

# Eldstäder och rökkanaler

Sotbeläggnings tillväxttakt och  
inverkan på brandrisken



**RÄDDNINGSS  
VERKET**

Denna rapport ingår i Räddningsverkets serie av forsknings- och utvecklingsrapporter. I serien ingår rapporter skrivna av såväl externa författare som av verkets anställda. Rapporterna kan vara kunskapssammanställningar, idéskrifter eller av karaktären tillämpad forskning. Rapporten redovisar inte alltid Räddningsverkets ståndpunkt i innehåll och förslag.

1999 Räddningsverket, Karlstad  
Räddningstjänstavdelningen  
ISBN 91-7253-034-0

Beställningsnummer P21-307/99  
1999 års utgåva

# Eldstäder och rökkanaler

Sotbeläggningsars tillväxttakt och  
inverkan på brandrisken

Forskare Lennart Gustavsson  
Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Räddningsverkets kontaktperson:

Ulf Lindén, enheten för olycksförebyggande verksamhet, telefon 08-590 786 20



# Innehållsförteckning

<b>Abstract</b> .....	5
<b>Sammanfattning</b> .....	7
<b>1 Inledning</b> .....	8
<b>2 Sotbildning - förutsättningar, mekanismer och mätmetoder</b> .....	10
2.1 Vad är sot?.....	10
2.2 Bildning av flamsot – fenomenologisk beskrivning .....	11
2.2.1 Allmänt.....	11
2.2.2 Sotets utseende .....	12
2.2.3 Sotbildning i förblandade flammor .....	13
2.2.4 Sotbildning i diffusionsflammor .....	13
2.2.4.1 Diffusionsflammans struktur.....	14
2.2.4.2 Turbulenta diffusionsflammor .....	15
2.2.5 Oxidation av sot .....	15
2.3 Flamsot - kemiska modeller .....	15
2.3.1 Allmänt.....	15
2.3.2 Beräkningsmodeller för sotbildning.....	16
2.4 Mätmetoder .....	17
2.4.1 Optiska metoder .....	17
2.4.2 Extraktiva metoder - termodiffusion.....	18
<b>3 Deposition av sot och aska</b> .....	20
3.1 Grundläggande mekanismer.....	20
3.2 Mätmetoder .....	22
3.2.1 Direkt metod .....	22
3.2.2 Indirekt metod .....	22
3.2.3 Sondmetoder .....	23
3.2.4 Mätning av sotemission .....	24
3.2.4.1 Optisk metod (Bacharach-metoden).....	24
3.2.4.2 Gravimetriska metoder.....	25

<b>4 Sotbelägningars tillväxttakt .....</b>	<b>27</b>
4.1 Laboratorie-och fältundersökningar .....	27
4.2 Erfarenheter från skorstensfejaremästare .....	31
<b>5 Vedeldningens specifika förutsättningar .....</b>	<b>33</b>
5.1 Allmänt om vedförbränning .....	33
5.2 Fysikaliska processer .....	33
5.3 Kemiska processer - sotbildning .....	34
5.4 Eldningsanordningar för ved .....	35
5.5 Diskussion .....	36
<b>6 Sotbelägningars inverkan på brandrisken .....</b>	<b>37</b>
6.1 Allmänt .....	37
6.2 Soteldar och vedeldning .....	37
6.3 Laboratorieundersökningar .....	38
6.4 Diskussion .....	40
<b>7 Kravspecifikation för fältmetod .....</b>	<b>42</b>
7.1 Syfte och användningssätt .....	42
7.2 Relevans .....	42
7.3 Praktiska synpunkter .....	43
<b>8 Förslag till mätmetod och valideringsprogram .....</b>	<b>44</b>
8.1 Förslag till mätmetod .....	44
8.2 Validering .....	45
<b>9 Referenser .....</b>	<b>46</b>

# Abstract

Soot deposition in combustion cause a number of negative effects such as decrease in boiler efficiency and risk of chimney fires. In addition, soot is associated with health and environmental problems. In order to decrease risks of chimney fires, chimney sweeping at prescribed intervals is mandatory in Sweden. However, the growth rate of soot deposits in a boiler or a chimney is dependent on a number of factors such as the construction of the combustion device and of the chimney, the fuel quality used, the operational characteristics and operation and maintenance. Consequently, there is a need for a method to estimate the growth rate of soot deposits.

The first part of the report consists of an overview of present knowledge in the field of soot formation and deposition. Mechanisms for these processes are described, as well as methods to measure soot formation and deposition rates. Results from laboratory and field investigations concerning deposition rates, principally when oil is fired, are reviewed, as well as general field experiences from chimney sweeps. Concerning soot deposition in wood combustion, especially with modern, ceramically insulated boilers, very little empirical data has been found. However, a general description of the special characteristics of wood combustion is given.

The influence of soot deposition rates on chimney fire risks is discussed based on laboratory investigations reported in the literature. However, it should be noted that very few data has been reported.

Finally, an indirect method to estimate the growth rate of soot deposits in a single installation is proposed. The method is based on a measurement of the particulate content in the flue gases. It is assumed that a correlation between the particulate content and the growth rate of soot deposits exists. In order to validate the method, a programme is proposed where measurements of the particulate concentration of the flue gases are correlated to the accumulated weight of soot deposited between two chimney sweepings. To obtain a sufficient statistical basis in a number of domestic heating installations need to be included in the evaluation of the method.





# Sammanfattning

Sotbildning vid förbränning innebär en rad negativa effekter som t ex miljö- och hälsoeffekter till följd av sotutsläpp, minskad effektivitet hos pannor samt risk för soteld i skorstenar. För att minska risken för soteld är sotningen i Sverige obligatorisk med givna tidsintervall. Tillväxten av sotbeläggningar i panna och skorsten beror emellertid på en rad faktorer som förbränningsanordningens konstruktion, rökkanalens konstruktion, använd bränslekvalitet, anläggningens driftsätt samt skötsel och underhåll. Det finns därför ett stort behov av att finna en metod med vilken tillväxttakten hos sotbeläggningarna kan uppskattas.

Rapportens första del utgörs av en genomgång av befintlig kunskap inom området sotbildning och beläggningssbildning. Mekanismer för dessa processer beskrivs, liksom mätmetoder för att bestämma sotbildning och avsättningshastigheter. Resultat från laboratorie- och fältundersökningar av beläggningssbildning främst vid oljeeldning relateras, liksom allmänna fälterfarenheter från skorstensfejarmästare. För beläggningssbildning vid vedeldning, speciellt med moderna, keramiskt infordrade pannor har mycket litet empiriskt material kunnat återfinnas. En allmän beskrivning av vedeldningens speciella förutsättningar ges dock.

Inverkan på sotbeläggningarnas tillväxttakt på brandrisken belyses genom referat av laboratorieundersökningar. Även här konstateras dock att materialet är mycket knapphändigt.

Slutligen föreslås en indirekt metod för att uppskatta sotbeläggningarnas tillväxttakt i en enskild anläggning. Metoden bygger på en bestämning av partikelhalten i rökgaserna. Det antas att en korrelation mellan partikelhalten och beläggningarnas tillväxttakt föreligger. Ett valideringsprogram för metoden föreslås där partikelhaltsmätningar kalibreras mot utvägning av mängden sot mellan två rensningstillfällen i ett större antal anläggningar.

# 1 Inledning

Sot har i alla tider varit förknippat med förbränning i olika typer av eldstäder. Från början ansågs sotbildning som en nödvändig och naturlig följd av förbränningsprocessen. Under det senaste århundradet har dock väsentliga ansträngningar gjorts för att söka minska sotbildningen i olika förbränningsprocesser. Orsaken är att sotbildningen medför en rad negativa effekter varav de viktigaste är:

- miljö- och hälsoeffekter till följd av sotutsläpp
- minskad effektivitet hos pannor etc, dels till följd av förluster i oförbränt, dels till följd av sotskiktets isolerande verkan på värmeupptagande ytor
- risk för soteld i skorstenar till följd av sotbeläggningar i dessa

Bl.a. för att minska risken för soteld, men även för att generellt utöva tillsyn över eldningsanläggningens och rökkanalens funktion och tillstånd, finns i flera länder, bl.a. Sverige, ett system med obligatorisk sotning med givna tidsintervall. Tidsintervallens längd är differentierade med hänsyn till typ av anläggning, bränsle och användningssätt.

Den tekniska utvecklingen av brännare, pannor och andra eldningsanordningar, liksom vissa bränslen, har medfört att sotbildningen och uppkomsten av sotbeläggningar rent generellt har minskat jämfört med tidigare. Exempel på sådana faktorer är optimeringen och förfiningen av tryckoljebrännartekniken, utvecklandet av keramiskt infordrade vedpannor samt utvecklandet av nya, bättre oljekvaliteter.

Det kan direkt konstateras att hur mycket sot som bildas och avsätts i eldningsanordning och rökkanal i det enskilda fallet beror på en rad faktorer. Exempel på sådana är:

- förbränningsanordningens konstruktion
- rökkanalens konstruktion
- använd bränslekvalitet
- anläggningens driftsätt
- skötsel och underhåll
- meteorologiska förhållanden

Vissa av dessa förhållanden styrs av användarens intresse och kunskaper, och stora variationer i dessa avseenden kan därför uppstå mellan olika likartade anläggningar.

Dagens bestämmelser om givna tidsintervall för den obligatoriska sotningen bygger på erfarenheter och kvalificerade bedömningar, men det kvantitativa faktaunderlaget är begränsat. Som framgår ovan är de faktorer som påverkar sotbildningen och -beläggningen mycket komplicerade och svåra att syste-

matisera och kvantifiera. Bedömningen blir en balansgång mellan bedömning av brandrisker, ekonomi samt miljö- och hälsoaspekter.

Det finns därför ett stort behov av att söka ta fram metoder för bedömning av sotbelägningars tillväxttakt och dess inverkan på brandrisken. Sådana metoder skulle kunna bidra till ett bättre beslutsunderlag för hur ofta sotning behöver genomföras inom olika anläggnings- och användarkollektiv.

Som ett led i processen att om möjligt utveckla sådana metoder har en genomgång av befintlig kunskap inom området sotbildning och beläggningens bildning genomförts. Vidare har ett förslag till metodik och utrustning för en fältmetod för bestämning av sotbelägningars tillväxttakt utarbetats, liksom ett valideringsprogram för den föreslagna metoden. Resultatet av detta arbete redovisas i denna rapport.

## 2 Sotbildning - förutsättningar, mekanismer och mätmetoder

### 2.1 Vad är sot?

Sot definieras här som partiklar bildade vid en förbränningsprocess. Dessa partiklar består till största delen av kol, men även mindre mängder syre och väte ingår. Förutom elementärt kol kan sot innehålla oförbrända kolväten (tjära) och viss del aska.

Allt sot som bildas i en flamma emitteras inte från skorstenen. En del oxideras i och efter flammen och en del avsätts på eldstadens och rökkanalens ytor. På dessa ytor kan också askpartiklar och kondenserade oförbrända kolväten avsättas. Avsättningarna i pannan och skorstenen kan fenomenologiskt indelas av Peterson på följande sätt [1]:

Flygsot (löst sot) består huvudsakligen av kol, med små inslag av aska och oförbrända kolväten. Det är pulverformigt och färgen beror på andelen aska (metalloxider)

Blankсот bildar ett fast homogent skikt på kanalväggarna. Det är svårt att avlägsna och innehåller stora mängder tjära. Det har en svart till brunsvart blänkande slät yta och kan var såväl sprött som mjukt. Askhalten är låg.

Knottersot (skrapсот) bildar knottriga ytor på kanalväggarna och är inhomogent med en mängd blåsor. Vidare är det relativt sprött och därför lätt att avlägsna. Det har låg askhalt, högt värmevärde och relativt låg antändningstemperatur.

Smörjsot är sot i skorstenen som har en smörjig och halvflytande karaktär. Ofta innehåller det emulgerat vatten och har en hög antändningstemperatur innan vattnet avdunstat.

Denna indelning säger ingenting om hur sotet har uppstått. För att uppnå en viss systematik i detta avseende delar Peterson in sotbildningsmekanismerna vid vedeldning enligt följande [1]:

- bildning av flamsot, vars partikelstorlek väsentligt understiger  $1\ \mu\text{m}$
- askpartiklar
- oförbrända bränslebitar
- kondenserade kolväten

Det är flamsotet som utgör det egentliga sotet från förbränningsprocessen, i den meningen att det bildas direkt som partiklar i flammen. Vid gas- eller oljeeldning är det endast flamsotet som är av betydelse.

## 2.2 Bildning av flamsot – fenomenologisk beskrivning

Bildning av flamsot har av nödvändighet främst studerats i väldefinierade flammor i laboratorieskala. Dessa studier har dock direkt bäring på de flammor som uppstår i praktiska förbränningsanordningar. Beroende på hur strömningsförhållandena i flammen ser ut skiljer man mellan laminära och turbulenta flammor, och beroende på hur bränsle och luft tillförs skiljer man mellan förblandade flammor och turbulenta flammor. I laminära flammor är strömningshastigheten låg och flammen har en konstant form. I turbulenta flammor är strömningshastigheten högre och flammen byggs upp av i tiden varierande strukturer. Förblandade flammor innebär att bränslet (gas) och oxidationsmedel (luft) blandas före brännaren. I en diffusionsflamma däremot tillförs bränsle och oxidationsmedel däremot separat och blandas först i reaktionszonen. I de flesta praktiska förbränningssystem är flammorna diffusionsflammor, ofta turbulenta.

### 2.2.1 Allmänt

Haynes och Wagner [2] ger i en klassisk artikel en god sammanfattning av den tidiga forskningen om sotbildning. I det följande ges en sammanfattning av deras framställning med vissa kompletteringar från senare forskning.

Sot bildas i en flamma under en mycket kort tidsskala, normalt några få millisekunder. Sotbildningen beskrivs vanligen i termer av sotvolymandelen  $\phi$  ( $\text{cm}^3$  sot/ $\text{cm}^3$ ), antalet sotpartiklar  $N$  per volymsenhet ( $\text{cm}^{-3}$ ) samt storleken hos sotpartiklarna  $d$ . Sotpartiklarna har egentligen en storleksfördelning, som kan beskrivas statistiskt, men förenklat kan en medeldiameter användas.

Sotbildningen kan förenklat beskrivas som en stegvis process. Steg 1 utgörs av bildningen av partikelkärnor ("particle inception") då de första kondenserade partiklarna bildas ur bränslet via oxidations- eller pyrolysisprodukter. Viktiga sådana produkter är acetylen ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) och högre analoger samt polyaromatiska kolväten (PAH), som utgörs av större molekyler uppbyggda av bensenringar. Dessa två grupper utgör således föregångare till sot, och vi återkommer senare till en närmare beskrivning av processen.

Dessa reaktioner leder till bildningen av de första observerbara sotpartiklarna, som är mycket små,  $d < 20 \text{ \AA}$ . Även om ett mycket stort antal partiklar bildas, blir den totala sotmängden därför liten i detta steg.

Partikelkärnorna ökar därefter i storlek genom ytillväxt ("surface growth"), d v s genom att molekyler i gasfas binds till partiklarna. Fig 1 visar schematiskt denna process. Av figuren framgår att om sot, som har en molandel av väte på ca 0,1, skall bildas ur polyacetylen eller PAH så måste andelen väte på något sätt minskas under ytillväxten.

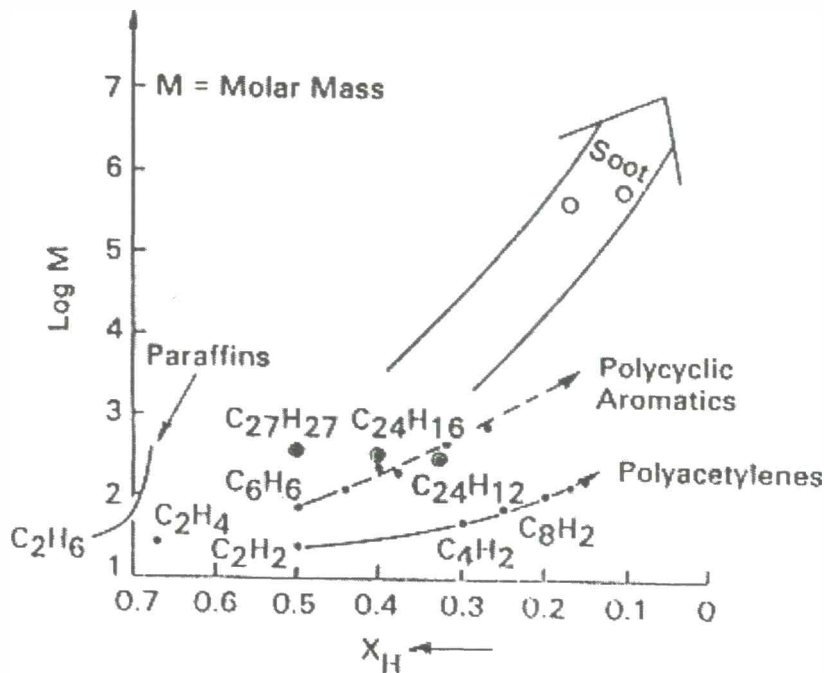


Fig 1: Schematisk framställning av sotbildning. Ur [2].

Ytillväxten innebär att mängden sot ( $\phi$ ) ökar men antalet partiklar (N) förblir konstant. Det motsatta gäller för tillväxt genom koagulering, vilket innebär att partiklar kolliderar och slås samman. I detta fall är mängden sot ( $\phi$ ) konstant, men antalet partiklar (N) minskar. Partikeltillväxten (ökande d) är resultatet av samtidig ytillväxt och koagulering.

Det sot som bildas utsätts till viss del för oxidation, d v s sotet förbränns till CO och CO<sub>2</sub>. Den slutliga emissionen av sot från en flamma bestäms av balansen mellan bildning och oxidation.

### 2.2.2 Sotets utseende

Sot som bildas i en förbränningsprocess är inte entydigt definierat. Normalt är det svart och består huvudsakligen av kol, men vätehalten kan uppgå till ca 10 mol-% eller mera när partiklarna är "unga". Ibland emitteras ämnen som när de kyls ser ut som tjära eller glasliknande material. Färgen kan variera från svart eller brun till gulaktig. Dessa kan bestå av mellanprodukter från sotbildningen eller kondensationsprodukter av tunga kolväten som bildats under förbränningen. De kan också bestå av sotpartiklar på vilka tunga kolväten har kondenserat.

Om sot undersöks i ett elektronmikroskop finner man att det består av sfäriska eller nästan sfäriska grundenheter med diametrar på 200-300 Å. Dessa kallas ofta elementära sotpartiklar, och varje sådan innehåller ca 1 miljon kolatomer. De elementära partiklarna binds samman i raka eller grenade kedjor som bygger upp de makroskopiska sotpartiklarna.

### 2.2.3 Sotbildning i förblandade flammor

Från termodynamisk synpunkt borde sot endast uppstå när förhållandet kol/syre i en flamma överstiger 1, d v s när mängden syre inte räcker till för att oxidera allt kol till CO. I praktiken uppstår sotbildning långt tidigare, ofta då  $C/O \approx 0,5$ . Trots vissa komplicerande faktorer används ofta bestämning av det kritiska C/O-förhållandet då sotbildning börjar i en förblandad flamma för att karaktärisera olika bränslen. Om C/O-förhållandet ökas över det kritiska för ett visst bränsle, ökar sotbildningen snabbt. Det är emellertid inte antalet sotpartiklar så mycket som partikelstorleken som ökar med ökande C/O-förhållande. Det är också värt att konstatera att mängden sot vid ett visst överkritiskt C/O-förhållande för olika bränslen inte har något direkt samband med det kritiska C/O-förhållandet för dessa bränslen.

Tillsats av additiv eller utspädning kan i vissa fall påverka sotbildningen. Vissa metaller minskar sotbildningen även vid halter under ppm-nivå. Inerta gaser minskar sotbildningen något vid konstant temperatur; utspädningen sänker praktiskt dock temperaturen vilket gynnar sotbildningen varför slutresultatet blir en balans mellan dessa effekter. Kväveinnehållande ämnen som  $NH_3$ , NO och  $NO_2$  liksom de svavelinnehållande  $H_2S$  och  $SO_2$  undertrycker sotbildningen och höjer det kritiska C/O-förhållandet.  $H_2$ , CO och kolväten ökar däremot sotbildningen. Samtliga additiv som påverkar sotbildningen gör detta genom påverkan på partikelstorleken, inte antalet partiklar.

### 2.2.4 Sotbildning i diffusionsflammar

De flesta praktiska förbränningssystem använder sig av diffusionsflammar. Detta innebär att bränsle och oxidationsmedel tillförs separat och att förbränningsprocessen är diffusionskontrollerad, eller mer allmänt, blandningskontrollerad. Det är då uppenbart att C/O-förhållandet inte överallt i flammen kan understiga det kritiska för sotbildning. Bildningen och emissionen av sot i en diffusionsflamma beror därför på strömningsförhållandena i flammen.

För att klassificera olika bränslen ur sotbildningssynpunkt har ofta det inversa värdet av den höjd vid vilken en laminär diffusionsflamma i en given brännare börjar sota använts.

Allmänt gäller att ju mindre molekyl, desto mindre tendens till sotbildning. På samma sätt är mera kompakta isomerer med grenade kedjor mera benägna till sotbildning. Acetylen sotar mycket starkt i en diffusionsflamma.

Vad gäller tillsats av additiv och utspädning kan konstateras att inerta gaser, H<sub>2</sub> samt speciellt CO<sub>2</sub> och H<sub>2</sub>O och ännu mer SO<sub>2</sub> undertrycker sotbildningen. Halogener, särskilt brom, gynnar däremot bildning av sot.

#### 2.2.4.1 Diffusionsflammans struktur

För att förstå sotbildning är det instruktivt att studera enkla laminära diffusionsflammar. Wolfhard och Parker [3] utvecklade en spaltbrännare som ger en flat flamma med en oxidantsida och en bränslesida, åtskilda av reaktionszon med dess heta produkter. På en given höjd minskar syrekoncentrationen stadigt från oxidantsidan till bränslesidan och syrehalten är låg där sotbildningen sker. Denna zon uppträder några millimeter åt bränslesidan från området med maximal temperatur. Den karakteriseras av stark luminositet och en stark absorptivitet.

På motsvarande sätt har axialsymmetriska diffusionsflammar studerats, t ex för propan-luft [4]. Sotbildningszonen uppstod också här ca 2 mm åt bränslesidan från området med maximal temperatur. I denna flamma uppstod lokalt mycket höga sotkoncentrationer, upp till  $1 \times 10^{-5}$  g/cm<sup>3</sup>. Partikelstorleken uppmättes till 400-600 Å. Undersökningar av en flat eten/luftflamma visar också att sotet uppstår i en några få millimeter bred zon åt "bränslehället" från området med maximal temperatur. Partikeldensiteten är högst ( $>10^{12}$  cm<sup>-3</sup>) närmast reaktionszonen och minskar snabbt mot bränslesidan.

Då de första sotpartiklarna bildats följer de strömlinjerna in i mer bränslerika områden av flammen. Samtidigt verkar termodiffusionen (en transportmekanism som driver material från högre till lägre temperatur) i samma riktning, mot den kallare bränslezonen, bort från det heta reaktionszonen. Under dessa förhållanden är oxidationen av partiklar knappast signifikant, men yttillväxten har gynnsamma förutsättningar och sotmängden ökar snabbt. Längre in i flammen minskar yttillväxten och sotmängden minskar åter. Under hela denna process koagulerar partiklar och antalet partiklar minskar. Partikelstorleken ökar dock både genom koagulation och yttillväxt.

Analys av pyrolysisprodukter i flamzonen diffusionsflammar av kolväten visar att acetylen, eten, metan, propen samt bensen förekommer i relativt höga halter. Polyaromatiska kolväten förekommer också, men i lägre koncentrationer (<10 ppm).



#### 2.2.4.2 Turbulenta diffusionsflammar

Då bränsleflödet i en laminär diffusionsflamma ökar, ökar den synliga flammhöjden. Slutligen nås turbulenta förhållanden, flamman blir kortare beroende på turbulenta effekter som inblandning av luft. I detta fall är inte längre molekylär diffusion styrande utan eddy-diffusionen (eddy = makroskopiska, i tiden varierande strukturer) kontrollerar blandningsprocessen.

Mätningar av radiella sotkoncentrationsprofiler i turbulenta diffusionsflammar visar en topp som närmar sig centrum längre upp i flamman; dvs sotbildningen försiggår främst i en konisk yta, koncentrisk med flammans axel. Denna zon ligger väl inom den synliga flamman och når axeln vid ca 50 % av flammans höjd. Sot kan längs axeln först påvisas vid ca 20 % av flammhöjden och därefter ökar koncentrationen snabbt till ett maximum som sammanfaller med punkten för maximal temperatur. Efter maximum dominerar förbränningen av sot och koncentrationen sjunker.

#### 2.2.5 Oxidation av sot

Den synliga emissionen av sot från en förbränningsanordning är vanligen mycket mindre än den mängd som bildats i processen. En avsevärd andel av sotpartiklarna förbränns i syrenehållande områden nedströms sotbildningszonen. Hur oxidationen går till är inte till fullo känt idag. Nagle och Strickland-Constable [5] formulerade en mekanism för oxidation av pyrografit, som länge använts även i sotsammanhang. Modellen bygger på det finns två typer av aktiva säten på kolytan som syremolekyler kan angripa. Denna mekanism kan förklara reaktionshastigheter under en rad olika betingelser, men det är troligt att även OH-radikaler och O-atomer kan spela en roll i oxidationen.

### 2.3 Flamsot - kemiska modeller

Haynes och Wagner [1] ger även en sammanställning av kemiska modeller för sotbildning. Då mycket har hänt sedan 1980-talet baseras följande framställning istället på Mauss doktorsavhandling [6] som utgör en central genomgång av dagens kunskapsnivå.

#### 2.3.1 Allmänt

Utgångspunkten för modern sotbildningsteori är att partikelbildning sker genom koagulering av polyaromatiska kolväten (PAH). Dessa partiklar har en massa på ca 2000 atommassenheter och motsvarar en storlek som är den minsta som kan observeras i ett elektronmikroskop. Samtidigt är det de minsta partiklar som ger upphov till det gula ljus som är typiskt för närvaro av sot i en flamma.

PAH-molekylerna bildas i huvudsak ur acetylen,  $C_2H_2$ . För att nå en storlek på 2000 amu åtgår det ca  $2 \times 40$  acetylenmolekyler. De reaktionshastigheter som kan beräknas för bildning av PAH ur acetylen och tillväxt av PAH räcker inte till för att förklara experimentellt observerade sotbildningshastigheter. Om man däremot antar en "reaktiv koagulering" mellan PAH-molekyler kan experimenten förklaras. Begreppet innebär att efter kollision mellan två PAH-molekyler sker en kemisk reaktion som stabiliserar den nya, större molekyl. Vid koaguleringen mellan plana PAH-molekyler uppstår de första tredimensionella strukturerna ur gasfasen, d v s partiklar bildas.

Koaguleringen sker principiellt enligt klassisk rörelseteori, där den fria våglängden mellan två kollisioner antas vara mycket större än partiklarnas diameter. Varje kollision innebär att partiklarna koagulerar. Mauss hävdar också att s.k. "van der Waalskrafter" mellan partiklarna bidrar till en högre sannolikhet för kollision.

Ytprocesserna delas upp i tre delprocesser; kondensation av molekyler ur gasfasen på partikelytan liksom anlagring av kolväten på grund av heterogena reaktioner innebär tillväxt av partiklarna. Nya aromatiska strukturer bildas på detta sätt. Den tredje delprocessen utgörs av oxidationsreaktioner på partikelytan, d v s utbränning av sotet.

### 2.3.2 Beräkningsmodeller för sotbildning

Den första modellen för beräkning av partikeltäthet i flammor utvecklades av Tesner [7]. I denna modell antogs sotpartiklar (N) bildas ur "aktiva partiklar" (n). Följande ekvationer uppställdes:

$$\frac{d(n)}{dt} = \eta_o + (f-g) [n] - g_o [N] [n] \quad (1)$$

$$\frac{d(N)}{dt} = (a-b [N]) [n] \quad (2)$$

Den spontana bildningshastigheten för aktiva partiklar ( $\eta_o$ ) antogs vara beroende av acetylenkoncentrationen. I (1) ingår vidare en förgrenningsreaktion  $f$  och en termineringsreaktion  $g$ , som inte beskrevs närmare. Den sista termen i (1) beskriver deaktivering av aktiva partiklar genom kollisioner med sotpartiklar. Sotbildningen antogs ske enligt en global reaktion där 25 st  $C_2H_2$  reagerade med en "aktiv partikel". Tesners modell är rent empirisk och tar inte hänsyn till koagulering eller yttillväxt. Ändå kunde modellen framgångsrikt användas av Magnussen för att modellera sotbildningen i turbulenta flammor. Förklaringen är att endast partikelkoncentrationen och inte sotvolymandelen beräknas. Partiklarnas tillväxt genom koagulering och yttillväxt spelar då ingen roll.

Tesners modell beskriver även med dagens kunskap partikelbildningen väl, om de aktiva partiklarna antas vara små PAH-molekyler, som växer genom addition av acetylen. Termineringsreaktionen ”g” kan beskrivas som oxidation eller fragmentering av PAH.

Senare har Lindstedt föreslagit en modell som bygger på en global reaktion



för bildningen av de första sotpartiklarna. Tillväxten av sotpartiklarna antogs ske via acetylenmolekyler. Modellen möjliggör beräkningar av både partikelkoncentration och sotvolymandel, som överensstämmer väl med experimentella data för olika flammor.

Den mest aktuella modellen har utvecklats av Frenklach [8] och används av Mauss i hans avhandling. Modellen innebär att sotbildningen indelas i tre steg efter kemiska elementarreaktioner. I det första steget bildas polyaromatiska kolväten ur bensen. Ett stort antal ingående elementarreaktioner delas in i reaktionsklasser. I det andra steget beskrivs tillväxten av PAH-molekylerna som en linjär polymerisation. Det tredje steget beskriver den egentliga partikelbildningen ur PAH, liksom ytprocesser och koagulering. Modellen innefattar ett stort antal kemiska ämnen och använder sig av statistiska momentfunktioner för att beräkna partikelstorleksfördelning, partikeltäthet och sotvolymandel. För närmare beskrivning av modellen hänvisas till Mauss avhandling.

En översiktlig, men aktuell, genomgång av modeller för sotbildning finns tillgänglig på internet (författare Michael Frenklach); <http://chemistry.anl.gov/bkd.soot.html>.

## 2.4 Mätmetoder

Bestämning av sotvolymandel och partikeldiameter i flammor är relativt komplicerad. En rad olika tekniker har använts i olika sammanhang. Ofta har optiska metoder använts där sotets egenskaper att påverka ljusstrålar utnyttjats. Också extraktiva metoder, som kopplats till masspektrometri och/eller elektronmikroskopi har kommit till användning. Gemensamt är att dyrbar och komplicerad utrustning krävs. Nedan ges en kort sammanfattning av några alternativ.

### 2.4.1 Optiska metoder

Optiska metoder har fördelen att mätningen inte påverkar processerna i flammen, eftersom inga provtagningssonder krävs. En nackdel är att sotets optiska egenskaper inte är så väl kända och att dessa troligen kan variera beroende på bränsle och var i flammen man mäter, d v s hur ”gammalt” sotet är.

Den optiska teknik som använts mest är extinktion (utsläckning). Denna innebär att man mäter hur mycket av ljusenergin en stråle som sänds genom flammen som absorberas på vägen. För sfäriska, absorberande partiklar är extinktionskoefficienten beroende av antalet partiklar per volymsenhet och partikeldiametern och därmed proportionell mot sotvolymandelen. Metoden används därför ofta för mätning av sotbildningen i en flamma. En svårighet är att även andra ämnen än sot kan absorbera i den synliga och UV-områdena, vilket stör mätningen. Jämförelser mellan gravimetriska metoder och extinktionsmetoder har i flera fall visat att optiska metoder överskattar sotvolymandelen, speciellt tidigt i en flamma där partiklarna är små.

Ljusspridning ("light scattering") är en annan teknik som används. Här används polariserade ljusstrålar, vars spridning då det träffar partiklar mäts upp. En kombination av extinktions- och ljusspridningsmätning möjliggör bestämning av medelvärde för partikeldiametern och antalet partiklar per volymsenhet.

#### 2.4.2 Extraktiva metoder - termodiffusion

Extraktiva metoder har främst utvecklats med syfte att studera sotets morfologi, dvs hur partiklarna ser ut. Som exempel på sådana metoder skall här kortfattat beskrivas arbeten av Dobbins et.al. [9], som bygger på sotets termodiffusion. Termodiffusion innebär att partiklar som befinner sig i en temperaturgradient mellan heta gaser och en kall yta kommer att dras till den kalla ytan och avsätta sig där. Processen är väsentlig vid bildning av sotbeläggningar, vilket diskuteras i kap. 3, men utnyttjas av Dobbins et.al. för sotprovtagning i en flamma. En sond bestående av en hållare med en 3 mm stor mikroskopisk nätstruktur hålls vid rumstemperatur och förs därefter under en mycket kort tid in i flammen. Partiklar deponeras därvid på nätstrukturen och kan senare undersökas med olika tekniker. Exponeringstiden skall vara så lång att tillräckligt stort sotprov erhålls, men så kort att ytan inte värms upp signifikant. I praktiken innebär detta tider på ner till några tiotal millisekunder och med hjälp av speciella styrsystem kan in- och utförande av sonden ske på ännu kortare tider till en noggrant definierad position i flammen.

Proverna som erhålls kan därefter analyseras med elektronmikroskop (SEM eller TEM), masspektrometri eller andra metoder. Förutom information och sotpartiklarnas struktur kan närvaron av olika föregångare ("precursor") påvisas och i kombination med optiska metoder kan bestämningen av partikeldiameter, sotvolymandel etc förfinas.

### **KORTFAKTA**

- Sot i pannor och skorstenar kan uppträda som flygsot, blanksot, knottersot och smörjsot.
- Flamsotet består av partiklar vars diameter understiger 1  $\mu\text{m}$ . Det bildas i syrefattiga områden i flamman. Partiklarna bildas ur eten och bensen via polyaromatiska kolväten. Partiklarna tillväxer dels genom ytillväxt, dvs genom att gasmolekyler binds till partiklarna, och dels genom att partiklar slås ihop, koagulerar.
- Sotbildningen i flammor kan mätas med optiska metoder, t.ex. extinktion och ljusspridning, samt med hjälp av extraktiva metoder, t.ex. termodiffusion.

## 3 Deposition av sot och aska

Sot som lämnar flamzonen och inte oxideras omedelbart därefter förs med förbränningsgaserna vidare i pannan och ut i rökkanalen. En del av detta sot avsätts på pannväggar och rökkanalens ytor. Hur stor andel som avsätts beror på en lång rad faktorer såsom:

- pannans geometriska förhållanden
- gasernas strömningshastighet
- temperaturförhållanden
- dragförhållanden
- sotkoncentrationen
- typ av sot.

Till detta kommer att även flygaska som följer med rökgaserna avsätts på väggarna, liksom vid ofullständig förbränning, kondenserade tunga kolväten. Detta innebär att det är oerhört svårt att i detalj förutsäga avsättningshastigheter i praktiska anläggningar. Speciellt gäller detta i mindre anläggningar med dess små dimensioner och komplexa geometrier.

Med tillämpning på främst större pannor har en del studier gjorts av mekanismer för avsättning. I det följande ges en sammanfattning som baseras på Benson et.al [10] Deras beskrivning är främst inriktad på avsättning av aska i större förbränningsanordningar, men är av intresse för att förstå de grundläggande förloppen.

### 3.1 Grundläggande mekanismer

Transport av partiklar till en yta kan ske med hjälp av flera mekanismer beroende på partikelstorleken. De minsta partiklarna ( $<1\mu\text{m}$ ) transporteras med hjälp av diffusion, dvs ”slumpmässiga rörelser”. För något större partiklar ( $<10\mu\text{m}$ ) blir även termodiffusion (”thermophoresis”) viktig. Termodiffusion innebär att partiklar transporteras längs en temperaturgradient i riktning från varmt till kallt. Större partiklar ( $>10\mu\text{m}$ ) transporteras och avsätts på ytor främst beroende på tröghetskrafter som hindrar dem att följa gasens strömningslinjer. Detta kräver att partiklarnas massa är tillräckligt stor. Omvänt gäller att för små partiklar är tröghetskrafterna så små att de följer gasens strömningslinjer. Avsättningar på grund av partiklarnas tröghetskrafter (eller impaktering) uppstår därför då gasströmmen tvingas ändra riktning på grund av pannans konstruktion. Om en värmeväxlartub placeras i en ström av förbränningsgaser innehållande partiklar kommer stora partiklar att avsätta sig på grund av impaktering på tubens framsida, medan resten av tubens ytteryta kommer att beläggas av finare partiklar, som transporteras dit genom diffusion och termodiffusion. Fig 2 åskådliggör de olika mekanismerna för avsättning av partiklar.

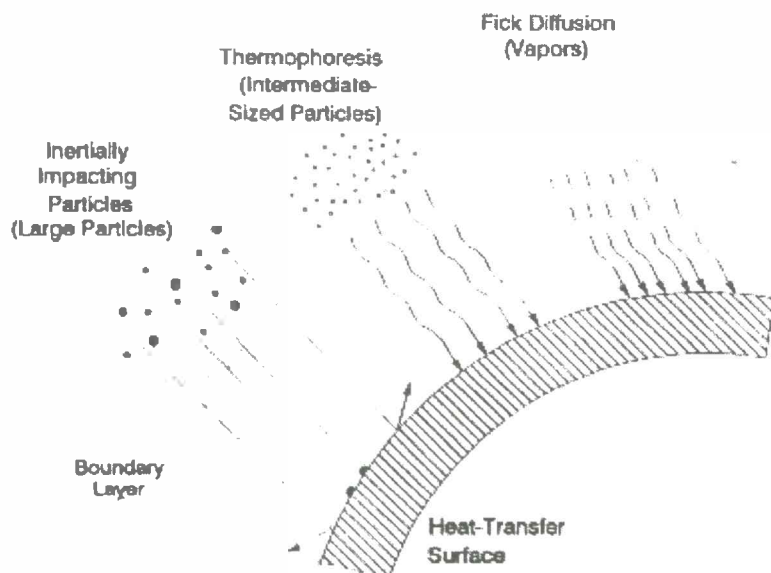


Fig. 2: Mekanismer för avsättning av partiklar. Ur [10].

För att beskriva hur stor andel av partiklar som anströmmar en yta används flera olika effektivitetsbegrepp. Impakteringseffektiviten anger den andel av partiklarna som verkligen träffar ytan av alla som närmar sig en yta. Infångningseffektiviteten (capture efficiency) anger den andel av partiklarna som fastnar på ytan av de som träffar ytan. Avsättningseffektiviteten (collection efficiency) definieras som produkten av impakteringseffektivitet och infångningseffektivitet och utgör då den andel av alla partiklar som närmar sig en yta som avsätts på ytan.

En rad modeller har utvecklats för att beräkna avsättningshastigheter för partiklar under olika förhållanden. Modellerna utgår ofta från enkla geometrier som är relevanta i större pannor, t ex enstaka cylinder i tvärström, tubbankar och strömning i en tub eller längs en vägg. Benson et.al. [10] ger en översikt över dessa arbeten. Vad gäller strömning längs en vägg, komplicerar två faktorer möjligheten att beräkna avsättningshastigheten. Det första är skrovligheten i väggen, som normalt ökar då avsättningarna ökar. Den andra är inverkan av termodiffusionen, som kan vara signifikant. I en modell utvecklad av Greenfield och Quarini [11] har denna studerats speciellt. Även Rosner [12] har gjort viktiga insatser för att undersöka termodiffusionens betydelse.

Sammanfattningsvis kan konstateras att en hel del arbete gjorts för att studera och modellera avsättningsars uppkomst i förbränningsammanhang. Mycket är dock inriktat på förbränning av kol i stora pannor. I detta fall är det oorganiska komponenter, aska, som i första hand ger upphov till olika bränslen och förbränningsbetingelser vilket ger upphov till motsvarande variationer i beteendet vad gäller beläggningar. Jämfört med sot uppstår ofta kompaktare beläggningar. De grundläggande mekanismerna torde dock vara desamma även för organiskt material i form av sot.

## 3.2 Mätmetoder

Peterson [1] diskuterar olika metoder att mäta sotbeläggningar i en panna eller skorsten. De metoder som där föreslås är ”globala” i den meningen att de ger medelvärden över hela den belagda ytan. Andra metoder, som innebär att sonder monteras i pann- eller rökkanalväggen ger lokala värden.

### 3.2.1 Direkt metod

Den mest direkta metoden är att väga ut mängden sot som erhålls vid rensning av panna respektive skorsten. På detta sätt erhålls ett ”medelvärde” både över hela den yta i pannan eller skorstenen som sotas och över tiden som gått sedan föregående sotning. Metoden ger således ett bra ”globalt” mått på sotbeläggningarna i den enskilda anläggningen, men säger ingenting om hur beläggningen tillväxer över tiden, eller hur skiktjockleken varierar mellan olika delar av ytorna. En komplicerande faktor är att korrosionsprodukter från stålskorstenar och sten och bruk från tegelskorstenar kan rivs loss vid sotningen och därmed ingå i det material som vägs in.

Om även volymen av det erhållna sotet bestäms kan en fiktiv medelskiktjocklek beräknas om den totalt sotade ytan är approximativt känd. Detta har ett visst intresse framför allt för att få en bild av förändringar i en pannas effektivitet. En osäkerhetsfaktor är dock att densiteten vid volymbestämningen kan skilja sig från den verkliga i sotskiktet. Detta torde dock inte hindra en approximativ beräkning. Ett alternativt sätt att göra ett väl grundat antagande om densiteten hos det ursprungliga skiktet och räkna om mängden sot till en fiktiv skiktjocklek med hjälp av denna.

En variant på den direkta metoden är att hänga in plåtbitar i skorstenen och efter en tid ta ut och väga det som avsatts på plåtarna. Denna metod användes i en tysk undersökning som återges i kap 4 och man fann god överensstämmelse mellan avsättningar på skorstensväggarna och på de inhängda plåtbitarna. Metoderna lider dock av vissa praktiska begränsningar; t ex hanteringen av proverna så att inte sot faller av före vägning samt vägnoggrannheten. Denna direkta metod lämpar sig främst för bestämning av sotmängderna i skorstenen. Principiellt kan den även tillämpas i en panna, men det är viktigt att sotningen sker mycket noggrant.

### 3.2.2 Indirekt metod

Peterson´s indirekta metod bygger på att mäta förbränningsgasernas temperatur omedelbart efter pannan vid olika tillfällen för att därmed bestämma hur mycket pannans värmeupptagande förmåga försämras i tiden. Metoden använder sig av en modell för pannans konvektionsdel som en värmeväxlare och förutsätter att storheter som förbränningsgasernas temperatur vid inträdet i pannans konvektionsdel, pannvattentemperaturen, pannans konvektionsyta och dess k-värde samt flödet av förbränningsgaser och dess värmekapa-



citivitet är åtminstone approximativt kända. Genom att mäta rök-gastemperaturen dels vid nysotad panna, dels vid ett senare tillfälle erhålls den genomsnittliga sotavsättningshastigheten för perioden mellan mätningarna. Vissa av nödvändiga ingångsdata är lätta att få fram, andra svårare. Speciellt gäller detta sotets värmeledningsförmåga, som dock Peterson anger en approximativ metod för bestämning av.

Metoden har använts bl a i en oljeeldad panna där man visat att sotskiktets tillväxt avstannar efter viss tid, olika beroende på vilket sotal pannan drivs vid.

För oljepannor, där förbränningsbetingelserna i princip är konstanta i tiden, torde metoden vara relativt tillförlitlig. Den ger dock ett fiktivt medelvärde på sotskiktets tjocklek som motsvarar sotets isolerande verkan och inte skiktets verkliga tjocklek. Ur brandskyddsteknisk synpunkt är det dock ett fullt relevant mått.

För vedeldade pannor torde dock metodens användbarhet vara mindre klar, eftersom förbränningsprocessen och därmed rök-gastemperaturen varierar i tiden under en brasa. Metoden förutsätter då att förbränningsprocessen förlöper på liknande sätt vid de båda ”mätbrasorna” och att mätningen av rök-gastemperaturen sker under motsvarande tidsperioder. Det första villkoret torde vara svårt att upprätthålla exakt, åtminstone för pannor med överförbränning.

En allmän bedömning är att den indirekta metoden är principiellt tilltalande, men lider av vissa praktiska begränsningar.

### 3.2.3 Sondmetoder

Då fasta bränslen, t ex kol eller träflis, eldas i större anläggningar med nära nog fullständig förbränning uppstår ofta beläggningar av slagg och aska på värmeväxlarytor i pannan. Dessa beläggningar minskar snabbt upptagningen av värme och kan dessutom vara korrosiva. Stora ansträngningar har därför lagts ned på att studera vad dessa beläggningar består av och under vilka förhållanden de uppstår. I det sammanhanget har ofta sonder, som monterats in i pannväggarna, använts. Sonderna, som utförs så att de avviker lite som möjligt från övriga väggar utförs med tryckluft- eller vattenkylning så att ytan kan hållas vid en kontrollerad temperatur, lika övriga väggen. Ofta finns flera termoelement inlagda på olika djup, så att värmeflödets förändring i tiden då beläggningen byggs upp kan studeras. Givetvis kan även sonden tas ut och beläggningsskiktet mätas, ev vägas eller studeras på andra sätt. Exempel på sådana sonder ges av Kallner & Zintl [13], LeVert et.al. [14] samt Hanson & Abbot [15].

I princip skulle liknande sonder kunna användas även för att mäta sot-beläggningars tillväxttakt. Det finns dock en del praktiska begränsningar som måste beaktas. För det första erhålls av nödvändighet mycket lokala värden. För att få en mera översiktlig bild i en panna krävs ett antal sonder.

Det är också många gånger svårt att komma åt att montera sondaerna. Om sondaerna skall hållas vid konstant temperatur krävs kylutrustning (luft eller vätska) för varje sonda. Det är dock möjligt att kravet på temperaturreglering kan efterges i vissa fall när det gäller mätning av sotbeläggningar. Ett problem är att göra sondaerna så stora att tillräcklig sotmängd för att möjliggöra vägning erhålls. Liknande metoder har dock använts i en undersökning som relateras i kap 4.

### 3.2.4 Mätning av sotemission

Emissionen av sot är resultatet av sotbildning minskat med oxidation och avsättningar i panna och rökkanal före mätpunkter. Att mäta emissionen är därför inget direkt mått på hur sotbeläggningarna tillväxer. Ändå torde det finnas en kvalitativ korrelation på så sätt att en anläggning som drivs med höga utsläpp av sot också drabbas av kraftigare beläggningar i panna och rökgaskanal. Det finns därför ett uppenbart intresse av att kunna mäta emission av sot. En kort genomgång av några metoder skall därför ges.

#### 3.2.4.1 Optisk metod (Bacharach-metoden)

I Bacharach-metoden mäts svärtningen av ett filterpapper genom vilket en viss rökgasvolym sugits. Provytan, som är liten ( $\varnothing = 3$  mm), jämförs med en tiogradig skala, där  $<1$  i princip motsvarar ingen svärtning och  $>9$  motsvarar helt svart yta. Metoden är enkel, kräver enkel utrustning och används i stor utrustning för mätning på oljepannor. Den ger mycket god vägledning vid injustering av oljebrännare och är väletablerad.

Metoden ger emellertid inget kvantitativt mått på sotkoncentrationen i rökgaserna Peterson [16] har dock visat att svärtningen kan beskrivas med exponentialfunktion där ingående konstant beror av sotets färg och genomsnittliga partikelstorlek. Mavroudis har också gjort en kalibrering av Bacharachmetoden för vedeldning [17] och kommer fram till att typen av ved samt fukthalten hos denna påverkar svärtningen. Det är därför omöjligt att hitta ett entydigt samband mellan sotal och partikelkoncentration rökgasen för olika bränslen. Det är också så att sotalen ofta överstiger skalan vid traditionell vedeldning, om man enligt föreskrifterna använder tio pumpslag vid provtagningen.

Sammanfattningsvis kan sägas att Bacharach-metoden är enkel och tillförlitlig för att justera in och kontrollera oljebrännare, men inte användbar för att absolut bestämma sothalten i rökgaserna.

Optiska metoder finns också för större anläggningar, där ljus skickas tvärs genom rökgaserna i skorstenen till en detektor, som mäter ljusabsorptionen. Även dessa metoder är främst jämförande och för att erhålla någorlunda kvantitativa värden på stofthalten måste omfattande kalibreringar göras mot gravimetriska mätningar under liknande förhållanden.

### 3.2.4.2 Gravimetriska metoder

Den exponerade filterytan i Bacharachmetoden är liten. Detta innebär att den uppsamlade mängden partiklar är för liten för att vägas. Om emellertid en bestämd volym rökgas sugs genom ett filter med större yta, t ex planfilter med  $\varnothing = 90$  mm eller hylsfilter så kan mängder som är tillräckliga för invägning erhållas (några mg och uppåt). Denna princip har under lång tid använts för bestämning av stoftutsläpp från större anläggningar och ligger till grund för bl a nu gällande internationell standard [18]. Nackdelen är att apparaturen normalt är relativt komplicerad och otymplig och därför olämplig för mätning i villaanläggningar och liknande.

I Tyskland använder skorstensfejarna en förenklad gravimetrisk metod för mätning av partikelutsläpp från fastbränsleeldade mindre anläggningar, t ex villapannor. I denna variant används ett litet hylsfilter av drygt en fingerborgs storlek för uppsamling av partiklar. Hur provtagningen skall gå till finns fastställd i den tyska miljöskyddslagstiftningen [19], [20]. Provtagningen innebär att 135 m<sup>3</sup>n rökgas sugs genom filtret under en tidsperiod på 15 min. Filtret, som vägts in i rent och torrt tillstånd före mätningen, samlar upp rökgasprovets innehåll av stoft, sot och tjära, d v s de partiklar som både utgör en miljöstörning och som bildar beläggningar i panna och rökkanal. Filtret vägs därefter in igen under kontrollerade förhållanden och med hjälp av viktskillnaden samt den utsugna rökgasmängden kan rökgasens halt av partiklar beräknas.

Flera instrument av denna typ finns på den tyska marknaden och dessa är både fältanpassade och hanterbara. Eftersom kravet på mätningar har funnits länge i Tyskland, torde både instrument och metod vara väl utprovade. Åtminstone ett av instrumenten kan dessutom mäta CO och ger då ett medelvärde av CO-halten i rökgaserna över provperioden.

För bestämning av partikelhalt i rökgaser från mindre anläggningar torde denna metod och denna utrustningstyp vara mest anpassad av de som studerats. Ett kvantitativt mått på partikelemissionen erhålls på ett relativt enkelt sätt och utan andra krav på förberedelser i anläggningen än ett mindre mått i rökkanalen. Hur denna metod skulle kunna utnyttjas för att indirekt få ett mått på sotbeläggningars tillväxttakt återkommer vi till i kap 8.

## KORTFAKTA

- Avsättning av sot och aska i pannor och rökkanaler kan beroende på partikelstorlek ske genom diffusion ("slumpmässiga rörelser"), termodiffusion (partiklarna vandrar från högre till lägre temperatur) och genom tröghetskrafter.
- Mätning av beläggningar kan ske genom vägning av erhållen sotmängd vid rensning, indirekt genom mätning av förändring i rökgastemperatur eller med hjälp av sonder som monteras i den aktuella ytan. Samtliga metoder är förknippade med praktiska svårigheter.
- Mätning av sotemission kan ske med Bacharach-metoden (oljeeldning) eller gravimetriska metoder där partiklarna i en viss rökgasmängd samlas upp på ett filter som vägs. En variant av gravimetrisk metod tillämpas rutinmässigt av skorstensfejare i Tyskland för mätning på små fastbränsleeldade anläggningar.

# 4 Sotbeläggningsars tillväxttakt

## 4.1 Laboratorie-och fältundersökningar

Trots sotbildningens ekonomiska och miljömässiga betydelse har få systematiska undersökningar gjorts av hur sotbeläggningar tillväxer under olika förutsättningar. Peterson [1] redovisar enstaka försök i pannor som drivits lång tid utan normal sotning. Inga försök att mäta sotbeläggningsarnas tillväxt gjordes, men med jämna mellanrum eldades standardbrador, varvid rökgastemperatur, CO<sub>2</sub>-halt och drag mättes. Underlaget är för litet för att dra statistiskt säkerställda slutsatser ur, men efter en tid kunde konstateras att så mycket sot ansamlats på pannornas konvektionsytor att soteld i pannan uppstod. Därmed ”rengjordes” pannans konvektionsytor och risken för soteld i rökkanalen minskade åter.

En mera omfattande undersökning av sotbeläggningsars tillväxttakt under praktiska förhållanden genomfördes i början av 1980-talet i Nordrhein-Westfalen i Tyskland [21]. Undersökningen omfattade dels laboratorieförsök med flytande, fasta och gasformiga bränslen under väldefinierade förhållanden, dels fältundersökningar i ett antal anläggningar av olika typ och med varierande bränslen. Eftersom denna undersökning är den mest omfattande som kunnat spåras ges här ett relativt fylligt referat av metoder och resultat.

Vid laboratorieförsöken med oljeeldning kördes dels tre identiska pannor anslutna till tre identiska skorstenar men med tre olika sotal (3, 6, 9), dels fyra identiska pannor anslutna till fyra olika skorstenstyper men vid samma sotal (9). De senare pannorna eldades under 450 h och var 100:e timme mättes sotskiktets tjocklek dels på luckor i skorstensväggen, dels på plåtar som hängts inuti skorstenen. Dessa plåtar var tillverkade i samma material som skorstenens väggar. Luckorna och plåtarna var monterade på olika höjder i skorstenen. Var 100:e timme rengjordes panna och anslutningsrör och det uttagna sotets massa och volym bestämdes.

De sotmängder och volymer som i försöken med olika skorstenar erhöles från panna och anslutningsrör var relativt konstanta i tiden. För pannorna erhöles ca 1800 cm<sup>3</sup> sot (ca 100 g) och för anslutningsrören ca 200 cm<sup>3</sup> sot (ca 150 g) per 100 h drifttimmar. Detta visade att sotbelastningen på skorstenen var relativt konstant i tiden. Sotbeläggningsen i skorstenarna tillväxte relativt konstant i tiden. Först efter 100 drifttimmar var beläggningsarna mätbara, d v s >0,5 mm. Efter 450 drifttimmar kunde, oberoende av höjden i skorstenen och om mätningen gjordes på luckor i skorstenen eller på de inhängda plåtarna, en skiktjocklek på 2-3 mm uppmätas. En antydan till större skiktjocklek i de nedre delarna av skorstenen kunde dock konstateras.

Vad gäller beroende av skorstensform (kvadratisk eller cirkulär) eller tvärsnittsytta (140 x 140 mm,  $\varnothing = 160$  mm, 160 x 160 mm eller 180 x 180 mm) kunde inga signifikanta skillnader i skiktjocklek konstateras. Inte heller inverkade väggtemperaturen i skorstenen, signifikant; ena halvan av skorstenarna var isolerad, medan andra var oisolerad.

Inverkan av olika skorstensmaterial studerades i den största skorstenen. Inga signifikanta skillnader i skiktjocklek mellan plattor av keramik resp rostfritt stål kunde konstateras.

Vid försöken med identiska anläggningar som drevs med olika sotal vägdes hela anslutningsröret med jämna mellanrum. Dessutom mättes skiktjocklekarna på ett antal punkter i anslutningsrören, som innefattade två st 90 ° böjar, samt på skorstenens botten. Resultaten framgår av Tabell 1.

**Tabell 1:** Sotmängder vid oljeeldning under 650 h med olika sotal. Ur [21].

	Sotal		
	3	6	9
Massa i anslutningsrör, g	40	40	260 (450 h)
Skikt på skorstenens botten, mm	≈ 0	≈ 0	200 (450 h)

För anläggningarna med sotal 3 och 6 kunde alltså inga större skillnader i sotillväxt konstateras; anslutningsrörens viktökning var ca 40 g efter 650 drifttimmar. För anläggningen med sotal 9 uppnåddes däremot en viktökning för anslutningsröret på ca 60 g redan efter 200 drifttimmar. Därefter inträffade en rökgasexplosion och efter 450 h måste försöket avbrytas. Då var viktökningen i anslutningsröret ca 260 g. Skiktjockleken i första böjen av anslutningsröret var vid samma tillfälle ca 45 mm.

För anläggningarna med sotal 3 och 6 kunde inget mätbart sotskikt konstateras på skorstenens botten vid försökens slut (635 h). För anläggningen med sotal 9 uppmättes ett kraftigt sotlager, ca 200 mm, vid försökets slut (450 h).

Vad gäller sotskiktets tjocklek på plåtar inhängda i skorstenen så kunde ingen mätbar beläggning konstateras för anläggningarna med sotal 3 och 6. En skillnad i svärtningsgrad beroende på avståndet från skorstensinloppet kunde dock konstateras. För anläggningen med sotal 9 uppmättes i skorstenens nedre del skiktjocklekar på 5-6 mm i mitten av provperioden. Därefter minskade skiktjocklekarna troligen p g a att sot lossnat av egenvikten eller påverkan av varierande strömningshastighet. Vid försökets slut var massan av sotet ungefär lika stor (ca 250 g) i pannorna med sotal 3, 6 och 9. Däremot ökade sotvolymen drastiskt med sottalet; sotet blev alltså mera poröst och flockigt. För pannorna med sotal 3 och 6 uppmättes mindre än 50 g sot i vardera anslutningsrör, skorstenens botten och skorsten, medan för anläggningen med sotal 9 mera sot uppmättes i samtliga dessa delar än i själva

pannan. Uttryckt i volym var skillnaderna för dessa delar ännu större mellan anläggningarna med sotal 3 och 6 resp med sotal 9.

Utgående från uppmätta resultat gjordes en extrapolation av sotmassor och volymer till 1850 drifttimmar. För anläggningar med sotal 3 och 6 erhöles 6-800 g sot i pannan och för sotal 9 ca 1100 g sot i pannan. I anslutningsrör, skorstensfot och skorsten erhöles små mängder för anläggningar med sotal 3 och 6, men 1000-2400 g respektive för anläggningen med sotal 9. Uttryckt i sotvolym blev dessa skillnader än större, med 12000-24000 cm<sup>3</sup> för de olika delarna i en anläggning med sotal 9.

Vid laboratorieförsöken med fasta bränslen användes dels en kokseldad panna, dels tre koleldade kaminer, anslutna till samma skorsten. För den kokseldade pannan kunde efter förbränning av 1000 kg koks ett sotskikt på 11 mm konstateras i inloppet av anslutningsröret, men mindre än 0,5 mm i utloppet till skorstenen. Totalt avlagrades 295 g sot, eller 620 cm<sup>3</sup>, i anslutningsröret (längd ca 2 m, 2 x 90 ° böjar, Ø = 160 mm) under provet. I skorstenen kunde inte på någon punkt sotskikt överstigande 0,5 mm konstateras. Då skorstenen rensades erhöles 55 g (80 cm<sup>3</sup>) sot. På skorstensfoten uppmättes efter provets slut ett sotskikt på ca 4 mm (105 g, 200 cm<sup>3</sup>).

Kaminerna, som var anslutna på olika våningar till samma skorsten, eldades dels med 1000 kg antracit, dels med 250 kg flamkol. Resultaten framgår av Tabell 2.

**Tabell 2:** Sotskiktstjocklekar vid eldning i kaminer av antracit resp. flamkol. Ur [21].

	1000 kg antracit	250 kg flamkol
I anslutningsrör, mm	2,5 - 13	1 - 23
I skorsten, mm	< 1,5	< 3,5

Efter 1000 kg antracit uppmättes alltså 2,5 - 13 mm sot i olika delar av kaminernas anslutningsrör. Efter 250 kg flamkol uppmättes 1-23 mm sot på motsvarande ställen. Störst skiktjocklek uppmättes närmast kaminerna. I skorstenen kunde efter 1000 kg antracit skiktjocklekar på max 1,5 mm uppmättes. Efter 250 kg flamkol var sotskikten tjockare, upp till 3,5 mm.

Vid laboratorieförsöken med gasformigt bränsle användes en atmosfärisk gaspanna som eldades under 450 h. Som förväntat kunde inga sotbeläggningar konstateras i panna eller skorsten.

Fältundersökningen genomfördes under eldningssäsongen 1982-83. I undersökningen ingick 34 st oljeeldade anläggningar, 46 st gaseldade anläggningar, och 16 st fastbränsleeldade anläggningar (2 st kokspannor och 14 st varmluftaggregat) samt 96 st skorstenar med flera fastbränsleeldade lokaleldstäder anslutna.

Undersökningen inleddes med en sotning på hösten och avslutades med en ytterligare sotning efter fastställt tidsintervall (oftast 90 dagar) under vin-

tern. Vid dessa sotningar bestämdes dels massa och volym för det sot som lagrats på skorstenens botten, samt d:o för det sot som rensades ut ur skorstenen. För de oljeeldade anläggningarna bestämdes även sotvolym och -massa i anslutningsröret. Dessutom genomfördes för dessa anläggningar mätningar av rökgastemperatur, CO<sub>2</sub>-halt, sotal samt skorstensdrag.

Ca 75 % av de oljeeldade anläggningarna hade en märkeffekt av 25-55 kW; resten var större. I ca 95 % av anläggningarna uppmättes sottalet till 1,2 eller 3, med 65 % som sotal 1. Brännarna var således inställda för god förbränning. Resultaten visade stora variationer i sotmängderna. I genomsnitt uppmättes ca 500 cm<sup>3</sup> sot totalt för skorstenens botten, skorsten och anslutningsrör efter ett sotningsintervalls drift. I enstaka anläggningar erhöles dock över 4000 cm<sup>3</sup> sot. Med en medeldensitet på ca 0,7 kg/dm<sup>3</sup> för sotet från de ingående anläggningarna motsvarar detta i medeltal 300-400 g sot per anläggning. Vad gäller förhållandet mellan sotmängd på skorstenens botten och sotmängd på skorstensväggarna var variationerna stora; kvoten varierade mellan 0,2 och 8 uttryckt i massa.

Utgående från de uppmätta sotmängderna och uppmätning av skorstenarnas totala inneryta beräknades en fiktiv skiktjocklek under förutsättning att sotet fördelades lika över skorstenens hela inneryta. I samtliga fall erhöles skiktjocklekar understigande 0,1 mm, men en största frekvens runt ca 0,02 mm. De uppmätta sotvolymerna motsvarande således en mycket liten skiktjocklek i skorstenen.

En extrapolation av erhållna sotmängder till en drifttid på 365 dagar utan sotning genomfördes också. Under dessa förhållanden skulle sotskikt på 0,04-0,3 mm erhållas efter 1 års drift utan sotning. Vid denna beräkning utelämnades några anläggningar där funktionen var extremt dålig.

47 st gaseldade anläggningar undersöktes; i inget fall kunde sotbeläggningar konstateras.

För de 14 fastbränsleeldade varmluftaggregaten och de två kokspannorna var driftperioden mellan sotningarna ca 110 dagar. Också här visade anläggningarna stora variationer; massor av sot varierade mellan 240 och 2030 g; volymen mellan 600 cm<sup>3</sup> och 5400 cm<sup>3</sup>. I de två kokseldade anläggningarna erhöles 1500-2500 g sot (3400-7100 cm<sup>3</sup>).

Utöver vad som ovan redovisats undersöktes även 96 st skorstenar med lokaleldstäder ("einzelfeuerstätten") anslutna. Eftersom dokumentationen av dessa (bränsle, effekt, antal anslutna eldstäder, effektiv skorstenslängd etc) inte förelåg hos skorstensfejarna kunde endast sotmängden (-volymen) bestämmas. I de allra flesta fallen konstaterades volymer på max 4000 cm<sup>3</sup>, men speciellt för skorstenar i trevåningshus förekom mera sot, normalt upp till 12000 cm<sup>3</sup>, men i enstaka fall 47000 cm<sup>3</sup>.

Den här redovisade undersökningen ger en hel del värdefull information om storleksordningarna för sotmängden och skiktjocklekar i anläggningar i praktisk drift.



Undersökningen lider dock ur ”svensk” synpunkt av vissa begränsningar. Bl a kan följande konstateras:

1. Undersökningen är utförd i Tyskland. Detta innebär andra klimatförhållanden och därmed drifttider samt i viss mån andra typer av eldstäder och skorstenar i fältundersökningen.
2. Undersökningen omfattar i stort sett inga vedeldade anläggningar. Detta är vanligt förekommande i form av pannor och lokaleldstäder i Sverige och förhållandena vad avser sotbeläggningar kan förväntas vara annorlunda för sådana anläggningar.
3. Undersökningen utfördes för mer än femton år sedan. En viss utveckling beträffande oljebrännarteknik, oljekvalitet, men framför allt ny teknik för vedeldning har skett sedan dess.

Den grundläggande metodiken bedöms däremot som intressant, och vi återkommer i kap. 8. till hur den skulle kunna utnyttjas för att validera en föreslagna indirekt metod för att uppskatta sotbeläggningars tillväxttakt.

## 4.2 Erfarenheter från skorstensfejaremästare

Inom projektets ram har en intervju genomförts med skorstensfejarmästarna Staffan Blixt och Bengt Nilsson, Göteborg. Syftet med denna var att samla en del generella intryck om sotbeläggningarnas omfattning i dagens eldningsanläggningar i Sverige och under vilka förutsättningar de speciellt uppkommer. Resultatet av intervjun redovisas nedan i fri form.

Sotbeläggningar i större omfattning förekommer främst vid vedeldade pannor och i mindre grad vid lokaleldstäder. Ett undantag är dock spisinsatser där mycket sot ofta konstateras, troligen ofta beroende på dålig tätning mellan anslutningsrör och rökkanal. Beläggningarna är generellt mindre om pannan är ansluten till ackumulatortank och/eller av keramiskt infordrad typ, s.k. ”miljögodkända” pannor. Detta gäller även om rensningsintervallet för dessa pannor är en gång per 16 veckor mot en gång per 8 veckor för traditionella vedpannor. Även i pannans konvektionsdelar är sotbeläggningarna mindre i dessa pannor. Tjärsotet, där detta förekommer, bygger på mer och mer längre upp i skorstenen, vilket kan ge stora avsättningar i skorstenstoppen. Ingen skillnad i beläggningar av tjärsot är tydlig mellan stålskorstenar resp. tegelskorstenar. Däremot ger trånga kanaler och sneddragningar ofta större avsättningar. Beläggningar i CorTen-skorstenar har ofta mer skrovlig yta än beläggningar i rostfria stålskorstenar.

Eldning med fuktig ved ger betydligt mer sot än eldning med torr ved. I vedspisar ger lövved mycket men löst sot, medan barrved ger mindre men segt sot. Fliseldning ger ofta mycket sot.

Sotet vid oljeeldning är oftast poröst och beläggningarna normalt inte särskilt omfattande. Dock konstateras mera sot numera sedan rensningsinter-

vallet förlängts till en gång per år. Kombinationseldning olja/ved tycks ha minskat vilket förbättrat situationen. Det finns fortfarande en hel del gamla brännare i drift som ger upphov till mera sot. Möjligen har också antalet servicebesök minskat, men å andra sidan kan ingen klar skillnad i fråga om sotbeläggningarnas omfattning ses mellan kunder som har resp. inte har serviceavtal.

Ett viktigt konstaterande är enligt skorstensfejarmästarna att brukaren har det största inflytandet över sotbeläggningarnas omfattning.

#### **KORTFAKTA**

- Vid oljeeldning som fungerar på någorlunda tillfredsställande sätt uppstår i normalfallet mycket små sotbeläggningar.
- Variationerna i sotbeläggningar kan var mycket stora mellan olika anläggningar beroende på ett stort antal faktorer (bränsle, typ av eldningsanordning, driftbetingelser, skötsel m.m.
- Sotbeläggningar i större omfattning förekommer främst vid vedeldade, vattenkylda pannor utan ackumulatortank, och i mindre grad vid lokaleldständer.

# 5 Vedeldningens specifika förutsättningar

Ved är det enda fasta bränsle som i någon omfattning används för uppvärmning av mindre fastigheter. Jämfört med olja och gas är förbränningsprocessen relativt komplicerad, vilket medför att beläggningar av olika typer kan uppstå i panna och röckanal. Förutom flamsot och flygaska erhålls ofta kondensation av oförbrända högre kolväten (tjära) på väggarna. Speciellt gäller detta pannor av traditionell överförbränningstyp med vattenkylda väggar.

## 5.1 Allmänt om vedförbränning

Ved består av brännbart material (cellulosa, hemicellulosa och lignin), aska samt fukt. Fukthalten kan variera från ca 10 % (inomhuslagrad ved) upp till ca 50 %. Fuktinnehållet påverkar förbränningsprocessen starkt, eftersom energi åtgår för att förånga vattnet vilket sänker värmevärdet per kg bränsle.

Förbränning av ved kan schematiskt indelas i fyra faser:

- torkning
- avgasning
- gasförbränning
- koksförbränning

Torkningen kräver värmeförsel från förbränningen, liksom avgasningen då veden flyktiga beståndsdelar (ca 80 %) avgår från vedstycket. Under gasförbränningen, då avgasningsprodukterna brinner med tydliga flammor, samt under koksförbränningen, då glöden brinner, frigörs däremot värme.

Var och en av dessa delprocesser har sina specifika krav på betingelser vad gäller t ex temperatur och lufttillförsel för att fungera optimalt. I en traditionell överförbränningspanna, där hela vedmängden brinner samtidigt, pågår dessa processer mer eller mindre samtidigt i samma utrymme. I moderna pannor används däremot normalt omvänd förbränning, vilket innebär att gasförbränningen sker med nedåtriktad låga genom ett roster i botten av bränslemagasinet. Primärluft tillförs bränslemagasinet ovanifrån eller i sidorna, medan sekundärluft tillförs i eller efter rostret. Tekniken innebär att de olika delprocesserna försiggår i separata zoner i pannan och att det därmed är lättare att skapa rätt betingelser för varje delprocess.

## 5.2 Fysikaliska processer

Vedens fysikaliska egenskaper och struktur spelar en stor roll för hur förbränningen sker. Kontaktytan mellan bränsle och luft är förhållandevis liten jämfört med t ex atomiserad olja. Detta innebär att masstransportbegränsningar, dvs hur snabbt färsk brännbara gaser eller färsk koksytan kan komma i kontakt med luft blir väsentligt.

Förloppen vid förbränning av ved har mer detaljerat studerats av bl a Larfeldt [22] och Grönli [23]. Nedan ges en översiktlig beskrivning.

Då ett vedstycke brinner i eldstaden kommer strålning och i mindre mån konvektion att värma upp angränsande vedstycken, ju mer desto mer isolerad eldstaden är. Upphettningen driver först av vedens fukthinnehåll och därefter sker en avgasning av flyktiga komponenter genom vedtryckets ytteryta. Eftersom veden är anisotrop, d v s har olika struktur i olika riktningar kommer avgasningen lättast att ske genom vedstyckenas ändar. Efterhand kommer dock sprickor i varierande storlekar att uppstå p g a krympning och termiska spänningar i veden. Dessa sprickor medför att vedstycket blir ”poröst” och att nya ytor ”inåt veden” frigörs för avgasning.

De avgasningsprodukter som frigörs brinner med diffusionsflammar strax utanför vedstyckets ytteryta. Inuti bränslebädden kan lokalt även förblandade flammar uppstå. Om eldstaden arbetar med överförbränning kommer dessa flammar att vara relativt ”oordnade” i tid och rum. Detta innebär att den lokala luftfaktorn varierar kraftigt och att zoner med mycket feta bränsleblandningar tidvis uppstår. I dessa blir förbränningen ofullständig och bl a sot uppstår. Tillförsel av sekundärluft medverkar till bättre utbränning, men normalt är inblandningen i en överförbränningspanna ineffektiv, vilket ger höga utsläpp av oförbrända kolväten.

I en panna med omvänd förbränning samlas däremot flammorna ihop nedåt och går genom en eller flera öppningar i rosterna. Processen blir därmed mera kontrollerad och kontinuerlig och sekundärluft kan tillsättas på ett effektivt sätt, ofta med hjälp av en fläkt, i eller efter rosten. Detta gör att emissionerna av oförbrända kolväten och sot blir avsevärt mindre.

Förutom effektiv blandning av avgasningsprodukter och förbränningsluft är temperaturen av avgörande betydelse för förbränningsresultatet. För att uppnå nära fullständig förbränning krävs en temperatur på minst 900 °C under 1-2 s. I en överförbränningspanna är detta mycket svårt att uppnå, dels därför att väggarna är vattenkylda, dels därför att hela vedmängden skall värmas upp på en gång. I en panna med underförbränning är däremot både primär- och sekundärförbränningszonerna okylda, ofta med keramisk infordring. Dessutom sker torkning och avgasning, de värmekrävande processerna, gradvis underifrån allteftersom bränslet sjunker ned.

## 5.3 Kemiska processer - sotbildning

Veden består av mycket stora molekyler. Vid förbränningen skall dessa brytas ned till koldioxid och vatten. I ett första steg bildas en komplex blandning av olika kolväten. I nästa steg bryts dessa ned till kolmonoxid som därefter oxideras till koldioxid. Om inblandning av förbränningsluft inte är tillräckligt effektiv och/eller temperaturen inte tillräckligt hög under tillräckligt lång tid kommer mindre mängder av nedbrytningens mellanprodukter (oförbrända kolväten) att gå ut i skorstenen som emissioner. Exempel på sådana komponenter som konstaterats är metan, eten, propen, ben-

sen samt polyaromatiska kolväten. Vissa av dessa är kända som aktiva i sotbildningen.

Sotbildning vid vedeldning har studerats relativt litet. Emellertid borde de grundläggande förloppen vara likartade som vid gas - eller oljeeldning. I flammorna är det avgasningsprodukter, d v s gasformiga kolväten av olika slag som brinner. Peterson [1] har gjort vissa ansatser till beskrivning av vad som påverkar sotbildningen under olika betingelser. Kozinski och Saade [24] redovisar studier av sotbildning och bildning av PAH vid eldning av ved, avfall från massatillverkning samt spånskiva i en laboratoriereaktor liknande en vedkamin. Man konstaterar skillnader i sot- och PAH-bildning mellan de olika bränslena. Vidare påvisas att temperatur-tid-förloppet samt den lokala blandningen av bränslegas/luft påverkar både de kemiska förloppen före bildning av sotpartiklar och tillväxten av dessa.

## 5.4 Eldningsanordningar för ved

Styckeved kan eldas antingen i pannor eller i lokaleldstäder, dvs kaminer, spisinsatser och kakelugnar. Räddningsverket anger [25] att ca 251 000 pannor huvudsakligen eldas med ved, och att det finns ca 790 000 lokaleldstäder. Trots att antalet lokaleldstäder är så stort, är det rimligt att anta att den förbrukade vedmängden i dessa, på grund av de flesta eldas relativt sällan och dessutom värmer upp en mindre yta, utgör en mindre del av den totalt förbrukade mängden.

Endast ca 10 % av vedpannorna bedöms vara ”miljögodkända”, dvs uppfylla Boverkets utsläppskrav, och endast ca 30 % av pannorna bedöms vara anslutna till ackumulatortank. De flesta av pannorna är därför av traditonell överförbränningsstyp, och arbetar direkt mot husets momentana värmebehov. Detta är under stora delar av året betydligt mindre än pannans nominella effekt. Tillsammans med den vattenkylda konstruktionen, som ger en låg förbränningsstemperatur, och ofta dålig inblandning av förbränningsluft ger detta förutsättningar som gynnar sot- och tjärbildning. Om eldning sker med dåligt torkad ved förstärks detta ytterligare. Att dessa förhållanden är vanliga i praktiken bekräftas av skorstensfejarmästare (kap. 4.2). Det skall dock inte glömmas bort att en intresserad brukare med kunskaper om sin anläggning och som använder torr ved kan elda även en överförbränningspanna med relativt begränsad sot- och tjärbildning.

Eldning i lokaleldstäder ger normalt mindre sotbeläggningar än i pannor enligt skorstensfejarmästare. Detta gäller speciellt kakelugnar, där förbränningsstemperaturen är relativt hög på grund av den keramiska eldstaden. Även i andra lokaleldstäder torde dock frånvaron av vattenkyld eldstad, ofta partiell keramisk infordring av eldstaden, relativt små vedmängder samt ett stort luftöverskott bidra till att sotbildningen normalt blir relativt begränsad. Användning av ved av dålig kvalitet samt ”pyreldning”, dvs med strypt förbränningsluftspjäll kan dock medföra att sotbildningen ökar markant.

## 5.5 Diskussion

Eldning av ved kan ske under vitt skilda betingelser i olika typer av förbränningsanordningar. Vidare kan vedkvaliteten, främst fukthalten, variera. Lokala förhållanden vad gäller temperatur och luftöverskott i förbränningen medför att sotbildningen blir olika stor.

Pannor med omvänd förbränning ger normalt avsevärt lägre utsläpp av oförbrända kolväten än traditionella vattenkylda pannor av överförbränningstyp. Erfarenheter från fältet visar på en sådan skillnad även vad gäller bildning av sotbeläggningar, men inga systematiska studier av detta har kunnat återfinnas. En sådan studie skulle ha ett stort intresse för att påvisa skillnader mellan gammal och ny teknik, inte bara i utsläppshänseende utan även i fråga om eventuella brandrisker.

### **KORTFAKTA**

- Förbränning av ved kan indelas i fyra faser: torkning, avgasning, gasförbränning och koksförbränning.
- Pannor med omvänd förbränning och keramisk isolering ger normalt mindre sotbeläggningar än traditionella vattenkylda pannor av överförbränningstyp.
- Endast ca 10 % av de befintliga pannor som eldas med ved bedöms uppfylla Boverkets utsläppskrav, och endast ca 30 % bedöms varan anslutna till ackumulatortank.
- Eldning i lokaleldstäder ger normalt mindre sotbeläggningar än i pannor. Speciellt gäller detta kakelugnar.

# 6 Sotbeläggnings inverkan på brandrisken

## 6.1 Allmänt

För att en soteld skall uppstå krävs att två faktorer är uppfyllda; dels att det finns tillräckligt med sot tillgängligt i rökkanalen och dels att en tändkälla, t ex tillräckligt heta rökgaser, kommer i beröring med sotet. Zhang [26] ger en schematisk beskrivning av förloppen då en soteld uppstår, vilken här återges i fritt format.

En soteld kan indelas i två stadier, föruppvärmning (pre-heating) och reaktionsstadiet. Övergången mellan dessa stadier definieras av antändningstemperaturen. Under föruppvärmningen värms sotlagret i rökkanalen upp av förbränningsgaserna från eldstaden. Värme leds genom sotlagret via konvektion. Temperaturen ökar alltså även om förbränningsreaktionerna är försumbara i detta stadium. När antändningstemperaturen nås, tändes sotet spontant och förbränningsreaktionernas hastighet ökar kraftigt. Dessa reaktioner producerar värme, som leds vidare upp i sotlagret. Värmeförluster uppstår, men överflyglas av det frigjorda värmets vid förbränningen, så att en flamma uppstår.

Zhang [26] formulerar också en modell, med vilken brinnhastigheten i m/s kan beräknas om ett antal storheter för sotlagret är kända. Brinnhastigheten visas vara proportionell mot kvadratroten ur sotets reaktionshastighet och värmevärdet hos sotet, och ökar proportionellt mot sotets konduktivitet. Ju lägre antändningstemperatur sotet har ju högre blir brinnhastigheten. Andra faktorer som påverkar brinnhastigheten är sotets värmeledningsförmåga och densitet. Modellen kalibrerades mot ett soeldsförsök i en 6 m hög skorsten som belagts med 4 kg artificiell tjära. I experimentet pågick sotelden i 86 min, vilket ger en medelbrinnhastighet på 1,1 mm/s. Samma värden erhöles med beräkningsmodellen. Modellen kan under förutsättning att sotlagrets tjocklek och fysikaliska egenskaper är kända även användas för beräkning av varaktigheten hos en soteld. Under normala förutsättningar ger modellen varaktigheten på 1-3 timmar, vilket överensstämmer med praktiska erfarenheter.

## 6.2 Soteldar och vedeldning

Det är intressant att söka samband mellan antalet soteldar i ett område och omfattningen av vedeldning i samma område. Zhang [26] återger soteldsstatistik från Danmark och USA. I Danmark ökade antalet soteldar från ca 1000 till ca 3000 mellan åren 1977 och 1983. I USA ökade antalet från ca 70 000 1978 till ca 140 000 1981 där antalet stabiliserats fram till 1990. Denna tidsperiod sammanfaller med en kraftig ökning av vedeldningens om-

fattning i dessa länder (i Danmark även halm) på grund av höjda oljepriser. I USA är det främst i vissa delstater som vedeldningen fått stor omfattning. För Danmark visar Zhang en direkt korrelation mellan antalet soteldar och förbrukad mängd ved och halm totalt per år.

I Sverige anger Zhang [26] att 200-500 soteldar per år uppstår. Räddningsverkets statistik för 1997 [25] ger en annan bild. I denna redovisas att räddningstjänsten ryckt ut till drygt 1300 soteldar under 1997, vilket motsvarar drygt 10 % av alla bränder där räddningstjänsten tillkallats.

Mattsson [27] utgår från antalet soteldar i fyra värmländska kommuner som föranledde utryckning från Räddningstjänsten 1991 och uppskattar det totala antalet soteldar med utryckning i Sverige till ca 2300 detta år. Beräkningen rymmer dock en serie osäkra interpolationer, och bör ses som ett försök till uppskattning i brist på statistik från denna tidpunkt. Vad som däremot är intressant i Mattssons undersökning är sammanställningen av antalet försäkringsanmälda soteldar under perioden 1983-1992, baserat på statistik från Försäkringsbranschens Service AB (FSAB) och Länsförsäkringsbolagen. Denna visar under perioden 1983-1987 på 1100-1400 försäkringsanmälda soteldar per år, och därefter en kraftig minskning till 700-800 per år. Detta kan troligen förklaras med ändringar i hur underlaget till statistiken tagits fram.

Intressant, men knappast överraskande, är att både Mattssons eget material och citerade källor visar att minst 95 % av soteldarna uppstår i anläggningar där det huvudsakliga bränslet är ved.

Vad som gör bedömningen av den totala soteldsfrekvensen så svår är bl.a. att en del soteldar som föranleder utryckning inte anmäls till försäkringsbolag, och att en del soteldar som anmäls till försäkringsbolag inte föranlett utryckning. Dessutom finns troligen ett visst mörkertal för soteldar som uppstår men som varken föranleder försäkringsanmälan eller utryckning.

## 6.3 Laboratorieundersökningar

Tillgängligt material vad beträffar laboratorieundersökningar av soteldar är relativt litet. Peterson [1] har gjort vissa försök som är av intresse. I övrigt har endast material i den tyska undersökningen som refereras i kap 4 [21] samt en artikel av Peacock [28] kunnat återfinnas. Dessa undersökningar skall kortfattat refereras här.

I den tyska undersökningen ingick försök med soteld i en speciell kanal som uppvärmdes med förbränningsgaser från en gasbrännare. Sot av olika typer (kolsot, oljesot, hård- och blanksot) anbringades i olika skiktjocklekar (5, 10, 15 och 20 mm) i kanalen varefter tendenser till soteld observerades vid olika O<sub>2</sub>-halter och temperaturer (max 800 °C) i de tillförda förbränningsgaserna. Gasbrännaren var monterad före kanalen så att flamman inte influerade på försöksbetingelserna.



Resultaten visade antändningstemperaturer på 380-580 °C för blanksot. De högre antändningstemperaturerna erhöles vid lägre luftöverskott; speciellt var detta beroende tydligt för kolsotet. Vidare kunde följande konstateras:

- antändningstemperaturen var oberoende av sotskiktets tjocklek
- antändning skedde på "slumpvisa" ställen i sotproven, varefter sotelden spred sig till andra delar. Detta avspeglade troligen skillnader i sotets sammansättning och/eller inhomogeniteter i strukturen.
- vid försöken med låga O<sub>2</sub>-halter erhöles endast svagt glödande partier. Då brännaren därefter slogs av, dvs O<sub>2</sub>-halten steg upp till 21 %, spred sig sotelden med lysande glödförbränning
- i inget fall observerades öppna flammor. När sotet uppnått antändningstemperatur började det att glöda vilket sedan pågick under mer än 45 min utan flammor.

I Peacocks undersökning [28] genomfördes provningar med fem olika typer av skorstenar i tolv olika anläggningar med kaminer som eldades med ved. Fyra av skorstenarna var prefabricerade; en med luftisolering och tre med konventionell isolering; och den femte var en platsmurad skorsten. De prefabricerade skorstenarna installerades enligt fabrikantens anvisningar i schakt. Före soteldsproven eldades de anslutna vedkaminerna under en längre period (400-800 h) vid låga effekter för att bygga upp ett sotlager i skorstenarna. I de flesta fall eldades mellan 500 och 1200 kg ved upp. Proven startades därefter genom att en stor brasa eldades så att tillräckligt höga temperaturer för antändning av sotet erhöles. Därefter togs all ved ut och sotelden fick utvecklas fritt. Sotskiktets tjocklek klassificerades i de flesta fall till 3-13, 6-13 eller 13-19 mm, dvs kraftiga sotavlagringar förelåg.

För antändning av sotet krävdes temperaturer överstigande 650-725 °C i utloppet från kaminerna. Det är troligt att temperaturen i sotet var lägre vid antändningen, eftersom rökgastemperaturen mättes i centrum av kanalen där temperaturen är som högst. Peterson [1] redovisar antändningstemperaturer runt 300 °C och i vissa fall ned mot 200 °C för sot från vedeldning. Zhang [26] undersökte sot från olika delar av en vedeldad panna och den anslutna skorstenen. Han kunde identifiera upp till tre olika antändningstemperaturer för dessa prov, där den andra gav störst temperaturökning. För denna andra antändningstemperatur erhöles Zhang värden på 250 °C till 600 °C. De lägsta temperaturerna erhöles för prov med stor tjärandel, medan prov som hade en hård struktur tände vid högre temperaturer. För de flesta prov uppgick temperaturen då "stabil" förbränning inträtt till 700-800 °C.

I Peacocks undersökning [28] uppmättes i alla fall utom ett den maximala temperaturen i rökgaserna under sotelden till 750-1000 °C. I fallet då sotlagret var 13-19 mm tjockt uppmättes hela 1370 °C. Soteldarnas varaktighet definierades som den tid som temperaturen i rökgaserna översteg 200 °C. Varaktigheten varierade från 20 min till över 1,5 h. Det kunde inte entydigt

konstateras något samband mellan sotbeläggningarnas tjocklek och soteldens varaktighet.

De maximala temperaturerna på skorstenarnas innerytor varierade i huvudsak mellan 650 °C och 900 °C. Temperaturerna på skorstenarnas yttertor varierade mellan 46 °C (den murade skorstenen) upp till 420 °C (den luftisolerade skorstenen). På schaktets yta vänd mot skorstenen uppmättes mellan 39 °C och 234 °C som maximala temperaturer. Medeltemperaturen över alla mätpunkter varierade mellan 37 °C och 133 °C. Även om dessa temperaturer översteg vad som vanligen anges som antändningstemperaturen för trä, kunde ingen antändning konstateras. Troligen kan detta hänföras till den relativa kortvarigheten hos soteldarna.

## 6.4 Diskussion

Det material om sambandet mellan sotbeläggningars skiktjocklek och brandrisken som har kunnat återfinnas är mycket begränsat. Det kan dock konstateras att utan förekomsten av ett tillräckligt sotskikt kan inte soteld uppstå. Tillräckligt höga rökgastemperaturer är nödvändiga för att antända sotet och det är troligt att risken är störst kalla vinterdagar då man eldar som intensivast. Sotets karaktär har stor betydelse för soteldsrisken. Sot med mycket tjära kan antända ner mot 200 °C, men avsättes främst på pannväggarna och inte i skorstenen. Torrare sot tänder först vid högre temperaturer. Sot från vedeldning i traditionella pannor har lägre antändningstemperatur än från oljeeldning. En faktor, som veterligen inte alls finns belyst, är egenskaperna hos sot från moderna, keramikisolerade vedpannor.

Enkla samband mellan sotskiktens tjocklek och varaktigheten hos en soteld har inte heller kunnat återfinnas. Intuitivt bör dock ett visst sådant samband finnas. Ett tjockare sotskikt torde också innebära att effektutvecklingen vid en soteld blir högre, vilket ökar belastningen på skorstenen och omgivande material. Även sotets karaktär torde ha en väsentlig betydelse för varaktigheten och de maximala temperaturer som uppnås.

Sammanfattningsvis kan konstateras att den systematiskt dokumenterade kunskapen om sambanden mellan sotbeläggningarnas tjocklek och risken för och varaktigheten hos en soteld är liten. Försök att bättre undersöka dessa samband bör göras.

### **KORTFAKTA**

- Antändningstemperaturen för sot varierar kraftigt. Sot med mycket tjära kan antändas ner mot 200 °C, medan för torrare sot kan temperaturer upp mot 600 °C krävas.
- Inga entydiga samband mellan sotskiktets tjocklek och brandrisken föreligger. Troligen finns dock samband mellan skiktjockleken och en sotelds varaktighet samt mellan skiktjockleken och effektutvecklingen vid en soteld.
- Varaktigheten hos en soteld kan variera från delar av en timma upp till flera timmar.

# 7 Kravspecifikation för fältmetod

## 7.1 Syfte och användningsätt

För att utveckla en metod för bestämning av sotbelägningars tillväxttakt med rimlig ambitionsnivå är det avgörande att syftet med metoden klarläggs. Idealt sett skulle en sådan metod kontinuerligt mäta sotskiktets tjocklek på ett antal ställen i panna respektive rökkanal. Enligt vad som framkommit i denna undersökning torde dock en sådan metod vara såväl tekniskt som ekonomiskt omöjlig att utarbeta för praktiskt, rutinmässigt bruk.

I stället måste ambitionsnivån ställas lägre. Ett första steg är att inrikta sig på en diskontinuerlig mätning, d v s att bestämma hur mycket sotbelägningarna tillväxer mellan två diskreta tidpunkter, t ex ett antal veckor. Ett andra steg är att frånga kravet på rumsupplöst bestämning, d v s att mäta på ett antal delytor och istället inrikta sig på en bestämning av någon slags medelvärde över samtliga ytor i panna respektive rökkanal. Om syftet är att på sikt förbättra underlaget för bedömning av soteldsrisken torde dessa förändringar vara rimliga, utan att relevansen försämras.

Sotbelägningars tillväxttakt beror, som allmänt diskuterats i inledningen, på ett antal faktorer, varav vissa kan variera kraftigt över tiden i den enskilda anläggningen. Den teoretiska tanken att ”en gång för alla” genom en enkel mätning fastställa tillväxttakten i varje anläggning och därefter kunna föreskriva ett individuellt sotningsintervall torde därför vara omöjlig att realisera. Detta gäller både av tekniska och ekonomiska skäl.

Vad är då rimligt att åstadkomma med hjälp av en tänkt mätmetod? Eldningsanläggningar delas redan idag in i olika typer av kollektiv beroende på i första hand bränsle, typ av eldstad och typ av fastighet. För dessa kollektiv föreskrivs olika sotningsintervall. Om skillnader i sotbelägningarnas tillväxttakt mellan dessa kollektiv, eller andra som kan definieras, kan fastställas med hjälp av metoden skulle underlaget för sotningsintervallet successivt förbättras. Detta förutsätter dock att metoden används på ett stort antal anläggningar så att statistiskt signifikanta resultat kan erhållas.

## 7.2 Relevans

Begreppet relevans avser att den storhet som mäts skall ha tillräckligt entydig koppling till det syfte som mätningen har. Det mätvärden som erhålls skall också vara relevanta i fråga om tids- och rumsvariationer. I det enklaste fallet är relevansen fullständig, t ex längden av en bräda. I andra fall kan det av praktiska skäl vara lämpligt eller nödvändigt att mäta en annan parameter än den man egentligen söker, men som gör det möjligt att bedöma den intressanta parametern.

Detta resonemang kan föras också i det här aktuella sammanhanget. Den direkt intressanta parametern är sotskiktets tjocklek på rökkanalens väggar. Av

en rad skäl, bl a tillgänglighet och noggrannhet är det svårt att mäta detta på plats. Om någon lättare tillgänglig och mätbar parameter kunde visas ha tillräcklig korrelation med sotskiktets tillväxthastighet skulle denna kunna användas för uppskattning av tillväxthastigheten.

### 7.3 Praktiska synpunkter

Om mätmetoden skall användas på ett stort antal anläggningar utan alltför stora arbetsinsatser och kostnader ställs ett antal praktiska krav. Bl a är det rimligt att kräva följande:

- metoden skall inte kräva alltför komplicerad eller dyrbar utrustning
- metoden skall efter utbildning kunna användas av personal utan specialkunskaper i mätteknik
- metoden skall vara utprovad och fältmässig
- metoden skall inte förutsätta större ingrepp i anläggningarna
- metoden skall inte påverka förbränningsprocessen eller driftbetingelserna
- mätningen får inte ta alltför lång tid
- metoden skall direkt vid mättillfället ge en uppfattning om resultatet.

Kvantifiering i siffror är dock inte omedelbart nödvändig.

Dessa praktiska krav utesluter i princip all laboratorieutrustning. I stället får lösningen sökas bland etablerade fältmetoder. Ett förslag till sådan metod och hur denna skall valideras för att bli praktiskt användbar ges i följande kapitel.

# 8 Förslag till mätmetod och valideringsprogram

## 8.1 Förslag till mätmetod

Vad som ovan redovisats indikerar att direkt mätning av sotskiktets tjocklek inte är en praktiskt framkomlig väg. En intressant möjlighet är då att undersöka kopplingen mellan partikelhalten i rökgaserna och sotskiktets tillväxttakt. Partikelhalten definieras här som summan av sot, aska och tjära i rökgaserna. Intuitivt kan sägas att en positiv sådan korrelation bör föreligga. Om partikelhalten är hög i rökgaserna är det troligt att mera partiklar avsätter sig på rökkanalens väggar än om partikelhalten är låg. Beläggningarna tillväxer därmed snabbare. Detta troliga samband borde då kunna utnyttjas så att en bestämning av rökgasernas partikelhalt under relevanta driftbetingelser används för att indikera beläggningarnas tillväxttakt.

Partikelhalten i rökgaserna kan som nämnts i avsnitt 3.2.4.2 bestämmas gravimetriskt. Denna metod används rutinmässigt av skorstensfejare i Tyskland för att bestämma utsläppen av partiklar från mindre fastbränsleanläggningar. Metoden är därför väl utprovad, och fältmässig, kommersiell utrustning finns tillgänglig. Åtminstone en av de tillgängliga utrustningarna mäter även CO-halten i rökgaserna. Utrustningen har i ett projekt, utfört av SP åt Statens Energimyndighet, utvärderats och befunnits lämplig för mätning av halten oförbränt från små fastbränsleeldade anläggningar [29].

En rimlig väg att söka komma fram till en relativt enkel metod för att bestämma tillväxttakten för beläggningar i rökkanaler är därför att undersöka korrelationen mellan partikelhalten i rökgaserna och denna tillväxttakt. Om en sådan korrelation kan fastställas och kvantifieras till en rimlig grad bör metoden kunna tillämpas för att uppskatta tillväxttakten för sotbeläggningar i olika typer av anläggningar och under olika förhållanden.

Förslaget till mätmetod är därför följande:

**Den metod som används i Tyskland för bestämning av partikelhalt i rökgaser från mindre fastbränsleeldade anläggningar bör utvärderas med avseende på korrelationen med sotbeläggningarnas tillväxttakt i panna och rökkanal. Det kan förväntas att en åtminstone kvalitativ sådan korrelation bör föreligga. Metoden är ur emissionssynpunkt väl beprövad och kommersiell, fältmässig utrustning finns. De krav som formuleras i kravspecifikationen i kap. 7 uppfylls av denna metod.**

## 8.2 Validering

Metoden förutsätter att en relativt omfattande validering utförs. Denna validering bör omfatta ett relativt stort antal anläggningar med olika eldstadstyper, olika driftbetingelser och olika bränslen. Hur många anläggningar som krävs bör analyseras statistiskt.

Valideringen kan av skäl som ovan angetts inte utföras direkt mot en fysisk bestämning av sotbeläggningarnas tillväxttakt. I stället föreslås att den utförs som en kombination av emissionsmätningen och den metod för bestämning av sotmängd som refereras till i kap 4. Denna metod innebär att det sot som avsatts mellan två rensningar samlas in och vägs och volymbestäms. Med kännedom om den totala rökgasberörda ytan i eldstad resp. rökkanal kan då en fiktiv skiktjocklek beräknas i det enskilda fallet. Under tiden mellan rensningarna genomförs mätningar av partikelhalten i rökgaserna med den föreskrivna metoden under standardiserade betingelser.

Praktiskt skulle en sådan validering innebära att för varje anläggning sker följande:

- anläggningens utförande dokumenteras; speciellt anges dimensioner på panna och rökkanal så att de totala rökgasberörda ytorna kan beräknas
- pannan och rökkanalen sotas noggrannt vid ordinarie sotningstillfälle
- loggbok förs av anläggningsägaren över antalet eldningar, typ av ved etc.
- mätningar av partikelhalt i rökgaserna genomförs under standardiserade betingelser vid 2-4 tillfällen fram till nästa sotningstillfälle, ordinarie eller extra p g a valideringen
- pannan sotas återigen noggrannt och sotet från panna resp rökkanal samlas in, vägs och volymbestäms
- den erhållna sotvolymen omräknas till en medelskiktjocklek över de rökgasberörda ytorna i panna resp rökkanal.

Ur detta material för ett antal anläggningar studeras korrelationen mellan partikelkoncentration i rökgaserna och den beräknade medelskiktjockleken. Förutom denna s k ”globala” korrelation torde det, om tillräckligt många anläggningar ingår, vara möjligt att studera olika anläggningskollektiv separat.

Slutligen görs en bedömning av om den korrelationsgrad som uppnås är tillräcklig för de syften metodutvecklingen har.

## 9 Referenser

- [1] Peterson, F.: Sotbildning vid vedeldning. KTH, Inst. för Uppvärmnings- och Ventilationsteknik, Stockholm 1989.
- [2] Haynes, B.S. och Wagner, H.Gg.: Soot formation. *Prog. Energy Combust, Sci. Vol. 7 (1981), s 229-273.*
- [3] Wolfhard, H.G. och Parker, W.G.: A spectroscopic investigation into the structure of diffusion flames. *Proc. Phys. Soc. A, vol. 65 (1952), s 2-19.*
- [4] Kuhn, G. och Tankin, R.S.: Spectroscopic measurements to determine teemperature and carbon particle size in an absorbing propane diffusion flame. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, vol. 8, (1968), s 1281-1292.*
- [5] Nagle, J. och Strickland-Constable, R.F.: Oxidation of carbon between 1000-2000 °C. Proceedings of the Fifth Conference on Carbon, s. 154-164, Pergamon Press, London 1962.
- [6] Mauss, F.: Entwicklung eines kinetisches Modells der Russbildung mit scnell polymerisation. Doktorsavhandling RWTH Aachen. Cuvillier Verlag, Göttingen 1998.
- [7] Tesner, P.A., Snegiriova, T.D. och Knorre, V.G.: Kinetics of Disper- sed Carbon Formation. *Combust. and Flame, vol. 17 (1971), s 253.*
- [8] Frenklach, M. Och Wang, H.: Detailed Mechanism and Modeling of Soot Particle Formation. I Mechanisms and Models of Soot Formation, Bockhorn, H. (utg.), Springer Verlag 1994.
- [9] Dobbins, R.A. och Megaridis, C.M.: Morphology of flame-generated soot as determined by thermophoretic sampling. *Langmuir, vol. 3 (1987), s 254.*
- [10] Benson, S.A., Jones, M.L. och Harb, J.H.: Ash formation and deposi- tion. I Fundamentals of Coal Combustion for Clean and Efficient Use, Smoot, L.D. (utg.), Elsevier 1993.
- [11] Greenfield, C. Och Quarini, G.: A Lagrangian simulation of particle deposition in a turbulent boundary layer in the presence of thermophoresis. *Appl. Math. Modell., vol. 22 (1998), s 759-771.*
- [12] Konstandopoulos, A.G. och Rosner, D.: Inertial effects on thermopho- retic transport of small particles to walls with streamwise curvature. *Int. J. Heat Mass Transfer, vol 18 (1995), no 12, s 2305-2315.*
- [13] Kallner, P. och Zintl, F.: Orsaker till påslag på värmeöverföringsytor vid trdbränsleeldning och additiv för att minska problemen. Värmeforsk- rapport nr 611, Stockholm 1997.



- [14] LeVert, F.E., Robinson, J.C., Barrett, S.A., Frank, R.L., Moss, R.D., Nobles, W.C. och Anderson, A.A.: Slag Deposition Monitor for Boiler Performance Enhancement. *ISA Transactions*, vol. 27, no 3, s 51-57.
- [15] Hanson, S.P. och Abbott, M.F.: Fiurnace water-wall slag deposition testing in a 0,5 MW combustion plant. *Prog. Energy Combust, Sci. Vol. 24 (1998)*, s 503-511.
- [16] Peterson, F.: Sottalsmätning. *VVS 40, no 10, Stockholm 1969*.
- [17] Mavroudis, K.: Stoffbildning vid vedeldning - del 1 och 2. Tekniska Meddelanden nr 234 och 235. KTH, Inst. för Uppvärmnings- och Ventilationsteknik, Stockholm 1982.
- [18] ISO 9096:1992. Stationary source emissions - Determination of concentration and mass flow rate of particulate material in gas-carrying ducts - Manual gravimetric method
- [19] BImSchV, Erste Verordnung, Anlage III
- [20] Bundeseinheitliche Praxis bei der Überwachung der Emissionen aus Feuerungsanlagen gemäss der Ersten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Kleinfeuerungsanlagen - 1. BImSchV): Mindestanforderungen an die Messgeräte bei der Eignungsprüfung.
- [21] Verschmutzung und Reinigungshäufigkeit von Rauch- und Abgasanlagen häuslicher und gewerblicher Feuerstätten. Utg.: Der Minister für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, Steinfurt 1983.
- [22] Larfeldt, J. och Leckner, B.: Matematisk modellering med inriktning på förlopp i biobränsleeldade småpannor. CTH, Inst. för Energiteknik, Göteborg 1997.
- [23] Grönli, M.: A Theoretical and Experimental Study of the Thermal Degradation of Biomass. Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet, Institutt for termisk energi og vannkraft, Doktor-ingeniörahandling 1996:115.
- [24] Kozinski, J.A. och Saade, R.: Effect of biomass burning on the formation of soot particles and heavy hydrocarbons. An experimental study. *Fuel vol. 77 (1998), no 4, s 225-237*.
- [25] Räddningstjänst i siffror 1997. Räddningsverket nr I99-064/98, Karlstad 1998.
- [26] Zhang, X.: Soot and soot fires in wood combustion. Licentiatuppsats. *Fjärrvärme med förbränningsteknik nr 1-3:1992, KTH, Inst. för Uppvärmnings- och Ventilationsteknik, Stockholm 1992*.
- [27] Mattsson, B.: Hur ofta skall småhusen sotat?. Högskolan i Karlstad, Forskningsrapport 94:6, Samhällsvetenskap, 1994.

[28] Peacock, R.D.: Chimney Fires: Intensity and Duration. *Fire Technology*, vol. 22 (1986), no 3, s 234-252.

[29] Gustavsson, L. och Viktorsson, M.: Utveckling av fältmetod för utvärdering av emissioner från villapannor och lokaleldstäder. Energimyndighetens program "Småskalig förbränning av bibränslen", rapport under färdigställande.



Räddningsverkets bibliotek  
Karlstad



26152002542

Räddningsverket, 651 80 Karlstad  
, telefax 054-10 28 89. Internet <http://www.raedningsverket.se>

Beställningsnummer P21-307/99. Telefon 054-10 42 86, telefax 054-10 42 87  
ISBN 91-7253-034-0



14/16

Ps \*i

Eldstäder ..