

# Sotbeläggningar och brandrisk

Lennart Gustavsson, Mathias Johansson och  
Marie Rönnbäck

SP – Sveriges Provnings- och  
Forskningsinstitut

Räddningsverkets kontaktperson:  
Ulf Lindén, skorstensfejardirektör, 054 – 13 52 06

# Förord

Projektets målsättning var att studera hur storleken på sotbeläggningar i uppvärmningsanläggningar påverkar brandrisken. Ansvarig för projektets genomförande har varit SP - Sveriges Provnings - och Forskningsinstitut. Fältmätningar och provtagningar har genomförts av Sotar´n i Borås AB. Ett varmt tack för gedigna insatser och mycket gott samarbete framförs härmed till Lars-Inge Johansson, Magnus Johansson, Morgan Rosengren, Mats Andersson och Bennie Åkerfeldt vid Sotar´n i Borås AB.

Lennart Gustavsson  
Sveriges Provnings - och Forskningsinstitut

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Målsättning</b> .....	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Genomförande</b> .....	<b>10</b>
3.1	Allmänt .....	10
3.2	Mätningar, provtagning och analys.....	10
3.2.1	Fältmätningar och insamling av sotprov .....	10
3.2.2	Upparbetning och analys av sotprover.....	13
3.3	Utvärdering .....	16
3.3.1	Utvärdering av emissionsmätningar .....	16
3.3.2	Utvärdering av tillväxthastighet.....	16
3.3.3	Utvärdering av antändningstemperatur, effektivt värmevärde m.m.....	17
3.4	Beräkningsmodell för ytemperatur på rökkanaler vid sotbrand .	17
3.4.1	Allmänt .....	17
3.4.2	Beräkningsmodell .....	17
<b>4</b>	<b>Resultat</b> .....	<b>19</b>
4.1	Emissionsmätningar .....	19
4.1.1	Biobränsleeldade anläggningar .....	19
4.1.2	Oljeeldade anläggningar .....	26
4.2	Rökgastemperatur .....	28
4.3	Sotmängder och klassificering .....	32
4.3.1	Allmänt .....	32
4.3.2	Vägning och volymbestämning .....	32
4.3.3	Okulär klassificering .....	34
4.3.4	Oförbränt i sotprover.....	36
4.3.5	Korrigerade sotmängder.....	37
4.4	Tillväxthastighet.....	37
4.5	Antändningstemperatur, effektivt värmevärde m.m.....	69
4.6	Korrelation stofthalt –tillväxthastighet .....	70
4.7	Brandrisker.....	74

4.7.1	Programuppbyggnad.....	75
<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>84</b>
<b>6</b>	<b>Slutsatser.....</b>	<b>85</b>
<b>7</b>	<b>Fortsatt arbete.....</b>	<b>88</b>
<b>8</b>	<b>Referenser .....</b>	<b>89</b>
	<b>Bilaga 1: Typbilder på sotprover .....</b>	<b>90</b>
	<b>Bilaga 2: Beräkningsexempel.....</b>	<b>95</b>

# Abstract

The overall objective of the present project has been to study the growth rate of the soot depositions in different types of domestic heating plants and to elucidate the correlation between the magnitude of the depositions and a possible risk of fire. This has been made through a combination of field measurements and sampling of soot, analysis of soot samples as well as mathematical modelling of soot fires in chimneys. As a part of the project, a proposed indirect method to measure the growth rate of the soot depositions has been evaluated.

Within the project, field measurements have been made and soot samples have been collected at about 340 chimney sweepings in about 110 heating plants during 18 months. The mass and volume of the soot samples have been determined, the samples have been classified visually and in certain cases analysed in terms of combustible content, heating value as well as ignition temperature. Average values of the deposition rates have been calculated for different types of plants, and the correlations between soot mass and type of soot has been studied. A mathematical model has been developed which calculates the maximal period between chimney sweepings provided that a maximal surface temperature on the chimney in case of a chimney fire should not be exceeded. As input to the model, results from the project regarding the properties of the soot as well as the deposition growth rate are used. The model is based on a heat balance over the chimney in case of a chimney fire.

The field measurements showed a wide variation in emission levels and soot amounts, both between different plant types and between different plants of the same type. In average, however, the dust and CO contents were significantly higher in the flue gases from wood boilers than from pellet boilers, and the dust content was higher in flue gases from water-cooled, traditional wood boilers than from ceramically insulated wood boilers. Oil boilers with an environmental label in average showed lower excess-air ratios, lower CO contents and lower soot numbers than conventional oil boilers.

The fraction of the soot samples which were classified as “tar” or “soot” was significantly higher for wood boilers than from pellet boilers, while it was slightly higher for water-cooled boilers than for ceramically insulated ones. The combustible content in the soot samples from wood combustion increased in the order “ash” → “normal” → “tar”/“crusts” → “soot”. For samples from oil combustion, the combustible content increased in the order “concrete”/“ash” → “normal” → “soot”.

The growth rate for the soot deposits was in average about 0,001 mm/degree-day or about 1,5 g/degree-day for wood-fired boilers. For pellet boilers the growth rate was about 0,6 g/ degree-day. The growth rate in oil-fired boilers on the other hand, was only about 0,0001 mm/degree-day, and even lower for the environmentally labelled boilers. The growth rate for the soot deposits

was in most cases in average higher for brick chimneys than for steel chimneys. As an average, the growth rate was highest for those plants whose soot samples had been classified as tar/crusts (wood-fired boilers) and sot (oil-fired boilers) and lowest for those plants hose soot samples had been classified as ashes. It shall however be noted that in single cases considerably higher growth rates were found. The calculated growth rates were based on the presumption that the soot deposits are evenly distributed over the entire inner area of the chimney, which in most cases is not true.

No significant correlation between the dust content and the growth rate of the soot deposits could be detected. This means that the proposed method to measure the dust concentration could not be used to predict the growth rate of the soot deposits in the individual plant.

From calculations with the mathematical model for chimney fires, using average results from the project as input, maximum time periods between the chimney sweepings are achieved which are of the same order of magnitude as the time intervals which are prescribed today. The model should however primarily be used to study the influence of different parameters and not for absolute calculations. It is proposed that the computer model should be further developed and refined, and also be validated in relevant experiments. It is also proposed that preliminary experiments with measuring gloss and diffuse reflectance on soot of different types are made in order to possibly correlate this to the fire properties of the soot.

**Key words:** soot, chimney fire, soot deposits, growth rate, emissions

# Sammanfattning

Den övergripande målsättningen för föreliggande projekt har varit att studera tillväxthastigheten för sotbeläggningarna i olika typer av enskilda uppvärmningsanläggningar samt att konkret belysa sambandet mellan beläggningarnas storleksordning och eventuell brandrisk. Detta har skett genom en kombination av fältmätningar och provtagning av sot, analys av sotprover samt matematisk modellering av sotbrand i rökkanaler. Som ett delmoment har ett förslag till en indirekt mätmetod för att kunna mäta sotbeläggningarnas tillväxthastighet utvärderats.

Inom projektet har fältmätningar gjorts och sotprov insamlats vid ca 340 sotningstillfällen i ca 110 st anläggningar under ca 18 månader. Sotproverna har vägts och volymbestämts, klassificerats okulärt samt i vissa fall analyserats med avseende på halt oförbränt, effektivt värmevärde samt antändningstemperatur. Genomsnittliga tillväxthastigheter har beräknats för olika typer av anläggningar och sambanden mellan anläggningstyp och sotmängd och sottomp har studerats. En matematisk modell har utvecklats där den maximala tiden mellan sotningarna för att en given yttemperatur på skorstenen vid sotbrand inte skall överskridas beräknas. Som indata till modellen används resultat från projektet beträffande sotets egenskaper samt tillväxthastighet. Modellen bygger på en värmebalans över skorstenen vid pågående sotbrand.

Fältmätningarna visade på en stor variation i utsläppsnivåer och sotmängder både mellan olika typer av anläggningar och mellan olika anläggningar av samma typ. I medeltal var dock stoft- och CO-halterna betydligt högre i rökgaserna från vedpannor än från pelletspannor, liksom stofthalten var högre i vattenkylda, traditionella vedpannor än i keramiska sådana. Miljömärkta oljepannor hade i genomsnitt lägre luftöverskott, lägre CO-halter samt lägre sothalt än konventionella oljepannor.

Andelen sotprov som klassificerades som tjära eller sot var väsentligt högre för vedpannor än för pelletspannor, medan den var marginellt högre för vattenkylda pannor än för keramiska d:o. Andelen oförbränt i sotproverna från vedeldning ökade i i ordningen aska → normal → tjära/knotter → sot. I prover från oljeeldning ökade andelen oförbränt i ordningen murbruk/aska → normal → sot.

Tillväxthastigheten för sotskiktet var i genomsnitt ca 0,001 mm/graddag eller ca 1,5 g/graddag för vedpannor. För pelletspannor var tillväxthastigheten ca 0,0009 mm/graddag eller ca 0,6 g/graddag. Tillväxthastigheten i oljeeldade anläggningar var däremot endast ca 0,0001 mm/graddag eller ca 0,1 g/graddag och ännu lägre för de miljömärkta pannorna. Tillväxthastigheten för sotskiktet var i de flesta fall som medeltal högre för tegelskorstenar än för stålskorstenar. I medeltal var tillväxthastigheten högst för de anläggningar vars sotprov klassificerades som tjära/knotter (vedeldade pannor) resp. sot (oljepannor) och lägst för de anläggningar vars sotprov klassificerats som aska.

Det skall dock beaktas att i enskilda fall konstaterades avsevärt högre tillväxthastigheter. De beräknade tillväxthastigheterna bygger också på att sotet antas fördelas likformigt över hela skorstenens inneryta, vilket i de flesta fall inte är fallet i praktiken.

Ingen signifikant korrelation mellan stofthalten i rökgaserna och sotskiktets tillväxthastighet kunde fastställas. Detta innebär att den föreslagna metoden att mäta stofthalten inte kan användas för att förutsäga sotskiktets tillväxthastighet i den enskilda anläggningen.

Vid beräkningar med den matematiska modellen för sotbrand och med användning av genomsnittliga resultat från projektet som indata erhålls för vedpannor maximala tidsperioder mellan sotningarna som är i samma storleksordning som de sotningsfrister som idag tillämpas. Modellen bör dock i första hand användas för att studera inverkan av olika storheters inverkan och inte för absoluta beräkningar. Det föreslås att datormodellen skall vidareutvecklas och förfinas och valideras genom lämpliga försök. Det föreslås också att orienterande försök med att mäta glans resp. diffus reflektans på sot av olika typer genomförs för att om möjligt korrelera detta till sotets brandegenskaper.

**Nyckelord:** sot, sotbrand, sotbeläggningar, tillväxthastighet, emissioner



# 1 Inledning

Räddningsverket beslutade den 28 november 1996 om nya föreskrifter avseende sotnings- och kontrollfrister. Dessa föreskrifter är baserade på den erfarenhet och det tekniskt-vetenskapliga kunskapsunderlag som då fanns tillgängligt. I den konsekvensutredning som Räddningsverket utarbetade med anledning av de nya föreskrifterna om sotnings- och kontrollfrister fanns en plan för fortsatt arbete i syfte att öka det tekniskt-vetenskapliga underlaget inom området.

Som ett led i detta arbete genomfördes en inledande studie av sambandet mellan sotbeläggningarnas tillväxthastighet och risken för brand. Denna utgjordes i huvudsak av en litteraturstudie, och slutrapporterades i maj 1999. Det konstateras i rapporten (Räddningsverket P21-307/99) att området är relativt dåligt studerat och att inga entydiga beskrivningar av sambanden mellan sotbeläggningarnas tillväxthastighet och inverkan på brandrisken kunde ges. För att bättre klarlägga sambanden föreslogs att fortsatta studier, främst i form av fältmätningar och analyser av sot skulle genomföras. I rapporten föreslogs också en mätmetodik för att göra lämpliga fältmätningar.

Räddningsverket beslutade i början av 2000 att genomföra ett större fältprojekt enligt detta förslag med sikte på att förbättra kunskapen om sambanden. SP – Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut fick i uppdrag att genomföra denna undersökning, och resultatet redovisas i denna rapport.

## 2 Målsättning

Det övergripande målsättningen för Räddningsverkets insatser på området är att öka möjligheterna att utvärdera sotningens brandförebyggande betydelse och att skapa förfinade metoder för att fastställa behovet av rengöring och brandskyddskontroll för olika objekttyper.

Målsättningen för detta projekt har varit trefaldig:

- att studera sotbeläggningarnas tillväxthastighet i olika typer av anläggningar och under olika driftbetingelser
- att om möjligt utarbeta en relevant indirekt mätmetod för att kunna mäta sotbeläggningars tillväxthastighet för olika typer av uppvärmningsanordningar
- att konkret belysa sambandet mellan beläggningarnas storleksordning och inverkan på brandrisken.

## 3 Genomförande

### 3.1 Allmänt

Den grundläggande idén för projektets genomförande har varit att genom omfattande fältmätningar och provtagning av sot i ett stort antal anläggningar av olika slag skapa en unik databas för hur mycket sot som avsätts under olika betingelser.

Vidare har studerats om sottillväxten kan kopplas till en enkel mätmetod för bestämning av stofthalt resp sotal. Mätmetoden innebär för ved- och pelletseldade pannor en bestämning av stofthalt, CO-halt och O<sub>2</sub>-halt i rökgaserna, och för oljeeldade pannor en bestämning av sotal, CO-halt och O<sub>2</sub>-halt i rökgaserna.

Ett urval av de erhållna sotproverna har därefter analyserats med avseende på olika egenskaper. En matematisk modell för beräkning av yttemperaturen på en rökkanal vid sotbrand har formulerats. Som indata till modellen används mätresultat från projektet. Projektets genomförande har bestått av följande huvuddelar:

- 1) Fältmätningar och insamling av sotprov vid totalt ca 340 sotningstillfällen i ca 110 st anläggningar under ca 18 månader
- 2) Vägning och volymbestämning samt okulär klassificering av samtliga sotprov
- 3) Analys av bl.a. halt oförbränt, effektivt värmevärde samt antändningstemperatur hos ett antal sotprov
- 4) Studier av sambanden mellan anläggningstyp och sotmängd och sottyp
- 5) Studier av sambanden mellan stofthalt/sotal och sotmängd
- 6) Utveckling samt programmering av en matematisk modell för simulering av sotbrand i rökkanaler
- 7) Beräkning av några typfall för sotbrand med data på mängd och egenskaper hos sotet från projektet

### 3.2 Mätningar, provtagning och analys

#### 3.2.1 Fältmätningar och insamling av sotprov

Fältmätningarna och insamlingen av sotprov har på uppdrag av SP – Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut genomförts av Sotarn i Borås AB vid ordinarie sotningstillfälle. Mätningarna har genomförts under tiden juni 2000 till december 2001 med utrustning som tillhandahållits av SP. I samband med

första mättillfället gjordes en detaljerad beskrivning av anläggningen. Vid samtliga mätningar har mätprotokoll upprättats.

### 3.2.1.1 Urval av anläggningar

Fältundersökningen har omfattat både fastbränsleeldade och oljeeldade anläggningar. Totalt ca 110 st anläggningar med en effekt på högst 60 kW har ingått i undersökningen. Vid planeringen eftersträvades följande fördelning med hänsyn till anläggningstyp och sotningsfrist:

- ca 30 st vattenkylda vedeldade pannor (sotningsfrist 8 veckor)
- ca 20 st keramiska vedeldade pannor (sotningsfrist 16 veckor)
- ca 20 st lokaleldstäder för vedeldning (sotningsfrist 3 alt 1 år)
- ca 20 st konventionella oljepannor (sotningsfrist 1 år)
- ca 10 st miljömärkta oljepannor (sotningsfrist 2 år)
- ca 10 st pelletseldade pannor (sotningsfrist 16 veckor)

Med ”vattenkylda vedpannor” menas här vedpannor av traditionell typ med vattankylt eldstad som inte visats uppfylla Boverkets utsläppskrav av organiskt bundet kol (OGC). Med ”keramiska vedpannor” menas vedpannor som visats uppfylla Boverkets utsläppskrav (dvs är ”miljögodkända”), vilket i praktiken innebär att de har en keramiskt infordrad eldstad.

Med ”miljömärkta oljepannor” menas pannor som erhållit Svanen-märkning enligt Nordisk Miljömärkning. Med ”konventionella oljepannor” menas alla andra oljepannor.

Anläggningarna valdes ut inom koncentrerade geografiska områden för att möjliggöra effektivt genomförande av fältarbetet. Vid urvalet beaktades att anläggningarna skulle uppvisa en relevant spridning i fråga om pannotyp, typ av rökanal, bränsle och användningsätt. Urvalet gjordes av Sotarn i Borås AB och granskades och godkändes av SP.

I huvudsak har de från början utvalda anläggningarna kunnat användas under hela projektiden. I några få fall har dock anläggningsägaren bytt panna under projektiden eller vidtagit andra åtgärder som innebär att anläggningen fallit ifrån. Detta gäller främst gruppen pelletseldade pannor, och av denna anledning utökades gruppen med ytterligare ca 10 anläggningar under projektets senare del.

### 3.2.1.2 Anläggningsbeskrivningar

Vid första mättillfället upprättades en detaljerad beskrivning av anläggningen och dess användning. Följande huvuddata dokumenterades:

- Foliernr (i sotningsföretagets datasystem)
- Eldstadstyp (konventionell eller ”miljögodkänd” vedpanna, konventionell eller miljömärkt oljepanna, kamin)
- Fabrikat
- Eldningsapparat (ev oljebrännare, pelletsbrännare)
- Ackumulator/volym
- Skorstensmaterial
- Skorstensarea
- Skorstenshöjd
- Eldningsfrekvens (daglig, daglig okt-mars, övrigt)
- Bränsletyp
- Fukthalt (normal/fuktig)

Dessa data lades in i den databas som upprättades för projektet.

### 3.2.1.3 Uttag av sotprover

Vid ankomst till fastigheten rensades pannans eldstad på eventuellt kvarvarande sot och aska vilket togs om hand på sedvanligt sätt. Därefter rensades rökkanal, anslutningskanal och pannans konvektionsdelar. Mängden sot i pannans konvektionsdelar var normalt mycket liten jämfört med mängden sot i anslutningskanal och rökkanal. Allt avsatt sot (aska) från dessa delar slogs ihop och sparades i en märkt plastpåse. Påsarna levererades till SP för senare bestämning av sotets massa och volym samt klassificering av sottomtyp och i förekommande fall analys.

### 3.2.1.4 Mätningar

Mätmetoden innebär för ved- och pelletseldade pannor en bestämning av stofthalt, CO-halt och O<sub>2</sub>-halt i rökgaserna, och för oljeeldade pannor en bestämning av sotalt, CO-halt och O<sub>2</sub>-halt i rökgaserna.

Mätningarna på **ved- och pelletseldade pannor samt kaminer** skedde enligt en metod och med utrustning som används i Tyskland för besiktning av mindre fastbränsleeldade pannor. Metoden innebär att totalt 135 liter rökgas sugts ut och filtreras genom ett litet stofffilter under en tidsrymd på 15 minuter. Stofffiltret har före provtagningen konditionerats och vägts in.

Under provtagningen mäts samtidigt CO- och O<sub>2</sub>-halterna och en delström av provgasen samlas upp i en påse. Efter stoftprovtagningen mäts CO- och O<sub>2</sub>-halterna i detta gasprov vilket ger medelvärden på CO- och O<sub>2</sub>-halterna under provtagningsperioden. Efter konditionering och invägning av stofffiltret erhålls uppsamlad stoftmängd vilket tillsammans med provgasvolymen

och rökgasernas O<sub>2</sub>-halt ger stofthalten normerad till given O<sub>2</sub>-halt (normalt 10 %). CO-halten erhålls i g/m<sup>3</sup> normerad till given O<sub>2</sub>-halt. Utöver stoft- CO- och O<sub>2</sub>-halterna bestämdes också drag och rökgastemperatur med samma instrument vid mätningen.

Vid ankomst till fastigheten var pannan inte tänd. Efter uttag av sotprover tändes pannan upp med en mindre mängd ved och när en glödbädd erhållits fylldes ved på. Därefter avvaktades till dess att stabila förbränningsbetingelser bedömdes ha uppnåtts innan mätningen påbörjades. Detta innebar i normalfallet en tidsperiod på 20-45 min mellan upptändning och start av mätningen; den längre perioden framför allt för ”miljögodkända” pannor.

Invägningen av stoftfilter gjordes partivis av SP varefter dessa förvarades i märkta kopparhylsor och levererades till Sotarn i Borås för användning. Efter mätning återfördes filtren till SP för konditionering och vägning.

För mätningarna användes instrument av typ Wöhler SM-96 CO, inköpta av SP. Före mätkampanjens start erhöll mätpersonalen en dags utbildning i handhavande, funktion och service av instrumentet. En särskild svenskspråkig manual för instrumentet togs också fram.

För **oljeeldade pannor** skedde bestämning av CO- och O<sub>2</sub>-halt med hjälp av ett handinstrument av typ Testo 325. Sottalet bestämdes enligt Bacharach.

## 3.2.2 Upparbetning och analys av sotprover

### 3.2.2.1 Vägning och volymbestämning

För samtliga sotprov bestämdes massa resp. volym. Massan bestämdes genom vägning av resp sotpåse på en våg av typ Sartorius LC 34. Volymen bestämdes genom att föra över sotprovet till ett 2000 ml mätglas och läsa av volymen. I vissa fall måste provet delas upp i flera delprov för att den totala volymen skulle kunna bestämmas.

### 3.2.2.2 Okulär klassificering

De erhållna sotprovens utseende varierade starkt i fråga om färg, kornstorlek, struktur och matthet/glans. För att så långt möjligt systematisera proverna utvecklades en empirisk okulär modell enligt vilken samtliga prover klassificerades. Klassificeringen genomfördes så att ett större antal prover lades upp (öppna sotpåsar) samtidigt på ett bord så att jämförelse skulle vara möjlig. Därefter bedömdes vilken grupp varje sotprov skulle tillhöra. Samma person genomförde alla klassificeringar. Dessutom fotograferades samtliga sotprov med digitalkamera så att okulär jämförelse på dator är möjlig.

Följande klasser användes för prover från ved- och pelletseldade anläggningar:

- normal (grått-svart, ev inslag av vita ”korn”, medelgrovt, ej blankt)
- aska (ljus grått, medelgrovt till fint, ej blankt)
- sot (starkt svart, fint pulver, poröst., matt)
- tjära (svart, blankt, sprött, sammanhängande bitar)
- knotter (svart, blankt, sprött, ”knottrigt”)

Följande klasser användes för prover från oljeeldade anläggningar:

- normal (se ovan)
- aska (se ovan)
- sot (se ovan)
- murbruk (i huvudsak rester av rökkanalen)

Typbilder på sotprover från de olika klasserna visas i bilaga 1.

### 3.2.2.3 Bestämning av oförbränt i sotprover

Halten oförbränt bestämdes i ett sjuttioalot sotprover. Avsikten var att undersöka om halten oförbränt varierade mellan prover från de olika klasserna och i så fall ta fram korrigeringsfaktorer för omräkning av sotmängder till mängd oförbränt.

Sotprover för analys av oförbränt togs ut i två omgångar; dels från hösten 2000 (omgång 1), dels från våren 2001 (omgång 2). I varje omgång togs slumpvisa prover ut från varje grupp enligt följande.

**Tabell 1: Sotprover för analys av oförbränt**

	Antal prov	
	Omgång 1	Omgång 2
<b>Ved- och pelletseldade anläggningar</b>		
- normal	5	11
- aska	5	4
- sot	3	5
- tjära	3	4
- knotter	3	2
<b>Oljeeldade anläggningar</b>		
- normal	3	3
- aska	-	2
- sot	4	3
- murbruk	4	-

Totalt analyserades därmed 64 st sotprov med avseende på halten oförbränt, dvs ca 20 % av samtliga prover. Halten oförbränt bestämdes som glödförlust vid 700°C enligt SP-Metod 0515. Trippelbestämning utfördes på samtliga prov.

### 3.2.2.4 Bestämning av antändningstemperatur, effektivt värmevärde m.m.

Ett antal av sotproverna analyserades vidare med avseende på antändningstemperatur, effektivt värmevärde m.m.

**Bestämningen av antändningstemperatur** skedde enligt en metod som utvecklades inom projektet. En detaljerad beskrivning av detta ges i [1]. Nedan ges en kortfattad beskrivning.

För bestämningen användes en rörugn där temperaturen kan höjas kontinuerligt på ett kontrollerat sätt. En liten mängd sot placerades i ett tråg (40 x 40 mm). I sotprovets yta placerades ett termoelement. Tråget fördes in i rörugnen och när sotprovet nått termisk jämvikt med ugnen startades uppvärmningen med hastigheten 3 °C/min. Temperaturen i sotets yta mättes kontinuerligt och antändningstemperaturen bestämdes därefter ur temperaturkurvorna med hjälp av tangentmetoden.

Sammanlagt 26 st sotprover analyserades på detta sätt.

Ca 20 st av dessa prov samt ytterligare 10 st sotprov analyserades beträffande **antändlighet och värmeutveckling**. Provningarna utfördes i en s.k. konkalorimeter enligt ISO 5660. I denna bestrålas provkroppar med ytan 100 x 100 mm (i detta fall sot utbrett i en plåtkorg) så att denna värms upp och pyrolysgaser börjar avges och därefter antändas. Rökgaserna samlas upp i huv och genom bestämning av syrehalten i rökgaserna kan utvecklad värmeeffekt bestämmas. Massförlusten under försöket bestäms också. Följande parametrar bestäms i första hand vid provningen:

- tid till antändning (min:s)
- maximalt utvecklad värmeeffekt (kW/m<sup>2</sup>)
- medeleffekt under 180 s (kW/m<sup>2</sup>)
- totalt utvecklad energi (MJ/m<sup>2</sup>)
- effektivt värmevärde (MJ/kg)

## 3.3 Utvärdering

### 3.3.1 Utvärdering av emissionsmätningar

Resultaten av emissionsmätningarna har sammanställts i olika grupper beroende på anläggningstyp m.m. Vid utvärderingen har följande grupper tillämpats:

- keramiska resp. traditionella vedpannor
- pannor med resp utan ackumulatortank
- traditionella resp miljömärkta oljepannor
- pelletspannor
- lokaleldstäder
- anläggningar med tegelskorsten resp stålskorsten

För dessa grupper har samtliga mätvärden för rökstemperatur, CO<sub>2</sub>-halt, CO-halt och stofthalt (för vedpannor, pelletspannor och kaminer) resp rökstemperatur, CO<sub>2</sub>-halt, CO-halt och sotal (för oljepannor) lagts in i diagram. Vidare har medelvärden för resp parameter och anläggningstyp beräknats.

### 3.3.2 Utvärdering av tillväxthastighet

#### 3.3.2.1 Korrektion av sotmängder

De uppmätta sotmängderna korrigerades till mängd oförbränt genom multiplikation med en korrektionsfaktor, beroende på klassificeringen av sotprovet. Korrektionsfaktorn bestämdes genom att beräkna medelvärdet av andelen oförbränt i samtliga prover som analyserats inom resp. klassificeringsgrupp. På detta sätt erhöles en korrigerad massa och en korrigerad volym för varje sotprov som motsvarar andelen oförbränt.

#### 3.3.2.2 Beräkning av sotbeläggningarnas tillväxthastighet

De uppmätta sotmängderna är åtminstone principiellt beroende på hur lång tid som gått sedan föregående sotning. Eftersom sotningsfristerna är olika för olika typer av anläggningar och dessutom de verkliga fristerna varierar något av praktiska skäl, har **tillväxthastigheten uttryckt i gram per dygn och i mm skiktjocklek i aktuell röckanal per dygn** beräknats ur de korrigerade sotmängderna.

För att ytterligare generalisera resultaten har också antalet graddagar under resp provperiod mellan sotningarna beräknats. Med hjälp av detta har **tillväxthastigheten uttryckt i gram per graddag och i mm per graddag i aktuell röckanal** också beräknats.



### 3.3.2.3 Utvärdering av samband mellan anläggningstyp och tillväxthastighet samt sottyp

För att söka samband mellan olika anläggningstyper och sotskiktets tillväxthastighet har data delats upp i grupper på motsvarande sätt som för emissionsdata. Utöver dessa grupper har en indelning i anläggningar med tegelskorsten (dit även modulskorstenar av typ Iso-Kaern och Anki har räknats) och anläggningar med stålskorsten (dit andra typer av modulskorstenar räknats) gjorts. Data har dels lagts in i diagram och vidare har medelvärden för respektive grupper beräknats.

### 3.3.3 Utvärdering av antändningstemperatur, effektivt värmevärde m.m.

De fysikaliska egenskaperna hos de sotprover som analyserats har i första hand studerats mot bakgrund av den okulära klassificering som gjorts av proven. Medelvärden av antändningstemperatur, tid till antändning, maximalt utvecklade effekt, medeleffekt under 180 s, totalt utvecklad energi per m<sup>2</sup> samt effektivt värmevärde har beräknats för de olika sotklasserna.

## 3.4 Beräkningsmodell för yttemperatur på rökkanaler vid sotbrand

### 3.4.1 Allmänt

En sotbrand uppstår genom antändning av sotskiktet i en rökkanal. Då en sådan brand uppstått kommer yttemperaturen på rökkanalens ytteryta att stiga på grund av effektutvecklingen i skorstenen. Beroende på avståndet till omgivande material, luftströmningsförhållanden m.m. kommer också temperaturen på närliggande brännbart material att stiga. Hur mycket temperaturen på rökkanalens ytteryta och därmed närliggande brännbart material stiger vid en sotbrand beror bl.a. på effektutvecklingen vid sotbranden och dess varaktighet. Detta i sin tur beror på hur mycket sot som finns tillgängligt i rökkanalen samt dess innehåll av oförbränt och därmed dess effektiva värmevärde. Bestämningarna av sotmängd samt analyserna av sotprover ger underlag för typiska värden i dessa avseenden.

### 3.4.2 Beräkningsmodell

För att möjliggöra beräkningar av temperaturen på ytterytan av en skorsten under sotbrand har en datormodell utvecklats. Modellen bygger på en värmebalans där förbränningen sker med konstant effektutveckling och temperatur under en viss uppskattad brinntid. En beskrivning av modellen ges i avsnitt

4.7.1. Med hjälp av modellen kan det beräknas vid vilken tjocklek på ett sot-skikt av given typ som temperaturen på utsidan av skorstenen blir högre än ett viss ur säkerhetssynpunkt accepterat värde. Vid en viss tillväxthastighet kan då också beräknas hur långt sotningsintervall som kan accepteras. Man kan också studera vilka parametrar som har stor betydelse och vilka som har liten.

Vid användning av modellen krävs följande indata:

- cirkulär eller rektangulär skorsten
- anläggningens ungefärliga effekt
- bränsle
- bränslets fukthalt (om ved)
- O<sub>2</sub>-halt
- rökgastemperatur
- rumstemperatur
- skorstenens innermått
- skorstenens väggdjocklek
- isoleringens tjocklek
- väremeledningskoefficienter för skorsten resp. isolering
- placering i välventilerat resp svagt ventilerat utrymme
- sotets värmevärde
- sotets densitet
- sotbrandens varaktighet
- sotskiktets tillväxthastighet

# 4 Resultat

## 4.1 Emissionsmätningar

### 4.1.1 Bibränsleeldade anläggningar

För de anläggningar som eldades med ved eller pellets mättes stofthalt, CO-halt och O<sub>2</sub>-halt i rökgaserna samt rök Gastemperatur och drag. I tabell 2 ges en sammanställning av erhållna värden för stoft- och CO-halter i form av medelvärden och standardavvikelser för olika anläggningstyper.

**Tabell 2:** Stoft- och CO-halter för olika typer av anläggningar

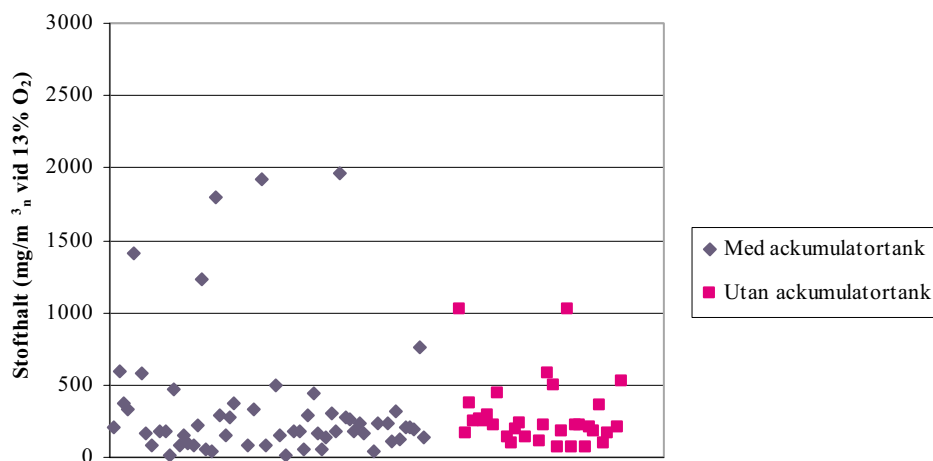
	Stofthalt, mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub> vid 13 % CO <sub>2</sub>			CO-halt, mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub> vid 13 % CO <sub>2</sub>		
	mv	n	σ	mv	n	σ
Vattenkylda pannor						
- totalt	314	91	377	4,72	96	2,7
- med ack.tank	369	59	440	5,16	59	3,1
- utan acktank	284	32	235	4,06	33	1,7
Keramiska pannor						
- totalt	194	52	417	4,96	51	4,0
- med ack.tank	200	48	274	4,91	46	3,9
- utan ack.tank	722	4	1229	5,47	5	5,1
Pellets pannor	88	43	129	1,54	43	1,9
Kaminer	279	30	296	4,30	28	2,3

Som framgår av tabellen är stoft- och CO-halterna för vedeldade anläggningar betydligt högre än för pelletseldade anläggningar. Skillnaden är ca en faktor fyra. En skillnad i fråga om stofthalt kan också utläsas mellan vattenkylda pannor och keramiska pannor, där de förra ger 1,5-2,0 gånger högre stofthalt. I fråga om CO-halt kan dock ingen signifikant skillnad utläsas.

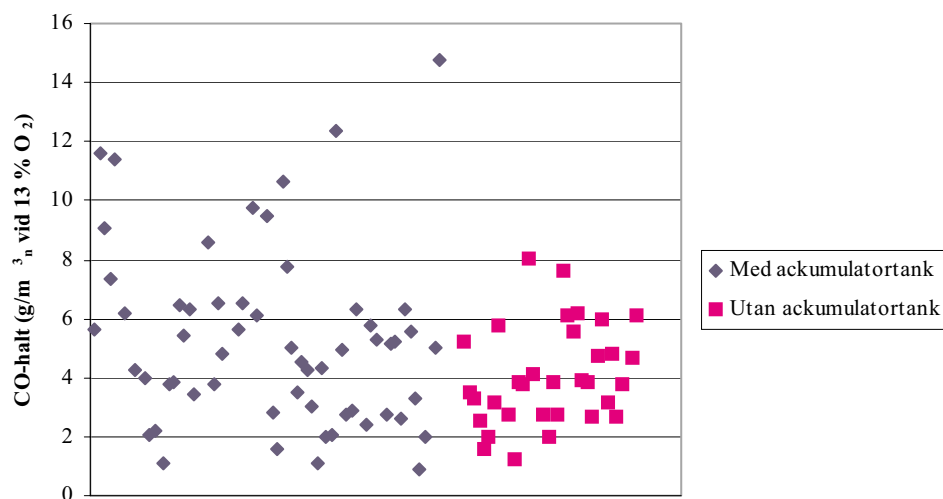
#### 4.1.1.1 Vattenkylda pannor

I materialet ingår 91 st mätningar på 30 st anläggningar. I de flesta fall har fyra mätningar genomförts på varje anläggning, fördelat över en tidsperiod på ca ett år.

I figurerna 1 resp. 2 nedan visas stoft- och CO-halter för anläggningar med resp. utan ackumulatortank.



**Figur 1:** Stofthalt för vattenkylda pannor med resp. utan ackumulatortank



**Figur 2:** CO-halt för vattenkylda pannor med resp. utan ackumulatortank

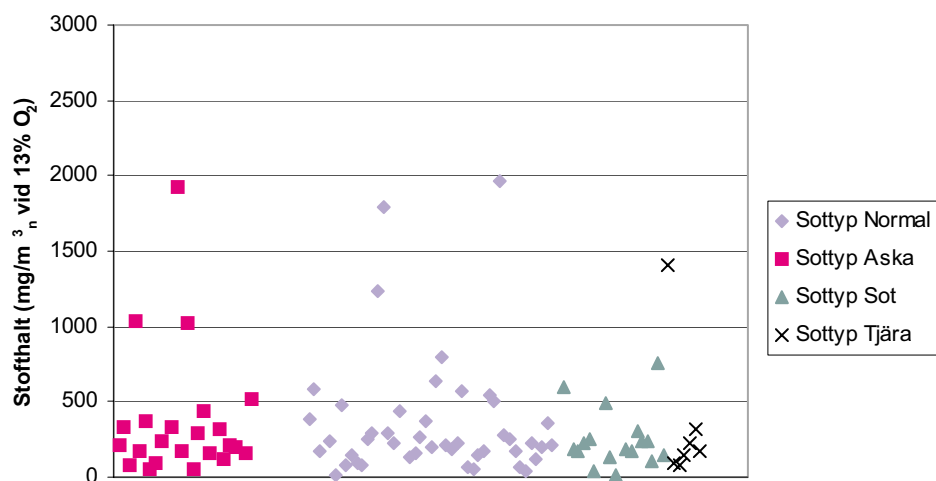
Anläggningar utan ackumulatortank ger i genomsnitt något lägre CO-halter och stofthalter än anläggningar med ackumulatortank. Som framgår är spridningen i stoft- och CO-halter mellan olika anläggningar relativt stor, och några långtgående slutsatser bör därför inte dras

I Tabell 3 nedan redovisas stoft- och CO-halter fördelat på olika sottomtyper.

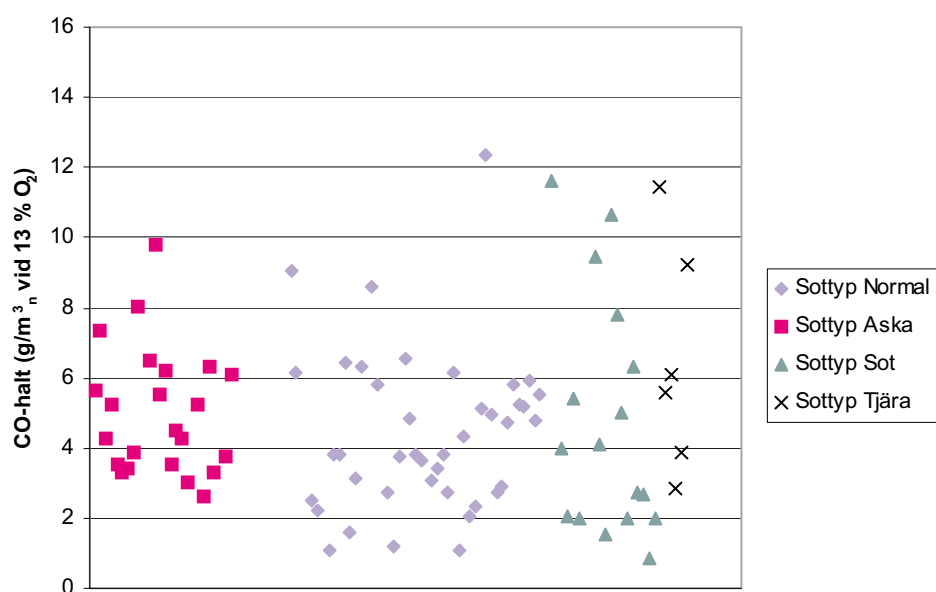
**Tabell 3:** Stoft- och CO-halter för vattenkylda pannor fördelat på olika sottomtyper

Sottomtyp	Stofthalt, mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub> vid 13 % CO <sub>2</sub>			CO-halt, g/m <sup>3</sup> <sub>n</sub> vid 13 % CO <sub>2</sub>		
	mv	n	σ	mv	n	σ
Normal	354	47	403	4,3	47	2,3
Aska	371	23	427	4,8	23	1,8
Sot	251	17	195	4,7	17	3,4
Tjära	350	7	475	6,1	6	3,2

I figurerna 3 resp. 4 nedan visas stoft- och CO-halter från anläggningar med olika typer av sot.



**Figur 3:** Stofthalt för vattenkylda pannor med olika typer av sot



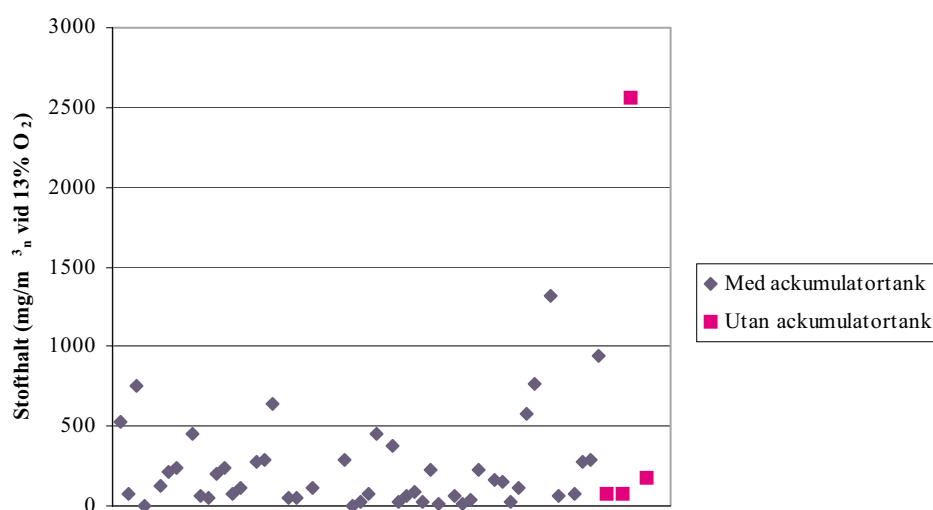
**Figur 4:** CO-halt för vattenkylda pannor med olika typer av sot

Någon signifikant korrelation mellan stoft- eller CO-halt och typ av sot kan inte fastställas. Möjligen kan något högre CO-halter konstateras för de pannor vars sotprover klassificerats som ”sot” eller ”tjära”.

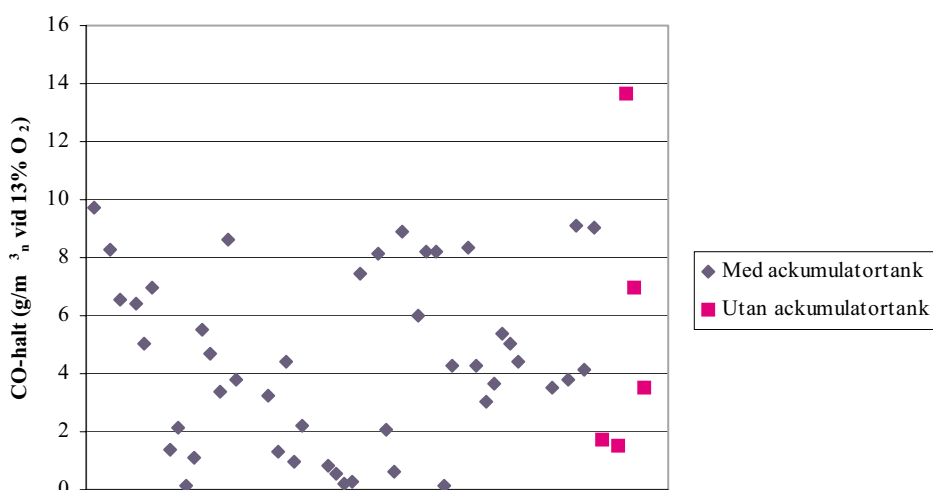
#### 4.1.1.2 Keramiska pannor

I materialet ingår 51 st mätningar på 21 st anläggningar. I de flesta fall har tre mätningar genomförts på varje anläggning, fördelat över en tidsperiod på ca 15 månader.

I figur 5-6 nedan visas stoft- och CO-halter för anläggningar med resp. utan ackumulatortank.



**Figur 5:** Stofthalt för keramiska pannor med resp. utan ackumulatortank



**Figur 6:** CO-halt för keramiska pannor med resp. utan ackumulatortank

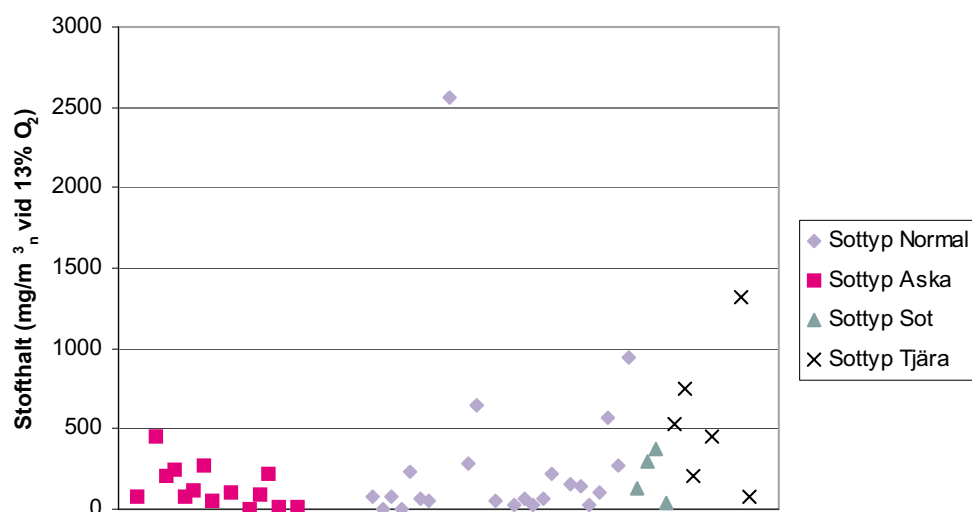
Även i detta fall är spridningen mellan olika anläggningar relativt stor.

I Tabell 4 nedan redovisas stoft- och CO-halter fördelat på olika sottomtyper.

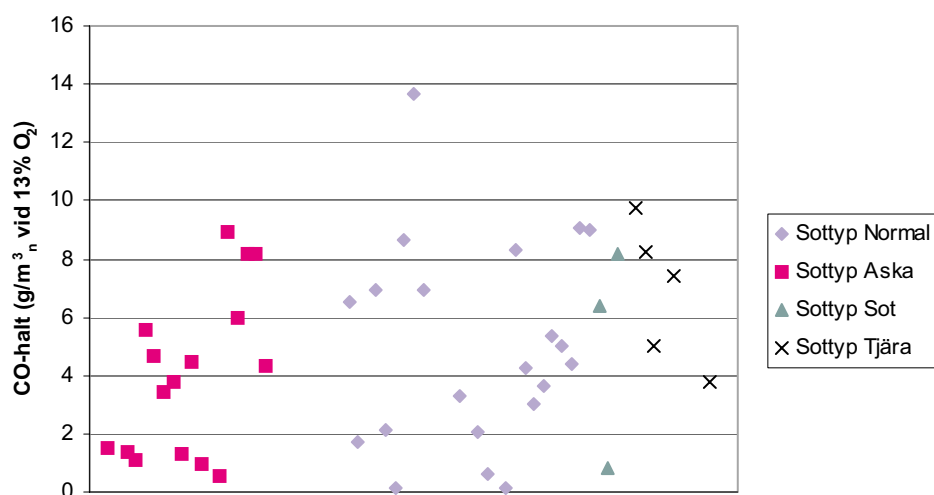
**Tabell 4:** Stoft- och CO-halter för keramiska pannor fördelat på olika sottomtyper

Sottomtyp	Stofthalt, mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub> vid 13 % CO <sub>2</sub>			CO-halt, g/m <sup>3</sup> <sub>n</sub> vid 13 % CO <sub>2</sub>		
	mv	n	σ	mv	n	σ
Normal	278	23	540	5,0	21	3,5
Aska	128	14	126	4,0	16	2,9
Sot	210	4	153	5,1	3	3,8
Tjära	556	6	441	6,9	5	2,4

I Figur 7-8 nedan visas motsvarande mätvärden.



**Figur 7:** Stofthalt för keramiska pannor med olika typer av sot



**Figur 8:** CO-halt för keramiska pannor med olika typer av sot

Inte heller här något tydligt samband mellan stoft- och/eller CO-halt och typ av sot konstateras.

#### 4.1.1.3 Pellets pannor

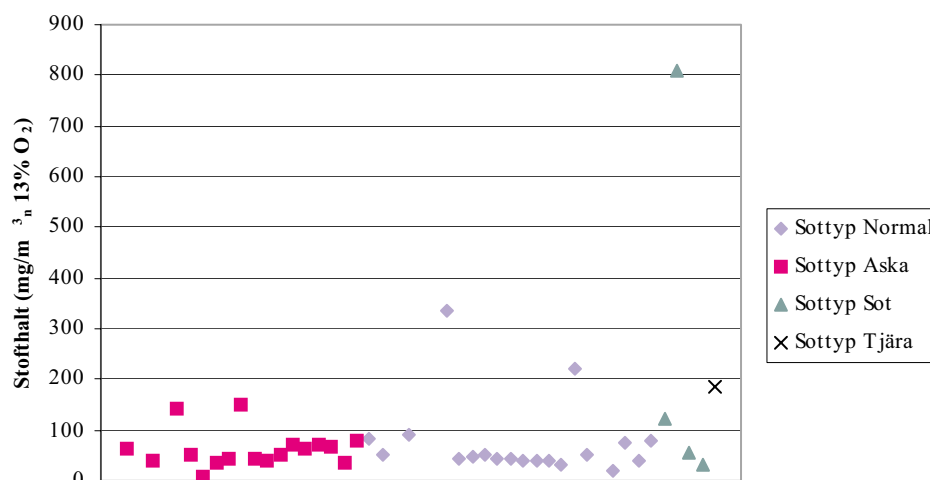
I materialet ingår 44 st mätningar på 20 st anläggningar. I de flesta fall har två mätningar genomförts på varje anläggning, fördelat över en tidsperiod på ca ett halvt år.

I Tabell 5 nedan redovisas stoft- och CO-halter fördelat på olika sottyper.

Tabell 5: Stoft- och CO-halter för pellets pannor fördelat på olika sottyper

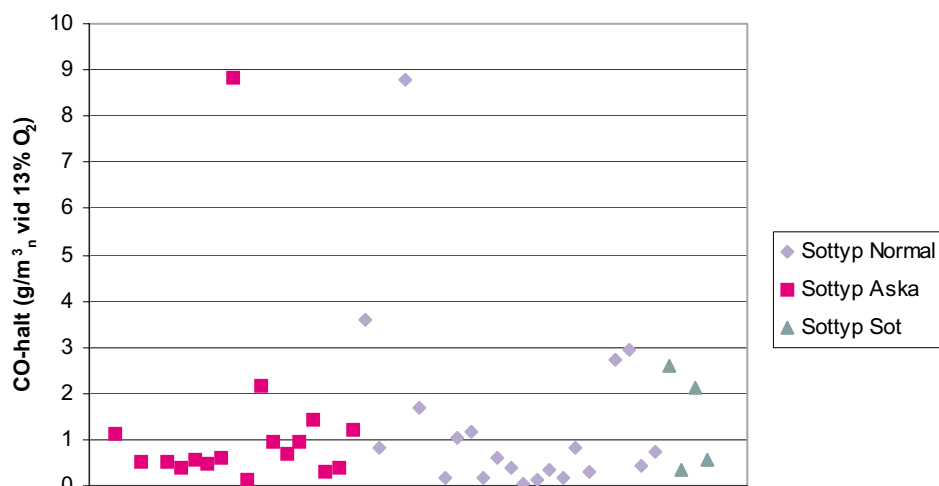
Sottyp	Stofthalt, mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub> vid 13 % CO <sub>2</sub>			CO-halt, g/m <sup>3</sup> <sub>n</sub> vid 13 % CO <sub>2</sub>		
	mv	n	σ	mv	n	σ
Normal	75	19	76	1,4	20	2,0
Aska	62	17	36	1,2	17	2,0
Sot	254	4	371	1,4	4	1,1
Tjära	186	1	-	-	-	-

I figur 9-10 nedan visas stoft- och CO-halter för olika sottyper



Figur 9: Stofthalt för pellets pannor med olika typer av sot





**Figur 10:** CO-halt för pelletspannor med olika typer av sot

I detta fall är spridningen med något enstaka undantag mindre mellan olika anläggningar. Utsläppen av stoft och CO är också i genomsnitt betydligt lägre än för de vedeldade pannorna.

#### 4.1.1.4 Kaminer

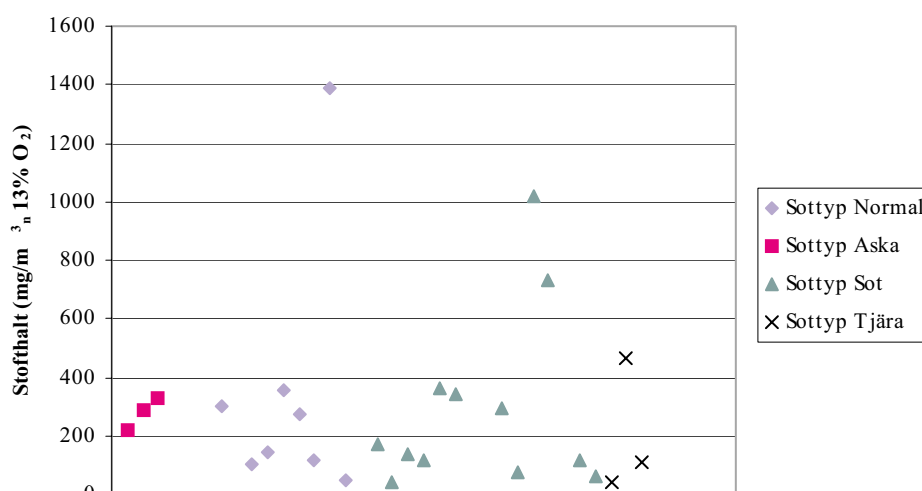
I materialet ingår 36 st mätningar på 19 st anläggningar. I de flesta fall har två mätningar genomförts på varje anläggning med en mellanliggande tidsperiod på ca 1 år.

I Tabell 6 nedan redovisas stoft- och CO-halter fördelat på olika sottomtyper.

**Tabell 6:** Stoft- och CO-halter för kaminer fördelat på olika sottomtyper

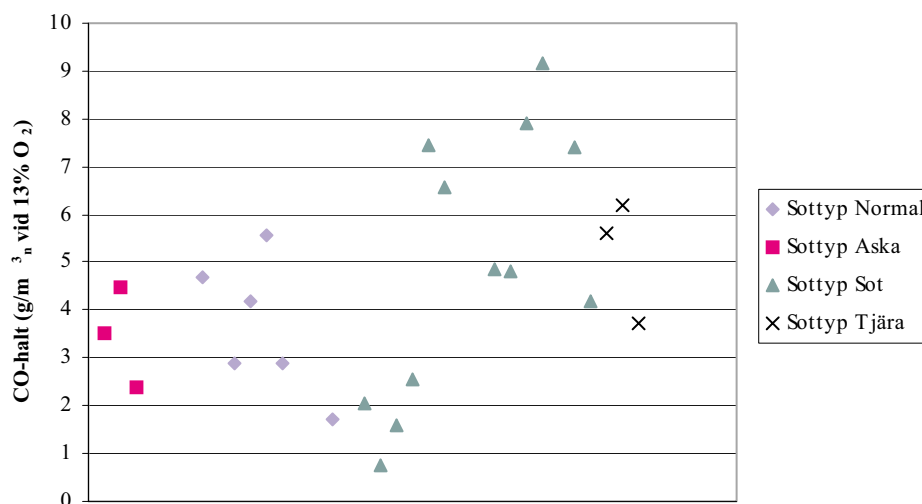
Sottyp	Stofthalt, mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub> vid 13 % CO <sub>2</sub>			CO-halt, g/m <sup>3</sup> <sub>n</sub> vid 13 % CO <sub>2</sub>		
	mv	n	σ	mv	n	σ
Normal	341	8	438	3,7	6	1,4
Aska	278	3	58	3,5	3	1,1
Sot	289	12	301	4,9	12	2,8
Tjära	205	3	229	5,2	3	1,3

I figur 11 nedan visas stofthalten fördelat på olika sottomtyper



Figur 11: Stofthalt för kaminer med olika typer av sot

I figur 12 visas på motsvarande sätt den normerade CO-halten fördelat på olika sottomtyper.



Figur 12: CO-halt för kaminer med olika typer av sot

I detta fall är åter spridningen stor mellan de olika anläggningarna, men en relativt klar tendens till högre stof- och CO-halter för de anläggningar vars sotprover klassificerats som "sot" eller "tjära" kan konstateras.

#### 4.1.2 Oljeeldade anläggningar

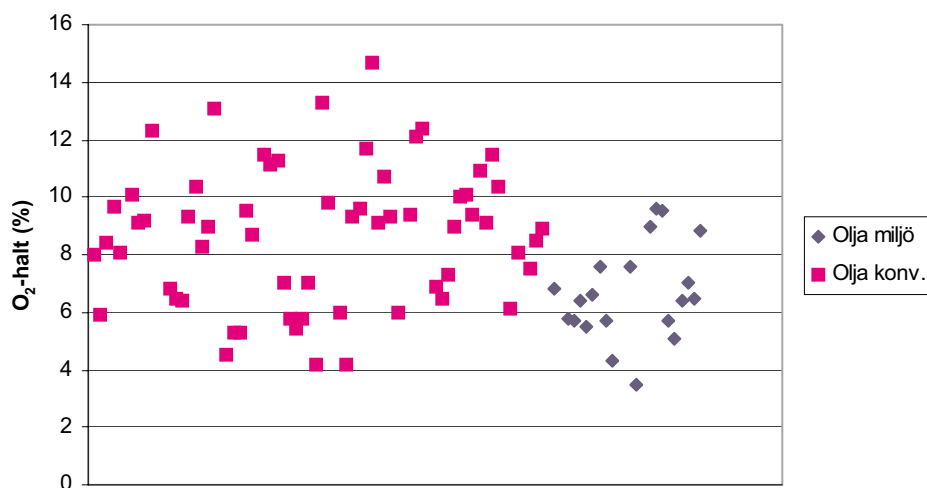
För de anläggningar som eldades med olja mättes O<sub>2</sub>-halt, CO-halt och sotall i rökgaserna samt rökgastemperatur och drag. I tabell 7 ges en sammanställning av erhållna värden i form av medelvärden och standardavvikelse för olika anläggningstyper.

**Tabell 7:** O<sub>2</sub>-halt, CO-halt och sotal för oljeeldade anläggningar

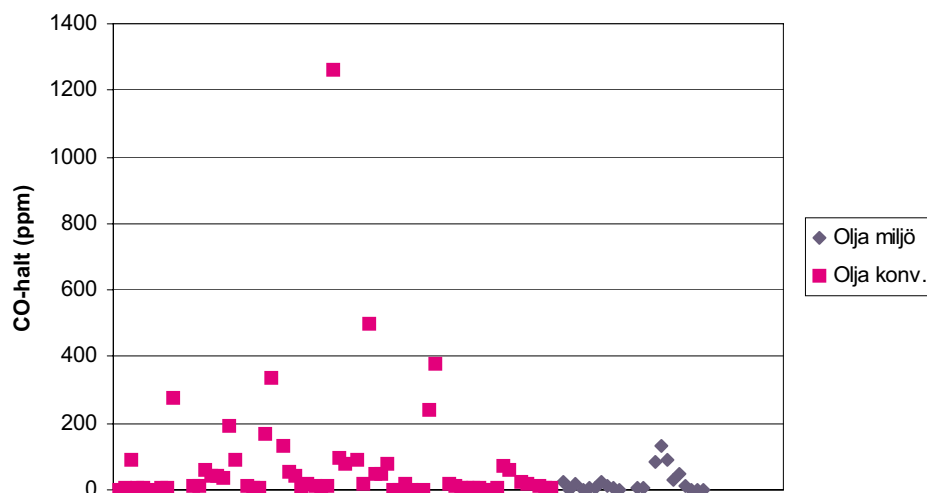
	Antal mätningar	O <sub>2</sub> -halt, vol-% t.g.		CO-halt, ppm t.g.		Sotal enl. Bacharach	
		mv	σ	mv	σ	mv	σ
Konventionella pannor	63	8,7	2,4	78	182	1,9	1,9
Miljömärkta pannor	21	6,7	1,6	25	35	1,0	0,7

De CO-halter och sotal som uppmättes måste bedömas som i genomsnitt mycket goda värden, både för miljömärkta och konventionella pannor. Sotal på 1 – 2 samt CO-halter under 100 ppm indikerar att de allra flesta ingående oljepannorna brann förhållandevis bra.

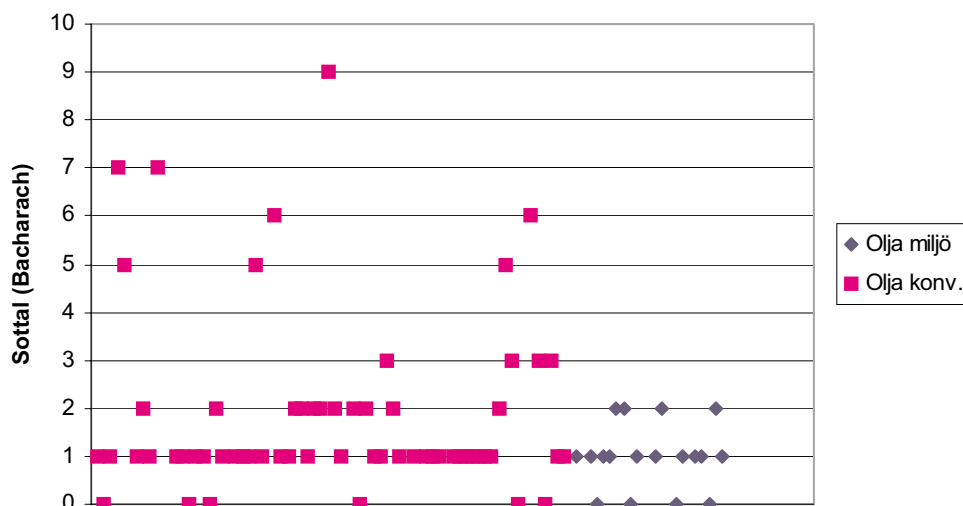
I figur 13-15 visas uppmätta O<sub>2</sub>-halter, CO-halter och sotal uppdelat på konventionella resp miljömärkta pannor.



**Figur 13:** O<sub>2</sub>-halter för konventionella resp. miljömärkta oljepannor



**Figur 14:** CO-halter för konventionella resp. miljömärkta oljepannor



**Figur 15:** Sottal för konventionella resp. miljömärkta oljepannor

Som framgår visar de miljömärkta pannorna i medeltal lägre luftöverskott, lägre CO-halter och lägre sotal än de konventionella pannorna. I underlaget för konventionella pannor ingår visserligen en anläggning med starkt avvikande värden för CO-halt och sotal, men även då denna borträknas är skillnaden klart signifikant.

## 4.2 Rökgastemperatur

Samtidigt med mätningen av stoft och CO uppmättes även rökgastemperaturen. I Tabell 8 ges en sammanfattning av de uppmätta värdena.

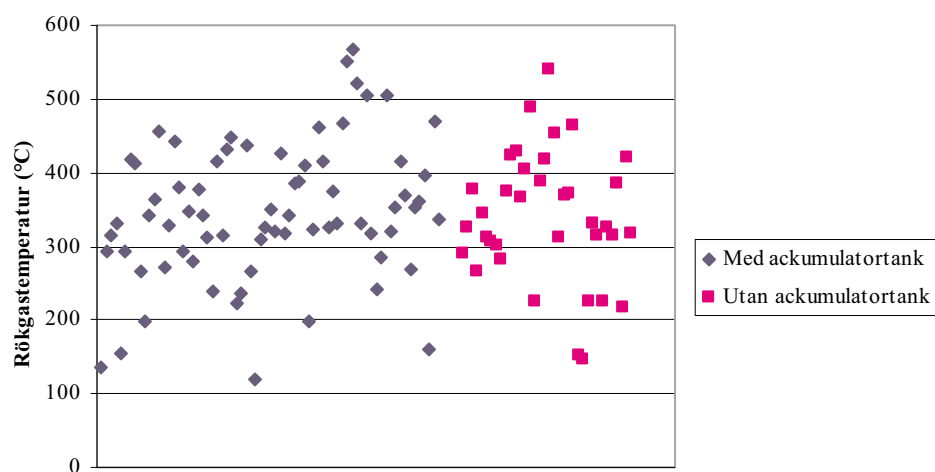
Rökgastemperaturen för vattenkylda pannor är således i medeltal ca 120 °C högre för de vattenkylda vedpannorna än för de keramiska vedpannorna, 346 °C mot 229 °C. För pellets pannor är rökgastemperaturen ytterligare ca 70 °C lägre, eller ca 160 °C. Vedkaminerna visar de högsta genomsnittliga rökgastemperaturerna, medan oljepannorna ger temperaturer på 160 – 170 °C.

I figur 16-20 redovisas de uppmätta rökgastemperaturerna för olika eldstadstyper.

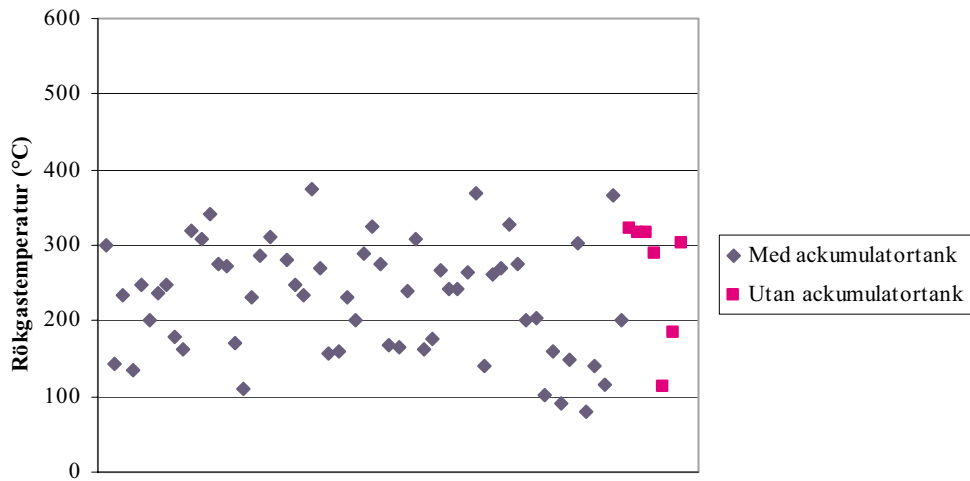
**Tabell 8:** Rök-gastemperaturer för olika typer av eldstäder

	Rök-gastemperatur, °C		
	mv	n	$\sigma$
Vattenkylda vedpannor			
- totalt	343	107	91
- med ackumulatortank	346	71	94
- utan ackumulatortank	339	36	89
Keramiska vedpannor			
- totalt	232	75	75
- med ackumulatortank	229	68	74
- utan ackumulatortank	263	7	82
Pelletspannor	160	45	55

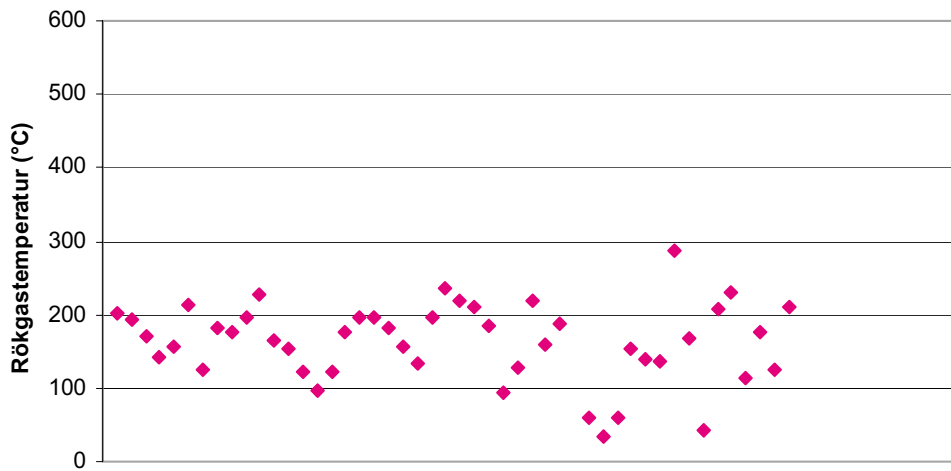
Kaminer	361	36	109
Oljepannor, konventionella	170	40	20
Oljepannor, miljömärkta	163	30	60



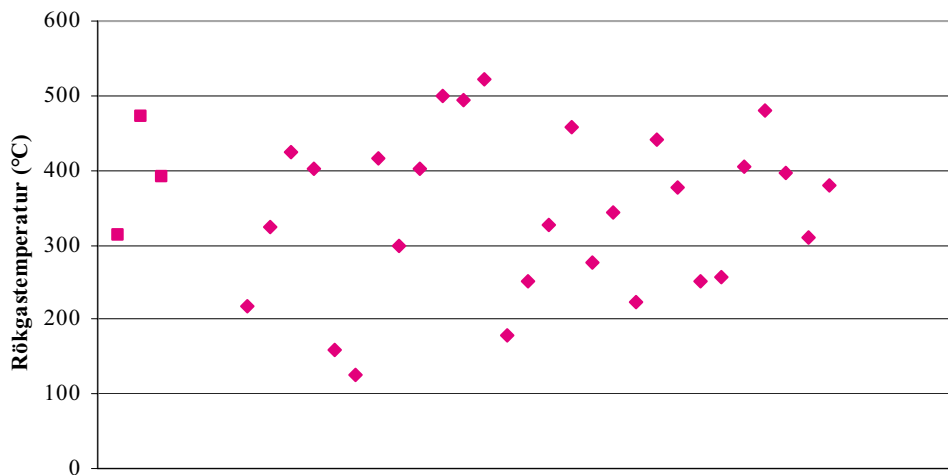
**Figur 16:** Rök-gastemperaturen för vattenkylda pannor med resp. utan ackumulatortank



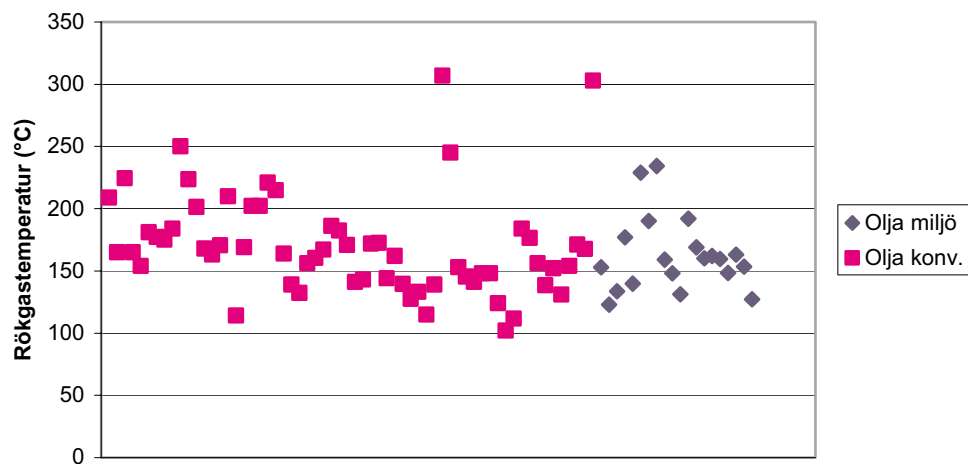
**Figur 17:** Rökgastemperaturen för keramiska pannor med resp. utan ackumulatortank



**Figur 18:** Rökgastemperaturen för pelletspannor



**Figur 19:** Rökgastemperaturen för kaminer



**Figur 20:** Rökgastemperaturen för oljepannor

Som framgår är spridningen i rökgastemperatur störst för vattenkylda vedpannor och kaminer. Bland de vattenkylda pannorna har relativt många rökgastemperaturen på över 400 °C, medan ingen keramisk vedpanna når sådana temperaturer. Även ett antal kaminer når rökgastemperaturer över 400°C. Det skall dock påpekas att ett flertal av de kaminer som ingick var av samma typ med relativt liten konvektionsyta.

Bland pellets pannorna har i stort sett ingen panna en rökgastemperatur på över 250 °C, medan några har så låga temperaturer att kondensproblem kan befaras.

## 4.3 Sotmängder och klassificering

### 4.3.1 Allmänt

Samtliga sotprover, totalt 307 st, har vägts och volymbestämts. Därefter har de klassificerats okulärt i olika grupper enligt beskrivning ovan.

### 4.3.2 Vägning och volymbestämmning

I Tabell 9 redovisas uppmätta sotmängder fördelat på olika eldstadstyper.

**Tabell 9:** Uppmätta sotmängder för olika eldstadstyper

	Antal prover	Sotmassa, g		Sotvolym, ml		Densitet, kg/m <sup>3</sup>
		mv	$\sigma$	mv	$\sigma$	mv
<b>Vedpannor</b>						
Vattenkylda pannor						
- totalt	100	1721	1313	3751	2310	464
- med acktank	69	1552	1072	3657	2310	444
- utan acktank	31	2097	1695	3963	2564	508
<b>Keramiska pannor</b>						
- totalt	64	2034	1136	4228	2428	489
- med acktank	58	1919	1062	4102	2420	478
- utan acktank	6	3151	1326	5405	2386	596
<b>Pelletspannor</b>	48	1112	1074	3277	3460	392
<b>Kaminer</b>	33	956	709	2141	1515	446
<b>Oljepannor</b>						
-Totalt	67	327	252	423	416	1002
- konventionella	52	349	261	478	449	976
- miljömärkta	15	249	205	235	181	1094



Tabell 10 visar uppmätta sotmängder fördelat på olika skorstenstyper.

**Tabell 10:** Uppmätta sotmängder för olika skorstenstyper

	Antal prover	Sotmassa, g		Sotvolym, ml		Densitet, kg/m <sup>3</sup>
		mv	σ	mv	σ	mv
<b>Vedpannor</b>						
Vattenkylda pannor						
- totalt	104	1686	1300	3693	2289	461
- med tegelskorsten	78	1877	1113	4069	2438	449
- med stålskorsten	26	1113	720	2566	1234	494
<b>Keramiska pannor</b>						
- totalt	64	2034	1136	4225	2428	489
- med tegelskorsten	50	2246	1134	4609	2508	503
- med stålskorsten	14	1278	790	2851	1504	436
<b>Pelletspannor</b>						
- med tegelskorsten	26	1120	1142	3438	3798	400
- med stålskorsten	22	1102	1015	3087	3089	383
<b>Kaminer</b>						
- med tegelskorsten	9	1159	561	2394	1468	508
- med stålskorsten	24	880	753	2045	1552	423
<b>Oljepannor</b>						
Konventionella						
-Totalt	51	333	236	464	442	975
- med tegelskorsten	41	355	243	464	395	971
- med stålskorsten	10	209	178	420	629	992
Miljömärkta						
-Totalt	15	249	205	235	181	1093
- med tegelskorsten	5	376	263	350	239	1062
- med stålskorsten	10	186	146	177	121	1109

### 4.3.3 Okulär klassificering

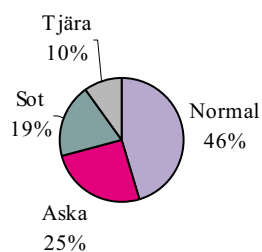
I Tabell 11 redovisas resultatet av den okulära klassificeringen i olika sottyper uppdelat på olika typer av ved- och pelletseldade anläggningar.

**Tabell 11:** Okulär klassificering av sotprover från ved- och pelletseldning

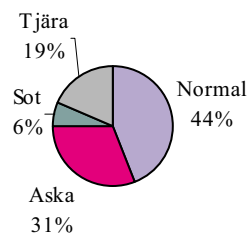
	Totalt antal prov	Antal prov klassificerade som			
		normal	aska	sot	tjära/knotter
<b>Vedpannor</b>					
- vattenkylda	103	47	26	20	10
- keramiska	64	28	20	4	12
<b>Pelletspannor</b>	48	23	20	4	1
<b>Kaminer</b>	31	9	12	4	16

I figur 21 åskådliggörs den procentuella fördelningen av de olika klasserna för olika biobränsleeldade eldstadstyper.

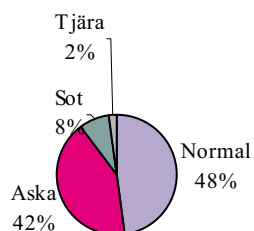
**Traditionella vedpannor**



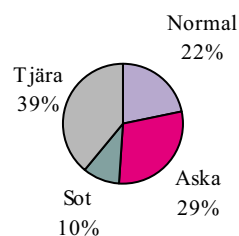
**Keramiska pannor**



**Pelletspannor**



**Kaminer**



**Figur 21:** Fördelning på olika sottyper för biobränsleeldade eldstäder

Det framgår att andelen sotprover från vedpannor som klassificerats som ”sot” eller ”tjära” är betydligt högre för vedpannor än för pelletspannor. Någon signifikant skillnad mellan sotprover från vattenkylda vedpannor resp. keramiska vedpannor kan dock inte ses. Kaminerna visar den största andelen prover som klassificerats som ”sot” eller ”tjära”.

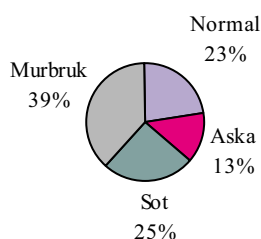
I Tabell 12 redovisas resultatet av den okulära klassificeringen i olika sottomtyper uppdelat på konventionella och miljömärkta oljepannor.

**Tabell 12:** Okulär klassificering av sotprover från oljeeldning

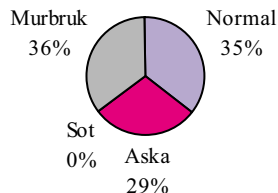
	Totalt antal prov	Antal prov klassificerade som			
		normal	aska	sot	murbruk
Traditionella pannor	52	12	7	13	20
Miljömärkta pannor	14	5	4	0	5

I figur 22 åskådliggörs den procentuella fördelningen av de olika klasserna för konventionella resp. miljömärkta pannor.

**Traditionella oljepannor**



**Miljömärkta Oljepannor**



**Figur 22:** Fördelning på olika sottomtyper för oljepannor

För prover från traditionella oljepannor klassificerades 25 % som ”sot”, medan inget prov från miljömärkta pannor fick denna klassificering.

#### 4.3.4 Oförbränt i sotprover

Totalt 65 st sotprover analyserades med avseende på halten oförbränt. Resultaten av dessa analyser redovisas i tabell 13.

**Tabell 13:** Oförbränthalter i analyserade sotprover

	Antal prov	Oförbränthalt, %	
		mv	$\sigma$
<b>Ved- och pelletspannor, kaminer</b>			
- normal	15	66	14
- sot	8	79	10
- aska	9	47	13
- tjära/knotter	12	77	10
<b>Oljepannor</b>			
- normal	6	45	14
- sot	7	47	28
- murbruk/aska	6	19	16

De erhållna medelvärdena användes sedan för korrigering av uppmätta sotmängder. Vid korrigeringen multiplicerades uppmätt sotmängd med medelvärdet av oförbränthalten för den klass resp. prov tillhörde. T.ex. multiplicerades ett prov från en pelletspanna som klassificerats som ”sot” med faktorn 0,79.

### 4.3.5 Korrigerade sotmängder

I tabell 14 nedan redovisas uppmätta sotmängder korrigerade till mängd oförbränt enligt omräkningen ovan.

**Tabell 14:** Mängd oförbränt i sotproverna

	Antal prover	Mängd oförbränt, g	
		mv	$\sigma$
<b>Vedpannor</b>			
Vattenkylda pannor			
- totalt	101	1125	960
- med acktank	69	1032	801
- utan acktank	31	1307	1293
Keramiska pannor			
- totalt	59	1320	717
- med acktank	46	1191	697
- utan acktank	15	1943	569
<b>Pelletspannor</b>	47	653	672
<b>Kaminer</b>	33	654	496
<b>Oljepannor</b>			
- konventionella	52	106	101
- miljömärkta	15	70	57

När sotmängderna på detta sätt korrigeras till mängd oförbränt blir de skillnader som indikeras i tabell 9 tydligare. Pellets pannorna ger avsevärt mindre mängder oförbränt än vedpannorna. Den största förändringen är dock att skillnaden mellan oljepannor och vedpannor blir ännu större pga den låga halten oförbränt i sotet från oljeeldning.

## 4.4 Tillväxthastighet

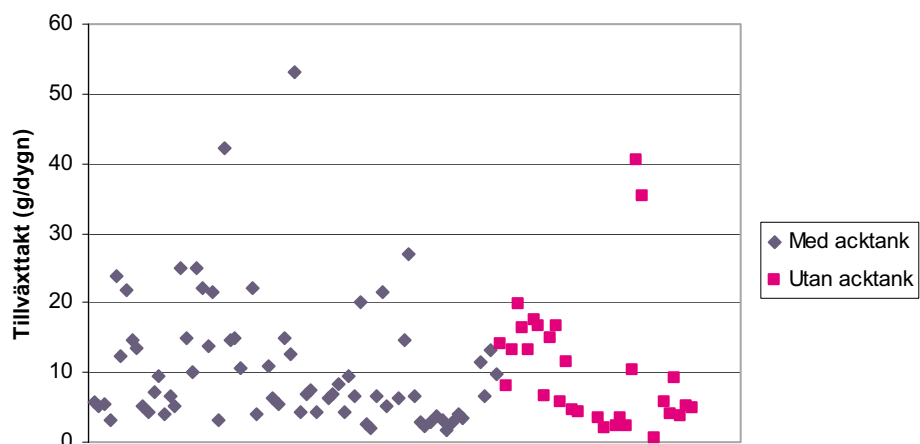
För att generalisera de uppmätta och korrigerade sotmängderna beräknades tillväxthastigheten under mätperioden uttryckt dels i gram/dygn, dels i mm/dygn. För den senare beräkningen förutsattes att det avsatta sotet fördelades jämnt över den aktuella skorstenens inneryta. För beräkningen av inneryta användes data på diameter/sidor och uppskattad höjd som dokumenterats vid första mätningen.

Tabell 15 visar den beräknade tillväxthastigheten för olika eldstadstyper uttryckt i mm/dygn.

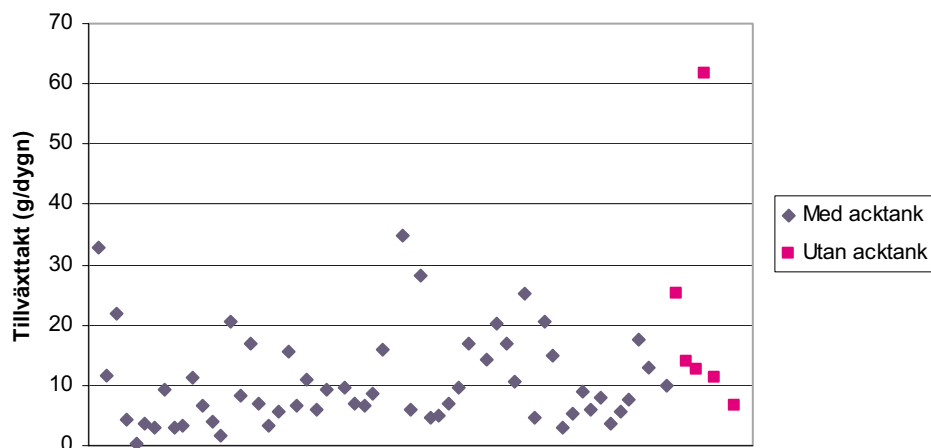
**Tabell 15:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn och mm/dygn för olika anläggningstyper

	Antal prover	Tillväxthastighet			
		g/dygn		mm/dygn i aktuell skorsten	
		mv	$\sigma$	mv	$\sigma$
<b>Vedpannor</b>					
Vattenkylda pannor					
- med acktank	69	10,7	9,3	0,009	0,006
- utan acktank	30	10,5	9,2	0,010	0,010
- alla	99	10,5	9,2	0,010	0,009
Keramiska pannor					
- med acktank	57	10,6	7,7	0,008	0,005
- utan acktank	6	21,9	20,5	0,010	0,007
- alla	63	11,7	9,9	0,008	0,005
<b>Pelletspannor</b>	44	7,2	13,1	0,008	0,009
<b>Kaminer</b>	26	4,1	3,7	0,004	0,004
<b>Oljepannor</b>					
- konventionella	50	0,8	0,9	0,001	0,002
- miljömärkta	12	0,6	1,0	0,0006	0,0008
- alla	62	0,79	0,93	0,0010	0,0017

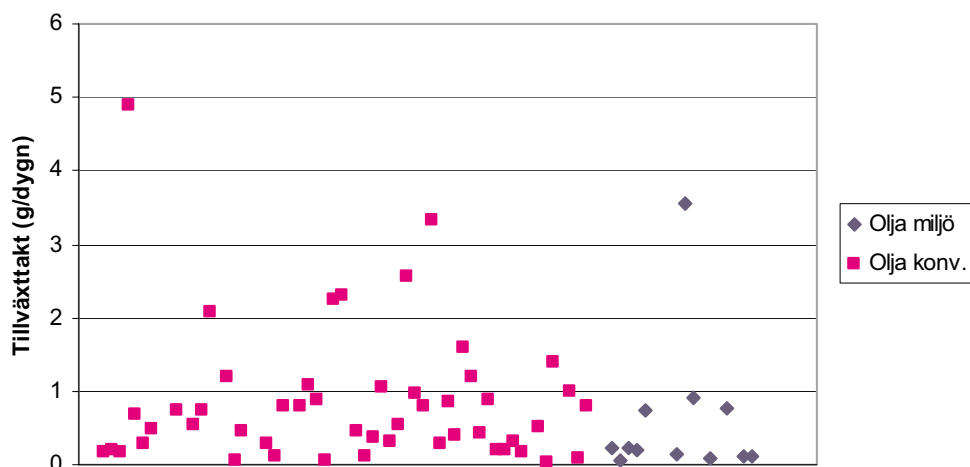
I figur 23-25 visas tillväxthastigheterna uttryckta i g/dygn för olika typer av vedpannor och oljepannor. I figur 26-28 redovisas motsvarande data uttryckta i mm/dygn.



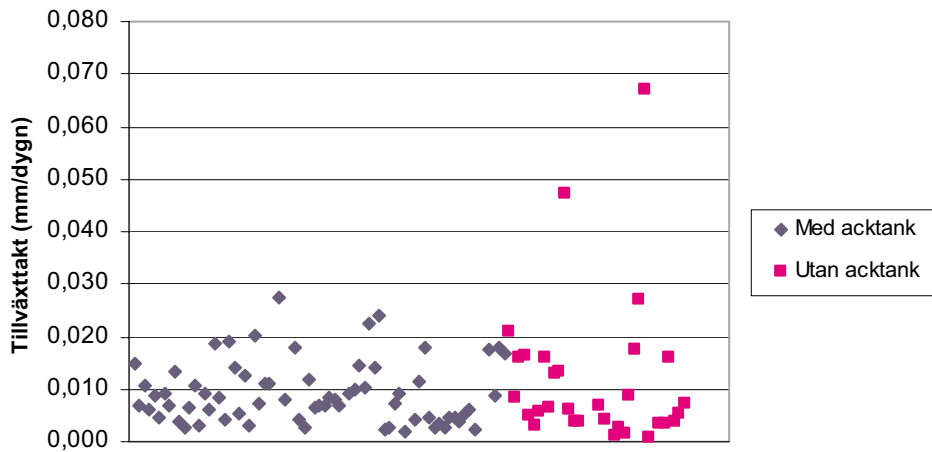
**Figur 23:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för vattenkylda vedpannor med resp utan ackumulatortank



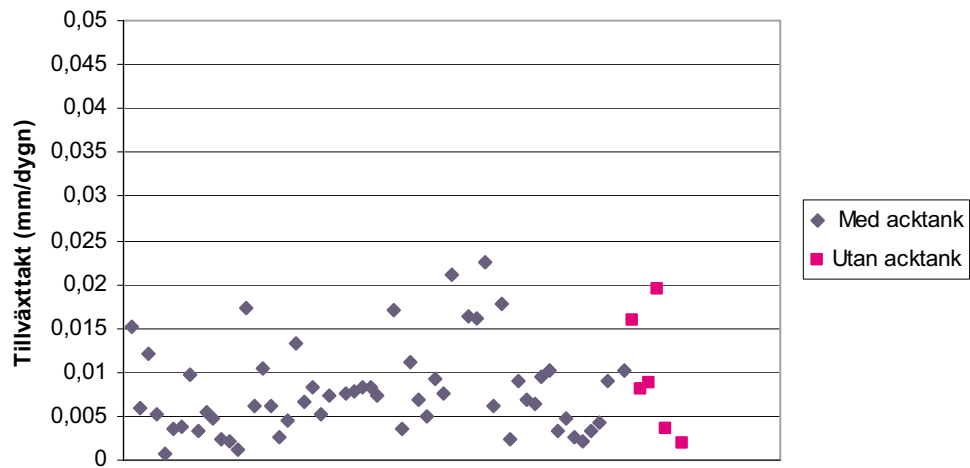
**Figur 24:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för keramiska vedpannor med resp utan ackumulatortank



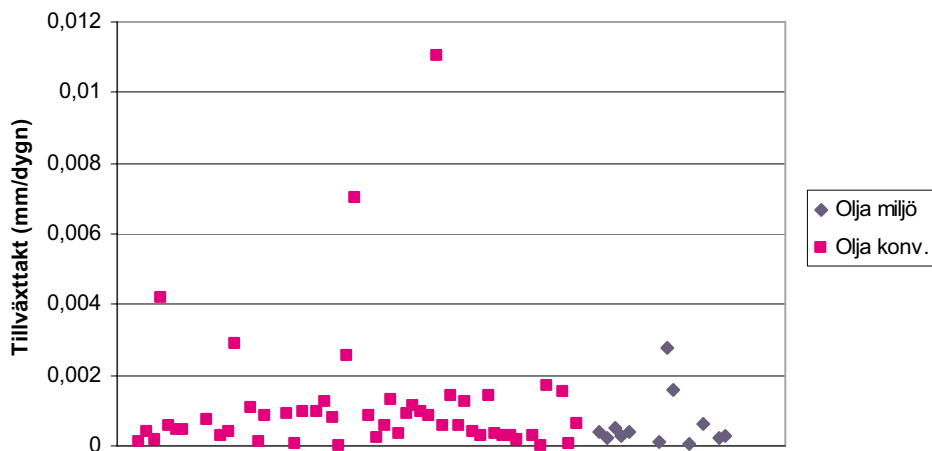
**Figur 25:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för konventionella resp miljömärkta oljepannor



**Figur 26:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för vattenkylda vedpannor med resp. utan ackumulatortank



**Figur 27:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för keramiska vedpannor med resp. utan ackumulatortank



**Figur 28:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för konventionella resp. miljömärkta oljepannor



Beräkningarna indikerar att tillväxthastigheten för sotbeläggningarna uttryckt i mm/dygn är i stort sett likvärdig, ca 0,01 mm/dygn, för alla typer av vedeldade anläggningar. Tillväxthastigheten för oljeeldade anläggningar är däremot endast ca 0,001 mm/dygn och ännu lägre för de miljömärkta oljepannorna. Tillväxthastigheten är således ca en tiopotens högre i vedeldade anläggningar jämfört med i oljeeldade anläggningar, vilket naturligtvis är en signifikant och avgörande skillnad.

Beträffande tillväxthastigheten uttryckt i gram/dygn ses motsvarande skillnad mellan vedeldade pannor och oljepannor. För pelletseldade pannor är tillväxthastigheten uttryckt i gram/dygn något lägre än för vedpannor, vilket indikerar att beläggningarna vid pelletseldning i genomsnitt har en lägre densitet än de vid vedeldning. Den lägre tillväxthastigheten för kaminer förklaras av den troligen betydligt lägre eldningsfrekvensen jämfört med ved- och pelletspannor.

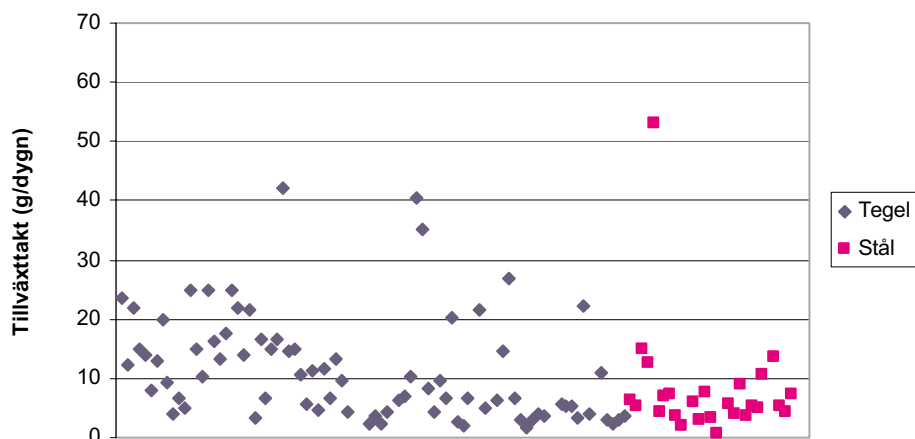
För keramiska pannor erhålls en betydligt högre tillväxthastighet för anläggningar utan ackumulatortank som för anläggningar med tank. Skillnaden kan till en del hänföras till en enstaka anläggning utan ackumulatortank, men även då denna utesluts är skillnaden signifikant.

I tabell 16 redovisas tillväxthastigheten i sotskiktet fördelat på typ av rökkanal.

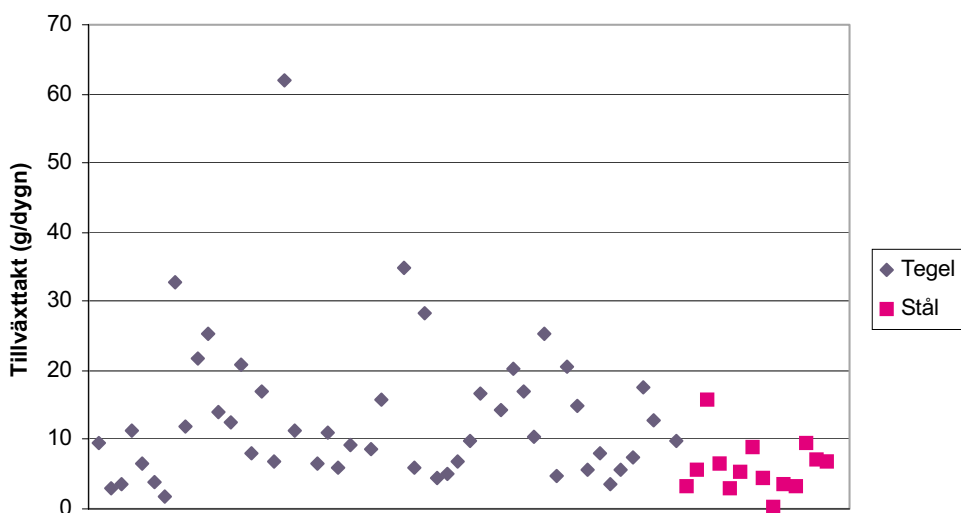
**Tabell 16:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn och mm/dygn för olika typer av rökkanaler

	Antal prover	Tillväxthastighet			
		g/dygn		mm/dygn i aktuell skorsten	
		mv	$\sigma$	mv	$\sigma$
<b>Vedpannor</b>					
Vattenkylda pannor					
- tegelskorsten	79	11,0	8,9	0,011	0,010
- stålskorsten	26	8,1	9,8	0,008	0,006
- alla	106	10,5	9,2	0,010	0,009
Keramiska pannor					
- tegelskorsten	49	13,3	10,5	0,009	0,006
- stålskorsten	14	6,0	3,7	0,007	0,004
- alla	63	11,7	9,9	0,008	0,005
<b>Pelletspannor</b>					
- tegelskorsten	24	7,6	6,8	0,007	0,008
- stålskorsten	20	6,8	7,2	0,007	0,004
- alla	44	7,2	13,1	0,007	0,009
<b>Kaminer</b>					
- tegelskorsten	7	2,4	2,1	0,002	0,002
- stålskorsten	23	4,6	3,9	0,004	0,004
- alla	30	4,1	3,7	0,004	0,004
<b>Oljepannor</b>					
- tegelskorsten	46	0,85	0,94	0,0008	0,0008
- stålskorsten	20	0,63	0,91	0,0013	0,0027
- alla	66	0,79	0,93	0,0010	0,0017

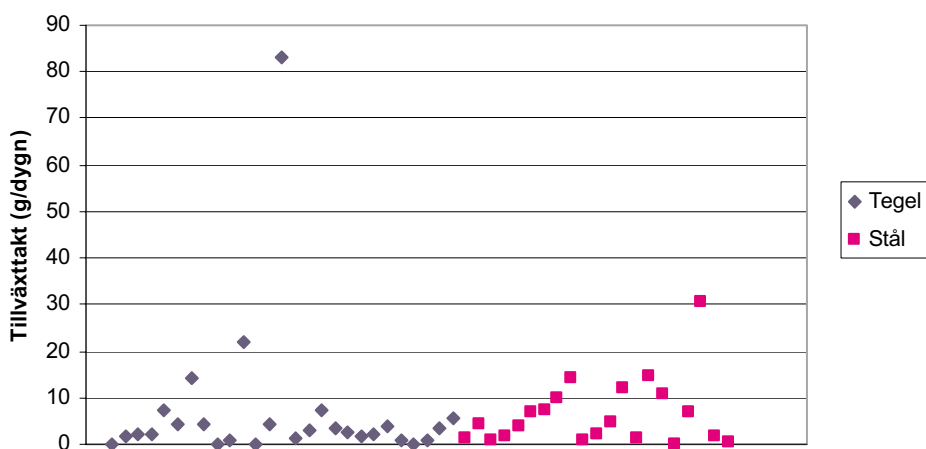
I figur 29-33 visas tillväxthastigheten i g/dygn för olika typer av skorstenar för olika eldstäder. I figur 34-38 visas motsvarande data uttryckt i mm/dygn.



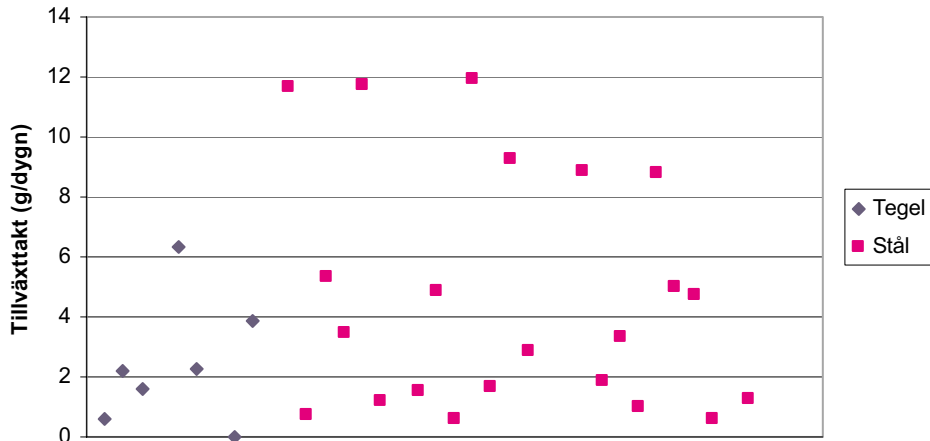
**Figur 29:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för vattenkylda vedpannor med tegel- resp. stålskorsten



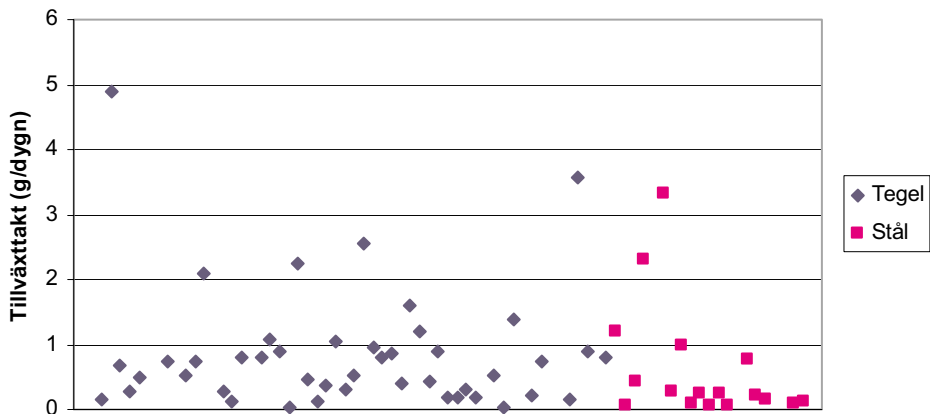
**Figur 30:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för keramiska vedpannor med tegel- resp. Stålskorsten



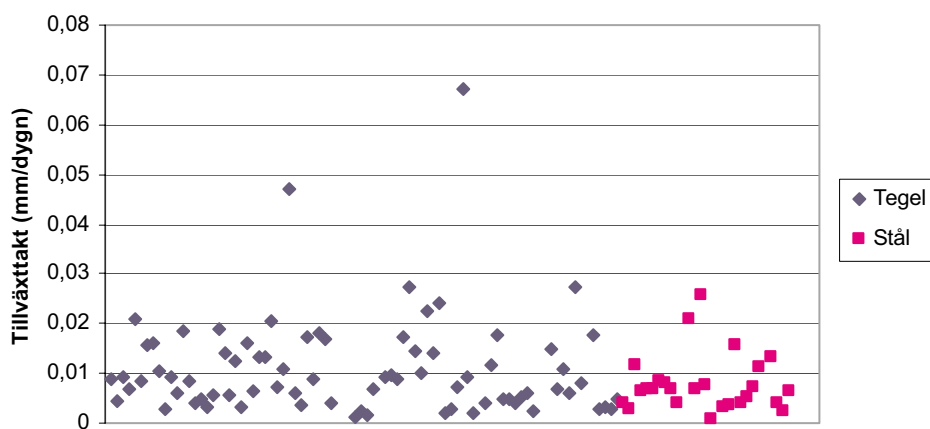
**Figur 31:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för pelletspannor med tegel- resp. stålskorsten



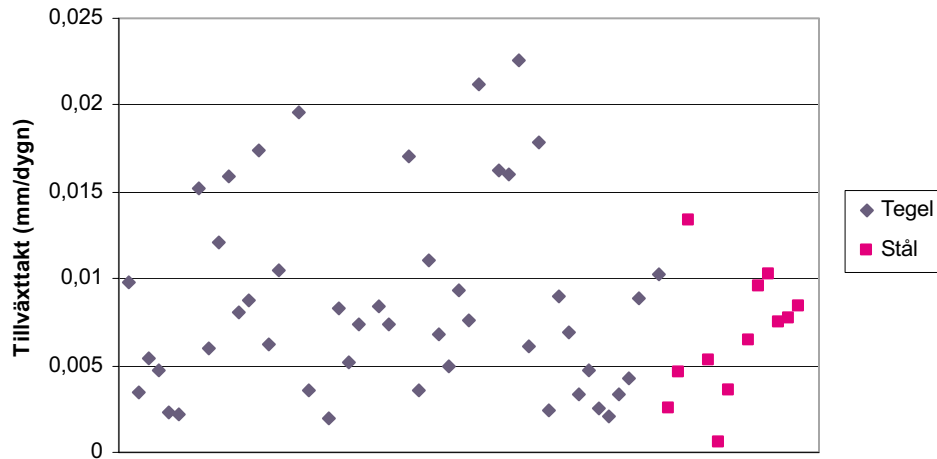
**Figur 32:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för kaminer med tegel- resp. stålskorsten



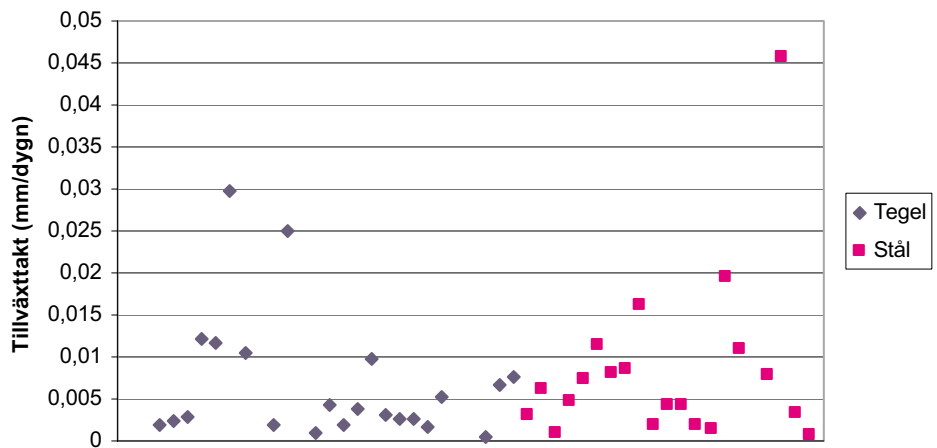
**Figur 33:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för oljepannor med tegel- resp. stålskorsten



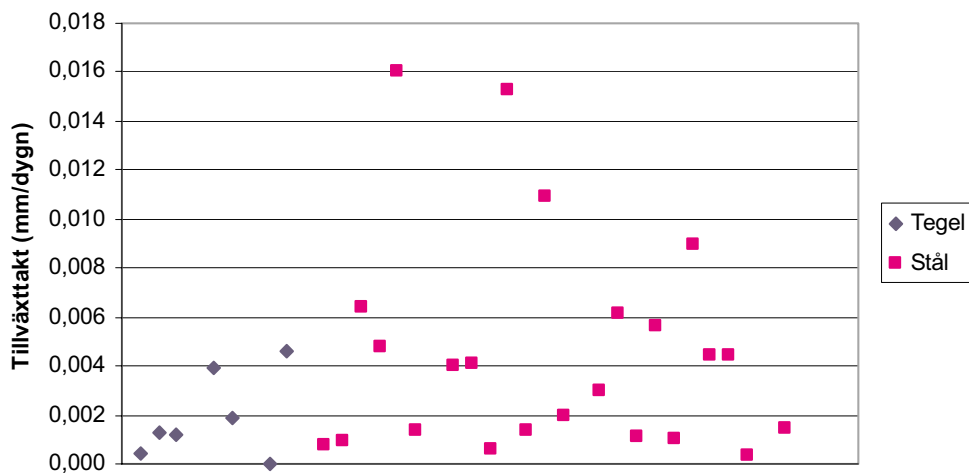
**Figur 34:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för vattenkylda ved-pannor med tegel- resp. stålskorsten



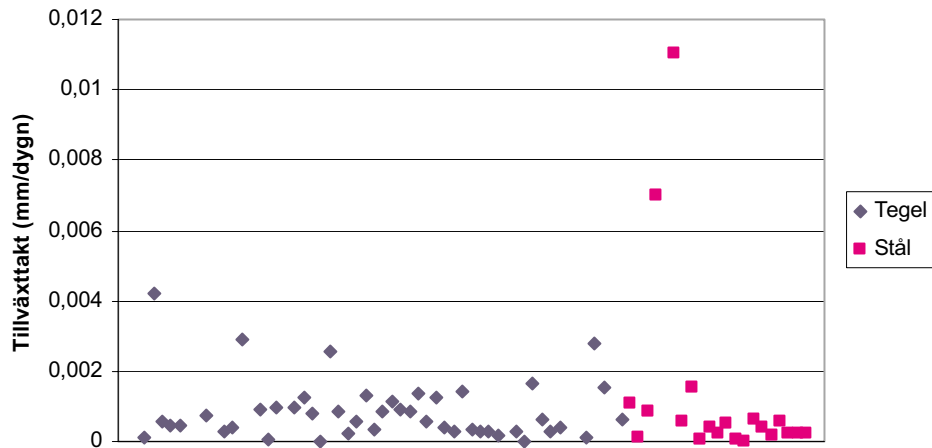
**Figur 35:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för keramiska ved-pannor med tegel- resp. stålskorsten



**Figur 36:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för pelletspannor med tegel- resp. stålskorsten



**Figur 37:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för kaminer med tegel- resp. stålskorsten



**Figur 38:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för oljepannor med tegel- resp. stålskorsten

Tillväxthastigheten för sotskiktet är i de flesta fall som medeltal högre för tegelskorstenar än för stålskorstenar. Speciellt uttalat är detta för keramiska vedpannor där skillnaden är ca en faktor två. Även för vattenkylda vedpannor och oljepannor är skillnaden signifikant.

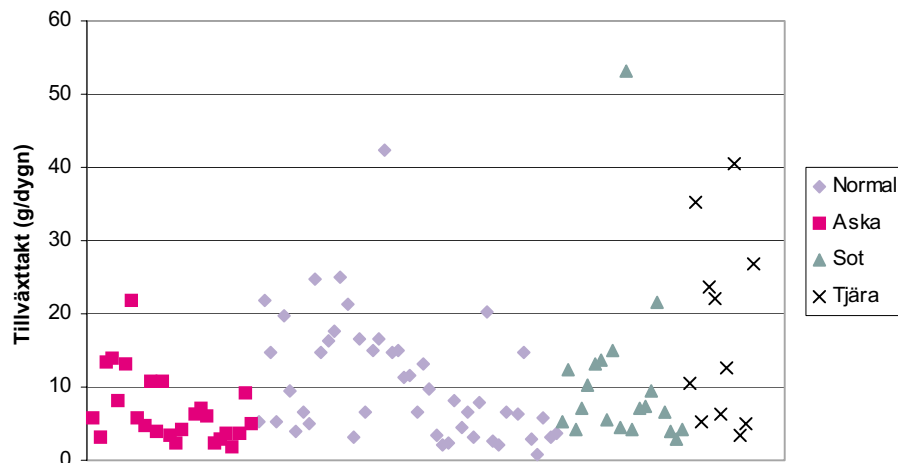
För kaminer erhölls det omvända förhållandet; tillväxthastigheten var högre i stålskorstenar än i tegelskorstenar. Resultatet skall dock tolkas med försiktighet eftersom underlaget för tegelskorstenar är litet.

I tabell 17 redovisas tillväxthastigheten i sotskiktet fördelat på olika klassificeringar av sottypen.

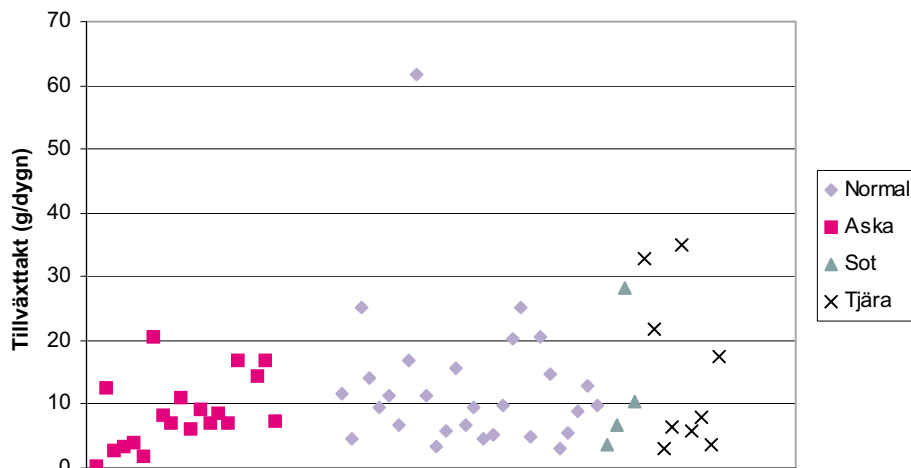
**Tabell 17:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn och mm/dygn för olika typer av sotprover.

	Antal prover	Tillväxthastighet			
		g/dygn		mm/dygn i aktuell skorsten	
		mv	$\sigma$	mv	$\sigma$
<b>Vedpannor</b>					
Vattenkylda pannor					
- normal	47	10,7	8,2	0,010	0,011
- aska	26	6,7	4,9	0,011	0,010
- sot	20	10,6	11,1	0,007	0,004
- tjära/knotter	8	17,6	13,0	0,011	0,009
Keramiska pannor					
- normal	28	12,8	11,5	0,009	0,005
- aska	19	8,7	5,5	0,009	0,006
- sot	4	12,2	11	0,007	0,005
- tjära/knotter	9	14,9	12,4	0,007	0,005
<b>Pelletspannor</b>					
- normal	22	3,7	3,6	0,005	0,005
- aska	17	10,2	19,7	0,008	0,008
- sot	4	15,3	10,5	0,020	0,018
- tjära/knotter	1	3,3	-	0,003	-
<b>Kaminer</b>					
- normal	7	3,9	3,9	0,001	0,005
- aska	3	1,9	1,8	0,002	0,002
- sot	16	4,1	3,8	0,003	0,004
- tjära/knotter	2	9,1	0,3	0,008	0,003
<b>Oljepannor</b>					
- normal	16	1,1	1,1	0,0014	0,0027
- aska	11	0,49	0,40	0,0005	0,0004
- sot	13	1,9	3,2	0,0016	0,0021
- murbruk	23	0,53	0,51	0,0007	0,0007

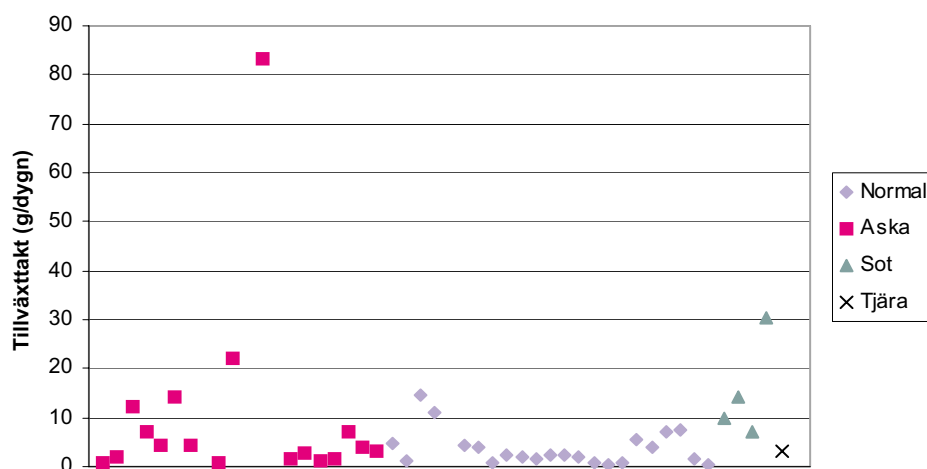
I figur 39-43 visas tillväxthastigheten i g/dygn uppdelat på olika typer av sot. I figur 43-48 visas motsvarande data uttryckt i mm/dygn.



**Figur 39:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för vattenkylda vedpannor med olika typer av sot

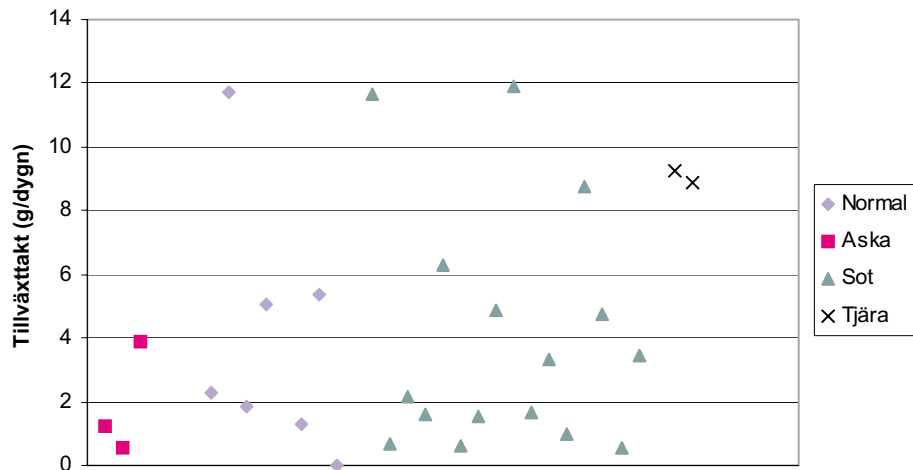


**Figur 40:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för keramiska vedpannor med olika typer av sot

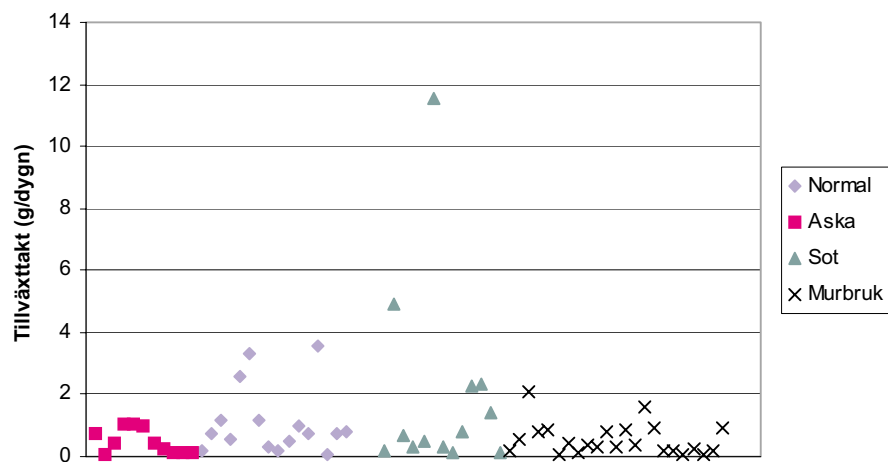


**Figur 41:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för pellets pannor med olika typer av sot

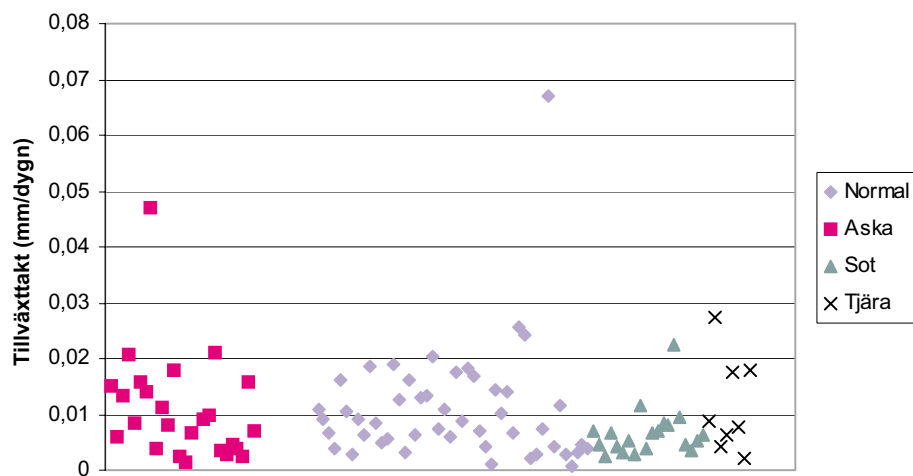




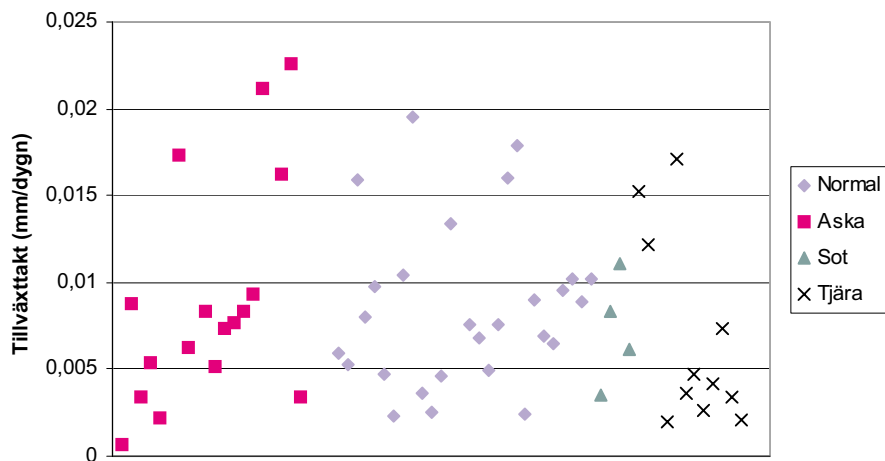
**Figur 42:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för kaminer med olika typer av sot



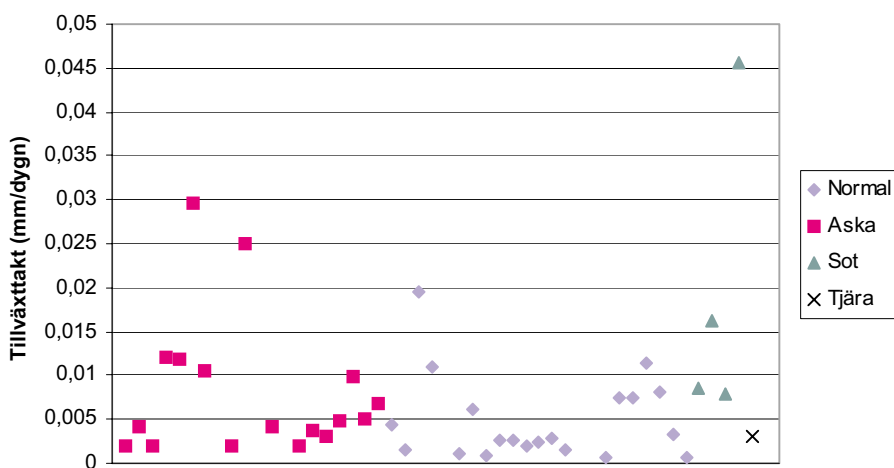
**Figur 43:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/dygn för oljepannor med olika typer av sot



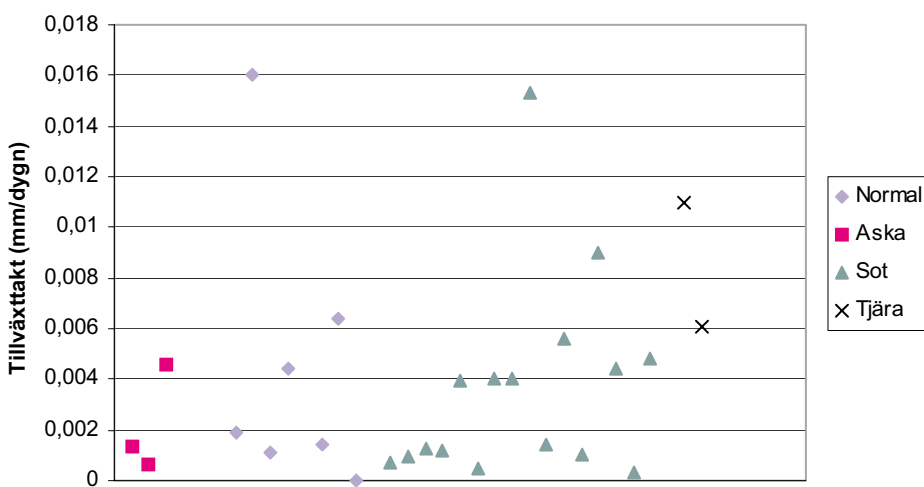
**Figur 44:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för vattenkylda vedpannor med olika typer av sot



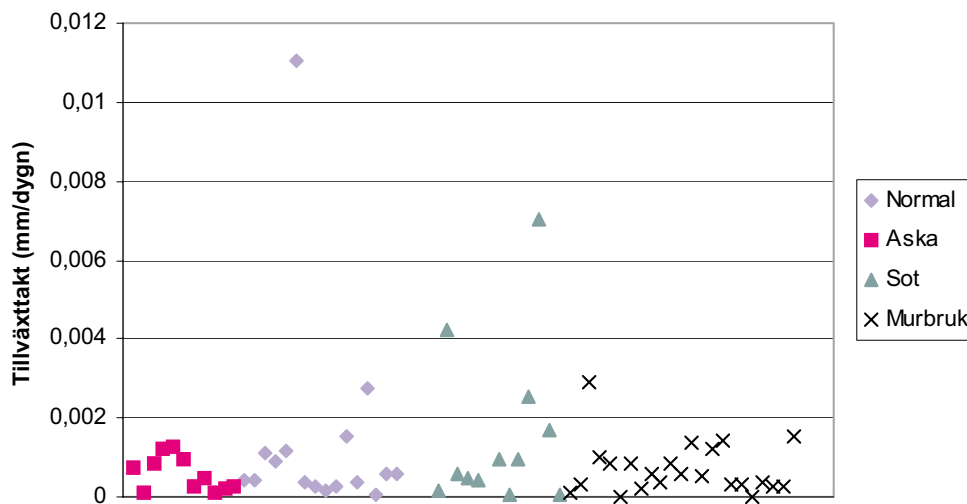
**Figur 45:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för keramiska vedpannor med olika typer av sot



**Figur 46:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för pelletspannor med olika typer av sot



**Figur 47:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för kaminer med olika typer av sot

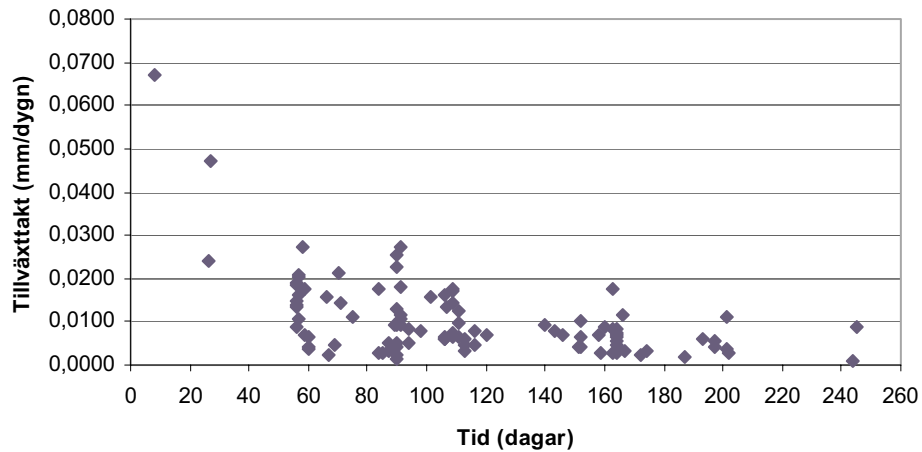


**Figur 48:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/dygn för oljepannor med olika typer av sot

I de flesta typer av anläggningar är det sotprover som klassificerats som ”aska” som ger den lägsta tillväxthastigheten uttryckt i massa/dygn, medan ”sot” alt. ”tjära/knotter” ger den högsta tillväxthastigheten. För vedpannorna är tillväxthastigheten uttryckt i mm/dygn dock ungefär densamma för alla sottyper. Pellets pannor skiljer sig från vedpannor på så sätt att tillväxthastigheten är högre för de prover som klassificerats som ”aska”. Detta kan förmodligen förklaras med att pellets i vissa fall har en högre askhalt än styckeved.

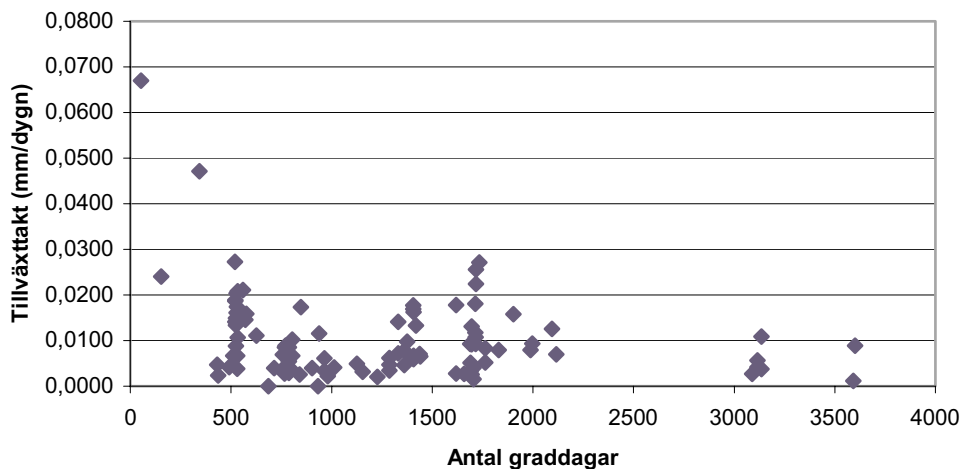
För de oljeeldade pannorna erhålls högst tillväxthastighet i de fall sotproverna klassificerats som ”sot” och därefter ”normal”. ”aska” och ”murbruk” ger däremot lägre tillväxthastigheter.

Tidsperioderna mellan provtagningarna inom projektet har i viss mån varierat. Detta ger en möjlighet att studera om någon indikation på att tillväxthastigheten varierar med tiden kan observeras. I figur 23 visas den genomsnittliga tillväxthastigheten i mm/dygn för traditionella pannor under perioden mellan provtagningarna som funktion av periodens längd.

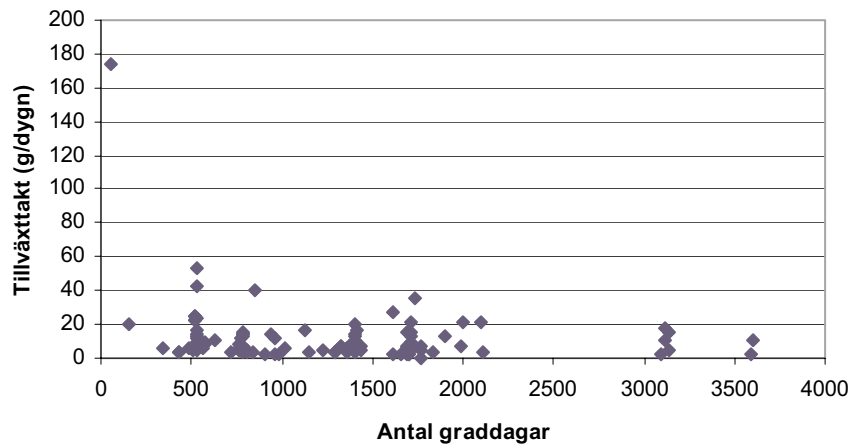


**Figur 49:** Sotskiktets genomsnittliga tillväxthastighet för vattenkylda pannor som funktion av periodens längd

Detta framställningsätt är dock vilseledande om inte hänsyn tas till det varierande genomsnittliga värmebehovet under perioderna. En längre period har nästan alltid ett lägre värmebehov beroende på sotningsfristernas anpassning till årstiderna. Ett mera rättvisande mått är då att studera tillväxthastigheten i förhållande till antalet graddagar under perioden mellan sotningarna. Då detta görs erhålls för vattenkylda pannor resultat enligt följande.



**Figur 50:** Tillväxthastigheten i mm/dygn som funktion av antalet graddagar sedan föregående sotning för vattenkylda vedpannor.



**Figur 51:** Tillväxthastigheten i g/dygn som funktion av antalet graddagar sedan föregående sotning för vattenkylda vedpannor.

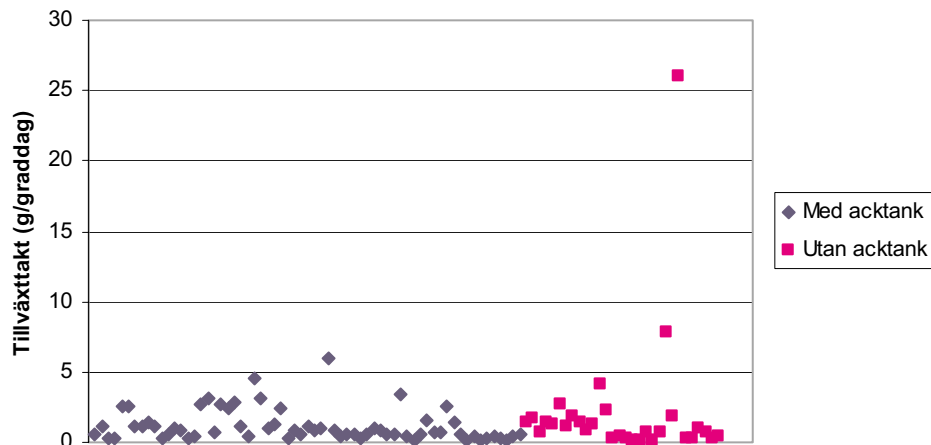
Som framgår är det svårt att se någon tydlig tendens till avtagande tillväxthastighet som funktion av antalet graddagar i detta fall. Detsamma är fallet för övriga typer av anläggningar.

Ovanstående resonemang ger anledning att förmoda att **tillväxthastigheten** hos sotskiktet uttryckt som **gram/graddag resp. mm/graddag** är intressant att studera. I Tabell 18 ges en sammanställning av dessa data för olika typer av anläggningar.

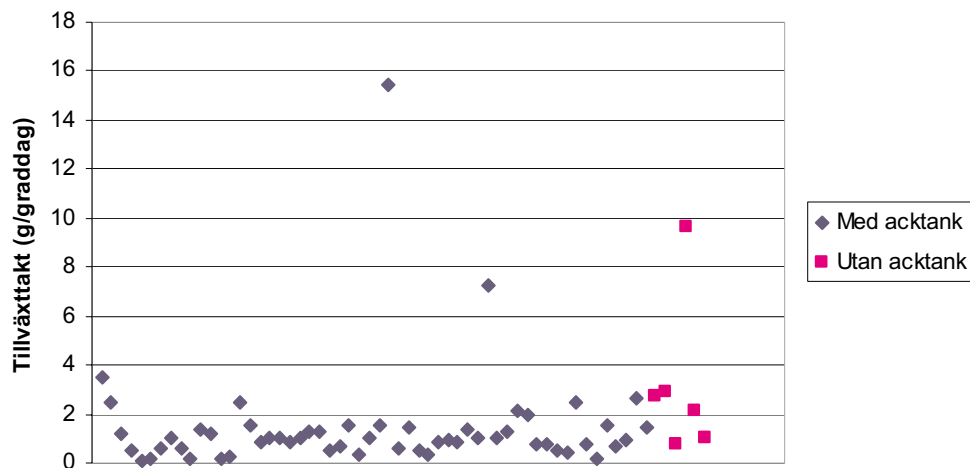
**Tabell 18:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag och mm/graddag för olika anläggningstyper

	Antal prover	Tillväxthastighet			
		g/graddag		mm/graddag i aktuell skorsten	
		mv	$\sigma$	mv	$\sigma$
<b>Vedpannor</b>					
Vattenkylda pannor					
- med acktank	65	1,2	1,1	0,0009	0,0007
- utan acktank	30	2,1	4,8	0,0012	0,0019
- alla	95	1,5	2,8	0,0010	0,0012
<b>Keramiska pannor</b>					
- med acktank	56	1,4	2,2	0,0011	0,0015
- utan acktank	6	3,2	3,3	0,0013	0,0010
- alla	62	1,6	2,3	0,0011	0,0015
<b>Pellets pannor</b>	43/42	0,6	0,7	0,0009	0,0009
<b>Kaminer</b>	27/28	0,7	0,8	0,0007	0,0010
<b>Oljepannor</b>					
- konventionella	51	0,15	0,36	0,00013	0,00025
- miljömärkta	12/15	0,09	0,21	0,00008	0,00015
- alla	63/66	0,14	0,33	0,00012	0,00023

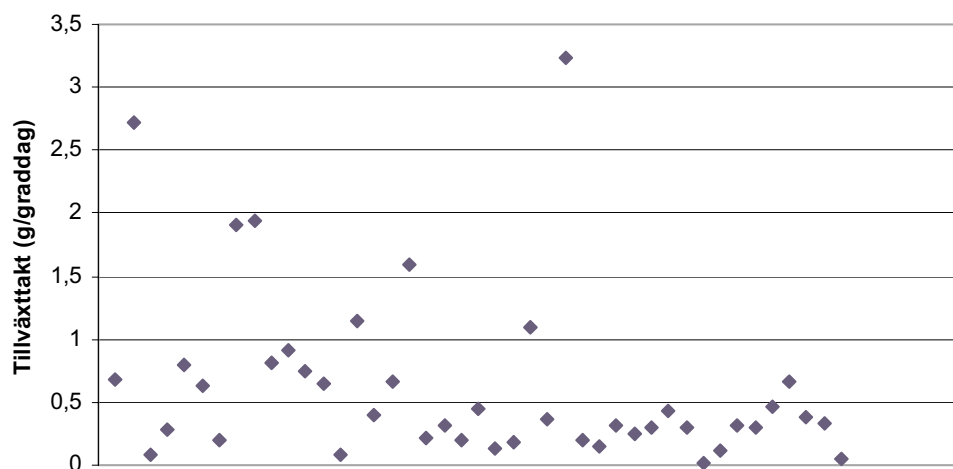
I figur 52-56 visas tillväxthastigheten i g/graddag uppdelat på olika typer av anläggningar. I figur 57-61 visas motsvarande data uttryckt i mm/dygn.



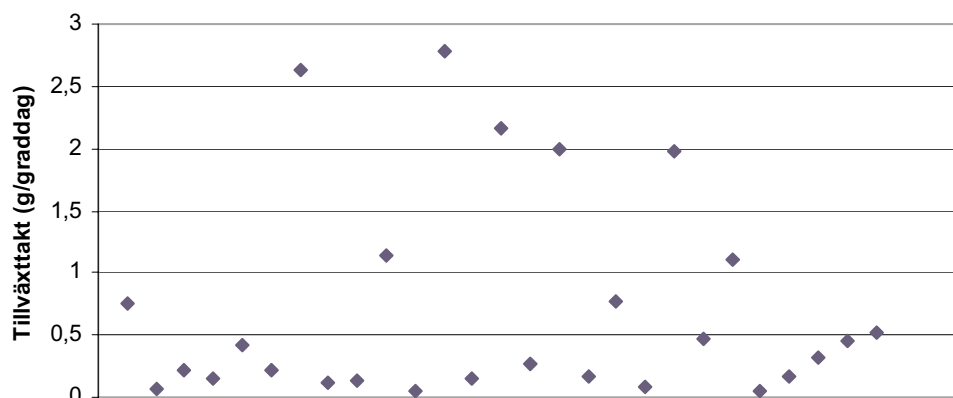
**Figur 52:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag för vattenkylda vedpannor med resp. utan ackumulatortank



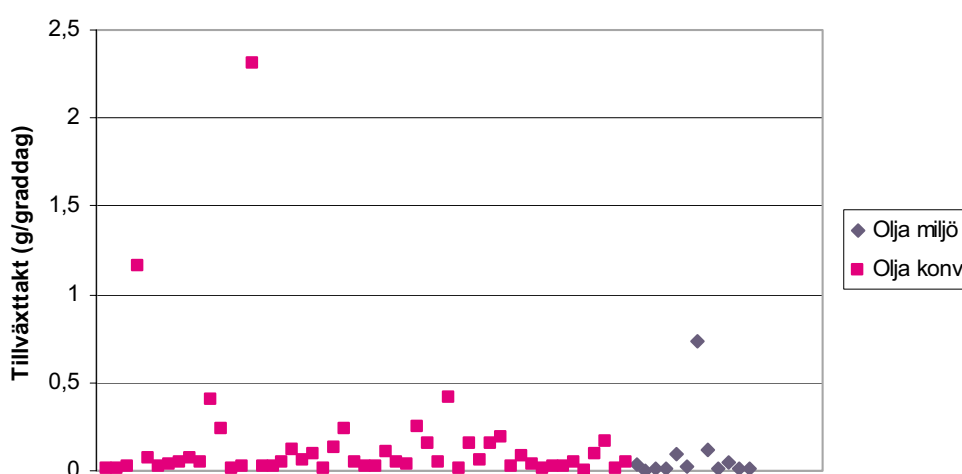
**Figur 53:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag för keramiska vedpannor med resp. utan ackumulatortank



**Figur 54:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag för pelletspannor



**Figur 55:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag för kaminer

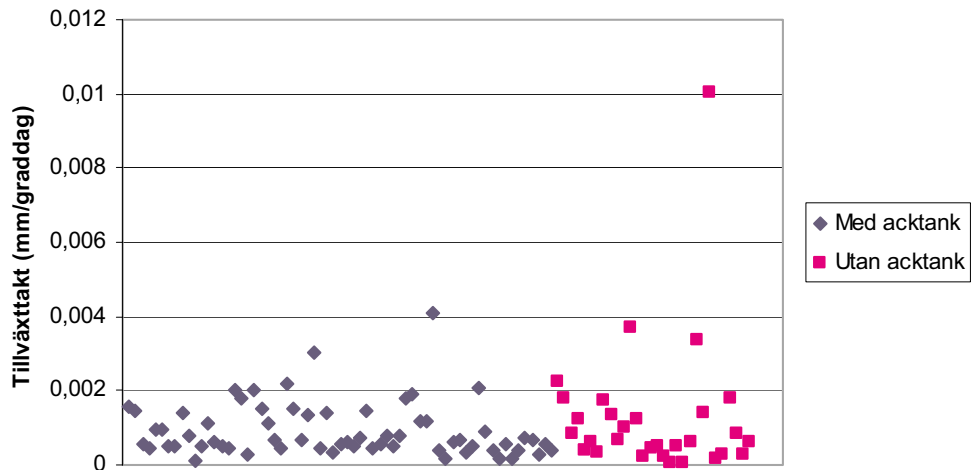


**Figur 56:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag för konventionella resp. miljömärkta oljepannor

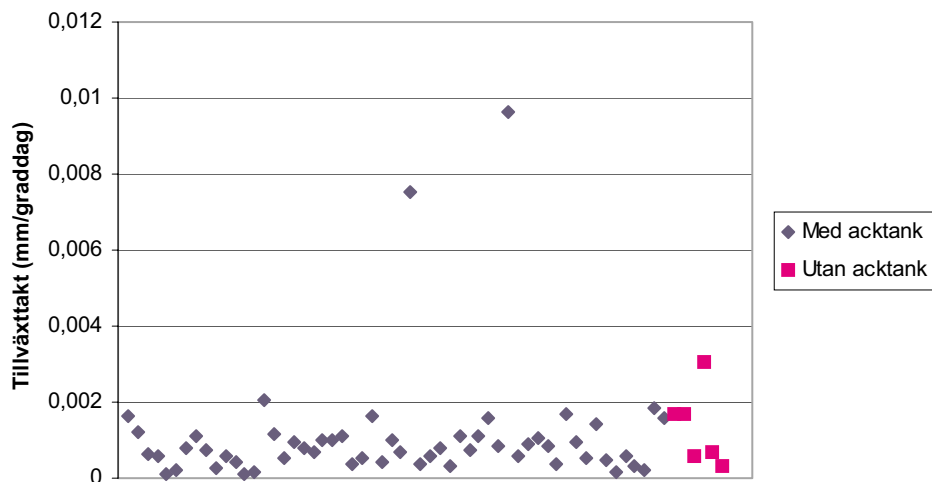
Tillväxthastigheten är i medeltal ca 1,5 g/graddag för både vattenkylda och keramiska vedpannor. För framför allt keramiska vedpannor men även vattenkylda sådana är tillväxthastigheten högre för anläggningar utan ackumulatortank än för anläggningar med tank. För pelletspannor är tillväxthastigheten ca 0,6 g/graddag, dvs ca 40 % av motsvarande värde för vedpannor.

För oljepannor är tillväxthastigheten endast ca 0,15 g/graddag, eller ca 10 % av den för vedpannor. Tillväxthastigheten för konventionella pannor är högre än för miljömärkta dito.

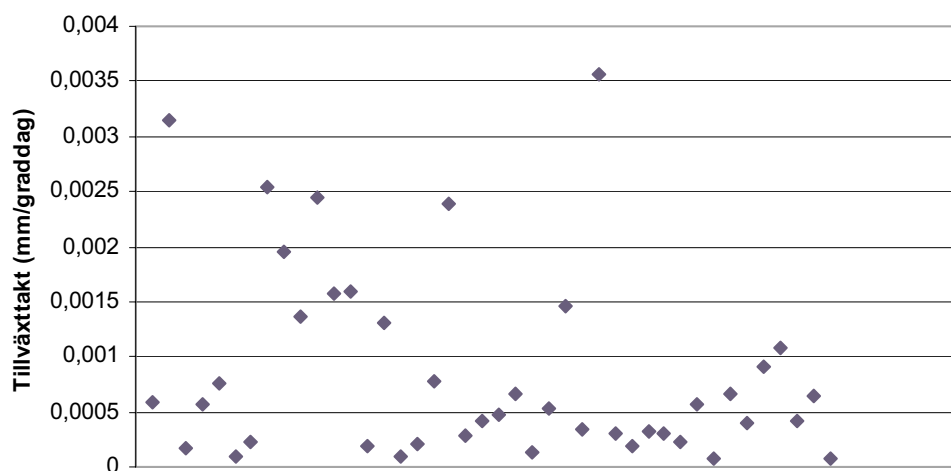




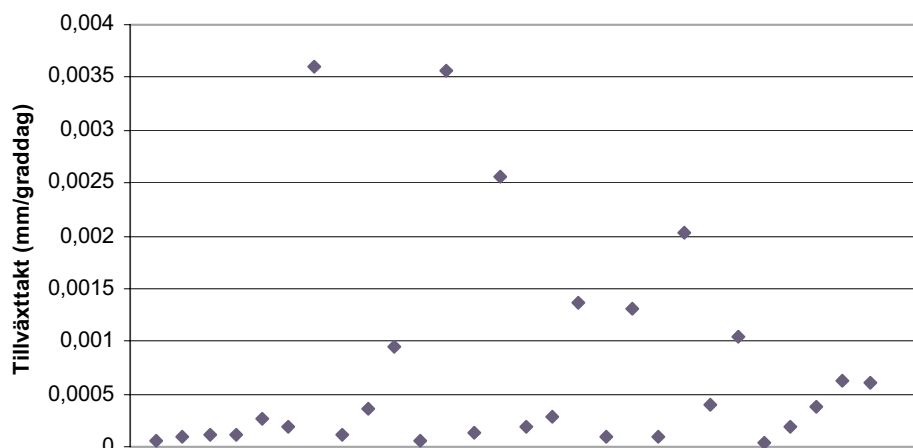
**Figur 57:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för vattenkylda vedpannor med resp. utan ackumulatortank



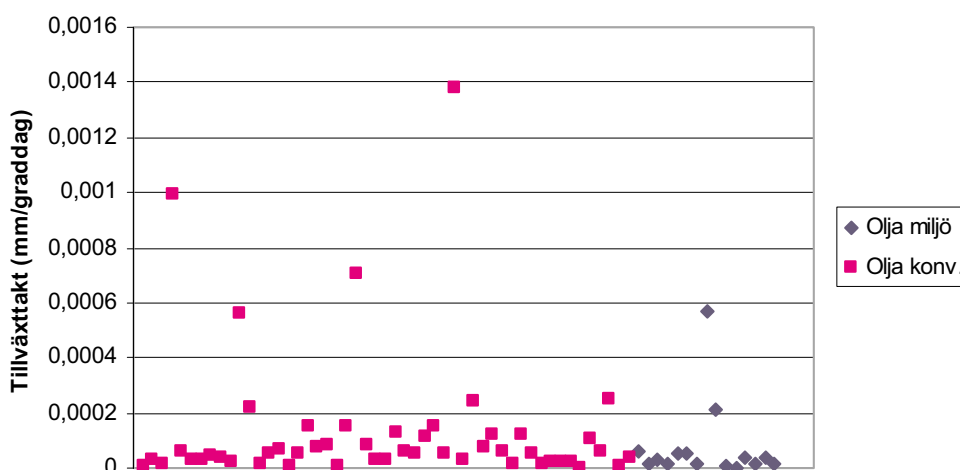
**Figur 58:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för keramiska vedpannor med resp. utan ackumulatortank



**Figur 59:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för pelletspannor



**Figur 60:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för kaminer



**Figur 61:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för konventionella resp. miljömärkta oljepannor

Tillväxthastigheten är i medeltal ca 0,001 mm/grad dag för både vattenkylda och keramiska vedpannor. För framför allt vattenkylda vedpannor men även keramiska sådana är tillväxthastigheten högre för anläggningar utan ackumulatortank än för anläggningar med tank. För pelletspannor är tillväxthastigheten något lägre än för vedpannor.

För oljepannor är tillväxthastigheten endast ca 0,0001 mm/grad dag, eller ca 10 % av den för vedpannor. Tillväxthastigheten för konventionell pannor är högre än för miljömärkta dito.

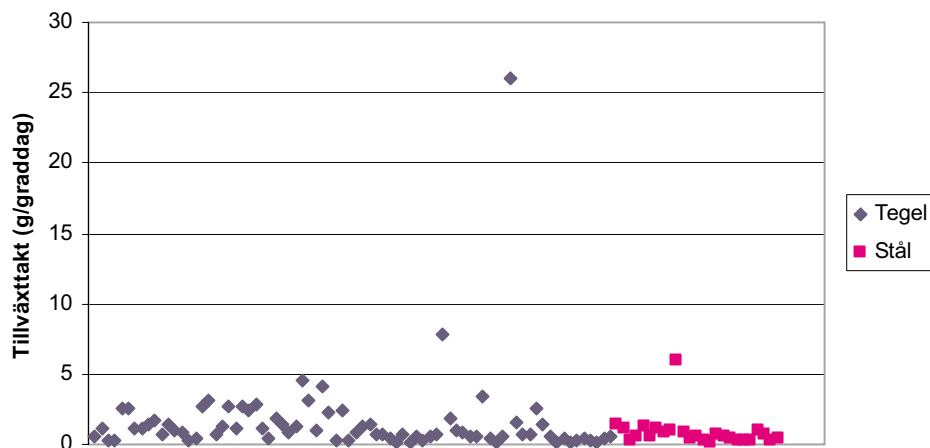
I tabell 19 redovisas tillväxthastigheten hos sotskiktet i g/graddag och mm/graddag fördelat på typ av rökkanal.

**Tabell 19:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag och mm/graddag för olika typer av rökkanaler

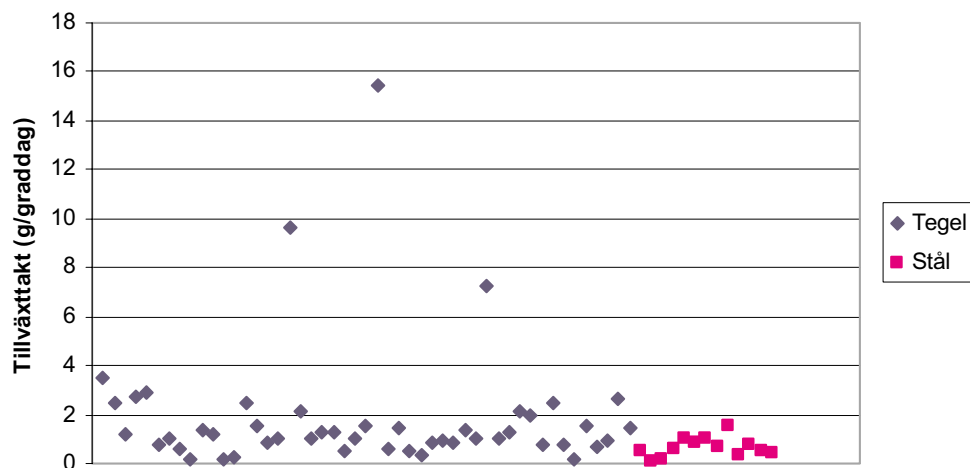
	Antal prover	Tillväxthastighet			
		g/graddag		mm/graddag i aktuell skorsten	
		mv	$\sigma$	mv	$\sigma$
<b>Vedpannor</b>					
Vattenkylda pannor					
- tegelskorsten	78	1,6	3,1	0,0012	0,0013
- stålskorsten	25	0,9	1,1	0,0008	0,0006
- alla	103	1,4	2,7	0,0011	0,0012
Keramiska pannor					
- tegelskorsten	49	1,9	2,6	0,0012	0,0017
- stålskorsten	13	0,7	0,4	0,0008	0,0005
- alla	62	1,6	2,3	0,0011	0,0015
<b>Pelletspannor</b>					
- tegelskorsten	23/22	0,5	0,7	0,0008	0,0009
- stålskorsten	20	0,7	0,7	0,0009	0,0009
- alla	43/42	0,6	0,7	0,0009	0,0009
<b>Kaminer</b>					
- tegelskorsten	5	0,3	0,2	0,0003	0,0002
- stålskorsten	22/23	0,8	0,9	0,0008	0,0011
- alla	27/28	0,7	0,8	0,0007	0,0010
<b>Oljepannor</b>					
- tegelskorsten	45/46	0,1	0,2	0,0001	0,0002
- stålskorsten	17/20	0,1	0,1	0,0001	0,0003
- alla	62/66	0,1	0,2	0,0001	0,0002

Tillväxthastigheten i g/graddag är för vedpannor i stort sett dubbelt så hög för tegelskorstenar som för stålskorstenar. För pelletspannor och kaminer är förhållandet det motsatta, men med mindre skillnad. Underlaget för kaminer är dock för litet för att dra några relevanta slutsatser. Både för pelletspannor och kaminer torde andra faktorer än skorstenstypen i sig påverka jämförelsen

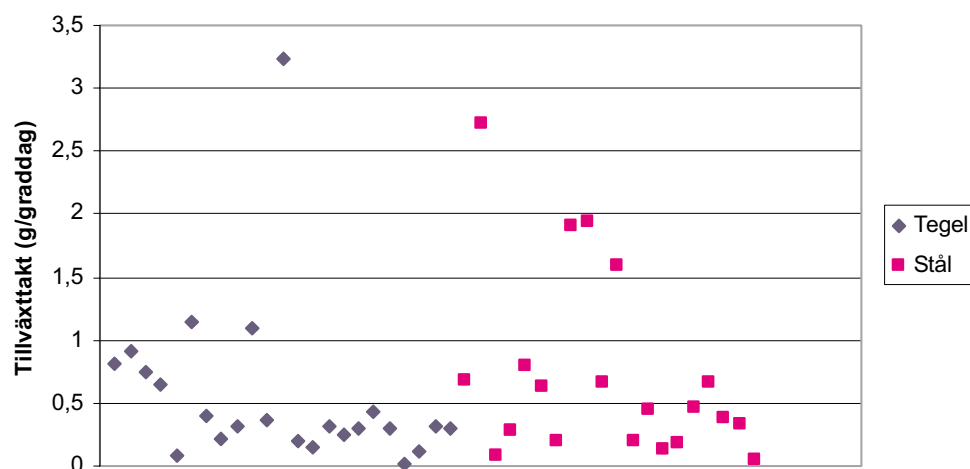
I figur 62-66 visas tillväxthastigheten i g/graddag för olika typer av skorstenar för olika eldstäder. I figur 67-71 visas motsvarande data uttryckt i mm/graddag.



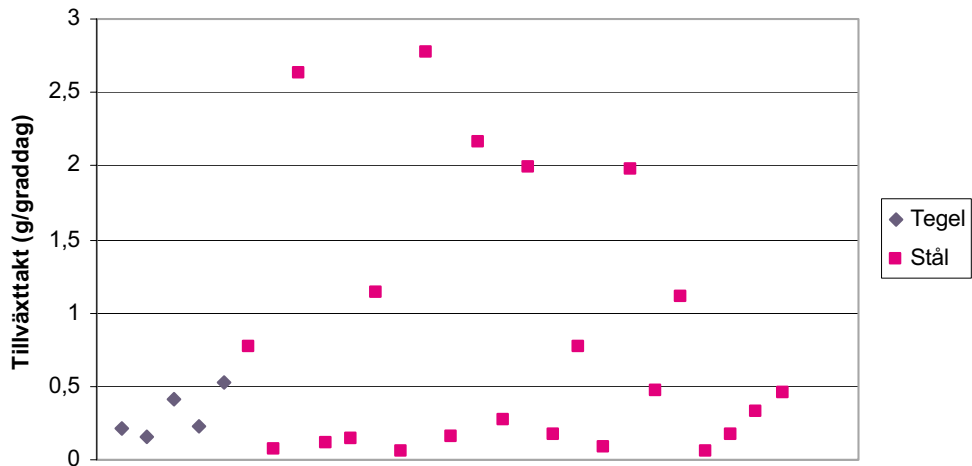
**Figur 62:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag för vattenkylda vedpannor med tegel- resp. stålskorsten



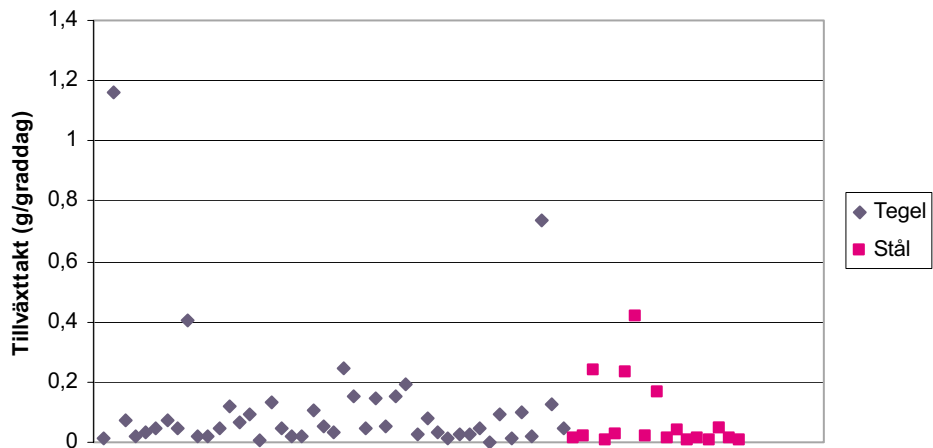
**Figur 63:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag för keramiska vedpannor med tegel- resp. stålskorsten



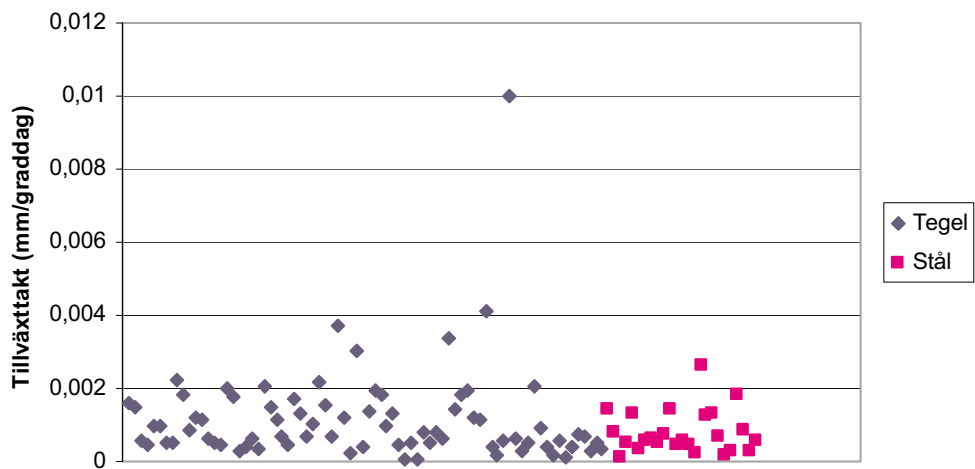
**Figur 64:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag för pelletspannor med tegel- resp. stålskorsten



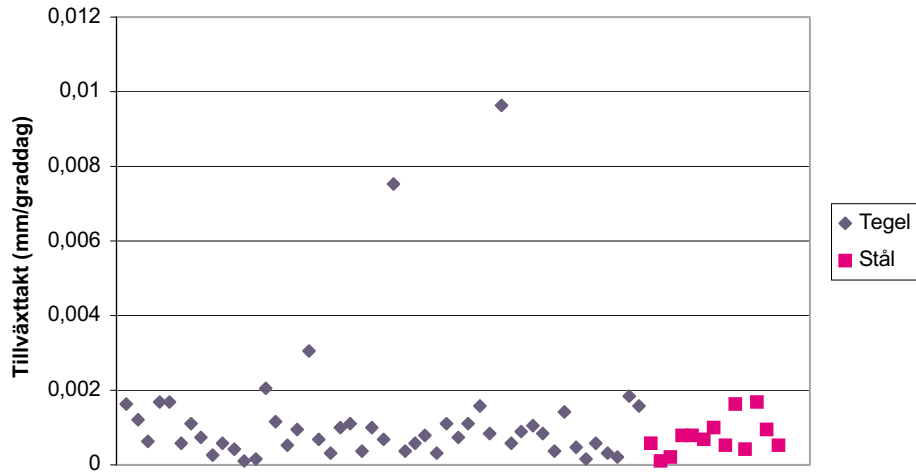
**Figur 65:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/grad dag för kaminer med tegel- resp. stålskorsten



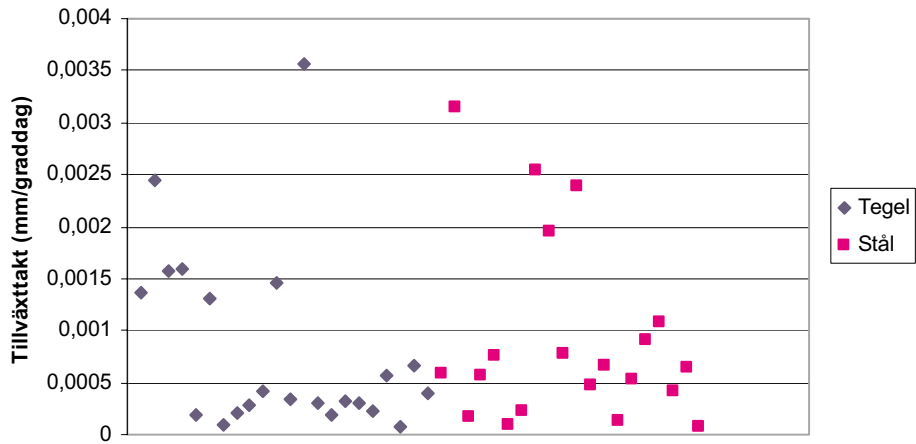
**Figur 66:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/grad dag för oljepannor med tegel- resp. stålskorsten



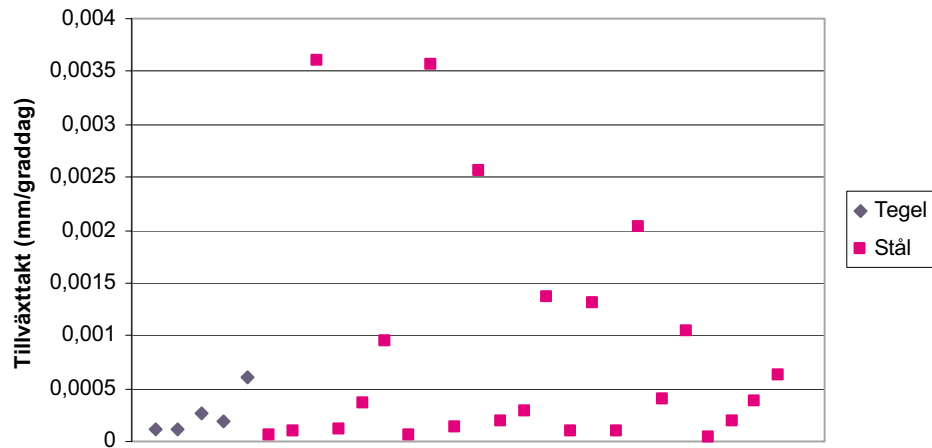
**Figur 67:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för vattenkylda vedpannor med tegel- resp. stålskorsten



**Figur 68:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för keramiska vedpannor med tegel- resp. stålskorsten



**Figur 69:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för pelletspannor med tegel- resp. stålskorsten



**Figur 70:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för kaminer med tegel- resp. stålskorsten



I tabell 20 redovisas tillväxthastigheten i sotskiktet fördelat på olika klassificeringar av sottyper.

**Tabell 20:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag och mm/graddag för olika typer av sotprover.

	Antal prover	Tillväxthastighet			
		g/graddag		mm/graddag i aktuell skorsten	
		mv	$\sigma$	mv	$\sigma$
<b>Vedpannor</b>					
Vattenkylda pannor					
- normal	47	1,7	3,8	0,0012	0,0015
- aska	25	0,9	0,9	0,0011	0,0009
- sot	20	1,2	1,4	0,0007	0,0004
- tjära/knotter	11	1,8	2,1	0,0011	0,0011
Keramiska pannor					
- normal	27	1,6	1,8	0,0010	0,0006
- aska	19	1,3	1,6	0,0013	0,0021
- sot	4	0,8	0,6	0,0004	0,0002
- tjära/knotter	12	2,5	4,2	0,0012	0,0020
<b>Pelletspannor</b>					
- normal	22/20	0,6	0,8	0,0007	0,0009
- aska	16/17	0,5	0,4	0,0008	0,0007
- sot	4	1,4	1,0	0,0017	0,0012
- tjära/knotter	1	-	-	-	-
<b>Kaminer</b>					
- normal	6	0,7	1,0	0,0008	0,0014
- aska	3	0,2	0,3	0,0003	0,0003
- sot	15	0,7	0,8	0,0007	0,0010
- tjära/knotter	3	1,5	1,1	0,0014	0,0012
<b>Oljepannor</b>					
- normal	16	0,15	0,19	0,0002	0,0004
- aska	11	0,04	0,05	0,00005	0,00005
- sot	13/12	0,32	0,67	0,0002	0,0003
- murbruk	23	0,07	0,09	0,00009	0,0001

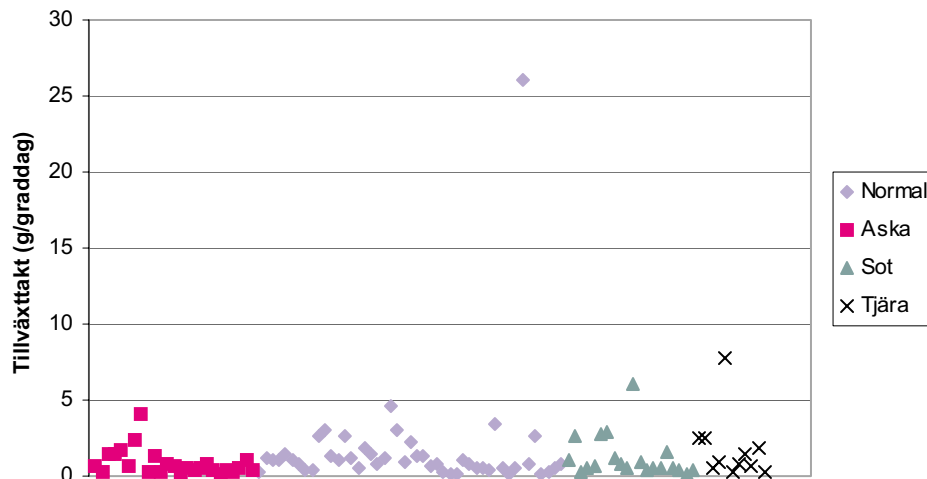


I figur 72-76 visas tillväxthastigheten i g/graddag fördelat på olika sottomter i olika anläggningar. I figur 77-81 visas motsvarande data uttryckt i mm/graddag.

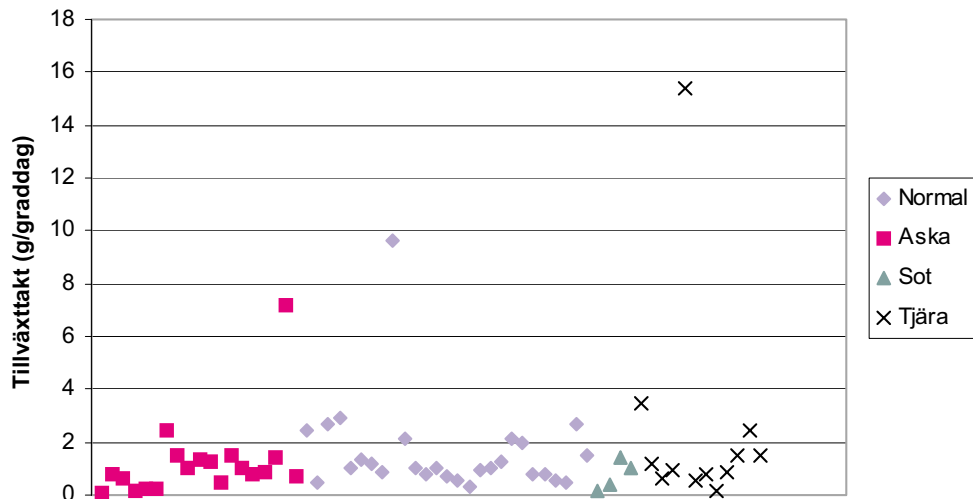
För vedpannor är tillväxthastigheten i g/graddag högst för de anläggningar vars sotprov klassificerats som "tjära/knotter", medan tillväxthastigheten för prover som klassificerats som "aska" är låg. I anläggningar vars prover klassificerats som "normal" resp. "sot" har medelhöga värden med undantag för keramiska pannor med prov som klassificerats som "sot", vilka ger låga värden. Underlaget är emellertid litet.

Uttryckt i mm/graddag är tillväxthastigheten ungefär densamma för grupperna "normal", "aska" och "tjära/knotter". Detta indikerar den högre densiteten för sotprover som klassificerats som "sot"

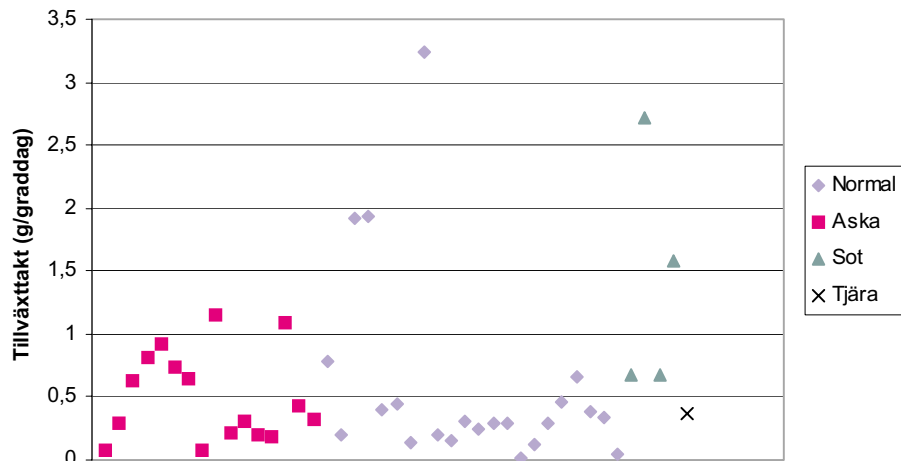
För oljepannorna är tillväxthastigheten låg för anläggningar vars sotprover klassificerats som "aska", något högre för "normal" och högst för anläggningar vars prover klassificerats som "sot".



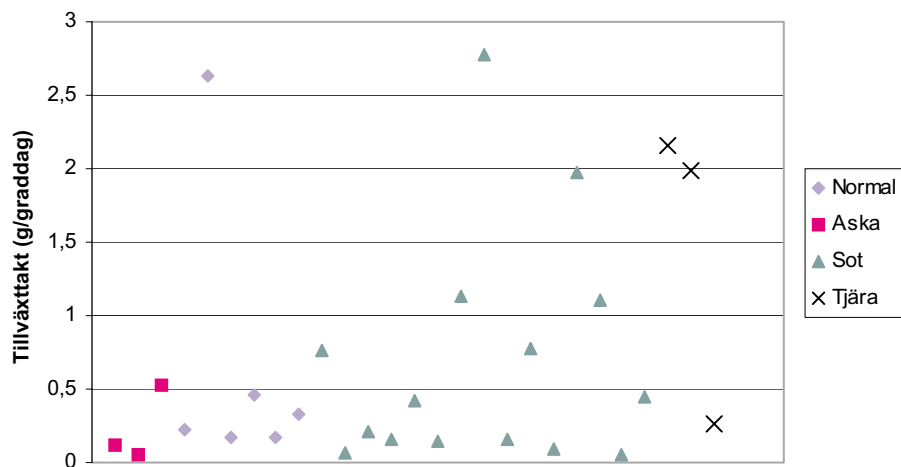
**Figur 72:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag för vattenkylda vedpannor fördelat på olika sottomter



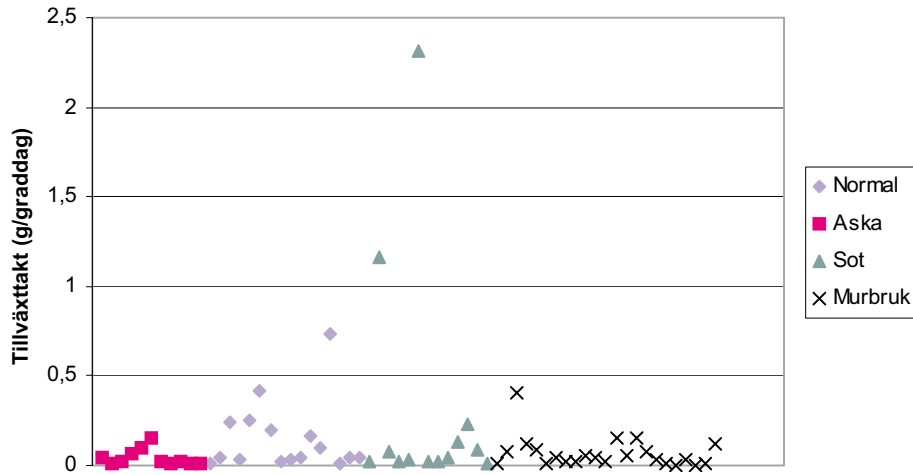
**Figur 73:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag för keramiska vedpannor fördelat på olika sottomtyper



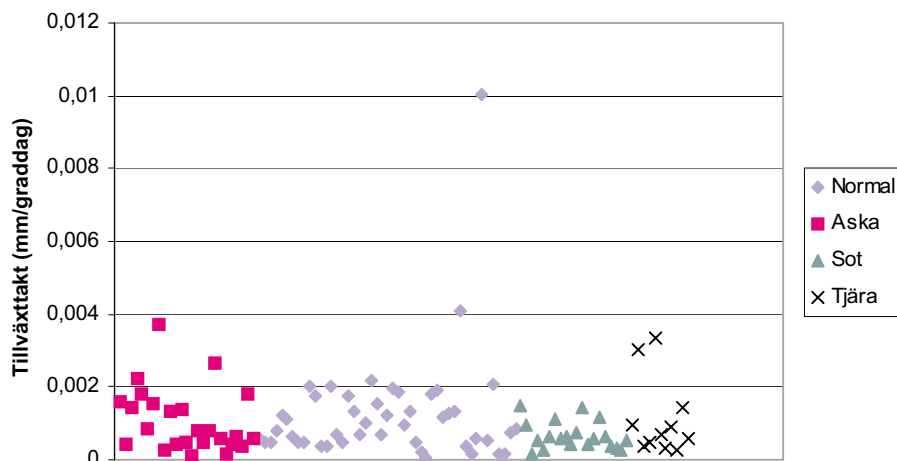
**Figur 74:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag för pelletspannor fördelat på olika sottomtyper



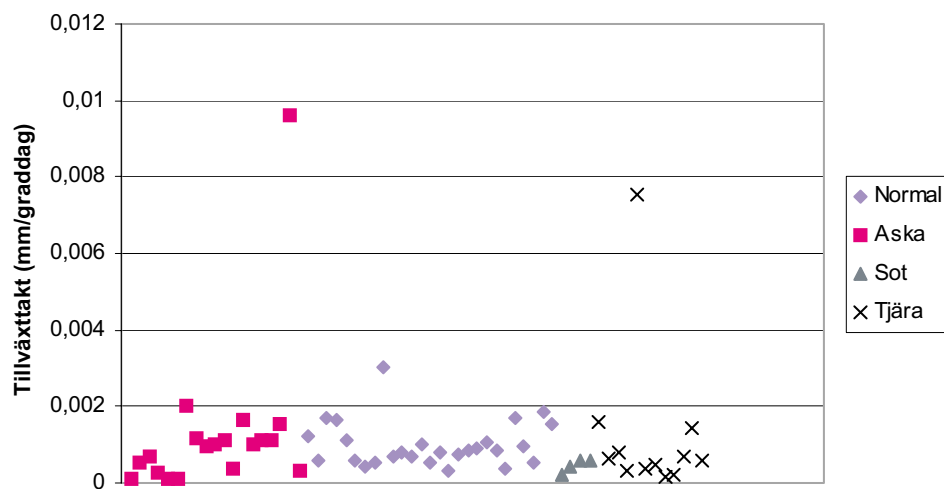
**Figur 75:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/graddag för kaminer fördelat på olika sottomtyper



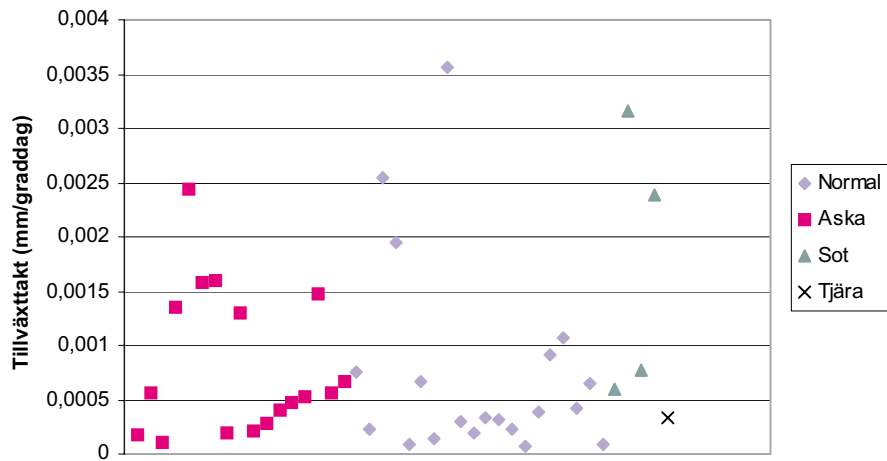
**Figur 76:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i g/grad dag för oljepannor fördelat på olika sotstyper



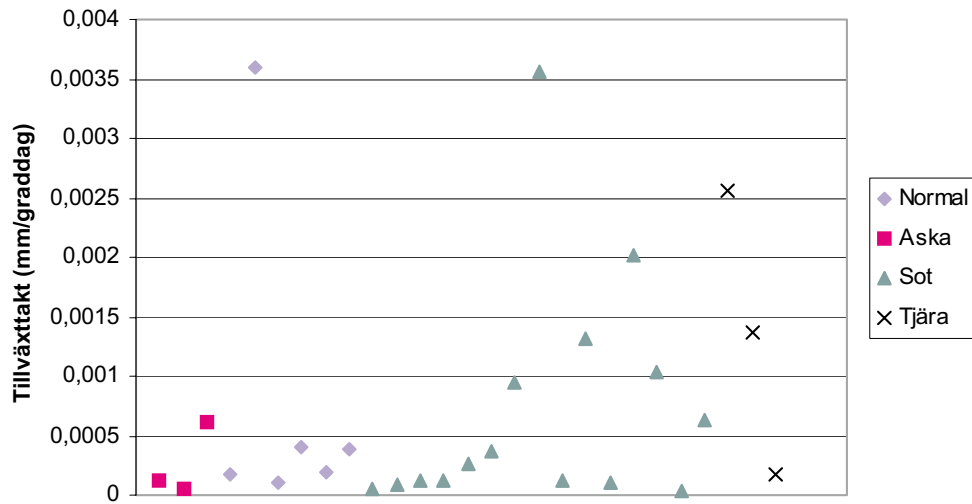
**Figur 77:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för vattenkylda vedpannor fördelat på olika sotstyper



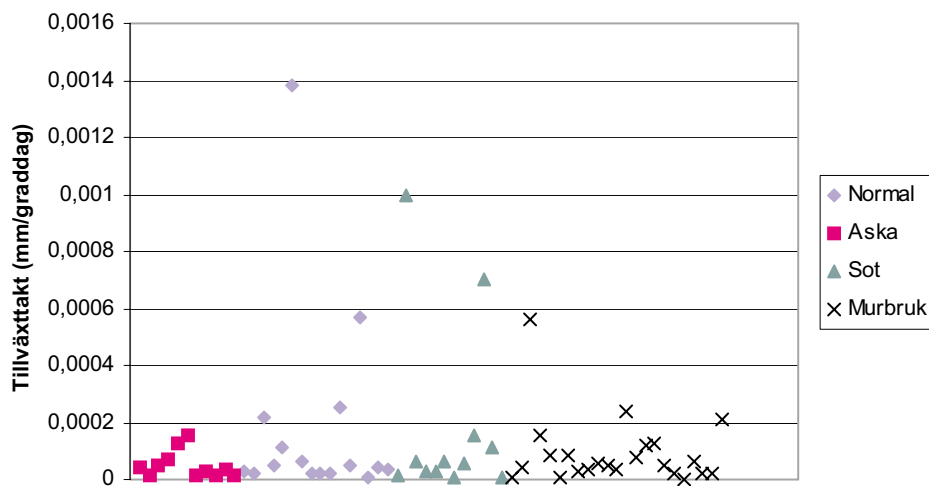
**Figur 78:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för keramiska vedpannor fördelat på olika sotstyper



**Figur 79:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för pelletspannor fördelat på olika sottyper



**Figur 80:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för kaminer fördelat på olika sottyper



**Figur 81:** Beräknad tillväxthastighet hos sotskiktet i mm/grad dag för oljepannor fördelat på olika sottyper

## 4.5 Antändningstemperatur, effektivt värmevärde m.m.

Antändningstemperaturen för 26 st sotprover med olika klassificering bestämdes i en rörugn. För närmare beskrivning av metoden, se [1].

De erhållna resultaten framgår av Tabell 21.

**Tabell 21** Antändningstemperaturen bestämd i rörugn för 26 st sotprover

Typ av sotprov	Antal	Antändningstemperatur	
		mv	$\sigma$
<b>Ved, tjära</b>	5	264	20
knotter	5	274	25
sot	4	310	49
normal	3	280	10
aska	1	280	-
alla	18	280	32
<b>Olja, normal</b>	1	360	-
sot	2	340	-
murbruk	1	370	-
alla	4	353	51

Skillnaden i antändningstemperatur mellan olika typer av sotprover är relativt små. Antändningstemperaturen för sotprover från vedeldning är dock som medelvärde klart lägre än för sotprover från oljeeldning; 280°C jämfört med 353°C. För de olika sottomtyperna från vedeldning kan möjligen en tendens till lägre antändningstemperatur för sottomtyper med förmodat högt innehåll av flyktiga ämnen, dvs ”tjära” och ”knotter”, utläsas jämfört med andra sottomtyper.

Provning enligt ISO 5660 gjordes för samtliga de prover för vilka antändningstemperaturen bestämts i rörugn samt för ytterligare tio st sotprover. Resultaten framgår av tabell 22.

**Tabell 22:** Resultat från analys av sotprov enligt ISO 5660

Typ av sotprov	Antal	Tändtid	Max effekt, kW/m <sup>2</sup>	Medel-effekt, kW/m <sup>2</sup>	Effektivt värmevärde, MJ/kg
<b>Ved, tjära</b>	5	00:05	142	93	17,6
knotter	5	00:06	130	91	22,6
sot	5	ej tänt	33	22	15,8
normal	8	06:40/ ej tänt	34	23	14,6
aska	5	ej tänt	56	33	12,9
alla	28	-	74	49	16,5
<b>Olja, normal</b>	1	ej tänt	27	19	9,4
sot	2	02:40/ ej tänt	40	31	12,5
murbruk	1	ej tänt	19	6	3,9
alla	4	-	32	22	9,6

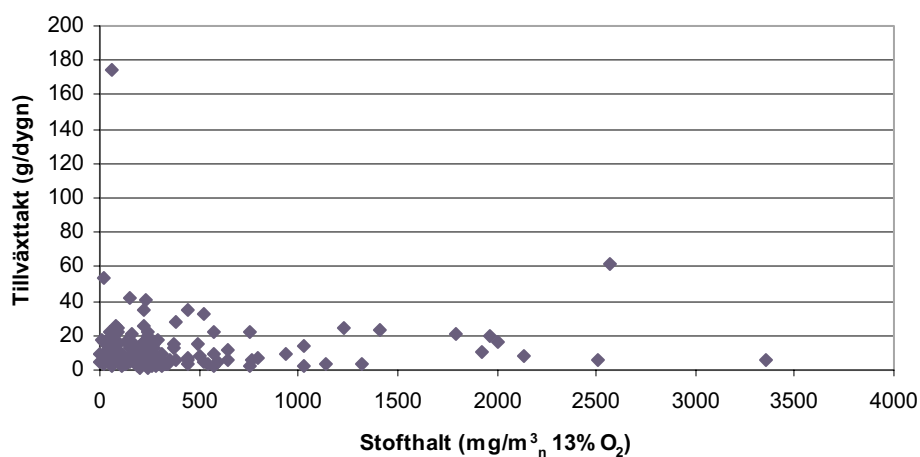
Sotproven från vedeldning, som klassificerats som ”tjära” eller ”knotter” uppvisar kraftigt avvikande beteende jämfört med övriga prover. Tändtiden är endast några få sekunder, medan prover som klassificerats som ”sot”, ”normal” eller ”aska” antingen inte tänds alla eller tänds först efter några minuter. Tändning definieras här som att synliga lågor kan konstateras. Den maximala effekten och medeleffekten är också avsevärt högre för ”tjära”- och ”knotter”-prover än för övriga.

Det effektiva värmevärdet visar mindre variation mellan sottomtyperna. Dock är ordningsföljden logisk med i fallande ordning ”knotter” – ”tjära” – ”sot” – ”normal” – ”aska”. Medelvärdet för prover från vedeldning är också betydligt högre än för prover från oljeeldning.

Sotproverna från oljeeldning tände med ett undantag inte enligt definitionen ovan. Underlaget i form av antalet prover är starkt begränsat, men den maximala effekten, medeleffekten och det effektiva värmevärdet visar klart lägre värden i genomsnitt än för proverna från vedeldning.

## 4.6 Korrelation stofthalt –tillväxthastighet

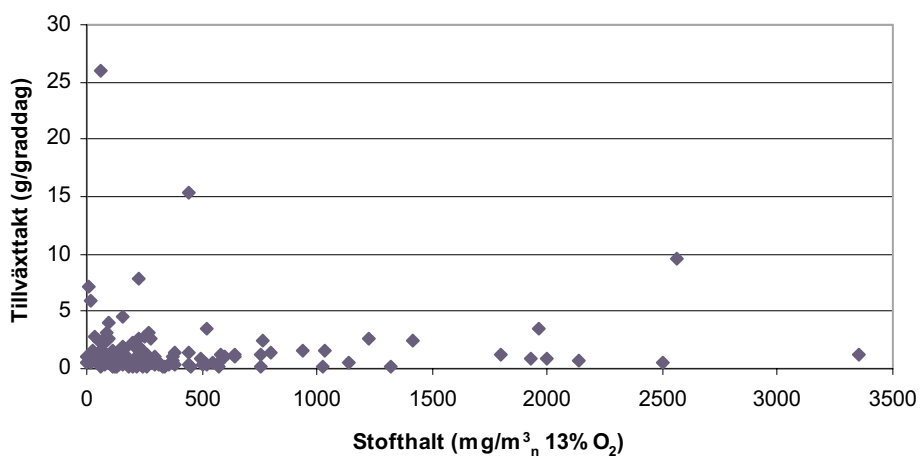
En av idéerna bakom föreliggande projekt har varit att undersöka om en mätning av stofthalten i rökgaserna skulle kunna ge något underlag för att förutsäga tillväxthastigheten hos sotbeläggningarna i den enskilda skorstenen. För att studera om en sådan korrelation föreligger har tillväxthastigheten i g/dygn avsatts mot uppmätt stofthalt för vattenkylda pannor, keramiska pannor samt pellets pannor. Resultatet framgår av figur 82.



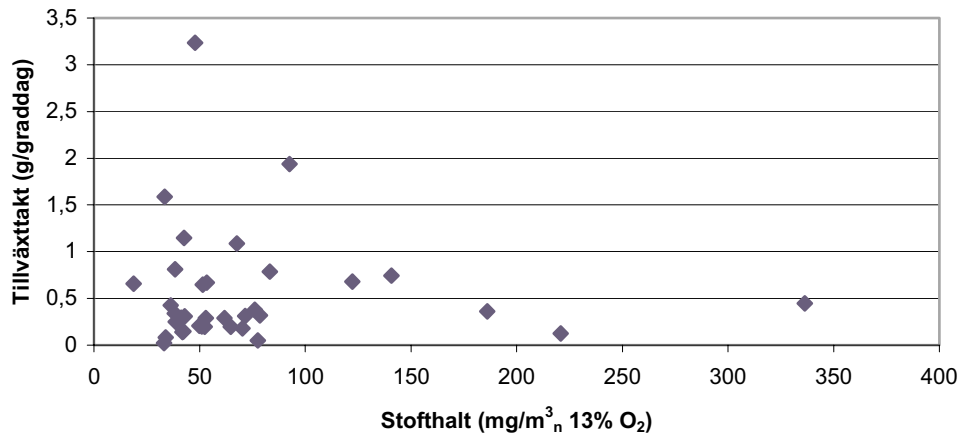
**Figur 82:** Tillväxthastigheten i g/dygn som funktion av stofthalten för vedeldade pannor

Som synes kan ingen korrelation fastställas mellan dessa storheter. Spridningen mellan samhörande värden är mycket stor. Förhållandet är likartat för andra typer av anläggningar.

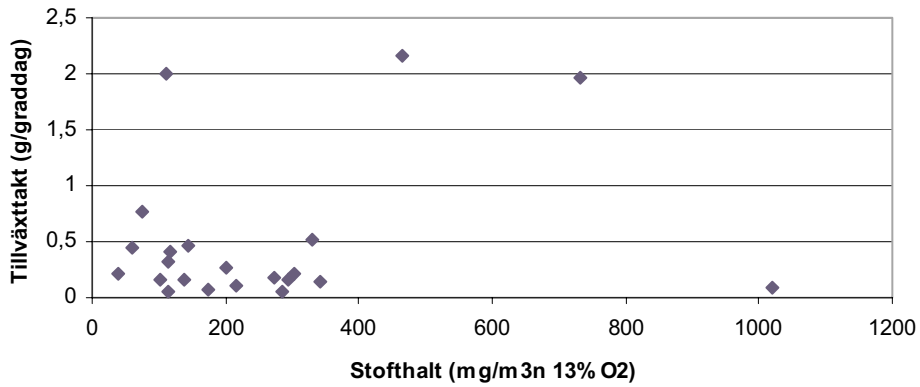
På samma sätt som ovan är det mera intressant att söka korrelationer mellan stofthalten och tillväxthastigheten uttryckt i g/graddag resp mm/graddag. I figur 83-86 resp figur 87-90 visas samhörande data för dessa storheter.



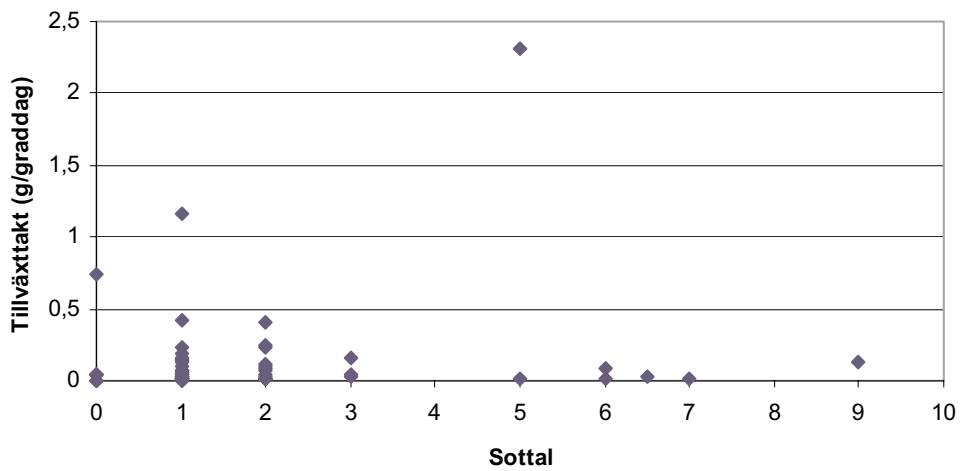
**Figur 83:** Beräknad tillväxthastighet för sotskiktet uttryckt i g/graddag som funktion av uppmätt stofthalt för vedpannor



**Figur 84:** Beräknad tillväxthastighet för sotskiktet uttryckt i g/graddag som funktion av uppmätt stofthalt för pelletspannor

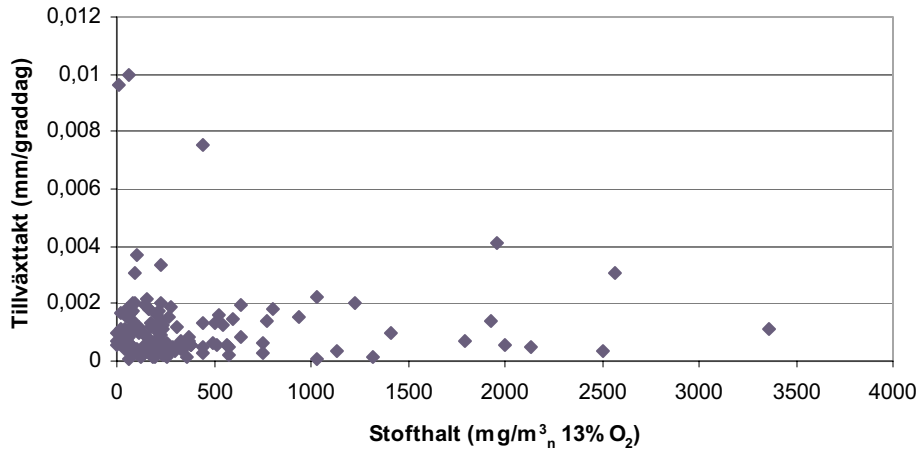


**Figur 85:** Beräknad tillväxthastighet för sotskiktet uttryckt i g/graddag som funktion av uppmätt stofthalt för kaminer

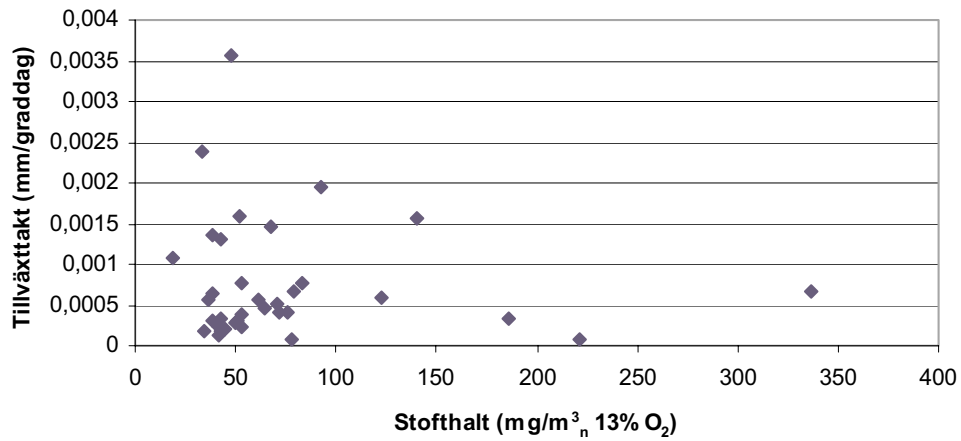


**Figur 86:** Beräknad tillväxthastighet för sotskiktet uttryckt i g/graddag som funktion av uppmätt sotal för oljepannor

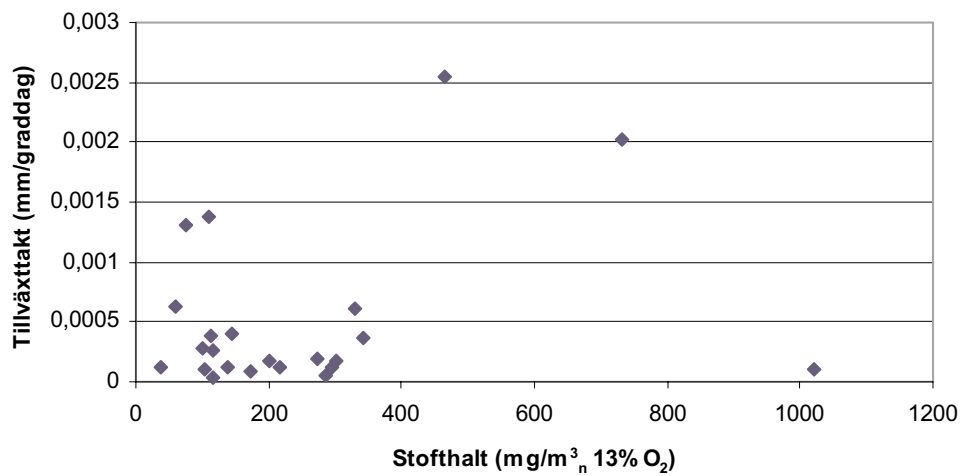




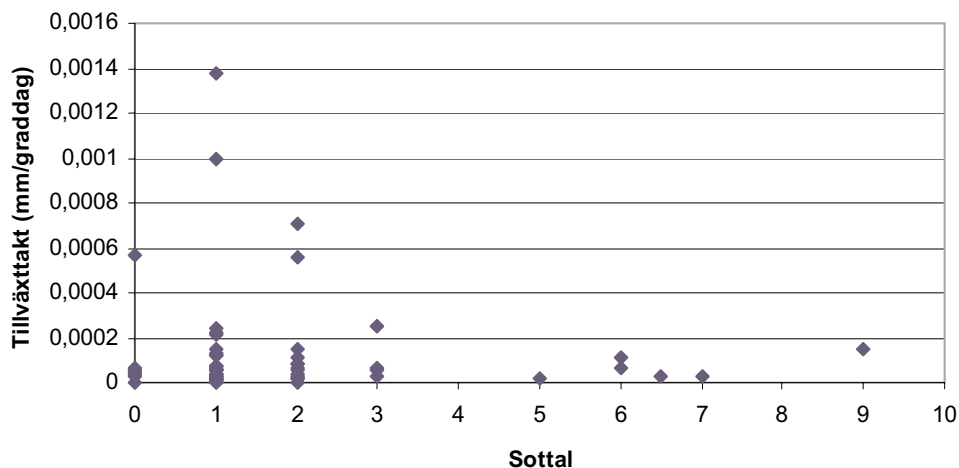
**Figur 87:** Beräknad tillväxthastighet för sotskiktet uttryckt i mm/grad dag som funktion av uppmätt stofthalt för vedpannor



**Figur 88:** Beräknad tillväxthastighet för sotskiktet uttryckt i mm/grad dag som funktion av uppmätt stofthalt för pelletspannor



**Figur 89:** Beräknad tillväxthastighet för sotskiktet uttryckt i mm/grad dag som funktion av uppmätt stofthalt för kaminer



**Figur 90:** Beräknad tillväxthastighet för sotskiktet uttryckt i mm/graddag som funktion av uppmätt sotal för oljepannor

Inte heller ovanstående analyser kan påvisa någon signifikant korrelation mellan tillväxthastigheten uttryckt i g/graddag eller mm/graddag och stofthalten i rökgasen. Detta innebär att en mätning av stofthalten i den enskilda anläggningen **inte** kan läggas till grund för någon förutsägelse om hur snabbt sotskiktet tillväxer.

## 4.7 Brandrisker

Uppbyggnaden av ett sotskikt på väggarna i en rökkanal innebär i sig inte någon brandrisk. Sotskiktet innebär dock en indirekt brandrisk om det skulle antändas och en sotbrand uppstå. Förutom eventuella skador på rökkanalen i sig innebär sotbranden en risk för höga temperaturer på anslutande brännbara byggnadsdelar, eventuell antändning av dessa och därmed brandspridning i själva byggnaden. I detta fall kan skadorna givetvis bli stora. Som en viktig del i projektet har därför ingått att utveckla ett verktyg för bedömning av dessa brandrisker.

Risken för brand i själva byggnaden är intimt förknippad med de temperaturer som uppstår på rökkanalens ytteryta vid en eventuell sotbrand. Dessa i sin tur beror på brandbelastningen i rökkanalen, sotbrandens varaktighet samt rökkanalens konstruktion. Brandbelastningen i sin tur beror på dels sotets egenskaper, dels mängden sot i rökkanalen. Kunskapen om dessa parametrar har tidigare varit starkt begränsad. De resultat som redovisats ovan ger däremot ett unikt underlag i dessa avseenden.

Ett datorprogram har därför utvecklats som för ett givet utförande av rökkanal beräknar yttemperaturen på rökkanalens utsida vid en sotbrand under givna förutsättningar. Som indata anges, förutom dimensioner och materialdata för rökkanalen, värmevärde, densitet och tillväxthastighet för sotet. Programmet har vidare utformats så att en högsta tillåten yttemperatur vid

sotbrand anges. Programmet beräknar därefter med hjälp av valda indata den maximalt tillåtna tidsperioden mellan två rensningar med hänsyn till vald yttemperatur.

Programmet bygger på en fullständig värmebalans över skorstenen i fortvarighetstillstånd vid en sotbrand. Förutom beräkningar vid en enskild kombination av indata innehåller programmet också rutiner för att studera inverkan då olika parametrar, t.ex. isoleringstjocklek eller sotskiktets tillväxthastighet, varierar inom ett visst intervall. På detta sätt kan programmet användas för att studera hur olika parametrar påverkar risken för brand i byggnaden vid en sotbrand.

Programmet redovisas i form av en datafil på CD. Programmets uppbyggnad inkl de fysikaliska modeller som utnyttjas beskrivs i avsnittet nedan.

Ett exempel på beräkning med programmet ges i Bilaga 2.

## 4.7.1 Programuppbyggnad

### 4.7.1.1 Modellens syfte

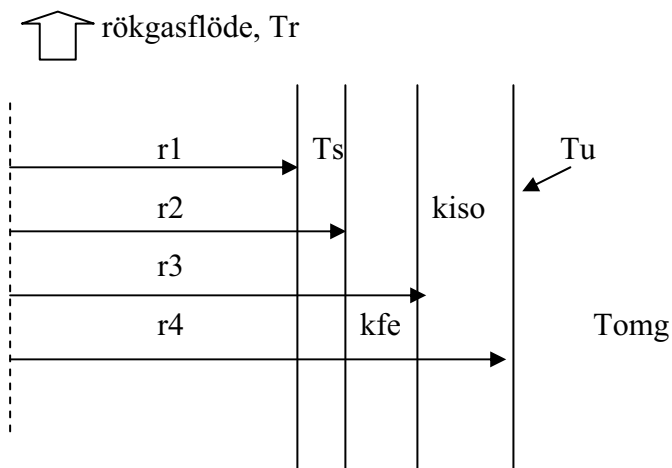
Vid en sotbrand har många faktorer i praktiken betydelse för vilka temperaturer som uppnås på insidan och utsidan av skorstenen. De viktigaste är: skorstenens utformning och dess material och placering, val av bränsle och rökgasflödets storlek, sotets värmevärde, brinntid och mängd. Här beräknas temperaturen på utsidan av skorstenen då ett sotskikt brinner m.h.a. en modell för värmeöverföringen genom skorstensväggen.

Modellen är ett redskap med vilket man kan studera hur olika parametrar påverkar resultatet. T.ex. kan man se vilka parametrar som har stor betydelse och vilka som har liten. Modellen kan på så vis ge ökad kunskap om effekten av en soteld, men något exakt svar på när en sådan bryter ut och vilka konsekvenser den får kan den dock inte ge.

Modellen bygger på en värmebalans där förbränningen av sotet sker med konstant effektutveckling och temperatur under en viss uppskattad brinntid. Modellen besvarar frågan: vid vilken tjocklek på en sotskikt blir temperaturen på utsidan högre än en viss ur säkerhetssynpunkt accepterad temperatur?

### 4.7.1.2 Modellbeskrivning

Ett tvärsnitt genom en cylindrisk skorstensvägg visas i figur 91. Nomenklatur för figuren och modellen återfinns i avsnitt 4.7.1.11. Röret består av två skikt med olika värmeledningsförmåga, vanligtvis en stålmantel och ett lager isolering. Sotet ackumuleras på insidan av stålmanteln. Rökgasflödet med temperaturen  $T_r$  rör sig uppåt i röret. Omgivningen har temperaturen  $T_{omg}$  och skorstenens utsida har temperaturen  $T_u$

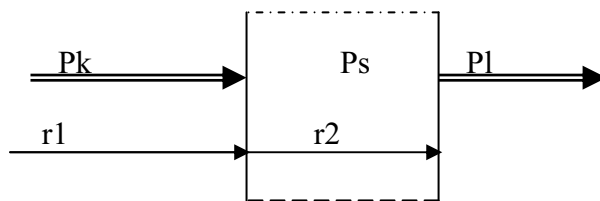


**Figur 91:** Figuren visar ett tvärsnitt genom en vägg i en cylindrisk skorsten.

#### 4.7.1.3 Värmebalans över sotskiktet

En värmebalans över sotskiktet enligt figur 92 ger:

$$P_s + P_k = P_l \quad (1)$$



**Figur 92:** Värmebalans över sotskiktet.

$P_s$  är den effekt som utvecklas när sotet brinner,  $P_k$  är den effekt som överförs mellan rökgaser och innervägg (sotskikt) via konvektion.  $P_l$  är den effekt som leds ut genom skorstensväggen.

$$P_s = \frac{H_i \cdot \rho_s \cdot \delta_s \cdot 2 \cdot r_1 \cdot \pi \cdot 10^6}{\Delta t} \quad [\text{W/m}] \quad (2)$$

Sotet antas brinna med en konstant effektutveckling i tiden.

$$P_k = 2 \cdot r_1 \cdot \pi \cdot h_i \cdot (T_r - T_s) \quad [\text{W/m}] \quad (3)$$

Värmeövergångskoefficienten mellan rökgasen och rörets insida,  $h_i$ , beräknas från kända korrelationer för strömning i rör. Värmeövergången går från rökgas till sot när rökgasens temperatur är varmare än sotets, och från sot till rökgas då sotet är varmare än rökgasen.

$$P_l = 2 \cdot r_2 \cdot \pi \cdot U_2 \cdot (T_s - T_{omg}) \quad [\text{W/m}] \quad (4)$$

Vid beräkning av värmeledningen försummas ledning över sotskiktet. Värmeövergångskoefficienten  $U_2$  räknas från insidan av stålmanteln till omgivande luft.

$$U_2 = \frac{1}{\frac{r_2}{k_{fe}} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{r_2}{k_{iso}} \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) + \frac{r_2}{r_4 \cdot h_u}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (5)$$

Värmeövergångskoefficienten mellan utsida och omgivande luft,  $h_u$ , beräknas från kända erfarenhetsvärden för väggar i byggnader. Data för omgivning, skorstenen, sotet och rökgasflödet beräknas eller uppskattas utifrån aktuell anläggning och driftssituation.

#### 4.7.1.4 Beräkning av temperatur i sotet och sotskiktets tjocklek vid en viss temperatur på utsidan

$P_l$  kan beräknas med kunskap om att  $P_l = \text{konstant}$  över alla skikten i skorstenen och mellan väggen och omgivningen. Vid en viss accepterad högsta  $T_u$  och med kunskap om omgivningens temperatur fås:

$$P_l = 2 \cdot r_4 \cdot \pi \cdot h_u \cdot (T_u - T_{omg}) \quad [\text{W/m}] \quad (6)$$

$T_s$  kan nu beräknas ur (4)

$$T_s = \frac{P_l}{2 \cdot r_2 \cdot \pi \cdot U_2} + T_{omg} \quad [^\circ\text{C}] \quad (7)$$

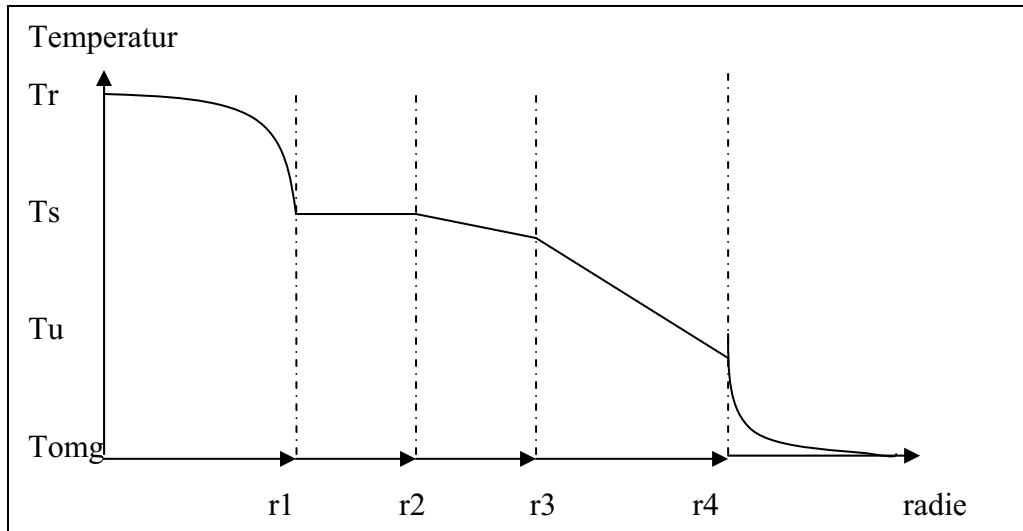
Sotets tjocklek kan nu beräknas ur balansen (1). Vid beräkningen utnyttjas att  $r_1 \approx r_2$ .

$$\delta_s = \frac{(2 \cdot r_2 \cdot \pi \cdot U_2 \cdot (T_s - T_{omg}) - 2 \cdot r_2 \cdot \pi \cdot h_i \cdot (T_r - T_s)) \cdot \Delta t}{H_i \cdot \rho_s \cdot 2 \cdot r_2 \cdot \pi \cdot 10^6} \quad [\text{m}] \quad (8)$$

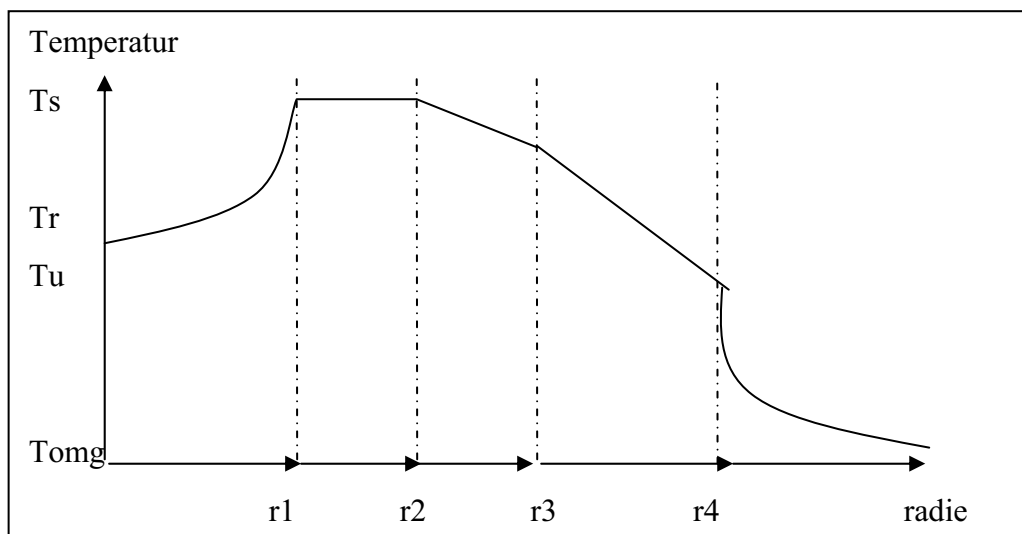
Om sotets tjocklek är känd, kan istället andra data beräknas från balansen, t.ex. sotets temperatur.

#### 4.7.1.5 Temperaturprofil

Så länge sotet inte brinner, kommer temperaturen att falla från rökgasen till omgivningen, se figur 93. Om sotet brinner och dess temperatur  $T_s > T_r$ , fås en temperaturprofil enligt figur 94.



**Figur 93:** Temperaturprofil då sotet ej brinner.



**Figur 94:** Temperaturprofil då sotet brinner och  $T_s > T_r$ .

#### 4.7.1.6 Beräkning av konvektiva värmeövergångskoefficienter

##### 4.7.1.6.1 Insidan av röret

Konvektionen mellan rökgasen och insidan av röret är väsentlig för temperaturutvecklingen. Värmeövergångskoefficienten  $h_i$  beräknas från kända korre-

lationer för Nusselt-talet,  $Nu_D = \frac{h_i \cdot D_i}{k_g}$ , för strömning i rör.

För laminär strömning och konstant värmefflöde är:  $Nu_D = 4,66$  (9)

och för turbulent strömning är:  $Nu_D = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3}$  (10)

Som omslag mellan laminär och turbulent strömning används lämpligen  $Re = 2000$  eftersom strömningen i skorstenen alltid är behäftad med störningar.

Reynolds-talet,  $Re = \frac{D_i \cdot u}{\nu}$ , beräknas efter att hastigheten i rökgasflödet har beräknats. Medelhastighet vid aktuell rökgastemperatur räknas fram från

$$\text{rökgasflödet genom: } u = \frac{V_n^*}{D_i^2 \cdot \pi / 4} \cdot \frac{(Tr + 273)}{273} \quad [\text{m/s}] \quad (11)$$

Gasens värmekonduktivitet,  $kg$ , Prandtl-tal,  $Pr$ , och kinematiska viskositet,  $\nu$ , hämtas från tabellverk.

#### 4.7.1.6.2 Utsidan av röret

Vid beräkning av värmeövergångskoefficienter vid inre och yttre väggar kan man enligt Boverkets Nybyggnadsregler räkna med att värmeövergångskoefficienter på in- respektive utsidan av en vägg är

$$\text{hinne} = 7,7 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (12)$$

$$\text{hute} = 25 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (13)$$

Om luften står stilla går  $h$  mot en konstant. Från BNR hämtar vi då luften står stilla:

$$\text{hstill} \rightarrow 6 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (14)$$

Om värmeövergångskoefficienten  $h_u$  är hög, dvs det blåser kring skorstens utsida, kommer temperaturen  $T_u$  att sjunka. Det är när luften står stilla som problem med högt  $T_u$  kan uppstå. Därför anges välventilerad skorsten inomhus ( $h_u = 7,7$ ) eller dåligt ventilerad skorsten ( $h_u = 6$ ) som indata till modellen.

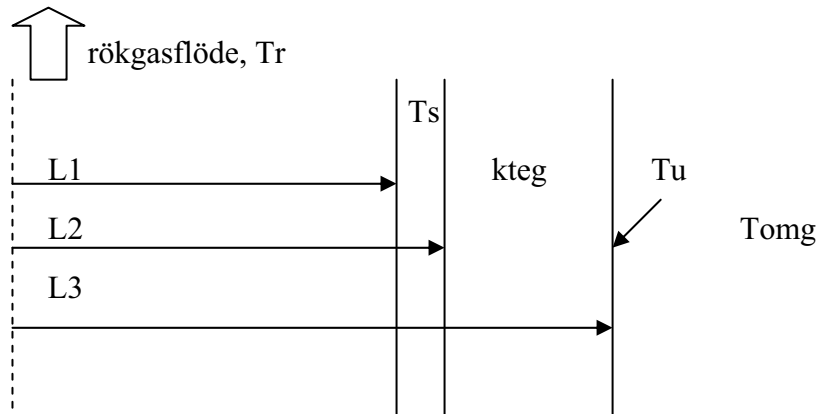
#### 4.7.1.7 Högsta och lägsta sottemperatur

Modellen bygger på en teoretisk balans, och hänsyn till lägsta tändtemperatur för sotet eller tillgång på syre till förbränningen görs ej. Vid bedömning av resultatet måste man därför vara medveten om vilka temperaturer som är rimliga. Beroende på sotets värmevärde och elementaranalys kan en högsta möjlig adiabatisk förbränningstemperatur beräknas. I praktiken är dock tillgången på syre begränsad vid en soteld varvid temperaturen hålls tillbaka. Om modellen visar en orimligt hög  $T_s$  som resultat, bör man se detta som en varning, inte som ett absolut resultat.

#### 4.7.1.8 Modifieringar då skorstenen har ett fyrkantigt tvärsnitt

Om skorstenen har ett kvadratisk tvärsnitt modifieras modellen enligt följande:  
Beräkning av värmegenomgångstalet  $UL$ :

$$U2L = \frac{1}{\frac{L3-L2}{kteg} + \frac{1}{hu}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (15)$$



**Figur 95:** Figuren visar ett tvärsnitt genom en vägg i en skorsten med kvadratisk tvärsnitt. Observera att  $L1$ ,  $L2$  och  $L3$  är räknade från centrum. Den inre sidan är  $2 \times L2 =$ .

Värmeövergångskoefficienten  $hiL$  för ett fyrkantigt tvärsnitt är vid laminär strömning:

$$Nu_l = \frac{hiL \cdot l}{kg} = 3,61, \quad l = \text{insidans bredd.} \quad (16)$$

och för turbulent strömning används samma beräkning som för cirkulärt tvärsnitt, men med den hydrauliska diametern  $D_h = \frac{4A_c}{P}$ . För ett fyrkantigt tvärsnitt med bredden  $l$  blir  $D_h = \frac{4 \cdot l \cdot l}{4 \cdot l} = l$ . Vi får:

$$Nu_{D_h} = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \quad (17)$$

På samma sätt som vid cirkulär skorsten anges välventilerad skorsten inomhus ( $hu = 7,7$ ) eller dåligt ventilerad skorsten ( $hu = 6$ ) som indata till modellen.

Värmeflödet genom ledning blir:

$$PIL = 2 \cdot L3 \cdot 4 \cdot hu \cdot (Tu - Tomg) = 2 \cdot L2 \cdot 4 \cdot U2L \cdot (Ts - Tomg) \quad [\text{W}/\text{m}] \quad (18)$$

Utvecklad effekt då sotet brinner blir:

$$PsL = \frac{H_i \cdot \rho_s \cdot \delta s \cdot 2 \cdot L1 \cdot 4 \cdot 10^6}{\Delta t} \quad [\text{W}/\text{m}] \quad (19)$$

Konvektivt överförd effekt:

$$PkL = 2 \cdot L1 \cdot 4 \cdot hiL \cdot (Tr - Ts) \quad [\text{W}/\text{m}] \quad (20)$$



Sotets tjocklek kan nu beräknas ur värmebalansen. Vid beräkningen utnyttjas att  $L1 \approx L2$ .

$$\delta s = \frac{(2 \cdot L2 \cdot 4 \cdot U2L \cdot (Ts - Tomg) - 2 \cdot L2 \cdot 4 \cdot hiL \cdot (Tr - Ts)) \cdot \Delta t}{H_i \cdot \rho_s \cdot 2 \cdot L2 \cdot 4 \cdot 10^6} \quad [\text{m}] \quad (21)$$

#### 4.7.1.9 Kommentarer till modellresultat

Modellen ska ses som ett verktyg att bättre förstå vad som påverkar förloppet vid en sotbrand. Följande är exempel på några mycket allmänna resultat:

- Borttransport av värme både på insidan och på utsidan av skorstenen har stor betydelse för att hålla ned temperaturerna. En trång skorsten tål ett tjockare sotskikt än en vid skorsten (samma effekt och bränsle), eftersom den konvektiva värmeöverföringen mellan sotskiktet och rökgaserna blir bättre då rökgasens hastighet ökar. Samtidigt höjs sotets temperatur, eftersom mer värme kan utvecklas utan att utsidan på skorstenen blir för varm.
- Eftersom värmeöverföringskoefficienten mellan rökgas och sotskikt är väsentlig för resultatet bör en så god uppskattning som möjligt av tillfört bränsle, luftfaktor och utvecklade effekt göras.
- En ökad isolering ökar sotets temperatur och minskar utsidans temperatur. Här får man se upp för orealistiska sottemperaturer.
- Sotets värmevärde, densitet och brinntid kan visserligen uppskattas väl. Men modellen tar inte hänsyn till tillgängligt syre för förbränningen, och därför kan uppnådda temperaturer i sotet överskattas. En bedömning av rimligheten i sotets temperatur måste alltid göras.

#### 4.7.1.10 Förslag till förbättring av modellen

I modellen finns inbyggt möjligheten att i diagram studera hur sotskiktet växer till då olika parametrar varieras. En tänkbar förbättring av modellen är att utsträcka denna möjlighet till att omfatta diagram där även anläggningens effekt och rökgastemperatur varieras. Detta kräver en viss beräkningsinsats.

Det kan vara av intresse att utvidga modellen till rektangulära skorstenar. Rektangulära tvärsnitt kan räknas redan nu, om man approximerar till en fyrkantig eller en rund. Valmöjligheten ”rektangulärt tvärsnitt” skulle dock göra det lite enklare för användaren och ge ett noggrannare resultat.

En svårighet är att känna till sotets brinntid. Brinntiden är i viss mån beroende av syretillförseln. En tänkbar förbättring skulle vara att med kunskap om det ökade drag sotbranden ger, beräkna tillgänglig syremängd för sotbranden, och därefter en brinntid.

Modellen bygger på en värmebalans, där sotets temperatur beräknas ur balansen. I verkligheten brinner inte sotet under en viss temperatur (tändtemperatur) och när det väl har börjat brinna är det troligt att temperaturen stiger till

ett viss  $T_s$ , som beror bl.a. av syretillgången. En bättre beräkning av drag och tillgänglig syremängd skulle därför också ge en bättre temperatur.

En sotbrand är i praktiken ett transient förlopp, där branden initieras någonstans och sedan sprider sig i kanalen. Det är möjligt att en modell där det transienta förloppet beskrivs skulle ge ökad kunskap om riskerna vid sotbränder, men en sådan modell kräver en helt annan beräkningsinsats, än vad som är gjord här.

Fler förfiningar kan göras av befintlig modell, där en del approximationer kan ersättas med noggrannare beräkningar. Den typen av förfiningar skulle ge smärre förändringar i resultatet, men inte i någon högre grad bidra med mer kunskap om sotbränder.

#### 4.7.1.11 Nomenklatur för modellen

Beteckningarna följer i den ordning de förekommer i texten.

Beteckning	Dimension	Beskrivning
$2 \cdot r_2$ , $D_i$	m	innerdiameter på skorstensröret
$\delta_s = r_2 - r_1$	m	sotskiktets tjocklek i ett cylindriskt skorstensrör
$\delta_{fe} = r_3 - r_2$	m	stålmantels tjocklek i ett cylindriskt skorstensrör
$\delta_{iso} = r_4 - r_3$	m	isoleringens tjocklek i ett cylindriskt skorstensrör
$2 \cdot r_4$	m	yterdiameter på skorstensröret
$T_r$	Celsius	rökgasens temperatur
$T_s$	Celsius	sotskiktets temperatur
$T_u$	Celsius	temperatur utsidan skorsten
$T_{omg}$	Celsius	temperatur i omgivning till skorsten
$k_{fe}$	W/(mK)	värmeledningskoefficient för stålmanteln
$k_{iso}$	W/(mK)	värmeledningskoefficient för isoleringen
$h_i$	W/(m <sup>2</sup> K)	värmeöverföringskoefficient mellan rökgas och rörets insida, cylindriskt skorstensrör
$h_u$	W/(m <sup>2</sup> K)	värmeöverföringskoefficient mellan omgivningen och rörets utsida, cylindriskt skorstensrör
$P_s$	W/m	av det brinnande sotet utvecklade effekt, cirkulär skorsten
$P_k$	W/m	överförd effekt mellan rökgas och vägg, cirkulär skorsten
$P_l$	W/m	effekt som leds ut genom skorstensväggen, cirkulär skorsten
$H_i$	MJ/kg	sotets värmevärde

$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	sotets densitet
$\Delta t$	sekund	uppskattad brinntid för sotet
U2	W/(m <sup>2</sup> K)	värmegenomgångskoefficient för cylinder
kg	W/(mK)	värmeledningskoefficient för rökgasen
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematisk viskositet
u	m/s	rökgasens medelhastighet vid aktuell temperatur
$V_n^*$	m <sup>3</sup> /s	rökgasflöde vid normaltillstånd
$2 \cdot L_2, l$	m	innerväggens längd, fyrkantig skorsten
$\delta_s = L_2 - L_1$	m	sotskiktets tjocklek, fyrkantig skorsten
$\text{teg} = L_3 - L_2$	m	teglens tjocklek, fyrkantig skorsten
k <sub>teg</sub>	W/(mK)	värmeledningskoefficient för tegel
U <sub>2L</sub>		värmegenomgångskoefficient för fyrkantig skorsten
$A_c$	m <sup>2</sup>	area i den fyrkantiga skorstenen
P	m	omsluten rand
P <sub>sL</sub>	W/m	av det brinnande sotet utvecklade effekt, fyrkantig skorsten
P <sub>kL</sub>	W/m	överförd effekt mellan rökgas och vägg, fyrkantig skorsten
P <sub>lL</sub>	W/m	effekt som leds ut genom skorstensväggen, fyrkantig skorsten

## 5 Diskussion

De resultat som erhållits under projektet utgör ett unikt material vad gäller sotbildningens omfattning och sotets egenskaper i dagens anläggningar för enskild uppvärmning. Ett stort antal fältmätningar av emissioner samt provtagning av sot från olika typer av anläggningar har genomförts. Vidare har analyser av egenskaperna hos ett relativt stort antal sotprover genomförts. En modell som beräknar den maximala tidsperioden mellan två rensningar för att inte yttemperaturen på skorstenen vid en eventuell sotbrand skall överstiga ett givet värde, t.ex. 80 °C, har utvecklats. Tillsammans ger detta material underlag för att studera sotningens brandförebyggande funktion.

En av målsättningarna för projektet var att studera sotbeläggningarnas tillväxthastighet i olika typer av anläggningar och under olika driftbetingelser. Denna målsättning bedöms ha uppfyllts väl, och ett antal slutsatser som redovisas nedan kan dras.

En annan målsättning var att om möjligt utarbeta en relevant indirekt mätmetod för att kunna mäta sotbeläggningars tillväxthastighet. Hypotesen var att stofthalten i rökgaserna skulle kunna användas för detta ändamål. Projektet har visat att detta inte är möjligt; korrelationen mellan stofthalten och tillväxthastigheten är i stort sett obefintlig.

Den tredje målsättningen var att konkret belysa sambandet mellan beläggningarnas storleksordning och brandrisken. Detta har kunnat göras genom att bestämma tillväxthastigheten, analysera sotets egenskaper och formulera en matematisk modell för vad som händer i och runt en rökkanal då en sotbrand uppstår. Genom att använda indata till modellen som bygger på mätningar och analyser inom projektets ram och vars rimlighet därmed bekräftats kan inverkan av olika parametrar på brandrisken studeras. Det bör dock understrykas att de absoluta beräkningsresultaten bör användas med stor försiktighet pga de förenklingar som med nödvändighet har måst göras.

Två aspekter av resultaten bör särskilt apostroferas. Det första är den stora spridningen mellan resultaten inom respektive anläggningstyper, både vad gäller emissioner och sotmängder. I de flesta fall är standardavvikelsen i samma storleksordning som mätvärdet, dvs spridningen i värden är stor. Detta innebär att sambanden mellan olika parametrar inte kan användas på enskilda anläggningar. Däremot är antalet mätdata i de flesta fall så stort att de skillnader i medelvärden mellan olika anläggningstyper som erhållits kan antas vara signifikanta.

Den andra aspekten är de beräkningsmässiga förenklingar som gjorts i utvärderingen av tillväxthastigheten. Det har antagits att sotet avsätts jämnt fördelat över hela skorstenens inneryta, vilket inte är fallet i verkligheten. Vidare finns naturligtvis viss osäkerhet i sotets egenskaper från fall till fall. Beräkningsmodellen är uppbyggd på en fullständig värmebalans, men innehåller några smärre förenklingar.

Sammanfattningsvis kan konstateras att projektet i de flesta avseenden lett till förväntade resultat. De data och de redskap som kommit fram under arbetet bör också kunna användas för vidare studier av dessa frågeställningar. Förslag till vidare arbete ges nedan.

## 6 Slutsatser

De resultat som erhållits i projektet ger anledning till följande slutsatser:

### **Emissioner och rökgestemperatur**

1. Stoft- och CO-halterna var betydligt högre i i rökgaserna från vedpannor än i rökgaserna från pelletspannor.
2. Vattenkylda, traditionella vedpannor gav högre stofthalter i rökgaserna än keramiska d:o.
3. Miljömärkta oljepannor gav lägre luftöverskott, lägre CO-halter och lägre sotthalter än konventionella pannor
4. Vattenkylda vedpannor hade i genomsnitt ca 100 °C högre rökgestemperatur än keramiska d:o.
5. Pelletspannor gav ungefär samma rökgestemperaturer som oljepannor.
6. Miljömärkta oljepannor gav i genomsnitt något lägre rökgestemperaturer än konventionella oljepannor.

### **Klassificering av sotprover**

1. Andelen sotprov som klassificerats som tjära eller sot var marginellt högre för vattenkylda vedpannor än för keramiska d:o.
2. Andelen sotprov som klassificerats som tjära eller sot var väsentligt mindre för pelletspannor än för vedpannor.
3. För miljömärkta oljepannor klassificerades inget sotprov som ”sot”, medan andelen för traditionella pannor var ca 25 %.
4. Andelen oförbränt i sotproverna från vedeldning ökade i ordningen aska → normal → tjära/knotter → sot. I prover från oljeeldning ökade andelen oförbränt i ordningen murbruk/aska → normal → sot.

## **Tillväxthastighet**

1. Tillväxthastigheten för sotskiktet var i genomsnitt ca 0,01 mm/dygn för alla typer av vedeldade anläggningar under lastförhållanden som förelåg under provperioderna. Tillväxthastigheten i oljeeldade anläggningar var däremot endast ca 0,001 mm/dygn och ännu lägre för de miljömärkta pannorna
2. Ett generellare mått på tillväxthastigheten som ger mindre spridning i data är att uttrycka denna i g/graddag resp. mm/graddag. För vedpannorna erhöles en tillväxthastighet på ca 1,5 g/graddag eller ca 0,001 mm/graddag i genomsnitt. För pellets pannor var tillväxthastigheten ca 0,6 g/graddag. För oljepannorna var tillväxthastigheten ca 0,15 g/graddag eller ca 0,0001 mm/graddag, dvs endast ca 10 % av motsvarande värden för vedpannor
3. Spridningen i data uttryckta i g/graddag resp. mm/graddag är jämfört med övriga erhållna data relativt liten. Detta innebär att erhållna medelvärden för dessa storheter bör vara relativt generella för t.ex. vedpannor resp oljepannor i allmänhet.
4. Tillväxthastigheten för sotskiktet är i de flesta fall som medeltal högre för tegelskorstenar än för stålskorstenar.
5. Tillväxthastigheten i g/graddag var för vedpannor högst i anläggningar vars sotprov klassificerats som "tjära/knotter", och lägst för anläggningar vars sotprov klassificerats som "aska". För oljepannorna var tillväxthastigheten lägst för anläggningar vars sotprov klassificerats som "aska", något högre för anläggningar vars sotprov klassificerats som "normal" och högst för anläggningar vars sotprov klassificerats som "sot".

## **Sotets egenskaper**

1. Antändningstemperaturen för sotprover från vedeldning var som medelvärde ca 70 °C lägre än för sotprover från oljeeldning. Skillnaden i antändnings temperatur mellan olika klasser av sotprover inom respektive typ av eldstad var liten.
2. Vid provning enligt ISO 5660 visade de prover som klassificerats som "tjära/knotter" mycket snabb antändning, medan prover av övriga typer visade betydligt längre tändtid eller inte tände alls.
3. Sotproverna från oljeeldning antändes med ett undantag inte alls vid provning enligt ISO 5660.

4. Den maximalt utvecklade effekten vid provning enligt ISO 5660 var avsevärt högre för sotprover som klassificerats som ”tjära/knotter” än för övriga prover.
5. Det effektiva värmevärdet var betydligt högre för sotprover från vedeldning än för sotprover från oljeeldning.
6. Det effektiva värmevärdet för sotprover från vedeldning minskade enligt ordningsföljden ”knotter” → ”tjära” → ”sot” → ”normal” → ”aska”. Skillnaderna var dock relativt små.

#### **Korrelation stofthalt – tillväxthastighet**

Ingen signifikant korrelation mellan den uppmätta stofthalten i rökgaserna och tillväxthastigheten kunde fastställas. Detta innebär att en mätning av stofthalten inte kan användas för att bedöma tillväxthastigheten i den enskilda anläggningen.

# 7 Fortsatt arbete

I projektet har ett unikt datamaterial beträffande sotbeläggningars tillväxthastighet och sotets egenskaper tagits fram. Vidare har verktyg för att bedöma brandrisken utvecklats. Arbetet har dock av naturliga skäl inte kunnat ge ett fullständigt underlag för alla frågeställningar. Det bedöms därför angeläget att vidare arbete utförs för att ytterligare vidga kunskaperna på området. Några exempel på insatser som ter sig naturliga är följande:

## **1. Utveckling och förfining av beräkningsmodellen för yttemperaturer vid sotbrand.**

Beräkningsmodellen bygger på fullständiga värmebalanser för vad som händer vid en sotbrand. Av nödvändighet innehåller den dock vissa förenklingar. Det finns möjlighet att ytterligare utveckla de fysikaliska modellerna med relativt liten arbetsinsats, vilket bör göras.

## **2. Validering av beräkningsmodellen**

Detta kan dels bestå i att ta fram ytterligare underlag för lämpliga indata till modellen, dels att genomföra valideringsförsök i full skala. Detta innebär att sotbränder framkallas i skorstenar som preparerats med kontrollerade sotbeläggningar och att temperaturförloppen i och runt skorstenen noga mäts upp. Metodik och utrustning används i viss mån vid typprovning av skorstenar, men behöver förmodligen utvecklas ytterligare något.

## **3. Klassificering av sot**

Sotproverna har klassificerats okulärt enligt en empirisk, ”hemgjord” modell där klasserna bygger på ögats uppfattning. Detta blir naturligtvis i viss mån godtyckligt. En mera objektiv metod skulle vara att bestämma sotets ”utseende” med hjälp av fysikaliska parametrar. Preliminärt skulle en mätning av glans enligt standardiserad metod vara intressant att utvärdera. Det kan också finnas andra optiska egenskaper som är relevanta.

I en sådan utvärdering bör målet vara att undersöka samband mellan optiska egenskaper och termiska egenskaper, t.ex. effektivt värmevärde och användningstemperatur hos sotet. På så sätt skulle eventuellt ytterligare objektiva kriterier för att bedöma brandrisker kunna utarbetas.

Slutligen bör noteras att samtliga sotprover från projektet finns kvar och kommer att sparas under fem år. Det finns alltså möjlighet att utnyttja dessa för ytterligare studier som nu inte formulerats. Ett lämpligt exempel är dock den studie av samband mellan optiska och termiska egenskaper hos sot som föreslås ovan.



## 8 Referenser

- [1] Janzén och Nurminen: En experimentell studie av sots antändningstemperatur. Projektarbete vid SP – Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, mars 2001.

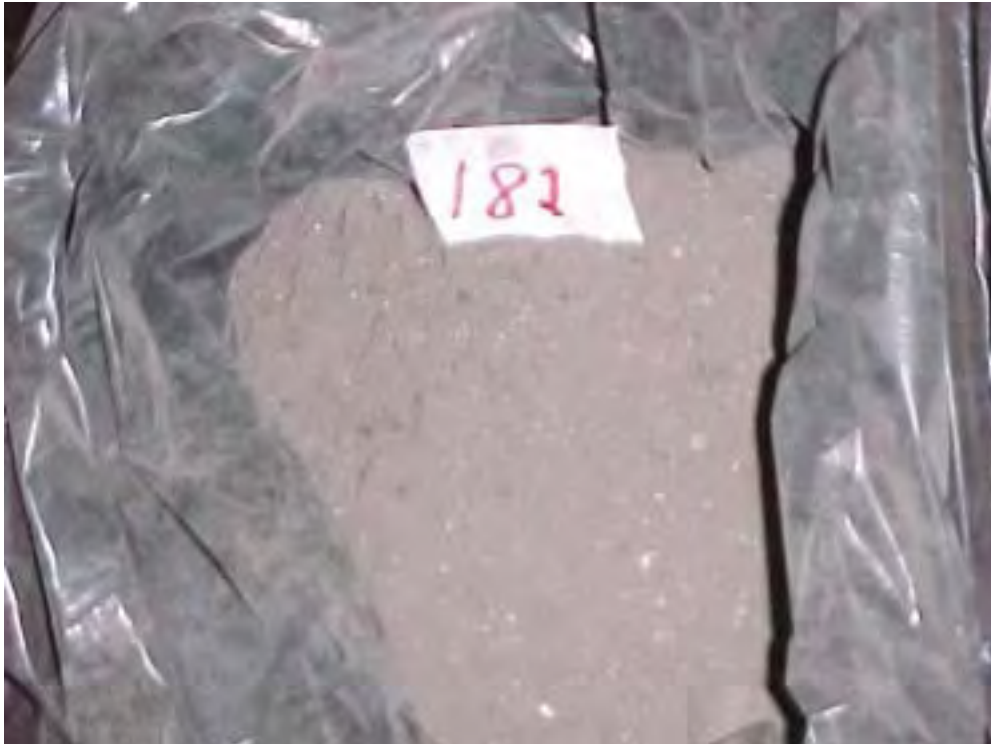
# Bilaga 1: Typbilder på sotprover

Vedeldning

Normal



Aska



Sot



Tjära

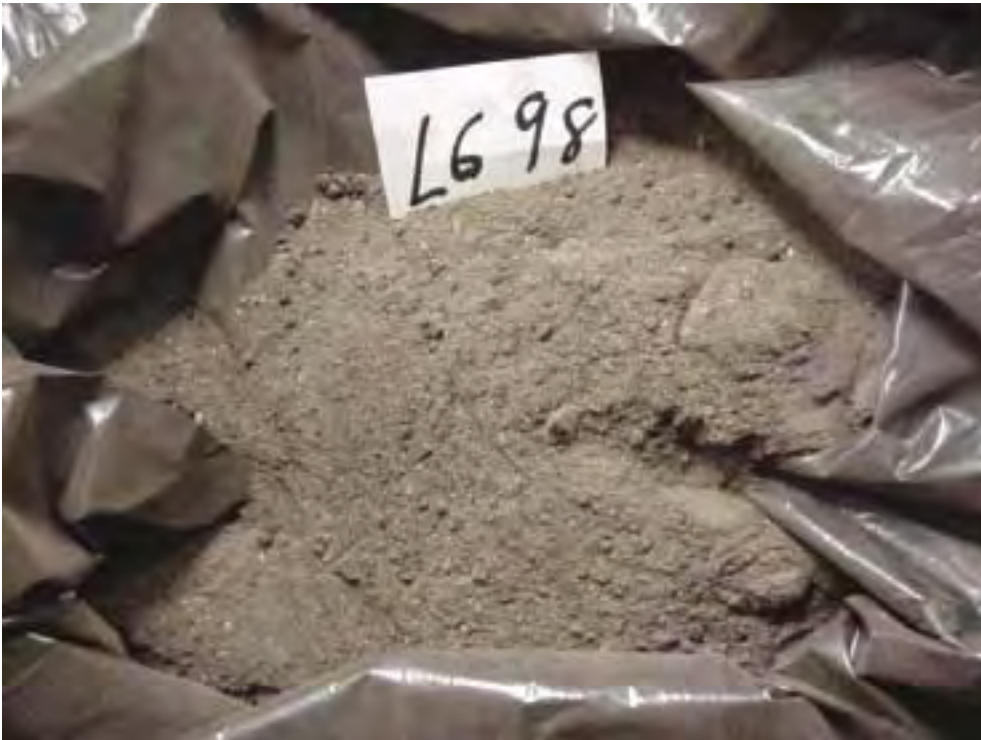


Knotter



Oljeeldning

Normal



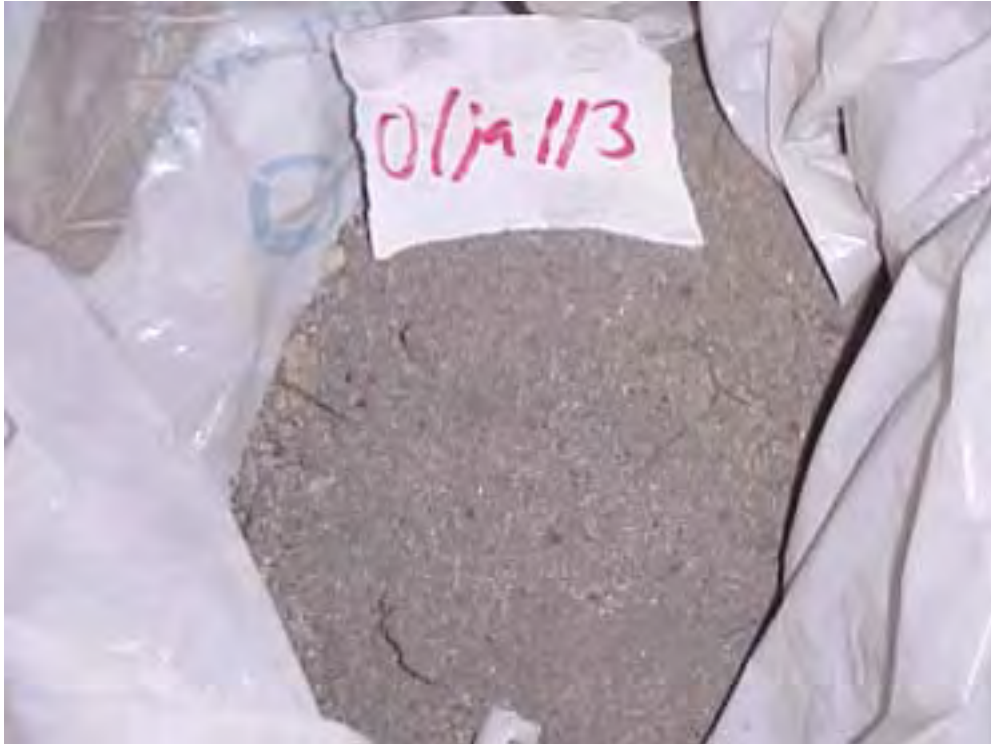
Aska



Sot



Murbruk



# Bilaga 2: Beräkningsexempel

Nedan följer ett beräkningsexempel på en cirkulär skorsten

Följande indata till programmet har använts:

**Indata (1 av 3)**

Anläggningens data

Effekt:	<input type="text" value="20"/>	kW (anläggningens ungefärliga effekt)
Bränsle:	<input type="text" value="Ved"/>	
Fukthalt:	<input type="text" value="18"/>	% (endast om ved)
O <sub>2</sub> :	<input type="text" value="10"/>	% (ungefärlig syrehalt i rökgaserna)
Rökgastemp:	<input type="text" value="270"/>	°C (rökgastemp vid normaldrift)
Rumtemp:	<input type="text" value="20"/>	°C (ungefärlig rumtemp runt skorstenen)

Nästa >

Avbryt

**Indata (2 av 3)**

Skorstens data

Innerdiameter	<input type="text" value="0,15"/>	m
Godstjocklek:	<input type="text" value="0,003"/>	m
Isoleringstjocklek:	<input type="text" value="0,06"/>	m
Skorstensrörets värmelädningskoefficient:	<input type="text" value="56"/>	W/mK
Isoleringens värmelädningskoefficient:	<input type="text" value="0,034"/>	W/mK
Tillåten yttemperatur på skorstenen:	<input type="text" value="80"/>	°C

Skorstenen placerad i välventilerat utrymme

Skorstenen placerad i dåligt ventilerat utrymme

Nästa >

< Föregående

Avbryt

**Indata (3 av 3)**

Sot data

Sotets värmevärde:  MJ/kg

Sotets densitet:  kg/m<sup>3</sup>

Soteldens varaktighet:  min

Sotets tillväxttakt:

Beräkna tjocklek

< Föregående

Avbryt

Ovanstående indata resulterar i följande resultat:

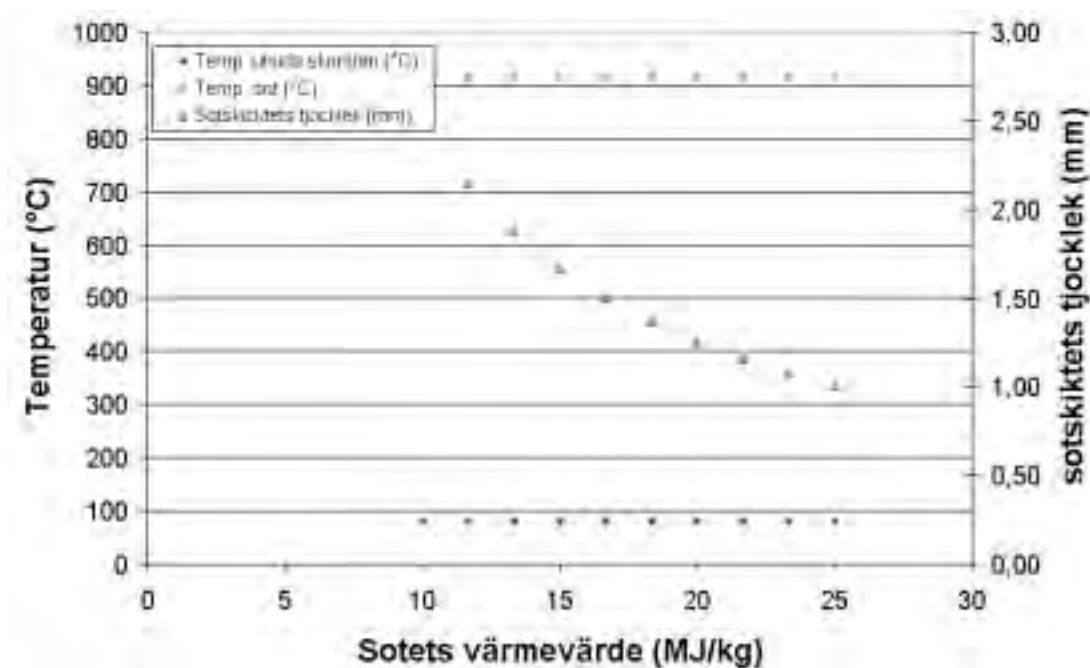
**Resultat**

Sotskiktets tillåtna tjocklek blev 1,253271 mm vid tillåten yttemperatur på 80 °C.

Med angiven tillväxttakt blir sotningsintervallet 125,3271 dagar

Avsluta      Variera indata      Ny Beräkning

Varieras sotets värmevärde från 10 MJ/kg till 25 MJ/kg erhålls följande resultat





Ändras isoleringens värmeledningskoefficient från 0,034 till 0,06 erhålls följande resultat

