

---

Rapport SGC 051

**NORDISKA DEGELUGNSPROJEKTET**  
Pilot- och fältförsök med gasanvändning  
i degelugnar för glas

Eva-Maria Svensson  
Glasforskningsinstitutet

November 1993



Rapport SGC 051

**NORDISKA DEGELUGNSPROJEKTET**  
Pilot- och fältförsök med gasanvändning  
i degelugnar för glas

Eva-Maria Svensson  
Glasforskningsinstitutet

November 1993



## SGC:s FÖRORD

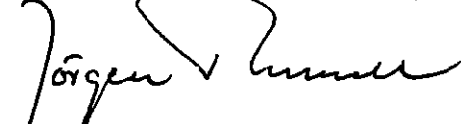
FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns i slutet på denna rapport.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, Sydgas AB, Sydkraft AB, Göteborg Energi AB, Malmö Energi AB, Lunds Energi AB och Helsingborg Energi AB.

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Jörgen Thunell



# Nordic Pot Furnace Project

Fältexperiment

Eva-Maria Svenson  
Glafo

November 1993



## FÖRORD

Styrgruppen för Nordic Pot Furnace Project har varit sammansatt av representanter för projektets finansiärer och för den manuell glasindustrin. Finansiärer har varit:

Nordiskt Gastekniskt Center	NGC
Svenskt Gastekniskt Center	SGC
Terminalgas	
NUTEK	
Glasbranschen	

Styrgruppen har haft följande sammansättning:

Ordförande	Per Arne Persson	SGC	
Ledamöter	Thomas Carlqvist	NGC	(t om 920229)
	Ingemar Gunnarsson	NGC	(from 920301)
	Ola Harström	Terminalgas	
	Göran Persson	Nutek	(from 920401)
	Arne Fransson	Kosta Glasbruk	
	Bert Jonsson	Skrufs Glasbruk	
	Henning Mejer	Holmegaards Glassverker	
	Stellan Persson	Glafo	
	Eva-Maria Svenson	Glafo	
	Sören Dahlin	DTI	

Stellan Persson har varit projektledare och Eva-Maria Svenson internt ansvarig på Glafo för projektets genomförande.

Projektet har genomförts i samarbete med flera parter. Martti Köhli AB konsulterades för konstruktion av pilotugnen, RAMCO byggde ugnen på gaslaboratoriet i Malmö samt iordningställde den för produktion på Kosta Glasbruk. Institutionen för Värme- och Ugnsteknik på KTH anlätades för vattenmodellförsök.

Pilotugnsvärförsöken genomfördes som ett delprojekt på Drifttekniska Institutionen på Lunds Tekniska Högskola i Malmö. Försöken genomfördes och sammanställdes av Sören Dahlin. Rapportering sköttes i samarbete med Glafo.

Fältexperimenten genomfördes på Kosta glasbruk, vilka ställde produktionsresurser till projektets förfogande. Thomas Karlsson på Kosta ansvarade för provtagning och provberedning för kvalitetsuppföljning samt bistod med kunskaper, erfarenheter.



Sören Dahlin, DTI ansvarade för styr- och reglerutrustning till ugnen.

Eventuella frågor om det framtagna ugnskonceptet kan ställas till Stellan Persson på Glafo.

Projektledare Stellan Persson och undertecknad vill tacka samtliga inblandade i projektet för ett gott samarbete.

Eva-Maria Svenson

## SAMMANFATTNING

Nordic Pot Furnace Project är finansierat av Nordisk gas- och glasindustri. Syftet med projektet har varit att utveckla ett konkurrenskraftigt gaseldat alternativ till olje- och elvärmda degelugnar för glasframställning. Målet var att öka primaglasproduktionen med 2-4 %, sänka energiförbrukningen med 10 % och NO<sub>x</sub>-emissionen till hälften.

Projektet delades upp i fem delsteg som var: I Förstudier, II Vattenmodellförsök, III pilotugnsförsök med degelsimulator, IV fältexperiment i produktion och V fullskaleförsök. Delsteg I till och med IV är genomförda och sammanfattas i denna rapport.

Vid vattenmodellförsöken konstaterades de grundläggande principerna för en fungerande ugn:

- Tangentiellt riktade samverkande brännare i neder- och ovankanten av degeln ger bra förutsättningar för en god degelvärmning.
- Om den övre brännaren byts mot en Flat Flame-brännare som placeras i valvet ovanför degeln erhålls en strömningsfördelning i ugnen som ytterligare underlättar styrning av värmefördelning i ugnen.

Koncepten prövades med flera olika brännare i pilotförsöken i Malmö. Låga NO<sub>x</sub>-värden erhöles för låg-NO<sub>x</sub> brännarkombinationen där emissionen sänktes till hälften i jämförelse med referensbrännaren. En annorlunda och homogen värmefördelning erhöles med Flat Flame-kombinationen med små temperaturgradienter och god bottenvärmning degeln.

Dessutom undersöktes effektbehovets beroende av luftförvärmning, ugnstrycksreglering och luftöverskott. Samtliga tre faktorer påverkade bränsleförbrukningen mer än byte av brännare.

Placeringen av driftermoelementet i ugnsrummet och dess position i ugnsväggen visade sig ha stor betydelse för ugnens styrning. Mätresultaten från försöken och glasarbetarnas åsikt innebär att gas mycket väl kan konkurrera med olja och el ur samtliga undersökta synvinklar.

Då ugnen med Flat Flame-kombinationen sattes i produktion på Kosta glasbruk erhöles från första smältdagen bra glaskvalitet.

Arbetsmiljön visade sig vara mycket god. NO<sub>x</sub>-emissionens medelvärde var ca 500 mg/MJ och bränsleförbrukningen i paritet med en likvärdigt producerande oljeugn. Försöksugnen hade stora värmeförluster på grund av att den var dåligt isolerad. Yttertemperaturen var 50-80 °C högre än en normalt isolerad ugen. Då förlusterna räknats bort (ca 10 %) är Flat Flame-kombinationens förbrukning 86 % av en oljeugns.

Flat Flame-brännarens placering och dess strålning mot glasytan ökar andelen energi som går direkt till glaset.

Med en BUSS-brännarkombination var glaskvaliteten inte lika bra men ändå fullt tillräcklig. NO<sub>x</sub>-emissionens medelvärde något lägre, ca 400 mg/MJ. Bränsleförbrukningen då förluster för dålig isolering räknats bort är för kombinationen 81 % av oljeugns förbrukning.

Projektet i sin helhet har varit en stor framgång.

## SUMMARY

The Nordic Pot Furnace Project is financed by the Nordic gas and glass industry. The purpose of the project was to develop a competitive gas-fired alternative to oil and electrically heated pot furnaces for the manufacture of glass. The objective was to increase prime-quality glass production by 2-4%, lower energy consumption by 10% and halve NO<sub>x</sub> emissions.

The project was divided into five substages, these being: I Prestudies, II Water model trials, III Pilot furnace with crucible simulator, IV Field experiment in production, and V Full-scale trial. Substages I to IV, inclusive, have been completed and are summarized in this report.

During the water model trials, the basic principles of a functioning furnace were ascertained:

- Tangentially directed concurrent burners at the top and bottom of the pot provide good conditions for excellent pot heating.
- If the upper burner is swapped for a flat-flame burner positioned in the vault above the pot, the flow distribution achieved in the furnace further serves to facilitate the control of heat distribution in the furnace.

The concept was tried out on several different burners during the pilot trials in Malmö, Sweden. Low NO<sub>x</sub> values were obtained for the low-NO<sub>x</sub> burner combination, in which emissions were reduced to half by comparison with the reference burner. A different yet uniform spread of heat was obtained using the flat-flame combination with small temperature gradients and good bottom heating for the pot.

In addition, a study was made of the dependence of the power requirement on air preheating, furnace pressure regulation and excess air. All three factors affected fuel consumption more than burner substitution.

The position of the operating thermocouple in the furnace chamber and its siting in the furnace wall proved to be of great importance to furnace control.

When the flat-flame combination furnace was put into production at the Kosta Glassworks, very high glass production quality was obtained from day one of melting. The working environment also proved to be very good. The mean value for the NO<sub>x</sub> emissions was approx. 500 mg/MJ and fuel consumption was on a par with a similar producing oil furnace. The trial furnace displayed great heat losses owing to the fact that it was poorly insulated. The external temperature was 50-80°C higher than a normally insulated furnace. Calculating out the losses (by 10%), the consumption of the flat-flame combination is 86% of that of an oil furnace.

The location of the flat-flame burner and its radiation to the glass exterior increase the proportion of energy directed straight at the glass.

Using a BUSS burner combination, the quality of the glass was not equally good, though still perfectly adequate, and the mean value for NO<sub>x</sub> emissions was somewhat lower, about 400 mg/MJ. Once losses for poor insulation are deducted, fuel consumption for the combination is 81% of the oil furnace's consumption.

The project as a whole has marked a great advance. Measurement results from the trial and the glassworkers' views confirm that gas is perfectly able to compete with oil and electricity from all the angles investigated.

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

## FÖRORD

## SUMMARY - SAMMENFATTNING

<b>1</b>	<b>INLEDNING OCH BAKGRUND</b>	<b>1</b>
1.1	MÅL OCH SYFTE	1
1.2	UPPLÄGGNING	2
1.3	AVGRÄNSNINGAR OCH FÖRUTSÄTTNINGAR	2
1.4	DELSTEG I TILL II	2
1.4.1	Steg I - grundläggande studier	3
1.4.2	Steg II - vattenmodellförsök	3
1.4.3	Steg III - pilotugnsförsök	6
<b>2</b>	<b>FÄLTEXPERIMENT</b>	<b>14</b>
2.1	INLEDNING	14
2.2	MÅL OCH SYFTE	15
<b>3</b>	<b>UTRUSTNING OCH TILLVÄGAGÅNGSSÄTT FÖR FE</b>	<b>16</b>
3.1	UGN G2	16
3.1.1	Installering av ugn	16
3.1.2	Gas- och luftsystem	17
3.1.3	Degel	17
3.2	BRÄNNARUPPSÄTTNING	19
3.3	LOGGNINGSUTRUSTNING	21
3.4	UPPFÖLJNING AV GLASKVALITET	22
3.4.1	Glasframställning	22
3.4.2	Kostas statistikprogram	23
3.4.3	Analysutrustning för glaskvalitet	23
3.4.3.1	Homogenitet och blåsor	23
3.4.3.2	Analys av glasfel	26
3.5	RÖKGASSAMMANSÄTTNING	26
3.6	TEMPERATURPROFILMÄTNING I GLASET	28
<b>4</b>	<b>RESULTAT OCH DISKUSSION</b>	<b>31</b>
4.1	TEMPERATURFÖRDELNING I UGNEN	31
4.1.1	Värmebild	31
4.1.1.1	Flat Flame-kombinationen	31
4.1.1.2	BUSS1-kombinationen	32
4.1.2	Temperaturprofil i glaset	33
4.1.3	Degelpåverkan	34
4.2	BRÄNNARNAS FUNKTION	38
4.3	SMÄLT CYKEL	39

4.3.1	Flat Flame-kombinationen	39
4.3.2	BUSS1-kombinationen	40
4.4	GLASKVALITET	41
4.4.1	Flat Flame-kombinationen	42
4.4.1.1	Omdömet från produktionen	42
4.4.1.2	Kvalitet vid syning efter kylrör	42
4.4.1.3	Lasermätningar	46
4.4.2	BUSS-brännarkombinationen	49
4.4.2.1	Omdömet från produktionen	49
4.4.2.2	Kvalitet vid syning efter kylrör	49
4.4.2.3	Homogenitetsmätningar	51
4.5	EFFEKTBEHOV OCH BRÄNSLEFÖRBRUKNING	53
4.6	MILJÖMÄTNINGAR	59
5	SLUTSATSER	62
6	FÖRSLAG TILL VIDARE INSATSER	63
	REFERENSER	64

#### **BILAGOR**

1	Ritning på systemet samt fullständig komponentlista
2	Exempel på smältrapport
3	Temperaturkurvor
4	Kvalitetsuppföljning från Kosta
5	Fältförsök Kosta, energitillförsel

## 1 INLEDNING OCH BAKGRUND

Nordic Pot Furnace Project är ett projekt som finansieras av den nordiska gasindustrin och den manuella glasindustrin samt NUTEK. Grunden till projektet var att finna ett konkurrenskraftigt koncept för en gaseldad ugn i jämförelse med el och olja. Då projektet startade pågick i Sverige planeringen av ett utvidgat naturgasnät och i övriga Norden ville gasleverantörerna utveckla tekniken för användning av gas inom glasindustrin.

Konkurrensmedlet är att finna ett koncept som ger en bättre totalekonomi för glasframställningen. Detta nås i första hand genom att producera glas av hög kvalitet så att primautbytet höjs men också genom lägre bränsleförbrukning. Förväntade avgifter på NO<sub>x</sub> gör ett låg-NO<sub>x</sub>-alternativ attraktivt.

### 1.1 MÅL OCH SYFTE

Syftet med projektet har varit att utveckla tekniken att använda gas vid tillverkning av glas i degelugnar. Vid utveckling av den nya tekniken skall hänsyn tas till glaskvalitet, energiförbrukning och NO<sub>x</sub>-emission.

Målen som sattes upp i projektbeskrivningen var att i jämförelse med en oljeeldad ugn:

- Förbättra glaskvaliteten genom ökad homogenitet och reducerad grad av lusor, blåsor och stenar. Detta uppskattas öka delen producerat primaglas med 2-4 % och reducera graden av sekunda och icke säljbart glas.
- Reducera energiförbrukning med 10 % utan, eller 40 % med, installation av rekuperator eller regenerator.
- Reducera NO<sub>x</sub>-emissionen med minst 50 % av existerande emissionsnivå eller att nå under förväntade TA-luft normer, vilka uppskattas till 500 mg NO<sub>x</sub>/m<sup>3</sup>n (8 % O<sub>2</sub>) eller 200 mg NO<sub>x</sub>/MJ bränsle för denna tillämpning.



## 1.2 UPPLÄGGNING

Projektet består av fem delprojekt uppdelade enligt följande:

- I. Förstudier, litteratursammanställning
- II. Vattenmodellförsök på Institutionen för Värme- och Ugnsteknik på Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm.
- III. Pilotugnsförsök i Gaslaboratoriet på Drifttekniska Institutionen (DTI) vid Lunds Universitet beläget i Malmö.
- IV. Fältexperiment (FE) med pilotugnen i produktion på Kosta glasbruk.
- V. Fullskaleförsök på Holmegaards Glassvaerker i Danmark.

Resultaten från del I, II och III finns redovisade i rapporter med projektnummer PR 413 och PR 414, [1] till [5].

Denna rapport redogör för steg IV - fältexperiment, i Nordic Pot Furnace Project. Rapporten utgör också slutrapport för steg I till och med IV. En eventuell fortsättning av projektet med fullskaleförsök kommer att biläggas denna rapport som ett komplement.

## 1.3 AVGRÄNSNINGAR OCH FÖRUTSÄTTNINGAR

För att kunna finna ett ugn- och brännarkoncept som är direkt applicerbart på dagens degelugnar har utgångspunkten för ugnsgemetrin varit en konventionell degelugn. Samtliga brännare som testats är kommersiellt tillgängliga och har inte modifierats för att anpassas till glassmältning.

Degeln är av konventionell typ och placeringen i ugnen skiljer sig endast från en ordinär ugn med avseende på avståndet mellan bänk och degelbotten.

Vattenmodellförsöken visade att en kombination av en valvbrännare och två bottenbrännare gav den bästa värmefördelningen i ugnsrummet.

För att underlätta styrning och reglering av ugnen har endast två brännare använts i pilotugnsförsöken och i fältexperimenten. Effektregleringen är gemensam för de båda brännarna. Detta innebär att den procentuella fördelningen mellan brännarna är konstant under drift. Brännarna kan därför ej regleras separat. Rekuperatorn är kommersiellt tillgänglig.

Vid kvalitetsbedömningen under fältexperimenten producerades glasprodukter i experimentugnen med höga krav på glasets kvalitet. De produktionsugnar som fungerat som jämförelse vid försöken har haft samma kvalitetskrävande produkter.

#### 1.4 DELSTEG I TILL III

##### 1.4.1 Steg I - grundläggande studier

De inledande delarna av de grundläggande studierna bestod av studiebesök på glasbruk i Norden, England och USA som har naturgaseldning, en litteratursammanställning samt en behovs- och problemanalys. Rapporter från dessa tre delar finns på Glafo [1-3].

De grundläggande studierna fortsatte med en enkel simuleringsmodell av värmeöverföring till en degel med smält glas.

Vidare undersöktes möjligheterna att genomföra matematisk modellering av värmningsbilden i det smälta glaset under luttring och arbete. Modelleringen utfördes av British Gas men tyvärr lyckades man inte anpassa någon av sina modeller till glas-smältning.

##### 1.4.2 Steg II - vattenmodellförsök

Vattenmodellförsöken finns närmare beskrivna i rapporten [4].

Med hjälp av en plexiglasmodell av en ugn med degel, modell av dess brännare och simulering av driftsbetingelser med hjälp av vatten och syra-/basteknik kan man visualisera de varma gasernas strömning i ugnen.

På detta sätt simulerades flera olika brännarplaceringar och kombinationer av brännare. Försöken gjordes för att minska antalet tester i pilotugnen och för att komma fram till optimala

strömnings- och värmningsförhållanden i ugnen. Efter vattenmodellförsöken valdes de konfigurationer ut som skulle testas i pilotugnen.

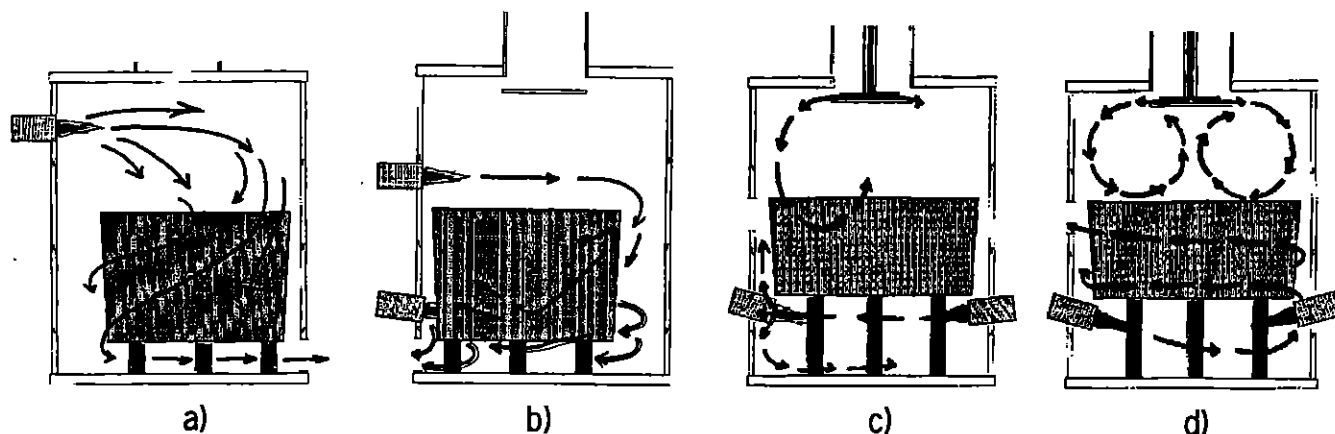
Degelugnen skalades ner till ett hanterbart format och en plexi-glasmmodell tillverkades i skala 1:7. Brännarna konstruerades som två koncentriska rör med bränslelansen i centrum. Tvärsnittsarean på det yttre röret var dubbelt så stor som för det inre. På detta sätt blev utströmningshastigheten för en viss flödesvolym lika stor oavsett vilket rör den fördes genom. Med denna metod var det möjligt att variera den visuella bilden utan att ändra den simulerade flammans egenskaper.

Storleken på vattenflödet i modellen bestämdes utifrån gasvolymen i en verklig ugn vid olika effekt. Värdet beräknades med hjälp av det dimensionslösa Reynolds tal,  $Re$ .

Visualisering av fluiders strömning kan ske på flera sätt. I försöket valdes syra/bas-metoden där en basisk lösning färgades blålila med indikatorfärg och den sura lösningen inte färgades alls. Då den basiska lösningen blandades med den sura neutraliserades lösningen och avfärgades. Genom att hålla totalflödet av sur och basisk lösning konstant och samtidigt ändra förhållandet mellan dessa avfärgades basen efter olika lång uppehållstid i ugnen. På detta sätt kunde strömningen studeras på olika avstånd från brännarna.

Zonerna med den svagaste strömningen detekterades genom att fylla ugnen med basen och härmed blåfärga hela ugnsrummet. Genom att därefter kasta om förhållandet mellan surt och basiskt ur brännarna till helt surt avfärgades lösningen successivt. Områden med svag strömning och låg omsättning av vatten/gas avfärgades sist.

Då två eller flera brännare användes på olika nivåer i ugnen styrdes dessa separat.



**Figur 1** Figuren visar plexiglasmodellen av degelugnen. Modellen är i skala ca 1:7.

Strömningsmönstret för de varma gaserna i ugnen visas i figur 1 för fyra brännarkombinationer.

a) Referensbrännare i position tangentiellt över degeln med stabil homogen värmefördelning.

b) Brännare i referensbrännarposition i kombination med en undre brännare med lägre effekt. Kombinationen ger en stabil strömning med god värmning av degelbotten.

c) Kaotisk strömning av gaser på grund av att flammorna varken samarbetar med varandra eller följer ugnsrummet.

d) Flat Flame-brännare placerad i ugnens valv i kombination med två tangentiellt riktade brännare i höjd med degelbotten. Kombinationen ger en god homogen strömning med jämn värmefördelning runt hela degeln. Detta är förutsättningen för en optimal, det vill säga jämn, värmning av degeln samt minimerad risk för lokal överhettning. I kombination med detta ger Flat Flame-brännarens förmåga att rikta den största delen av flammans strålningsenergi mot glasets yta en unik möjlighet att styra och reglera glassmältningsprocessen.

Slutsatserna av vattenmodellförsöken var:

- Brännarna måste riktas tangentiellt så att dess impuls skapar en cirkulation i ugnen.
- Impulserna från de olika brännarnas flammor i en brännarkombination måste samarbeta.
- En kombination av brännare placerade i nivå med degelns botten och över degeln ger stora möjligheter till att kontrollera och reglera värmefördelningen i ugnen.
- Placering av avdraget har litet inflytande på ett väl utvecklat strömningsmönster.
- Flat Flame-brännare i kombinationen enligt figur 1 d) ger en stabil strömning i ugnsrummet samt en jämn fördelning av gaserna runt degeln. Värmebildningen skapar förutsättningar för en optimal glassmältning.

#### 1.4.3 Steg III - pilotugnsförsök

Pilotugnsförsöken finns presenterade i referens [5].

Syftet med pilotugnsförsöken var att kartlägga olika brännartyper placerade i de positioner som valts ut med hjälp av vattenmodellförsöken. Kartläggningen innebar mätning av bränsleförbrukning,  $\text{NO}_x$ -emission och temperaturfördelning i ugnsvägg och degel under försökscykeln.

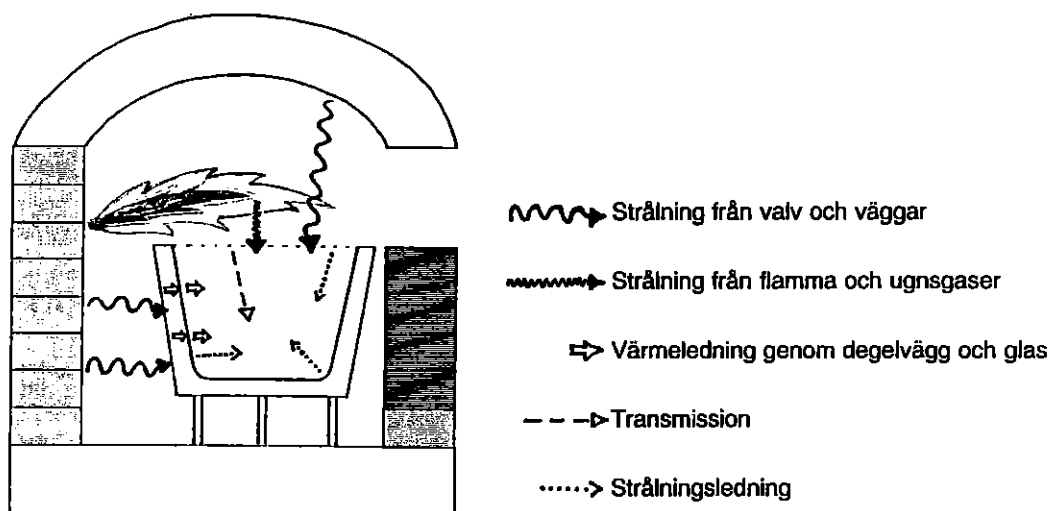
Målet var att välja ut den eller de bästa koncepten till fältexperimenten samt att få en så god kunskap om ugnens beteende med dessa koncept att en optimal styrning och reglering vid smältning kan erhållas.

Ugnen byggdes av Ramco. Försöken genomfördes i gaslaboratoriet på Drifttekniska Institutionen vid Lunds Tekniska Högskola, belägen i Malmö.

Till pilotugnsförsöken konstruerades en fullskalig degelugn med degeln utbytt mot en simulerad degel. Degelns väggar var murade av mullittegel. Som last i stället för glas fylldes degeln med kromslag. Med simulator i stället för verklig glassmältning

blir ugnen mer flexibel. Ugnen kan hettas upp och kylas ner utan hänsyn till degelns känslighet, smältcykeln kan simuleras till tre till fyra timmar i stället för 15 och inga råvaror eller smält glas behöver distribueras och deponeras.

Slaggen i degelsimulatoren har samma värmeledningstal som glas. Vid verklig glassmältning tillkommer dock en faktor då man talar om värmeledning genom transparenta media, den så kallade strålningsledningen. Sådan energitransport erhålls då varje del av materialet som absorberar strålning också emitterar strålning åt alla håll, också in i materialet. Figur 2 visar de olika sätt på vilka värme tillförs degeln och glaset.



**Figur 2** Översikt av de värmeöverföringsmekanismer som råder vid glassmältning.

Eftersom slaggen inte har samma optiska egenskaper som smält glas fungerar simulatoren endast som last. Detta är rimligt eftersom det endast är temperaturen på degelns yttre sidor som används i utvärdering av pilotugnsförsöken.

Pilotugns väggar var uppbyggda av radialstenar som gjutits i en tårtbitsliknande form. Stenarnas innersta skikt bestod av eldfast gjutmassa och det yttre skiktet var isolergjutmassa. Speciella stenar gjöts för att passa ihop med brännarstenar eller för att vara försedda med hål för avdrag eller för inspektion. Stenarna var ej fastmurade utan låg löst sammanfogade med isolerpapp mellan. På detta sätt var det enkelt att byta brännarplacering eller plats för avdrag. Utanpå stenarna var ugnen klädd i rockwool för att få en bättre isoleringsstandard. Ugnens front var av standardutförande för degelugnar.

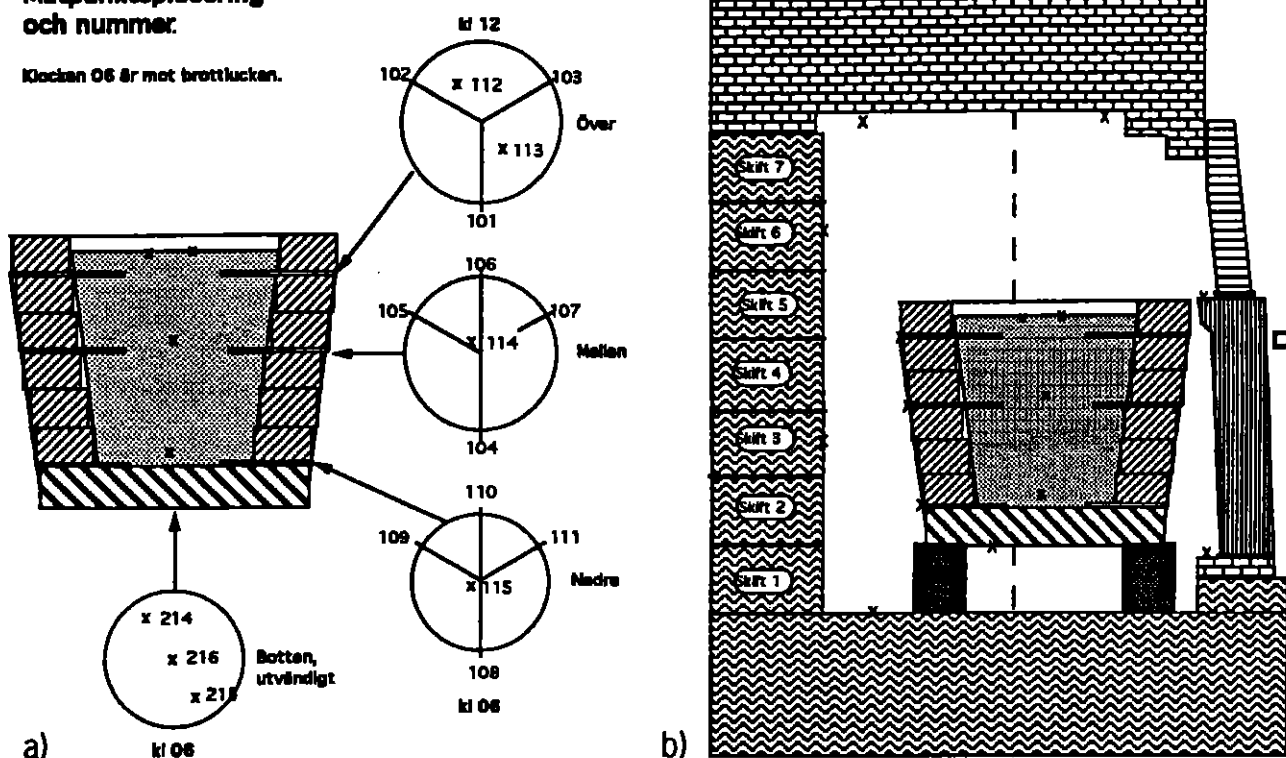
I avdraget satt en sond för provtagning och analys av rökgasernas sammansättning.

Temperaturfördelningen mättes med hjälp av 15 termoelement i ugnens väggar och 18 i och på degeln. Vissa stenar i ugnens väggar var försedda med genomgående hål för termoelement och dess skyddsror vilka stacks in i väggen utifrån. Dessa termoelement mätte ugnsväggens innertemperatur. Degelns yttertemperatur uppmättes med termoelement vars skyddsror murats in i degelväggen. Temperaturen mättes även på olika nivåer inne i kromslaggen. Placering av termoelement samt ugnens uppbyggnad framgår av figur 3. Dessutom mättes temperaturen på gasen, förbränningsluften och avgaserna.

Samtliga uppmätta värden loggades en gång per minut för senare behandling med hjälp av dataprogrammet Excel. Isotemperaturdiagram för drifttemperaturerna 1100 °C och 1400 °C framställdes manuellt med hjälp av de registrerade temperaturerna (figur 4). För att ange respektive temperaturs position i ugnen anges läget i horisontell led med klockslag medurs då ugnen studeras ovanifrån. Klockan 06 är då mitt fram vid brottluckan. I vertikal led på ugnens väggar anges i vilket skift av byggsstenar termoelementet är placerat, numrerade från botten och uppåt. Degeltemperaturernas vertikalledsposition anges med över-, mellan- och bottenposition. På bilden är ugnsvägg och degelvägg utvikta för redovisning av temperaturfördelningen i ugnen.

**DEGELSIMULATOR.  
Mätplatsplacering  
och nummer.**

Klockan 06 är mot brottluckan.



*Figur 3 Temperaturen mäts på flera ställen i ugnen och degeln. Mätpunkterna i figuren är markerade med x och för degelns sidor med respektive mätpunkts tresiffriga nummer. a) visar mätpunkterna i degeln och b) visar vissa av ugnens mätpunkter. För uppgifter om samtliga punkters placering hänvisas till referens [5].*

I pilotugnen prövades 10 olika brännar- och avdragskombinationer. De olika brännarna presenteras i tabell 1 och kombinationerna med försöksnumrering i tabell 2.



Tabell 1 Brännare med maxeffekt.

Brännare	Fabrikat	Max. effekt	Vid luftförv	Leverantör
Typ		kW	temp, °C	
Referensbrännare	Mats Lindahl	300	500	Mats Lindahl
G 100	BUSS	200	450	El&Gasteknik AB
ZIO 140 HB	Kromschröder	450	Kall	Lån Holmegaard
LYNX 4	Stordy	110	500	Scand Heat
WHG-H-120	Stordy Hauck	150	500	Scand Heat
Brännare		Injusterad	Tryck vid brännaranslutn.	
Beteckning	Typ	max. effekt	Gas	Luft
		kW	hPa	hPa
Ref. brännare		300	60	4
BUSS 1	G 100 A	300	27	13
BUSS 2	G 100 B	230	17	8
BUSS 3	G 100 C	230	1	4
ZIO	ZIO 140 HB	180	6	18
LYNX	LYNX 4	90	20	40
Flat Flame	WHG-H-120	150	7	70
Luftförvärmningstemperatur, 450 °C			Luftfaktor, 1,1	

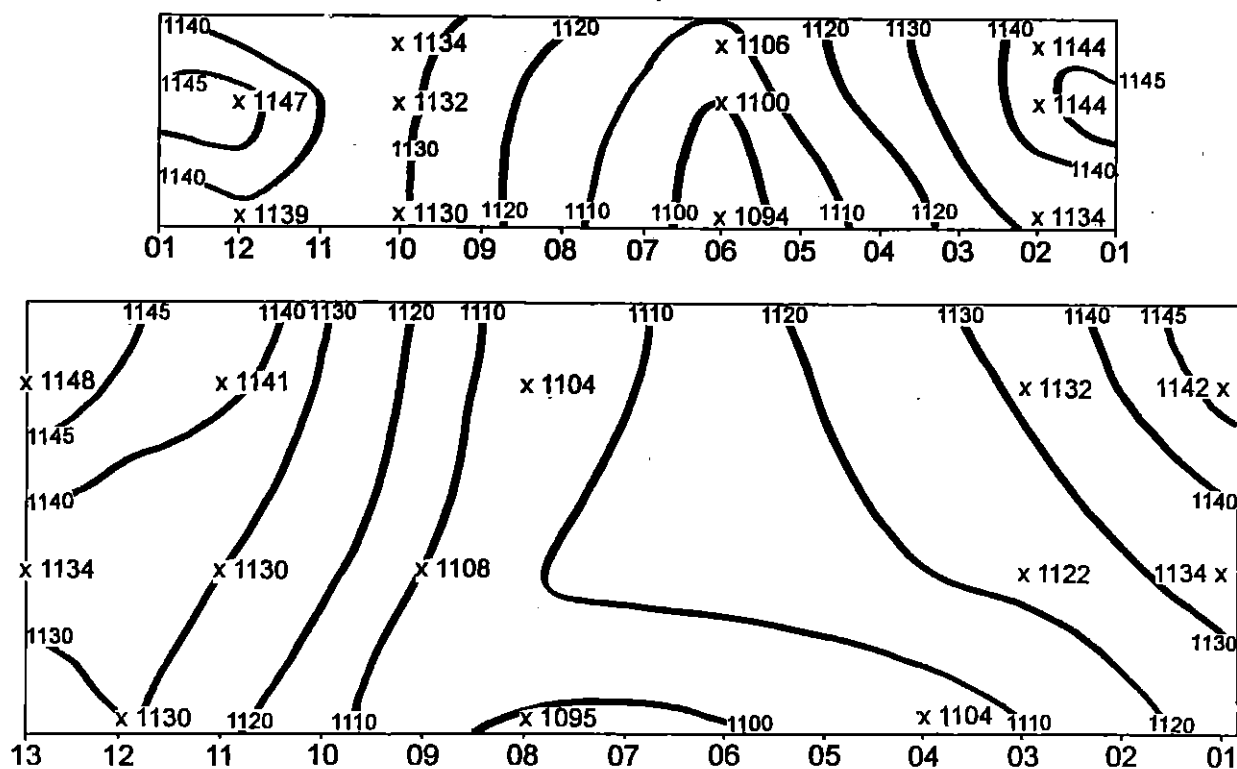
Tabell 2 Försöksserien med effektfördelning i kW och %.

Test	Brännare	Avdrag skift	Injusterad max. effekt		
			Totalt, kW	Övre, kW/%	Undre, kW/%
1	Referens	2	300	300/100	
2	Ref. + LYNX	2	240	150/63	90/37
3	BUSS 1	2	300	300/100	
4	BUSS 1 + LYNX	2	300	210/70	90/30
4	BUSS 1 + LYNX	2	300	230/76	70/24
5	BUSS 1 + LYNX	5	300	230/76	70/24
6	BUSS 2 + LYNX	5	300	230/76	70/24
7	BUSS 3 + LYNX	5	300	230/76	70/24
8	Flat Flame+LYNX	5	240	150/62	90/38
9	Flat Flame+LYNX	2	240	150/62	90/38
10	ZIO+LYNX	2	270	180/67	90/33

De flesta av de nordiska degelugnarna är utrustade med rekupe-  
rator som återvinner en del av värmen från de varma avgaserna.  
Förbränningsluften förvärms på detta sätt till 400-500 °C. I  
pilotugnsprojektet valdes i stället att släppa ut avgaserna och  
åstadkomma luftförvärmningen med en gaseldad luftförvärmare. På  
detta sätt kunde man styra och hålla luftförvärmningstemperatu-  
ren konstant.

Pilotugnen kördes i försök om ca 3,5 timmar. Inför varje försök  
skulle ugnen ha en jämn temperatur motsvarande arbetstemperatur  
1100 °C. Då detta läge var uppnått loggades samtliga värden i  
30 minuter. Därefter simulerades uppkörningen av ugnen till  
smälttemperatur då temperaturbörvärdet ändrades till 1400 °C  
och brännarna gick på full effekt. Då börvärdet var uppnått  
reglerade ugnen successivt ner så att en konstant hög  
temperatur 1400 °C bibehölls under den återstående tiden för  
försökscykeln. Härefter avslutades försöket.

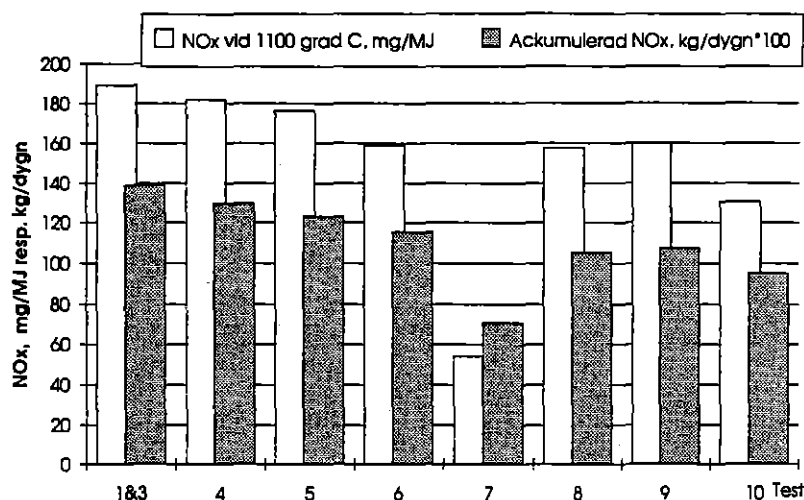
Isotemperaturdiagram försök 7  
Arbetstemperatur



Figur 4 visar en önskad värmefördelning där degel och ugnsvägg  
i full höjd vikts ut till rektangulära ark. Läge 06 är mitt för  
brottluckan, 12 mitt bakom degeln.

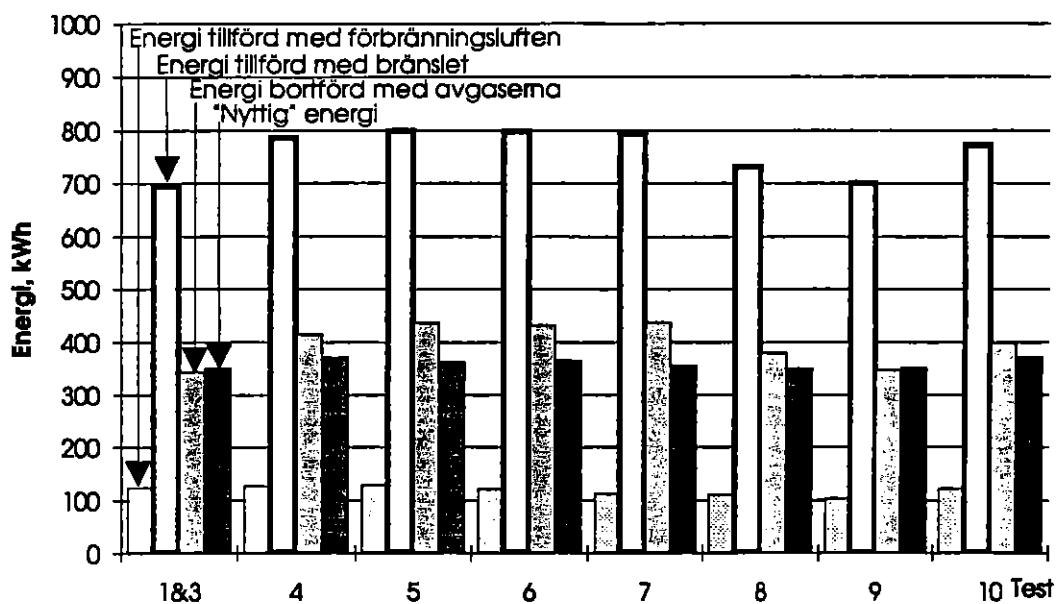
Slutsatserna från pilotugnsförsöken var att:

- Ett två-brännar-alternativ med en brännare placerad i ugnsväggen i nivå med degelbotten och en annan brännare över degeln ger en god temperaturfördelning i ugnen. Det är viktigt att sätta den nedre brännarens maxeffekt på en sådan nivå att degeln eller ugnsväggen inte skadas.
- $\text{NO}_x$ -emission från förbränningen kan relativt lätt minskas genom att använda Låg- $\text{NO}_x$ -brännare, figur 5.



**Figur 5** visar en beräknad ackumulerad mängd  $\text{NO}_x$  för de olika försöken. Försök 1&3 är utan låg- $\text{NO}_x$ -teknik, försök 7 med två låg- $\text{NO}_x$ -brännare.

- En lägre bränsleförbrukning har inte kunnat konstateras för två-brännar-kombinationerna i pilotugnen. I försöken har ingen hänsyn tagits till att dessa kombinationer ger degeln en kraftigare värmning och en helt ny typ av värmeförsel i Flat Flame-kombinationen. Verklig förbrukning måste därför undersökas vid produktion av glas, figur 6.



**Figur 6** Diagrammet visar till- och bortförd energi för de olika försöken. Med nyttig energi menas den energi som tillförs ugnens väggar, valv och degel. I denna post ryms därför den förlust som avgår genom värmestrålning från ugnens ytterytor.

## 2 FÄLTEXPERIMENT

### 2.1 INLEDNING

Glasråvaran består i huvudsak av sand ( $\text{SiO}_2$ ), flussmedel ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), stabilisatorer ( $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{ZnO}$ ) och luttringsmedel ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{As}_2\text{O}_3$ ). Flera av råvarorna förekommer i form av nitrater och karbonater. Råvarorna blandas ihop till mäng för att sedan eventuellt pelleteras.

Vid uppvärmning av mängen avgår först vatten vid  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Därefter smälter flussmedlet vid  $750\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$ . Smältan omsluter kornen av de svårsmälta materialen. Kornen löses successivt upp i smältan. Vid drygt  $900\text{ }^\circ\text{C}$  har sanden tillsammans med flussmedel och andra ämnen bildat en silikatsmälta.

Under höjningen av mängens temperatur frigörs  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  och  $\text{H}_2\text{O}$  från karbonater, nitrater och från mängens fuktighet. Ungefär 15 % av mängens ursprungliga massa avgår som gaser. I glaset bildar gaserna bubblor vilka bidrar till omrörning och homogenisering av smältan då de stiger till ytan och lämnar smältan. En del av gaserna löses i smältan medan återstoden blir kvar som blåsor vilka senare avlägsnas vid blanksmältningsperioden. De blåsor som eventuellt finns kvar efter blanksmältningen kallas lusor och försämrar glasets kvalitet.

Temperaturförloppet i ugnen är viktigt för att erhålla en god smältning. Då alkali smält tar det en viss tid innan den har hunnit diffundera in i och lösa sanden. Diffusions- och härmed upplösningshastigheten ökar med ökad temperatur.

Med en högre temperatur ökar risken för att flussmedlet skall ingå andra föreningar innan den hinner reagera med sanden. Sanden blir kvar ouplöst flytande på ytan och ser ut som vita kristaller.

Om temperaturen vid smältning hålls för hög kan glaset börja reagera med degeln vilket orsakar sliror och vid kraftigt angrepp degelsten i smältan. Förutom att glaset blir dåligt förkortas degelns livslängd.

Det är alltså viktigt att inte värma mängen för kraftigt vid nedsmältningen. En jämn relativt hög temperatur nere i smältan

bör eftersträvas för att underlätta för gaserna att stiga och lämna glaset.

## 2.2 MÅL OCH SYFTE

Fältexperimenten har syftat till att pröva hur de i pilotugnsförsöken utvalda brännarna, brännarkombinationerna och dess placering i ugnen påverkar glasets kvalitet. Försöken har också syftat till att finna en optimerad smältcykel för respektive brännarkombination samt att kartlägga och verifiera verklig bränsleförbrukning och emissioner av framför allt  $\text{NO}_x$ .

Målen med fältförsöken har varit att:

- Utifrån det nya smältkoncept som presenterats i pilotförsöken smälta och producera ett glas med en större mängd prima kvalitet och mindre kassation.
- Från försöken välja ut en av de testade brännarkombinationerna för att använda i fullskaleförsöken.
- Fastställa en optimerad smältcykel för fullskaleförsöken.
- Bestämma bränsleförbrukning och emissioner av  $\text{NO}_x$  vid glassmältning.

### 3 UTRUSTNING OCH TILLVÄGAGÅNGSSÄTT FÖR FÄLT EXPERIMENT

#### 3.1 UGN G2

Till fältexperimenten användes den pilotugn som byggts i DTI:s gaslaboratorium i Malmö. Ugnen benämnes G2 under fältexperimenten.

Ugnens uppbyggnad beskrivs närmare i kapitel 1.4.5 Steg III - pilotugnsförsök och i projektets delrapport referens [4]. Dimensionerna på ugnen är de samma som för en konventionell endegelugn.

Ugnens isoleringsstandard är sämre än för en ugn som byggs för permanent bruk. Yttertemperaturen på väggarna är ca 50-80 °C högre än brukligt. Dessutom är den mer otät och släpper in mer läckluft än en normal ugn. Vid beräkning av bränsleförbrukningen måste man därför ta hänsyn till en extra förlustfaktor för utrustningen. Denna faktor uppskattas med hjälp av överslagsberäkningar till minst 10 %.

##### 3.1.1 Installering av ugn

Ugnen inspekterades efter pilotugnsförsöken i Malmö och bedömdes vara i sådant skick att den skulle gå att flytta som hel ugnskropp. Valvet monterades bort för att ersättas med ett nytt på Kosta. Hålet i bänken där termoelementen tidigare letts ut vidgades och ugnens golv fasades så att det skulle slutta ner mot hålet för att underlätta för spillglas att rinna ner. På Kosta byggdes en kall glasficka i anslutning till detta hål.

Hyttgolvet sågades upp och ugnen placerades på en ställning. Degeln i experimentugnen var placerad på två på varandra lagda normalstenar så att den stod 13 cm över bänken. Avståndet mellan bänken och degeln var större i experimentugnen än i konventionella ugnar. Man var därför tvungen att sänka ner ugnen i hålet i motsvarande grad för att få normal arbetshöjd för glasarbetarna. Degelbottens slutliga läge i förhållande till hyttgolvet var fem cm över golvet.

För att kunna lyfta ner ugnen i hålet och placera den på ställningen monterades byggstenarna ner och märktes för att kunna

placeras på rätt plats igen. Vid återmonteringen murades stena fast i stället för att som tidigare vara löst liggande.

Efter murningen av ugn, nytt valv, glasficka, avdragskanal och inmontering av rekuperator, var ugnen klar. Reglersystem och brännare anslöts till gasoldistributionsnätet på Kosta och rekuperatorn anslöts till avgassystemet.

En verkstad/arbetsplats färdigställdes och brännarna och dess reglerutrustning kopplades in och ställdes in enligt smältcykeln.

### 3.1.2 Gas- och luftsystem

För styrning och reglering av ugnen användes samma utrustning som under pilotugnsförsöken. Utrustningen anslöts efter vissa modifieringar till Kostas distributionsnät för gasol.

Ritning på systemet samt fullständig komponentlista finns i bilaga 1.

### 3.1.3 Degel

Degeln är av standardutförande med måtten, diameter 900 mm och höjd 700 mm. Degelmaterialets sammansättning är ca 70 %  $\text{SiO}_2$ , 20 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , samt mindre delar  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}+\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  och  $\text{Na}_2\text{O}$ . Dvs en "sur" degel.

Degelmaterialet har egenskapen att bli något plastisk vid de höga temperaturer som råder vid smältning av glas. På grund av detta antar den redan efter några smältor en lätt bomberad form. Om degeln inte upphettas ännu mer (över 1500 °C) bibehålls den bomberade formen under hela degelns livslängd, ca 20 veckor.

Degeln utsätts ständigt för mekanisk och kemisk nötning från glaset, både vid inlägg av rumstempererad pellet och då glasytan sänks vid urarbetning. Glasets kemiska inverkan på degelmaterialet beskrivs som följer.

I gränsen mellan degel och glas bildas ett koncentrationsgränsskikt i både degeln och glaset. Aluminium kommer härigenom att diffundera ut ur degeln och alkali diffunderar in. Degelns



motståndskraft mot denna påverkan bestäms delvis av hur tätbränningen innan glassmältning gått till. En rätt utförd tätbränning ger degeln låg porositet och härmed hög resistens mot angrepp från glaset. En för låg (eller hög) tätbränningstemperatur ger hög porositet och låg resistens mot korrosion. Om brännarnas placering eller fördelning av bränsleeffekten vid tätbränningen skulle vara olämplig ur degelns synpunkt så skulle detta visa sig i form av en mindre hållbar degel och en ökad förslitning vid glassmältningen.

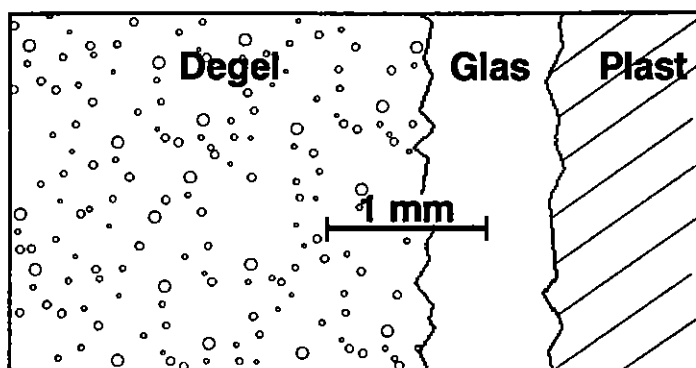
Förutom degelns kvalitet och motståndskraft efter tätbränning påverkas diffusionen av ämnen mellan glas och degel av degelns och smältans temperatur under smältcykeln. En hög degeltemperatur ger en högre diffusionshastighet av Al, Na och så vidare eftersom diffusionshastigheten ökar exponentiellt med temperaturen.

I FE togs degeln ut ur ugnen för undersökning efter ca tio veckors smältning. Produktionen hade då i huvudsak skett med den första brännaruppsättningen som skulle prövas, Flat Flame-kombinationen. En ny degel sattes in och degelbytet filmades så att den använda degelns form och utseende kunde studeras noggrant. Degeln spricker nämligen så snart den svalnar vilket försvårar undersökningen av hur värmningsbilden påverkat degelns form och hållbarhet. Ett prov togs ur degelväggen mellan övre och undre glaslinjen för vidare analys.

Utvärdering av det uttagna provet har skett med hjälp av svepelektronmikroskop (SEM) dels med linjeanalys för att studera förändringar i gränsskikt och dels för punktanalys.

För linjeanalys i SEM sågades en bit från degeln ut. Provet gjöts sedan in i en en-tums plastcylinder och preparerades för analys.

Linjeanalysen görs punktvis längs en 1 mm lång linje vinkelrätt mot gränsskiktet från degel och ut i glaseringskiktet, se figur 7. Avståndet mellan stegen är 10  $\mu\text{m}$  och i varje position analyseras en yta som är ungefär 10 x 10  $\mu\text{m}$ . Analysdjupet är 2-3  $\mu\text{m}$ . Ett separat linjesvep görs för varje grundämne som skall analyseras, i detta fall Na, K, Al och Fe.

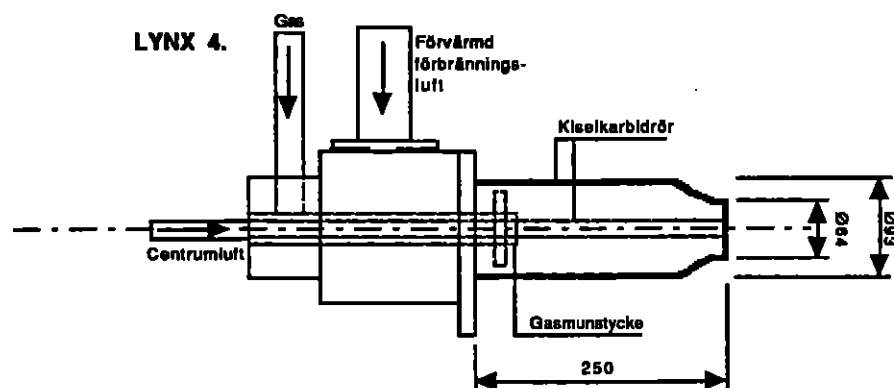


**Figur 7** I bilden visas den successiva övergången från opåverkad degel (längst till vänster) till glasskiktet (till höger). Det svarta strecket i figuren anger var i provet linjeanalysen gjorts. Plastfasen längst till höger i bilden är den provkuts som provet är inbakat i.

### 3.2 BRÄNNARUPPSÄTTNING

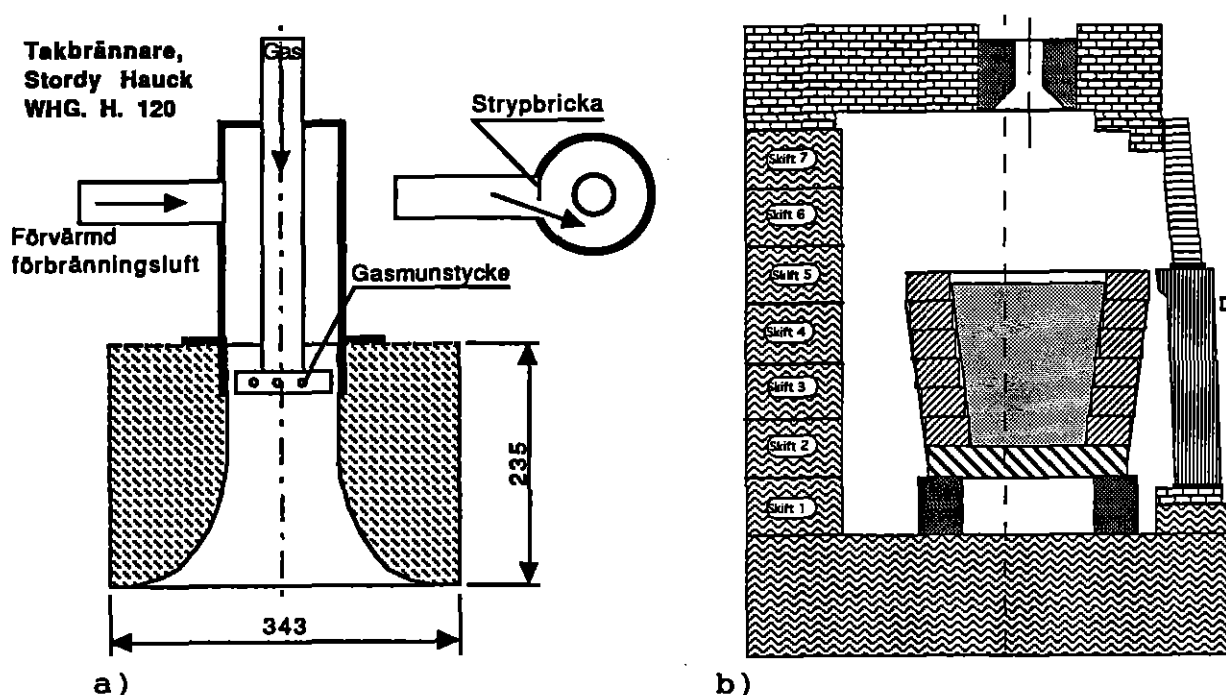
I både vattenmodellförsök och pilotugnsförsöken har det tidigare verifierats att de två-brännarkombinationer som prövades på DTI givit en god värmefördelning i ugnen. Det beslutades följaktligen att konceptet skulle testas med avseende på glaskvalitet.

Den undre brännare som användes i pilotugnsförsöken är en låg- $\text{NO}_x$ -typ av märket Stordy, modell LYNX, se figur 8.



**Figur 8** LYNX-brännaren i genomsnitt. Luften tillsätts i två steg. Första förbränningssteget sker understökiometriskt inne i kiselkarbidröret. Slutförbränningen sker då den ofullständigt förbrända gasen lämnar röret och blandas med den kalla sekundärluften.

Av de varianter av brännare som prövats för placering över degeln är Flat Flame-brännaren ovanlig i glasugnar. Brännarens utformning och placering framgår av figur 9. Brännaren skapar en tallriksformad flamma som värmer valv och brännarsten rakt ovanför degeln och glasytan. Den smältande mängden och det smälta glaset utsätts på detta sätt för en mycket kraftig strålning från både flamma och valv. Strålningens intensitet är temperaturberoende. Med Flat Flame-brännaren är valvets temperatur ca 100 till 400 °C varmare än om man använder brännare som är placerade i ugnsväggen på konventionellt vis.

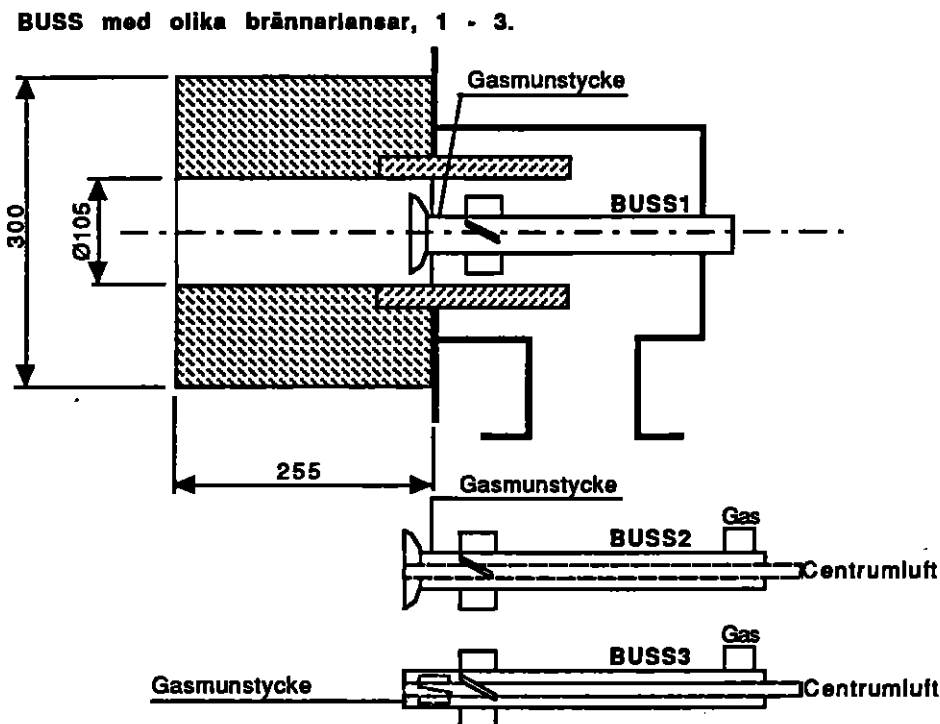


**Figur 9** a) Flat Flame-brännaren i genomskärning. Den höga luft-hastigheten pressar gaserna i radiell riktning så att flaman breder ut sig som en lysande platta i valvet. b) Brännarens placering i valvet.

Det beslutades att Flat Flame-kombinationen skulle prövas som första alternativ i FE på Kosta.

Efter den kraftiga  $\text{NO}_x$ -sänkningen vid pilotförsöken med låg- $\text{NO}_x$  varianten BUSS3 som övre brännare hade det varit önskvärt att pröva denna vid glassmältning. Styrningen av primär- och sekundärluft vid verkliga förhållanden i produktion där t ex luft-förvärmningstemperaturen förändras kontinuerligt är dock relativt komplicerad. Den installations- och arbetsinsats som krävs var ej möjlig inom ramarna för projektet.

Som andra alternativ valdes i stället BUSS1-brännaren i referensbrännarposition, figur 10. Kombinationen är ett mellanting mellan en konventionell brännarplacering och det nya konceptet med Flat Flame-brännare.



**Figur 10** BUSS1 har en enkel konstruktion där gas och luft blandas före flamskivan. Den relativt goda blandningen mellan gas och luft ger ett snabbt förbränningsförlopp och en kort flamma.

### 3.3 LOGGNINGSUTRUSTNING

Mät- och loggningsutrustningen som användes för att följa och dokumentera pilotugnen under försöken i Malmö utnyttjades också till en viss del i FE, se referens [5]. Temperaturförloppet mättes i flera punkter i väggar, valv och bänk. Dessutom mättes temperaturen på gasol, förvärmad förbränningsluft och rökgaserna i avdraget och efter rekuperatorn liksom tillförd effekt genom brännarna.

Loggningen skedde diskontinuerligt. Val av tidpunkt samt genomförande av mätning och leverans av data till DTI för analys sköttes av hyttmästaren på Kosta. Hyttmästaren skötte dessutom den manuella avläsningen av gasförbrukningen per dygn.

Rökgaserna analyserades med avseende på syre endast vid inställningen av brännare och ugnsgregering.

NO<sub>x</sub>-mätningar och mätning av temperaturprofilen i det smältande glaset utfördes separat av Glafo.

### 3.4 UPPFÖLJNING AV GLASKVALITET

#### 3.4.1 Glasframställning

Glasframställning i fältexperimentugnen utfördes som normal produktion, vars smältning beskrivs som följer.

Kl 15.00 då arbetet avslutats för dagen startar smältcykeln med att ugnen sätts upp till full effekt för att så snabbt som möjligt nå maxtemperaturen som är drygt 1400 °C.

Vid ca 1300-1350 °C görs första inlägget. Då detta smält ner görs inlägg nummer två. Om degeln varit mycket urarbetad behövs ytterligare ett eller två inlägg. Temperaturen ökar successivt under nedsmältningen mellan inläggen.

Efter att det sista inlägget smält ner vidtar den så kallade blanksmältningen då alla kvarvarande blåsor avlägsnas. För att kontrollera att glaset är färdigt efter blanksmältningen tas ett spikprov. Glaset på provet skall vara blåsfritt och utan andra defekter. Då provet tagits och godkänts sätts ugnen igen. Med detta menas att all energitillförsel stryps så att temperaturen i ugnen så snabbt som möjligt sjunker till den önskade arbetstemperaturen, ca 1100 - 1150 °C.

Samtliga data vid nedsmältningen samlas av smältarna i en smältrapport. I rapporten noteras för varje ugn data för uppföljning av glasets kvalitet. Ett exempel på smältrapport visas i bilaga 2.

Smältarna har tiden från 15.00 på eftermiddagen till 06.00 på morgonen efter på sig att smälta ett glas med hög kvalitet.

Under arbetsdagen formas sedan produkter av smältan då glasmassan svalnar och stelnar. Efter formningen sprängs glaset, det vill säga den del av glaset som sitter fast i glasblåsningsskivan, kappan, skiljs från den del som är glasets kupa.

Under hela perioden svalnar de olika tjocka delarna i glaset olika fort så att spänningar byggs in i glaset. Spänningarna gör att glaset kan spricka. Produkterna behöver därför svalna långsamt och under kontrollerade former så att glaset svalnar lika snabbt i alla delar. Till detta används en kontinuerlig kylugn (kylrör) där glaset förs genom olika temperaturzoner på ett löpande band.

Efter kylröret synas samtliga glas för att godkännas eller kasseras. De godkända går vidare för fortsatt bearbetning, slutsyning för bedömning av prima eller sekunda kvalitet och packning.

Under arbetet med att finna en smältcykel som skulle ge optimal glaskvalitet med det nya ugnskonceptet justerades inläggnings-temperaturer, ugnstryck och smälttider.

#### **3.4.2 Kostas statistikprogram**

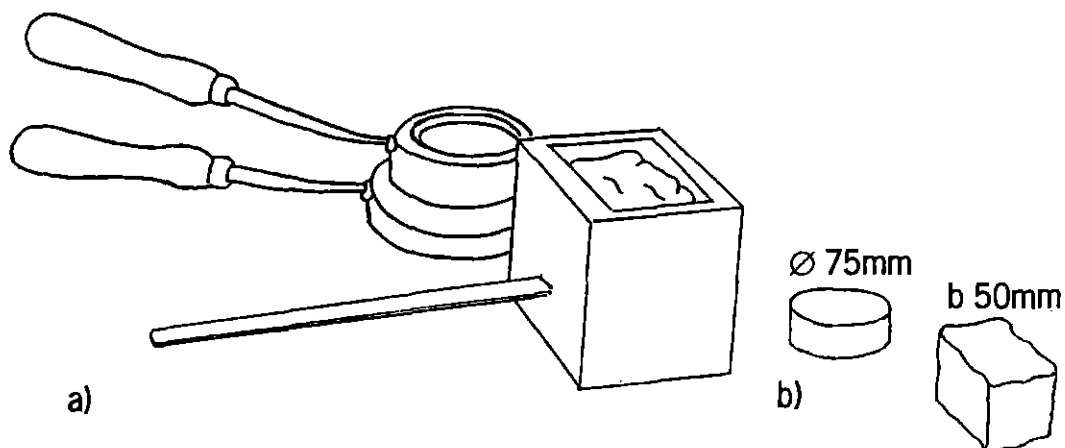
För bedömning av glaskvalitet har projektet utnyttjat Kostas eget statistikprogram för produktionsdata och utfall. I första hand har resultaten från syningen efter kylröret använts. Resultatet anger hur stor procentandel av tillverkningen för respektive verkstad som kasseras på grund av glasfel. Glasfelen delas upp i blåsor, sliror och stenar. Produkterna i G2 är av mycket känslig karaktär så att alla eventuella fel detekteras.

Ur statistikprogrammet kan man dessutom få sammanställningar på smälttider, inläggens storlek, andel skärv och pellet vid varje smälta mm. Data till dessa uppgifter kommer från smältrapporterna som fylls i för varje ugn och smältning, bilaga 2.

#### **3.4.3 Analysutrustning för glaskvalitet**

##### **3.4.3.1 Homogenitet och blåsor**

För objektiv bedömning av glasets kvalitet mäts glasets homogenitet och innehåll av blåsor och lusor. För de båda provningarna används två olika typer av glasprover. Provens utseende och dimensioner beskrivs jämte respektive form i figur 11.



**Figur 11** På bilden ses a) de båda formar som används för att ta ut prover b) de prover som används vid homogenitetsanalys, rektangulärt glasblock och bubbelräkning, puckformat glasprov.

Uttag och preparering av glasprover sköttes av Kosta. Prover togs ut parallellt för de båda testen i G2, i en oljeeldad ugn C3 och två elugnar E14 och E16.

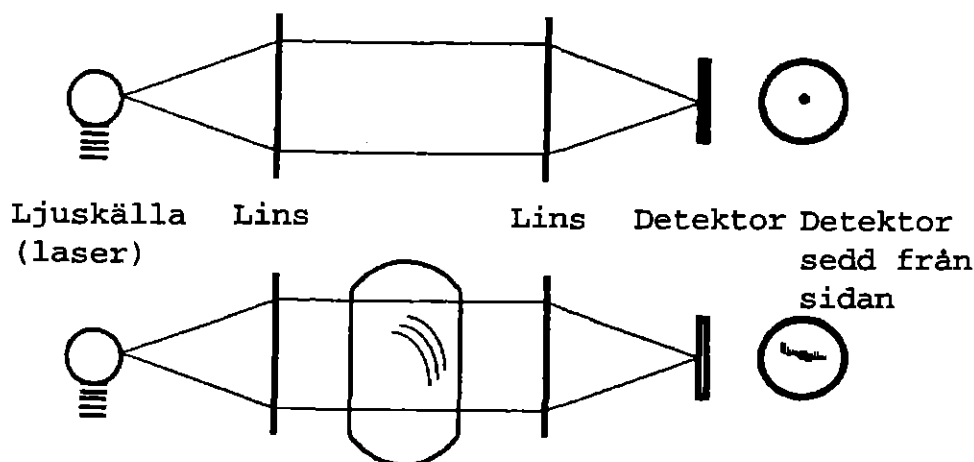
Provtagningsfrekvensen kan delas in i tre perioder. Under den första perioden togs prover två gånger per dag i alla tre ugnarna för att få ett bra referensmaterial. Proverna togs i början och slutet av arbetsdagen, kl 08.00 och kl 13.00. På detta sätt kunde man studera skillnaden i glaskvalitet på olika nivåer i degeln. Under andra perioden togs endast stickprov i el- och oljeugnen medan gasugnen följdes kontinuerligt. Under period tre togs endast stickprov i samtliga ugnar.

Vid varje provtagningsstillfälle noterades tidpunkt, hur mycket glas som arbetats ur degeln och om det fanns något speciellt att anmärka på.

Provet kylades i kylugn och märktes med datum, tidpunkt och ugn. Därefter slipades de och polerades innan de skickades vidare till Glafo för mätning av homogenitet och blåsfrekvens.

Som mått på homogenitet används en väldefinierad glasbits förmåga att släppa igenom laserljus, transmission, samt ljusets fokuserbarhet efter att ha passerat provet. Ju mer inhomogent provet är desto fler defekter, oftast sliror, finns det i glaset. Defekterna minskar transmissionen genom glaset och minskar

glasbitens förmåga att samla ljuset så att fokuserbarheten minskar, figur 12.



*Figur 12 Vid homogenitetsmätningar placeras provet mellan de båda linserna. Strålen (ljuskällan) utgår från lasern längst till vänster, passerar den första linsen, provet och den andra linsen för att slutligen nå detektorn.*

Homogeniteten mättes så att en laserstråle sändes genom materialet. Genom att sätta en spegel med 1 mm diameter i brännpunkten framför detektorn speglas det ljus som passerat glaset opåverkat och som återsamlas i brännpunkten bort. Övrigt ljus registreras av detektorn. Därefter tas spegeln bort, totala ljusmängden registreras och procentsatsen ljus som träffat spegeln beräknas. Det erhållna procenttalet är ett mått på glasets fokuserbarhet. Ett homogent glas har hög kvalitet och en hög fokuserbarhet.

Med lasermetoden kan man också jämföra detekterat totalljus med och utan glasprov. Procentsatsen ljus som passerat glaset i förhållande till ljusintensitet utan glas är ett mått på hur mycket ljus som passerat glaset utan att absorberas eller spridas. Värdet motsvarar ett mått på glasets homogenitet med måttet % transmission. Transmissionsmättet används endast för grovsällning av glas med mycket olika kvalitet.

Ett optiskt glas släpper igenom 100 % av strålen utan att sprida eller absorbera den. Både transmissionen och fokuserbarheten får för sådant glas värdet 100 %.



### 3.4.3.2 Analys av glasfel

I vissa fall innehåller glaset fel som avviker från de normala stenarna, sliorna eller blåsorna i karaktär, storlek eller antal.

Dessa prover togs till Glafo för specialsyrning. Provet bedöms först med ögat, därefter i ljusmikroskop. Råder det därefter fortfarande osäkerhet om felets ursprung görs en SEM-analys på felets sammansättning och struktur.

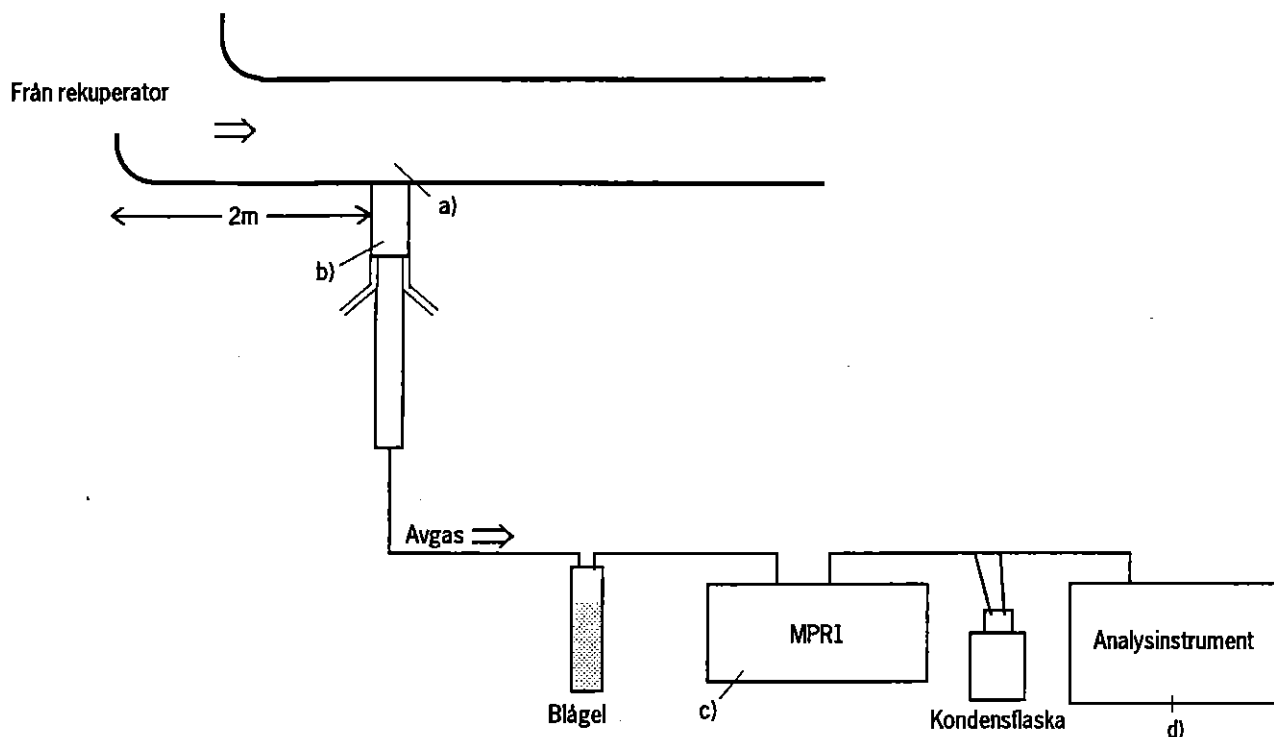
Efter dessa analyser kan man sluta sig till vad felet består av och dess ursprung. Härefter kan lämpliga åtgärder för eliminering av felkällan vidtas.

I fallet med Flat Flame-brännaren var det speciellt intressant att vara uppmärksam på glasfel som skulle kunna ha sitt ursprung från den annorlunda brännarplaceringen.

## 3.5 RÖKGASSAMMANSÄTTNING

Mätningarna utfördes inom ramarna för ett annat Glafo-projekt. På grund av detta mättes fler saker än vad som var relevant för FE. Hela provtagningsproceduren beskrivs nedan, men det är endast  $\text{NO}_x$ -mätningarna som kommenteras i resultatkapitlet.

Utrustningen för rökgasanalys av  $\text{NO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  och  $\text{SO}_2$ , ett ECOM-S+ instrument, hyrdes från PALGO i Malmö. Stoffmätaren MPR-1 hyrdes från ABB Fläkt i Växjö. Uttaget av rökgaserna gjordes efter rekuperatorn. För att den sond som suger ut gaserna skulle kunna fixeras i rätt läge svetsades ett cylindriskt uttag fast på rökgaskanalen, figur 13.

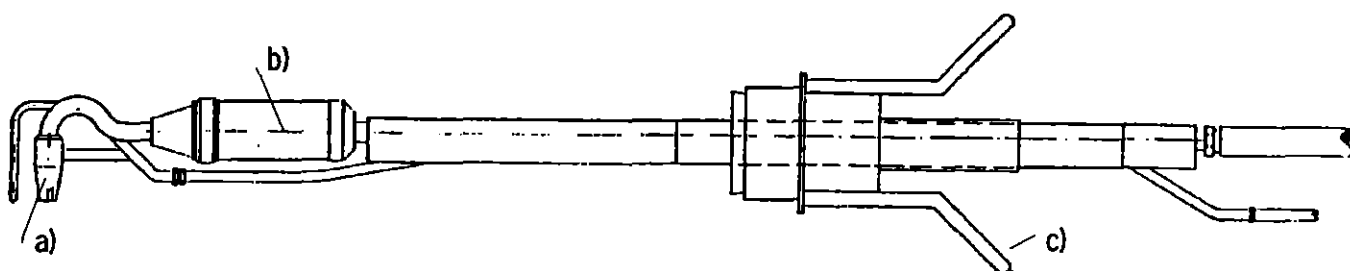


**Figur 13** Figuren visar provtagningsutrustning för rökgasanalys samt dess placering i rökgaskanalen.

Rökgasprov togs ut i kanalen efter rekuperatorn. Provtagningsutrustningens placering är mer än två meter efter närmaste krök på rökgaskanalen, vars diameter är 200 mm. Strömningen vid provtagningen kan därför antas vara laminär. Munstycket på den vattenkylda provtagningssonden placeras mitt i rökgaskanalen och sonden fixeras i det påsvetsade röret b). Rökgaserna pumpas sedan in i gaskylningsutrustningen där gasens fuktighet kondenseras och torr och våt temperatur mäts c). Därefter leds den kalla gasen vidare genom en kondenseringsflaska för ytterligare torkning och slutligen in i utrustningen för rökgasanalys av  $\text{NO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  och  $\text{SO}_2$ , ett ECOM-S+ instrument, d).

God laminär strömning antogs.

Sonden visas i figur 14. För att kunna uppnå villkoren för en isokinetisk provtagning fanns det olika munstycken för olika hastigheter på avgasflödet i kanalen.



**Figur 14** Vattenkyld sond för rökgasinsamling. Sondens munstycke är utbytbart beroende på gashastigheten i rökgasen a). Munstycket är gängat fast på filterhållaren där utbytbara filter för stoftinsamling monteras b). Sonden spänns fast i röret, se figur 14b, med hjälp av insatsen c).

Efter munstycket monterades ett filter in för stoftsamlng. Filtret byttes varje timma vid provtagningen för första försöket, mer sällan vid andra försöket. De filtrerade rökgaserna gick sedan vidare för kylning och bestämning av fukthalt samt torr och våt temperatur i MPR-1 instrumentet, samt till ytterligare analys av NO, O<sub>2</sub>, CO och SO<sub>2</sub> i ECOM-S+ instrumentet.

### 3.6 TEMPERATURPROFILMÄTNING I GLASET

Eftersom glas är ett transparent medium värms inte bara dess yta då glaset utsätts för värmestrålning. Strålningen tränger in i materialet och energin absorberas efter hand. Ju högre transparens desto mer värme kan föras in i materialet. Glasets transmission är våglängdsberoende och är störst i det synliga och infraröda våglängdsintervallet, mellan ca 0,3 och 2,7  $\mu\text{m}$ . Allra bäst, 80-90 %, är transmissionen vid de kortare våglängderna.

Flamman från en oljeeldad brännare brinner med en synlig gul-färgad låga vilket medför att den största delen av strålningen ligger inom glasets mest transparenta våglängdsområde.

En gasflamma är mer ofärgad så att dess strålning är mer förskjuten åt längre våglängder. Gasstrålningsspektrumet ligger dock fortfarande inom det våglängdsområde där glaset är transparent. Vid intensitetsmaximum för strålningen är transparensen 40-50 %.

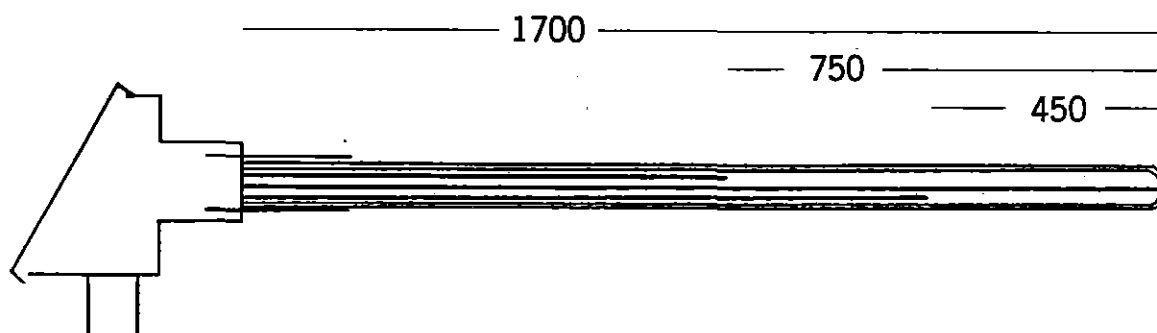
Energitransporten i glas sker också genom strålningsledning där varje atom som utsätts för strålning själv utsänder strålning i alla riktningar. På detta sätt fortplantas energin in i glaset. Strålningsledningen är betydligt större än vanlig värmeledning i klarglas.

En mindre del av värmningen sker genom värmeöverföring från degeln. Det är viktigt att degeln är varmare än eller har samma temperatur som glaset så att smältan inte behöver värma degelväggen. Sker en sådan värmeöverföring kommer glaset att svalna utmed degelväggen varvid densiteten ökar och ett skikt med kallare glas sjunker och samlas vid degelbotten. Detta glas har svårt att bli rent och dåligt glas kommer på så sätt att anrikas i degelns botten.

Genom att använda konceptet med två brännare försäkras man sig om en god värmning av degeln och framförallt dess botten.

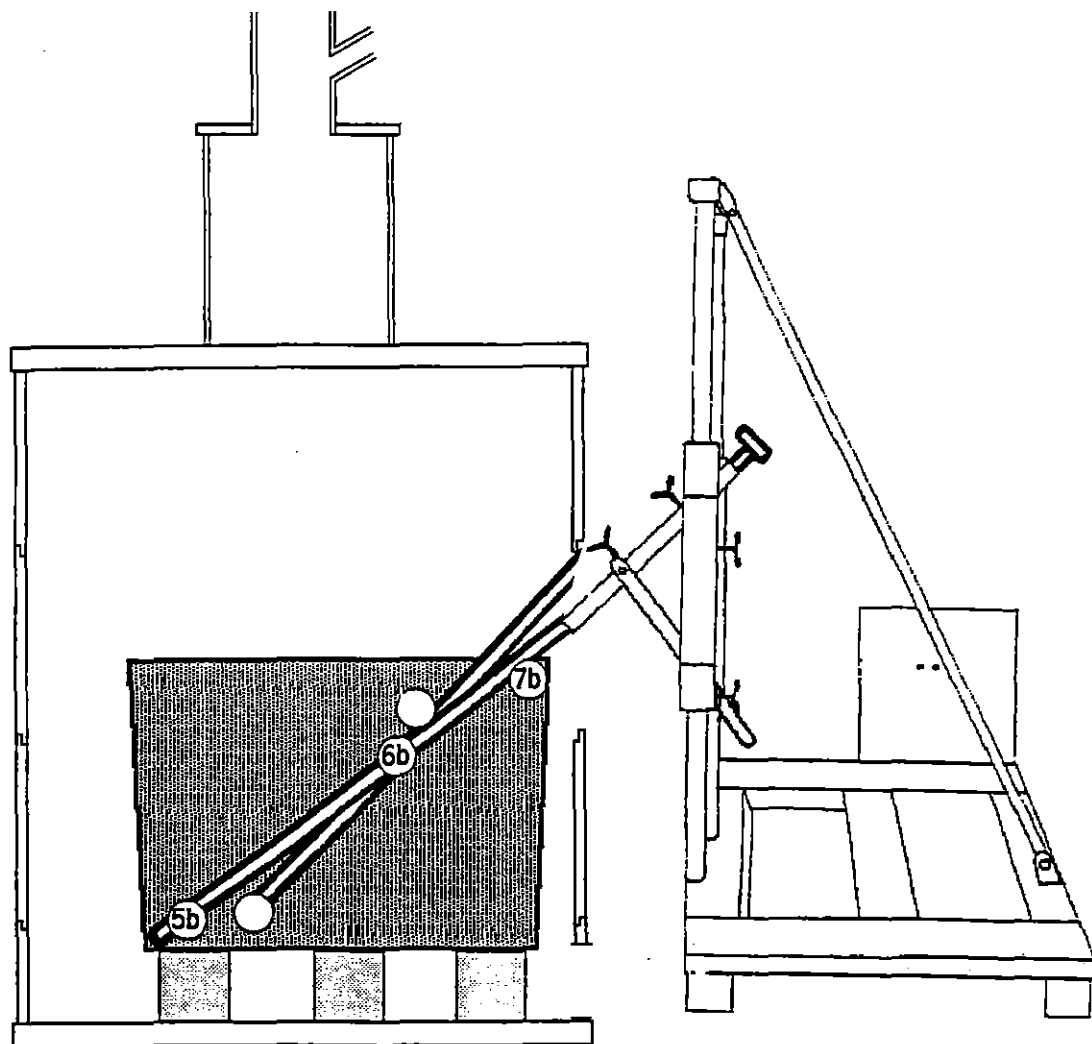
För att kartlägga hur värmningen med gas och med två brännare påverkar temperaturprofilen inne i glassmältan genomfördes följande mätning.

Temperaturprofilen i glaset mäts med hjälp av en specialbyggd doppyrometer. I pyrometern sitter tre termoelement av typ S på olika avstånd från lansens topp, se figur 15. Pyrometern är tillverkad av aluminiumoxidmaterial och måste tempereras innan den förs ner i smältan.



**Figur 15** Schematisk bild av pyrometern i genomskärning. De tre termoelementen sitter i sondens spets samt 450 och 750 mm från spetsen. Hela sondens längd är 1700 mm. Längst till vänster i bilden sitter sondens huvud, vilket befinner sig utanför ugnen under hela mätningen.

För att fixera pyrometern efter att den är på plats i smältan används ett stålstativ, figur 16.



*Figur 16* Då pyrometern förts ner i degeln fixeras den vid det stålstativ som visas i figuren. Justering till rätt höjd och vinkel görs med hjälp av skruvarna.

Mätningen genomförs under och efter blanksmältningsperioden, ca kl 20.30 - 04.30, eftersom pyrometern inte kunde placeras i glaset förrän all mängd var ilagd. Innan pyrometern kunde föras ner i glaset tempererades den till 1100 °C. Temperaturerna loggas på en 12-kanalers skrivare och utvärderas manuellt.

## 4 RESULTAT OCH DISKUSSION

### 4.1 TEMPERATURFÖRDELNING I UGNEN

#### 4.1.1 Värminingsbild

Temperaturen har mätts och registrerats i sju punkter i ugnens väggar och en punkt i bänken strax bakom degeln. Punkternas position i horisontell led betecknas med klockslag så att ugnen betraktad från ovan beskriver en urtavla. Mitt fram vid anfangsöppningen var kl 06, bakom degeln kl 12 och övriga klockslag medurs runt degeln. I skift 3, 50 cm ovanför bänken, är elementen placerade kl 09, kl 11 och kl 03. I skift 6, 110 cm ovanför bänken, är de placerade kl 11, kl 01 och kl 03. Drifttermoelementet är placerat i valvet strax bakom degeln sett uppifrån.

Temperaturkurvorna för försöken vid olika mättillfällen finns redovisade i bilaga 3. Värmefördelningen följer resultaten från pilotförsöken. Båda brännarkombinationerna i FE har en mer homogen värmning av glaset, vilket eftersträvats för att nå en hög glaskvalitet.

##### 4.1.1.1 Flat Flame-kombinationen

Temperaturfördelningen i ugnen beskrivs bäst genom att följa smältcykeln och karaktärisera de olika faserna av smältningen.

Vid arbetsdagens slut är ugnens temperatur jämn och ligger runt drifttemperaturen  $1150 \pm 5$  °C. Då smältperioden börjar sätts brännarna på full effekt. Samtliga temperaturer, med undantag för bänktemperaturen, ökar med samma hastighet så att värmningen av ugnen sker fullständigt homogent.

Bänkttemperaturen är betydligt trögare att få upp och den planar så småningom ut på 1350 °C, vilket är 50 °C lägre än drifttemperaturen. Detta beror delvis på att termoelementet är instuckat från sidan och placerat ca 5 cm under bänkens ytskikt. Därför närmar sig temperaturen 1350 °C vid drifttemperaturen 1400 °C.

Då ugnen enligt drifttermoelementet närmar sig 1400 °C reglerar brännareffekten ner för att upprätthålla temperaturnivån. Temperaturerna i skift 6 ställer då in sig på 1400 °C medan de i

skift 3 stannar på lägre nivåer. Skillnaden är ca 20 °C mellan drifttemperatur och lägsta temperatur i skift 3 kl 03.

Vid igensättningen då temperaturen sänks från smälttemperatur till arbetstemperatur följs temperaturerna åter väl åt, med undantag för driftelementet som minskar hastigare och bänkelementet som minskar långsammare. Samtliga temperaturer ställer in sig på börvärdet  $\pm 5$  °C.

Efter en längre period av låg effekt, t ex ett veckoslut, svalnar dock bänken allt mer. Vid en bibehållen drifttemperatur av 1150 °C under två dygn är bänkens temperatur nere i ca 1110 °C. Samma beteende visar mätpunkt kl 03 i skift 3, vars kurva följer bänktemperaturen med endast ett par graders differens.

Temperaturen i ugnen är hela tiden mycket jämn, förutom till höger om degeln (sett framifrån) skift 3 kl 3 och under bänken. Det är tydligt att de varma gaserna har svårt att tränga mellan degel och ugnsvägg så att värme kan överföras till ugnen. På motsatta sidan kl 09 i samma höjd är brännaren placerad kl 10. Båda mätpunkterna kl 09 och kl 11 följer ugnens medeltemperatur väl. Avdraget är placerat i skift 2 kl 08, men verkar inte påverka värmningen i sin närhet så att väggen kyls.

#### 4.1.1.2 BUSS1-kombinationen

Till skillnad mot Flat Flame-kombinationen är temperaturfördelningen i ugnen under arbetsdagen mycket ojämn. Då driftelementet har en temperatur av 1115 °C är skift 6 kl 01 1185 °C, skift 6 kl 03 1150 °C och skift 3 kl 11 1140 °C. Resterande punkters temperaturer ligger vid driftelementet  $\pm 10$  °C.

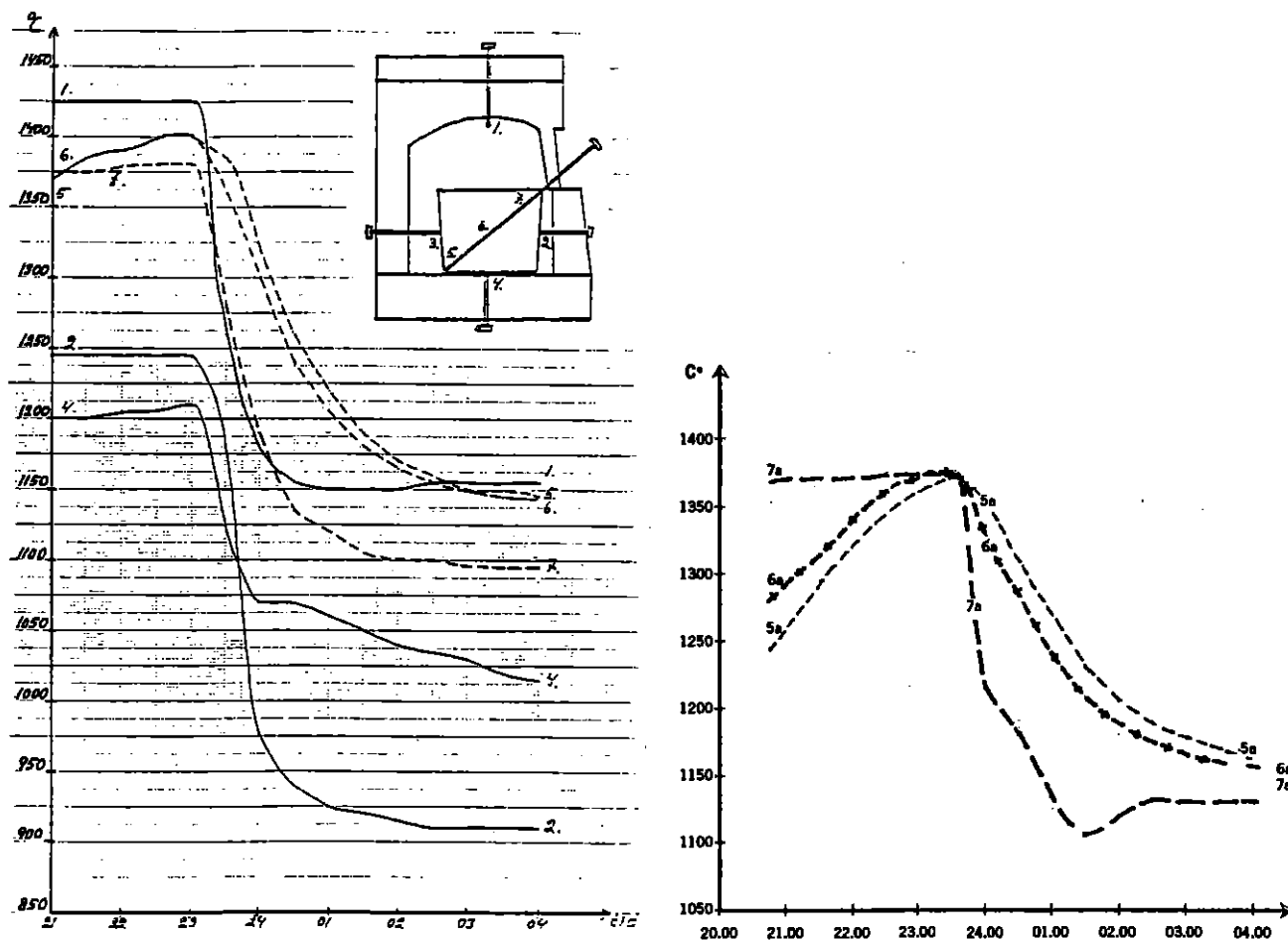
Då brännareffekten ökar vid smältperioden ökar samtliga temperaturer momentant och med samma hastighet. Den inbördes skillnaden består under hela smältperioden. Bänktemperaturen släpar efter vid temperaturstegringen och planar ut vid 1370 °C. Drifttemperaturen har då nått 1400 °C och i skift 3 kl 01 är temperaturen uppe i 1460 °C.

Vid igensättningen följs temperaturerna åter väl åt, med undantag för driftelementet som minskar hastigare och bänkelementet som minskar med lägre hastighet. Väl nere i arbetstemperatur är bilden identisk med den som beskrevs i avsnittets början.

Temperaturfördelningen i ugnen är mycket ojämn men stabil. Vid arbetstemperatur är spridningen  $\pm 70$  °C och vid smält- och luttringsperioden  $\pm 80$  °C. Risken för överhettning i "hot spots" är betydligt större för denna konfiguration än för Flat Flame-kombinationen.

#### 4.1.2 Temperaturprofil i glaset

Temperaturgradienten i glaset mättes två smältor i rad under försöket med Flat Flame-kombinationen. Temperaturen som funktion av tiden för en konventionell oljeeldad ugn och för FE med Flat Flame-kombinationen visas i figur 17.



Figur 17 Diagrammet till vänster visar en oljeeldad ugn där smältningen skett vid 1400 °C och till höger fältexperiment med Flat Flame-brännare där smältning skett vid 1350 °C.



Vid smältningen i oljeugnen låg ugnstemperaturens börvärde på 1400 °C under hela insmältningen. I fallet med Flat Flame-brännaren hölls börvärdet på 1300 °C ända tills sista inlägget på grund av den större strålningsintensiteten mot glasytan. En högre strålningsintensitet ger en högre yttertemperatur och hastigare nedsmältning. En alltför kraftig värmning ger ett glas med lägre kvalitet, se kapitel 3.4.1 Glasframställning. Vid mätningen av temperaturprofilen i glaset för en oljeugn är glastemperaturerna 5 och 6 (se infälld fig i fig 17 a) från mätningens början över 1350 °C. Efter ca två timmar är temperaturen i båda mätpunkterna 1400 °C. Temperaturstegringen blir 25 °C per timma.

I den gaseldade ugnen är temperaturen i motsvarande punkter vid mätningarnas början endast 1250 respektive 1280 °C. Det dröjer emellertid endast 2,5 timmar att nå maxtemperaturen 1370 °C. Hastigheten för temperaturstegringen är i detta fallet 40 °C per timma, det vill säga nästan dubbelt så fort som för oljeugnen. Detta medför en viss eftersläpning för bottentemperaturen i FE-försöket. Då maxtemperaturen är uppnådd är dock bottentemperaturen i fatt.

Efter igensättning sjunker temperaturen i mitten av smältan något snabbare än bottentemperaturen i båda mätningarna. Skillnaden mellan botten- och mittentemperaturen är dock större för FE-mätningen (ca 25 °C) än för oljeugnsmätningen (ca 15 °C).

Hastigheten för glasmassans temperatursänkning är 45 °C per timme för FE försöket, medan den är drygt 60 °C per timme för oljeugnen.

***Glassmältan i FE-försöket värms alltså effektivare trots lägre börvärdestemperatur och därmed lägre temperaturgradient mellan glas och ugnsatmosfär. Dessutom sjunker temperaturen långsammare vid igensättning i FE-försöket, vilket tyder på att mer energi är lagrad i degelns och ugnens väggar som en följd av jämn värmning av ugn och degel.***

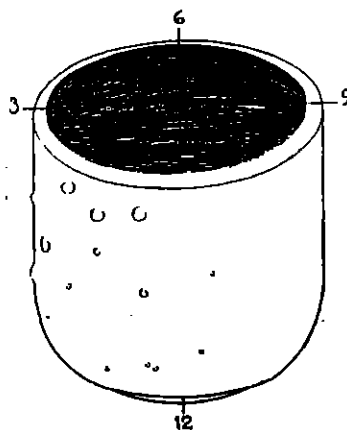
#### 4.1.3 Degelpåverkan

Degelns hållbarhet och livslängd påverkas bland annat av temperering, tätbränning, temperaturfördelning, temperaturnivå och glaskvalitet. Mest känslig är degeln om den utsätts för termo-

chock samt för låga (eller höga) tätbränningstemperaturer, se avsnitt 3.1.3 Degel.

För att undersöka hur degeln i föreliggande fall hade påverkats gjordes ett degelbyte efter ca tio veckors användning. Degelbytet filmades med videokamera. Vid denna tidpunkt hade Flat Flame-försöket avslutats och BUSS1-försöket påbörjats.

På den degelsida som varit utsatt för högst temperaturer hade ytliga blåsor bildats och spruckit, figur 18.

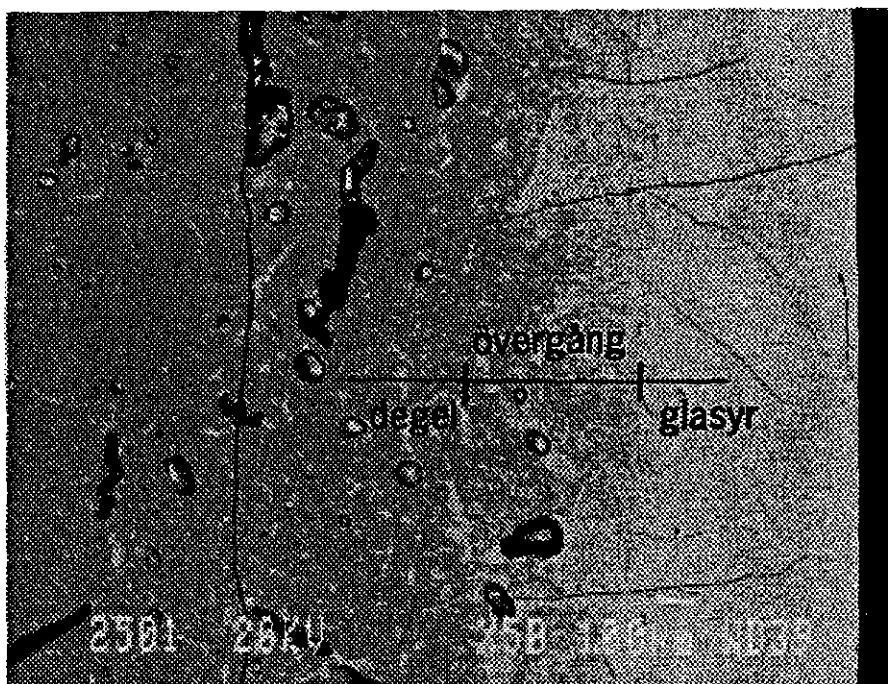


**Figur 18** Degelns utseende efter tio veckor med Flat Flame-kombinationen.

Blåsorna på degelns sida var belägna där degeln enligt tidigare mätningar bör ha högst temperatur. Blåsorna var inte genomgående och degelväggen hade inte deformerats. Någon risk för haveri förelåg inte. Degeln betraktas i figuren bakifrån med klockslagen inritade. Kl 06 är mot arbetsöppningen, övriga klockslag medurs om degeln betraktas ovanifrån.

Blåsorna kan ha bildats och växt till successivt vid de upprepade temperaturhöjningarna i varje smältcykel. Detta är ett normalt förekommande fenomen vid glasframställning.

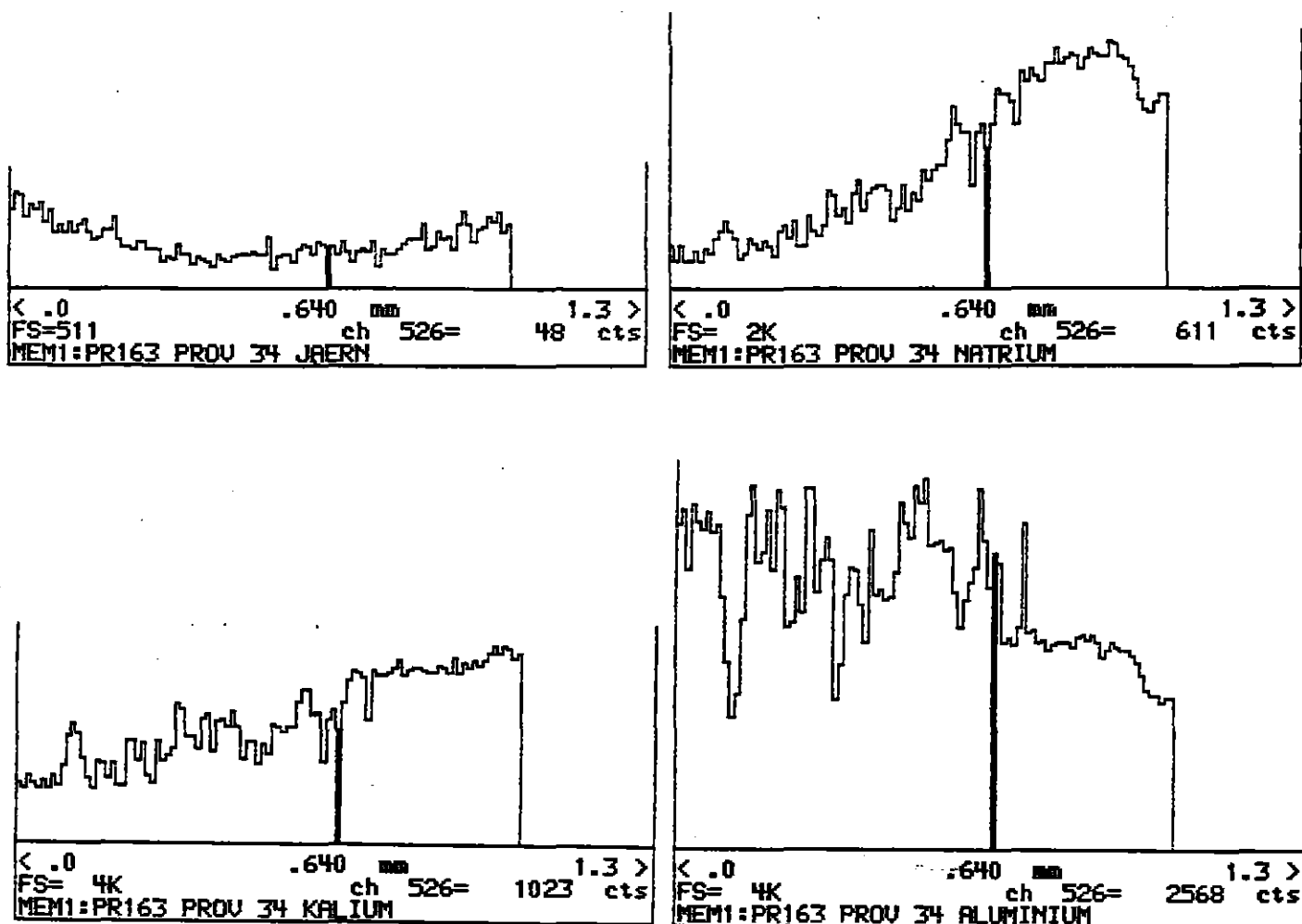
Efter att degeln hade kallnat togs en bit ur dess vägg mellan övre och nedre glaslinjen. Ett snitt av degelbiten analyserades med linjeanalys, figur 19.



**Figur 19** Ett SEM-foto på det preparerade snittet visar de olika zonerna i degelmaterialet.

Det ljusgrå partiet till höger i figur 19 är glasfas, vilken senare övergår till en blandzon mellan degel och glas. Det mörkgrå området längst till vänster är degelmaterialet med oförändrad sammansättning. SEM-analysen har gjorts utmed den 1 mm långa svarta linjen på bilden.

Längs linjen analyserades innehållet av aluminium, järn, natrium och kalium. Resultatet visas i figur 20. Samtliga kurvor visar att höga halter av de analyserade ämnena har diffunderat både in i och ut ur degeln.



**Figur 20** Figuren visar mätresultatet från linjeanalys av provets innehåll av a) Fe, b) Na, c) K och d) Al. Analysen har gjorts utmed en linje i gränsskiktet glas - blandfas glas/degel (med diffusion) - degel.

Figur 20 anger relativa mått på provets koncentration av respektive detekterade ämne. Linjen utefter vilken analysen gjorts sträcker sig från rent glas längst till höger, över en blandfaszon till det opåverkade degelmaterialet längst till vänster.

Skiktet mellan glas och degel där blandning av materialen föreligger är brett. Detta gör att koncentrationsgradienten är liten och härmed är också den drivande kraften liten för vidare diffusion av ämnena i materialet.

Ett brett blandskikt kan bero på att smälta och mäng/pellets inte sliter på degeln. I så fall kan en jämvikt ställa in sig mellan degel och glas med en sjunkande diffusionshastighet som följd. Degeln kommer i detta fall inte att korrodera utan hålla länge.

Fenomenet kan också bero på att degeln hela tiden korroderar, men att diffusionshastigheten i både glas och degel är så (väldigt) stor att koncentrationen av de diffunderande ämnena utjämnas och att gradienterna då omedelbart blir flacka.

Vid inspektion av degeln sågs ingen onormal slitning av materialet. Det fanns inte heller någon markerad glaslinje som kan förekomma då degeln utsatts för en korrosiv smälta eller varit felaktigt tätbränd.

#### 4.2 BRÄNNARNAS FUNKTION

Brännarna är valda för att ge en låg  $\text{NO}_x$ -emission och optimal värmningsbild. Den nedre brännaren motsvarar i första hand  $\text{NO}_x$ -kravet, medan Flat Flame-brännaren ger en bättre värmefördelning.

I brännare där gasen tillåts bli varmare än ca 600 °C krackar gasen och risken för koks bildning är stor. I pilotförsöken hände detta då referensbrännaren kombinerades med Lynx-brännaren i nedre delen av ugnen. Då effekten delades mellan de båda brännarna blev flödet lägre, uppvärmningen av gasen effektivare och hålen i gasmunstycket koksade igen.

Fenomenet uppstod också under FE. I det fallet var det den nedre brännaren som koksade igen. Följden blev att gasol som ej kom in i brännaren sökte sig ut på utsidan av ugnen vid brännarstenen och in mellan den yttre rockwool-isoleringen och isolerstenen där den började brinna.

Under försök 2 började Lynx-brännaren tjuta. För att få bort ljudet minskades andelen primärluft till den redan understökiometrisk förbränningszonen i kiselkarbidröret. En större andel gasol kom på detta vis att passera den primära förbränningszonen utan att reagera. Uppehållstiden vid de höga temperaturerna inne i brännaren ökade risken för koksning vilket fick till följd att brännaren sattes igen av koks.

Då brännaren plockades ut under försök 2 efter igenkoksningen höll inte kiselkarbidröret. Hela brännaren byttes då ut mot en brännare från Flameco, typ 82-A MVTA.

I väntan på att få in den nya nedre brännaren kördes ugnen med enbart den övre BUSS-brännaren. Maxeffekten justerades inte om men smälttiden fick förlängas ca 30 minuter för att glaset skulle bli smält och luttra klart.

Under Flat Flame-försöket observerade smältare och glasarbetare sporadiskt flagor av något material som tycktes komma från brännaren eller valvet. Vid analys av en sådan flaga visade den sig innehålla kol och mycket små mängder av antimon. Storleken på flagan var 2-3 mm i diameter. Fenomenet visar att koksbildning också kan förekomma i små mängder i Flat Flame-brännaren då gastemperaturen stiger över krackningstemperaturen för gasen. Detta kan inträffa om brännarens gastillförsel inte strypts fullständigt vid igensättningen. Med en riktig reglering av brännaren elimineras koksningens problemet fullständigt med Flat Flame-brännaren.

#### 4.3 SMÄLTCYKEL

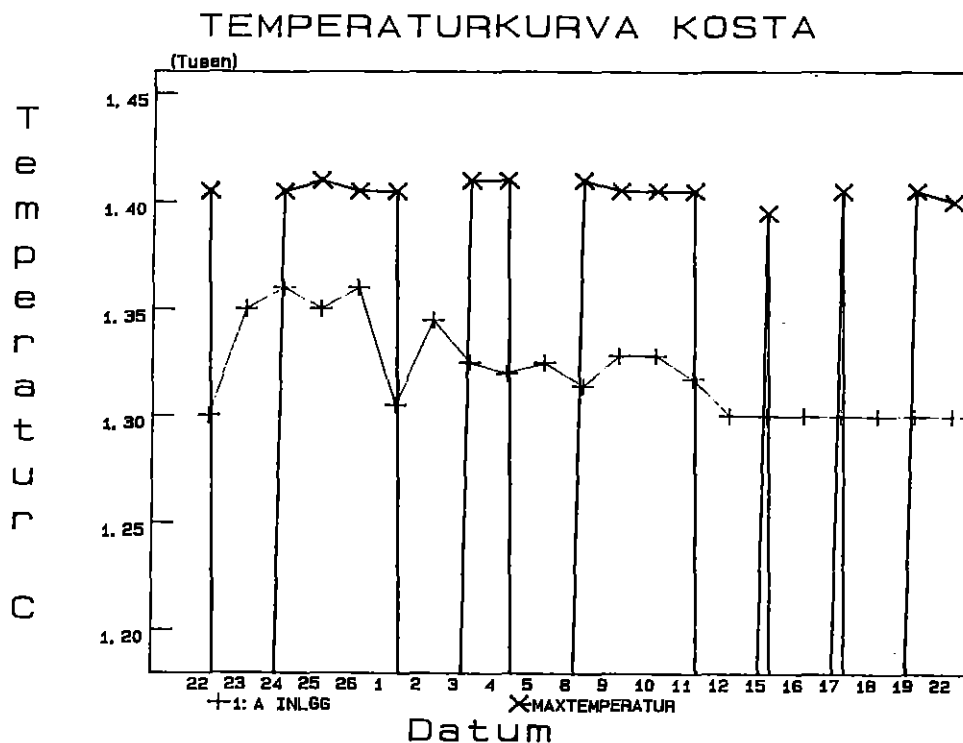
##### 4.3.1 Flat Flame-kombinationen

Då iläggen skedde vid samma drifttemperatur som i ordinarie ugnar bildades vita kristaller på glasytan och runt degelkanten i nivå med ytan. Kristallerna analyserades och man konstaterade att dessa bestod av osmält sand.

Fenomenet förekommer till och från i alla typer av degelugnar och kan bero på att flussmedlet smälter vid lägre temperatur än sanden och hinner reagera med andra föreningar än med sandkornen innan dessa hinner lösas upp fullständigt.

Vid en hastig och kraftig uppvärmning av mängden reagerar så stor del av flussmedlet snabbt med andra föreningar att sanden inte kan smälta alls vid de temperaturer som används vid glasframställning. Vid en något mindre reaktionsgrad för flussmedlet höjs glasets smälttemperatur så att det vid kalldrag in i ugnen fryser och bildar kiselkristaller.

Felet eliminerades genom att bibehålla normala dragförhållanden i ugnen samt att chargerar och smälta ner mängden vid en lägre temperatur enligt driftermoelement än vad som användes från början, figur 21.



**Figur 21** Temperaturdiagram för G2 för de första fyra veckornas produktion. + anger temperatur vid första inlägg, x maximitemperatur för smältan. Under inkörningen varierades temperaturen vid första inlägget och fastställdes så småningom till 1300 °C.

Inläggstemperaturen minskades successivt och sattes sedan till det fixa värdet 1300 °C. Denna temperatur bibehölls ända till sista inlägget var nedsmält och blanksmältningsperioden började och temperaturen reglerades upp till maxtemperatur 1400 °C.

Det faktum att den troliga reaktionen av flussmedel med andra föreningar upphörde eller minskade då inlägget av mängd skedde vid en lägre temperatur bekräftar att strålningen från en Flat Flame-brännare är betydligt effektivare än en vanlig brännare.

#### 4.3.2 BUSS1-kombinationen

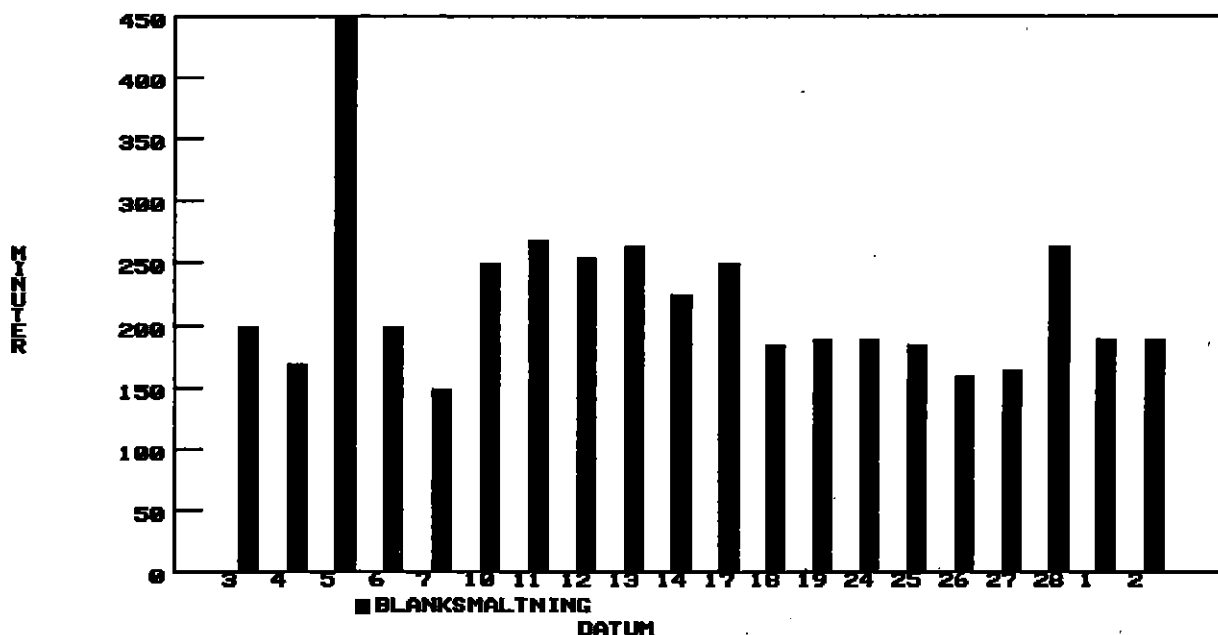
Vid detta försök återgick man till att smälta på samma sätt som vid konventionell smältning. Temperaturen ökas kontinuerligt till börvärdet 1400 °C utan att invänta smältning vid 1300 °C vilket var fallet vid det första försöket. Temperaturförloppen för de loggningar som gjordes under BUSS1-försöket visas i bilaga 3.

Den undre brännaren var ur funktion under vissa smältor. Vid dessa tillfällen kördes ugnen med endast den övre brännaren. Detta medförde en reducerad toppeffekt vilket fick till följd att smälttiden ökade med ca 30 minuter. Figur 22 visar blanksmältningstiden för G2 under maj månad. Från den 10 till den 14 värmdes ugnen med endast övre brännaren. En ökad blanksmältningstid under perioden är tydlig.

UGN:g2

DATUM:1993-05-01 - 1993-06-02

BLANKSMÄLTNINGSTID KOSTA



Figur 22 Blanksmältningstider för G2 under maj. Att stapeln för den 5/5 går utanför diagrammet beror på att data för datumet saknas. Tiderna för perioden med endast en brännare är klart längre än övriga tider.

#### 4.4 GLASKVALITET

Glaskvaliteten har bedömts utifrån glasets bearbetningsbarhet då det tas från ugnen, statistik från synning efter kylningen samt omdömet från syningspersonalen vid slutsynningen. Efter kylningen plockas de glas som skall kasseras bort och vid slutsynning sorteras glasets i prima och sekunda vara.

Med hjälp av statistiken från kylrörssynningen har man tagit fram kurvor för procentandel produkter med glasfel och typ av glasfel. Så länge summa glasfel befinner sig under 10 % kan man säga sig ha en acceptabel glaskvalitet.



#### 4.4.1 Flat Flame-kombinationen

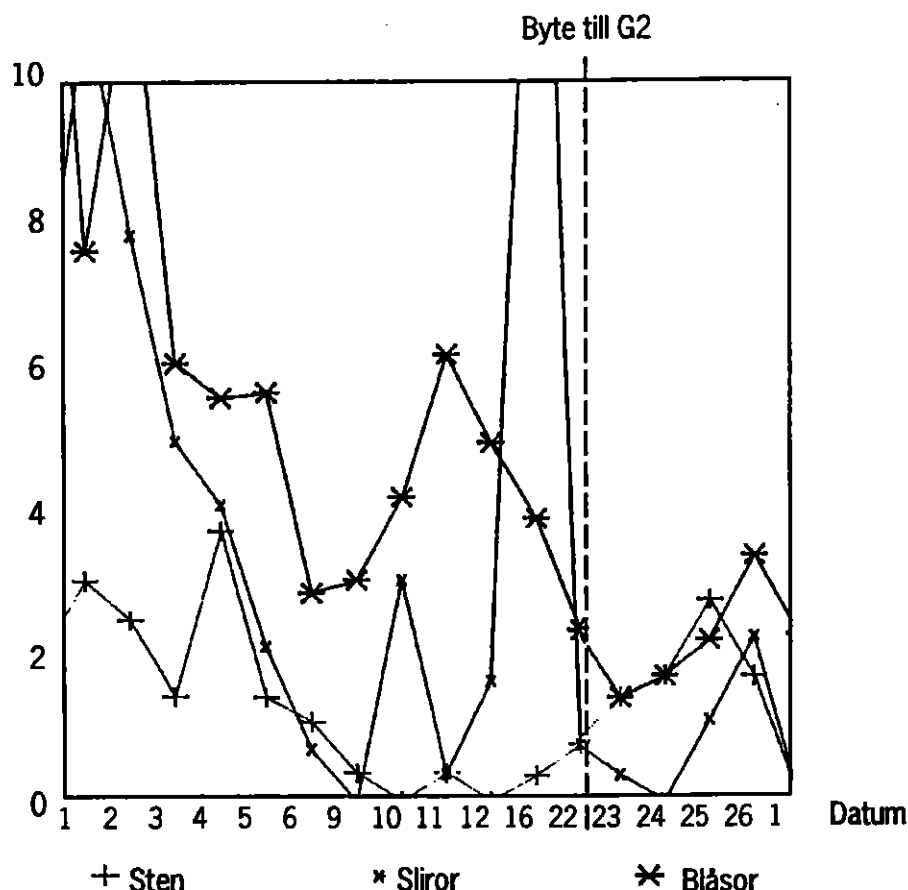
##### 4.4.1.1 Omdömet från produktionen

Den allmänna uppfattningen bland driftansvariga, glasarbetare och syningspersonal var att primautbytet vid produktion av samma sortiment ökade vid övergång till FE-ugnen. I normala fall sorteras en del av det glas som godkänts efter kylröret till sekunda och en del till prima sortering i slutsyningen. I fallet med G2 är en större andel glas än normalt prima sortering, vissa dagar upp till 100 %.

Ur arbetsmiljösynpunkt var omdömet om brännarkombinationen mycket gott. Värmestrålningen från anfangsöppningen var mindre eller lika stor som den från en oljeugn och mindre än den från elugnar. Ljudnivån var inte högre än från någon annan typ av ugn. Glasytan hade bättre anfangsegenskaper vid värmning med Flat Flame-brännaren jämfört med olje- och elugnar.

##### 4.4.1.2 Kvalitet vid syning efter kylrör

Innan försöken startade arbetade G2:s verkstad tillsammans med en annan verkstad i en el-ugn. Man kan tydligt se en förbättring av glaskvaliteten vid byte till G2, figur 23. Ugnen gav mycket bra glas redan från första smältan. Emellertid ökade totala procentandelen glas med fel successivt från ca 3 % till över 8 % under den första veckan då smältcykel och ugnsgleringen anpassades efter G2:s egenskaper. Slutliga dagsmedelvärdet för veckan blev 5,10 %.



**Figur 23** Antalet glasfel fördelat på blåsor, sliror och sten för verkstad 4. Verkstaden övergick den 22/2 från en elugn till G2. En dramatisk sänkning av antalet glasfel för verkstaden noterades.

Försöksperioden med Flat Flame-brännaren sträcker sig från första smältan vecka 8 till och med vecka 14. Vid utvärderingen räknas vecka 11 bort på grund av ett onormalt stort antal glasfel. Glasfelen är av samma karaktär som tidigare, det vill säga osmält sand eller kristalliserat glas på ytan och runt degelkanten. Orsaken kan vara det kalldrag som bildades då tryckregleringen havererade. Fenomenet försvann då normala tryck- och dragförhållanden upprättats igen.

Produktionsresultat för försöket med Flat Flame-brännaren i jämförelse med en oljeugn under samma period visas i figur 24 och 25 samt i tabell 3. Figur 24 visar totalt antal glasfel i procent och figur 28 felen uppdelade på % sten, % sliror och % blåsor för Flat Flame-kombinationen i ugn C3 och G2.

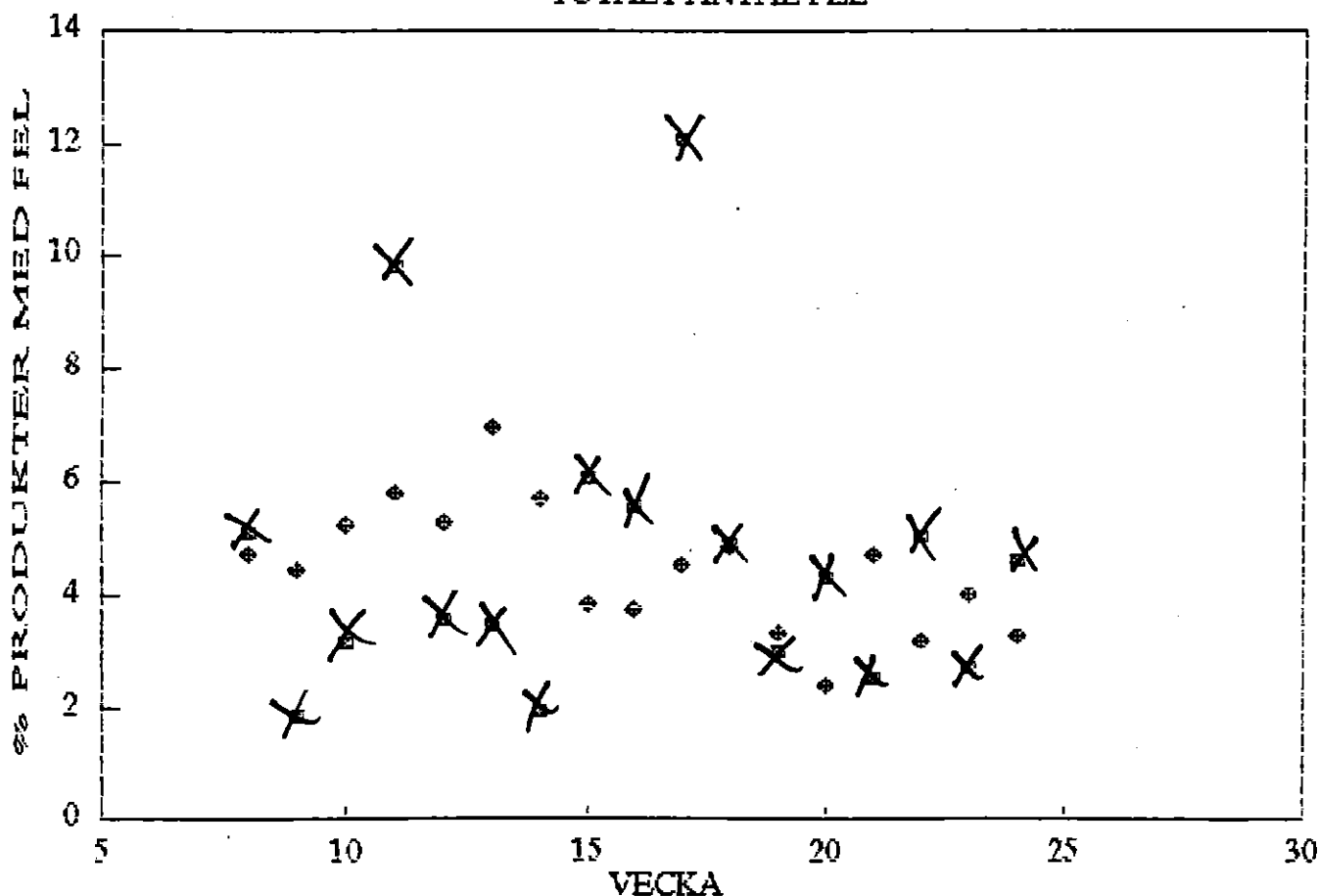
Tabell 3 Veckomedelvärde % glasfel per dag Flat Flame.

V.	% sten	% sliror	% blåsor	s:a G2	s:a C3
8	1,77	1,02	2,31	5,10	4,71
9	0,73	0,30	0,80	1,83	4,44
10	0,82	0,90	1,41	3,13	5,24
12	1,81	0,83	0,91	3,55	5,31
13	2,16	0,08	1,22	3,46	6,96
14	0,76	0,10	1,09	1,95	5,74

Tabellens dygnsmedelvärde för summa fel för hela perioden är för G2 3,20 % och för C3 5,33 %. Om första produktionsveckan räknas bort för G2 blir resultatet 2,79 %. Hänsyn har tagits till att vissa veckor endast innehåller 3 eller 4 arbetsdagar.

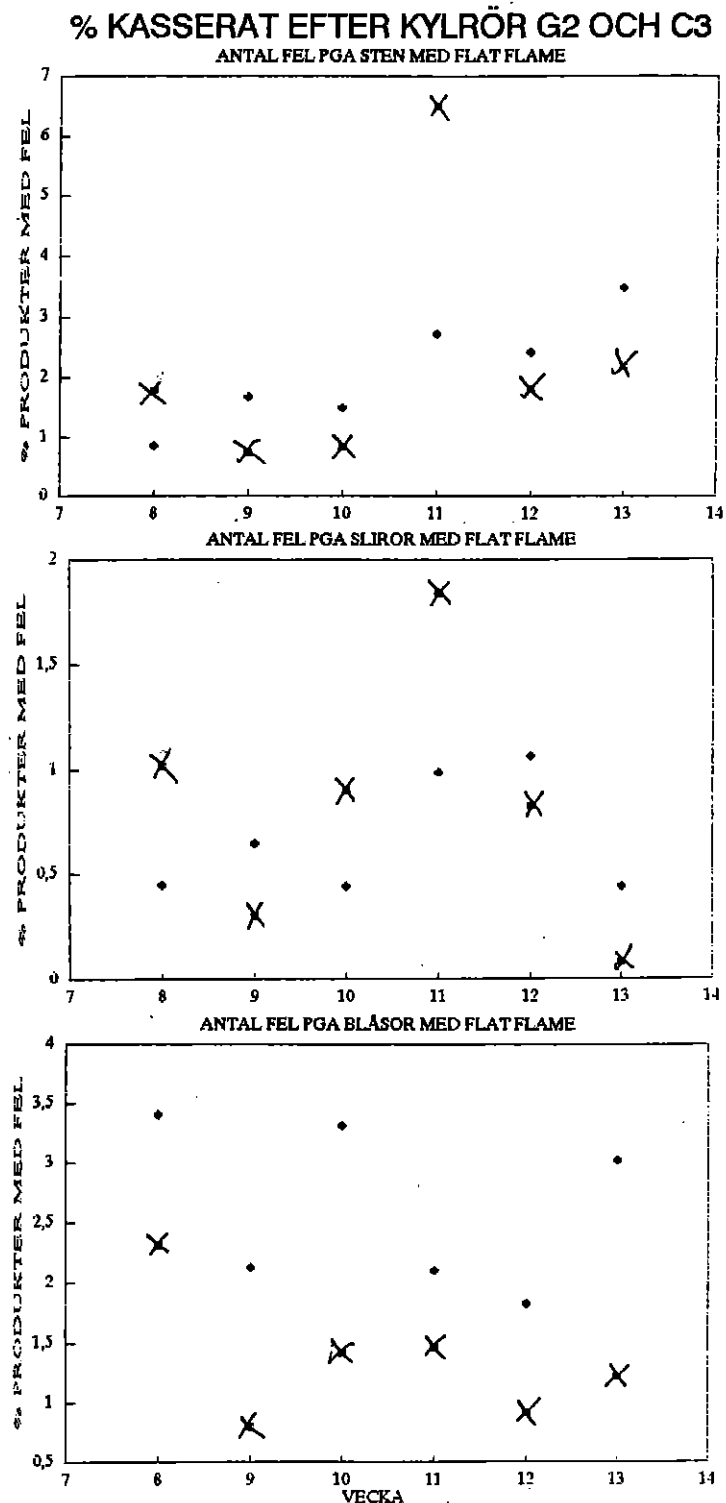
## % KASSERAT EFTER KYLRÖR G2 OCH C3

TOTALT ANTAL FEL



Figur 24 Summa kasserat glas i % av produktion som dagsmedelvärde per produktionsvecka. Flat Flame-försöket räknas till och med v 14, BUSS1-försöket från v 16. X=G2, +=C3.

Figur 24 visar tydligt att summa % glasfel från G2 under Flat Flame-försöket ligger på eller under halva antalet från C3. Undantag är G2:s inkörningsperiod första veckan och v 11.



Figur 25 De tre diagrammen visar hur stor procent av producerat glas som kasseras efter kylröret på grund av a) sten, b) sliror eller c) blåsor. Värdet anges som dagsmedelvärde per vecka. X=G2, +=C3.

Diagrammen i figur 25 delar upp glasfelen i sten, sliror och blåsor. Skillnaden mellan ugnarna är störst för % blåsor där G2 vid samtliga tillfällen ligger under halva C3:s antal.

Också antal stenar är lägre för G2, förutom för v 8 och 11. Att antalet sliror är lägre för G2 än för C3 framgår inte lika tydligt av diagrammet, men visas då medelvärde för hela försöket beräknats.

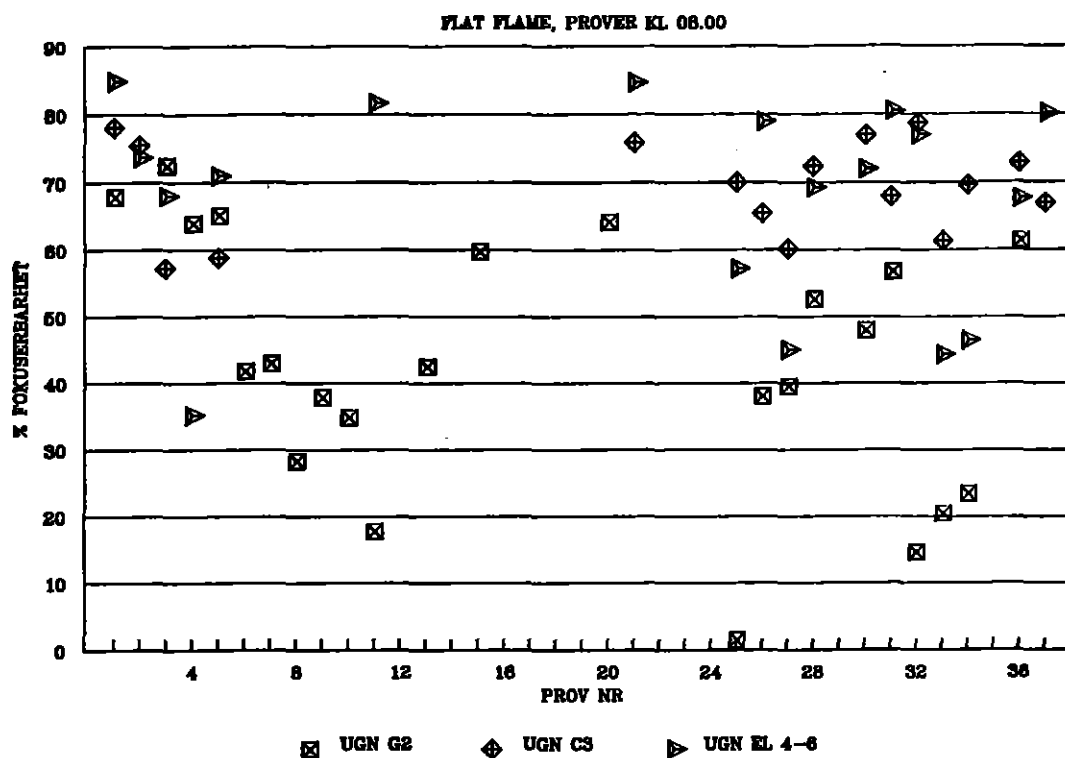
Från vecka 9 kan man säga att ugnen var injusterad och produktionen löpte normalt. Antal produkter med glasfel ligger under vecka 9 och 10 i snitt på 2,48 %. Medelvärdet för den oljeeldade ugnen är under samma period 4,84 %.

#### 4.4.1.3 Lasermätningar

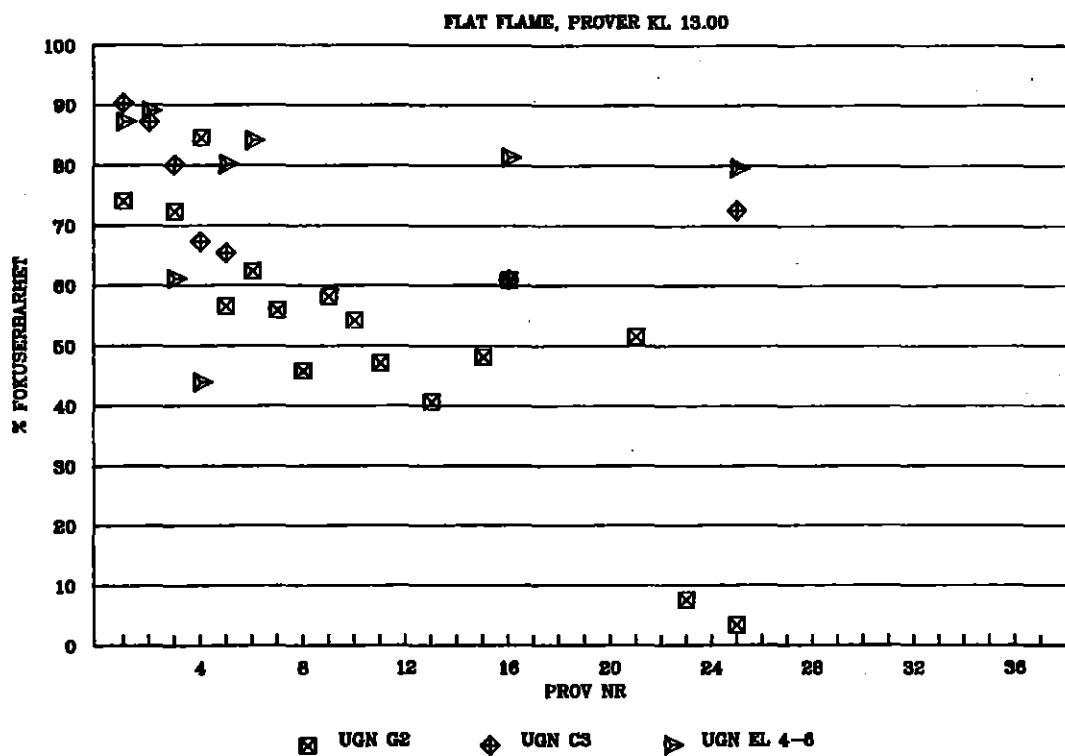
Lasermätningar gjordes med avseende på transmission och fokuserbarhet. Transmissionsmätningar ger en grov fingervisning om glasets kvalitet. Mätning av fokuserbarheten är en noggrann teknik som ger mer användbara värden. Det är alltså fokuserbarheten som fått vara måttet på glasets homogenitet i utvärderingen av glasets kvalitet med de olika brännarkombinationerna.

I figur 26 presenteras fokuserbarheten för prover som är uttagna kl 08.00. G2 visar en betydligt ojämna och sämre kvalitet än de båda andra glasen.

Resultatet är uppseendeväckande eftersom syningsresultaten under försöket var mycket bra, liksom omdömet från glasarbetarna. Figur 27 från samma ugnar under samma period med provtagning klockan 13.00.



**Figur 26** Fokuserbarhet för glas från G2, provtagning kl 08.00, i jämförelse med ett referensmaterial från el- och oljeugnar. G2 visar ett ojämnt resultat i motsats till syningen under samma period.



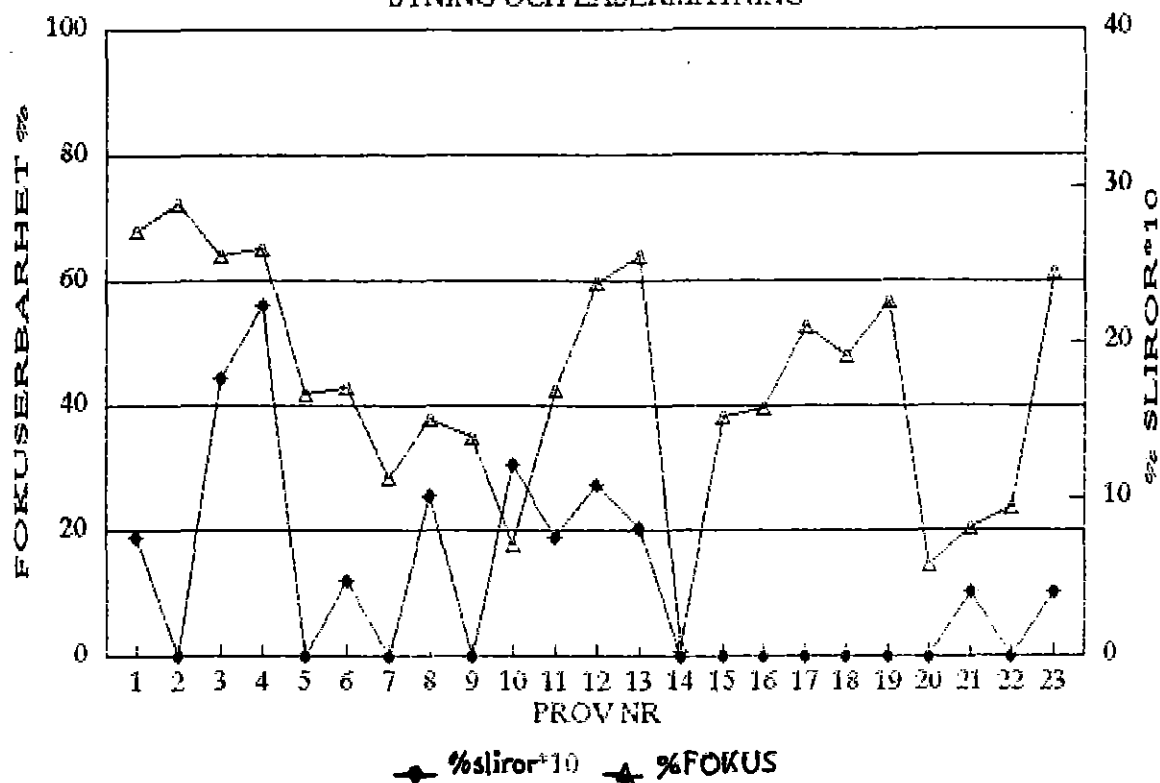
**Figur 27** Fokuserbarhet för G2, provtagning kl 13.00, i jämförelse med referensmaterial från el- och oljeugnar.

Som jämförelse har syningsresultatet med avseende på sliror ritats in i samma diagram som fokuserbarheten, figur 28. Vid nor-

mala förhållanden ger ett stort antal sliror en låg fokuserbarhet och vice versa. I fallet med Flat Flame-försöket kan man få uppfattningen att förhållandet skulle vara det motsatta.

## GLASKVALITETSANALYS G2

SYNING OCH LASERMÄTNING



**Figur 28** I diagrammet har syningsresultat och resultatet från mätningarna av fokuserbarheten lagts in. Diagrammet visar att låg fokuserbarhet skulle medföra hög glaskvalitet, vilket verkar orimligt.

Diskussioner har förts om hur fenomenet skulle kunna uppstå. Teorier har framförts om att fenomenet kan bero på glasytans temperatur vid Flat Flame-försöken.

Glasytan utsätts för strålning från Flat Flame-brännaren och valvet. Eftersom gasflammans strålning ligger i ett våglängdsområde där glasets transparens är 10-40 % tränger den kraftiga värningen endast ner ett par cm i glaset. Detta gör att den blir något varmare än vad som är normalt i en degel. Effekten har varit gynnsam för glasformningen.

Vid vanlig produktion anfångas glas bara från den varma ytan. Det anfångade glaset är därför jämnvarmt. Vid provtagning där-

emot tas glaset upp med en kula som sitter längst ut på en stång. Kulan rullas i glaset och tar med glas från 5-7 cm djup. Om det råder en stor temperaturgradient i glaset i detta skikt kan kulans anfångning ge glas med sliror med ursprung i från just temperaturens inverkan. Temperaturen kan bland annat påverka sammansättningen (på grund av avdunstning eller diffusion), ytspänning och viskositeten hos glaset. Flera av dessa faktorer i samverkan skulle eventuellt kunna vara orsaken till de sliror som observerats i provbitarna.

#### 4.4.2 BUSS-brännarkombinationen

##### 4.4.2.1 Omdömet från produktionen

Ugnen fungerar som en normal oljeeldad ugn med avseende på värmestrålning, buller och glasets bearbetbarhet. Detta innebär att den är acceptabel att arbeta vid och att den kan smälta ett glas med god kvalitet.

##### 4.4.2.2 Kvalitet vid syning efter kylrör

Försöket med BUSS-brännaren löpte från vecka 16 till och med måndag vecka 24. På grund av låg produktion med litet statistiskt underlag de första veckorna grundar sig slutsatserna på försöksveckorna 18 till och med 23. En sammanställning av resultatet redovisas i tabell 4. Samma siffror ligger till grund för figur 29.

**Tabell 4** Veckomedelvärde % glasfel per dag BUSS1.

V.	% sten	% sliror	% blåsor	s:a G2	s:a C3
18	0,95	2,69	1,28	4,92	4,89
19	1,73	0,33	0,95	3,01	3,33
20	1,36	0,14	2,79	4,29	2,39
21	0,69	0,42	1,41	2,52	4,71
22	0,71	0,00	4,35	5,06	3,21
23	0,68	0,27	1,78	2,73	4,04

Tabellens dygnsmedelvärde för summa fel för hela perioden är för G2 3,67 och för C3 3,88. Hänsyn har då tagits till att vissa veckor endast innehåller 3 eller 4 arbetsdagar.