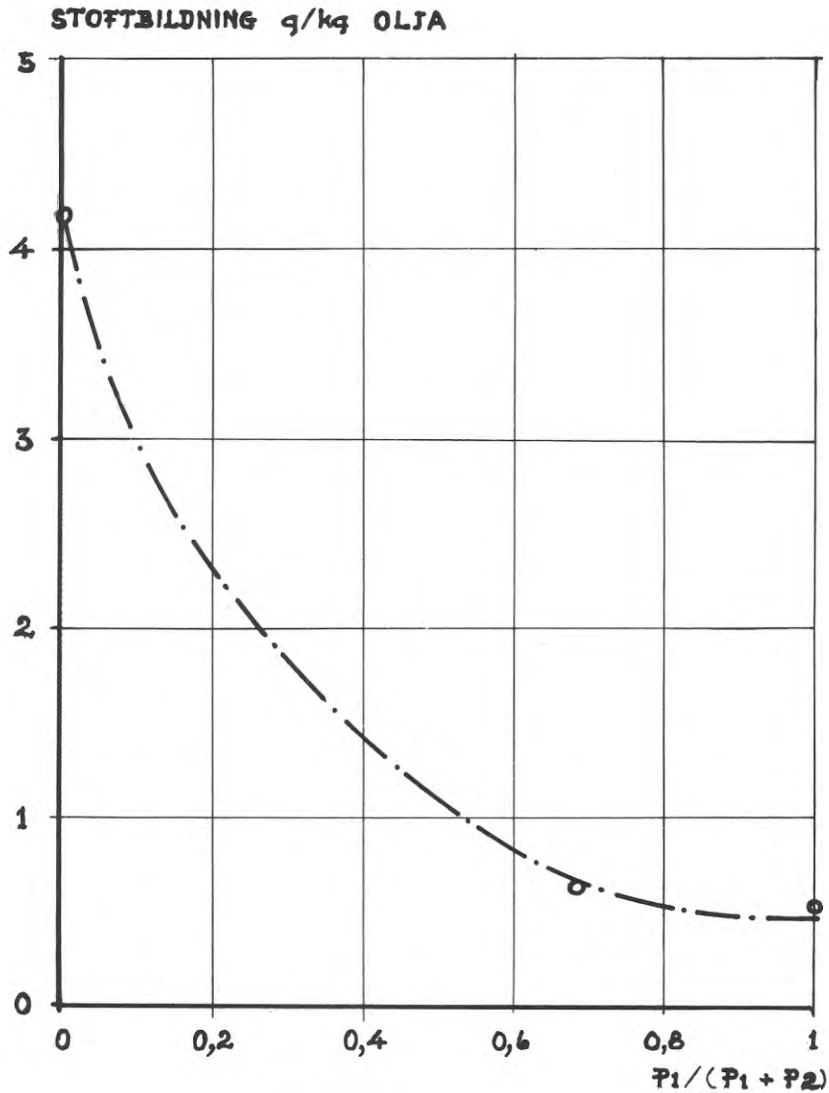


BILD 6:1 Stoffbildningens variation med inblandningen av olja P_1 i olja P_2 . Som framgår av bilden erhålls en kraftig minskning av stoffbildningen redan för en relativ blygsam inblandning. Ju större del av blandningen som utgörs av olja P_1 , desto mindre effekt får en ytterligare inblandning.

Förhållandet pekar på möjligheterna att genom en ekonomisk avvägning mellan kravet på ev stoftavskiljare och en förbättring av oljan, t ex genom inblandning av "bra" olja i "sämre" nå en viss optimering av driftkostnaderna.

P_1 och P_2 är andelen av resp. olja ($0 < P < 1$) och S_b är blandningens stoftbildning (g/kg).

$$\text{skulle ge} \quad 0,49 P_1 + 4,13(1 - P_1) = 0,55 \quad (6:2)$$

d.v.s.

$$P_1 = 0,98 \quad (6:3)$$

I realiteten består olja III av 31 vol.% av olja II och 69 vol.% av olja I. Ändringen i stoftbildning, som funktion av halten av olja I, visas i bild 6:1.

Redan en liten inblandning av olja I i II medför således en kraftig förbättring av den sämre oljans egenskaper, och en inblandning till förhållande $P_1 / P_2 = 2$ motsvarar en sänkning av stoftbildningen med 60 % från 4,2 till 1,7 g/kg olja.

6.2. STOFTBILDNINGEN FRÅN OLIKA OLJEBLANDNINGAR.

Stoftbildningen för ett antal oljeblandningar har undersökts. I samtliga fall har proven utförts på experimentpannan och oljan har för alla oljor utom EO 1 haft en konstant viskositet av 20 cSt. Vid provning av tunnolja eller blandningar där tunnoljeinlaget övervägt har viskositeten legat mellan 10 cSt och 12 cSt. Som tidigare nämnts är emellertid förstoftningen hos den använda brännaren relativt oberoende av oljans viskositet (se avsnitt 2), varför smärre viskositetsvariationer - vilket kan förekomma under ett och samma prov - ej spelar någon roll för droppbildningen och därmed cenosfärbildningen. De provade oljornas egenskaper framgår av tabell 6:2.

TAB 6:2

Olja	SIS-beteckning	Viskositet cSt		Ungefärlig askhalt g/kg
		20° C	50° C	
B1	EO 1	ca 10		spår
B2	EO 1	ca 10		spår
B3	EO 1	ca 10		spår
B4	EO 4 LS		70	0,3
B5	EO 4 LS		75	0,2
B6	EO 4 LS		80	0,06
B7	EO 4		130	
B8	EO 5		ca700	

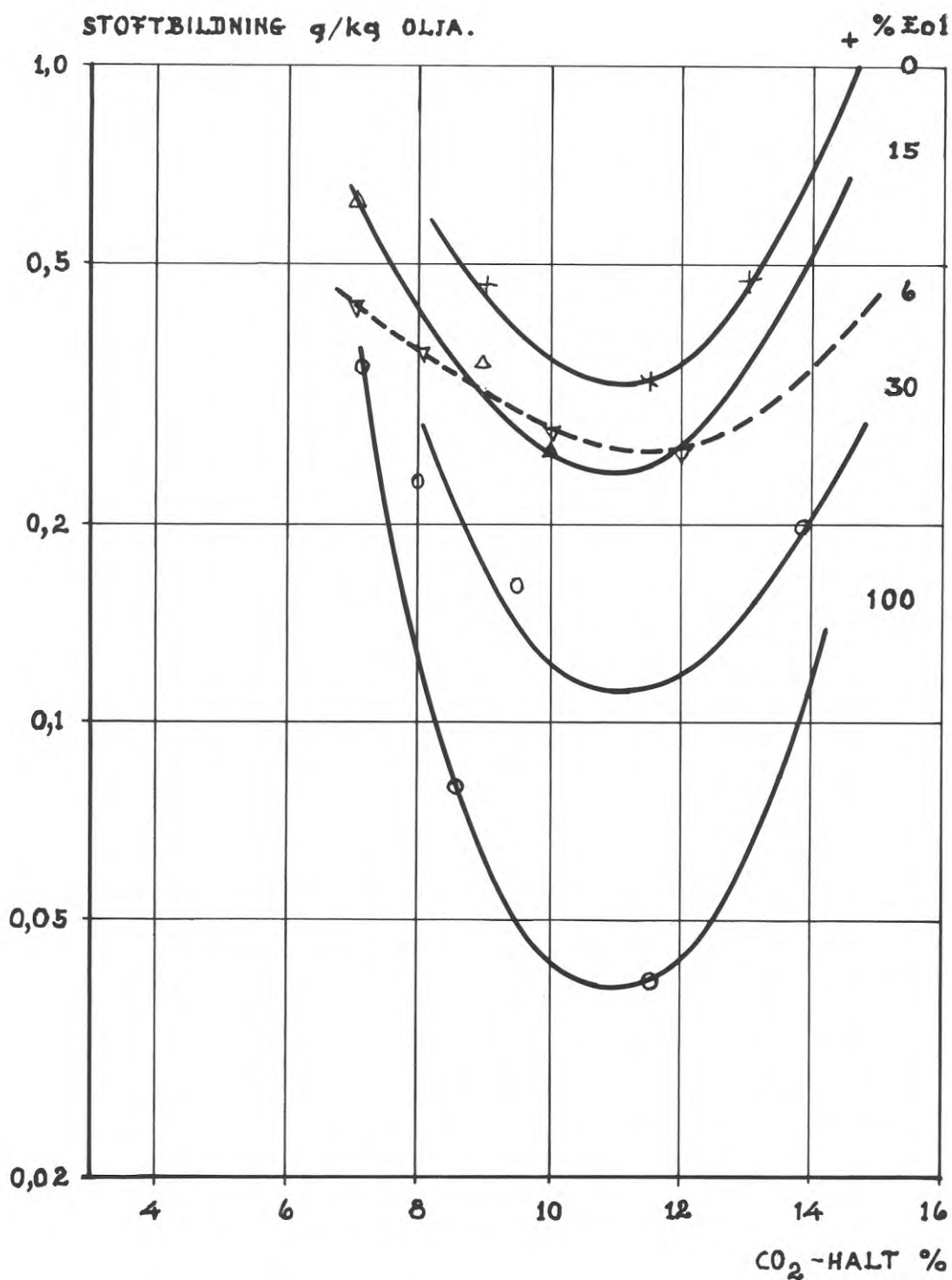


BILD 6:2 Stoffbildningen från olja B1 (EO 1) och B6 samt för vissa blandningar mellan de båda oljorna. Som framgår av bilden erhålls för samtliga blandningsförhållanden en minsta stoffbildning vid ca 11 % CO₂. Försöken som redovisas är utförda på laboratoriepannan.

6.3. UNDERSÖKNING AV BLANDNINGAR MELLAN DESTILLATOLJOR OCH TJOCKOLJA.

Låt oss först se närmare på hur inblandning av destillatolja, EO 1, i tjockare oljor inverkar på sotbildningen. Givetvis ändras oljans viskositet, men detta har som nämnts kompenseras genom val av temperatur motsvarande viskositeten 20 cSt. I bild 6:2 visas stoftbildningen som funktion av CO₂-halten vid olika blandningar mellan oljorna B1 och B6.

Försöksserien visar att en lägsta stoftbildning inträffar vid ca 10 % CO₂ - stoftbildningsminimum påverkas således ej av inblandningen d.v.s. respektive oljas kemiska eller fysikaliska egenskaper. Förhållandet måste antingen hänföras till allmänna egenskaper hos oljor eller också till de strömnings- och värmetekniska förhållandena vid förbränningen.

Beträffande försöksvärdena kan man konstatera att de för EO 1 erhållna stofthalterna är mycket låga, *även i relation till den aktuella tjockoljan (EO 4) som är en ur stoftbildningssynpunkt mycket bra olja.* Stoftbildningen från EO 1 är således endast omkring 10 - 20 % av den från tjockoljan.

Även olja B2 uppvisar låg stoftbildning. I bild 6:3 visas stoftbildningen för en blandning mellan olja B2 och B4 och i bild 6:4 för en blandning av B2 och B7.

Oljorna B4 och B7 är från stoftbildningssynpunkt väsentligt sämre än den förra tjockoljan B6. B4 är liksom B6 en eldningsolja 4 medan B7 är en ännu tjockare kvalitet - EO 5.

Som framgår ger B7 utan inblandning lägre stoftbildning än B4 vid i övrigt identiska förhållanden.

Oljekvaliteten - konventionellt uttryckt med viskositetsegenskaperna för en olja - är således ej något säkert mått på sotbildningstendensen, såvida ej oljans viskositetsområde och brännarens är direkt olämpliga för varandra.

Man kan konstatera att en relativt blygsam inblandning av en bra olja i en sämre ger en kraftig förbättring av den sämre oljan. I tabell 6:3 visas inverkan av en inblandning motsvarande $P_1 = 30\%$ i de tre här diskuterade tjockoljorna.

STOFFBILDNING g/kg OLJA

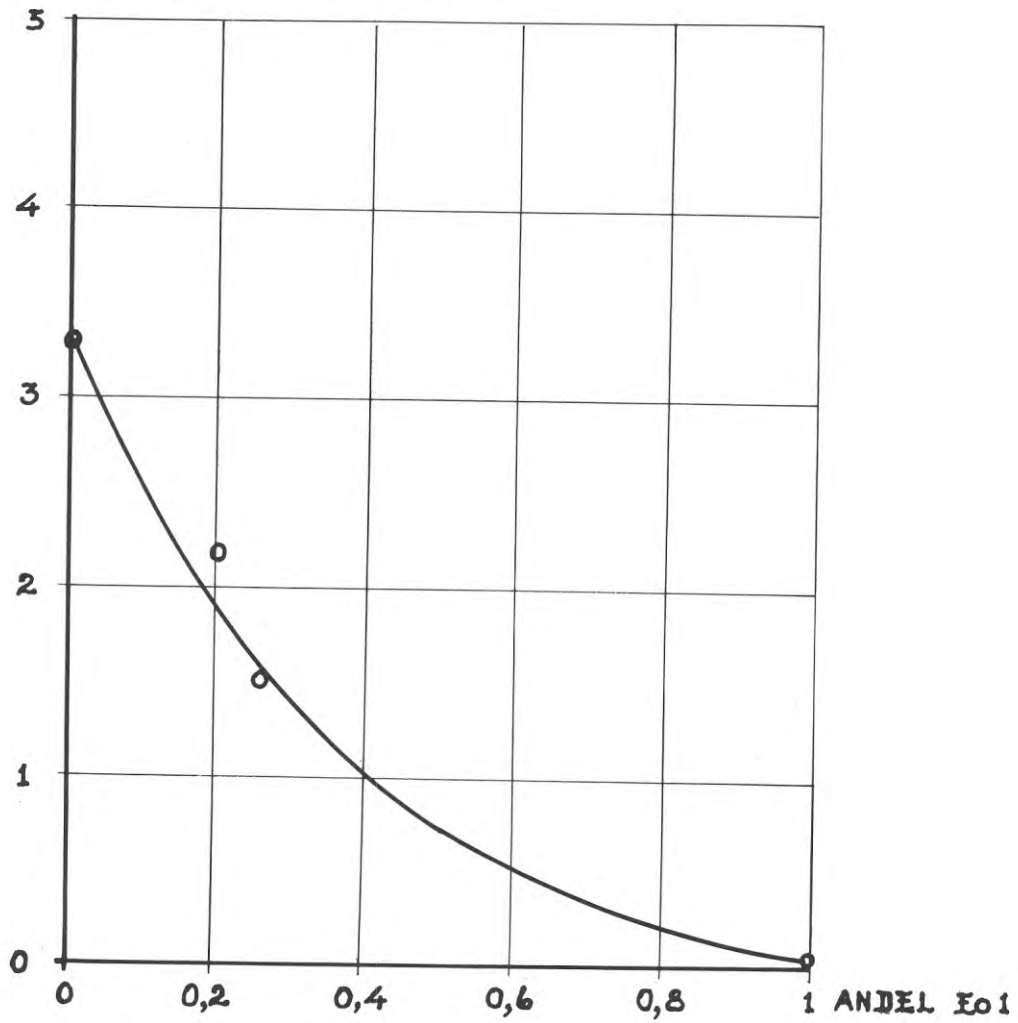


BILD 6:3 Stoffbildning från blandningar av oljorna B2 och B4.

STOFFBILDNING g/kg OLJA

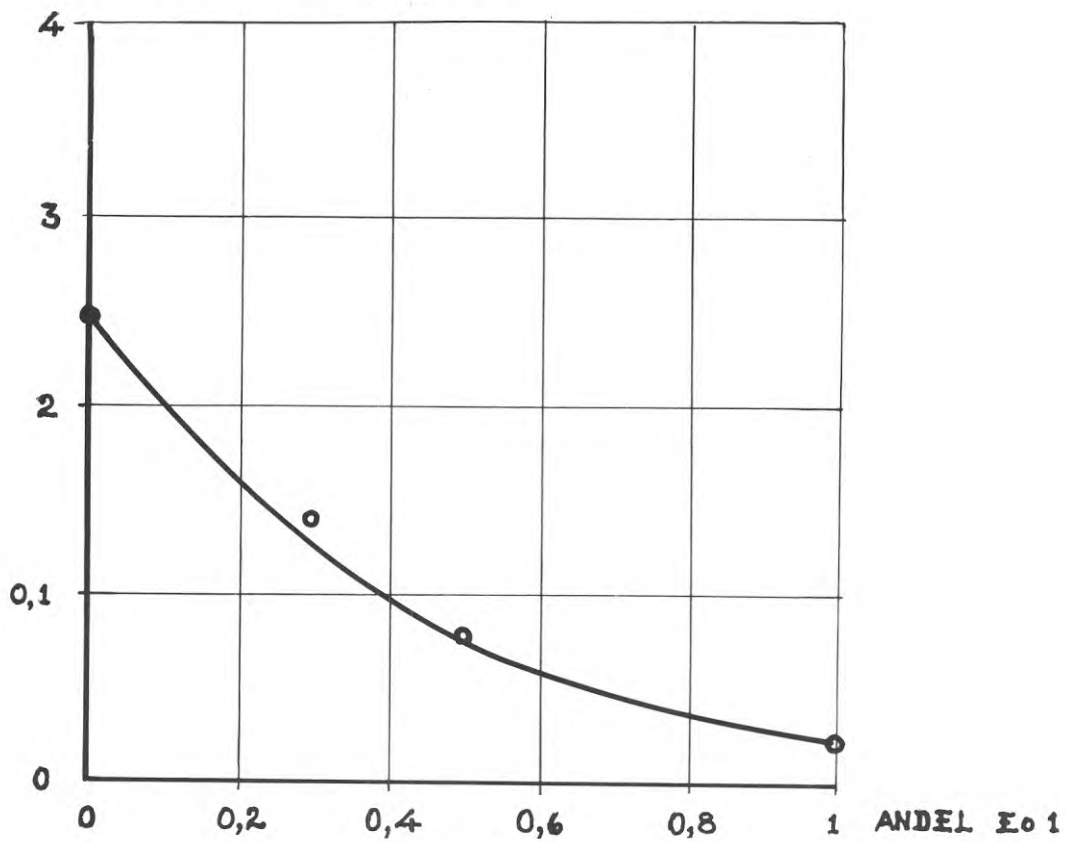


BILD 6:4 Stoffbildning från blandningar av oljorna B2 och B7.

TAB 6:3 Ändring av stoftbildningen vid inblandning av destillatolja i tjockoljor ($\text{CO}_2 = 10\%$). Försök med experimentpannan.

Tjockolja	Stoftbildning utan inblandning g/kg	Stoftbildning vid $p_1 = 0,3$ g/kg	Ändring i stoftbildning	
			g/kg	%
B 4	3,10	1,55	1,55	50
B 6	0,98	0,75	0,23	60
B 7	1,20	0,95	0,25	25

Man observerar att förändringen blir olika för de tre oljorna liksom för det tidigare givna exemplet, se bild 6:1 där man för $P_1 = 0,3$ får ca 60 % minskning av sotbildningen.

Redan här kan man göra den intressanta iakttagelsen att man vid inblandning av en och samma olja (B2) till två olika oljor (B4 resp, B7) får en större relativ förändring (50 % mot 20 %) vid inblandning i den sämre oljan (B4) än vid inblandning i den bättre (B7).

6.4. UNDERSÖKNING AV OLIKA TJOCKOLJEBLANDNINGAR.

I tabell 6:4 och 6:5 anges resultat från undersökningar av två olika blandningar, nämligen B4/B7 och B4/B5. Av dessa oljor är B5 ej tidigare redovisad. Som framgår av tabell 6:5 är denna olja mycket bra, med en stoftbildning av ca 0,1 g/kg olja vid bästa CO_2 -halt (= 10 %).

Man kan sänka stoftbildningen från ca 3 g/kg vid förbränning av olja B4 till ungefär 1 g/kg vid lika delar B4 och B5, se bild 6:5. Som framgår av bilden är den uppmätta förbättringen något beroende av CO_2 -halten men i stort sett uppgår den till mellan 50 och 70 %.

I bilden har även motsvarande värden för blandningen B4/B7 tagits med. Här förekommer ingen variation med CO_2 -halten utan förbättringen är ca 50 % inom hela det nedre området.

TAB 6:4 Provresultat för blandningar mellan olja B7 och olja B4.

Oljeblandning		Oljetemperatur °C	CO ₂ -halt %	Stoftbildning g/kg
Olja B7 %	Olja B4 %			
100	0	135	8	1
			11	1,25
			14,5	2,42
50	50	135	7,5	1,79
			8,5	2,18
			12	1,83
			14	4,01
0	100	135	7	6,60
			8	3,66
			9	4,10
			10	3,07
			11	3,40
			12	4,20

TAB 6:5 Provresultat för blandningar mellan olja B4 och olja B5.

Oljeblandning		Oljetemperatur °C	CO ₂ -halt %	Stoftbildning g/kg
Olja B4 %	Olja B5 %			
100	0	135	7	6,60
			8	3,66
			9	4,10
			10	3,07
			11	3,40
			12	4,20
50	50	135	7,5	1,62
			9	1,11
			13	4,06
			14	5,06
0	100	135	7	0,24
			8,5	0,40
			10	0,10
			13	0,12

RELATIV STÖFTBILDNING

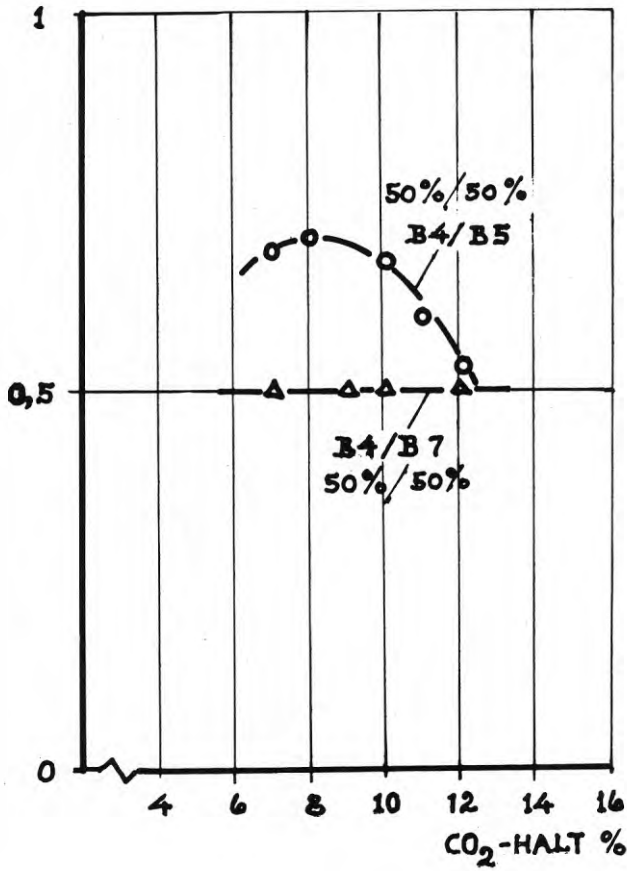
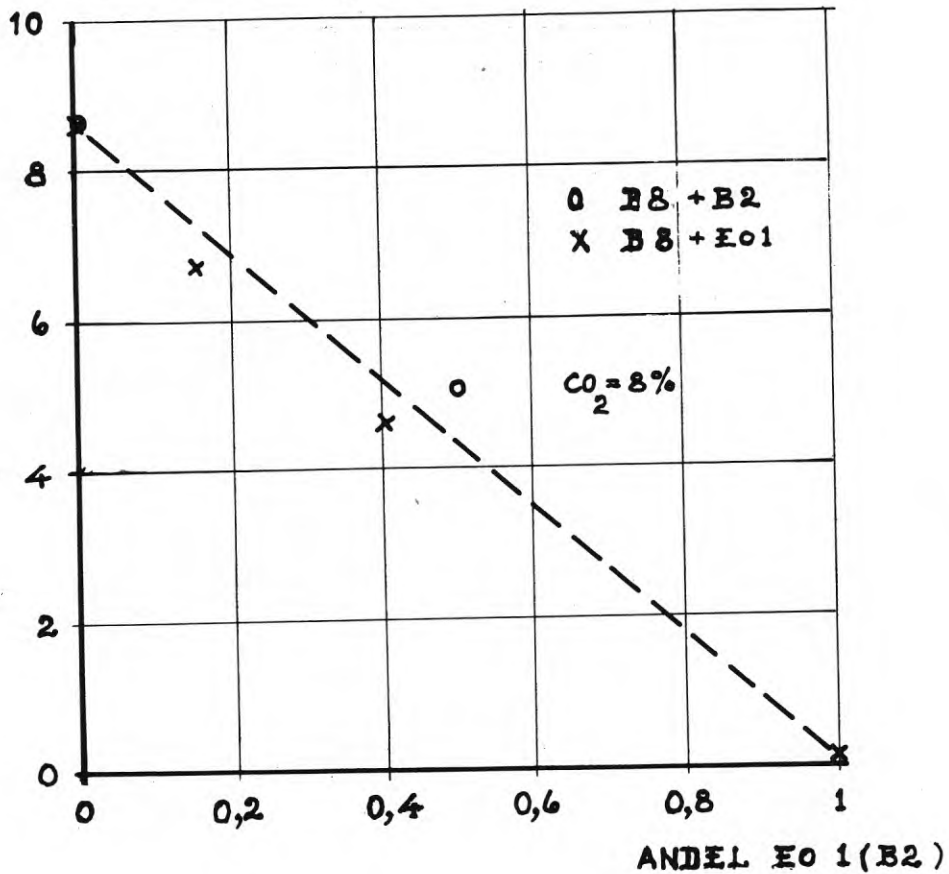


BILD 6:5 Stoffbildning vid drift med oljeblandningen i relation till drift med B4,

BILD 6:6 Stoffbildning för blandningar av olja B8 och B2 resp, B8 och Eo1.

STÖFTBILDNING g/kg OLJA



6.5. UNDERSÖKNING AV SPECIALOLJOR.

Av flera skäl kan man misstänka att en hög asfaltenhalt eller hög vaxhalt kan påverka oljans sotbildningsegenskaper. Prov med blandningar mellan sådana oljor och andra oljor har därför utförts, se tabell 6:6 - 6:8.

Oljan B8 har en exceptionellt hög asfaltenhalt jämfört med normala oljor där halten asfalten kan vara upp till 1 à 2 mass-%.

Oljan B7 är en olja med exceptionellt hög paraffinhalt (36 mass-%). Normalt har tjocka lågsvavliga oljor en paraffinhalt av omkring 50 % och normalsvavliga tjockoljor upp till 10 %.

Ytterligare en specialolja har använts, nämligen en krackad **tunnolja**, B2, vilken genom krackningen fått en väsentligt högre halt av aromater än vad som är normalt för EO 1.

I bild 6:6 och 6:7 visas effekten av inblandning av denna krackade resp. normal EO 1 i oljan B8. Bild 6:6 visar resultaten för CO₂-halten 8 %, bild 6:7 för CO₂-halten 10 %.

Som framgår av bilderna 6:6 och 6:7 föreligger en nära nog linjaritet mellan inblandning och stoftbildning för båda oljorna.

TAB 6:6 Provresultat för blandningar mellan olja B8 och olja B3.

Oljeblandning		Oljetemperatur °C	CO ₂ -halt %	Stoftbildning g/kg
Olja B8 %	Olja B3 %			
100	0	135	8	8,65
			9	5,64
			10	5,05
			11	6,65
			11,5	4,40
60	40		7,5	5,10
			9	3,84
			11	2,62
			14	3,94
85	15		10	5,56
			12	4,80
0	100	20	7,5	0,016
			9	0,009
			12	0,040
			14	0,051

Tab 6:7 Provresultat för blandningar mellan olja B8 och olja B2.

Oljeblandning		Oljetempe- ratur °C	CO ₂ -halt %	Stoftbild- ning g/kg
Olja B8 %	Olja B2 %			
100	0	135	8	8,65
			9	5,64
			11	6,65
			11,5	4,40
			10	5,05
50	50	135	9	4,90
			11	4,70
			13	4,40 ^{a)}
0	100	20	8	0,16
			11	0,10
			14	0,16

^a Oljeflödet för högt.

TAB 6:8 Provresultat för blandningar mellan olja B7 och olja B3.

Oljeblandning		Oljetempe- ratur °C	CO ₂ -halt %	Stoftbild- ning g/kg
Olja B7 %	Olja B3 %			
100	0	120	8	17,6
			10	13,9
			12,5	11,5
50	50	110	7,5	8,85
			9	7,05
			10,5	4,20
			13	4,25
0	100	20	7,5	0,016
			9	0,009
			12	0,040
			14	0,051

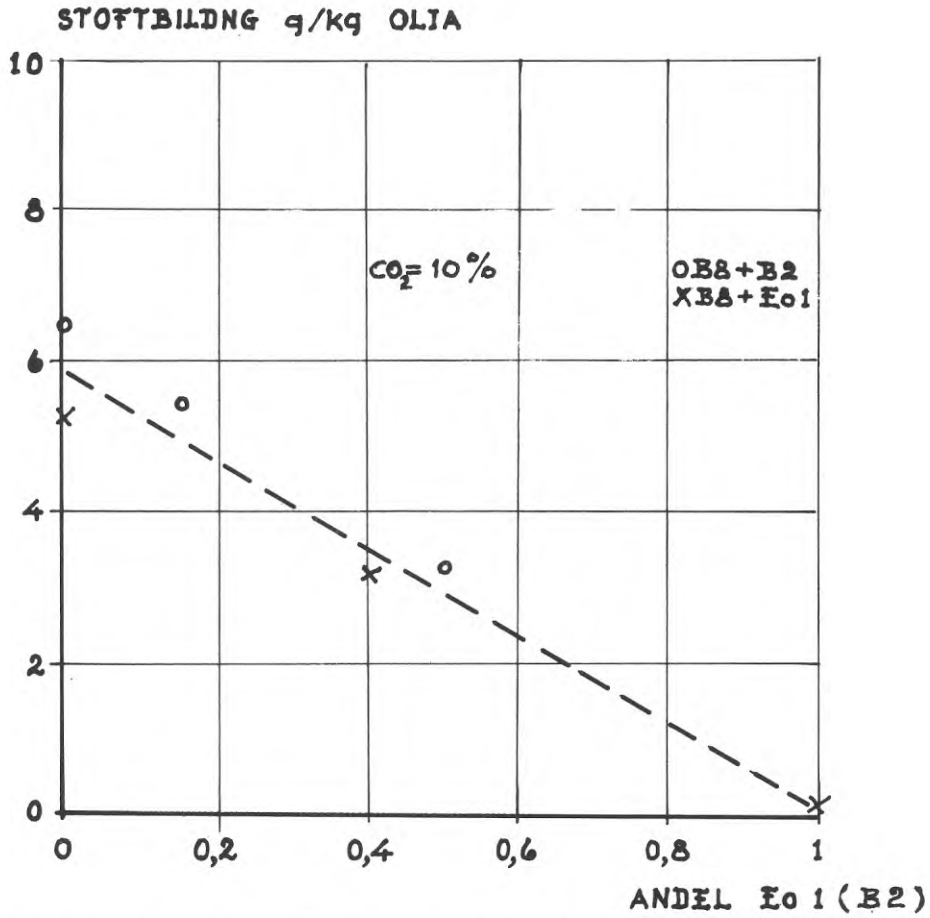


BILD 6:7 Stoffbildningen för två blandningar.

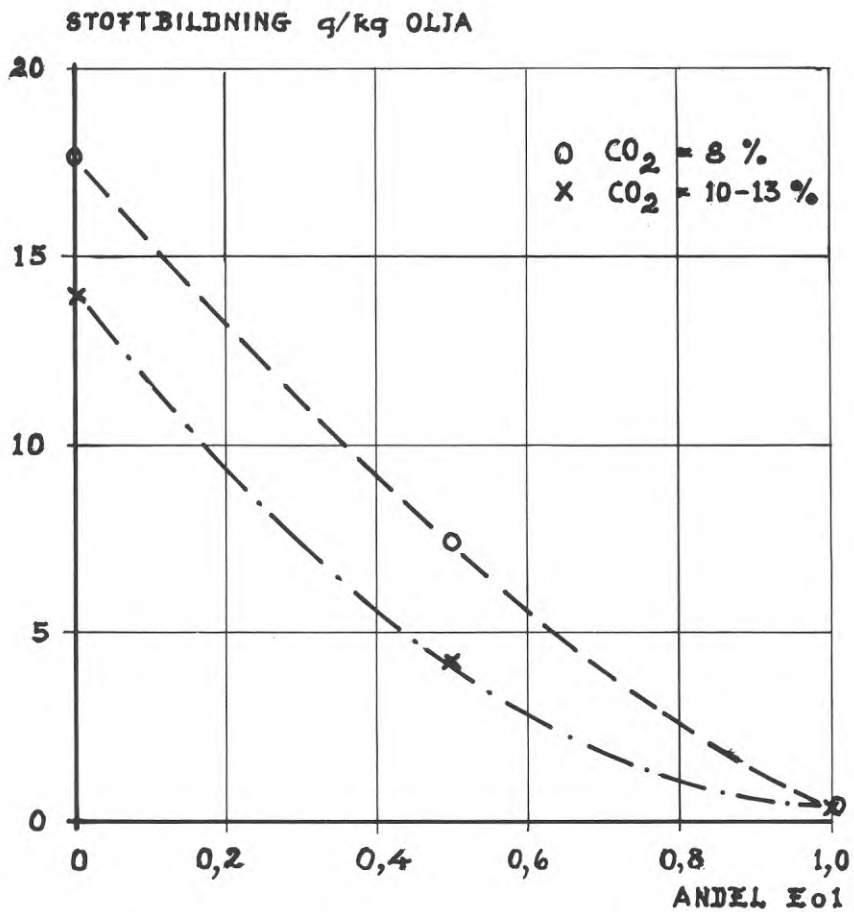


BILD 6:8 Stoffbildningen vid två CO_2 -halter. Blandning av olja B3 och B7

Den minskning vi här fått av stofthalten kan följaktligen vara en ren utspädningseffekt.

Försöken med den vaxrika oljan B7 - en olja med exceptionellt hög stoftbildning visar på en helt annan tendens se bild 6:8.

Inom hela försöksserien gav en inblandning av EO 1 (krackad) en effekt som ej var additiv, d.v.s. som ej kunde bestämmas genom en enkel proportionering. Inverkan av inblandning var istället större vid liten inblandning för att sedan avta vid högre inblandningar - helt i jämförelse med den effekt som visats i bild 6:2.

Orsakerna till dessa två helt olika effekter skall senare beröras närmare.

6.6 EMPIRISK MATEMATISK BEHANDLING AV STOFTBILDNINGEN FÖR OLJEBLANDNINGAR.

Vi har i det föregående funnit att stoftbildningen vid inblandning av en från stoftbildningssynpunkt bra olja i en sämre kan ge två slag av förbättringar vad gäller stoftbildningen; antingen kan man få en rent additiv effekt eller också kan man få en förstärkt effekt vid liten inblandning.

Den förra effekten kan tänkas sammansatt av två additiva effekter, se bild 6:9.

Den ena av de två effekterna är rent additiv inom hela intervallet $0 < P < 1$ medan den andra endast är additiv (eller approximativt additiv) inom ett mindre intervall

$$0 < P_1 < P_{\kappa} \quad (6:4)$$

För denna förra gäller, för stoftbildningen S' :

$$S' = (S_2' - S_1)(1 - P_1) + S_1 \quad (6:5)$$

medan man för den andra effekten har

$$S'' = S_2''(1 - P/P_{\kappa}) \quad (6:6)$$

inom intervallet (6:4) och för

$$P_{\kappa} < P_1 < 1 \quad (6:7)$$

$$S'' = 0 \quad (6:8)$$

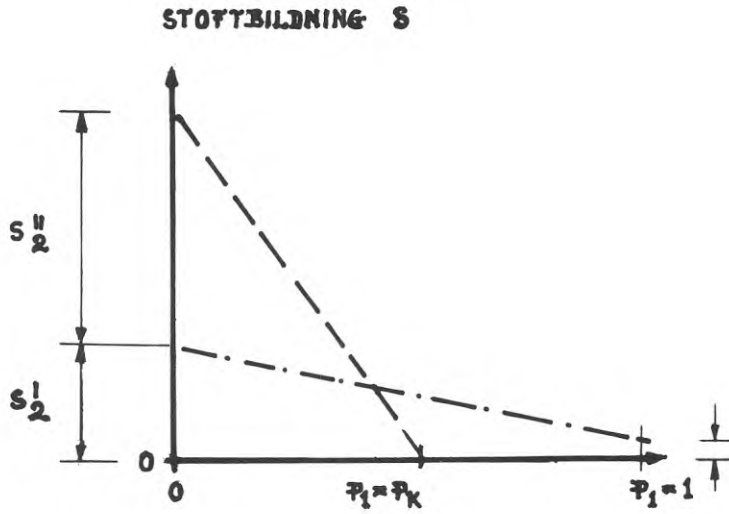


BILD 6:9 Beteckningar för avsnitt 6.6.

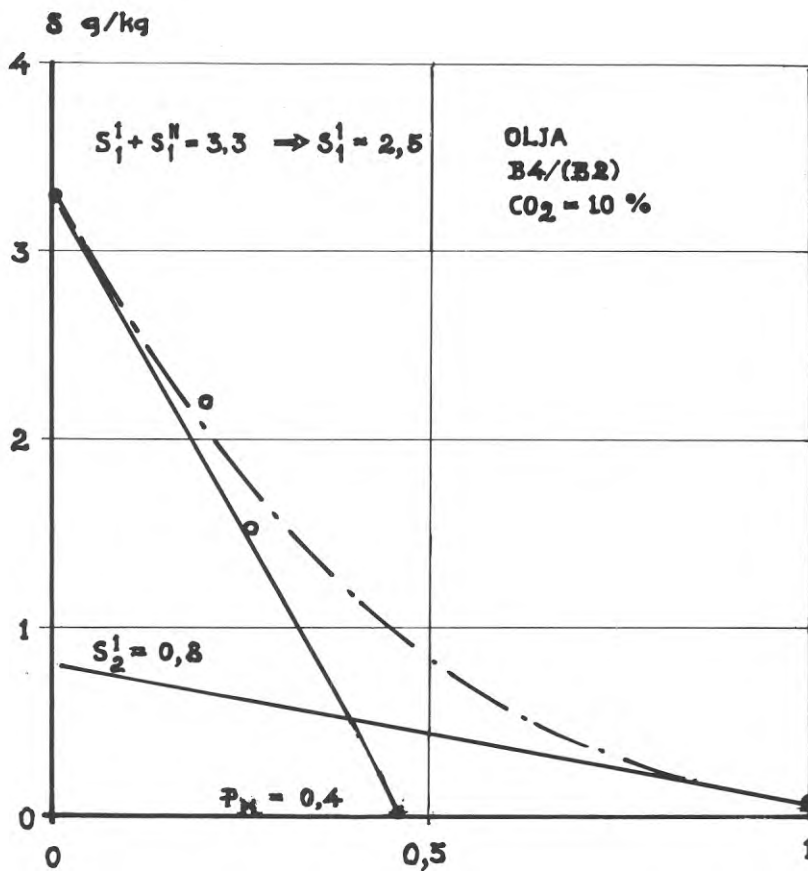


BILD 6:10 Utvärdering av S_2^I och S_1^I för blandning mellan olja B2 och B4.

Totalt gäller således för stoftbildningen $S=S'+S''$ inom intervallet (6:4)

$$S = S_1P_1 + S_2'P_2 + S_2''(1 - P/P_k) \quad (6:9)$$

och i intervallet (6:7)

$$S = S_1P_1 + S_2'P_2 \quad (6:10)$$

om vi sätter $P_2 = 1 - P_1$

Det kan vara av intresse att se på en fysikalisk tolkning av de angivna empiriska sambanden.

Ekvation (6:5) och (6:10) visar på ett additivt stoftbildande ämne. Hit hör exempelvis oljornas askhalt och i viss mån halten svårförbrända asfaltener, se avsnitt 8.4.

Ekvation (6:6) visar på en egenskap hos olja 2 (den sämre oljan av de två) som motverkas av en annan egenskap hos olja 1 (den bättre oljan). Som exempel på sådana faktorer kan vaxkristaller i oljan, se bild 8:1, nämnas. Sådana fasta vaxkristaller kan antas förbrinna väsentligt sämre än övriga delar av oljan och således ge vissa vaxrika oljor en hög stoftbildningstendens. Den motverkande faktorn är i detta fall den vaxlösande effekten hos olja 1. Denna verkar upp till en koncentration då alla paraf-finkristaller är lösta - punkt P_k i bild 6:9, vilket normalt sker inom intervallet enligt formel (6:4).

För olja B4 och B2 är konstanterna P_k , S , S_2 och S_2'' grafiskt bestämda i bild 6:10.

I tabell 6:9 visas en sammanställning över konstanterna S_2 , S_2'' och P_k för olika tjockoljor. Man bör observera att för "bra" LS-oljor är P_k^- , motsvarande endast en additiv effekt medan för "dåliga" LS-oljor alltid två effekter föreligger.

TAB 6:9 Konstanterna S_2 och S_2'' vid blandningar av tjockoljor och tunnoljor (CO_2 - 10 %).

Olja	S_2	S_2''	p_k
B4	2,5	0,8	0,4
B5	1,6	1,5	0,4
B6	6	0	1
B7	0,3	0,9	0,4
B8	6	0	1
B9	5	9	0,6

6.7. SAMMANFATTNING.

Blandningar av oljor uppvisar vanligen en lägre stofthalt än den från stoftbildningssynpunkt sämsta av de båda oljorna. Härvid föreligger två fall:

- o Inverkan av den bra oljan är additiv varför det krävs en avsevärd inblandning för att åstadkomma en kraftig förbättring.
- o Inverkan är sammansatt av (minst) två i sig själva additiva egenskaper av vilka den ena ger full effekt redan för en liten inblandning. I detta fall kan en mycket gynnsam blandning erhållas med en relativt blygsam del bra olja. Vid inblandningen erhåller blandningen, grovt sett, samma egenskap som den bra oljan.

7. FÄLTMÄTNINGAR

7.1 INLEDANDE FÖRSÖK

De försök som gjordes på provpannan visade stofthalter från 0,1 - 10 g/kg olja varierande med driftsförhållanden (CO_2 -halt) och oljeslag. Samtidigt skulle variationerna på fältet vara av samma storleksordning. En viss uppfattning av förväntade variationer erhålls från litteraturen (t.ex. Larsson 1970) men då dessa uppgifter sällan ger upplysning om mätställen, oljekvalitet (med hänsyn till leverantör) har en serie förberedande mätningar på olika centraler företagits. I tabell 7:1 ges en översikt över de erhållna resultaten. Mätstället har valts så gynnsamt som möjligt även om önskvärda avstånd från strömningshinder enligt avsnitt 4 ej kunnat erhållas i samtliga fall.

Vid de inledande försöken har stora skillnader uppmätts. Skillnaderna har varit betydande även vid jämförelse mellan centraler med samma pannuppställning och brännare. Orsaken härtill har ofta varit skillnader i oljekvalitet samt i några fall felaktigheter hos anläggningarna som ej åtgärdats före mätningarna.

Som framgår av försöken varierar mätresultaten inom det ovannämnda intervallet 0,1 - 10 g/kg olja. Mätserien gav även värdefulla försökstekniska erfarenheter. I det följande ges exempel på några ofta förekommande problem:

- o Att finna en lämplig mätplats - inte endast från strömnings- och temperatursynpunkt utan även med hänsyn till platsutrymme, ventilation m.m. Mätplatsen måste vara ca 3 - 4 m² och ha en ventilation motsvarande åtminstone 4 - 5 luftomsättningar per timme. Det senare kravet uppfylls vanligen lätt i en panncentral om mätningen kan göras i närheten av brännarna, se t.ex. bild 7:1 - 7:3. Om mätningen görs i andra, ovanför pannrummet liggande utrymmen blir det ofta betydligt svårare att innehålla ventilationskravet.
- o Centralens omfång måste vara sådant att mätningen ej störs av den normala driften. Lämpligen bör centralen ha 3 - 4 pannor samt viss överkapacitet även vid maximal belastning.
- o Mätningar sommartid försvåras ofta av låg belastning. Genom vänligt tillmötesgående av ASJ kunde

TAB. 7:1

Nr	Panneffekt MW	Panna typ/	Brännare kap. l/h	Olja		CO ₂ -halt %	Stoftbildning ¹⁾		Sottal
				kvalitet	NS/LS		mg/m ³ (norm)	g/kg	
1			170	EO 4	NS	12,9	66,7	0,935	2
						12,8	88,5	1,24	2
2			200			14,1	156,5	2,04	2
						13,1	195	2,73	2-3
3	4,5	Sunrod	240	EO 4	NS	12	44,0	0,67	1-2
			270			13	45,6	0,64	2-3
			276			14	385	5,0	10
			105			12	14,8	0,23	1-2
			90			10	9,5	0,17	1-2
			115			13	45,5	0,64	2
			130			14	47,4	0,62	3
3	2,3		150	EO 4-5	NS	12	90,1	1,37	2
			150			11,8	100	1,68	2
			150			12	90	1,40	2
			250						
4	2,9		162	EO 4-5		14,2	167	2,13	2-3
			150			12	117	1,78	2
			150			12,8	102	1,44	2
			300						
5	2,3		258	EO 4	LS	12,5	13,8	0,205	2
			259			12,5	16,5	0,235	2
			260			12,5	12,1	0,176	2
6	11,6		750	EO 4	LS	12	18,0	0,273	2
			750			1	12	11,3	0,171

1) Här och i fortsättningen avses nettobildning, se förord.

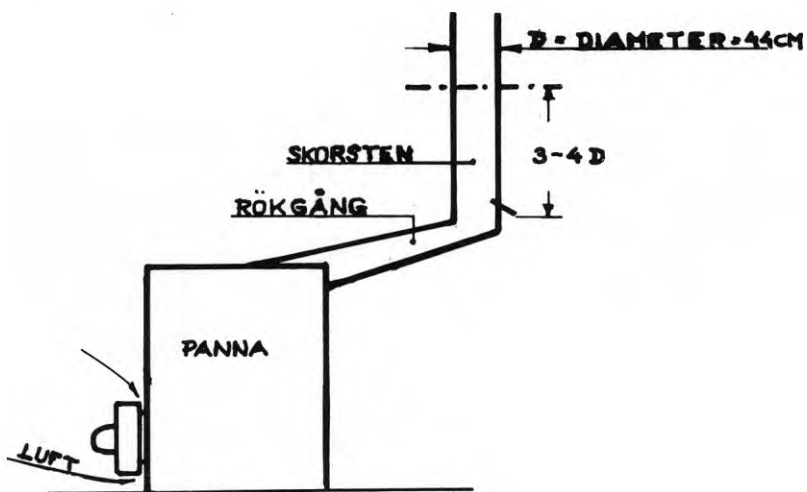


BILD 7:1 Placering av mätuttag vid central A.

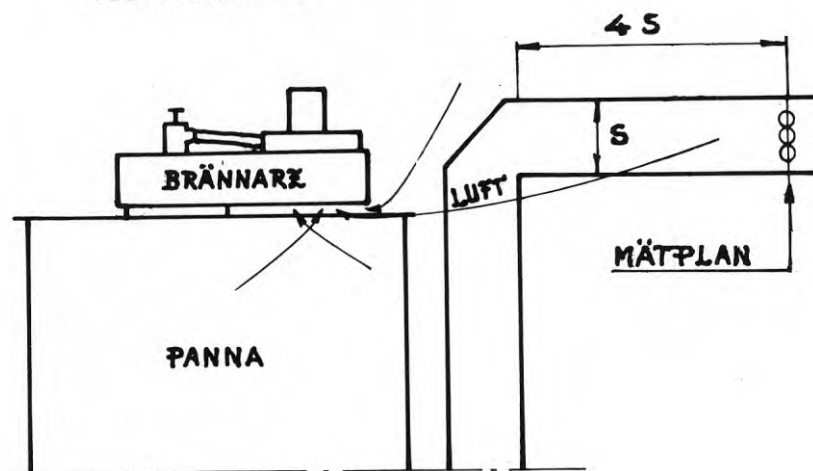


BILD 7:2 Placering av mätuttag vid central C

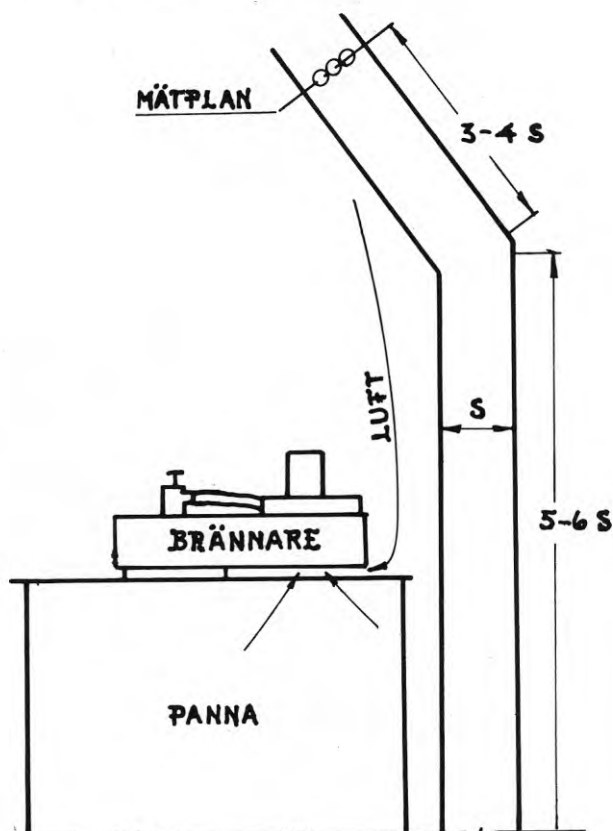


BILD 7:3 Placering av mätuttag vid central S. Se även bild 5.1 och 7.31.

en där befintlig experimentpanna av säckpanntyp, se bild 7:4, användas under sommaren.

De värmecentraler som - förutom de som avses i tabell 7:1 ovan - utnyttjades för fältförsöken anges i tabell 7:2, vilken även ger vissa karaktäristiska data för de aktuella pannorna.

Vid centralerna 3,4,5 och 6 företogs mätningar vid konstant belastning och vid konstant CO_2 -halt. Även om materialet egentligen är något för knapphändigt för en statistisk bearbetning, har i tabell 7:3 standardavvikelser framräknats rörande uppmätta stofthalter. Som framgår av tabellen uppgår standardavvikelsen till ca 10 % av medelvärdet utom för central 6. Detta tyder på att den använda mätmetodiken ger tillfredsställande reproducerbarheten vid mätningarna.

TAB. 7:2 Översikt över använda anläggningar

Anläggning	Pannor antal	Pannor typ	Panneffekt Mcal/h	Brännare typ	Brännare max.kap.
A	3	ångpanna	2000	pressluft	250
B	1	tornpanna	12000	pressluft	1500
C	3	tornpanna	12000	pressluft	1500
P	1	säckpanna		tryckolja	600
S	1-3	lådpanna	3500	pressluft (2 st)	400
	1			roterande	400
				pressluft med re- cirkgas	400
	1	lådpanna	2000	pressluft tryckolja	250 250
F	1	trestråk- panna	2000	pressluft	250

TAB. 7:3

Central	Belastning % av nominell	CO ₂ -halt volym-%	Stoftkoncentration mg/m ³ spridning			Stoftbildning g/kg spridning		
			medel- värde	variati- onsbredd	standard- avvikelse	medel- värde	variati- onsbredd	standard- avvikelse
3	60	12	96	19	11	1,48	0,31	0,17
4	50	12-12,8	109	15	10	1,62	0,34	0,21
5	100	12,5	14,1	4,4	2,2	0,205	0,08	0,02
6	60	12	14,6	6,7	4,7	0,222	0,10	0,07

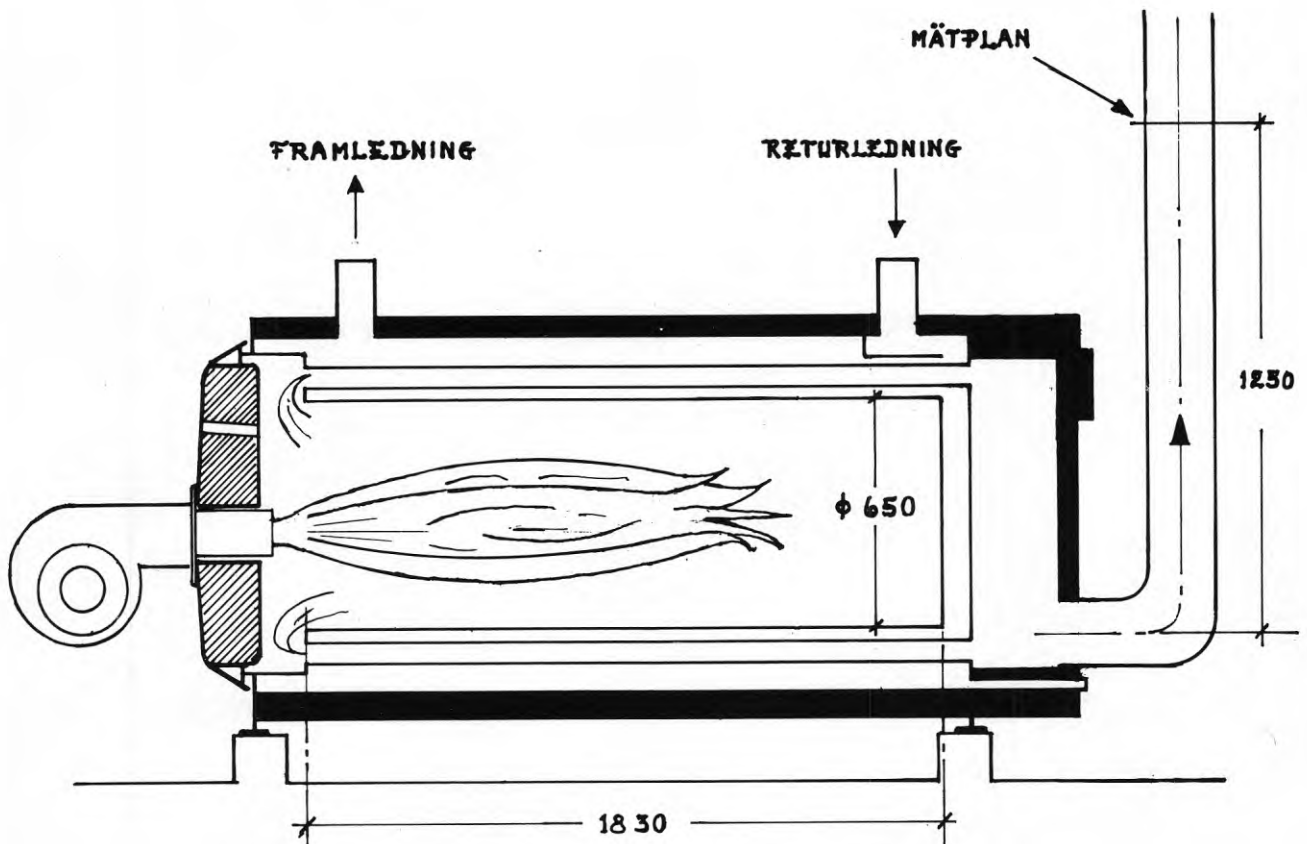


BILD 7:4 Säckpanna använd vid försöken vid central P.

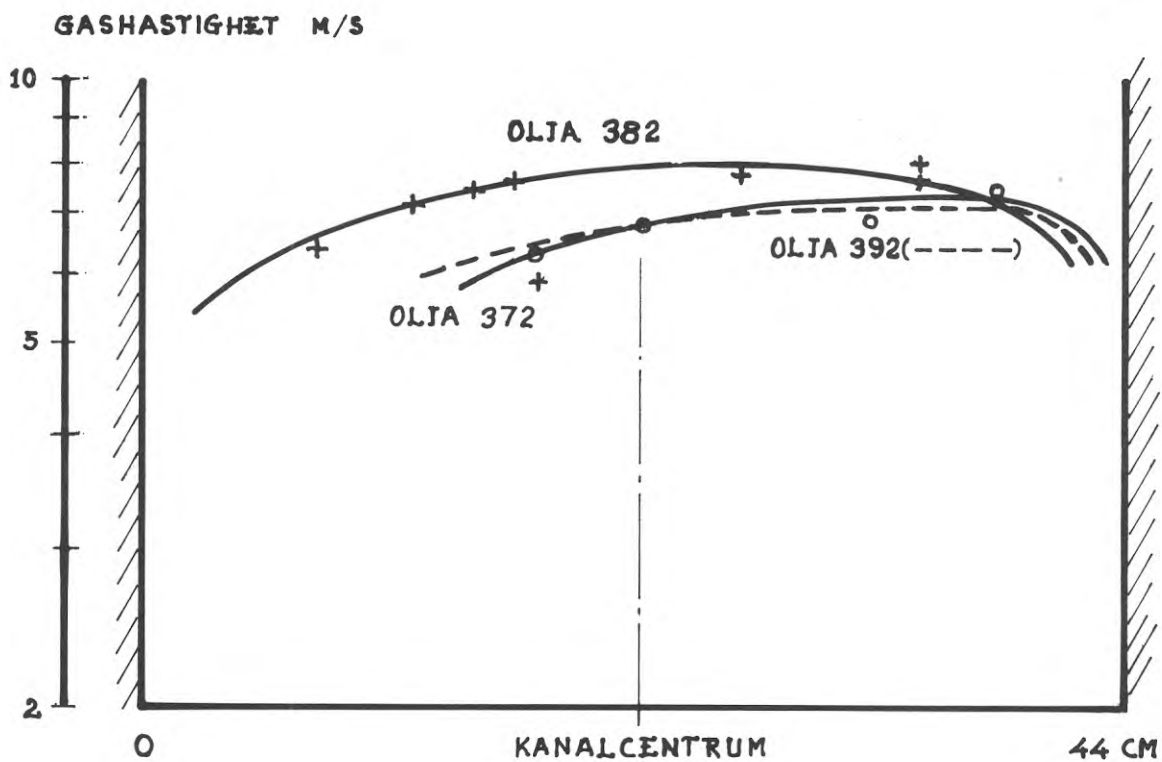


BILD 7:5 Gashastighetens variation över kanaltvårsnittet (utmed en diameter) vid central A. Oljeflöde vid försöken 300 lit/h, motsvarande ett något större gasflöde vid olja 382 än vid övriga oljor.

7.2 MÄTNINGAR VID CENTRAL A

Data för central A har tidigare angivits i tabell 7:2. Uttaget för förbränningsgaser var beläget på pannornas topp, se bild 7:1. Avsikten med mätningarna vid centralen var att undersöka stoftbildningen från tre oljor - en normalsvavlig och två lågsvavliga oljor. Samtliga oljor föll inom samma viskositetsklass (EO 4) enligt SIS 155403. I alla tre fallen var pannans och brännarens inställning densamma. Även oljeförvärmning hölls konstant. Skillnaderna i stoftbildning vid drift av anläggningen med olika oljor är m.a.o. påtaglig. *Det undersökta fallet motsvarar således de förhållanden som kan inträffa då man vid en central okritiskt övergår från en olja till en annan utan att närmare undersöka den nya oljans egenskaper, eller utan att vidta lämpliga åtgärder för övergången.*

I samband med stoftmätningarna bestämdes gashastigheten över måttvärnsnittet, se bild 7:5. Hastigheten visade sig därvid vara förskjuten mot krökens yttre sida, vilket tyder på att en betydande ojämnhet i partikelfördelningen kan komma att föreligga vid mätstället.

De uppmätta hastighetsskillnaderna kan synas små, men man bör observera att oregelbundenheter vid stoftmätningen ofta blir väsentligt större som en följd av centrifugalverkan på stoftpartiklarna. I bild 7:6 anges stoftflödet i kanalen uttryckt som gram stoft per ytenhet och sekund. Som framgår föreligger en tydlig förskjutning mot ena kanalväggen i enlighet med den förmodade centrifugalinverkan. I två fall har höga stofthalter uppmätts invid kanalväggarna, i det tredje fallet tillåter mätvärdena ej någon definitiv bestämning av stofthaltens variation över tvärsnittet.

7.2.1 Resultat av mätningarna vid central A.

Mätningarna vid central A pekar i likhet med laboratoriemätningarna på att olja 372 är en kraftigt sotbildande olja, medan olja 392 uppvisar goda egenskaper. Båda oljorna är lågsvavliga. Olja 382 som är en normalsvavlig olja visar både på experimentpannan och central A medelgoda egenskaper. Tas olja 392 som normvärde förhåller sig stoftbildningen för de tre oljorna som:

392:	382:	372
1:	4:	18

se bild 7:7.

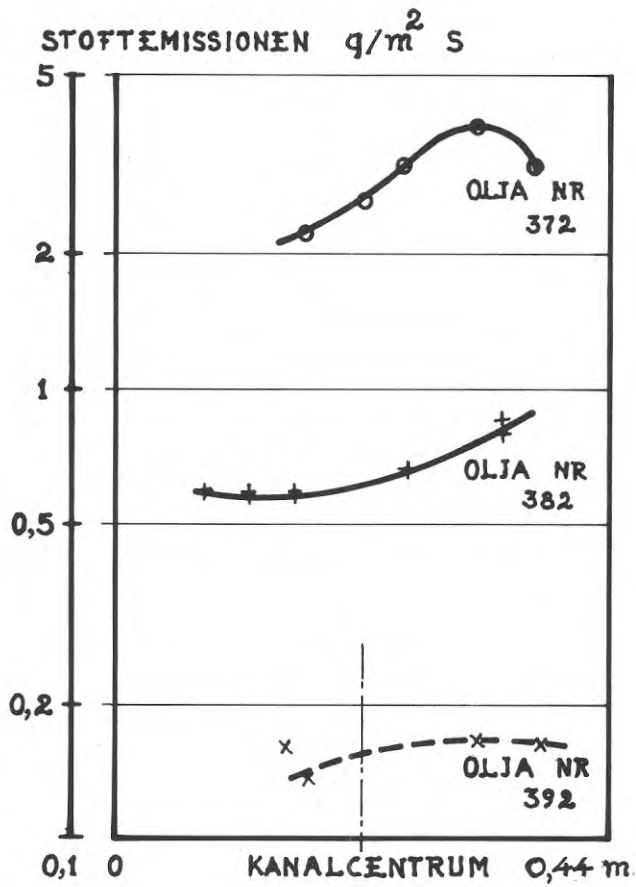


BILD 7:6 Stoffflödet (emissionen) vid central A.

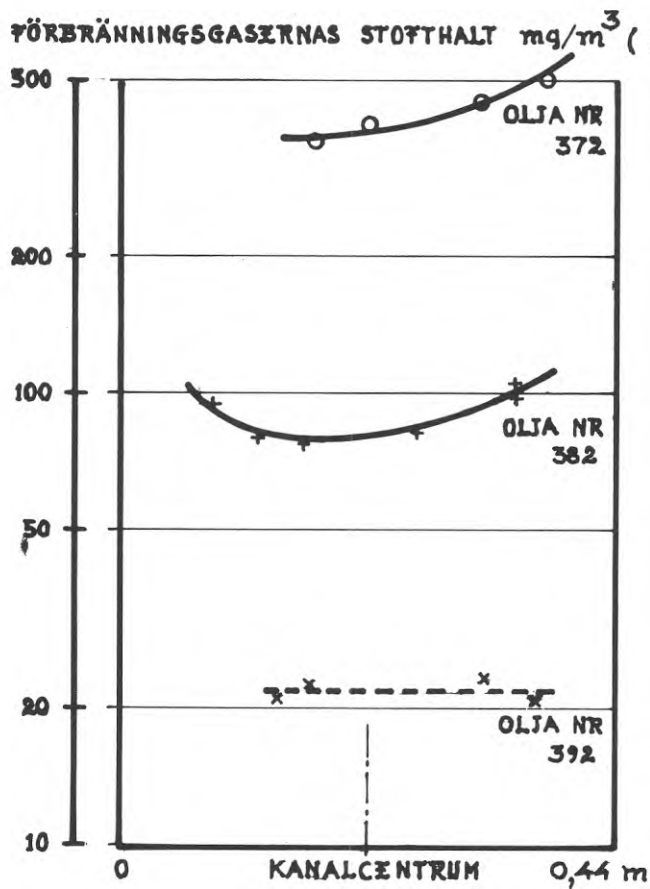


BILD 7:7 Förbränningsgasernas stofthalt vid central A.

7.3 MÄTNINGAR VID CENTRAL B.

Vid central B fanns ej någon lämplig mätpunkt mellan panna och stoftavskiljare. Man fick därför utföra mätningarna efter avskiljaren. Emissionen utgörs av summan av uppmätt stoft samt mängd uppfångat stoft i avskiljaren. Mätningarna omfattade undersökningar med två olika oljetyper. I det följande kommer endast resultaten av mätningar med olja 392 att redovisas. Samtidigt med bestämningarna av stoftutsläppet bestämdes den totala stoftalstringen. Dessa bestämningar utfördes för 6 mätpunkter placerade över kanaltvärsnittet. Efter en serie orienterande mätningar utvaldes sedan en mätpunkt för provet, vilken bedömdes vara representativ för hela gasflödet. Mätningarna gjordes även under en period med elbrist, vilket medförde att anläggningen ej kunde tas i anspråk i önskad omfattning. Det aktuella värmebehovet täcktes istället med hjälp av en ångpanna som samtidigt användes vid elgenerering och den undersökta pannan belastades endast till 1/3-last under relativt kort tid.

7.3.1 Resultat av mätningarna vid central B

Bild 7:8 visar stoftkoncentrationen (uttryckt som mg/m^3) vid varierande CO_2 -halt för centralen. Det sektionerade området betecknar det i cyklonen avskilda stoftet, varför bilden även anger den stoftemission som erhöles från anläggningen. Som framgår av bilden stiger stofthalten kraftigt i området omkring 13 - 14 % CO_2 (motsvarande ett luftöverskott av ca 15 %) vilket tyder på otillfredsställande inblandning av förbränningsluft. Vid 12 % CO_2 ligger stoftbildningen under det av myndigheterna fastställda värdet $100 \text{ mg}/\text{m}^3$. Det är även av intresse att notera hur stoftemissionen vid den aktuella belastningen varierar med CO_2 -halten. I bild 7:9 visas uppmätta värden vid ca 9 % CO_2 (luftöverskott ca 70 %) d.v.s. vid en kostnadsmässigt relativt ogynnsam drift.

Man konstaterar att en minskning av stofthalten i gaserna genom ökning av förbränningsluften ej med säkerhet ger en lägre stoftemission.

Beträffande cyklonens avskiljningsgrad ansåg man vid centralen att den var relativt god. Som framgår av bilden uppgick den till ca 25 % i hela mätområdet. (Det bör tilläggas att man vid högre belastning kan beräkna erhålla en förbättrad avskiljning och att mätosäkerheten var stor vid uppmätning av avskiljningsgraden).

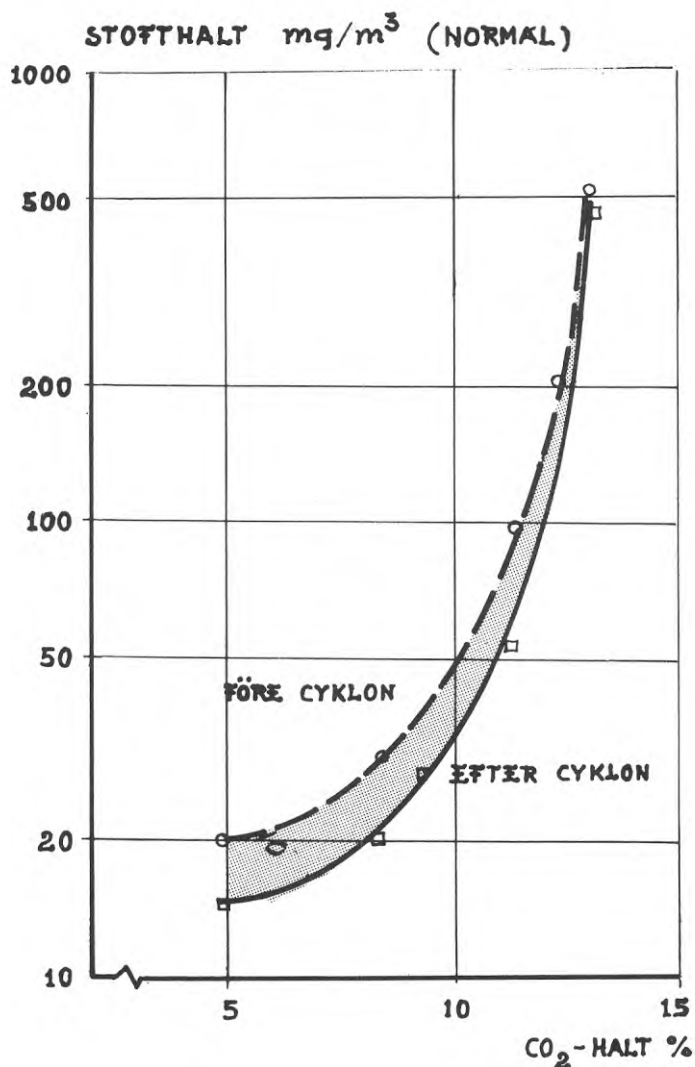


BILD 7:8 Stoffkoncentration i förbränningsgaserna före och efter cyklon i anläggning B.

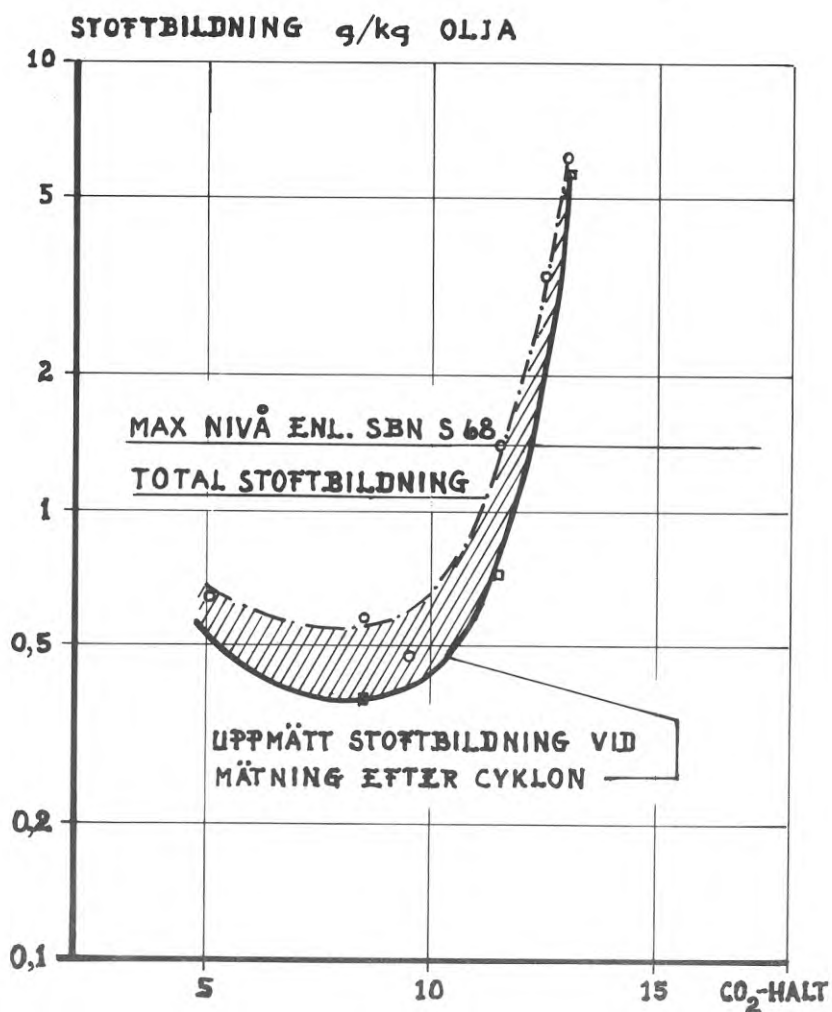


BILD 7:9 Stoffbildningen (mätt som g stoft/kg olja) före och efter cyklon i anläggning B. Som framgår av bilden är cyklonens avskiljningsgrad approximativt konstant 25 % och ökar ej med ökande inloppshastighet till cyklonen. Detta indikerar en densitetsändring med CO₂-halten hos det bildade stoftet.

Avståndet mellan cyklon och panna är så litet att en noggrann bestämning av förbränningsgasernas stofthalt före cyklonen skulle kräva 10 eller fler mätpunkter. Kostnaderna för provning av cyklonen skulle härmed bli orimligt höga. Man bör här tillfoga att kort avstånd mellan panna och cyklon är vanligt.

7.4 MÄTNINGAR VID CENTRAL C.

Central C var utrustad med tre hetvattenpannor med pressluftbrännare, se tabell 7:2 och bild 7:2.

Även vid denna central utfördes förberedande mätningar över kanalvärsnittet (1,0 x 0,45 m²). Mätningarna har tidigare omnämnts i samband med redovisningen av mätmetodik,

Några större skillnader i stofthalt över tvärsnittet förelåg här ej, varför de erhållna värdena i punkt 5, se bild 7:10-11 användes utan korrektion.

7.4.1 Resultat av mätningarna vid central C

Mätningar utfördes för tre olika laster motsvarande oljeförbrukningarna 450, 700 och 1000 l/h. För samtliga belastningar utfördes prov med varierande CO₂-halt inom intervallet

$$5 < \text{CO}_2 < 15 \% \quad (7:1)$$

vid den *lägsta* belastningen, (450 l/h) och

$$9 < \text{CO}_2 < 14 \% \quad (7:2)$$

vid den *högsta* belastningen, se bild 7:12 och 7:13.

Som framgår av de redovisade värdena var stoftbildningen vid låglast lägst vid 9 % CO₂ (ca 30 % av pannans stämplade effekt) och vid ca 70 % av stämplad effekt erhöles en lägsta stoftbildning vid ca 11 %.

Försöken utfördes med olja 401 och som framgår av bild 7:12 och 7:13 var stoftbildningen låg. I minpunkten (9-11 % CO₂) emitterades från 65 kg stoft/h vid låglast till 180 kg/h vid 70 % belastning, vilket med hänsyn till centralens storlek (total effekt 42 MW) får anses vara ett lågt värde.

I bild 7:14 visas en sammanfattande bild av de vid denna central utförda mätningarna. Av diagrammet framgår stoftbildningen som funktion av belastningen (abskissan) och luftöverskottet ut-

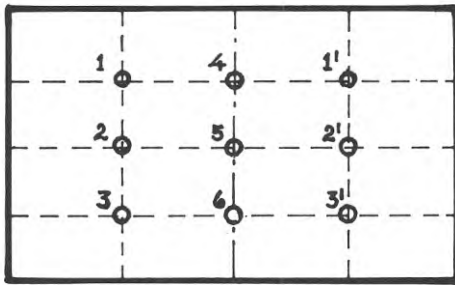


BILD 7:10 Fördelningen av mätpunkter över kanaltvårsnittet vid central C. Tvärsnittsarean $1,0 \times 0,45 \text{ m}^2$.

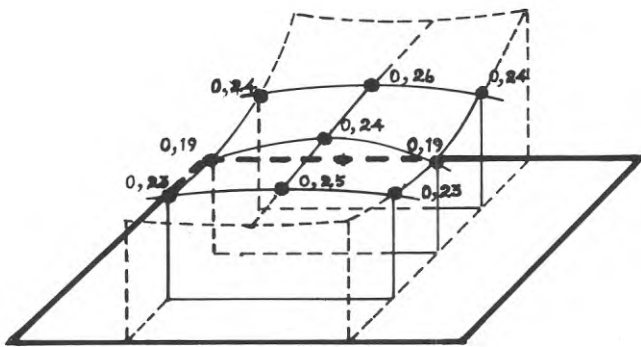


BILD 7:11 Stofffördelningen över kanaltvårsnittet vid central C. Värdena, som anger den lokalt uppmätta stoftbildningen (g stoft/kg olja) är medelvärden. För den aktuella oljan (401) erhålls en mycket jämn fördelning. Variationerna i en och samma mätpunkt antyds i bild 5:2.

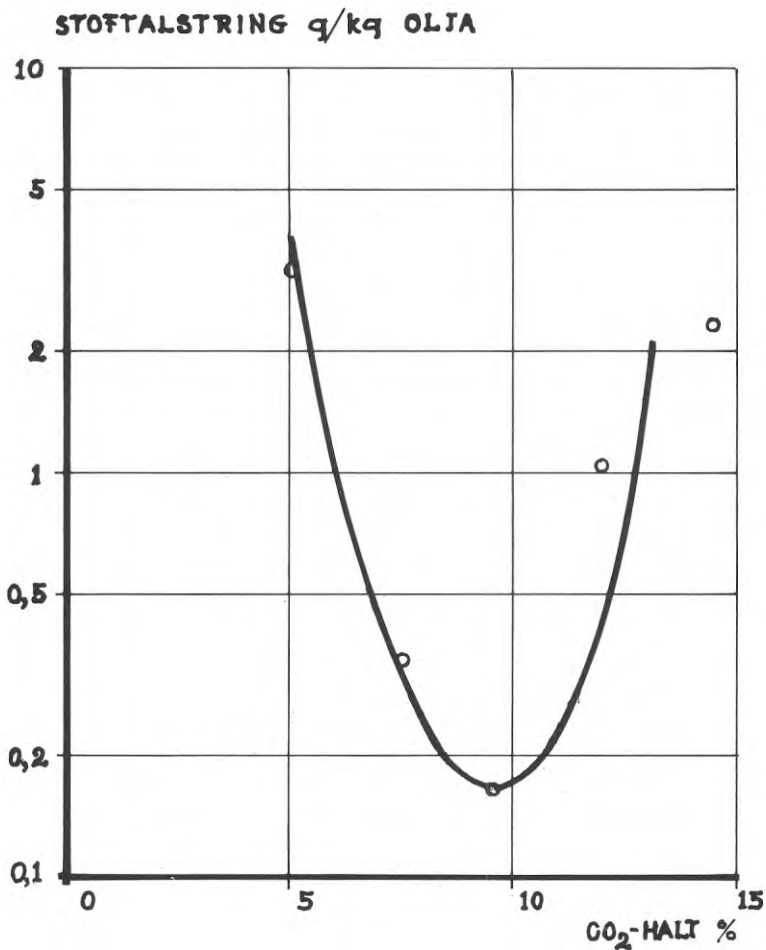


BILD 7:12

Stoftbildningen vid förbränning av 450 l olja/h och vid varierande CO₂-halt. Den lägsta stoftbildningen vid den undersökta belastningen erhöles vid 9-10 % CO₂ då värdet 0,17 g/kg olja uppmättes.

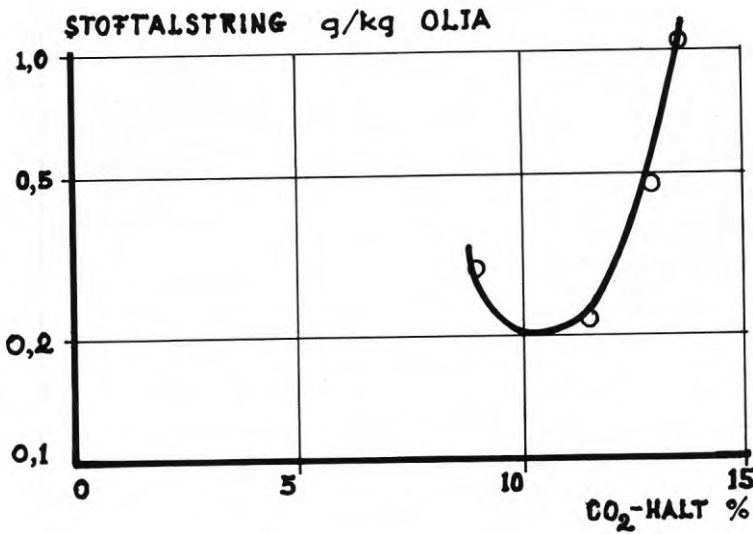


BILD 7:13 Som bild 7:12, men avseende stoftbildningen vid förbränning av 1000 l/h.

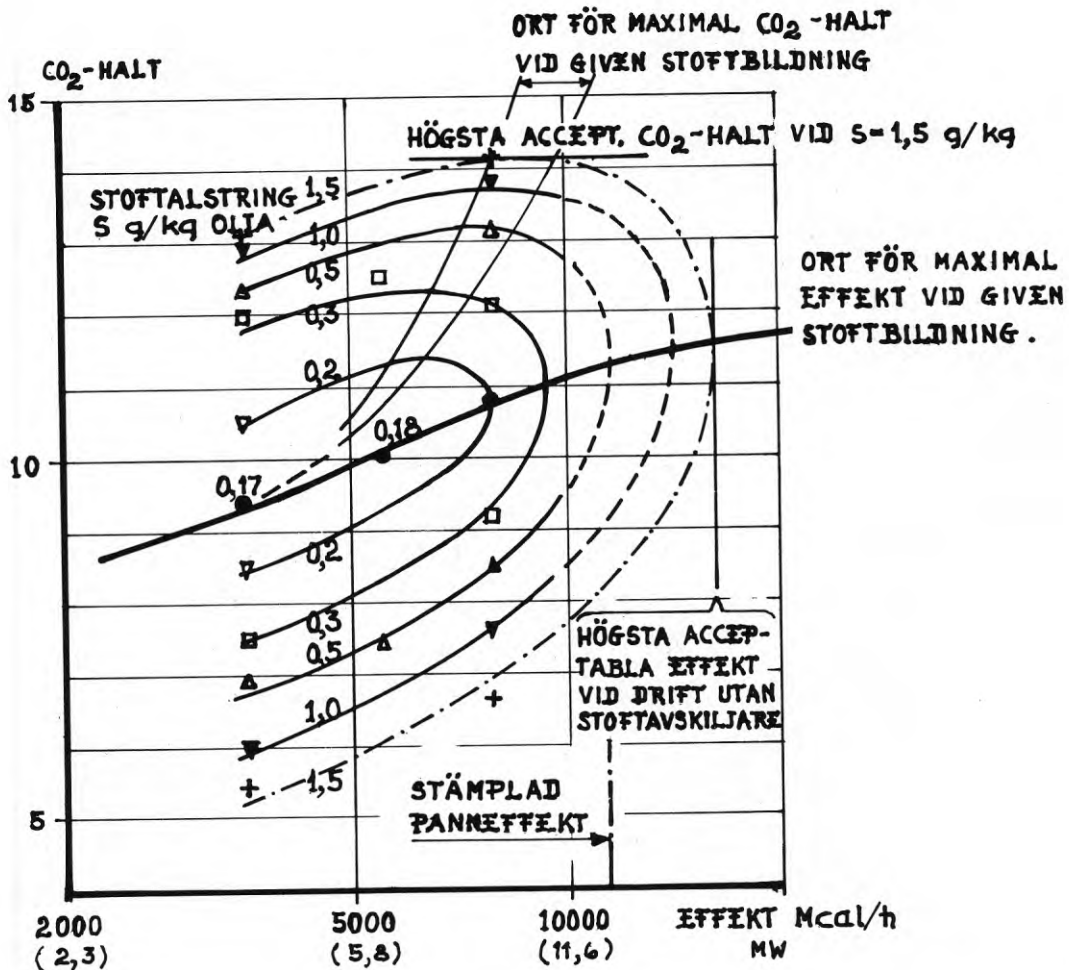


BILD 7:14 Sammanfattning av försöken vid central C. I bilden visas stoftbildningen (g/kg olja) som funktion av nyttig effekt (abskissa) och aktuell CO₂-halt (ordinata). Förutom stoftbildningen som anges med markering för 0,2;- 1,5 g/kg är inlagda linjer för maximal effekt vid föreskriven högsta stoftbildning och maximal CO₂-halt vid föreskriven högsta stoftbildning. Den sistnämnda orten är ett mått på bästa drift med hänsyn till ekonomi.

tryckt som CO_2 -halt utmed ordinatan.

Från diagrammet utläses följande resultat av mätningarna

- o Maximalt acceptabel belastning ca 21 MW vid 11,5 % CO_2 .
- o Maximal CO_2 -halt ca 14,2 % med hänsyn till emissionen vid 12 MW.

Ökad belastning över 10000 Mcal/h medför en ökning i stoftemissionen över 1,5 g/kg olja. Samma resultat erhöles vid en minskning av belastningen.

7.5 MÄTNINGAR VID CENTRAL P.

Central P var, som tidigare nämnts belägen vid AB. Svenska Järnvägsverkstäderna. Den använda värmepannan var av typen säckpanna se bild 7:3 , motsvarande en beräknad normaleffekt av 0,5 MW (400 Mcal/h). Pannan var under provningen ansluten till en rektangulär vertikal avgaskanal med mätplanet arrangerat enligt bild 7:3 . Kanalen hade kvadratisk tvärsnitt ($0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$) och i tvärsnittet togs vid de förberedande proven tre mätpunkter, se f.ö. bild 5:11. Avståndet mellan mätplanet och den uppströms liggande böjen var

$$H/d \approx 5$$

och fördelningen av stoftflödet i kanalen (mätt som $\text{g/m}^2 \text{ s}$) var relativt symmetrisk. Värdet $H/d = 5$ var sålunda i detta sammanhang fullt tillräckligt för att åstadkomma den önskade utjämnningen.

Koncentrationen i centrum kommer vid en symmetrisk fördelning vanligen att ligga högre än medelvärdet över kanalen. Så var även fallet här och det visade sig - jämför bild 5:11 - att koncentrationen här låg ca 18 % över medelvärdet motsvarande en korrektionsfaktor $k = 0,85$ då uppmätta centrumkoncentrationen skall användas för bestämning av medelstofthalten.

Vid försöken användes en tryckoljebrännare, se bild 9:1, som är den normala brännartypen vid denna panntyp. Brännarens karakteristiska data var:

Maximal kapacitet	85 l olja/h
Minsta kapacitet	20 l "

Omställning av kapaciteten sker genom byte av brännarmunstycken samt i viss mån genom ändring av oljetrycket. Det senare påver-

kar dock - jämför avsnitt 2 - förstoftningen ogynnsamt om det sänks under ett visst värde och används därför normalt ej för regleringen.

Försök utfördes med en rad olika oljor, inalles 12 stycken. Härvid användes - speciellt med hänsyn till rådande bestämmelser och riktlinjer för användning av tjockoljor i små brännar/pann enheter - bl.a. tre destillatoljor. Dessutom har nio olika återstodsoljor (av kvalitet EO 4) ingått i provserien. I proven ingick oljor med olika svavelhalt från olika oljeleverantörer. I tabell 7:3 anges några karakteristiska data för provoljorna.

TAB. 7:3 Data för provoljorna vid central P

Olja	Kvalitet enl. SIS- standard	Svavelhalt mass- %	Viskositet vid 50°C cSt	Askhalt g/kg
151	Eo 1	0,7		
101	Eo 1	0,19		spår
131	Eo 1	0,9		
411	Eo 4	1,0	80	0,01
401	Eo 4	0,4	80	0,06
441	Eo 4	2,3	75	0,3
431	Eo 4	0,9	70	0,1
421	Eo 4	2,0	75	0,12
461	Eo 4	2,5	78	0,2
451	Eo 4	0,8	78	0,2
471	Eo 4	2,3	75	spår
481	Eo 4	0,8	75	spår

Som framgår av tabellen omfattar undersökningen oljor med normalt förekommande svavelhalter och viskositeter - m.a.o. de vid tillfället vanliga kvaliteterna¹⁾.

7.5.1 Resultat för tjockoljor.

Som visas i tabell 7:3 undersöktes 5 lågsvavliga och 4 normalsvavliga oljor. De förra hade en svavelhalt upp till 1 %, de senare hade ca 2 % svavel, se tabellen. I samtliga fall var ask-

1) Sedan undersökningen genomförts har några kvaliteter undergått en viss förändring bl.a. till följd av provresultaten från de här aktuella undersökningarna.

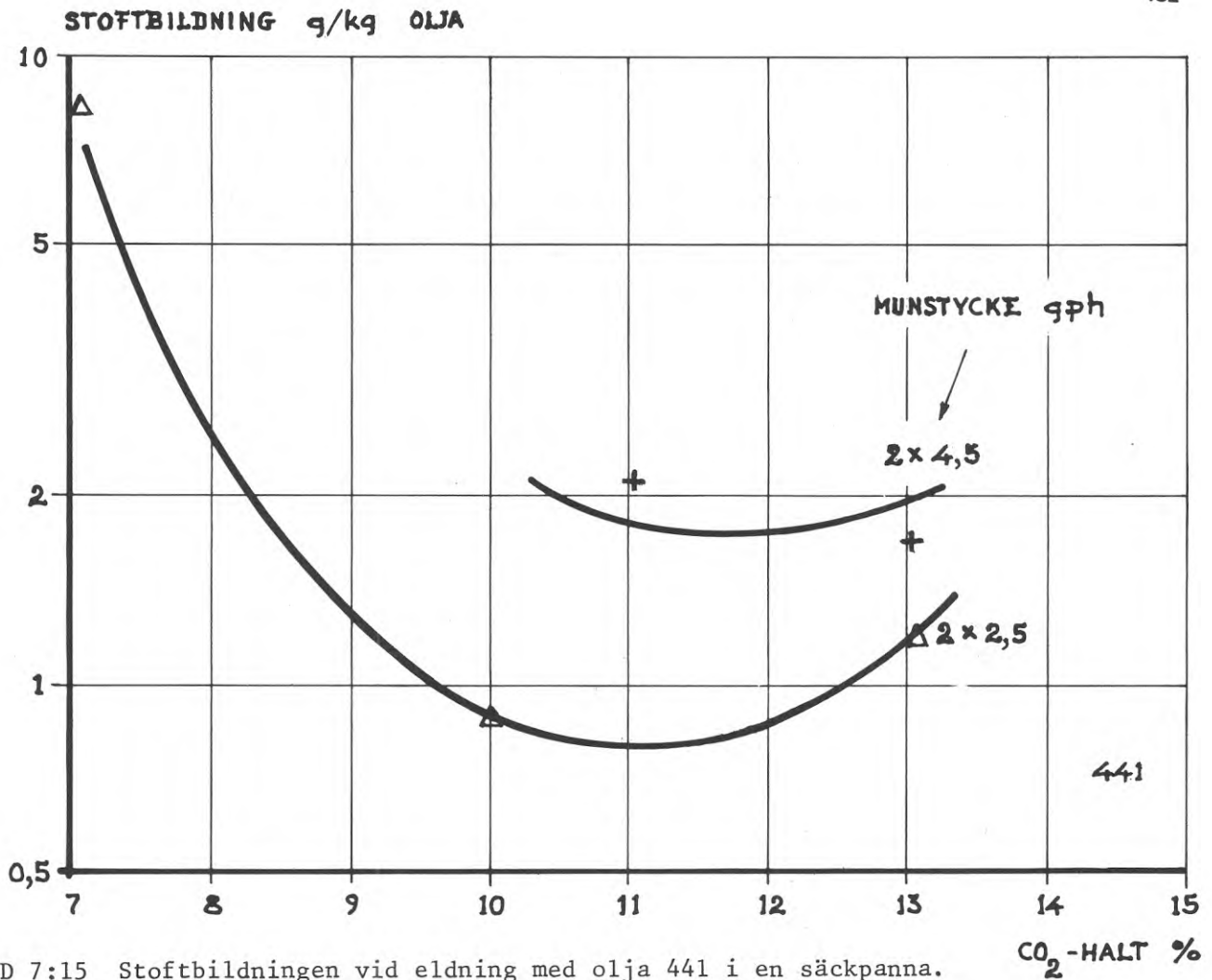


BILD 7:15 Stoffbildningen vid eldning med olja 441 i en säckpanna. Bildens värden avser stoffbildningen vid 18 kg/h resp vid 60 kg/h.

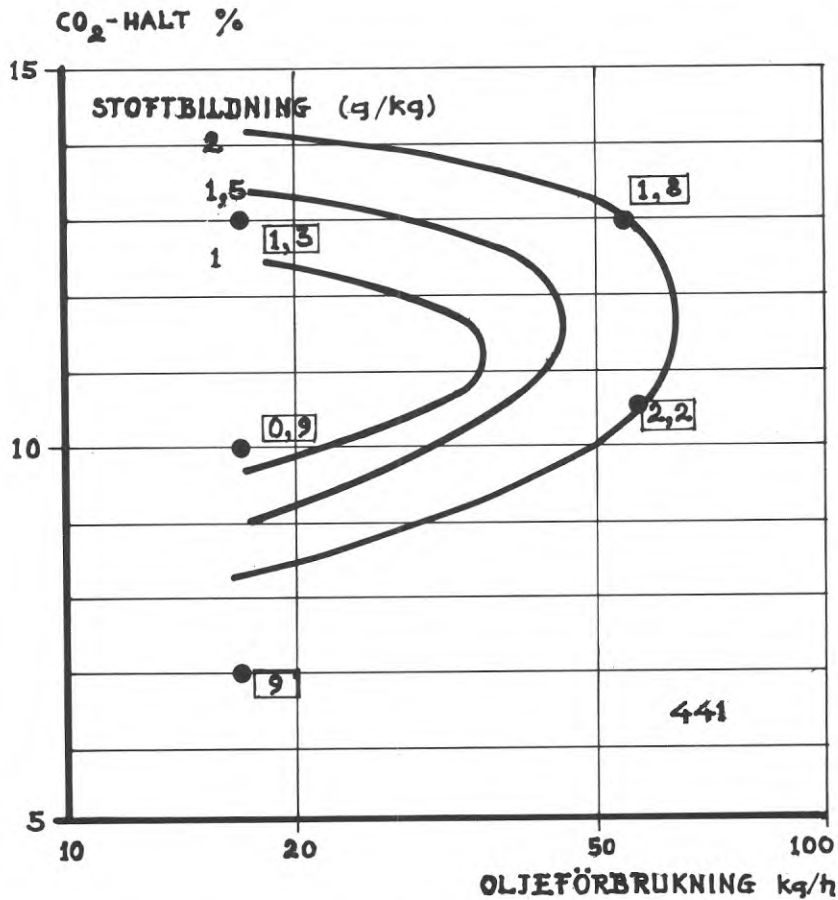


BILD 7:16. CO₂/kapacitetsdiagram för olja 441 vid säckpanna.

halten relativt blygsam med ett högsta värde av 0,3 g/kg uppgivet för olja 441, och i intet av fallen spelar askinnehållet någon avgörande roll för stoftbildningen vid den provade kombinationen panna/brännare.

Stoftbildningen undersöktes för kapaciteter upp till ca 60 kg olja/h motsvarande en tillförd effekt av ungefär 0,6 MW. Den lägsta undersökta kapaciteten var ca 18 kg olja/h vilket motsvarar 1/3 av normalbelastningen. Det bör påpekas att den använda brännaren, i enlighet med Statens Planverks publikation Panncentraler 6, ej borde utnyttjas för kapaciteter under 50 kg olja per timme. Som framgår av försöken finns det inga skäl - från lufthygienisk synpunkt att fasthålla vid regeln förutsatt att man använder en ur stoftbildningssynvinkel god olja. Används däremot en olja med olämpligt hög stoftbildning överskrids det allmänna funktionskravet (maximal stoftbildning 1,5 g/kg olja) med den undersökta panna/brännar kombinationen.

Låt oss först se på resultaten för de normalsvavliga oljorna. Bild 7:15 avser försök med olja 441. Denna olja undersöktes vid två kapaciteter - motsvarande 2 munstycken om nominellt 2,5 resp. 4,5 gph. Som framgår av bilden kunde vid den lägre kapaciteten ovannämnda funktionskrav uppfyllas för CO₂-halter mellan 8,5 och 13,5 % medan man vid den högre kapaciteten ej kunde uppnå så låg stoftbildning som man av luftvårdsskäl kräver ¹⁾.

Man bör observera att olja 441 gav upphov till en minsta stoftbildning vid ca 11 % CO₂, då för oljeflödet ca 18 kg/h stoftbildningen var omkring 0,8 g/kg olja och för ca 60 kg/h stoftbildningen stigit till ca 1,8 g/kg olja.

I bild 7:16 visas ett CO₂/kapacitetsdiagram med stoftbildningen som parameter för olja 441. I detta diagram visas en svag stegring av CO₂(opt) med stigande kapacitet, men det bör tilläggas att denna stegring är mycket osäkert bestämd. Med den använda

1) Här kan ett förtydligande vara på sin plats. Vid provens början hade brännaren injusterats för en viss kapacitet och med en viss olja. Efter injusteringen - som givit mycket bra driftsförhållanden med den använda (relativt goda) oljan ändrades ej brännarinställningen. Avsikten härmed var att erhålla ett mått på oljornas inbördes stoftbildningsegenskaper utan påverkan av brännaregenskaperna. Ett annat resultat hade givetvis erhållits vid försöksserien om brännaren injusterats för den aktuella oljan.

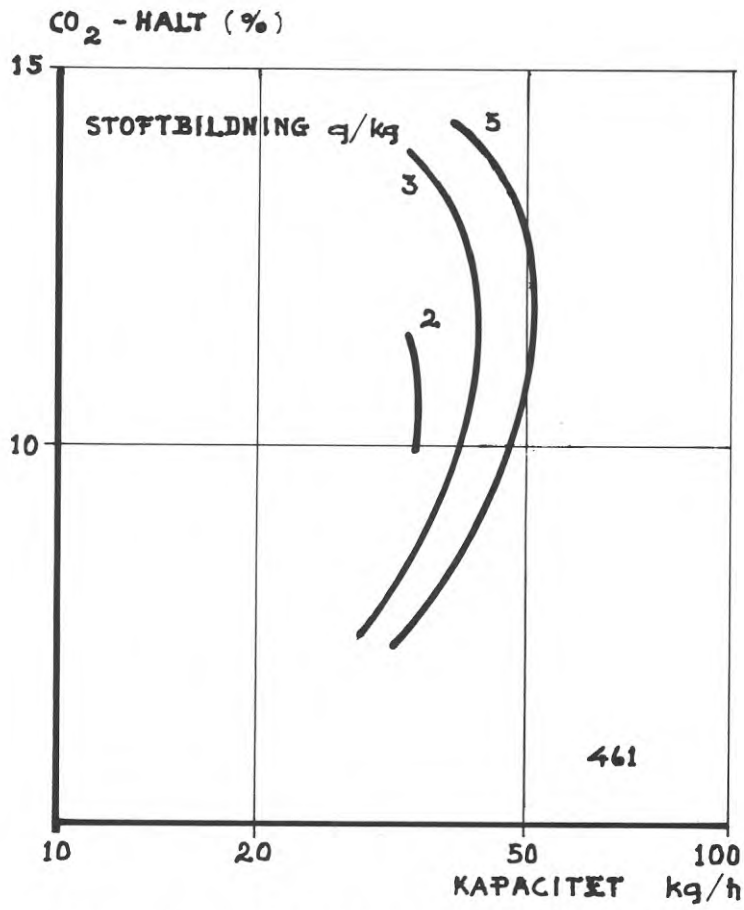


BILD 7:17 CO₂/kapacitetsdiagram för olja 461 vid säckpanna.

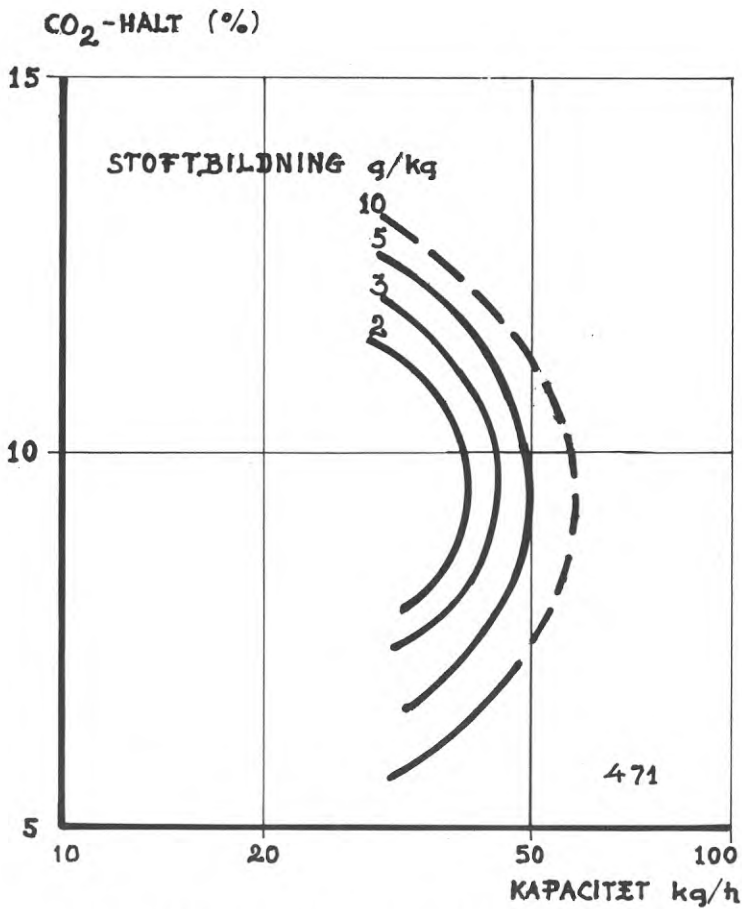


BILD 7:18 CO₂/kapacitetsdiagram för olja 471 vid säckpanna.

injusteringen kan brännaren ej användas över kapaciteten 45 kg/h vid 11 - 12 % CO₂. Vid lägre kapaciteter kan ett bredare driftsområde vad gäller lufttillförseln användas.

Även olja 421 var **normalsvavlig**. I tabell 7:6 anges erhållna stoftbildningar för denna olja vid kapaciteten 41 kg/h.

TAB. 7:6

CO ₂ -halt %	Stofthalt mg/m ³	Stoftbild- ning g/kg olja
7	125	3,2
9	56	1,1
12	25	0,38

Jämför vi denna olja med den tidigare - 441 - finner vi att stora likheter föreligger. Vid drift med båda oljorna erhålls en hög stoftbildning vid låga CO₂-halter och mellan 7 och 10 % CO₂ är de båda oljorna i stort likvärdiga. Vid högre CO₂-halter är dock olja 421 något bättre än 441, men båda oljorna ligger väl till med hänsyn till funktionskravet 1,5 g/kg olja.

I tabell 7:7 visas resultat för olja 461 vid kapaciteterna 34 resp, 40 kg olja/h.

TAB. 7:7

CO ₂ -halt %	Stoftbild- ning g/kg olja	Kapacitet kg/h
9,5	1,19	34
11	1,94	34
14	3,46	34
10,5	1,94	40
12,5	3,00	40

Värden kan användas för skissering av ett CO₂/kapacitetsdiagram med stoftbildningen som parameter. Resultatet visas i bild 7:17 men det bör tilläggas att antalet mätvärden är litet, varför kurvornas form är relativt osäker.

Det kan dock vara av intresse att jämföra denna bild med bild 7:16. Oljorna har ungefär samma CO_{2(opt)} nämligen 10 - 12 %, men stoftbildningen är en helt annan. Olja 441 gav endast hälften så höga stoftvärden som olja 461. Resultat för olja 471 visas i bild 7:18 och tabell 7:8.

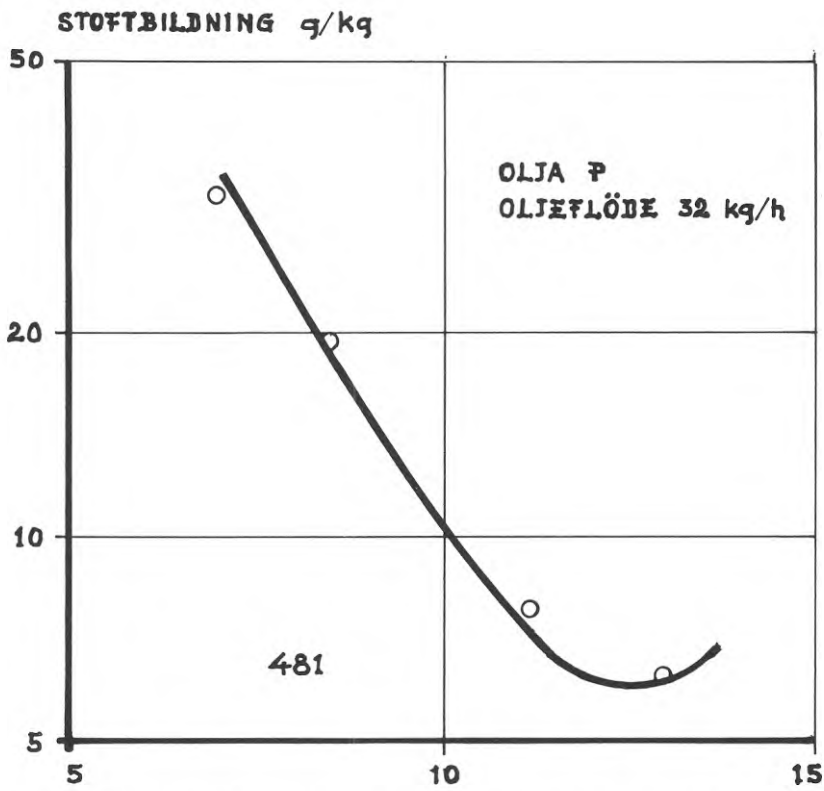


BILD 7:19 Stoftbildning som funktion av CO₂-halten (säckpanna) för olja 481.

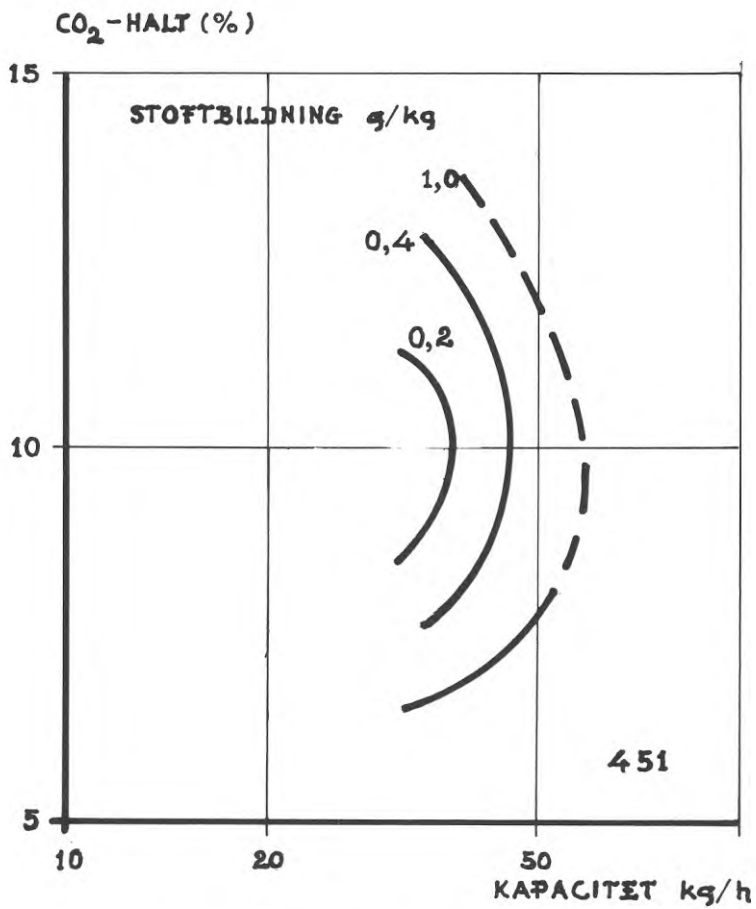


BILD 7:20 CO₂/kapacitetsdiagram för olja 451 vid säckpanna.

TAB. 7:8

CO ₂ -halt %	Stoftbild- ning g/kg olja	Kapacitet kg/h
6,5	9,00	32
9	1,00	32
11	2,26	32
13	7,6	32
7,5	6,82	41
9	2,05	41
13	0,62	41

Jämför vi denna olja med de föregående - se t.ex. tabell 7:6 - finner vi att stoftbildningen vid samma kapacitet och CO₂-halt är i det närmaste 2 gånger så hög som för olja 421 och av samma storleksordning som för olja 461. Vid lägre kapaciteter sjunker stoftbildningen och förhållandet mellan stoftbildningen vid oljeflödet 32 resp. 41 kg/h är ca 0,5 för ett normalt driftsområde (CO₂ = 10 - 11 %) medan för höga CO₂-halter stoftbildningen vid den senare oljan ökade långt snabbare än vid de förra.

De lågsvavliga oljor som undersöktes var 411 (1 % S), 401 (0,4% S), 431 (0,9 % S), 451 och 481 (båda med 0,8 % S). Med dessa oljor gjordes endast ett kort prov med olja 481, se bild 7:19. De exceptionellt höga värdena vid ca 7 % CO₂ är anmärkningsvärda, liksom det höga värdet för CO_{2(opt)}. Oljan gav som synes upphov till väsentligt högre stoftbildning än någon av de tidigare oljorna vid motsvarande oljeflöde och vid CO_{2(opt)}. Provserien med olja 451 gav de i tabell 7:9 redovisade värdena.

TAB. 7:9

CO ₂ -halt %	Stoftbild- ning g/kg olja	Kapacitet kg/h
7,5	1,80	34
9	0,21	34
10,5	0,20	34
8	0,64	40
11	0,093	40
13	0,32	40

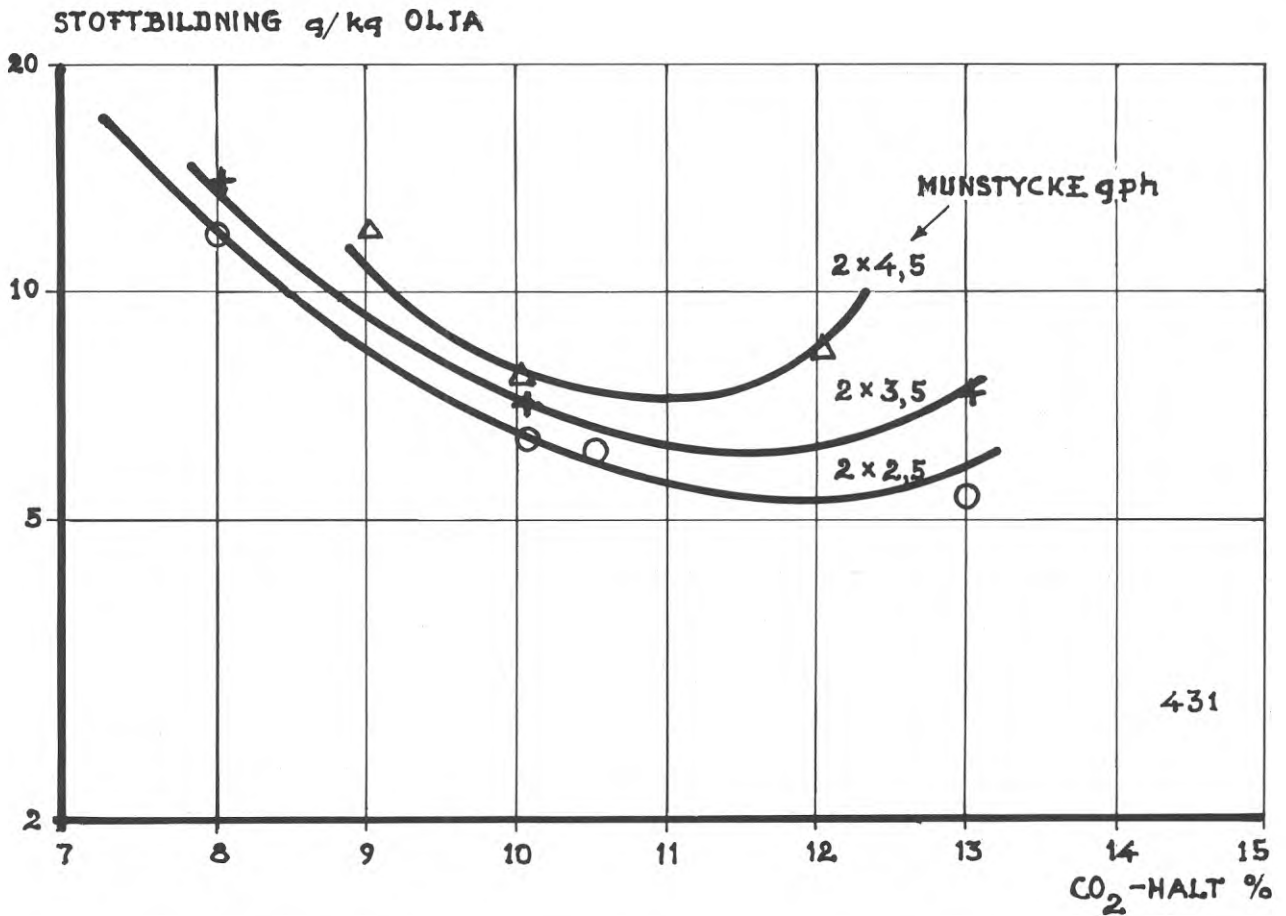


BILD 7:21 Stoffbildning som funktion av CO_2 -halten (säckpanna) för olja 431.

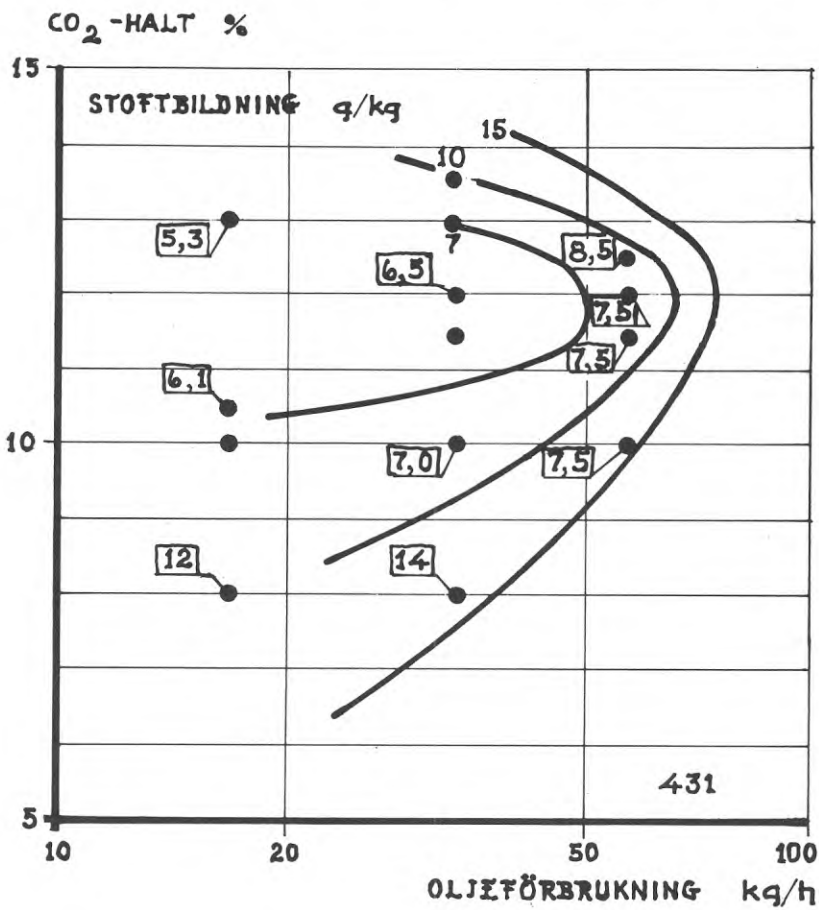


BILD 7:22 CO_2 /kapacitetsdiagram för olja 431. I bilden har mätvärden inramats.

Värdena redovisas i grafisk form (CO_2 /kapacitetsdiagram) i bild 7:20. Olja 451 är som framgår av diagrammet synnerligen bra. Pannan kan här arbeta upp till maxkapacitet utan att det funktionella kravet på stofthalten överskrids. Stoftbildningen för oljan ligger exempelvis vid $\text{CO}_2(\text{opt})$ på ca 1/15 av värdet vid drift med olja 481.

Man kan här lägga märke till att olja 481 och 451 båda säljs under samma handelsbeteckning (Eo 4 LS) och inrymmer i samma SIS-standard. Driftsmässigt skiljer sig oljorna dock åt i mycket hög grad och redan här torde det vara lämpligt att konstatera att oljornas stoftbildande egenskaper på något sätt borde redovisas för resp. olja. Härmed skulle man även för oljor av den i bild 7:19 redovisade typen finna avnämare, men sådana med väsentligt bättre möjligheter till en god förbränning (ev. i kombination med stoftavskiljning) än de som använder den här provade pannstorleken och brännarstorleken. Olja 431 undersöktes mer ingående vid tre olika kapaciteter (motsvarande munstycken 2 x 2,5; 2 x 3,5 resp. 2 x 4,5 gph. Försöksresultaten anges i bild 7:21 och som framgår av bilden har oljan stoftbildningsegenskaper som i stort överensstämmer med de för olja 481.

Redan vid bästa driftspunkt (ca 11 - 12 % CO_2) och vid lägsta kapaciteten erhöles omkring 5 g stoft/kg olja.

I bild 7:22 visas det för denna olja erhållna CO_2 /kapacitetsdiagrammet.

Olja 411 uppvisade nästan lika goda egenskaper som olja 401 och låg helt i paritet med 451, se bild 7:23 - 7:26.

Som framgår av CO_2 /kapacitetsdiagrammen i bild 7:24 och i bild 7:26 kan panna/brännarkombinationen utan omjustering användas för denna olja utan att de av myndigheterna ställda funktionskraven vad gäller stoftbildning överskridas.

7.5.2 Resultat för destillatoljor

Som tidigare nämnts undersöktes tre destillatoljor av handelskvalitet. Försöksresultaten anges i kraftigt nedkortad form i tabell 7:10. Som framgår av tabellen föreligger vissa skillnader vilka från luftvårdssynpunkt dock är relativt små. Destillatoljorna gav i samtliga undersökta fall en sotbildning som underskred den av Statens Planverk satta gränsen 1,5 g/kg olja.

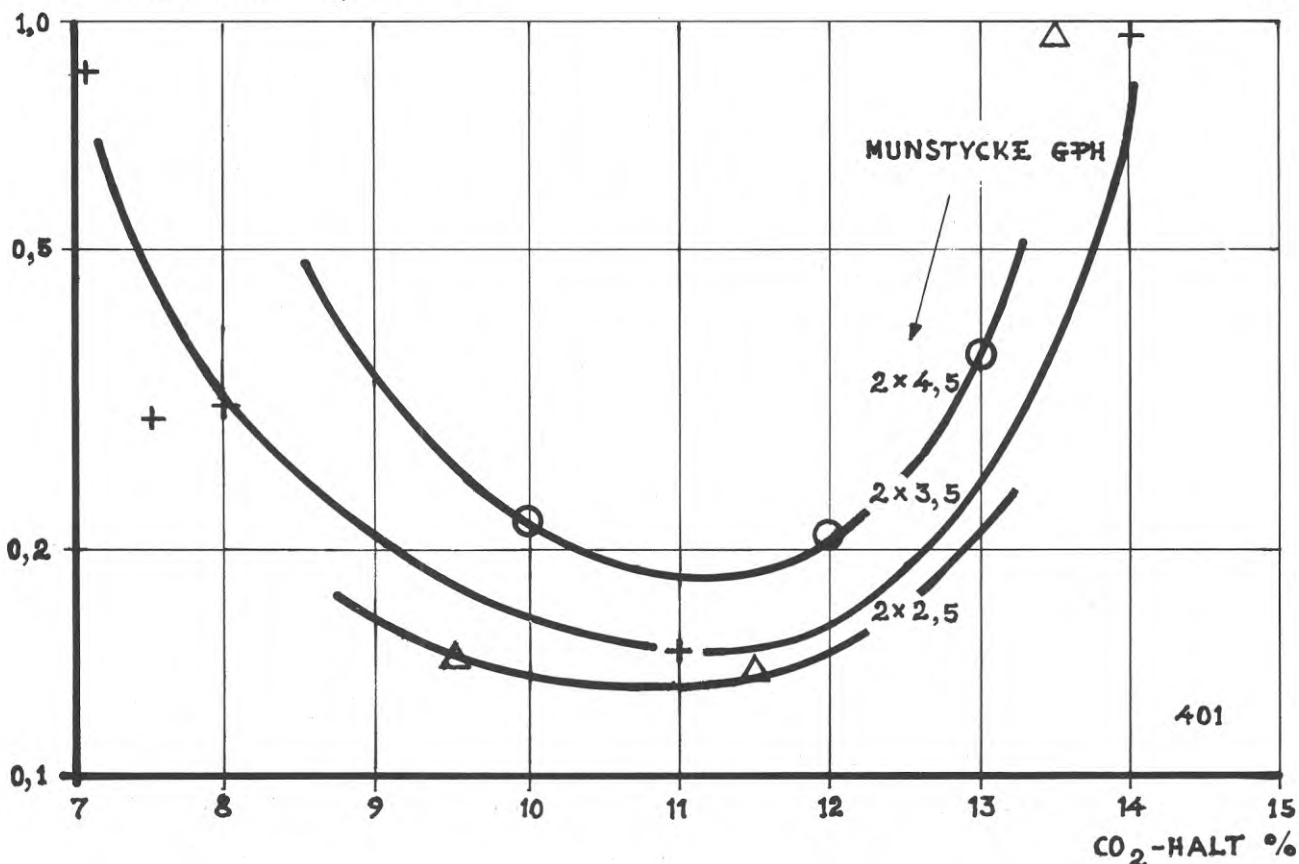


BILD 7:23 Stoffbildning som funktion av CO₂-halten (säckpanna) för olja 401

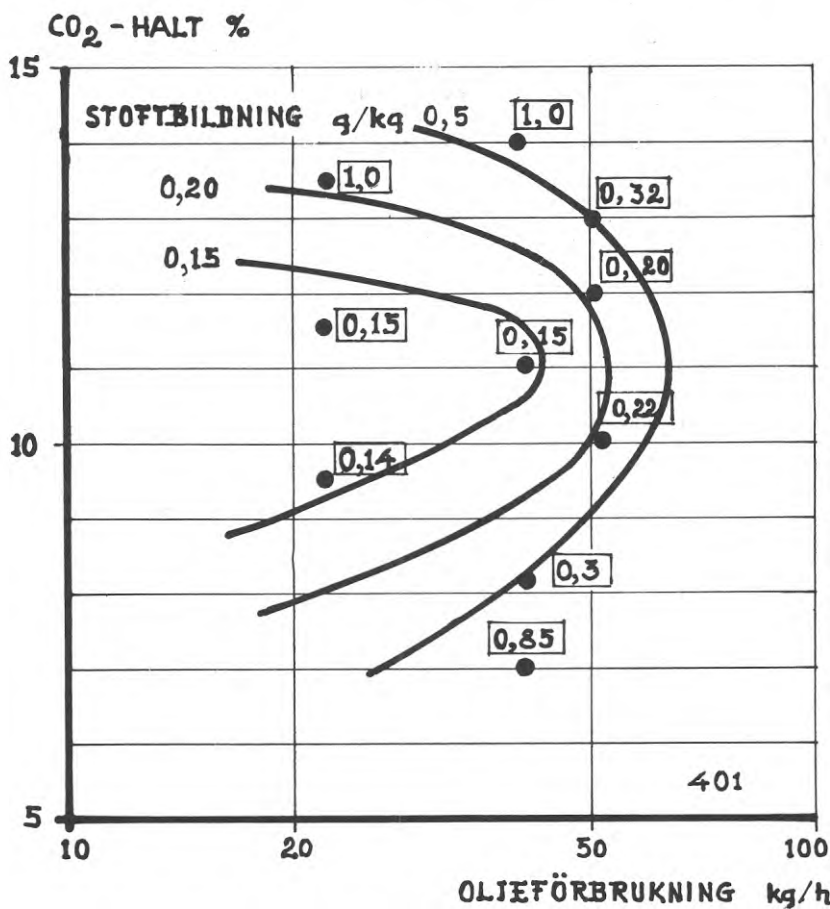


BILD 7:24 CO₂/kapacitetsdiagram för olja 401 vid säckpanna.

STOFFBILDNING g/kg OLJA

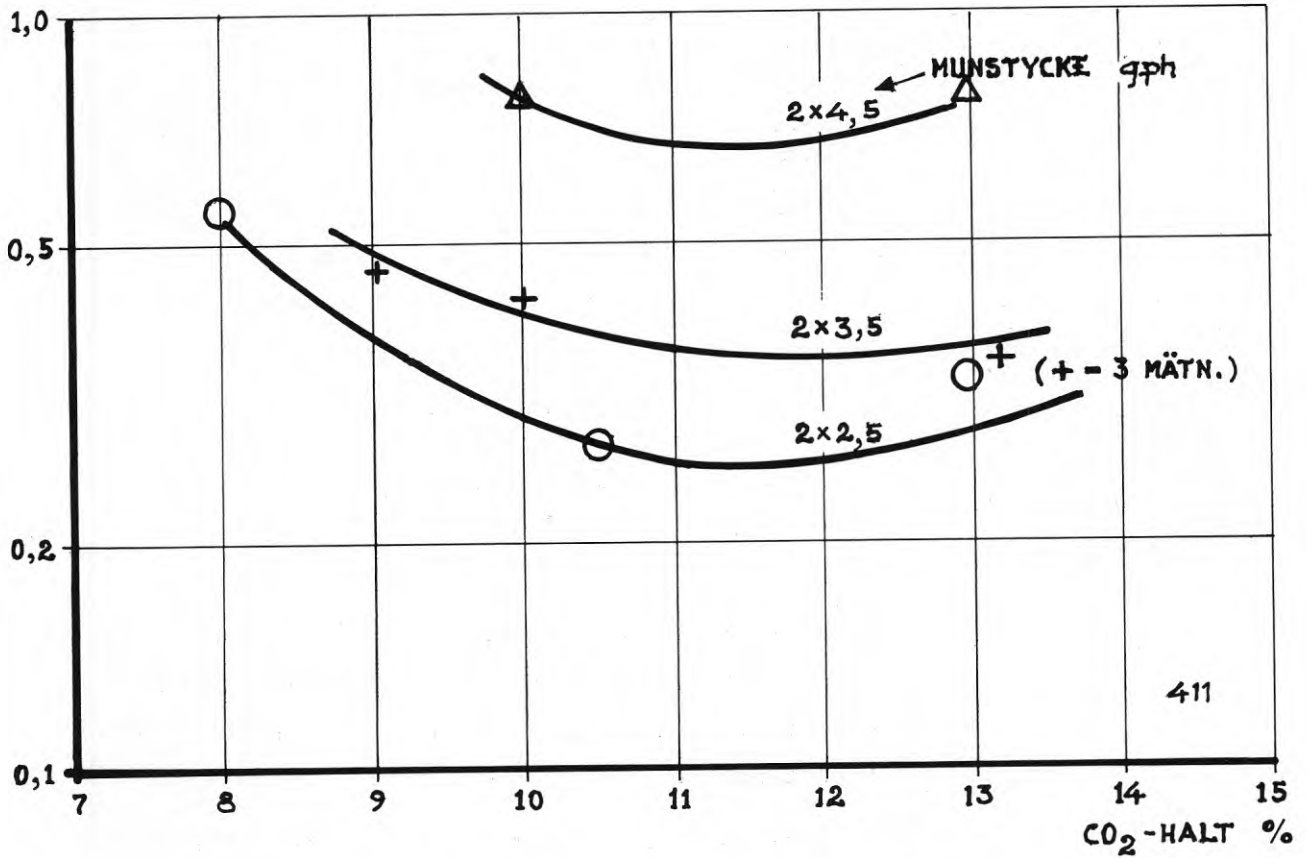


BILD 7:25 Stoffbildning som funktion av CO₂-halten (säckpanna) för olja 411.

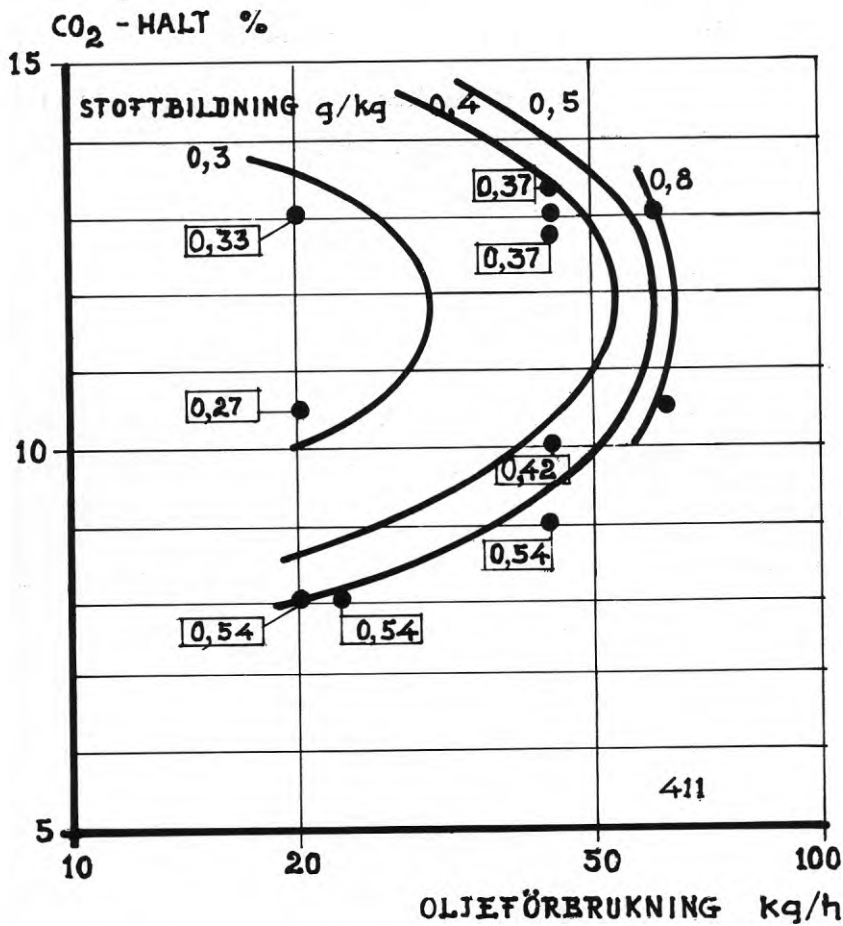


BILD 7:26 CO₂/kapacitetsdiagram för olja 411 vid säckpanna.

TAB. 7:10 Resultat för destillatolja vid 100 % belastning.

Olja	Sotbildning i g/kg vid CO ₂ -halt			
	8 %	10 %	12 %	14 %
151	0,06	0,05	0,06	(0.1)
101	0,002	0,004	0,002	-
131	0,01	0,004	0,01	0,07

Av vad som framgått tidigare inses att försöksresultaten för de bästa av de tre oljorna är synnerligen osäkra.

7.5.3 Sammanfattning av proven vid central P.

Den vid central P företagna provningen på en säckpanna i kombination med en tryckoljebrännare gav som resultat

- o De lågsvavliga oljorna uppvisade i stort sett två stoftbildningsegenskaper. Antingen var oljorna mycket bra t.ex. olja 411, 401 och 451 eller också högsotande som olja 431 och 481.
- o De normalsvavliga oljorna visar på tre kvaliteter med hänsyn till stoftbildningen - 441, 461 och 471 gav medelhöga stofthalter medan 421 gav låg stoftbildning och 431 en hög stoftbildning.

En noggrannare analys av stoftbildningen för de olika oljorna och en jämförelse med förhållandena vid andra pannor och brännare skall ges senare.

7.6 MÄTNINGAR VID CENTRAL F.

Mätningarna vid central F utfördes tillsammans med en utomstående mätgrupp och hade till syfte att ge ett mått på osäkerheten vid mätningar av detta slag. Tyvärr visade sig proven ej ge de önskvärda resultaten främst på grund av brister i den parallellt använda mätutrustningen¹⁾. Proven - som dessutom utgjorde en del i ett utvecklingsarbete - kunde ej förlängas varför något slutligt svar på frågan ej erhöles.

1) Provutrustningen var ej ägnad för isokinetisk mätning, varför betydande mätfel erhöles.

Mätplanets läge vid central F hade valts för att motverka de uppströms befintliga kanalböjarnas ogynnsamma inverkan på stofffördelningen över mätplanet.

Vid mätningarna utfördes först en förberedande kontrollmätning av stofffördelningen över tvärsnittet. Från denna kontrollmätning kan som vi tidigare sett en korrektionsfaktor bestämmas. Korrektionsfaktorn användes därefter för omräkning av den vid andra driftsfall i centrum **uppmätta emissionen till ett medelvärde** gällande för hela kanalen. Metoden är givetvis avhängig av att samma strömbild erhålls vid olika driftsfall. I tabell 7:11¹⁾ ges resultat av kontrollmätning i de i bild 7:27 angivna mät-punkterna.

I tabell 7:12 anges erhållna medelvärden av gashastigheten. Hastigheten har beräknats med stöd av de olika gasprovernans **storlek** och sondarean. Temperaturen har i samtliga fall antagits vara 260°C.

TAB. 7:12 Ungefärliga hastigheter i olika mätpunkter. Värdena avser fullast (ca 210 kg olja/h) och vid 13 % CO₂.

Mätpunkt	Gashastighet	
	m/s	n(norm)/s
1	14,0	7,4
2 (5)	10,0	5,3
3	10,5	5,8
4	13,0	6,9
6	10,0	5,3

Som framgår av tabellen är hastighetsprofilen över tvärsnittet något skev - vilket med relativt stor sannolikhet motsvaras av en skev stofffördelning. Från mängden uppsamlat stoft, sondarean och provtiden kan värden på den tidigare beskrivna emissionen (i g/m²s) bestämmas. För de olika mätpunkterna erhålls resultat enligt tabell 7:13.

1) Av utrymmesskäl placerad på omstående sida.

TAB. 7:11 Resultat vid kontrollmätningar vid anläggning F

Mät.n.r	Mätpunkt	Oljeflöde kg/h	a) CO ₂ -halt %	b) Sottal ^{c)}	Temperatur-d) hos förbrgas OC	Gasprovets volym nm ³	Uppsam- lat stoft mg	Stofthalt mg/m ³
1	4	227	12,8-13,8	4	245	416	43,80	95
2	2 (5)	221	13,0	4	245	434	46,90	106
3	1	221	13,0	4	245	441	79,05	179
4	3	221	12,7-13,0	4	245	460	34,70	70
5	6	221	13,0	4	245	660	125,50	186

a) Oljeflödet uppmättes med befintlig ny flödesmätare. 1-timmes medelvärden anges i tabell 1. För oljans densitet har värdet 940 kg/m³ använts. Felet hos mätningen kan antas vara $\pm 2\%$ av mätvärdet.

b) CO₂-halten uppmättes med Orsat apparat och gav ett absolut fel av $\pm 0,2\%$. 2 - 3 mätningar per prov gjordes.

c) Sottalet uppmättes med en s, k, Bacharachmätare, varvid de i avsnitt 5 angivna möjligheterna till mätfel beaktades.

d) Rökgastemperatur uppmättes med termoelement. Angivna värden, som ej direkt krävs för mätningens genomförande, har ej korrigerats med avseende på strålningsförluster. För rökgas-temperaturen kan mätfelet uppskattas till $+ 5^{\circ}\text{C}$.

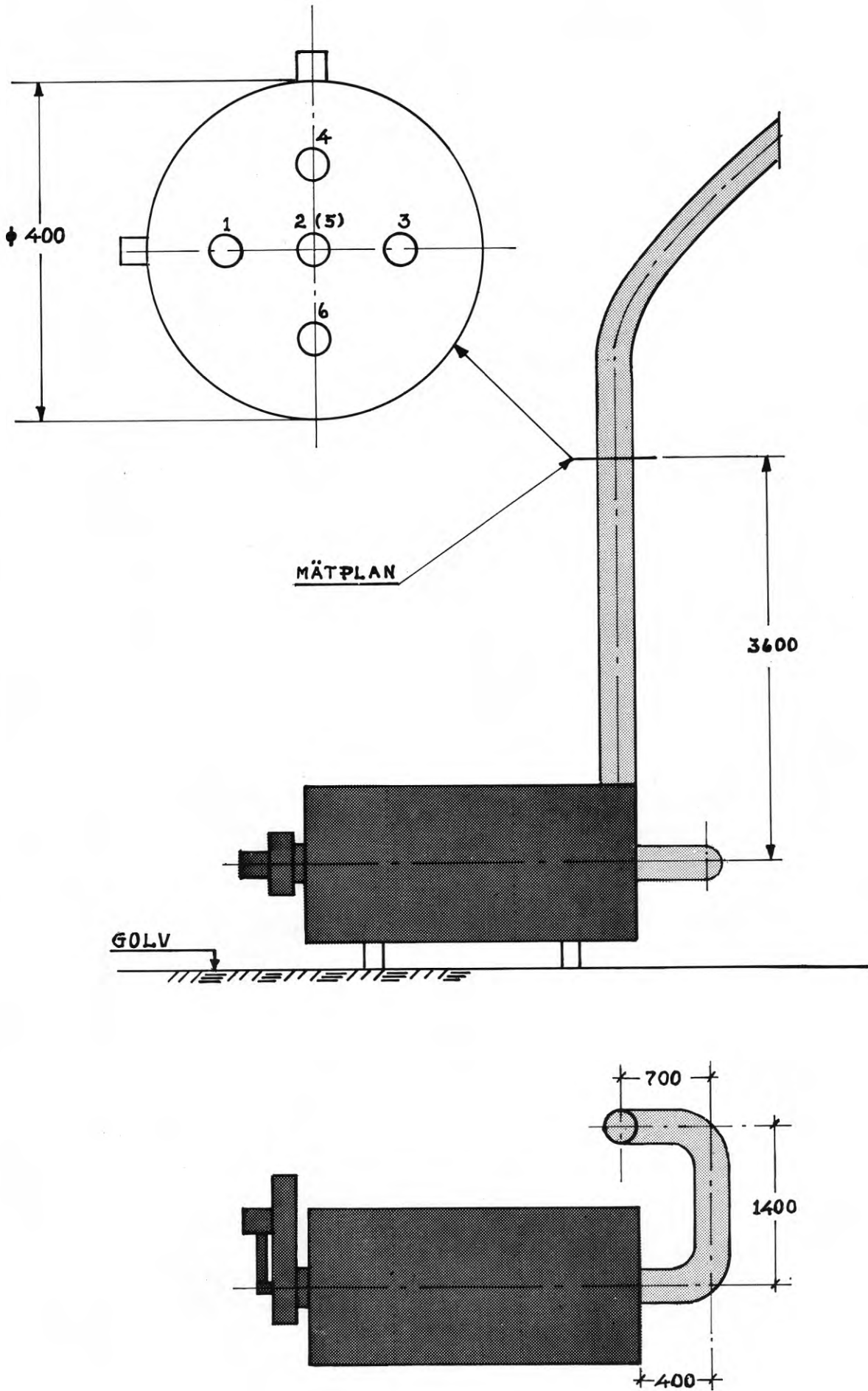


BILD 7:27 Mätplan mm vid anläggning F.

TAB. 7:13 Stoftflödet över kanaltvärsnittet.

Mätpunkt	Stoftemis- sion g/m ² s	Stoftbild- ning g/kg
1	1,37	2,48
2 (5)	0,59	1,47
3	1,44	1,00
4	0,66	2,60
6	1,03	1,30

I tabellen är även angivet de värden på stoftbildningen i g/kg som skulle ha erhållits om en enda mätpunkt valts. Som framgår av tabellen skulle en sådan enstaka mätning ha givit värden från 1,0 - 2,6 g/kg beroende på valet av mätpunkt varav framgår det slumpmässiga i sådana enstaka prov.

Medelvärdet för stoftflödet är beräknad enligt vad som tidigare sagts - 0,78 g/m²s, motsvarande 1,60 g/kg olja. Den uppmätta stoftbildningen i centrumpunkten var 1,47 g/kg olja varför den tidigare angivna korrektionsfaktorn här blev

$$k = 1,60/1,47 = 1,07$$

Detta innebär således att medelvärdet över kanalen enligt mätningarna ligger ca 7 % högre än mätningen i kanalcentrum ger vid handen.

7.6.1 Resultat av stoftmätningarna vid central F.

Provningsen av brännaren avsåg bestämning av stoftalstringen vid drift med två olika oljor, här benämnda I och II¹⁾. **Viskositeten för olja I uppgavs vara 100 cSt, för olja II 150 cSt vid 50°C.**

Bestämningen av stoftbildningen vid drift med olja I skedde den 13/1 och vid drift med olja II den 14/1.

Mätningen utfördes vid varierande belastning och vid varierande driftsförhållanden enligt tabell 7:14 och 7:15. Samtliga mätningar skedde i mätpunkt 2 (5) - centrumpunkten.

1) Ingen av oljorna har undersökts vid någon annan fältmätning.

TAB. 7:14 Driftsdata vid försök med olja I

Prov nr	Oljeflöde kg/h	CO ₂ -halt %	Sottal	Förbrägas temp.	Pannvatten temp.
6	226	13,0	3-4	240	80
7	296	13,2	6-8	280	90
8	56	13,2	0	150	75-60

TAB. 7:15 Driftsdata vid försök med olja II

Prov nr	Oljeflöde kg/h	CO ₂ -halt %	Sottal	Förbrägas temp.	Pannvatten temp.
9	84	13,0	1	135	80
11	227	12,8 - 13,0	2-3	250	80
12	227	10,5 - 10,8	1-2	250	80
13	227	8,2 - 8,5	2-3	255	80

Vid olja I undersöktes stoftemissionen som funktion av belastningen vid konstant CO₂-halt (13 %). I bild 7:28 visas resultatet, varvid såväl stoftbildning som stofthalt i förbränningsgaserna angivits. I bilden har även de av *provningsanstalten* erhållna resultaten redovisats. Mätningarna visar relativt stor - men procentuellt mycket konstant - avvikelse främst beroende på den icke isokinetiska avsugningen vid den jämförande mätningen. Till värdena i bild 7:28 bör tilläggas att stoftbildningen ej ens vid överlastprovet översteg det av myndigheterna maximerade värdet 1,5 g/kg olja + askhalt i g/kg. Proven med olja II syftade dels till detsamma som vid olja I, dels att utreda stoftalstringen vid olika CO₂-halter.

Inverkan av olika kapacitet och vid 13 % CO₂ visas i tabell 7:16 **vari** stoftbildningen (efter korrektion för sned stoftfördelning i avgaskanalen) anges som funktion av kapaciteten. I tabellen anges även stoftbildningen vid två icke provade kapaciteter, varvid en extrapolation¹ från mätdata gjorts. Samtliga värden avser, som nämnts ovan, stoftbildningen vid en CO₂-halt av 13 %.

1) Vid extrapolationen har antagits att stoftbildningen som funktion av kapaciteten är lika för båda oljorna, se bild 7:28.

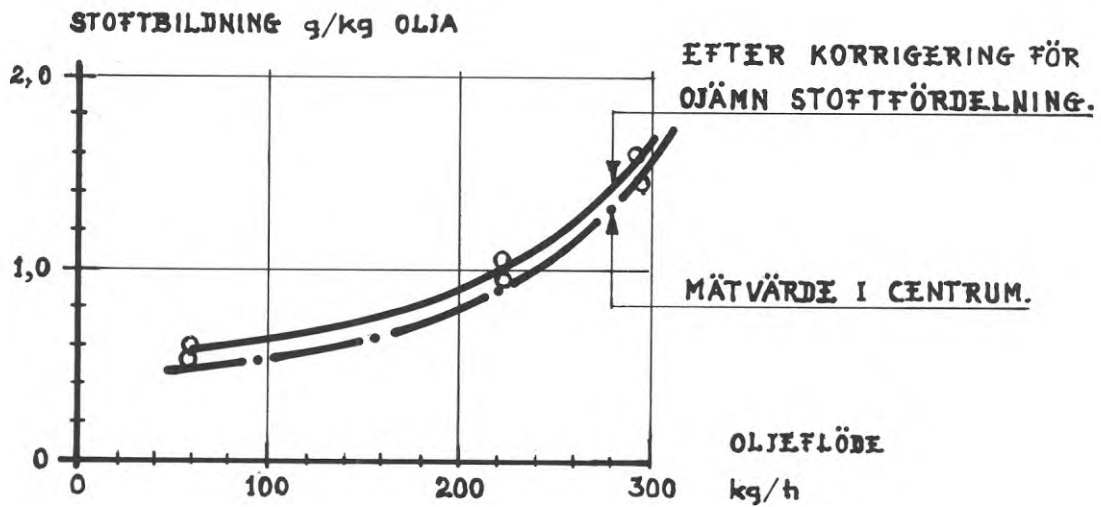


BILD 7:28a Stoffbildningen vid drift med olja I vid central F

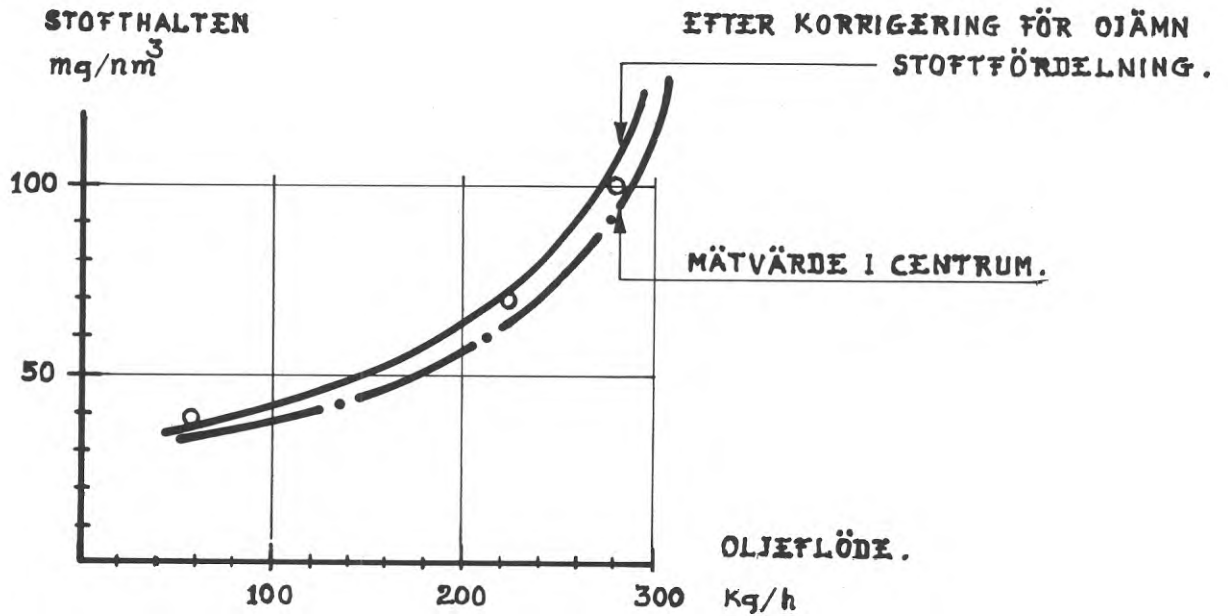


BILD 7:28b Förbränningsgasernas stofthalt vid drift med olja I vid central F.

TAB. 7:16 Jämförelse av stoftbildningen vid varierande kapacitet och med två oljor.

Kapacitet kg/h	olja I	olja II
56	0,56	(extrap) 0,8
84	0,60	0,84
227	1,07	1,4
296	1,60	(extrap) 1,8

Av tabellen framgår tydligt skillnaden i sotbildningstendens för de båda oljorna. Olja II ger i det uppmätta kapacitetsintervallet ca 35 % mer stoft än olja I. Bestämning av hur stor del av detta som faller på askhalten kräver särskild oljeanalys. Provingen avsåg som nämnts att studera variationerna vid en ändring av lufttillförseln. Den undersökta panna/brännarkombinationen uppvisar i detta avseende samma tendens som tidigare konstaterats vid liknande kombinationer. I bild 7:29 och 7:30 visas resultatet av mätningen.

Tidigare - se bild 7:28a och b har resultaten av de övriga mätningarna redovisats.

7.7 MÄTNINGAR VID CENTRAL S.

Vid central S utfördes huvudparten av försöksserierna. Provens omfattning framgår av tabell 7:17.

TAB. 7:17 Omfattning av proven vid central S

Oljor	Pannor	Brännare
9 EO 4 LS	3 st lika lådpannor om 4 MW	2 pressluftbrännare
8 EO 4 LS		1 tryckoljebrännare
3 EO 3 LS	1 st lådpanna likformig med övriga men med kap. 2,5 MW	1 rotationsbrännare

Mätningarna av stoftbildningen företogs i en rektangulär kanal se bild 7:31 och bild 5:7 och de i det följande redovisade resultaten hänför sig till mätpunkt b i mätplan 2 för samtliga försök, se bild 5:7. Korrigering till genomsnittliga värden kan således göras med ledning av bild 5:7 och korrektionsfaktorn kan sättas till

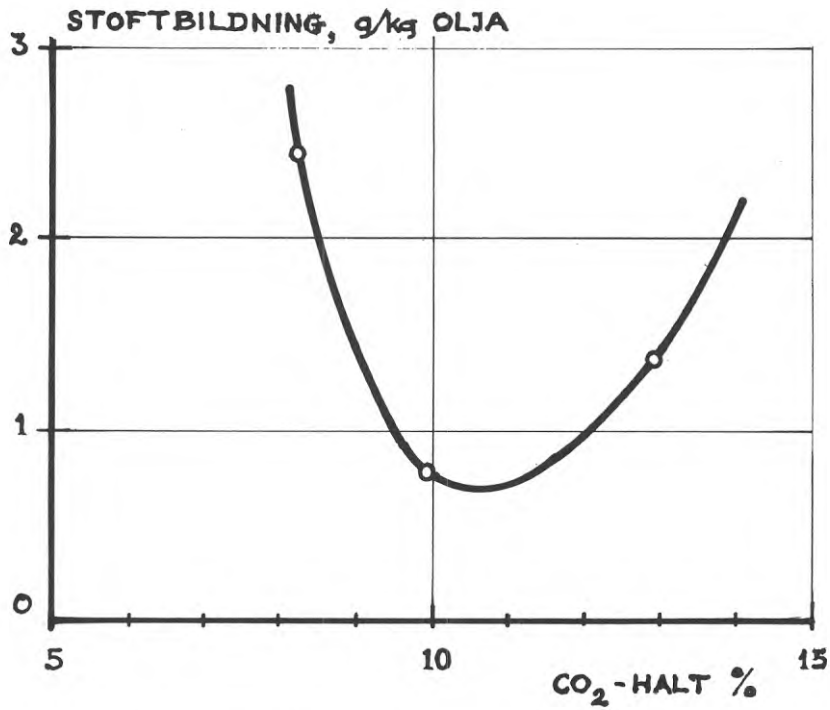


BILD 7:29 Stoffbildung som funktion av CO₂-halt vid anläggning F.

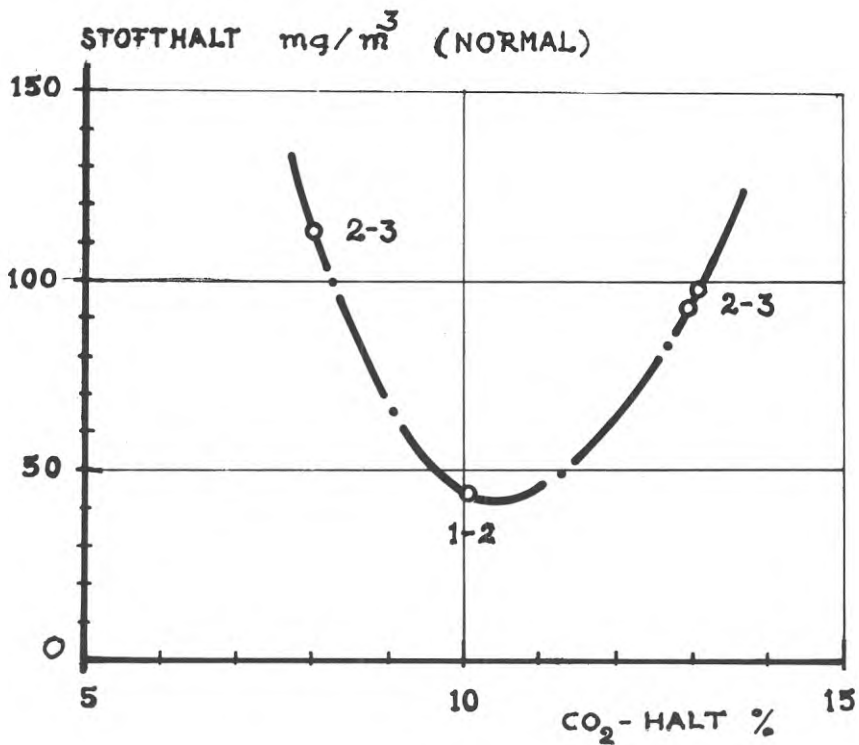


BILD 7:30 Sottal som funktion av CO₂-halt vid anläggning F.

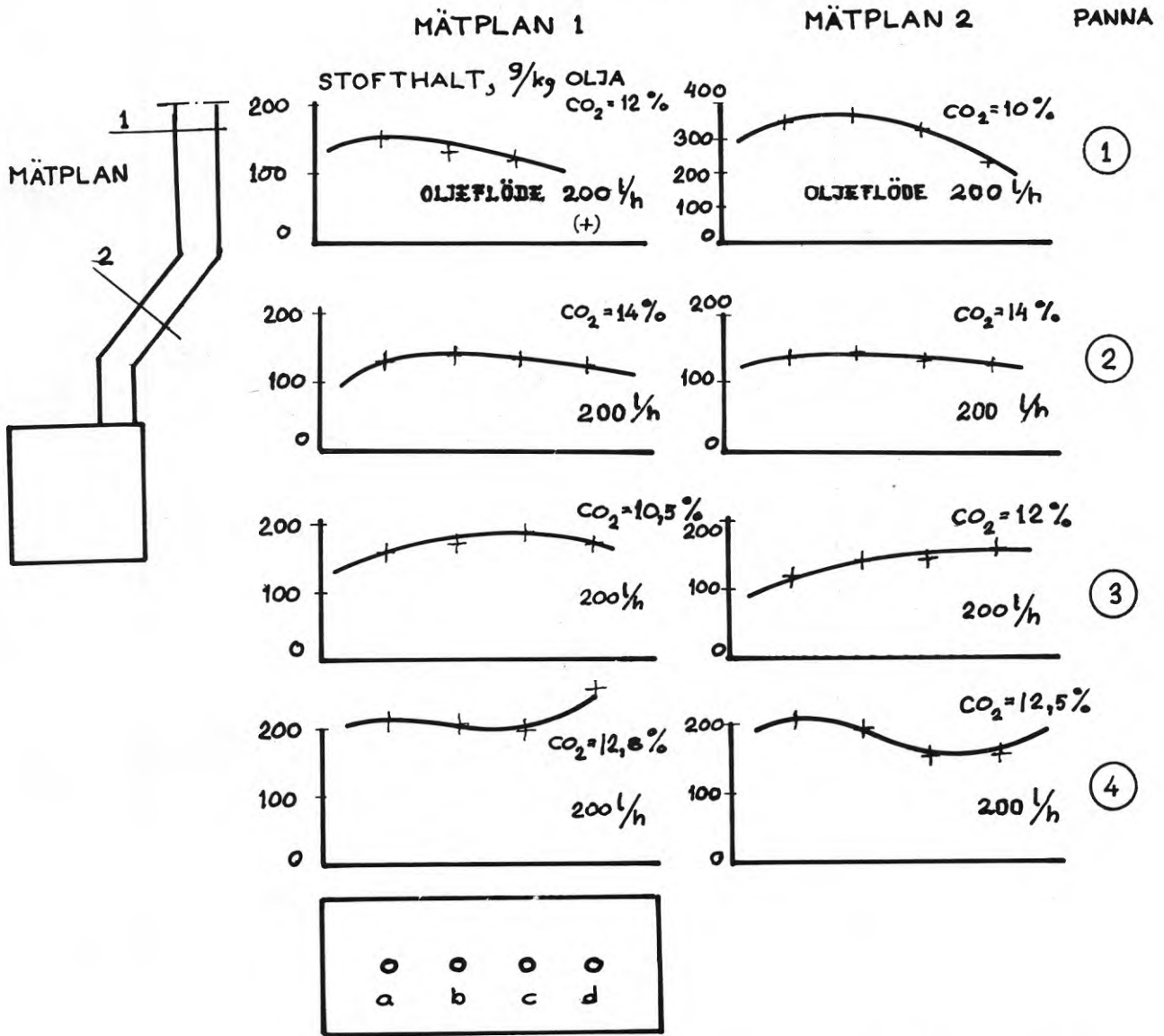


BILD 7:31 Val av mätpunkter och bestämning av stoftfördelningen över kanaltvärsnittet vid central S. Bestämningen har här skett för två plan, se den infällda skissen, för samtliga 4 pannor och vid de i diagrammen angivna CO_2 -halterna.

Vid de egentliga mätningarna har mätpunkt b använts.

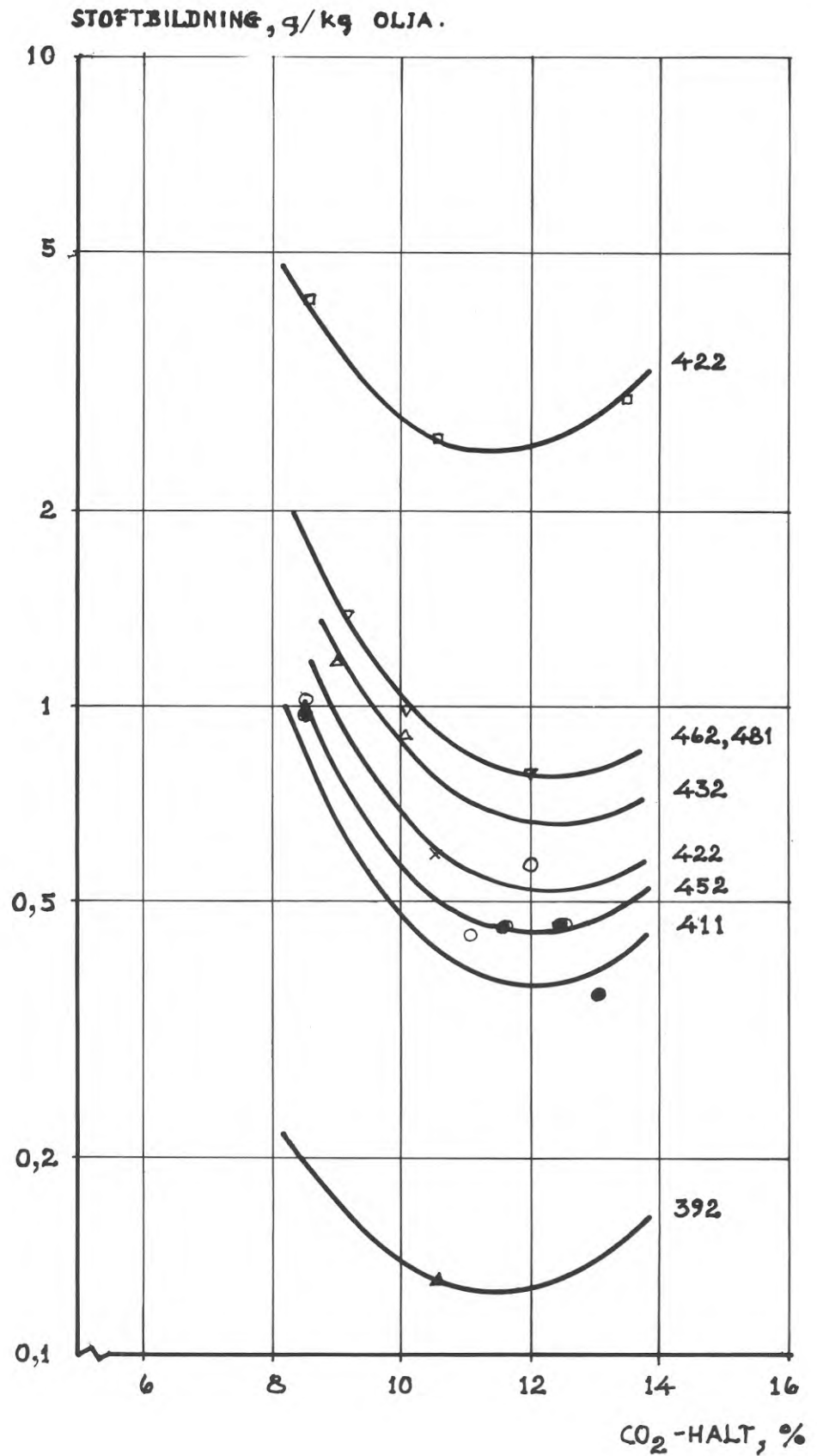


BILD 7:32 Stoffbildningen vid pressluftbrännare P(A) vid drift tillsammans med panna 3. Kapacitet 250 liter olja/h motsvarande en nyttig effekt av ca 2,3 MW.

$$\begin{aligned}
 k_1 &= 0,96 \\
 k_2 &= 0,96 \\
 k_3 &= 1,00 \\
 k_4 &= 1,00
 \end{aligned}
 \tag{7:3}$$

7.7.1 Stoffbildningen vid prov med två olika pressluftbrännare

Som tidigare visats - se tabell 7:17 - ingick i försöken prov med två pressluftbrännare P(A) och P(B) arbetande vid en och samma pannstorlek. De båda brännarna har undersökts med ett antal oljor och för kapaciteter mellan 100 och 400 l/h. Bild 7:32 visar stoftbildningen för brännare P(A) och bild 7:33 den för brännare P(B) vid en kapacitet av 250 l/h.¹⁾

Av försöken framgår följande:

- o De från tidigare försök konstaterade minimipunkterna **uppträder även** här och inom det förut visade intervallet $10 \% < \text{CO}_2 < 12 \%$ (7:4)
- o Stoffbildningen, S , faller inom ett område $0,5 \text{ g/kg} < S < 3 \text{ g/kg}$ (7:5)
för alla oljor utom två. Dessa (vid brännare P(B) är (471 resp. 431) båda LS-oljor, för vilka stoftbildningen uppgått till 5 - 15 g/kg olja inom ett relativt normalt driftsområde.
- o Lägst stoftbildning uppvisar olja 432, 452 och 411 vid brännare P(B) och 392 samt 411 vid brännare P(A). Samtliga dessa oljor är även LS-oljor, se tabell 7:3 och 7:18.
- o Stoffbildningen för den provade EO 3-kvaliteten är mycket låg (se bild 7:32). Man måste dock observera att detta ej kan generaliseras: *Stoftbildningen och oljekvaliteten (enl SIS-standard) står ej i relation till varandra!*

¹⁾ De i bilderna angivna värdena på stoftbildningen har ej här (eller i fortsättningen) korrigerats enligt ovan. En noggrann jämförelse kan således endast göras efter omräkning. Med hänsyn till mätnoggrannheten, se avsnitt 5, är dock ovanstående korrektioner normalt oväsentliga.

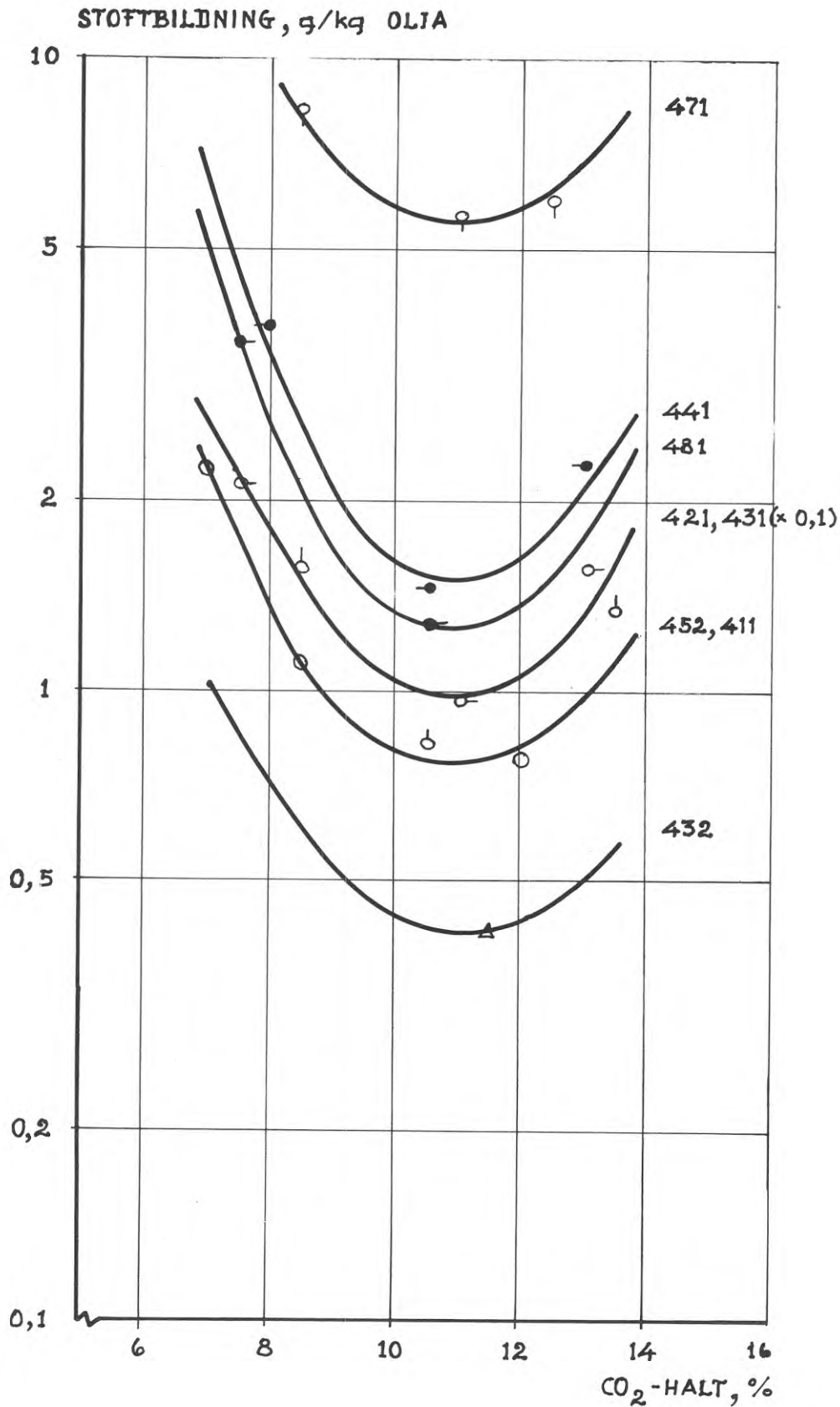


BILD 7:33 Stoffbildningen vid drift med pressluftbrännare P(B). Panna 2. Övriga data se bild 7:32. Observera att olja 431 avger ca 13 g stoft/kg vid 10 % CO₂.

TAB. 7:18 Data för vissa provoljor vid central S.

Olja	Kvalitet enl. SIS- standard	Svavelhalt mass-%	Viskositet vid 50°C cSt	Askhalt g/kg
491	Eo 4	0,9	74	< 0,2
402	Eo 4	2,4	74	< 0,2
412	Eo 4	0,8 - 0,9	60	< 0,2
422	Eo 4	2,3	65	< 0,5
432	Eo 4	1,6	90	< 0,2
442	Eo 4	2,2	90	< 0,2
452	Eo 4	0,7	35 - 40	-
462	Eo 4	2,3	65	< 0,5
372	Eo 3	0,7	65	ca 0,15
392	Eo 3	0,4	35	ca 0,1
313	Eo 3	0,6 - 0,8	35 - 40	ca 0,1

Till skillnaden mellan de olika LS-oljorna återkommer vi senare. Resultaten från försöken visar även på skillnader de båda brännarna sinsemellan. För oljorna 411, 452 och 481 har båda brännarna undersökts och i bild 7:34 visas en jämförelse mellan mätvärdena.

Som framgår av bilden är förhållandet mellan stoftbildningen för samma belastning (250 l/h) och samma CO₂-halt nära nog lika för samtliga tre oljor. De sjunkande kurvorna indikerar att brännare P(A) ger lägre stoftbildning vid högre CO₂ än brännare P(B) vilket främst hör samman med att den minsta stoftbildningen vid denna brännare erhöles vid ca 11,5 % CO₂, medan man för brännare P(B) får minimivärdet vid 10-10,5 % CO. Förskjuts kurvorna så att minimipunkten sammanfaller blir kvoten enligt bild 7:34 nära nog konstant och då ca 0,5. Brännare A ger således ca hälften av den stoftbildningen som erhöles vid brännare P(B).

Brännarna P(A) och P(B) har även provats vid andra kapaciteter än 250 l/h. I bild 7:35 och 7:36 visas stoftbildningen vid olika oljor och för ett oljeflöde av 400 l/h.

För oljorna 401, 421, 431 och 481 har prov gjorts vid båda brännarna. I bild 7:37 visas kvoten mellan stoftbildningen för de olika oljorna och vid 13 % CO₂. Värdet för olja 481 synes tveksamt av flera skäl, men har trots detta medtagits. Man kan konstatera att vid höglast har de båda brännarna i stort sett lika

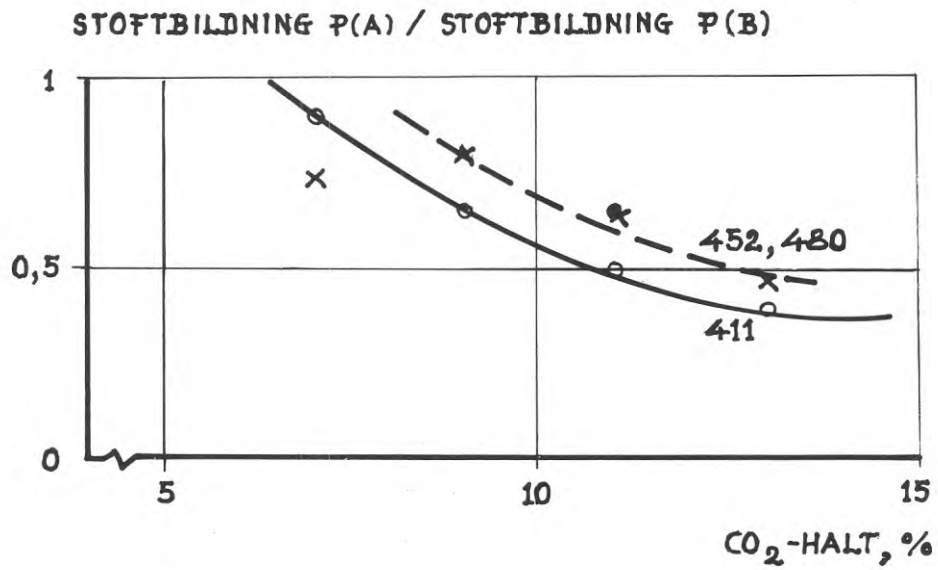


BILD 7:34 Jämförelse mellan stoftbildningen för tre olika oljor vid drift i två pressluftbrännare. Oljeflöde vid försöken 250 l/h. Brännarna drevs tillsammans med en lådpanna om 4 MW (märkeffekt).

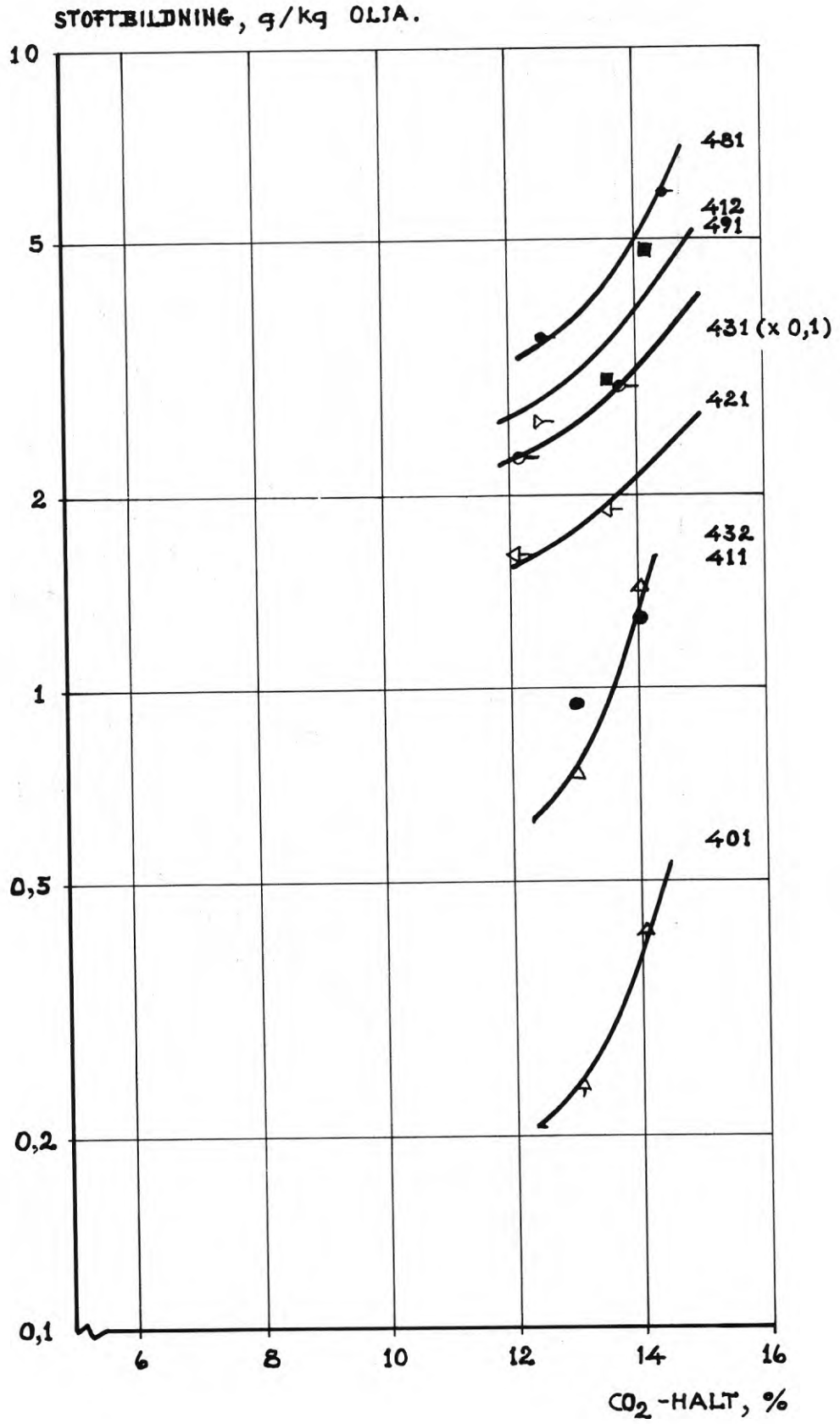


BILD 7:35 Som bild 7:32, men med oljeflödet 400 l/h.

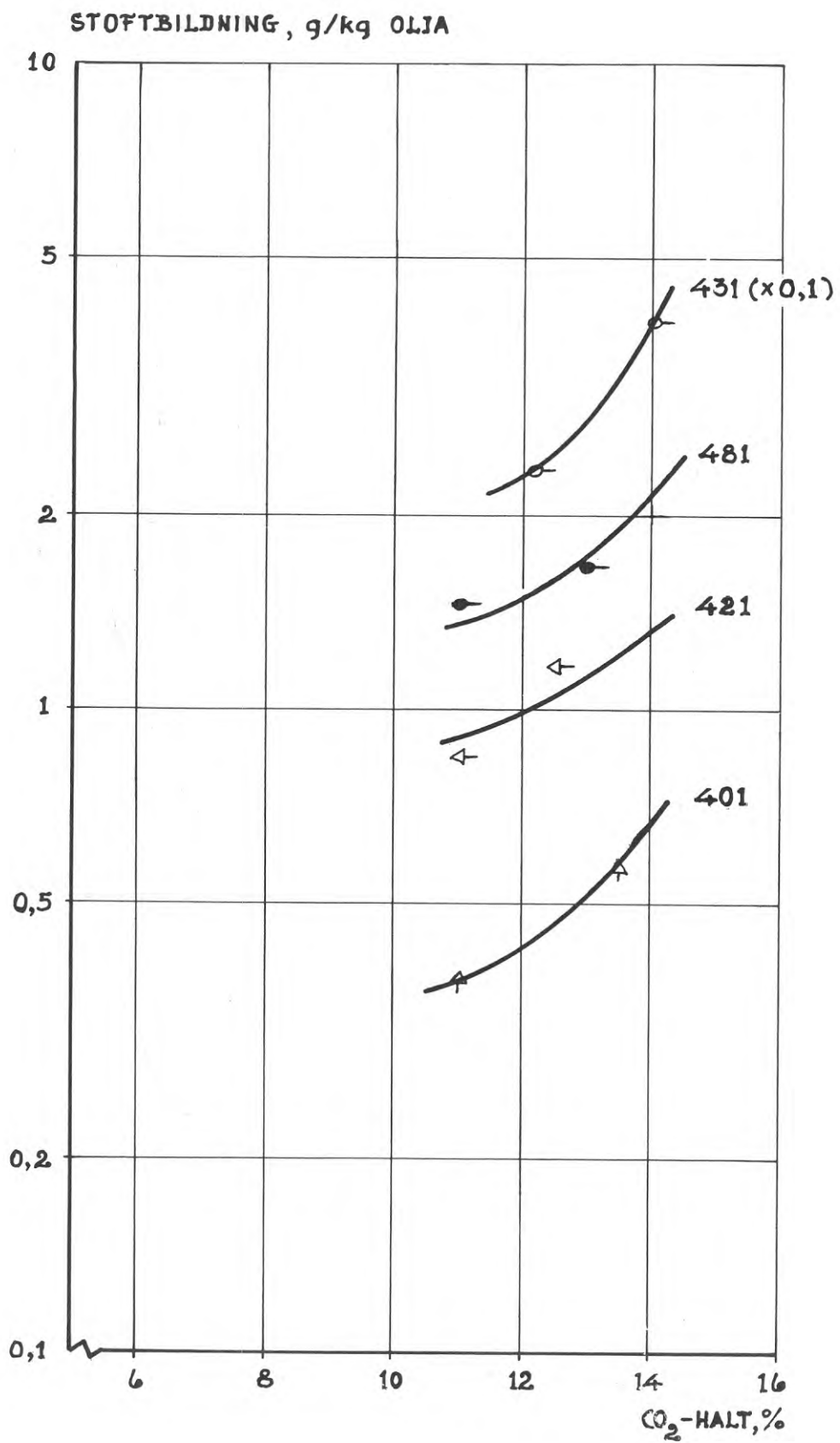


BILD 7:36 Som bild 7:33, men med oljeflödets 400 l/h.

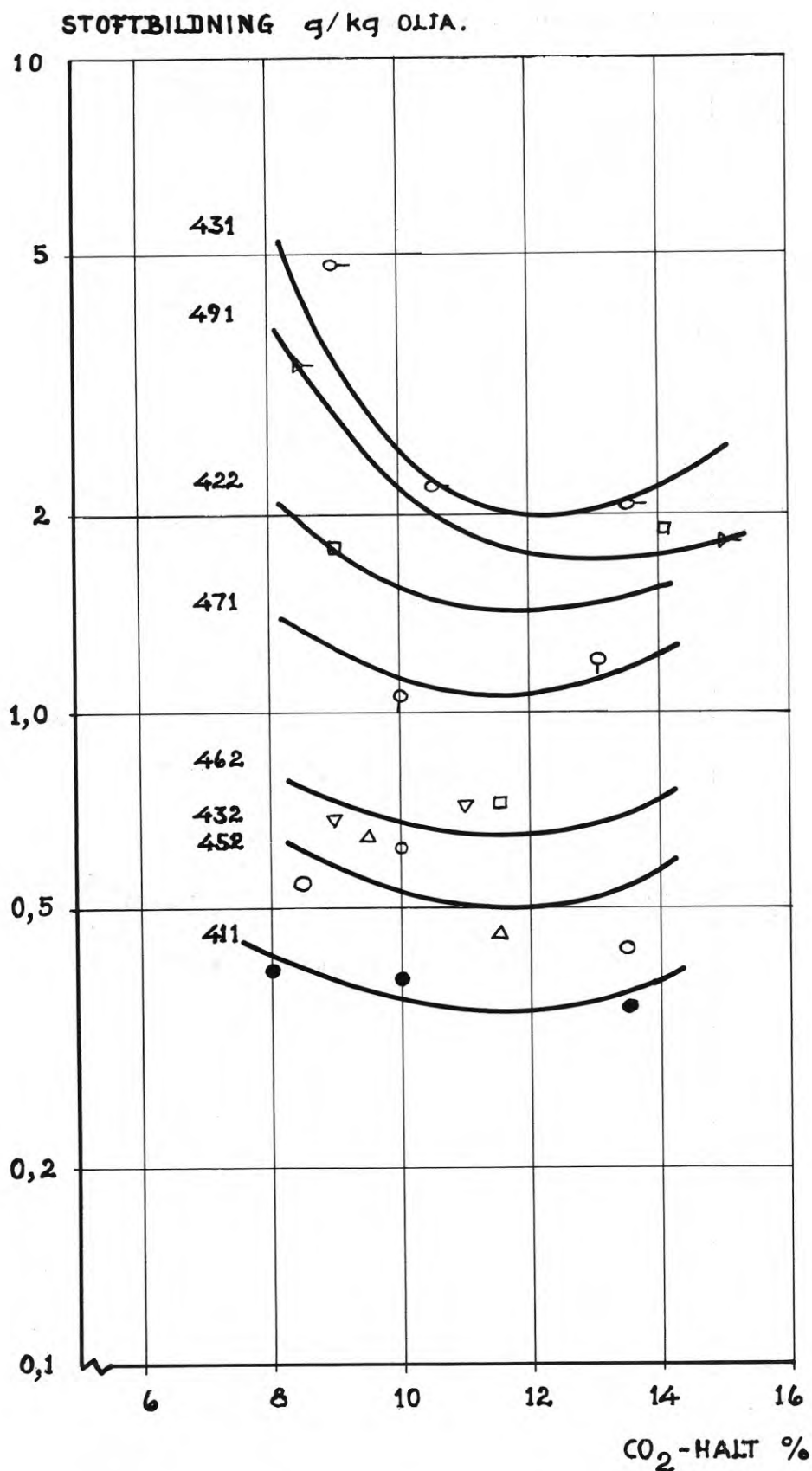


BILD 7:37 Stoffbildningen vid drift med rotationsbrännare R(A) på panna 4. Oljeflöde 250 l/h, Pannans märkeffekt 4 MW. Det bör noteras att korrektionsfaktorn för den använda mätpunkten är 1,0. De erhållna värdena representerar därför den "sanna" stoffbildningen. De ligger därför ca 5 % "över" de i bild 7:32 och 7:33 angivna värdena.

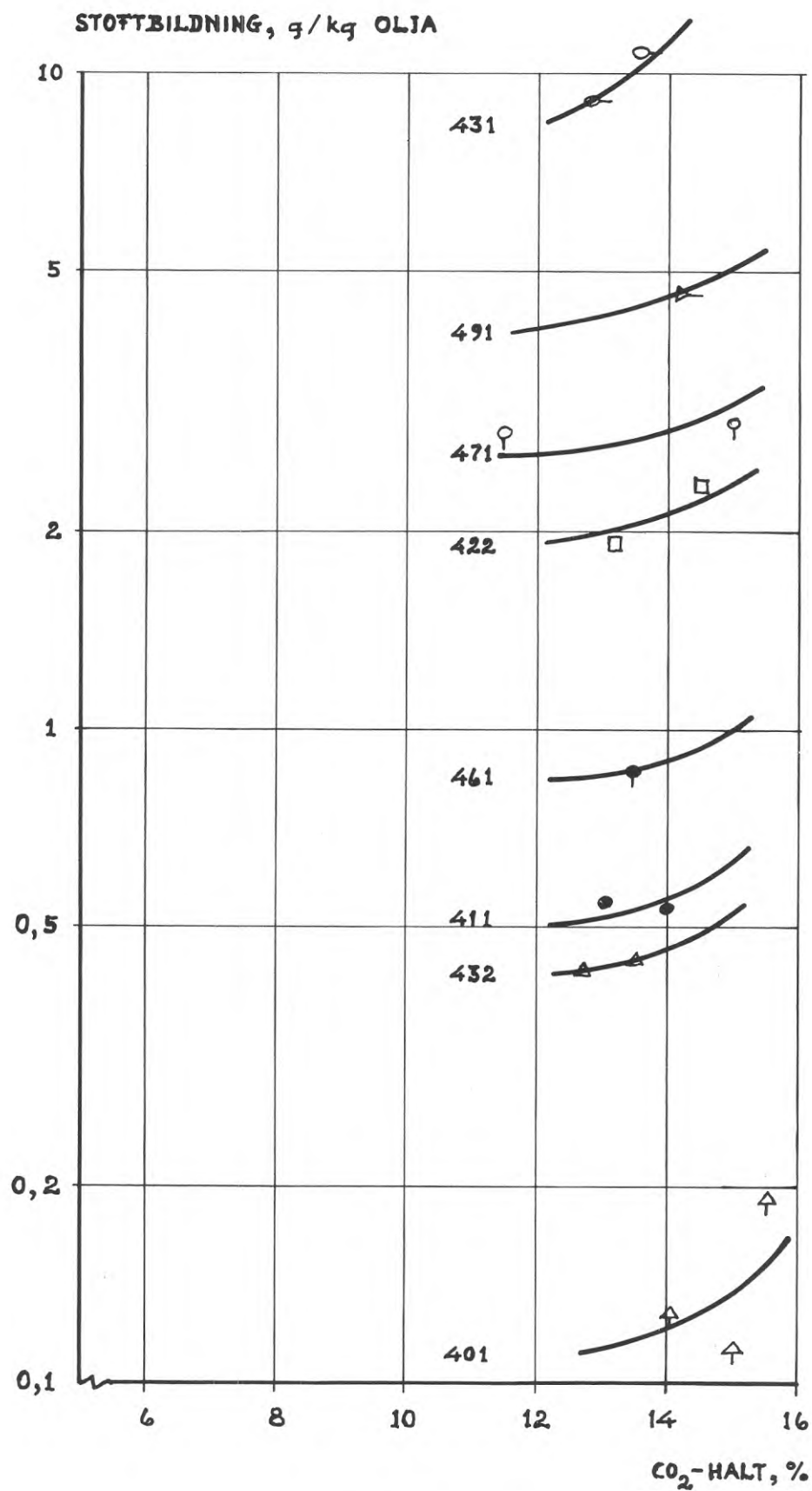


BILD 7:38 Stoffbildningen vid drift med rotationsbrännare R(A) på panna 4. Oljeflöde 400 l/h. Övriga data, se bild 7:37.

stoffbildning. Orsakerna härtill - liksom till de stora differenserna för olika oljor enligt bild 7:35 - skall beröras i avsnitt 8 och 9.

7.7.2 Stoffbildningen vid prov med rotationsbrännare.

I provserien ingick undersökning av en rotationsbrännarens egenskaper vid drift tillsammans med en lådpanna lika den som användes vid proven enligt 7.7.1.

I bild 7:37 och 7:38 visas resultaten för ett antal olika oljor vid denna brännar/pannkombination. Bild 7:37 avser belastningen 250 l/h tillförd effekt ca 2,3 MW, och bild 7:38 belastningen 400 l/h, tillförd effekt 4 MW. Det kan vara intressant att se närmare på den inbördes ordningen mellan oljorna vad avser stoffbildningsegenskaperna. I tabell 7:19 anges denna (olja med högsta stoffbildning först). Vissa oljor provades ej vid båda belastningarna.

TAB. 7:19

Nr	Belastning	
	250 l/h	400 l/h
1	431	431
2	491	491
3	422	471
4	471	422
5	462	-
6	-	461
7	461	411
8	-	452
9	411	432
	-	401

Som framgår av tabellen blir serien nära nog densamma för båda belastningarna. Denna iakttagelse, som kan göras för alla provade brännare skall senare diskuteras i samband med ett förslag till provning av oljors sotbildningsegenskaper.

7.7.3 Stoffbildningen vid prov med tryckoljebrännare

En tryckoljebrännare, T(A), provades tillsammans med en lådpanna av samma typ som övriga pannor vid central S. Pannan hade dock en lägre maximal kapacitet (stämplad effekt 2,3 MW) än övriga

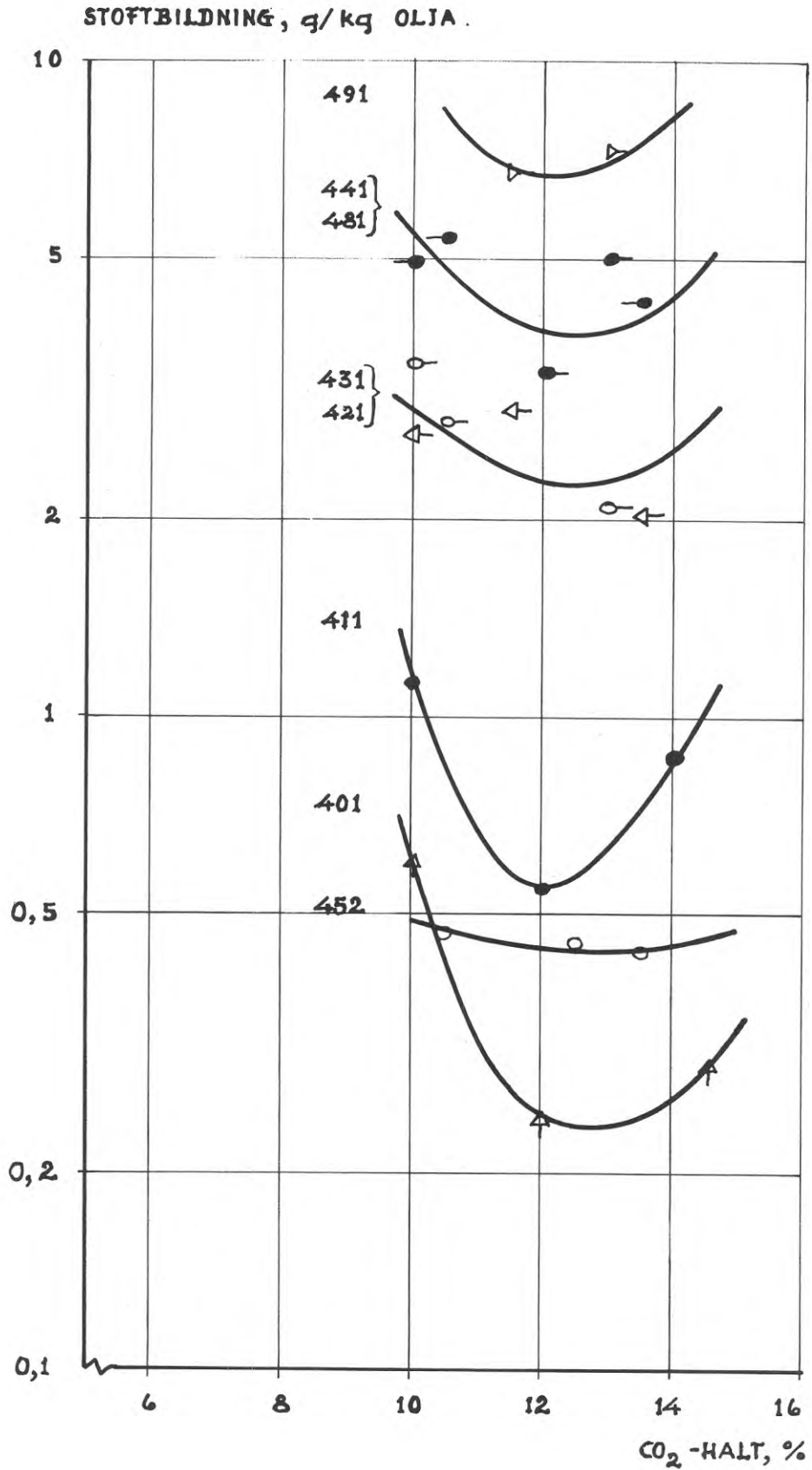


BILD 7:39 Stoffbildning vid drift med tryckoljebrännare T(A) på panna 2. Pannans märkeffekt 2500 Mcal/h. Oljeflödet vid proven 250 l/h.

riga pannor, vilket även gällde brännaren.

Vid provning med de tidigare nämnda oljorna erhöles de i bild 7:34 redovisade resultaten avseende 240 - 250 l/h (2,5 MW tillförd effekt).

Av bilden framgår att även för denna brännartyp erhöles en minsta stoftbildning vid

$$11 \% < \text{CO}_{2(\text{opt})} < 13 \% \quad (7:3)$$

men att $\text{CO}_{2(\text{opt})}$ här är förskjutet mot högre värden än vid pressluft och rotationsbrännare.

Vidare erhöles vid denna brännar/pannkonstruktion överraskande goda värden för olja 431 medan olja 491 gav normala (höga) värden. Variationer med kapaciteter undersöktes här bl.a. för oljorna 401 se bild 7:40 - och 492 - se bild 7:41 -. I bild 7:40 har den normala ökningen med belastningen erhållits medan de i bild 7:41 visade värdena pekar på en högre belastning vid låglast. I avsnitt 9.5 skall förhållandet belysas närmare.

7.7.4 Ytterligare försök vid central S

Vid central S utfördes ytterligare några försöksserier avseende att belysa förhållandena vid dålig skötsel, smärre förändringar i brännarna, ändringar i belastning m.m. Dessa försök och resultaten av dem tas upp i följande avsnitt och skall här ej redovisas separat.

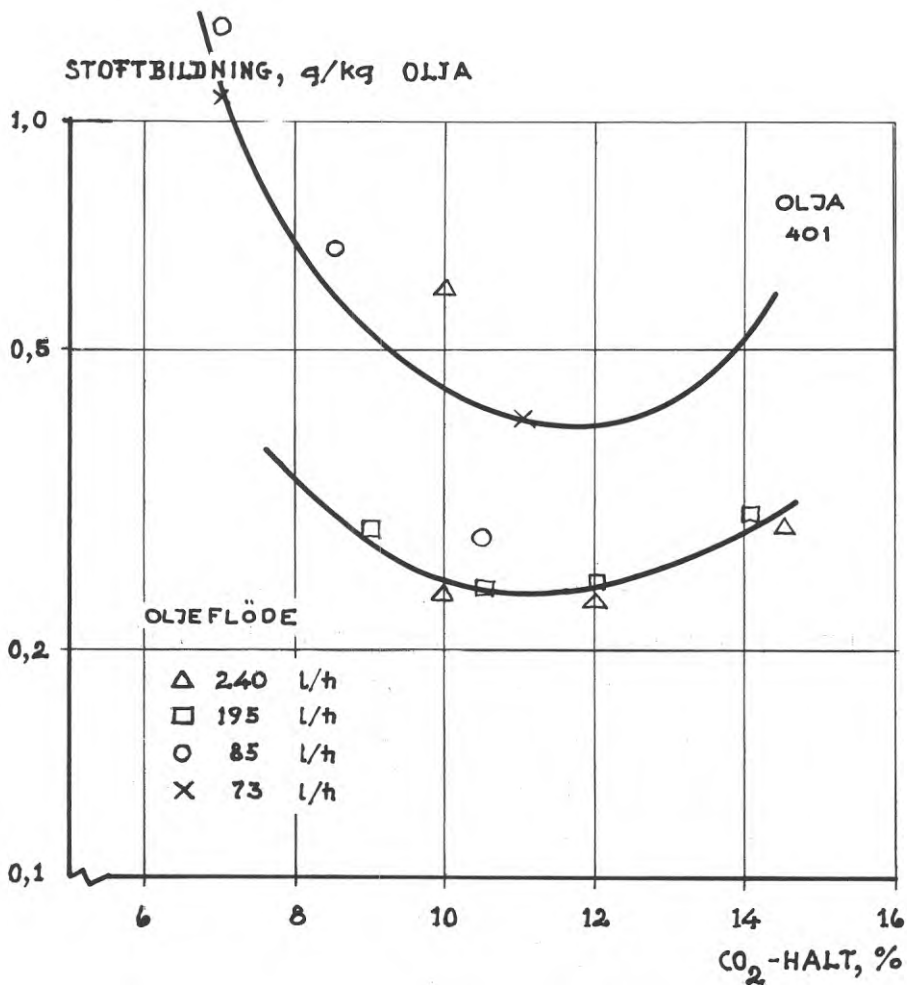


BILD 7:40 Stoffbildning som funktion av CO₂-halt vid anläggning S.
Olja 401.

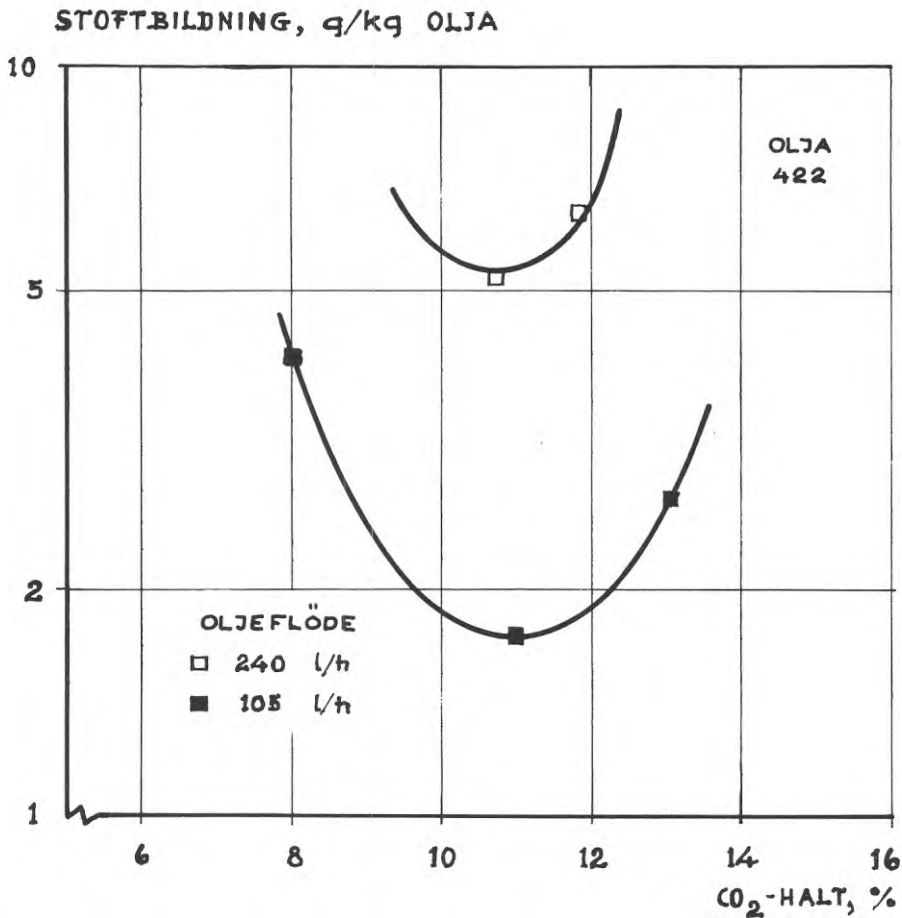


BILD 7:41 Stoffbildning som funktion av CO₂-halt vid anläggning S.
Olja 422.

1)

8. STOFTBILDNING FRÅN LÅGSVAVLIGA OLJOR (LS-OLJOR)

8.1 PROBLEM I SAMBAND MED LS-OLJOR.

Som framghållits tidigare har användningen av lågsvavliga oljor ökat väsentligt - inte blott i de tätorter där en låg svavelhalt föreskrivs, utan även i sammanhang där det från luftvårdssynpunkt ej är nödvändigt.

Den ökade förbrukningen av lågsvavliga oljor, vilka delvis har helt andra stoftbildningsegenskaper än de normalsvavliga har i några fall skärpt kraven på värmecentralernas utrustning. I de fall utrustningen varit föråldrad har personalen vid anläggningarna ej kunnat bemästra problemen och i vissa fall har det även vid nyare anläggningar blivit svårt att uppfylla de av Statens Naturvårdsverk angivna normerna. I några fall har man försökt lösa problemen genom en ökning av oljans förvärmning vilket resultat i en minskad viskositet och därmed minskade dropstorlekar. Som vi sett i avsnitt 2 blir dock storleksminskningen relativt blygsam och som framgår av avsnitt 9 (bild 9:9) är inverkan på stoftbildningen relativt obetydlig.

Vid användning av pressluftbrännare med kyld tryckluft som förstoftningsmedium kan speciella problem uppstå just vid de lågsvavliga oljorna, speciellt om de har en hög stelningpunkt (hög paraffinhalt). Vid expansionen i munstycket nedkyls luften nämligen med nedkylning av oljor som följd. Är oljan därvid otillräckligt förvärd kan eventuellt kristaller av paraffin utfällas. Resultatet blir att man snarare får att göra med förbränning av ett ämne i "pulverform" än av olja.

Det senare förhållandet uppstår även vid förbränning av olja som väl upphettats till *rätt temperatur*, men *ej under tillräckligt lång tid*. Fasta paraffinkristaller i oljan, se bild 8:1 (hämtad från Nelson (1970), får därvid ej tillfälle att smälta helt, vilket kan orsaka onormal stoftbildning. Stoftet kommer i så fall till stor del att innehålla "koksade oljedroppar" jämför avsnitt 3.1.2. Vi skall i det följande se närmare på de erhållna resultaten för lågsvavliga oljor

8.2 FÖRSÖKSRESULTAT

8.2.1 Laboratorieprov

Tidigare har - se avsnitt 6 - redogjorts för provningen av vissa lågsvavliga oljor vid eldning i provpannan. Här skall ytter-

1) Här och i fortsättning avses nettobildning, se förord.

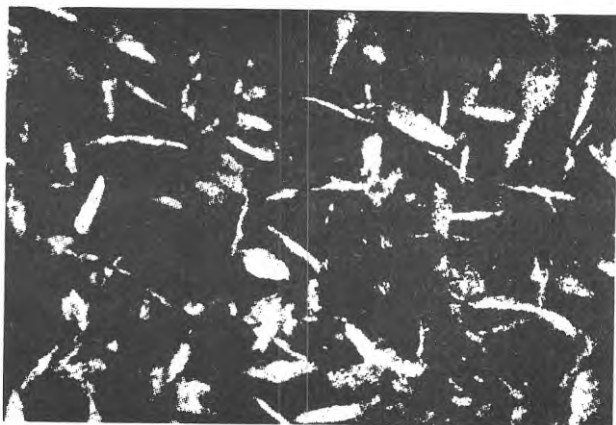


BILD 8:1 Utfällning av paraffinkristaller i olja..

ligare blott några försöksresultat, se bild 8:2 påvisas. I bilden anges stoftbildningen för 5 oljor, varav 3 lågsvavliga, nämligen 401, 411 och 431. Av dessa oljor uppvisar 431 den största och 401 den lägsta stoftbildningen vid 11 % CO₂. Förhållandet mellan de bästa oljornas stoftbildning vid denna CO₂-halt är 30.

8.2.2 Fältprov

Lågsvavliga oljor har undersökts på flera av fältanläggningarna. Vi skall här i huvudsak studera resultaten vid två av dessa, nämligen central P och central S. De aktuella provens sammanfattning framgår av tabell 8:1.

TAB. 8:1 Provning av LS-oljor vid central P och S

Brännare	Oljor provade vid central	
	P	S
Tryckoljebrännare	411	491
	401	452
	431	431
	451	411
	481	401
Pressluftbrännare		412
		452
		491
		431
		392
		432
		411
	401	
Rotationsbrännare		431
		401
		491
		471
		432
		452
	411	

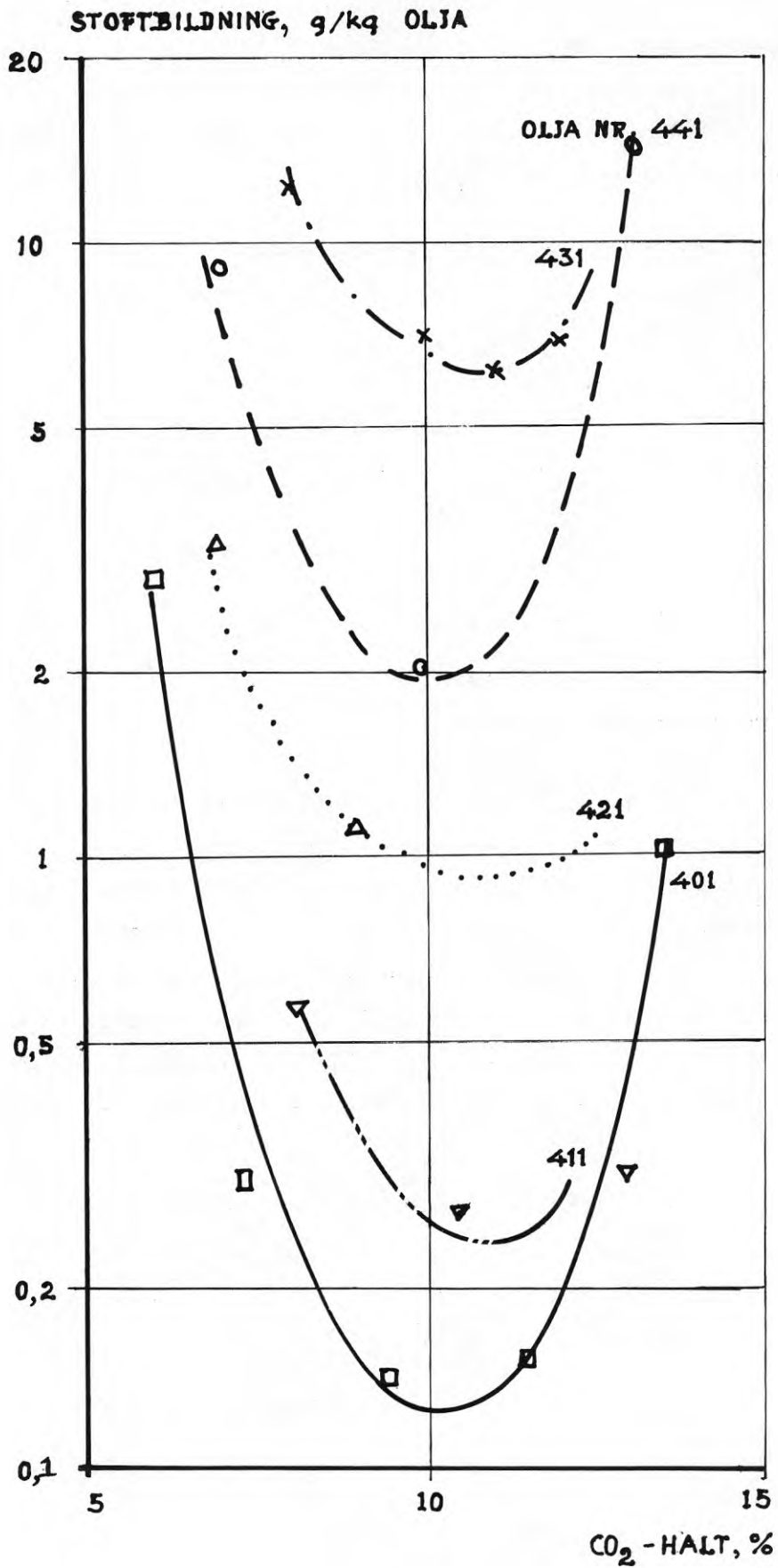


BILD 8:2 Stoffbildning från fem återstodsoljor.

Resultaten av provningarna har redovisats i avsnitt 7:7, 9:5 och 9:6, till vilka hänvisas för detaljer. Här skall vi blott se närmare på några tendenser som uppmärksammades vid proven. För detta ändamål skall vi göra en klassindelning av stoftbildningstendensen med klasser enligt tabell 8:2.

TAB. 8:2 Klassindelningen av stoftbildningen

Stoftbildning g/kg olja	Klass	Anm.
0,1 - 0,5	I	Godtas enl. SBN-68
0,5 - 1,0	II	Panncentra-
1,0 - 2,0	III	len
2,0 - 5	IV	
5 - 10	V	Ej godtaget för nya anläggningar
> 10	VI	

I tabell 8:3 visas resultatet av en sådan klassindelning för central P och i tabell 8:4 motsvarande för central S.

Vid indelning av oljorna i grupper enligt tabell 8:2 har stoftbildningen vid 11 % CO₂ (luftöverskott ca 40 %) och 60 - 70 % belastning av panna/brännaren varit bestämmande. Lasten har avsiktligt valts så att man med säkerhet kan säga att flammen ej träffar alla väggar, samtidigt som luftinblandningen ej försämrats på grund av det minskade luftflödet genom brännaren.

TAB. 8:3 Klassindelning av oljorna provade vid central P

Olja	Klassindelning vid oljeflöde	
	450 kg/h (70 % last)	200 kg/h (30 % last)
411	I	I
401	I	I
431	V	IV - V
451	II	I
471	IV	II

TAB. 8:4

Olja	Tryckolje- brännare	Pressluft- brännare	Rotations- brännare	Lab.
------	------------------------	------------------------	------------------------	------

392				
401	I			I
411	I	II	I	I
412				
431	III	V - VI	III	V
432		I	I	
452	I	II	I	
471		V	II	
491			III	

Som framgår av sammanställningen är det oljorna 431 och 471 som är speciellt svåra. Av övriga oljor uppvisar 392 (Eo 3), 401, 411, 432 och 452 goda egenskaper även om 432 och 452 är något sämre än de två andra. Oljorna 401 och 411 och 392 har så goda egenskaper att man redan vid förbränning med annars relativt otjänlig utrustning kan klara de av myndigheterna uppställda kraven.

Det kan i sammanhanget vara intressant att konstatera att olja 431 och 471 enligt uppgift svarade för ca 15 - 25 % av försäljningen inom Stockholmsområdet under den tid undersökningen pågick.

8.3 NYA OLJEKVALITETER

De här redovisade resultaten har delgivits resp. oljebolag, varvid man i några fall vidtagit åtgärder för att förbättra oljornas stoftbildningsegenskaper.

Som exempel härpå kan nämnas en ändring av olja 431. I bild 8:3 anges mätvärden för denna olja i en pressluftbrännare och vid drift med en värmepanna med märkeffekten 3500 Mcal/h. Brännarens kapacitet vid provet var 250 l/h. Som framgår av bilden har förändringen resulterat i en synnerligen kraftig minskning i oljans stoftbildande egenskaper.

8.4 MÖJLIGHETEN ATT PÅVERKA STOFTBILDNINGEN.

I avsnitt 1 berördes stoftbildningens beroende av oljans sammansättning, varvid aromathaltens inverkan visades. Förutom aroma-

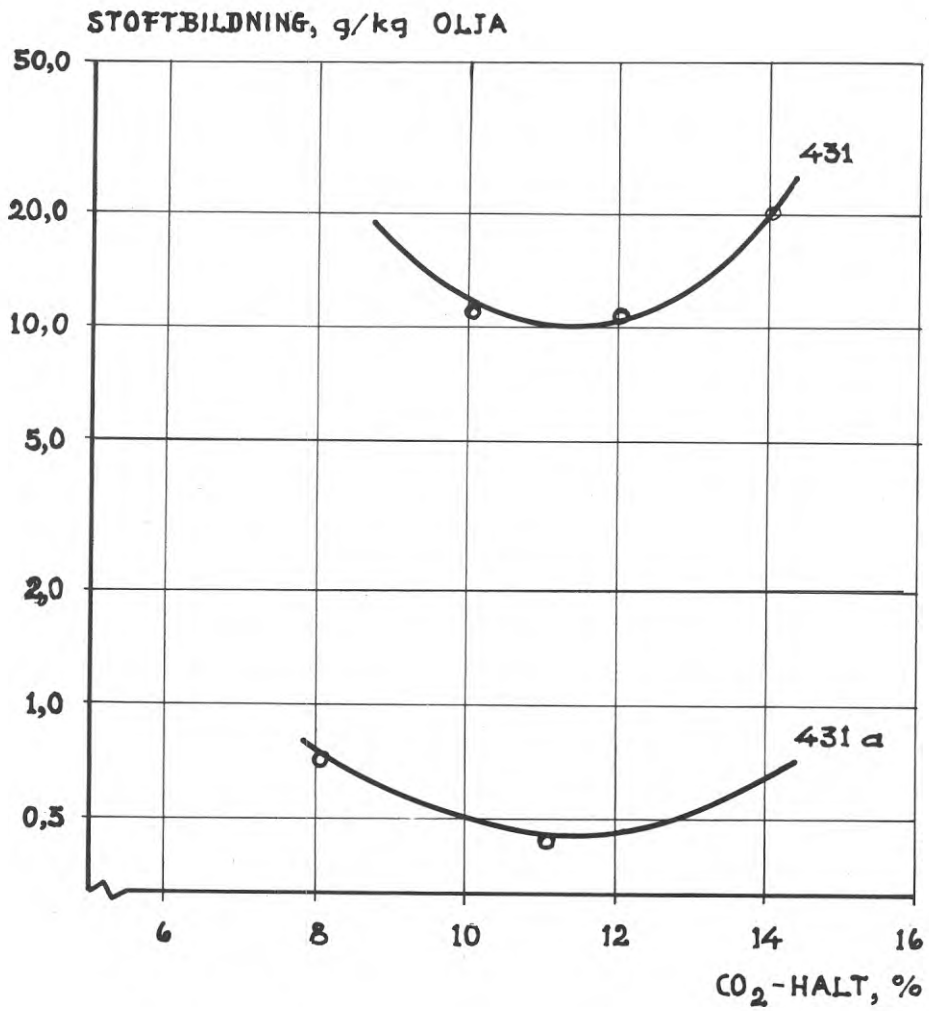


BILD 8:3 Stoffbildning som funktion av CO₂ före och efter ändring i tillverkningsprocessen av olja 431.

ter, vars betydelse är blygsam spelar även asfaltener en roll. Asfaltenshaltens ogynnsamma inverkan är som framgår av bild 8:4¹⁾ dock väsentligt högre och vi kan konstatera att vid en asfaltenshalt av A_s mass-% blir stofthalten S :

$$S \text{ g/kg olja} < A_s \% \quad (8:1)$$

Man kan lägga märke till att man vid högre asfaltenshalt får en betydligt lägre stoftbildning än vad en ren proportionering pekar på.

Det bör tilläggas att olja 431 ej ansluter sig till värdena i diagram 8:4 utan uppvisar en mycket hög stoftbildning trots en låg asfaltenshalt. Möjliga orsaker härtill har berörts i avsnitt 8:1.

8.5 ANVÄNDNINGSSOMRÅDE

Det bör framhållas att oljor med väsentligt olika stoftbildnings-egenskaper kan och bör användas i olika anläggningstyper. LS-oljor med hög stoftbildning bör exempelvis användas vid större anläggningar med goda förstoftare (se avsnitt 2), god anpassning mellan panna och brännare (avsnitt 9) och med stoftavskiljare, LS-oljor med låg stoftbildning i medelstora - ofta ej bemannade - centraler, där man med hänsyn till bristande skötsel har i många fall en enklare utrustning.

1) I bild 8:3 har medtagits såväl LS-oljor som NS-oljor.

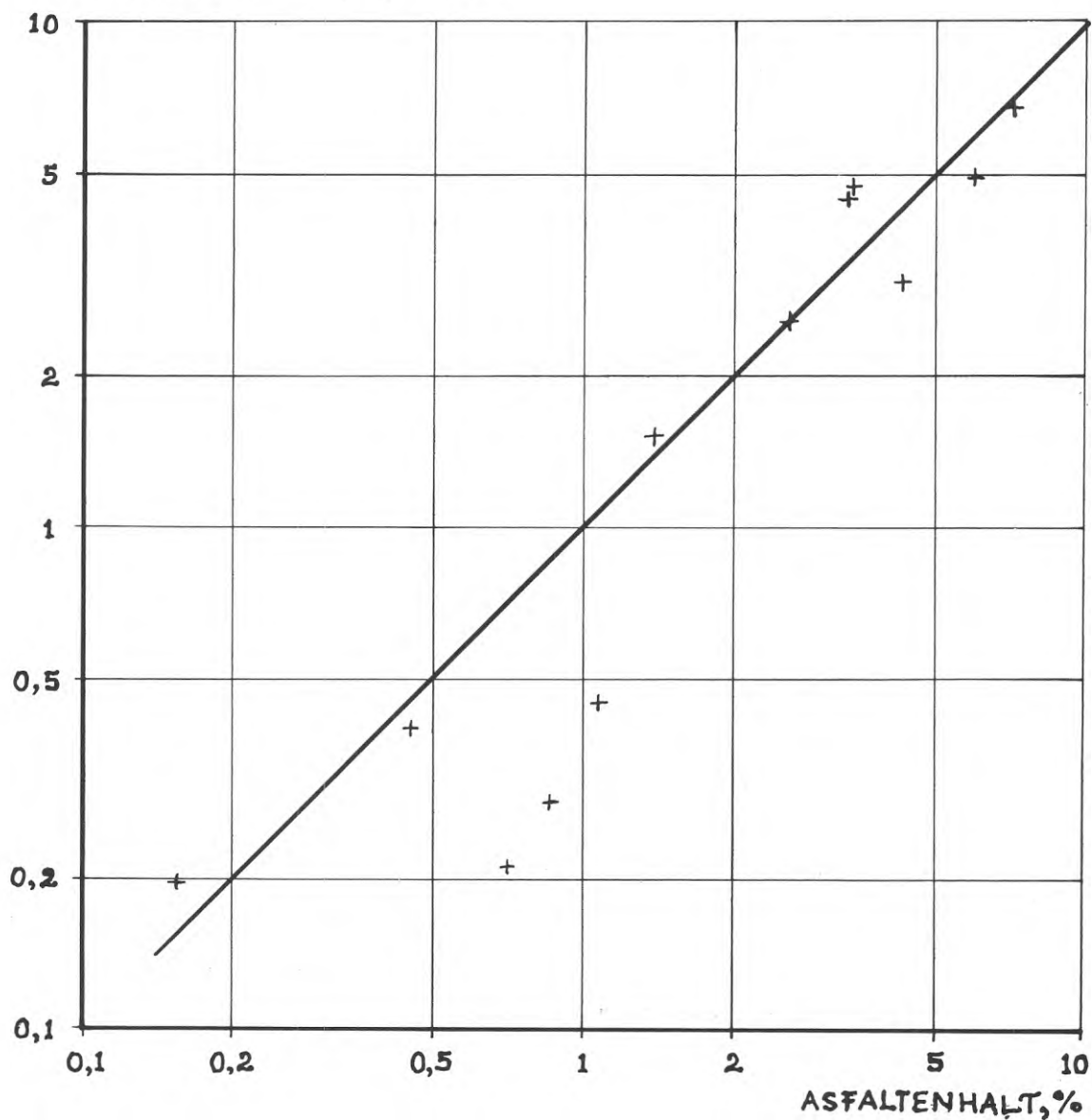


BILD 8:4 Sambandet mellan stoffbildningen, S g/kg olja, och oljans halt av asfaltener, A_s %.

9. STOFTBILDNING¹⁾ SOM FUNKTION AV DROPPSTORLEK, FÖRBRÄNNINGSRUM- METS STORLEK OCH LUFTÖVERSKOTT.

Det kan vara av intresse att se närmare på de faktorer som påverkar sotbildningen och då ej enbart ta i betraktande de *kemiska*-, *fysikaliska*-, *värme*- och *strömningstekniska* storheter som spelar roll utan även se på de teknologiska faktorerna t.ex. flamrumdimension och luftöverskott. Vi skall således ej enbart se till droppens uppehållstid i flamrummet, som var en av de viktiga parametrar som nämndes i avsnitt 2, utan också på sådana faktorer som *droppstorlek*, *luftöverskott* (vilket påverkar genomströmningshastigheten i flamrummet) och *flamrummets storlek* (som likaså är avgörande för uppehållstiden). Givetvis kan inverkan av de senast nämnda faktorerna hänföras till de strömningstekniska förhållandena men uttryckt på detta sätt saknar de vanligtvis relevans för den praktiskt arbetande oljeteknikern. Uttryckt i termer som *flamrumdimensioner*, *flamlängd*, *flamvolym* och *CO₂-halt vid förbränningen* får de en mer praktisk karaktär vilket medför att de i högre grad förstås och bättre kan utnyttjas.

9.1 INVERKAN AV OLJETRYCK VID TRYCKOLJEBRÄNNARE.

Vid tryckoljebrännare kan stoftbildning påverkas på flera sätt. Dels kan de i brännaren använda diffusorplattorna, se bild 9:1, varieras i form och storlek varigenom strömningen i förbränningsrummet varieras, dels kan oljetrycket före brännarmunstycket varieras, varigenom finfördelningen av oljan påverkas.

En ändring av oljetrycket ger flera effekter:

- o droppdiametern ändras med tredje roten ur tryckfallet:

$$\bar{d}_{area} = \text{konst} / \sqrt[3]{\Delta p} \quad (9:1)$$

- o flödet ändrar sig med kvadratroten ur tryckfallet över munstycket:

$$\dot{q} = \text{konst} \sqrt{\Delta p} \quad (9:2)$$

- o dropparnas hastighet ändrar sig med kvadratroten ur tryckfallet:

$$v = \text{konst} \sqrt{\Delta p} \quad (9:3)$$

1) Här och i fortsättningen avses nettobildning, se förord.

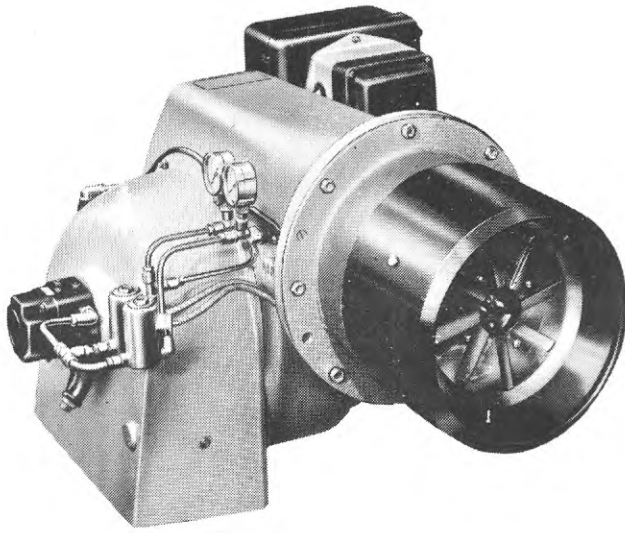


BILD 9:1 S k diffusorplatta vid tryckoljebrännare.

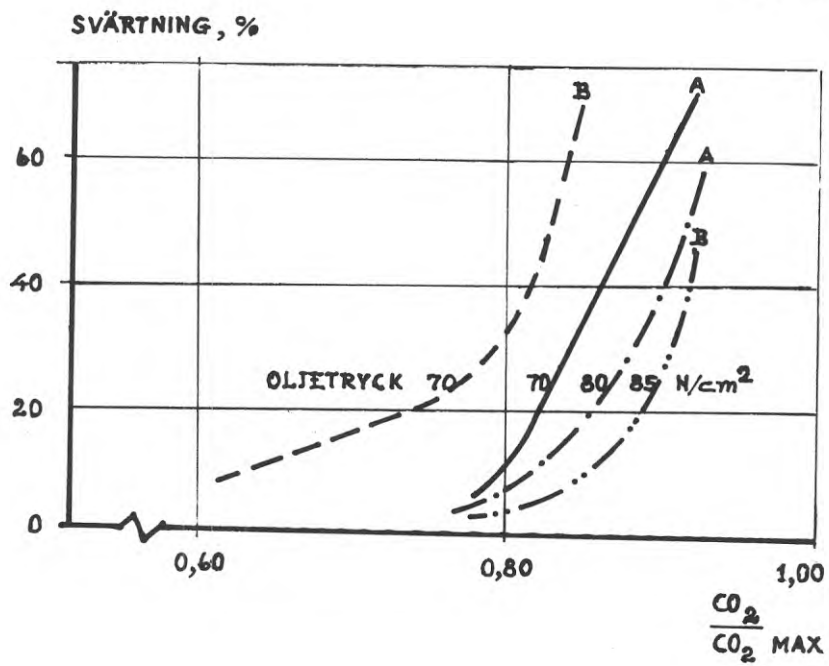


BILD 9:2 Oljetryckets inverkan på stoftbildningen vid tryckoljebrännare. Efter Locklin (1951).

Vid ett och samma munstycke leder således en tryckökning till en minskning av droppstorleken, en ökning av oljeflödet och en ökning av dropparnas hastighet.

De två sistnämnda faktorerna kan ge upphov till en ökning av stoftbildningen medan den förstnämnda faktorn ger en minskad stoftbildning. Vilken av effekterna som överväger beror på utformningen av förbränningsrummet t.ex. dess längd. Är flamrummet så långt att någon risk för att flamman skall träffa en kylvägg ej föreligger, kan den förbättrade atomiseringen ge upphov till en minskning i stoftmängden, se bild 9:2. I bilden visas resultat - (optisk mätning) - för förbränning av destillatolja vid olika förstoftningstryck (jämför bild 1:8). Minskningen som erhålls är här antagligen en följd av den minskade förbränningstid som erhålls vid mindre droppar. Förbränningstiden, t , som varierar med droppdiametern i kvadrat

$$t = \text{konst } d^2 \quad (9:4)$$

kommer i detta fall att ändras med oljetrycket enligt

$$t = \text{konst}/^3\sqrt{\Delta p^2} \quad (9:5)$$

Är medeldroppstorleken vid trycket 70 N/cm^2 ca $60 \mu\text{m}$ (vilket är en realistisk droppstorlek vid det använda munstycksslaget och oljetrycket, se exempelvis Tate m.fl. (1962)) erhålls överslagsmässigt de förändringar som anges i tabell 9:1.

TAB. 9:1 Uppskattade ändringar i droppstorlek och förbränningstider vid försök enligt Locklin (1951).

Oljetryck N/cm^2	Medeldropp- diameter μm	Maximal droppdia- meter μm	Förbränningstid	
			medel- värde ms	maximal- värde ms
70	60	120	0,036	0,15
85	55	115	0,033	0,14
90	55	110	0,031	0,13

Som framgår av resultaten, se bild 9:2, erhålls en förbättring av stoftbildningen först vid höga CO_2 -halter, d.v.s. vid relativt låga gashastigheter i flamrummet.

Enligt Locklins rapport var flamlängden vid dessa luftöverskott

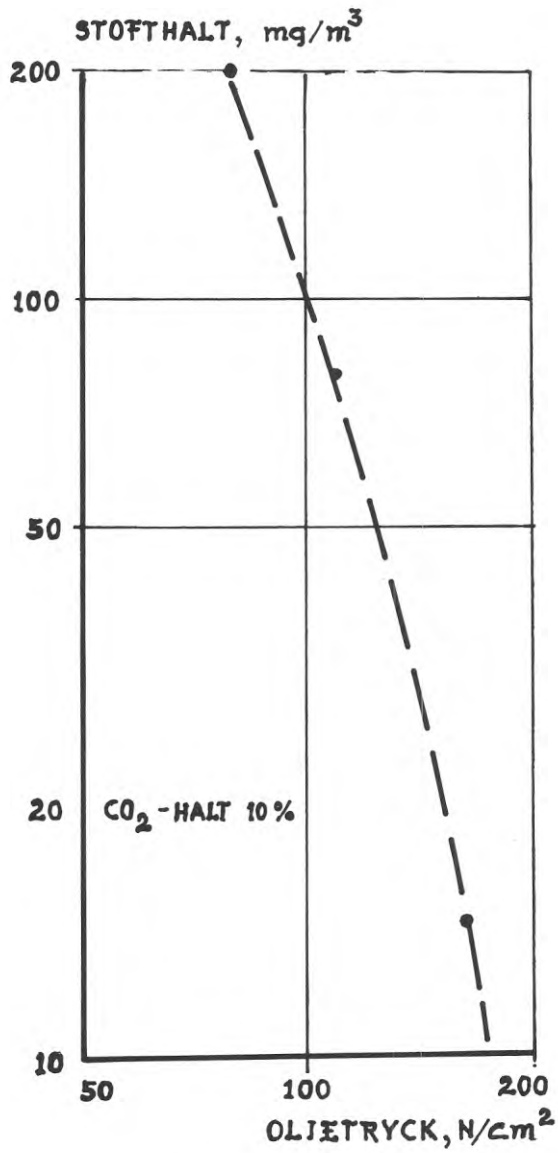


BILD 9:3 Mätdata för destillatolja i tryckoljebrännare. Efter Faut m fl(1967).

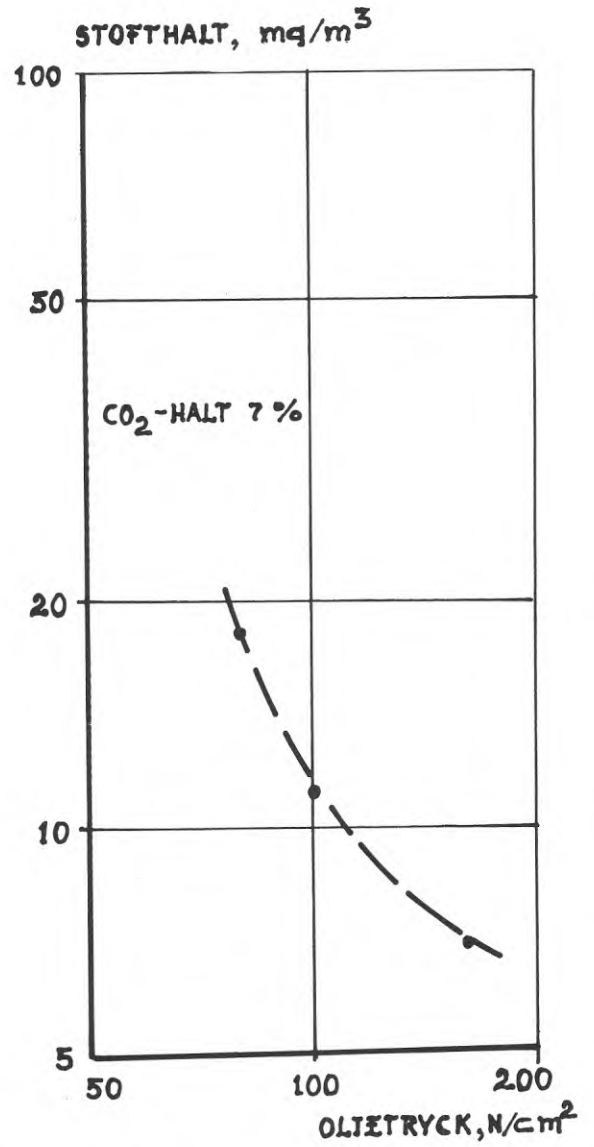


BILD 9:4 Som bild 9:3.

mycket stor och approximativt lika med flammkammarens längd. Man kan därvid redan av en relativt liten minskning i förbränningstiderna få en reducerad stoftbildning. Locklin anmärker också att flamlängden vid de högre trycken ej ökade trots att oljeflödet ökade med 8 resp. 13 %.

Det ökade oljeflödet kräver (vid konstant luftöverskott) motsvarande ökning av luftflödet, se tabell 9:2.

TAB. 9:2

Oljetryck N/cm ²	Relativt luftflöde % (100 % vid 70 N/cm ²)
70	100
85	108
90	113

Den kortare förbränningstiden för de enskilda dropparna kommer således att motverkas av den något högre genomströmningshastigheten genom flamrummet. Någon större förbättring kan således ej förväntas genom ökning av oljetrycket vid bibehållen munstycksstorlek, vilket är helt i överensstämmelse med Locklins resultat. I bild 9:3 visas resultat från försök med stoftbildning vid två tryckoljebrännare, där tre olika oljetryck (80, 110 resp. 160 N/cm²) använts. Vid små och medelstora luftöverskott erhålls här en minskning av stoftbildningen med ökande oljetryck. Ökas luftöverskottet, d.v.s. om dropparnas uppehållstid i förbränningsrummet minskas, visar resultaten, se bild 9:4, på en "nära nog lika" stofthalt vid en CO₂-halt av ca 7 %, och vid ett högre luftöverskott erhålls vid det lägre oljetrycket mindre stofthalt än vid de högre. Man ser här tydligt hur de ovan angivna faktorerna motverkar varandra.

För tryckoljebrännare och vid drift med tjocka oljor föreligger litteraturangivelser från Stein m.fl. (1961). Bild 9:5, som är hämtad från dennes undersökningar visar på en kraftig inverkan av oljetrycket.

Egna försök har utförts vid central P med olja 210. Vid försöken (med E03) har munstycksstorleken hållits konstant varför ett ökande oljetryck ger en större kapacitet (30 resp. 40 kg olja/timme). Denna ökning i kapacitet måste vid konstant luftöverskott medföra en förkortad uppehållstid för oljedropparna i flamrummet, vilket medför en ökning av mängden oförbränt och cenos-

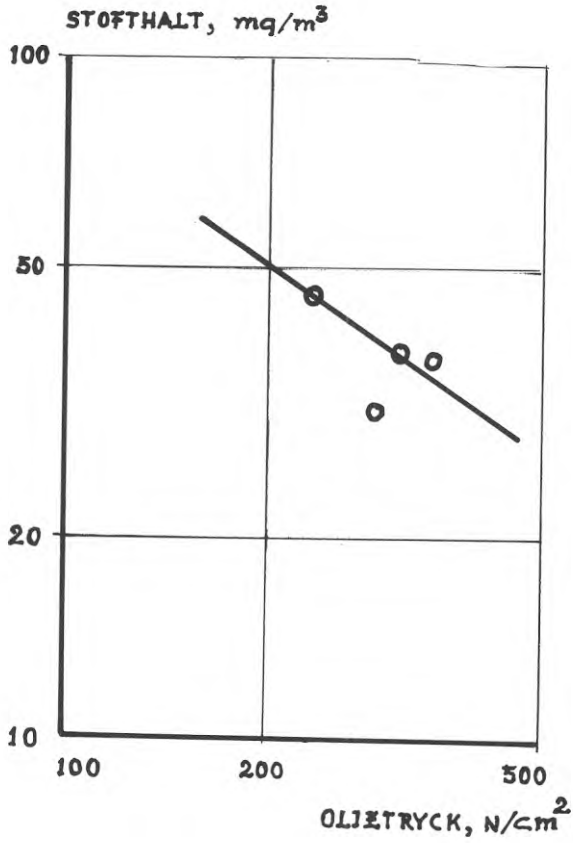


BILD 9:5 Stoffbildning, enl Stein, som funktion av oljetrycket vid en tryckoljebrännare.

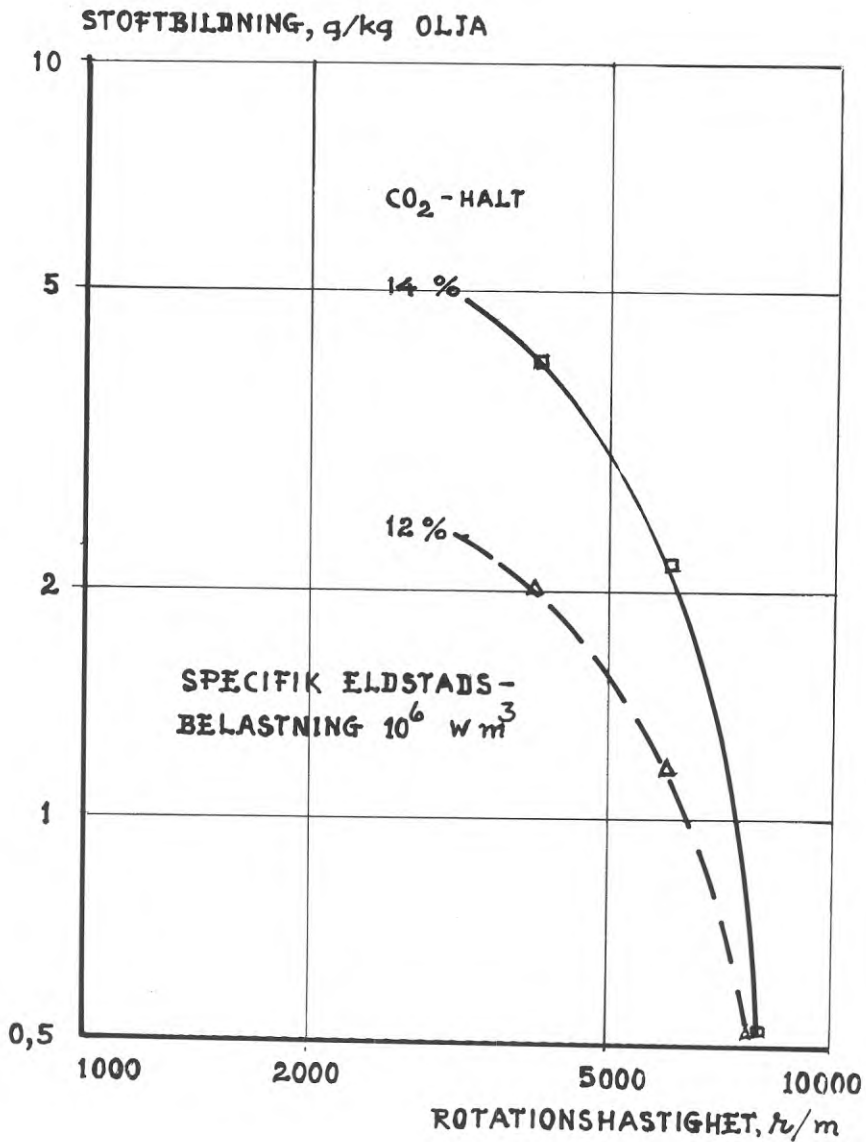


BILD 9:6 Stoffbildning som funktion av rotations-hastighet för en rotationsbrännare.

färer. Om i stället oljemängden hölls konstant och oljetryck och munstycksstorlek varierades, blev resultatet oberoende av oljetrycket.

Sammanfattningsvis kan sägas att en förändring av oljetrycket ger vissa möjligheter att minska stoftbildningen, men att man med hänsyn till förbränningskammarens längd m.m. nog i de flesta fall får en relativt obetydlig effekt med hjälp av denna åtgärd.

Uppgifterna i litteraturen är ytterst knopphändiga. Stein anger således ej om värdena i bild 9:5 gäller för konstant oljeflöde eller för ett och samma munstycke. Det senare är dock troligast.

9.2 ATOMISERINGSLUFTENS TRYCK VID PRESSLUFTBRÄNNARE.

Vid pressluftbrännare kan droppstorleken varieras inom relativt vida gränser genom variation av atomiseringsluftens tryck. Någon speciell studie av variationerna i stoftbildningen på grund av ändrat atomiseringstryck har ej varit aktuell ¹⁾ men inverkan är troligen att jämföra med den som erhålls genom andra faktorer som påverkar droppbildningen och medelstorleken hos oljedropparna.

9.3 INVERKAN AV ROTATIONSHASTIGHETEN FÖR ROTATIONSBRÄNNARE.

Droppstorleken vid rotationsbrännare bestämmes - se avsnitt 2 - i hög grad av rotationshastigheten. Sambandet mellan denna faktor och stoftutsläppet har undersökts av bl.a. Gills (1968) som anger de i bild 9:6 angivna värdena. Som framgår av bilden blir stoftbildningen vid låga rotationshastigheter (stora droppdiametrar) mycket hög, men sjunker och är acceptabelt låg vid ca 7000 - 8000 r/min. även vid höga flamrumsbelastningar. Det bör här anmärkas att Gills ej uppger någon specifikation av den använda oljan varför en jämförelse med de vid central S funna resultaten ej kan göras.

9.4. INVERKAN AV OLJANS VISKOSITET.

Flera faktorer inverkar givetvis vid droppbildningen, men effekten av dem är oftast underordnad de ovan beskrivna. Vi skall emellertid se närmare på hur oljans viskositet kan påverka atomiseringen och därmed stoftbildningen.

1) Målsättningen för undersökningen är närmast att studera olika oljors relativa stoftbildning.

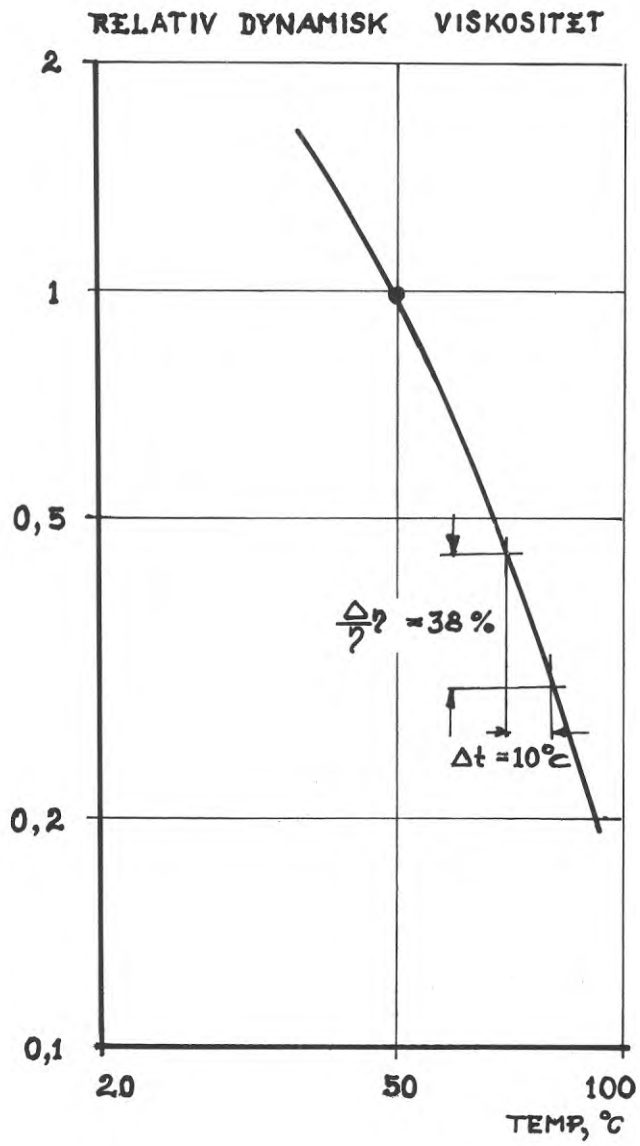


BILD 9:7

Relativ viskositet för EO, som funktion av oljans temperatur. Viskositeten vid 50°C har satts till 1.

I avsnitt 2 visades att inverkan av oljans dynamiska viskositet, ν , på de uppträdande droppstorlekarna kunde beskrivas av ¹⁾

$$d = \text{konst} \cdot \eta^{0,2} \quad (9:6)$$

Den dynamiska viskositeten har således en relativt obetydlig inverkan, men som framgår av bild 9:7 leder en relativt liten temperaturökning till en ganska stor viskositetssänkning och därmed till en om inte kraftig så ej heller betydelselös minskning av droppdiametern. En ändring av temperaturen med 10°C från exempelvis 70° till 80°C medför således en ändring av viskositeten med ca 4 cSt eller 20 % för en eldningsolja 3. Detta innebär - med motsvarande ändring för den dynamiska viskositeten - en minskning av droppdiametern från ett tryckoljemunstycke med ca 2 % och en minskning av medelbrinntiden med 4 %. För värme pannor med hög volymbelastning där risk finns för att flammans kan träffa kyllda ytor kan detta ha betydelse. I bild 9:8 visas resultat från försök med en eldningsolja 4 i experimentpannan och vid olika förvärmningstemperaturer. Förbränningsrummets volymbelastning var här måttlig och flamlängden underskred eldstadsrummets längd. Förbättring finns här, men är ej särskilt stor.

En sammanställning över egna försök och litteraturvärden ges i bild 9:9. Vid temperaturer över 90°C föreligger likhet i det uppmätta inflytandet. För lägre temperaturer har man med den använda provoljan (och vid experimentpannan) fått en avsevärd kraftigare förbättring. Orsaken härtill är att finna i oljans sammansättning. Den använda oljan - 431 - har hög paraffinhalt och man kan misstänka att alla paraffinkristaller som funnits i oljan först smält vid uppvärmning till temperaturer över 90°C . Vid lägre temperaturer kommer då vissa oljedroppar att förbrännas mer eller mindre som fasta partiklar, varvid ofullständigt förbrända partiklar med hög stofthalt bildas. En närmare granskning tyder på att viskositetens inflytande är olika för olika brännare se bild 9:10 och att därvid pressluftbrännaren har den

1) Övriga brännartyper har approximativt samma beroende, se avsnitt 2.

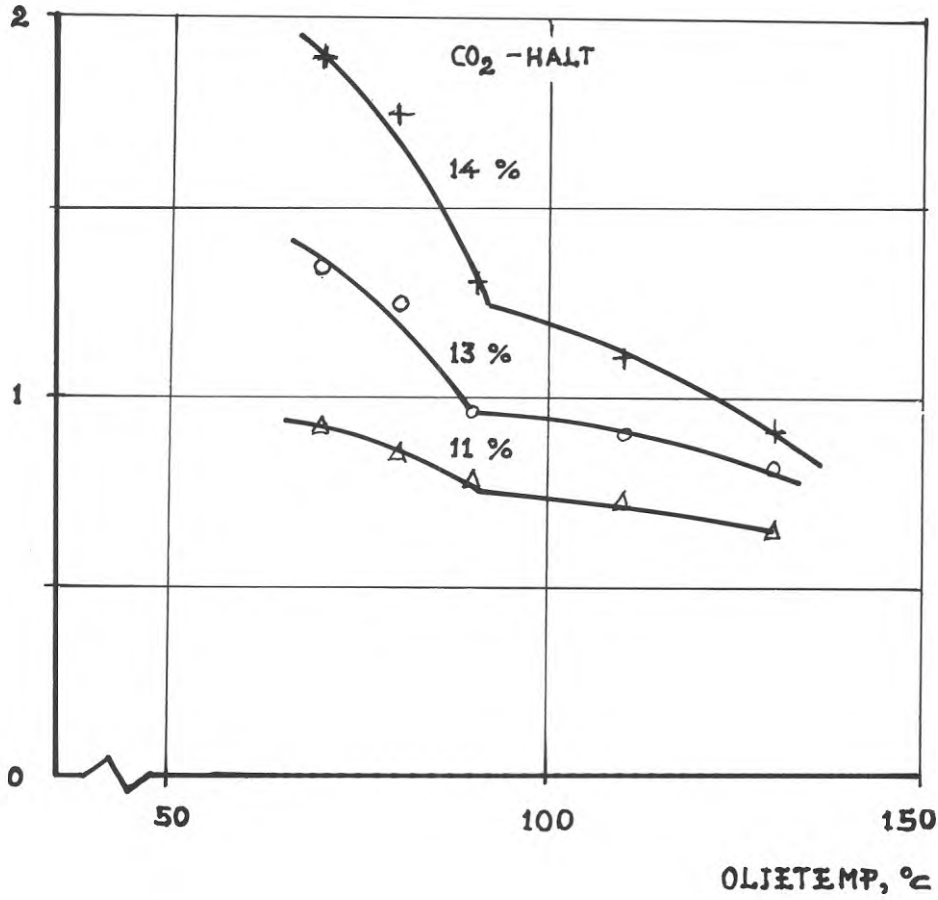


BILD 9:8
Stoffbildningens variation med oljetemperaturen. Försök på experimentpannan.

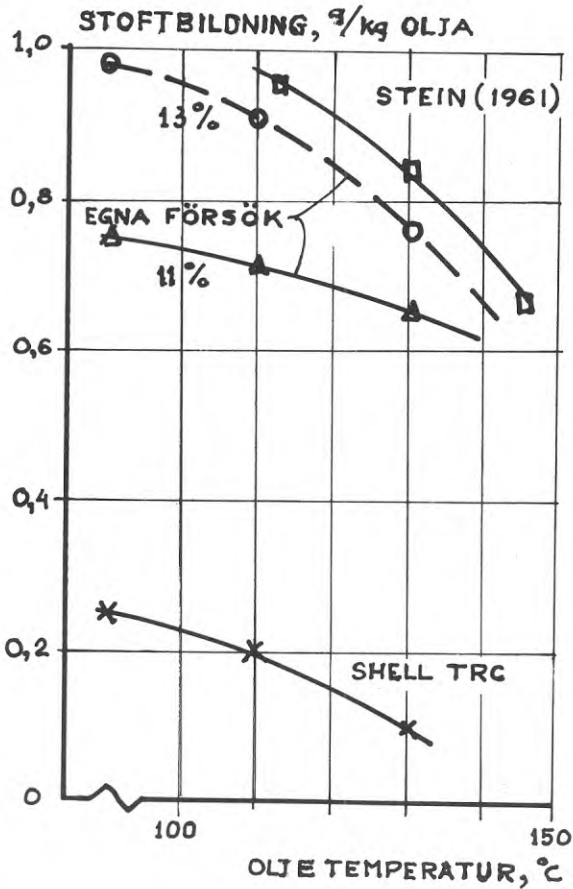


BILD 9:9 Stoffbildning som funktion av oljetemperaturen.

minsta känsligheten.¹⁾ För rotationsbrännare finns en undre gräns för viskositeten under vilken brännaren ej får drivas, nämligen ca 20 cSt. Under denna gräns finns risk för att oljefilmen i rotationskoppen släpper, och oljan således ej finförderas alls.

9.5 FÖRBRÄNNINGSKAMMARENS LÄNGD.

Redan i föregående avsnitt har betydelsen av en tillräckligt lång uppehållstid för oljedropparna i förbränningskammaren flera gånger nämnts. Upphållstiden bestäms av flera faktorer: luftflödet genom förbränningsrummet, medeltemperaturen i förbränningsrummet, utbredningen av luftstrålen, förbränningsrummets dimensioner m.fl. En analys av de ovan angivna faktorerna skulle ställa sig relativt omständlig och ej vara relevant med hänsyn till de utförda försökens syfte. Vi skall i stället använda oss av en kraftigt förenklad modell - s.k. "plug flow", se bild 9:11

Vid denna modell, antas förbränningsgaserna passera flamrummet genom en parallellströmning - recirkulation saknas således och gasen fyller hela tiden ut det konstanta rumstvärsnittet. Modellen har fördelen att vara enkel och ge kvalitativt rimliga resultat.

Gasflödet vid förbränning med en CO_2 -halt av (CO_2) volymprocent kan approximativt bestämmas som

$$\dot{Q} = 0,05 \dot{q} / (\text{CO}_2) \quad (9:7)$$

där \dot{q} är oljeflödet i kg/h

\dot{Q} är gasflödet i m^3/s (räknat vid 0°C)

Medelgashastigheten beräknas därav till

$$v = \frac{T \cdot \dot{Q}}{273A} \quad \text{m/s} \quad (9:8)$$

där T är medeltemperaturen ($^\circ\text{K}$) i flamman och

A är förbränningskammarens tvärsnittsarea (m^2)

Antar vi att dropparna ha samma hastighet som förbränningsgaserna (se appendix 1) kommer den sökta uppehållstiden, t , att bli

$$t = L/v \quad (9:9)$$

1) Man bör observera att de i bild 9:11 angivna egna försöken har framkommit vid drift med en pressluftbrännare.

STOFFBILDNING, g/kg OLJA

BILD 9:10 Stoffbildningen som funktion av oljans viskositet för olika brännare. Data efter Reed (1961)

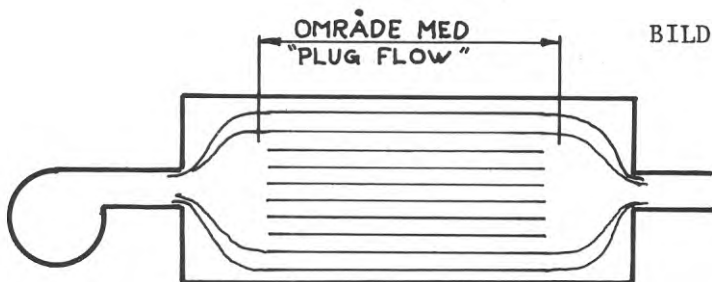
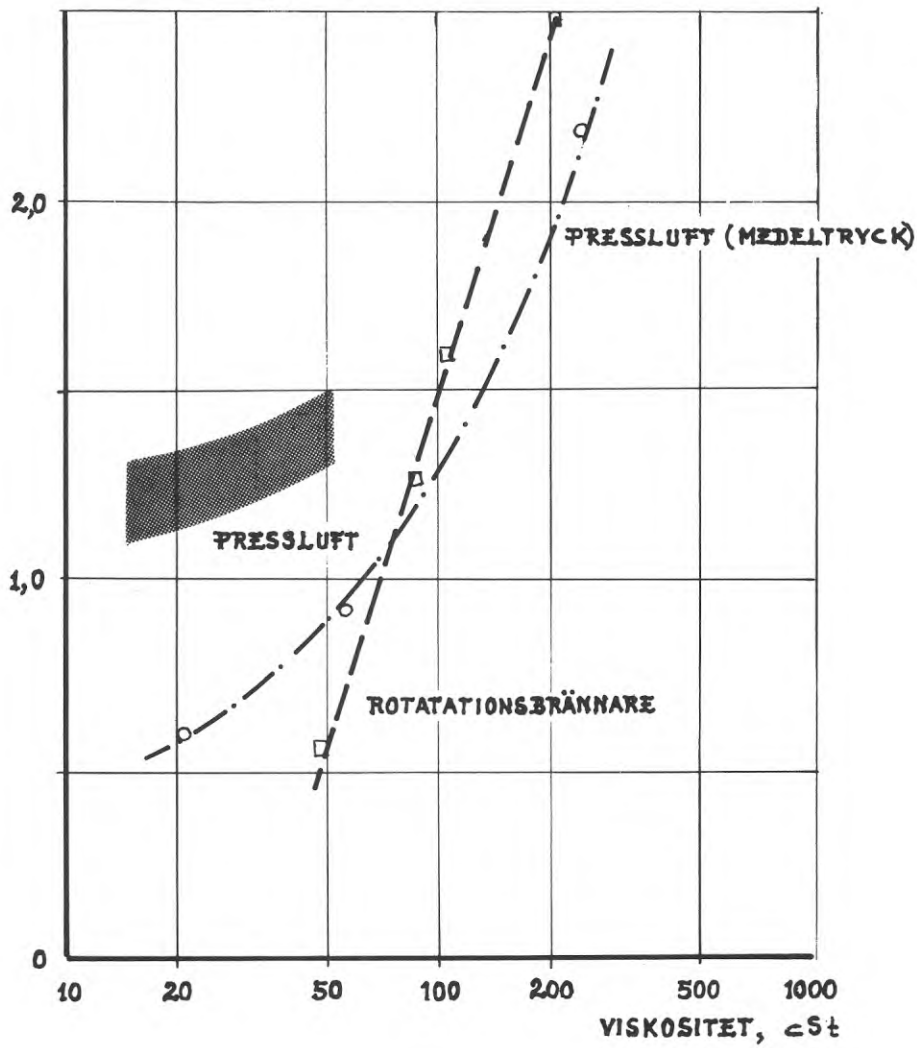


BILD 9:11 "Plug-flow"-modell av värmepanna.

där L är förbränningsrummets längd (m).

Tiden kan även skrivas

$$t = \frac{5460 \cdot L \cdot A \cdot (CO_2)}{\dot{q}} \quad (9:10)$$

som med $T = 1800^\circ K$ och $V = L \cdot A =$ flammens volym (m^3) ger

$$t = 3 V(CO_2) \dot{q} \quad (9:11)$$

Det kan här vara intressant att konstantera att större oljedroppar ej kan slutförbrinna i för små flammor. Sätter vi flamdiametern till 0,2 L (vilket är ett relativt bra medelvärde) får vi

$$V = 0,03 L^3 \quad (9:12)$$

och därmed

$$t = 0,1 L^3 (CO_2) \dot{q} \quad (9:12)$$

Oljedropparnas (förbrännings-) brinntid har studerats av ett stort antal forskare, se bild 9:12. Man kan i approximativt sätta ¹⁾

$$t_{brinn} = \text{konst} \cdot d^2 \approx 1 \cdot d^2 \quad (9:13)$$

där d är droppdiametern i mm. Med hänsyn till att oljedroppar från moderna brännare har en maximaldiameter av ca 200 mikrometer (0,2 mm) blir den största erforderliga brinntiden 0,04 sekunder. Införs detta värde i ekvation (9:11) kan flamlängden bestämmas till

$$L = 0,75 \sqrt[3]{\frac{\dot{q}}{(CO_2)}} \quad (9:14)$$

se bild 9:13.

I bilden har även inlagts erfarenhetsvärden hämtade från tekniskt material utgivet av Svenska Nu-Way AB. Överensstämmelsen mellan de erfarenhetsmässigt erhållna och de beräknade värdena är god.

1) Den härigenom erhållna flamlängden motsvarar förbränning till cenosfär, men ej ytterligare slutförbränning, se M a s d i n (1960).

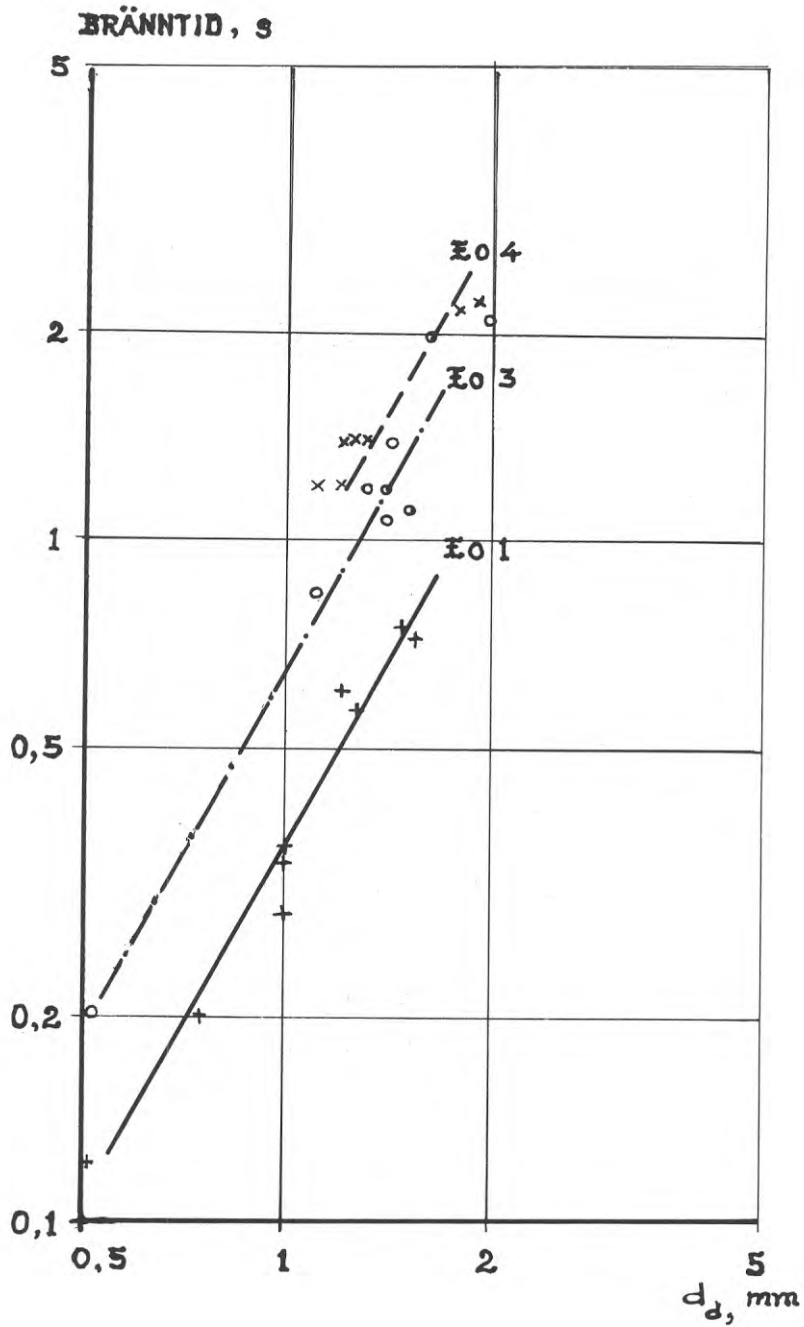


BILD 9:12 Förbränningstiden för oljedroppar beror på oljeslaget (som har en relativt blygsam inverkan) omgivande atmosfärs egenskaper, droppens rörelse och droppstorleken. Normalt erhålls för den senare faktorn, som är dominerande, ett kvadratisk beroende. Under vissa omständigheter, t ex för höga värden på Re kan dock exponenten i $T = kd_d^n$ avvika från värdet 2. I bilden visas resultat av försök (Peterson, 1967) där värdet $n = 1,5$ erhållits.

Största droppe, d_{max} , som kan förbrännas inom flamkamarlängden, L_f , erhålls från ekvation (9:12) och (9:13) som ger

$$d_{max} = \frac{0,1L^3(CO_2)}{\dot{q}} \quad (9:15)$$

För en viss brännare och med ett visst driftssätt erhålls en bestämd droppdiameter. Samma brännare, applicerad på pannor med olika långa förbränningskammare kan ge väsentligt varierande stoftbildning bl.a. som en följd av att dropparnas uppehållstid i flammen kommer att bli helt olika. I värsta fall kommer delar av flammen att träffa kylta pannväggar och en kraftig bildning av både flamsot och oförbrända oljedroppar blir följden. Vi skall i det följande se närmare på vilka verkningarna kan bli. I bild 9:14 visas resultat från central S, där prov utförts med en pressluftbrännare monterad på två olika pannor. Pannorna har samma konstruktion - lådpanna - och är i stort sett geometriskt likformiga.

Flamrummets längd i de båda pannorna skiljer sig dock med 20 % se tabell 9:3.

TAB. 9:3 Mått för panna 1 och 3 vid central S, se bild 9:16

Panna	Kapacitet Mcal/h	Flamrumsdimensioner mm		
		höjd	bredd	längd
1	2000	2300	1700	1800
3	3500	2480	2300	2500

Som framgår av försöksresultaten i bild 9:14 uppvisar den mindre pannan en väsentligt högre stoftbildning vid i övrigt lika förhållanden (CO_2 -halt och oljeflöde) än den större. Vid oljeflödet 200 l/h (ca 180 kg/h) är förhållandet mellan stoftbildningen vid 10 % CO_2 3,7. Som framgår av bilden ökar stoftbildningen för den mindre pannan kraftigt då oljeflödet stiger från 100 l/h till 200 l/h medan en ökning från 200 - ca 400 l/h för den största pannan ej ger samma kraftiga ökning i stoftbildningen.

Det kan vara intressant att se närmare på litteraturvärden för den här beskrivna effekten. I bild 9:15 och 9:16 visas resultat av en engelsk undersökning (Gills 1968) där stoftbildningen för

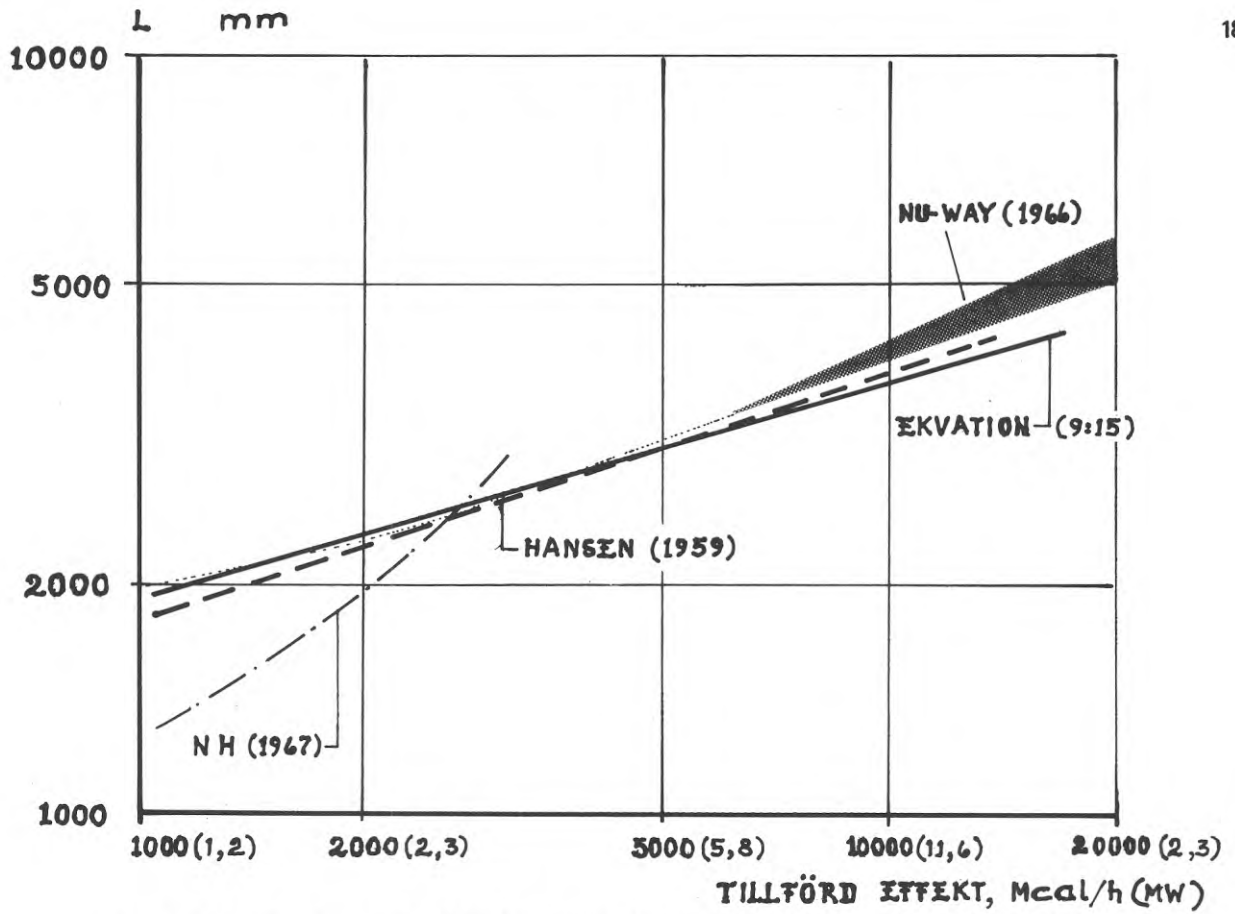


BILD 9:13 Sammanställning över beräknade och erfarenhetsmässigt erhållna kastlängder för oljeflammor.

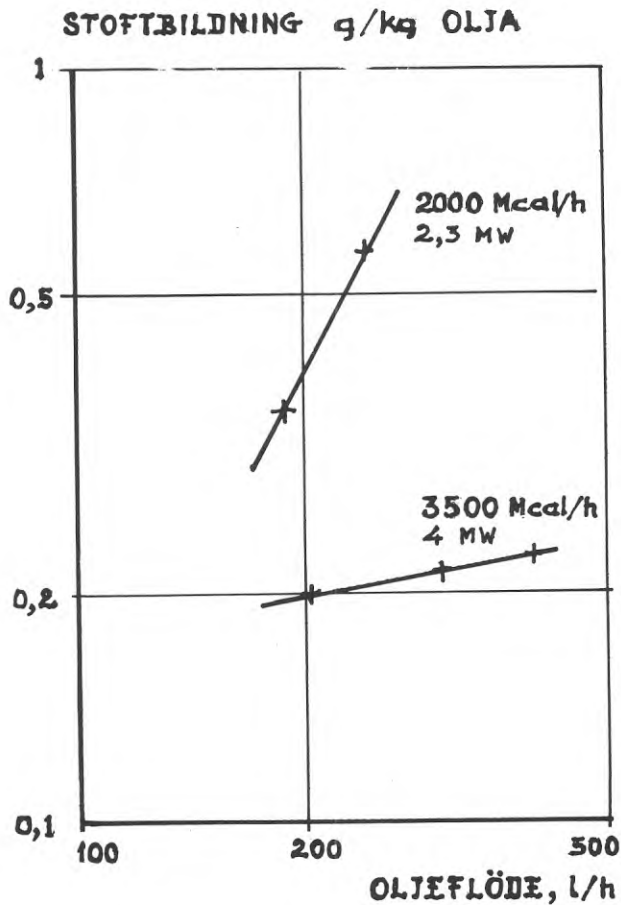


BILD 9:14 Stoffbildningen som funktion av oljefflöde vid eldning med pressluftbrännare och tillsammans med olika stora pannor.

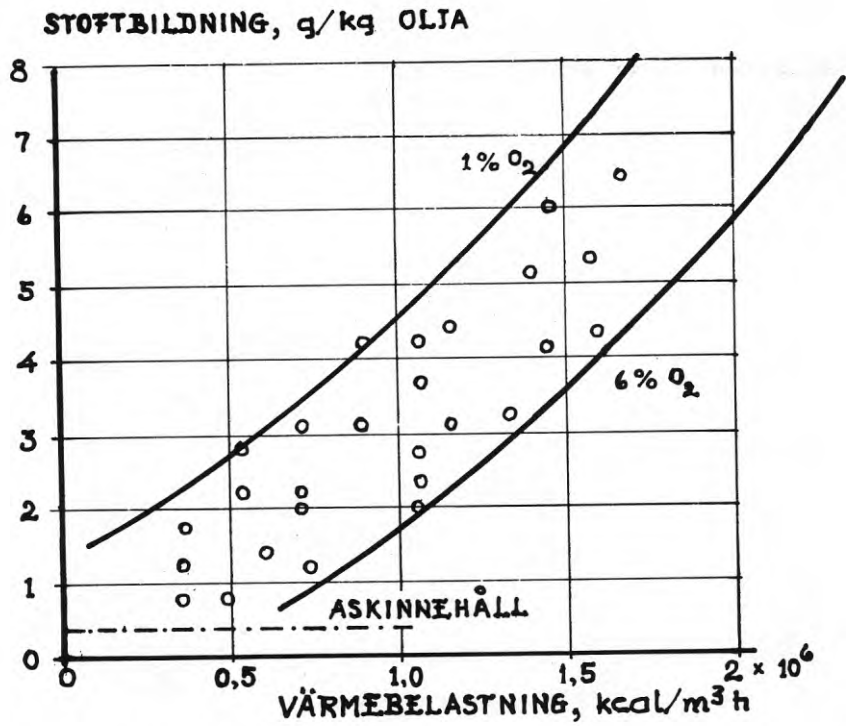


BILD 9:15 Stoffbildningen vid äldre rotationsbrännare

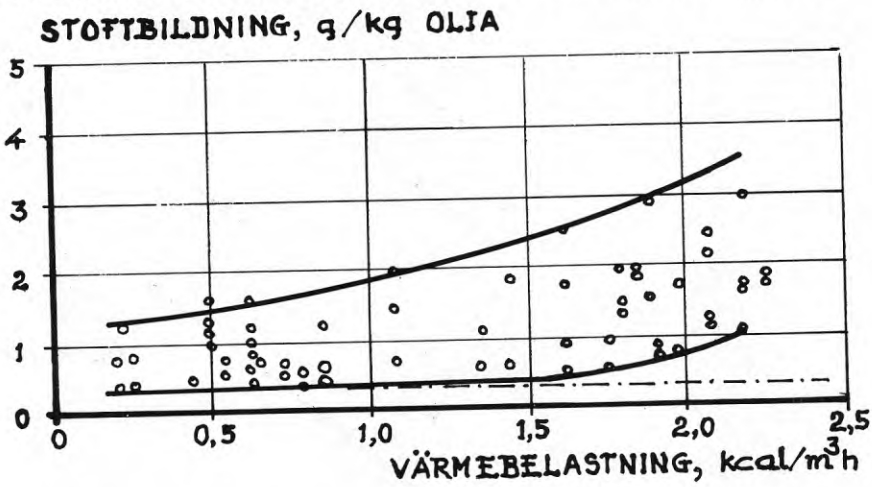


BILD 9:16 Stoffbildningen vid äldre pressluftbrännare.

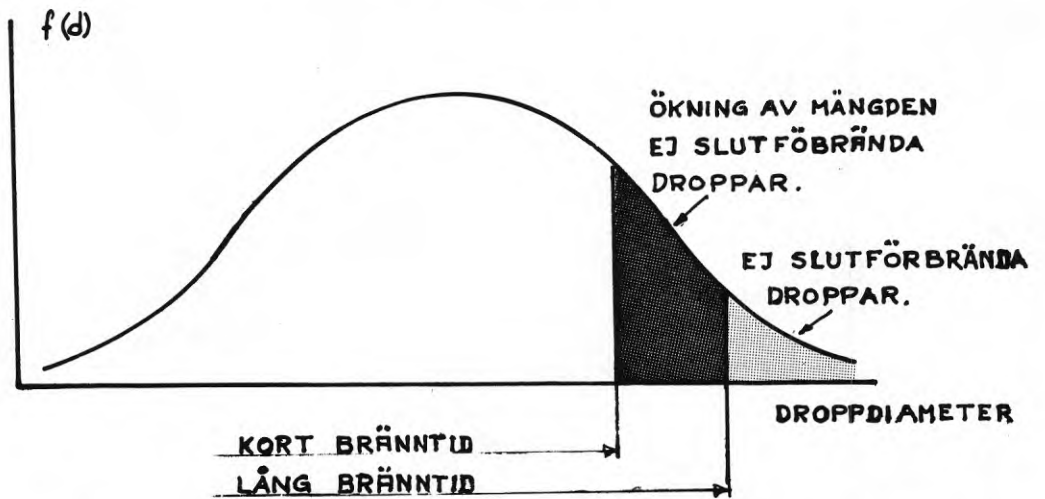


BILD 9:17 Vid minskning av uppehållstiden för oljedropparna, ökar antalet droppar som ej kan slutförbrännas.

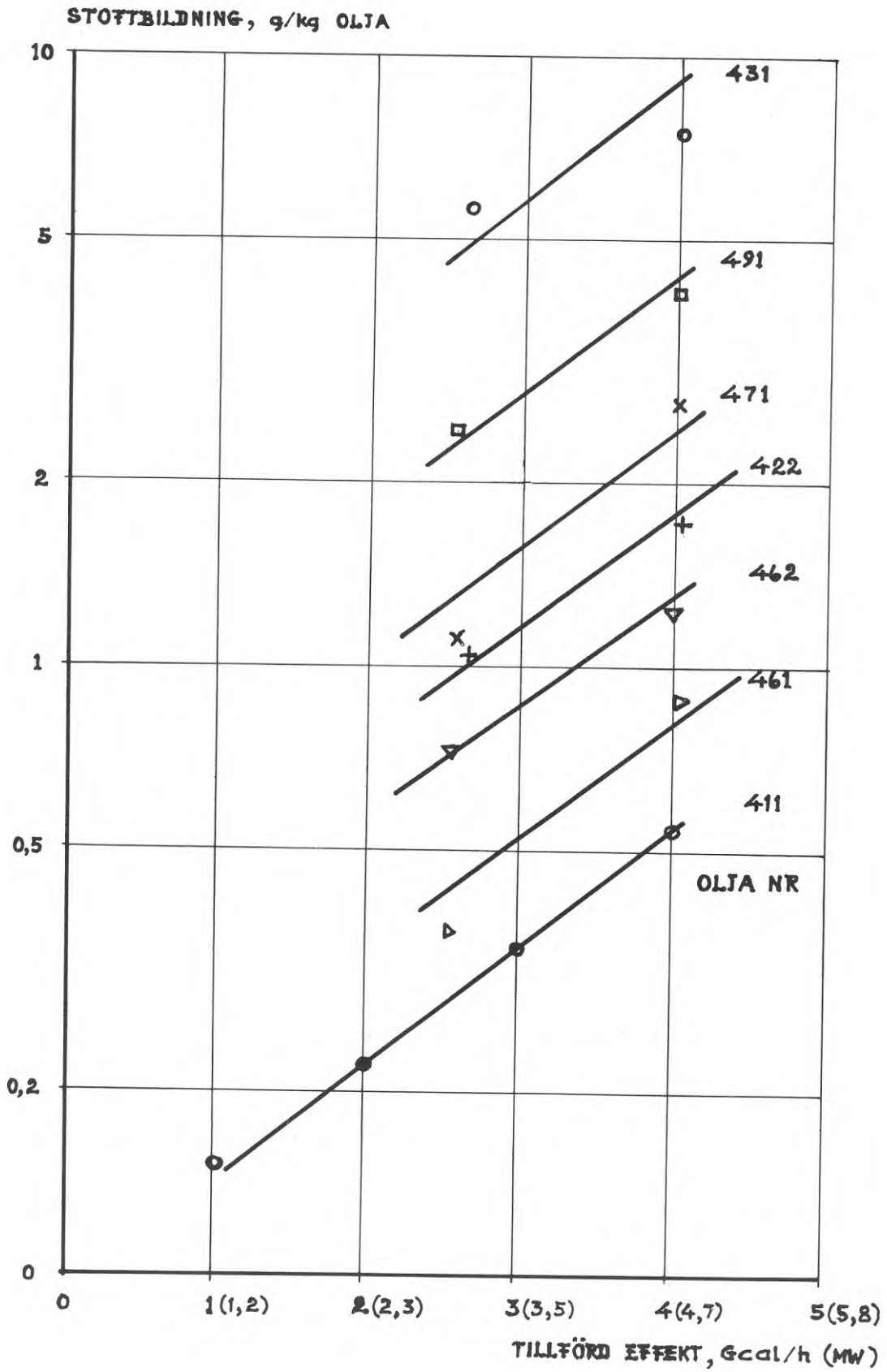


BILD 9:18 Stoffbildning för sju oljor som funktion av panneffekt. Anläggning S i drift med rotationsbrännare.

äldre rotations- och pressluftbrännare redovisats. **Försöksvär-**dena har här angivits som funktion av den specifika volymbelastningen $\text{kcal/m}^3\text{h}$, och som framgår av bilden erhålls en stegring av stoftbildningen med stigande volymbelastning. Volymbelastningen ($\text{kcal/m}^3\text{s}$) blir med tidigare använda beteckningar:

$$P = 2,8\dot{q}/V \quad (9:16)$$

Dropparnas uppehållstid i flammen är ej direkt tillämplig på moderna brännare som ej uppvisar samma stora skillnad mellan de båda brännartyperna.

Dropparnas uppehållstid i flammen blir därför

$$t = \frac{125}{P} \quad (9:17)$$

för $\text{CO}_2 = 15 \%$.

I bild 9:17 visas schematiskt hur en ökning av P ger en ökning av antalet droppar som ej kan slutförbrännas.

Av bilden framgår att antalet större droppar som ej hinner slutförbrännas stiger mycket snabbt med avtagande uppehållstid.

Det kan vara av intresse att se närmare på några mätningar där det ovan angivna förhållandet undersökts. Vid central S har sotbildningen från ett stort antal oljor uppmätts vid varierande belastning d.v.s. vid varierande uppehållstid, I bild 9:18 visas resultaten från försök med en **rotationsbrännare monterad** på en värmepanna med en märkeffekt av 3500 Mcal/h. Som framgår av bilden är stegringen i stoftbildning likartad för samtliga oljor och beskrivs empiriskt av¹⁾:

$$\ln S = \ln S_0 + \text{konst}(P - P_0) \quad (9:18)$$

där S är stoftbildningen vid effekten P och

S_0 stoftbildningen vid effekten P_0 .

Ekvation 9:18 kan även skrivas

$$S = S_0 \exp k(P - P_0) \quad (9:19)$$

1) Ett teoretiskt samband varav (9:18) utgör en approximation har senare framtagits, se Peterson, F. Stoftbildning vid oljeeldning. Diss. KTH, Stockholm 1972.

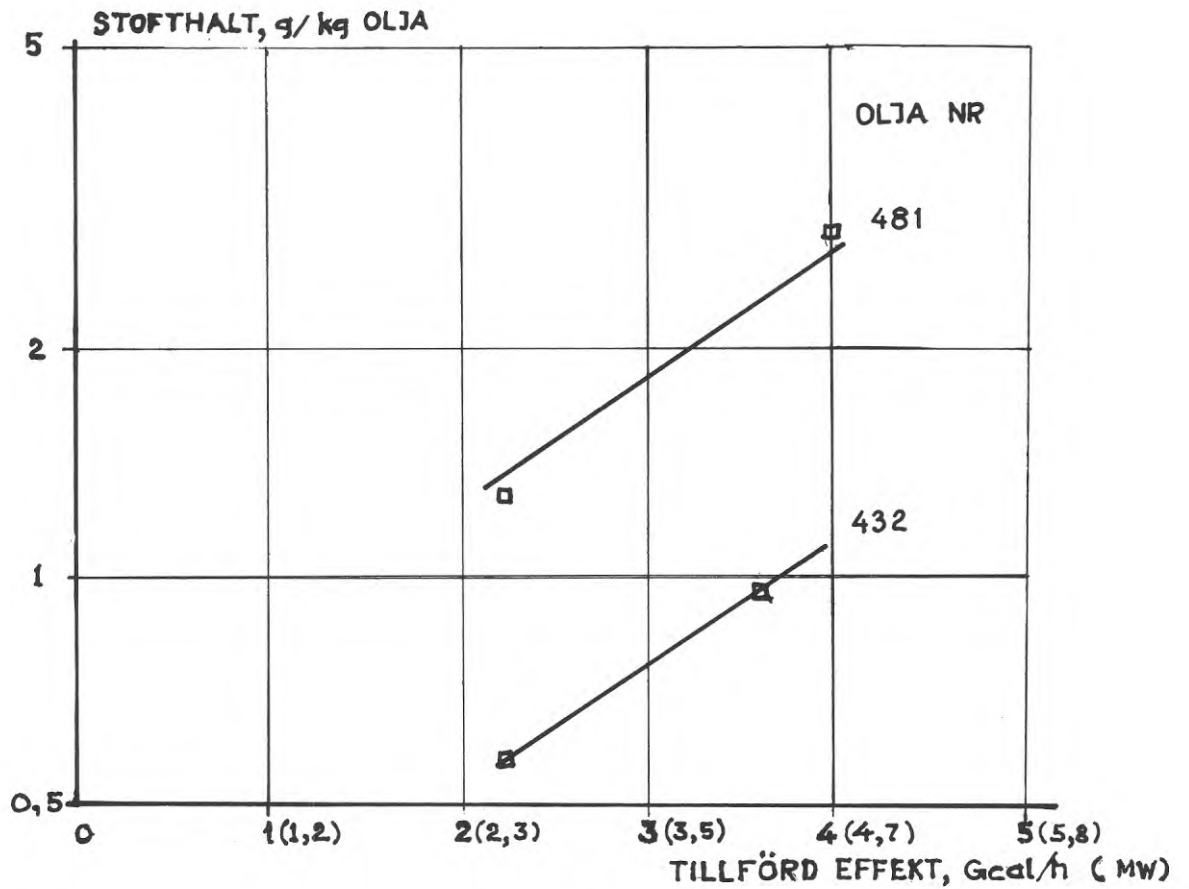


BILD 9:19 Stoftbildning för två oljor som funktion av panneffekt. Anläggning S i drift med pressluftbrännare.

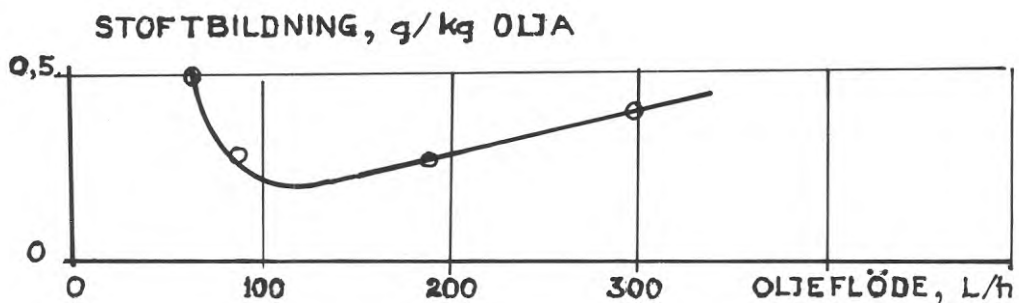


BILD 9:20 Stoftbildning som funktion av panneffekt. Dålig luftinblandning; flammen vid lågt luftflöde (= lågt oljeflöde).

Storheten S_0 bestäms av oljans stoftbildande egenskaper, brännar- och pannkonstruktion, medan storheten k är oberoende av oljans egenskaper.

För den provade pann/brännarkombinationen gäller

$$k = 0,55 \quad (9:20)$$

Man kan undra om de i bild 9:18 angivna resultaten gäller för andra pannor och brännartyper. I bild 9:19 visas en jämförelse mellan olika oljors stoftbildning vid två effekter. Resultaten härrör från central S och avser mätningar på en lådpanna med märkeffekten 3500 Mcal/h och vid drift med en pressluftbrännare. Som framgår av bilden blir stegringen vid en ökning av kapaciteten här lika kraftig som den som redovisades i bild 9:18. Man finner således även i detta fall

$$k = 0,55 \quad (9:21)$$

och således ej någon skillnad mellan de olika brännartyperna. Det bör här anmärkas att ekvation (9:17) ej kan tillämpas på alla brännar- och panntyper. Undantag uppstår givetvis då strömingsförhållandena i förbränningsrummet ändras radikalt vid en belastningsändring. Detta är exempelvis fallet för vissa typer av tryckoljebrännare och även andra brännare, där man har svårigheter att vid låga laster få önskvärd luftinblandning i flammen. I bild 9:20 visas hur stoftbildningen kan variera för en sådan brännartyp. Vid lägre last än 1 Gcal/h sker en försämring av luftinblandningen i flammen, vilket medför att stoftalstringen ökar våldsamt. Det kan exempelvis inträffa att flammen runt enskilda oljedroppar i flamcentrum blåses ut redan vid låga dropphastigheter om syrehalten blir för låg. Det är möjligt att korrigera för denna effekt i ekvation (9:18) men detta är utanför denna översiktliga studie av fenomenet.

9.6 LUFTFLÖDETS BETYDELSE

En faktor som spelar en avgörande roll för stoftbildningen är luftflödet till flammen. Vid för små luftflöden uppträder lokalt i flammans centrum låga syrehalter eller syreunderskott. Vid så-

dana förhållanden släpper flammen runt dropparna redan vid små skillnader mellan droppens och omgivande luftens hastighet vilket i väsentlig grad ökar risken för att oförbrända oljerester skall uppträda i förbränningsgaserna.

Vid för höga luftöverskott kan motsvarande fenomen uppträda som en följd av de högre lokala gashastigheterna. *Stoftbildningen kommer därför att öka både vid låga och höga luftöverskott.* Det kan här vara av intresse att se något närmare på hur stor inverkan av de här beskrivna fenomenen kan vara. I bild 8:2 visas några resultat från försök vid drift på experimentpannan. Som framgår av bilden har minimipunkten för stoftbildningen i allmänhet fallit i området vid 10 - 12 % CO₂, d.v.s. vid ca 40 á 50 % luftöverskott. Kallas CO₂-halten vid minpunkten för CO₂-opt gäller

$$\ln S - \ln S_o = k_p (\text{CO}_2 - \text{CO}_{2(\text{opt})})^n \quad (9:22)$$

där S_o är stoftbildningen vid CO₂-halten CO₂-opt och

S stoftbildningen vid en annan godtycklig CO₂-halt.

Som framgår av bilden gäller för experimentpannan att exponenten n är

$$n \approx 2 \quad (9:23)$$

medan koefficienten k_p bestäms av oljans stoftbildningsegenskaper.

Det kan även vara av intresse att se närmare på motsvarande resultat för några kommersiella pannor. En sådan granskning av exempelvis resultaten från central P (där pannan var en s.k. säckpanna och drevs med en brännare av tryckoljetyp) pekar på att samma n -värde kan tillämpas.

Frågor som är av intresse i detta fall:

- o Är konstanten n av mer eller mindre universiell karaktär eller är den en funktion av oljekvalitet och kombination panna/brännare?
- o Faller alltid CO₂-opt inom det ovan angivna intervallet?

Båda dessa problem, som ytligt behandlas med utgångspunkt från den matematisk - fysikaliska modellen, skall senare bli föremål för en närmare studie och tillsvidare får vi nöja oss med de här angivna empiriska sambanden.

Det kan dock redan här vara av intresse att den samlande inverkan av flamstorlek och luftöverskott kan åskådliggöras i ett diagram i enlighet med bild 7:14 m.fl.

10. ANLÄGGNINGSSKÖTSELNS BETYDELSE FÖR STOFTBILDNINGEN¹⁾

Oljebrännarens skötsel är en faktor av väsentlig betydelse för stoftbildningen. Ett noggrant studium av de effekter god resp. dålig skötsel leder till har ej varit möjlig inom ramen för den aktuella uppgiften. Här skall därför blott resultaten av några mindre försöksserier behandlas.

10.1 MINSKAT PRIMÄRLUFTFLÖDE VID PRESSLUFTBRÄNNARE

En minskning av luftflödet för finfördelningen av oljan vid pressluftbrännare har ett kraftigt inflytande på den erhållna droppstorleken. En ändring av luftflödet påverkar således ej endast hastigheten hos förstoftningsluften utan även förhållandet mellan luft- och oljeflödena.

Vid en minskning av luftflödet (och hastigheten) med 50 % ändras medeldroppdiametern från ca 100 mikrometer till ca 250 mikrometer samtidigt som den maximala droppdiametern ökar från 200 till ca 500 mikrometer. Droppar av denna storlek kräver relativt lång tid för fullständig förbränning (ca 1/4 sek), vilket aldrig nås med normala pannkonstruktioner i den här aktuella storleksklassen.

Flera orsaker till en minskning av primärluftflödet kan tänkas:

- o Igensättningar i luftkanalerna i brännaren.
- o Försämring av primärluftfläkten eller kompressorns prestanda.
- o Ändring av inställda driftsvärden.

En serie prov med igensättning av primärluftkanalerna¹⁾ utfördes i samband med försöken vid central S. I bild 10:1 redovisas följderna av det härigenom ändrade luftflödet.

Som framgår av bilden gav igensättningen upphov till en ökning från ungefär 10 till ca 20 g stoft/kg olja vid 10 % CO₂ och en kapacitet av 250 liter olja/h.

1) Igensättningen av kanalerna erhöles genom att luft med sotpartiklar användes som "primärluft". I bild 10:1 visas resultat för två oljor och vid olika grad av igensättning.

1) Här och i fortsättningen avses nettobildning, se förord.

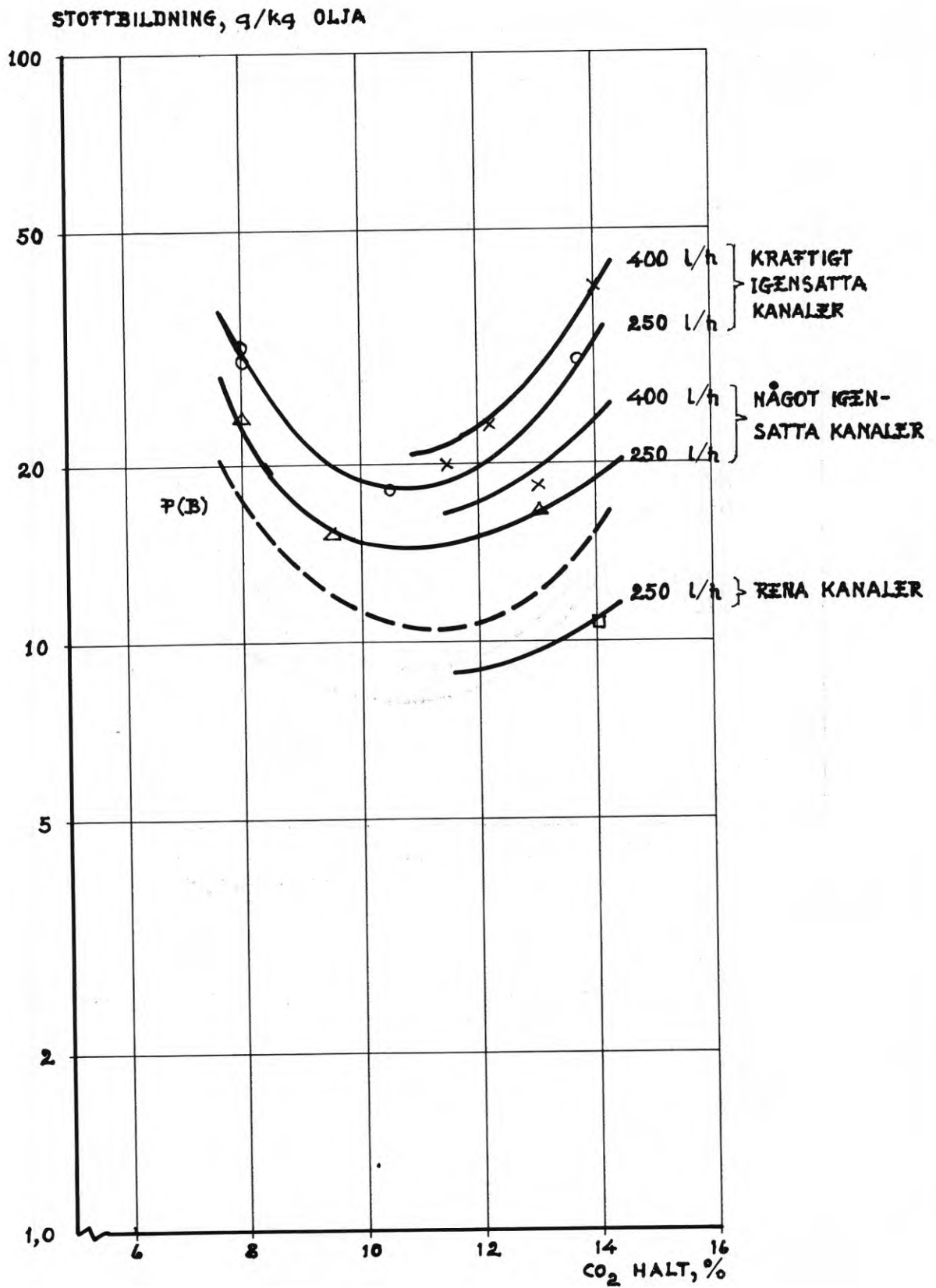


BILD 10:1 Inverkan av igensättning (minskat luftflöde) i primär-luftkanaler till en pressluftbrännare.

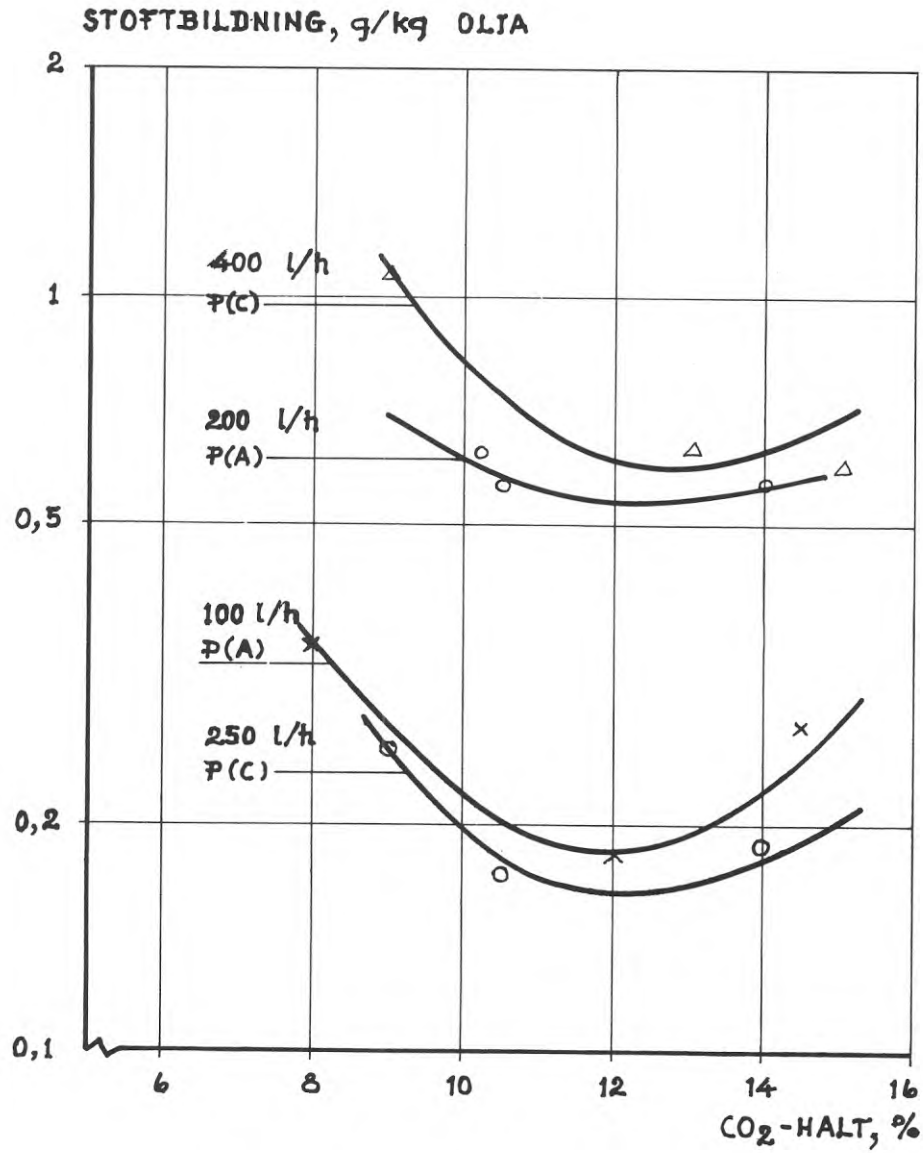


BILD 10:2 Resultat med nytt respektive med förslitet munstycke i en pressluftbrännare.

För olja 441 gjordes samma försök. Denna olja gav 1,5 - 2 g stoft/kg olja vid förbränning i pressluftbrännare (se t.ex. bild 7:32) vid 250 liter olja/h och 9 - 13 % CO₂. Vid igensättning blir värdena 3 - 5 g stoft/kg olja vid motsvarande driftsförhållanden och vid en kapacitet av 400 liter olja/h steg stoftbildningen upp till 8 à 9 g/kg, se tabell 10:1.

TAB.10:1. Stoftbildning vid eldning med olja 441 i brännare PA

CO ₂ %	Stoftbildning g/kg	Kapacitet l/h
8,5	5,64	250
9,5	3,30	250
13,5	4,64	250
12,0	6,72	400
13,5	8,40	400

10.2 MUNSTYCKSFÖRSLITNING

Redan i avsnitt 2 har påpekats vikten av att munstycken vid tryckoljebrännare är centriska. Vid små kapaciteter medför detta vissa tillverkningsproblem och här föreligger relativt sett en stor risk för variationer i munstycksdimensionerna. Till följd av i avsnitt 1 omnämnda svårigheter att vid låga belastningar erhålla goda strömningsförhållanden stiger ofta stoftbildningen vid små kapaciteter - jämför bild 7:38.

Även vid pressluftbrännare inverkar munstyckets utformning och förslitning. Gamla munstycken kan därför ge upphov till en väsentligt högre stoftbildning än nya. Här spelar även dimensionerna en viss roll. I bild 4:4 visas det munstycke som användes i en provserie, dels det vid brännare P(A) normala, dels ett nytt P(C)¹⁾. Resultaten vid drift med olja 401 anges i bild 10:2. Det kan vara av intresse att här närmare se på resultaten för oljeförbrukningarna 200 resp. 250 l/h. Vid munstycke (A) och CO₂ = 12 % erhöles en stoftbildning av ca 0,5 g/kg olja medan motsvarande värde för munstycke (C) var ca 0,2 g/kg olja. Beaktar vi att det senare resultatet erhöles vid 25 % högre kapacitet är förbättringen påtaglig.

1) Det gamla munstycket var förslitet.

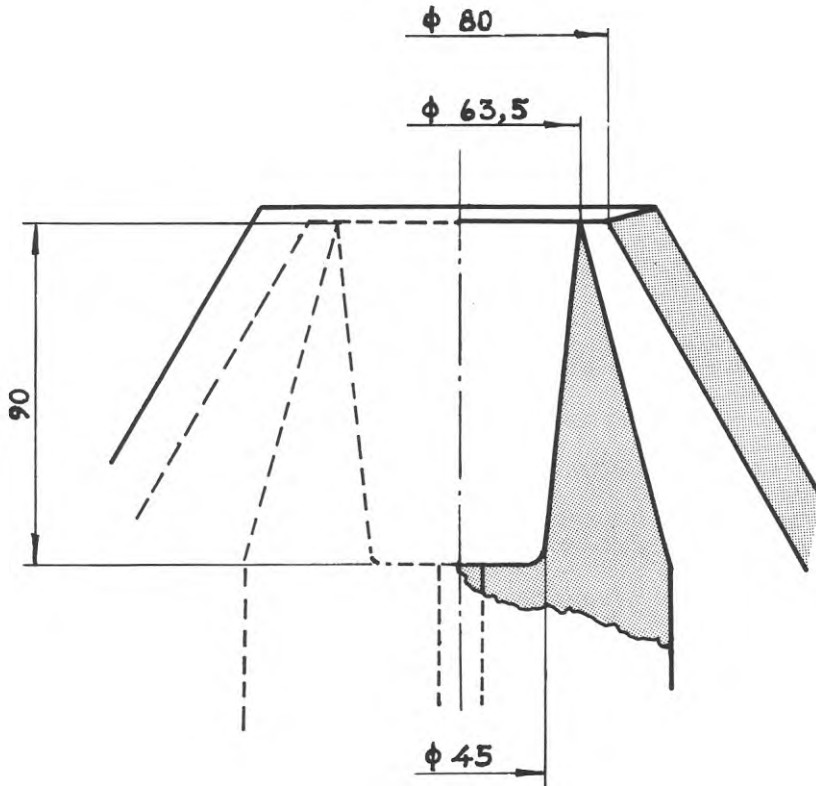


BILD 10:3 Dimensioner för rotationskopp vid brännare R(A) och R(B).

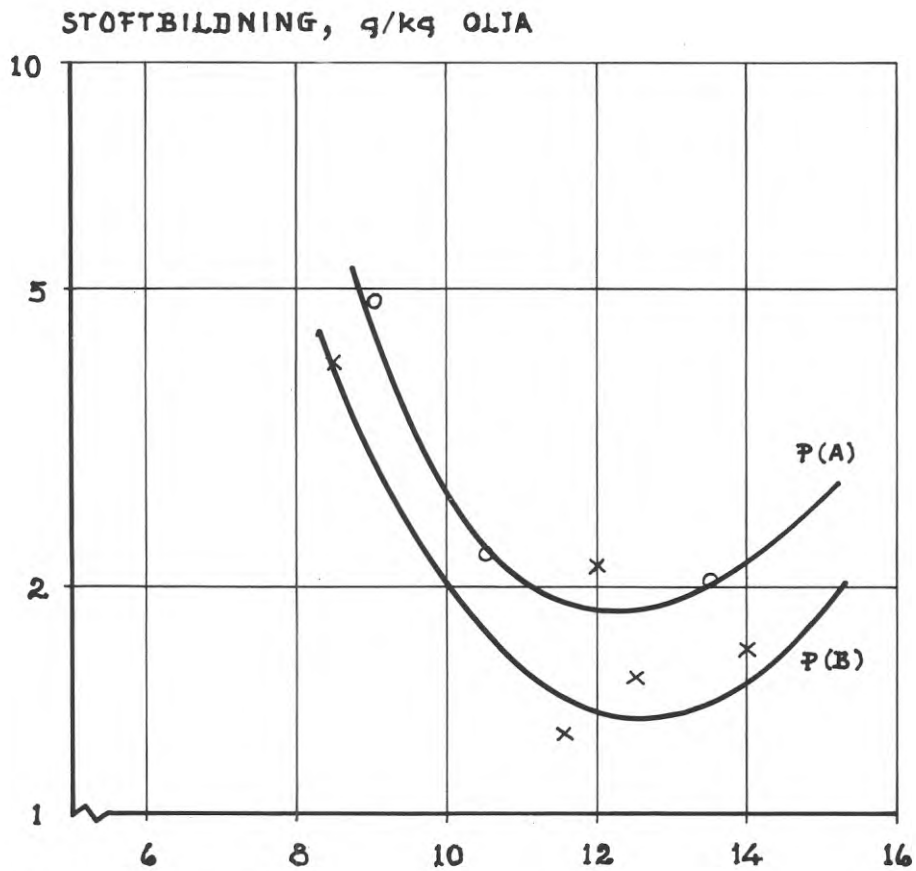


BILD 10:4 Stoffbildning vid rotationsbrännare. Använd (A) och ny (B) kopp.

Vid rotationsbrännaren kan, som nämnts en ökning av rotations-hastigheten eller den roterande koppens dimensioner vara medel till en förbättrad förstoftning.

I bild 10:3 ges dimensionerna för den använda rotationskoppen och i bild 10:4 visas resultaten vid drift med olja 431 för de båda varianterna. Här har förändringen lett till ca 40 % förbättring. Vid denna brännare spelar givetvis också koksavsättningar i dys¹ en avgörande roll. I bild 10:5 visas resultatet av en sådan koks-bildning.

10.3 OLJEFÖRVÄRMNING

Betydelsen av rätt oljetemperatur har tidigare diskuterats. Vid samtliga här redovisade prov har oljan förvärmats till en temperatur motsvarande en viskositet av ca 20 cSt, vilket torde vara lämpligt i flertalet fall.

Vid de förundersökningar som utfördes, visade det sig att hög stoftbildning kunde vara orsakad av en för låg oljetemperatur. I *enstaka fall* var oljeförvärmaren rent av så underdimensionerad att den måste utbytas för att stoftbildningen skulle kunna nedbringas. Inverkan härvid kan vara av storleksordningen 50 %.

10.4 LUFTÖVERSKOTT

Inverkan av varierande luftöverskott har visats i samband med resultatredovisningen i avsnitt 5. Dessutom behandlas denna faktors betydelse i avsnitt 8 där den kvantitativa inverkan av luftöverskottet diskuteras. Här skall endast konstateras att vid $CO_2(\text{opt}) = 11 \text{ à } 12 \%$ är driftsekonomin betydligt lägre än vid en högre CO_2 -halt.

För en och samma pannkonstruktion avtar det nyttiggjorda värmnet approximativt proportionellt mot luftöverskottet, d.v.s.

$$Q_{(\text{nyttig})} = Q_{(\text{nyttig})s} \left\{ 1 - K \frac{L - L_s}{L_s} \right\} \quad (10:1)$$

där

$Q_{(\text{nyttig})}$ är den vid luftflödet L upptagna effekten.

$Q_{(\text{nyttig})s}$ är den vid $L = L_s$ (= det stökiometriska luftflödet) upptagna effekten.

1) Samma är givetvis förhållandet vad gäller koksningen i dyser vid pressluft- och tryckoljebrännare.

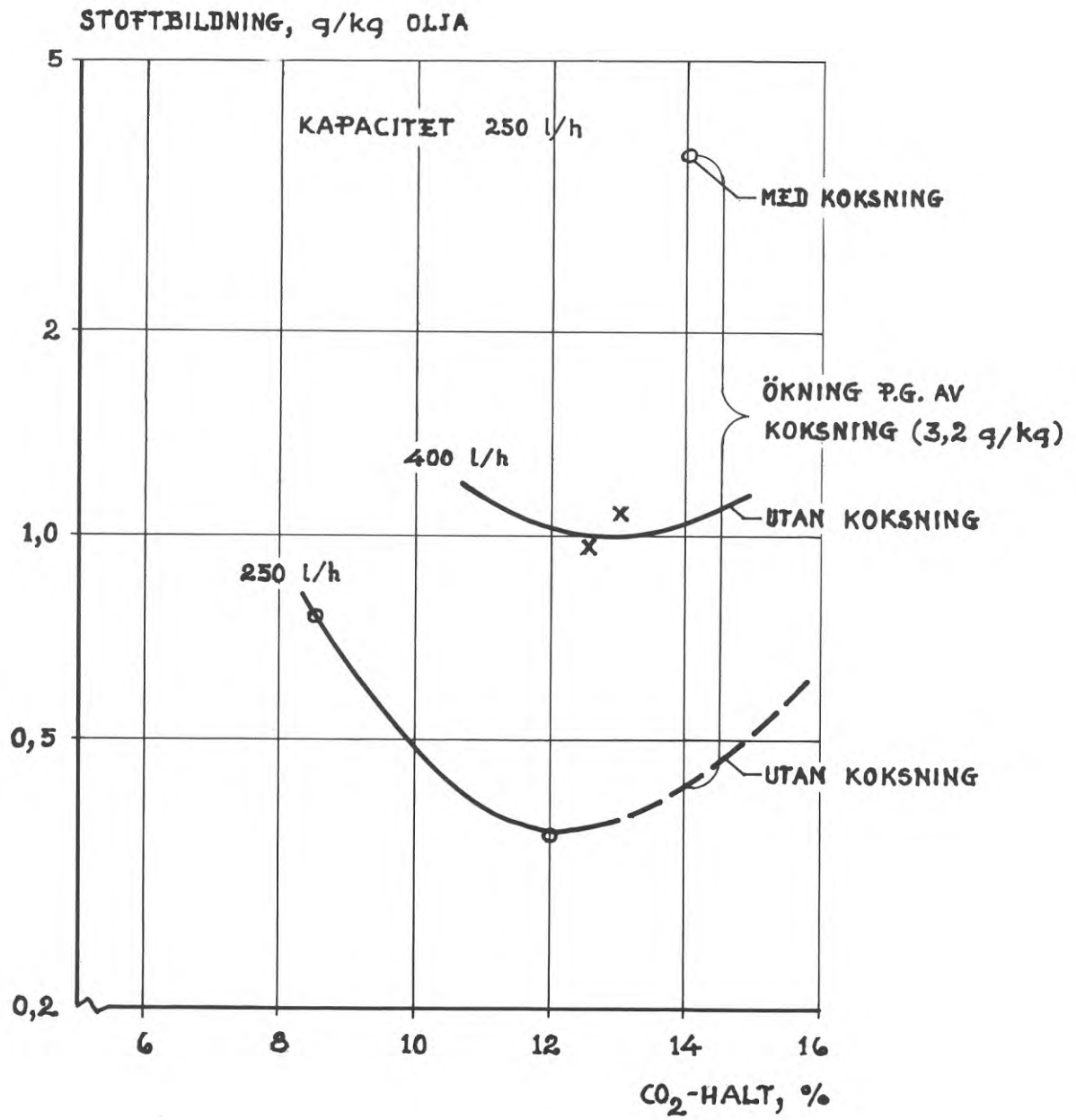


BILD 10:5 Stoffbildning vid pressluftbrännare med olika grader av försmutsning.

K är en konstant ($\approx 0,5$)

Minskningen enligt ekvation (10:1) är en följd dels av den ökande strömningshastigheten för förbränningsgaserna, dels av den med ett ökat luftöverskott sjunkande flamtemperaturen.

För

$$K = 0,5 \quad (10:2)$$

och vid $\text{CO}_2 = 15\%$, dvs vid

$$L_{15} = 12 \text{ m}^3/\text{kg olja} \quad (10:3)$$

erhålls

$$Q_{(\text{nyttig})} = 0,95 Q_{(\text{nyttig})s} \quad (10:4)$$

medan vi för $\text{CO}_2 = 11\%$, dvs för

$$L_{11} = 16 \text{ m}^3/\text{kg olja} \quad (10:5)$$

får

$$Q_{(\text{nyttig})} = 0,77 Q_{(\text{nyttig})s} \quad (10:6)$$

Den nyttiga effekten minskar således med $0,18/0,95 = 19\%$ se bild 10:6 Vid en minskning av CO_2 -halten från 13 till 11 % ändras driftekonomin på samma sätt med ca 15 %.

Ändringar mot en förbättrad lufthygien genom en ökad lufttillförsel leder således till en inte obetydlig försämring av driftekonomin.

Man bör emellertid hålla i minnet att den minskade stoftbildningen vid optimal CO_2 -halt även ger vissa driftekonomiska vinster. Hit hör bl a det minskande behovet av sotning och den förbättrade värmekonomin till följd av en minskad stoftavsättning på värmeytorna, se exempelvis Peterson (1968). Tillsammans ger dessa båda effekter en viss kompensation för den ovannämnda försämringen i ekonomi.

Ytterligare en faktor med ekonomisk betydelse är att det i en värmepanna avsatta stoftet får en surhetsgrad som varierar med luftöverskottet. Storleken av stoftets syrahalt ($\text{g H}_2\text{SO}_4/\text{g stoft}$) har undersökts av bl a Reed (1960). Erhållna värden varierar med en faktor 2 vid ett och samma luftöverskott några bevis för att ett syramaximum skulle föreligga vid 11 % CO_2 , vilket har framförts i andra sammanhang (se t ex Widell (1968)) synes ej föreligga. Här spelar säkert väggtemperaturerna - och därmed den inre cirkulationen i pannan - en större roll än lufttillförseln.

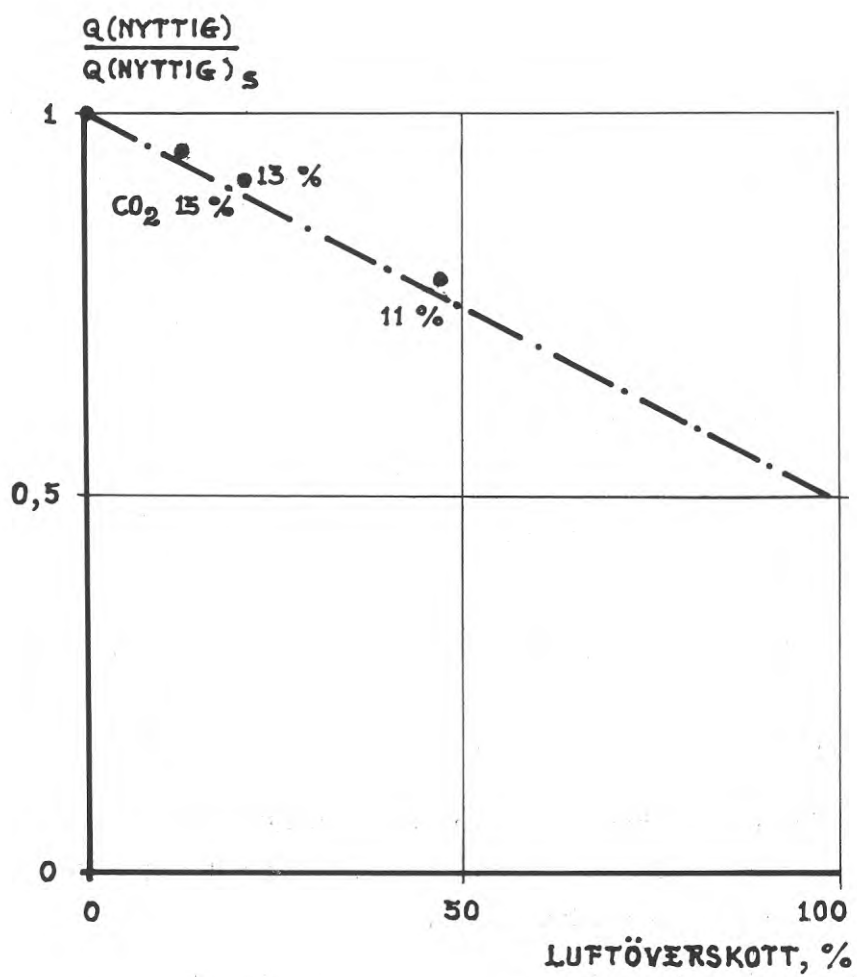


BILD 10:6 Nyttig effekt som funktion av luftöverskott (exempel).

11. FÖRSLAG TILL MÄTMETODIK FÖR BESTÄMNING AV OLIKA STOFTBILDNINGSEGENSKAPER

De här framlagda resultaten pekar på stor likhet i stoftbildningsavseende för en och samma olja, vid användning i olika oljebrännare. Vi har redan tidigare - se avsnitt 7 - kunnat konstatera att den aktuella brännarkapaciteten är av underordnad betydelse - ett förhållande som visat sig hålla även för olika pannor och olika brännare. Vi kan dessutom konstatera god överensstämmelse mellan laboratorieförsöken och fältmätningarna. I tabell 8:4 visas den inbördes ordningen mellan oljorna, vilka provats i flera olika sammanhang. Som framgår av tabellen erhålls vid de olika försöken nära nog samma ordning mellan de olika oljorna vad gäller stoftbildningen. Iakttagelserna leder tanken till *möjligheten att i en laboratorieuppställning undersöka oljornas stoftbildningsegenskaper*. Följande krav bör ställas på uppställningen:

- o Oljedropparnas uppehållstid bör vara densamma som vid fältanläggningar. För bestämning av uppehållstiden bör ekv. (9:17) vara tillräckligt noggrann.
- o Anläggningens brännare bör ge en förstoftning bättre än vid fältanläggningar, därigenom möjliggörs en minskning av provanläggningens storlek. En minskning av d_{\max} med 30 % innebär en minskning av flamrummets längd med ca 50 %.
- o Förhållandena bör i övrigt, t.ex. vad gäller eldstadsbelastning och väggtemperaturer i pannan i möjligaste mån överensstämma med fältförhållanden. Vid försöken är det önskvärt att uppmäta stofthalten vid olika CO₂-halter mellan 8 och 15 % vid *en* belastning. Det så erhållna sambandet mellan stoftbildning och CO₂-halt kan jämföras med motsvarande för en känd olja.

Ett förfarande enligt det här skisserade synes för närvarande vara den enda möjligheten man har att till rimliga kostnader undersöka olika oljors stoftbildningsegenskaper.

Det bör påpekas att man härigenom skulle kunna gardera sig mot obehagliga överraskningar vid användande av "nya" oljekvaliteter.

Förfarandet har dessutom den stora förtjänsten att oljornas egenskaper kan undersökas under förhållanden som är nära nog identiska med de som råder vid anläggningar i praktisk drift.

LITTERATURFÖRTECKNING

- Björkesson E (1970) Stoffmätning. Inst för uppvärmnings- och ventilationsteknik, KTH. Stockholm 1970.
- Brasser (1953) Die Verunr. d. Atmosf. TNO Rapport 17. Haag 1952. Air Repair 3(1953)Nr 1.
- Brocke W m fl (1963) Unters.Über d. Mögl. einer Verminderung d. Luftverunr. durch häusliche Feuerstätten. Schriftenreihe d.Landesanst.f.Imm.u.Bodenschutz d.L.Nordr.-Westfahlen. Essen 1963
- Blünz P m fl (1967) Infl of Fuel Oil Character, and Comb. Conditions on Flue Gas Properties in Water-tube Boilers. Journ Inst Fuel 40(1967)nr 9.
- Clarce m fl (1953) The Tendency to smoke of organic Substances on Burning. Part 1, Journ Inst. Petr 32 (1946)p627.
- Cornet J m fl (1953) Ind Eng Chem 45(1953)1033. Ref i Marshall (1954).
- Dirke L. (1968) Allmänna synpunkter på värmecentraler. Andra Nordiska luftvårdssymposiet. Imatra 1968. Nordforsk Publikation 1970:2. Helsingfors.
- Eisenklam P (1961) Atomisation of Liquid Fuel for Comb. Journ Inst Fuel 34(1961)nr 4.
- Edeling C (1950) Beihefte Ang Chemie (1950) Nr 57.
- Fauth m fl (1967) Gas- und Feststoffemission bei ölbeheizten Feuerstätten Staub- Reinhaltung der Luft 27(1967)nr 6.
- Fraser R m fl (1963) Performance Characteristics of Rotary Cup Blast Atomizers. Journ Inst Fuel (1963)nr 8.
- Friedman S m fl (1952) Centrifugal Disk. Atom. Chem Eng. Progr. 48(1952) p 181
- Gallaer (1957) How to measure Dust in stacks and Ducts for management (1957)p 88.
- Gills B (1968) Perf. of Ind. Oil Burners la Termotecnika 23(1969)nr 7.
- Hansen K (1950) Flyveaskeudskillere. København 1950
- Hansen W (1959) Heizöl-Handbuch für Industriefeuerungen. Springer 1959. **Berlin.**

- Hottel m fl (1955) Combust.of Droplets of Heavy Liquid Fuels. 5th Symp.Int. on Combustion. Reinhold Publ C Co. New-York 1955.
- Hunt R m fl (1961) Gravimetric Corr.of Smoke Measurements.API-Conference.Paper 61-6 1961.
- Joyce J (1949) The Atomization of Liquid Fuel for Comb. Journ. Inst. Fuel 22(1949)p 150.
- Kobayasi K (1955) An exp. Study on the Comb. of a Fuel Droplet. 5th Symp. (Int) on Comb. Reinhold Publ. Co. New York 1955.
- Meier zu Köcker (1968) **Zur Russbildung definierter Kohlenwasserstoffe bei d. Eindimensionalen Verbrennung. Brennstoff-Chemie 49 (1968) Nr 7.**
- ter Linden (1935) Flugaschemessungen. Ges.Ing. 58(1935)Nr 3.
- Larsson O (1970) Rökkanalers dimensionering och driftsförhållanden i medelstora panncentraler. BFR-rapport 6/69. Stockholm 1969.
- Longwell J (1943) Diss. Mass Inst of Techn
- Locklin m fl (1951) Rating of Fuel Oils by a Test Unit. Trans ASHVE nr 1413. Pres at the 57th Ann Meet. of ASHVE 1951.
- Marshall (1954) Atomization and Spray Drying, Chem Eng Prog Monogr Ser. Nr 2 vol. 50,
- Masdin E (1960) Diss. Univ. Sheffield (1960).
- Matthews m fl (1969) A Watercooled smokemeter for the estimation of soot cone.in Natural Gasflames.Journ Inst. Fuel 42(1969)Nr 7.
- Nelson L (1970) Petr. Ref. Eng. Mc Graw-Hill. 4e uppl. Tokio (1970).
- Narjes L (1965) Anwendung neuartiger Nulldrucksonden. Staub 25(1965) Nr. 4.
- Nukiyama m fl (1938-40) Trans.Soc.Mech.Eng.(Japan). Ref i Marshall (1954).
- Paushkin M m fl (1956) Inter.Univ.Conf.on the Chemistry of Petr. Moskva Univ.(1956).
- Peterson F m fl (1967) Sotbeläggningar i värmepannor. Tidskriften VVS 38(1967)Nr 8.
- Peterson F (1967a) Agressivt sot- ett allvarligt korrosionsproblem. Tidskriften VVS 38(1967)Nr 1.
- Peterson F Hecktor B (1968) Vattensotning 39(1968) Nr. 3.

- Peterson F (1968a) Stoftemissioner. Undersökning för Statens Planverk. Stockholm 1968.
- Peterson F (1969) Sottalsmätning. Tidskriften VVS 40(1969) Nr. 10.
- Peterson F (1970) Luftforurening fra kedelcentraler. Varme 35(1970) Nr. 3.
- Peterson F Skoog K (1970a) Övergång till lågsviskös olja. Tidskriften VVS 41(1970) Nrs 8,9,11.
- Peterson F (1971) Föredrag vid SPI-symposium 1971. Stockholm 1971.
- Peterson F (1971b) Kontroll av stoftemissioner. Hyg Revy 60 (1971)p 250.
- Peterson F (1971c) Problem vid mätning av stoftemissioner. Tidskriften TEAM 29(1971) Nr. 3.
- Pigford R m fl (1951) Perf. Characteristics of Spray Type Absorption. Equipm. Ind Eng Chem 43(1951)p 1649.
- Rayleigh (1878) Proc. London Math. Soc. 10(1878)
- Reed L (1961) The Effect of Operating Cond. on the Perf. of diff. types of Oil Burners. Journ. Inst. Fuel 34(1961)Nr 1.
- Riggs R m fl (1964) Comb. Improvers for Fuel Oils. ETHYL Co. 1964.
- Senftleben m fl (1917) Ann der Physik 54(1917) p 355. Ref. i Peterson 19.
- Sjøgren (1971a) Sødpletten. Varme 36(1971) Nr. 4.
- Sjøgren A (1971b) Nyt Apparat till bestemmelse af partikelindholdet i røggas.. Varme 36(1971) Nr. 4.
- Sjøgren (1971b) Isokinetisk prøveudtagning. Varme 36/1971) Nr. 4.
- Stairmand C (1951) The Sampl. of Dust Laden Gases. Trans Ins. of Chem. Eng. 29(1951) Nr. 1.
- Starkman A m fl (1951) Ind. Eng. Chem. 43(1951) 2822. Ref. i Marshall (1954).
- Tate R m fl (1953) Atom. by Centrifugal Press. Nozzles. Chem. Eng. Progr. 49(1953) p 169, 226.
- Tate m fl (1962) Spray Droplet Size of Pressure-Atom Burn Nozzles. ASHRAE J 39(1962) Nr. 4.

- Tesner A (1958) Form of Dispersed Carbon, by Thermal Decomposition of Hydrocarb. 7th Symp(Int) on Comb. (1958). Butterworths Publ. 1959.
- Vernon J m fl (1935) A Laboratory Study of the Atm. Corrosion of Metals. Trans. Far. Soc. 31(1935) p 1668.
- Waldenby T (1971) Medelvärde för svavelhalt i olja kan underlätta landets bränsleförsörjning. Tidskriften VVS 42(1971)Nr.2.
- Wetzell R m fl(1954) AICE Ann Meeting. Washington 1954.
- Whitely A m fl (1959) The effect of Probe Shape on the Acc. on Sampling of Flue Gases for Dust Cont. Journ. Inst. Fuel 32(1959) Nr 1,
- ASME (1941) Power Test Codes. Dust Separating Apparatus New-York 1941.
- BS(1940) Meth of Testing Dust Extr. Plant and the Emission of Solids from Chimneys of Electr. Power Stations. BS 893:1940.
- BS (1961) Simplifies Meth of Measurements of Grit and Dust Emission from Chimneys. BS 3405:1961. London 1961.
- Grit and Dust (1967) Report of the Working Party on Grit and Dust Emissions Min of housing and local Government. Her Majesty's Stationery Office. London 1967.
- IGCI (1964) Test Procedure for Gas Scrubbers. Ind Gas Cleaning Inst. New-York 1964.
- NH (1967) Teknisk rådgivning 1967.
- NU-WAY (1966) Teknisk rådgivning 1967.
- Rigolamente (1968) Rigolamente par l'eseecuzione della legge 13 luglio 1966 n 615, recante provvedimenti contro l'inquinamento atmosferico. limitantmente al settore degli impianti termici Gazz. Ufficiale 1968.
- Soc PB (1962) Methode. BP.de prélèvement B'imbulés solides dans les gas de comb de fuel oils. Paris 1962.
- Statens Luftvårdsnämnd (1967) Luftföroreningsproblem vid tjockoljeeldade värmecentraler. Orsaker och förslag till åtgärder. Stockholm 1967.
- Statens Planverk (1968) Panncentraler. Supplement till Svensk Byggnorm SBN - S 68. Stockholm 1968.

- Statens Naturvårds- Riktlinjer för emissionsbegränsade åtgärder vid luftförorenade anläggningar. Statens Naturvårdsverk 1970:2. Stockholm 1970.
- Statens Naturvårds- Luftvårdsproblem vid oljeeldade kraftverk. Statens Naturvårdsverk publ. 1970:5. Stockholm 1970.
- Statens Naturvårds- Luftvård vid äldre värmeanläggningar. Statens Naturvårdsverk publ. 1971:8. Stockholm 1971.
- VDI-Richtlinien Leistungsmessungen an Entstaubern. VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft VDI 2066. Düsseldorf 1966 resp. VDI Verlag GMBH/Berlin 1936.

CAPTIONS (FIGURTEXTER ÖVERSATTA TILL ENGELSKA)

- FIG. 1:1 Cenospheres formed from fuel oil.
- FIG. 1:2 Flame soot.
- FIG. 1:3 Retention of particles in the alveoli.
- FIG. 1:4 Size ranges of different kinds of solid particles. The shaded central area indicates particle sizes which are extensively deposited in the lungs. Particles emitted by central heating plants are in this range.
- FIG. 1:5 Relation between the number of particles, particle diameter and the total cross sectional area of the particles. The particles are assumed to be spherical and have a total weight of 1 g, and to have a density of 2 000 kg/m³.
- FIG. 1:6 Corrosion of iron in humid air. The humidity was increased during the test from 0 % to 99 % relative humidity, the latter value being reached after about 35 days. Once the relative humidity had reached 99 %, it was maintained constant during the remainder of the test. A-E in the figure indicate conditions as below.
- A: Carbon particles and particles of sodium sulphate on the metal surface. Pure air.
- B: No particles but SO₂ in the air.
- C: Particles of silicon dioxide on the metal surface and added SO₂ in the air.
- D: Particles of ammonium sulphate on the metal surface and SO₂ in the air.
- E: Carbon particles on the metal surface and SO₂ in the air.
- FIG. 1:7a Quantity of dust in flue gases when firing with fuel oil Q₁.
- FIG. 1:7b Quantity of dust in flue gases when firing with fuel oil Q₂.
- FIG. 1:8 Results of solid particle measurements when operating with six distillate oils in a pressure jet atomizer. It can be seen from the figure that there is a certain change in solid matter formation when the atomization pressure is changed. Data according to Locklin and others (1951). Datas for the oils are given in Table 1:11.
- FIG. 1:9 Quantity of soot when firing with three different distillate oils (see Table 1:12). According to Faut and others (1967).

- FIG. 1:10 Soot formation as a function of the quantity of aromatic compounds in diesel fuel.
- FIG. 1:11 Soot formation tendency of pure hydrocarbons when burned in a diffusion flame.
- FIG. 2:1 Droplet diameter as a function of time for a burning droplet of ethyl alcohol. Data according to Kobayasi (1955).
- FIG. 2:2 Combustion time as a function of the initial droplet diameter d_o .
- FIG. 2:3 Combustion time of oil droplets as a function of the composition of the oil (expressed in terms of the Conradsson No) and the composition of the ambient atmosphere. The figure relates to the combustion time of droplets with a diameter of approx. 100 μm .
- FIG. 2:4 Change in mass of droplets of residual oil when burned in atmospheres of different temperatures.
- FIG. 2:5 Break-up of an oil flow. Theoretical process according to Rayleigh (1878), actual process according to Marshall (1954).
- FIG. 2:6a Frequency curve for droplet sizes. The figure also shows the frequency of droplets in two fractions. In this case the frequency has been shown by bars.
- FIG. 2:6b Distribution curves for oil droplets (schematic).
- FIG. 2:7 The atomizer head of a pressure jet atomizer. The path of the oil to the swirl chamber is shown by arrows.
- FIG. 2:8a Tangential velocity, v_{tang} , in no-friction flow in a pressure jet nozzle.
- FIG. 2:8b Oil cone formed in a pressure jet nozzle.
- FIG. 2:9 Droplet size, \bar{d}_{area} , as a function of the oil pressure when atomization is by a pressure jet nozzle and of the oil flow (expressed as the relative flow, $q_{\text{oil}}/q_{(\text{oil})n}$, where $q_{(\text{oil})n}$ is the oil flow (50 kg/h) at oil pressure 70 N/m^2
- FIG. 2:10 Measured droplet diameters, \bar{d}_{area} , as a function of the oil flow and the oil pressure when atomization is by a pressure jet nozzle.
- FIG. 2:11 Droplet distribution according to Tate and others (1962) for the pressure jet nozzle.
- FIG. 2:12 Formation of oil film in a rotary cup atomizer.
- FIG. 2:13 Formation of oil droplets in a rotary cup atomizer.
- FIG. 2:14 Droplet diameter, \bar{d}_{area} , as a function of the viscosity ν of the oil at two oil flows. Data according to Fraser (1963).

- FIG. 2:15 Droplet diameter, \bar{d}_{area} , in a rotary cup atomizer varies with the oil flow and the air velocity. According to Fraser (1963).
- FIG. 2:16 Variations in droplet diameter, \bar{d}_{area} , as a function of the rotational velocity for varying air velocities and oil flows. Data according to Fraser (1963).
- FIG. 2:17 Relation between mean droplet diameter and the diameter of the largest droplet which occurs in the oil mist.
- FIG. 2:18 Construction of the nozzle in a pressure jet atomizer.
- FIG. 2:19 The droplet diameter, \bar{d}_{area} , as a function of the ratio of the mass of air flow to that of the oil flow, and as a function of the velocity, v , of the atomizing air.
- FIG. 2:20 Oil droplet diameter, d_{max} , for a pressure jet atomizer.
- FIG. 3:1 Schematic representation of the combustion of an oil droplet.
- FIG. 3:2 Grain size distribution of flame soot. Data according to Tesner (1958).
- FIG. 3:3 Temperature and concentration conditions around the droplet immediately after its injection into the combustion chamber (A), after being heated for a time but before ignition (B), and at the instant of ignition (C).
- FIG. 3:4 Temperature conditions near the droplet during combustion.
- FIG. 3:5 Decomposition of ethane.
- FIG. 3:6 Symbols.
- FIG. 3:7 Soot formation at the top of the flame, according to Masdin (1960a).
- FIG. 3:8 Diffraction of thermal radiation to the inside of the droplet.
- FIG. 3:9 Local temperature inside the oil droplet.
- Symbols used:
- t time since ignition
 a conductivity of oil
 T_0 initial temperature
 T_∞ ambient temperature
 T local temperature
- Data in the figure refer to $kR = 1$, where k is the absorption factor for thermal radiation.

- FIG. 3:10 Diameter of cenospheres as a function of the droplet diameter, according to Peterson (1970). (Diagram reproduced after correction of printing error.)
- FIG. 3:11 Variation in droplet diameter during combustion. The figure also shows the appearance of the flame on some occasions.
It should be noted that even after combustion has ceased (last inset), a particle of relatively large diameter remains.
- FIG. 3:12 As will be seen (A in the figure) the cenospheres may be deformed and damaged as a result of ruptures during combustion.
- FIG. 3:13 a) Cenosphere consisting of a thin transparent skin.
b) Cenosphere in section. The extremely thin skin can be seen. The diameter of the cenosphere is about 100 μm .
c) The cenospheres must be separated from the unburnt oil droplets which may pass the flame.
- FIG. 3:14 A series of tests aiming to elucidate the structure of the cenospheres has shown that these consist of a thin skin, usually with an inner thickened portion. See also FIG. 3:13.
The thickened portion contains about 90 % of the mass of the cenosphere.
- FIG. 4:1 The laboratory boiler.
- FIG. 4:2 Combustion temperature as a function of the CO_2 content in the laboratory boiler.
- FIG. 4:3 Estimated droplet size in the laboratory boiler.
- FIG. 4:4 a) The pressure jet atomizer used.
b) The burner and oil distribution system.
- FIG. 4:5 Construction of the exhaust system in the experimental boiler.
- FIG. 4:6 Separation efficiency of the cyclone for small particles. Results from measurements in tests on silicone dust, according to Peterson (1963).
- FIG. 4:7 Separation efficiency for solid matter from the oil fuel and silicone dust, with particle diameters less than 50 micrometre. The figures refer to overall separation efficiency.
- FIG. 5:1 Sampling at plant S, see Section 7:7.
- FIG. 5:2 Designations.

- FIG: 5:3 Emission of solid matter as distributed over a circular duct. The solid matter content is lowest at the centre, with a flow of only $2 \text{ kg/m}^2\text{h}$, while it is considerably higher at the walls.
- The higher flow of solid matter in this case (compare with flow conditions in a circular duct) is due to very high solid matter contents. According to ten Linden (1935).
- FIG. 5:4 Solid matter content in a gas flow (at a point 5 duct diameters beyond a bend). According to Narjes (1965).
- FIG. 5:5 A preliminary measurement was taken at plant S at two sections.
- The figure shows the results (solid matter content over the cross section of the duct) for sections 1 and 2 for two different oil flows. The CO_2 content during measurements was 14 %.
- FIG. 5:6 Distribution of solid matter before and after a bend. Data according to Zimmermann (1931).
- FIG. 5:7 Results of a preliminary measurements series at plant P. A Correction factor of 0.85 was obtained for solid matter emission when measurements were taken along the centre line of the duct.
- FIG. 5:8 Flow paths of gas and particles in the case of a) excessive b) too slow c) correct suction velocity.
- The measured solid matter concentration was too low in case a) and too high in case b).
- FIG. 5:9 In determining the solid matter content when only light particles are present, the suction velocity exerts no influence. In this case the particles follow the same paths as the gases. See also FIG. 5:8.
- FIG. 5:10 Example of method of control in solid matter determination, plant C. Measurements were started at 9.00 am on 21.4, in which case point 5 (see FIG. 7:10) showed a solid matter formation of 0.22 g/kg oil . This was sample No 53, see the FIG. At 11 am (after an intermediate measurement) there was a check of the solid matter content at point 5, and it was found that the value then obtained was somewhat higher than that originally measured.
- When the measurement series was continued the next day, it was started with a check at point 5 (sample No 95) and the value then obtained showed that the plant had attained satisfactory stability.
- The values shown refer to Oil No 411. The capacity at the time in question was equivalent to an oil flow of $0.7 \text{ m}^3/\text{h}$. The CO_2 content at the time of sampling was 11 %.

- FIG. 5:11 Measurement apparatus - general arrangement.
- FIG. 5:12 The measurement apparatus used ("BP apparatus").
- FIG. 5:13 When the probe is too short, there is a risk that the probe tube will give rise to interference.
- FIG. 5:14 Example of the effect of the length of the probe. The Figure shows the results for three different types of probe.
The values shown have been calculated on the basis of the quantities of solid matter collected and a gas flow determined by the duration of sampling and the gas velocity in the duct (i.e. not the actual suction velocity).
- FIG. 5:15 a) The newly designed "zero-pressure" probe.
b) Results of measurements with the new probe and the "BP" probe.
- FIG. 5:16 Error owing to the fact that suction is an isokinetic. The diagram relates to relatively large particles.
The error is negligible for solid matter from EO 1.
- FIG. 5:17 When the edge of the probe is blunt, an error occurs due to particles which bounce into the tube.
- FIG. 5:18 When the filter is incorrectly packed, solid matter is admitted. This can be seen as black tracks in the filter.
- FIG. 5:19 The apparatus for determination of Bacharach Soot number consists of a simple hand pump.
- FIG. 5:20 The Bacharach scale.
- FIG. 5:21 The relation between solid matter content and Soot number for distillate oil, according to different sources.
- FIG. 5:22 The relation between Bacharach Soot number and solid matter content for light fuel oils.
- FIG. 6:1 Variation in solid matter formation as a result of mixing oil P_1 into oil P_2 . As will be seen, there is considerable reduction in solid matter formation for a relatively modest admixture. The greater the proportion of the mixture which consists of oil P_1 , the smaller the effect due to further admixture.
This indicates that it might be possible to bring about a certain optimisation of operating costs by economically weighing up the demand for a dust collector in relation to improvement of the oil, e.g. by admixture of a "good" oil into a "bad" one.

- FIG. 6:2 Solid matter formation from Oil B1 (EO 1) and B6 and certain mixtures of these two oils. As will be seen, for all mix proportions the solid matter formation is the least when the CO_2 content is approx. 11%. The tests reported above were carried out in the laboratory boiler.
- FIG. 6:3 Solid matter formation from mixtures of oils B2 and B4.
- FIG. 6:4 Solid matter formation from mixtures of oils B2 and B7.
- FIG. 6:5 Solid matter formation when firing with the oil mixture in relation to that when firing with B4.
- FIG. 6:6 Solid matter formation from mixtures of oils B8 and B2 and B8 and EO1.
- FIG. 6:7 Solid matter formation from two oil mixtures.
- FIG. 6:8 Solid matter formation for two CO_2 contents. Mixture of oils B3 and B7.
- FIG. 6:9 Symbols used in Section 6.6.
- FIG. 6:10 Evaluation of S'_2 and S'_1 for mixtures of oils B2 and B4.
- FIG. 7:1 Placing of measuring points in plant A.
- FIG. 7:2 Placing of measuring points in plant C.
- FIG. 7:3 Placing of measuring points in plant S. See also FIGs. 5.1 and 7.31.
- FIG. 7:4 The boiler used in tests at plant P.
- FIG. 7:5 Variation in gas velocity over the duct cross section (along one diameter) at plant A. Oil flow during the tests $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$, equivalent to a somewhat larger gas flow for oil 382 than for other oils.
- FIG. 7:6 Solid matter flow (emission) at plant A.
- FIG. 7:7 Solid matter content of flue gases at plant A.
- FIG. 7:8 Solid matter concentration in the flue gases before and after the cyclone in plant B.
- FIG. 7:9 Solid matter formation (measured as grams solid matter/kg oil) before and after the cyclone in plant B. As will be seen, the separation efficiency of the cyclone is approximately constant at 25% and does not increase as the inlet velocity to the cyclone rises. This indicates that there is a change in density in the solid matter formed according to the CO_2 content.

- FIG. 7:10 Distribution of measuring points over the duct cross section at plant C. Area $1.0 \times 0.45 \text{ m}^2$.
- FIG. 7:11 Distribution of solid matter over the duct cross section at the plant C. The values which indicate the locally measured solid matter formation (grams solid matter/kg oil) are average values. The distribution is very uniform for the oil used (401). The variations at one and the same point are indicated in FIG. 5:2.
- FIG. 7:12 Solid matter formation when burning 450 litres oil/h, for varying CO_2 contents. The solid matter formation at the loading² investigated was lowest, 0.17 g/kg oil, at a CO_2 content of 9-10 %.
- FIG. 7:13 Same as FIG. 7:12 but for solid matter formation when burning 1 000 l/h.
- FIG. 7:14 Summary of tests at plant C. The figure shows the solid matter formation (g/kg oil) as a function of the useful output (abscissa) and the CO_2 contents (ordinate). Apart from solid matter formation which is indicated by curves ranging from 0.2 to 1.5 g/kg, the figure also shows loci for *maximum output at the prescribed maximum solid matter formation* and *maximum CO_2 content at the prescribed maximum solid matter² formation*. The last locus is a measure of the best operation with regard to economy.
- FIG. 7:15 Solid matter formation when firing with Oil 441 in the boiler shown in FIG. 7:4.
The curves refer to solid matter formation at 18 kg/h and 60 kg/h.
- FIG. 7:16 CO_2 - capacity diagram for oil 441. The same boiler as used for the test shown in FIG. 7:15.
- FIG. 7:17 CO_2 - capacity diagram for oil 461. The same boiler as used for the test shown in FIG. 7:15.
- FIG. 7:18 CO_2 - capacity diagram for oil 471. The same boiler as used for the test shown in FIG. 7:15.
- FIG. 7:19 Solid matter formation as a function of the CO_2 content. The same boiler as used for the test shown in FIG. 7:15.
- FIG. 7:20 CO_2 - capacity diagram for oil 451. The same boiler as used for the test shown in FIG. 7:15.
- FIG. 7:21 Solid matter formation as a function of the CO_2 content for oil 431. The same boiler as used for the test shown in FIG. 7:15.
- FIG. 7:22 CO_2 - capacity diagram for oil 431. The values measured have been boxed in the figure.

- FIG. 7:23 Solid matter formation as a function of the CO₂ content for oil 401. The same boiler as used for the test shown in FIG. 7:15.
- FIG. 7:24 CO₂ - capacity diagram for oil 401 in the same boiler as used for the test shown in FIG. 7:15.
- FIG. 7:25 Solid matter formation as a function of the CO₂ content for oil 411. The same boiler as used for the test shown in FIG. 7:15.
- FIG. 7:26 CO₂ - capacity diagram for oil 411 in the same boiler as used for the test shown in FIG. 7:15.
- FIG. 7:27 Gauging plane mm in plant F.
- FIG. 7:28a Solid matter formation when firing with oil I in plant F.
- FIG. 7:28b Solid matter content of flue gases when firing with oil I in plant F.
- FIG. 7:29 Solid matter formation as a function of the CO₂ content in plant F.
- FIG. 7:30 Bacharach Soot number as a function of the CO₂ content in plant F.
- FIG. 7:31 Choice of measuring points and determination of distribution of solid matter over the duct cross section in plant S. Determination in this case has been made at two sections, as shown in the inset, for all four boilers, at the CO₂ contents shown in the diagrams.
Measuring point b has been used for the actual measurements.
- FIG. 7:32 Solid matter formation for pressure jet atomizer P(A) when operating together with boiler No 3. Capacity 250 l oil/h, equivalent to a useful output of approx. 2.3 MW.
- FIG. 7:33 Solid matter formation when operating with pressure jet atomizer P(B). Boiler No 2. Other data as in FIG. 7:32.
Note that Oil 431 emits approx. 13 grams solid matter/kg at 10 % CO₂.
- FIG. 7:34 Comparison of the solid matter formation for three different oils when fired in two pressure jet atomizers. Oil flow in the tests 250 l/h. The burners were operated together with a boiler of 4 MW (rated output).
- FIG. 7:35 As FIG. 7:32, but oil flow 400 l/h.
- FIG. 7:36 As FIG. 7:33, but oil flow 400 l/h.

- FIG. 7:37 Solid matter formation on operation with a rotary cup atomizer R(A) on boiler No 4. Oil flow 250 l/h. Rated output of boiler 4 MW. It should be noted that the correction factor for the measuring point used is 1.0, and the values obtained therefore represent the "true" solid matter formation. They are therefore about 5 % above the values shown in FIGs. 7:32 and 7:33.
- FIG. 7:38 Solid matter formation on operation with a rotary cup atomizer R(A) on boiler No 4. Oil flow 400 l/h. Other data as in FIG. 7:37.
- FIG. 7:39 Solid matter formation on operation with a pressure jet atomizer T(A) on boiler No 2. Oil flow during the tests 250 l/h.
- FIG. 7:40 Solid matter formation as a function of the CO₂ content in plant S. Oil 401.
- FIG. 7:41 Solid matter formation as a function of the CO₂ content in plant S. Oil 422.
- FIG. 8:1 Precipitation of paraffin crystals in oil. See also Peterson, Skoog (1970a)
- FIG. 8:2 Solid matter formation from five residual oils.
- FIG. 8:3 Solid matter formation as a function of the CO₂ content before and after the production process for oil 431.
- FIG. 8:4 Relationship between solid matter formation, S g/kg oil, and the asphaltene content, A_s %, of the oil.
- FIG. 9:1 The "diffusor plate" in a pressure jet atomizer.
- FIG. 9:2 The effect of oil pressure on solid matter formation in a pressure jet atomizer. According to Locklin (1951).
- FIG. 9:3 Readings relating to distillate oil in a pressure jet atomizer. According to Faut and others (1967).
- FIG. 9:4 As FIG. 9:3.
- FIG. 9:5 Solid matter formation, according to Stein, as a function of the oil pressure in a pressure jet atomizer.
- FIG. 9:6 Solid matter formation as a function of the rotational velocity for a rotary cup atomizer.
- FIG. 9:7 Relative viscosity for E0 as a function of the temperature of the oil. The viscosity at 50°C has been taken as unity.
- FIG. 9:8 Variation in solid matter formation with oil temperature. Tests in the experimental boiler.
- FIG. 9:9 Solid matter formation as a function of the oil temperature.

- FIG. 9:10 Solid matter formation as a function of the viscosity of the oil for different burners. Data according to Reed (1961).
- FIG. 9:11 "Plug flow" model of central heating boiler.
- FIG. 9:12 The combustion time of oil droplets is a function of the type of oil (which has a relatively moderate influence), the properties of the ambient atmosphere, the motion of the droplet and the droplet size. A quadratic relationship is normally obtained for the latter factor which is predominant. Under certain circumstances, e.g. when the values of the Reynolds number are high, the index in the expression $T = kd_d^n$ may however deviate from 2. The figure shows the results of tests (Peterson (1967)) in which the value $n = 1.5$ was obtained.
- FIG. 9:13 Summary of the calculated and experimentally obtained throws for oil flames.
- FIG. 9:14 Solid matter formation as a function of the oil flow when firing with pressure jet burners used in conjunction with boilers of different sizes.
- FIG. 9:15 Solid matter formation in older rotary cup atomizers.
- FIG. 9:16 Solid matter formation in older pressure jet atomizers.
- FIG. 9:17 When the dwell time of the oil droplets is reduced, the number of droplets which cannot be completely burned increases.
- FIG. 9:18 Solid matter formation for seven oils as a function of the boiler output. Plant S in operation with a rotary cup atomizer.
- FIG. 9:19 Solid matter formation for two oils as a function of the boiler output. Plant S in operation with a pressure jet atomizer.
- FIG. 9:20 Solid matter formation as a function of the boiler output. Deficient air admixture; the flame at a low air flow (= low oil flow).
- FIG. 10:1 Influence of blockage (reduced air flow) in the primary air ducts to a pressure jet atomizer.
- FIG. 10:2 Results obtained with a new nozzle and a worn one in a pressure jet atomizer.
- FIG. 10:3 Dimensions of the rotary cup in burner R(A) and R(B).
- FIG. 10:4 Solid matter formation in a rotary cup atomizer. Used (A) and new (B) cup.
- FIG. 10:5 Solid matter formation in pressure jet atomizers with different amounts of dirt deposition.
- FIG. 10:6 Useful output as a function of excess air (example).

R54: 1974

Denna rapport hänför sig till anslag D 585 från Statens råd för byggnadsforskning till tekn.dr Folke Peterson, institutionen för uppvärmnings- och ventilationsteknik, KTH, Stockholm. Författare är tekn.dr Folke Peterson och ingenjör Kurt Skoog, Svenska Nu-way AB, Stockholm. Försäljningsintäkterna tillfaller fonden för byggnadsforskning.

**Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84 Stockholm
Grupp: installation**

Pris: 33 kronor