

1 Förord.

Detta är ett examensarbete utfört av Gunnar Johansson och Kaj Jonasson. Arbetet har utförts vid institutionen för Reglerteknik, Lunds Tekniska Högskola under 1978. Handledare har varit Matz Lenells. Arbetet behandlar uppställandet av en matematisk modell för en stegbalksugn vid Oxelösunds Järnverk.

Abstract

At Oxelösund Steel Work a walking beam furnace is used for slab reheating.

The furnace has very great energy consumption, about 30000 tons of oil per year, so it is advisable to improve the automatic control of the furnace.

In order to understand the process and to get a model to apply an improved automatic control on, we have made a mathematical model, which simulate a part of the furnace.

The model is programmed in Pascal, and the simulations to verify it is executed on a PDP 11/03.

2 Sammanfattning.

Vid Oxelösunds Järnverk användes en stegbalksugn för uppvärmning av ämnen till ett valsverk. Stegbalksugnen har hög energiförbrukning, cirka 30000 ton olja per år. Det är därför önskvärt att effektivt kunna styra ugnen och därmed minimera energiförbrukningen. För att förstå processen och få en modell att applicera styrlagar på har vi ställt upp en matematisk modell för ugnen. För att verifiera modellen har olika simuleringar gjorts. Dessa har körts på en PDP 11/03.

Svårigheterna med att göra modellen var större än beräknat och målet att få en färdig fungerande modell för ugnen har ännu ej uppnåtts. Problemet har dock definierats och vår förhoppning är att detta ska ge en god vägledning åt efterföljare.

Innehållsförteckning.

	sid.	
1	Förord	I
2	Sammanfattning	II
3	Beskrivning av ugnen	1
3.1	Ugnens läge och roll vid verket	1
3.2	Ugnens funktion	2
3.3	Brännarna	3
3.4	Problemställning	4
4	Beskrivning av modell av ugnen	5
4.1	Energiflödena i ugnen som vi har approximerat dem	5
4.2	Matematiska modeller, ekvationer	9
5	Beskrivning av simuleringsprogram	19
5.1	Beskrivning av program slabtemp	19
5.2	Beskrivning av program walltemp	24
5.3	Beskrivning av program ugn	26
5.4	Beskrivning av program testugn	28
6	Programlistor och simuleringsresultat	29
6.1	Flödesschema och programlista för programmet slabtemp	29
6.2	Flödesschema och programlista för programmet walltemp	36
6.3	Flödesschema och programlista för programmet testugn	43
6.4	Flödesschema för programmet ugn	46
7	Slutord	48
8	Källförteckning	50
9	Figurbilaga	51
10	Appendix	1
11	Diskett med program	

3 Beskrivning av ugnen.

3.1 Ugnens läge och roll vid verket.

Stegbalksugnen vid Oxelösunds Järnverk är av fabrikat TEG-OFU, Dusseldorf. Den togs i drift 1971. Tillsammans med två kontinuerliga genomskjutsugnar används den för att värma upp stålämnen till en temperatur där de är valsbara. Detta sker vid ungefär 1250 C.

Ugnarna får sina ämnen i huvudsak från den kontinuerliga gjutningen som äger rum i en byggnad vid sidan av valsverksbyggnaden. Se fig. 1.

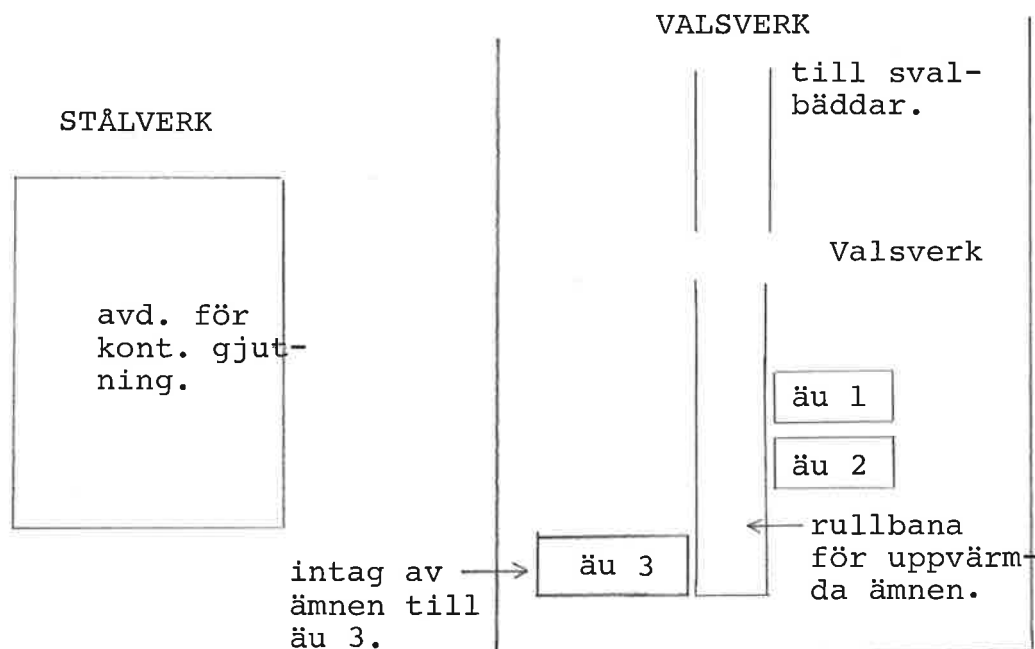


Fig. 1. Stegbalksugnen s läge vid Oxelösunds Järnverk.

Stegbalksugnen, ämnesugn 3 (äü 3), levererar, till valsverket, två ämnen på samma tid som de kontinueru-
gnarna äü 1 eller äü 2 levererar ett ämne. Efter vals-
verket följer svalbäddar och uppdelning av ämnen efter
deras tjocklek för vidare bearbetning.

Vid kontinuerlig drift användes i regel två av ämnes-
ugnarna. Den tredje får under tiden genomgå erforderlig
service. Eftersom det är en omständlig procedur, vad
avser tid och energi, att ta ugn i och ur drift är

det önskvärt att minimera antalet byten av ugnar i drift.

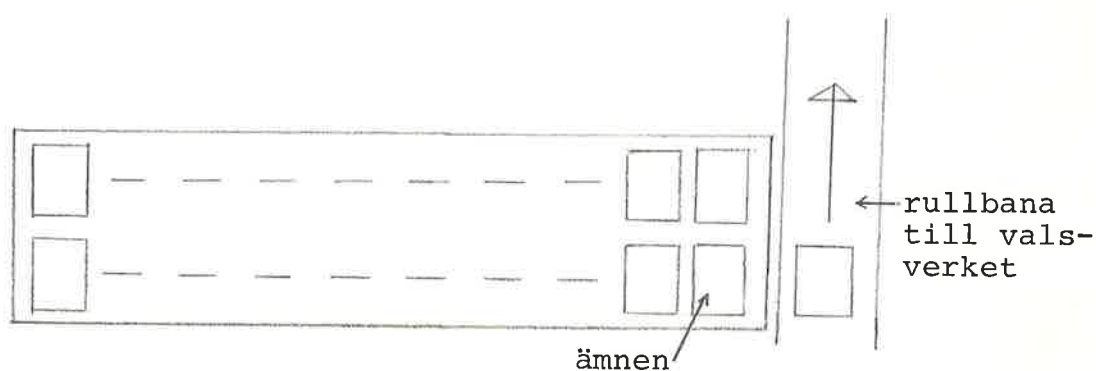
3.2 Ugnens funktion.

Stegbalksugnen har fått sitt namn av att ämnen vilar på balkar. Ugnens härd är 40.8 m lång och 8 m bred. Den har plats till två parallella ämnessträngar. Varje ämne får ha ett största mått av 2.3×3.5 m. Ämnestjockleken kan variera upp till 400 mm men är i praktiken mindre. Ugnen får i huvudsak sina ämnen från den kontinuerliga gjutningen. Dessa ämnen har en tjocklek av 225 eller 280 mm.

Ämnet skjuts in i ugnens ena gavel och plockas ut ur den andra gaveln med hjälp av en gaffel som skjuts in under ämnet. Ämnet läggs sedan ner på rullbanan för transport till valsverket. Vid varje förflyttning av ämnen i ugnen flyttas de stegvis framåt så att det efter varje förflyttning ligger ett nytt ämne på det gamla ämnets plats. Synkroniseringen är viktig ty annars skulle ämnen komma fel då de lyfts ur ugnen. Framflyttning av ämnen sker med hjälp av elektriska motorer. Stegbalkens ramar med ställbara löpskenor vilar på lyftaggregatets excenterrullar. Rullarna är förbundna med varandra genom axlar som, via snäckväxlar, drivs av likströmsmotorer. Vid framflyttning rör sig en hel ämnessträng. De båda ämnessträngarna rör sig oberoende av varandra. För att balkarna inte ska förstöras fordras att de kyls. Detta sker genom cirkulerande kylvatten i balkarna.

3.3 Brännarna.

Brännarna sitter i ugnens sidor i två rader.
Se fig. 2.



Ugnen sedd ovanifrån.

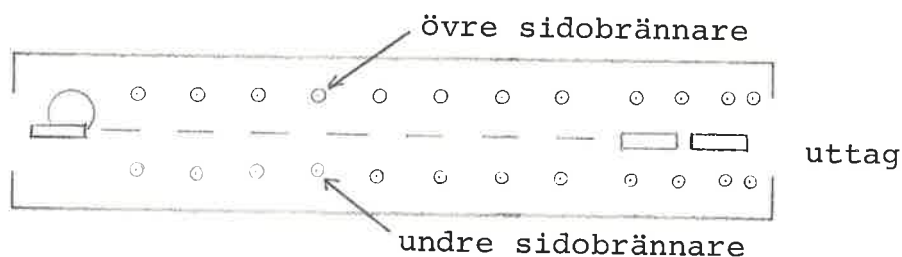


Fig. 2. Ugnen sedd från sidan.

Den övre raden brännare värmer på översidan och den undre raden brännare värmer på ämnens undersida. Brännarna är totalt 48 st. Ugnen är uppdelad i 5 zoner där alla brännare i samma zon regleras gemensamt. Den 5:e zonen är den kortaste och användes som utjämningszon. Som bränsle användes Eo 5 för zon 1 till zon 3 och koksgas till zon 4 och 5. Koksgasen fås som biprodukt vid järnverket. Oljan blandas i brännarna med förvärmad luft, omkring 420 °C. Brännarna arbetar med hög lufthastighet. Brän-

narnas låga har en hastighet av cirka 10 m/s ut över ämnet [4]. Regleringen av brännarna sker genom att ändra lufttillförselen. De oljedrivna brännarna för ämnesugn 3 förbrukar tillsammans 30000 ton olja per år. I ugnen hålls ett visst övertryck. Detta regleras med avgasutsläpp genom de två skorstenar som är placerade i den främre delen av ugnen. De båda skorstenarna regleras individuellt.

3.4 : Problemställning.

Det är önskvärt att ha en förbättrad styrning av stegbalksugnen av i huvudsak 2 skäl:

- Ugnens energiförbrukning är stor. Denna vill man minimera.
- Glödskaalsbildningen. Glödskaalsbildningen börjar få praktisk betydelse vid en ämnestemperatur högre än 850°C . Materialets oxidation ökar kraftigt vid ökad temperatur och uppvärmningstid. Därför önskar man ha så kort uppvärmningstid som möjligt.

För att kunna förbättra styrningen av ugnen behöver man en matematisk modell av ugnen.

4 Beskrivning av modell av ugnen.

4.1 Energiflödena i ugnen som vi har approximerat dem.

Enligt en energibalans för hela ugnen gäller följande energiförhållanden.[2]

Av all energi som tillförs ugnen kommer

71.9% från oljan

1 % från ämne

14.5% från luft

0.1% från finfördelningsånga

12.1% från cirkulerande kylvatten

0.3% från övrigt kylvatten

Av all energi som bortförs, sker

30.7% med ämne

14.5% med luft

29.8% med avgas

22.4% med cirkulerande kylvatten

0.8% med övrigt kylvatten

1.8% med ugnsförluster

Eftersom energi som tillförs och energi som bortförs är lika stora så är procentsiffrorna för tillförsel och bortförsel direkt jämförbara.

Av detta ges att energitillförsel sker nästan uteslutande med oljan och bortförseln sker med ämne, avgaser, cirkulerande kylvatten och ugnsförluster.

Omräknat i nettotillförsel så svarar oljan för 100%.

Av nettobortförseln sker

41.5% med ämne

41.5% med avgaser

14.0% med cirkulerande kylvatten

3.0% med ugnsförluster

Energi från finfördelningsånga och energi som går bort med övrigt kylvatten samt nettoenergi från luft approximeras till noll.

Vid energibalansen för hela ugnen är förluster genom cirkulerande kylvatten betydande, men om hänsyn tages endast till att simulera uppvärmning av stålämnen kan den förlusten anses kompenserad av att brännarna på undersidan ger cirka 15% mer energi än de på översidan.[3] Räknas dessa 15% bort på undersidans oljeinflöde kan uppvärmningen av ett ämne anses vara lika stor på översidan som på undersidan. Värmefördelningen i ugnen blir lika på översidan och undersidan och beräkningen behöver endast göras på översidan.

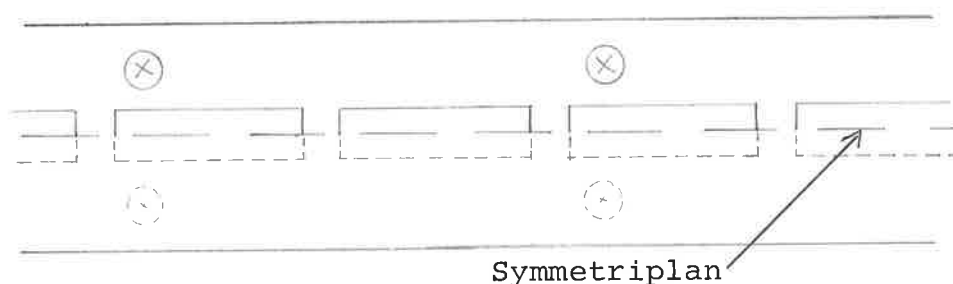


Fig. 3. Ugnen schematiskt sedd från sidan.

Eftersom det sitter brännare på båda sidor i ugnen är de båda ämnessträngarna lika behandlade. Beräkningen göres därför endast för en ämnesrads övre halva.

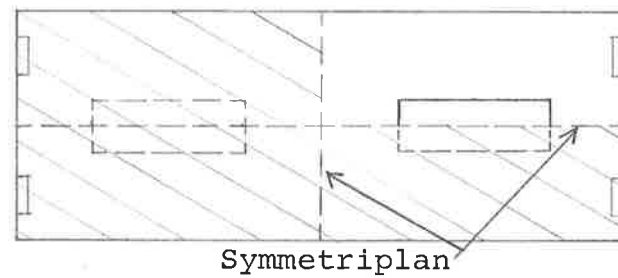


Fig. 4. Ugnen schematiskt sedd från gavelsida.

Utefter ugnens längdsriktning finns en värmefördelning. Ugnen har ej samma temperatur i början som i mitten osv. Denna temperaturfördelning har approximerats med ett antal zoner utefter ugnen, med konstant temperatur. Modellen har lika många zoner som det finns ämnen i ugnen.

En kontrollvolym är den volym som begränsas av ugnsväggar, zongräns, symmetriplan och ämnesyta. Kontrollvolymerna numreras från 1 till N , där N är antalet ämnen i en ämnesrad. Kontrollvolym (k.v.) 1 är den som ligger först i ugnen och k.v. N ligger närmast uttaget. När ämnena flyttas i ugnen antags de flyttas i ett steg från en k.v. till nästa. A kommer att hamna på B:s plats. Se fig. 6.

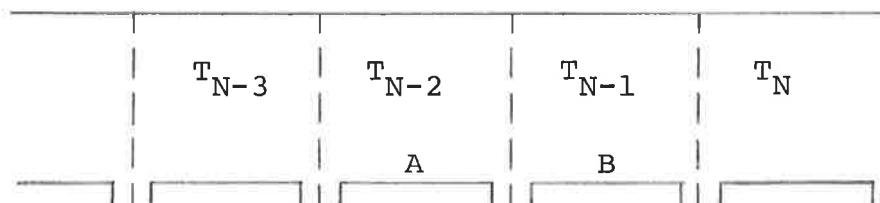


Fig. 6. Ugnen sedd från sidan med kontrollvolymerna utritade.

Begreppet kontrollvolym har vi infört för att kunna dela upp ugnen i zoner med konstanta temperaturer. Ekvationer kan också ställas upp för massbalans och energibalans i varje kontrollvolym. I denna användes beteckningar enligt fig. 7.

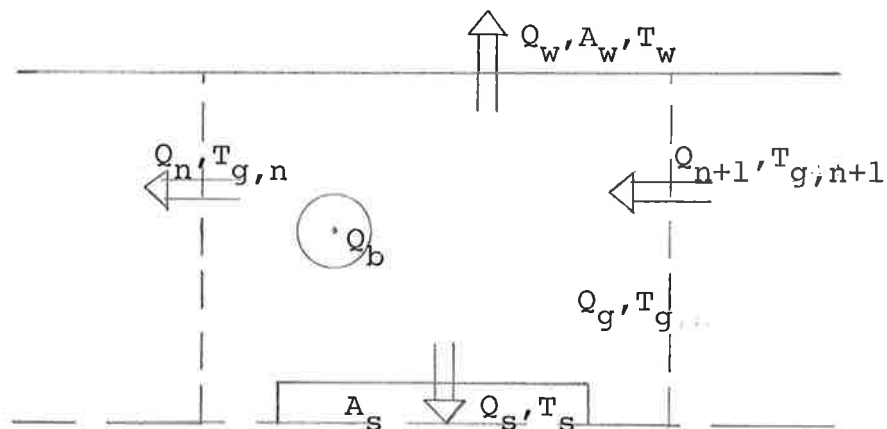


Fig. 7. De olika beteckningar som gäller för en kontrollvolym.

$$q_s = \frac{dQ_s}{dt} \quad \text{energi in i ämnet per tidsenhet.}$$

$$q_w = \frac{dQ_w}{dt} \quad \text{energi in i vägg per tidsenhet.}$$

$$q_{n+1} = \frac{dQ_{n+1}}{dt} \quad \text{energi in i k.v. från k.v. med} \\ \text{högre ordningstal per tidsenhet.}$$

$$q_b = \frac{dQ_b}{dt} \quad \text{energi in i k.v. genom brännare} \\ \text{per tidsenhet.}$$

$$q_g = \frac{dQ_g}{dt} \quad \text{energiökning per tidsenhet i k.v.} \\ \text{p.g.a. temperaturhöjning.}$$

$$q_n = \frac{dQ_n}{dt} \quad \text{energi ut ur k.v. till k.v. med} \\ \text{lägre ordningstal per tidsenhet.}$$

4.2 Matematiska modeller, ekvationer.

4.2.1 Värmeinflöde-och värmefördelning i ämnet.

Ett ämne som ligger i ugnen får sin värme från väggar och avgaser, dels genom strålning och dels genom värmeövergång från de varma avgaserna, s.k. konvektion.

Den huvudsakliga värmeöverföringen sker genom strålning.

Väggarna strålar ut (enligt Stefan-Boltzmanns lag)

$$q_w = A_w \sigma \epsilon_w F_{12} T_w^4 \quad \text{J/s} \quad (4.2.1.1)$$

som träffar ämnet.

Ämnet strålar ut

$$q_s = A_s \sigma \epsilon_s F_{21} T_s^4 \quad \text{J/s} \quad (4.2.1.2)$$

som träffar väggen.

Nettoenergin in i ämnet ges av ekvationen

$$q_{ws} = A_w \sigma F_{ws} (T_w^4 - T_s^4) \quad \text{J/s} \quad (4.2.1.3)$$

Denna härledes med hjälp av q_w och q_s .

Faktorn F_{ws} är en funktion av $\epsilon_s, \epsilon_w, F_{12}$ och F_{21} .

Avgaserna bildas vid förbränning av olja - luft blandning som kommer in genom brännarna. Avgaserna blir mycket heta och det är genom denna förbränning som energi tillförs ugnen. På samma sätt som för väggen kan man härleda en ekvation för energiflöde in i ämnet genom strålningsutbytet med avgaserna.

$$q_{gs} = A_g \sigma F_{gs} (T_g^4 - T_s^4) \quad \text{J/s} \quad (4.2.1.4)$$

Denna ekvation bygger på approximationen att avgaserna kan ses som en strålande fast kropp samtidigt som avgaserna inte absorberar något av strålningen som går igenom den från vägg till ämne.

Genom konvektion överförs energimängden

$$q_{konv} = H_s A_s (T_g - T_s) \quad \text{J/s} \quad (4.2.1.5)$$

per tidsenhet till ämnet.

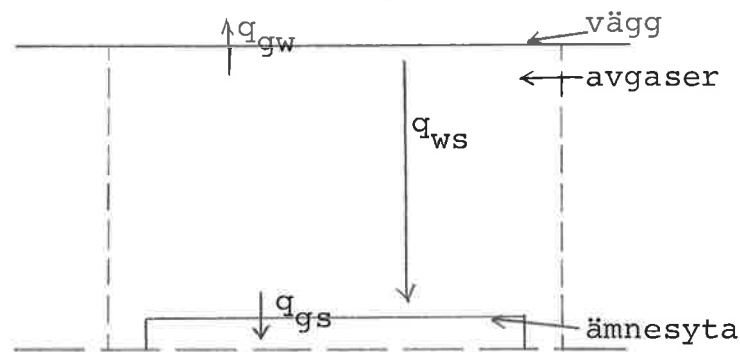


Fig. 8.

Summan av q_{gs} , q_{ws} och q_{konv} ger hur mycket energi som går in i ämnet per tidsenhet vid givna T_s och T_g . Detta användes för att simulera uppvärmning av ett ämne. Fig. 10 visar hur temperaturerna T_s , T_w och T_g varierar då ett ämne går med konstant hastighet genom ugnen. Modellen som, simulerar uppvärmningen av ett ämne, skall ge ämnestemperaturen T_s enligt fig. 10 om T_g och T_w varierar enligt fig. 10.

Ämnet består av homogent järn. Vi behandlar

endast värmefördelningen i tvärled och antar alltså att ämnet inte har någon temperaturfördelning utefter ytan. Temperaturförhållanden i ämnet ges av värmeledningsekvationen i en dimension.

$$\rho_s c_p \frac{\partial T_s}{\partial t} = K_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x_s^2} \quad (4.2.1.6)$$

För att lösa denna ekvation behövs randvärdestemperaturer vid ytan och i mitten. Temperaturen i ämnet antages vara symmetriskt fördelad m.a.p. ett horisontellt plan genom mitten.

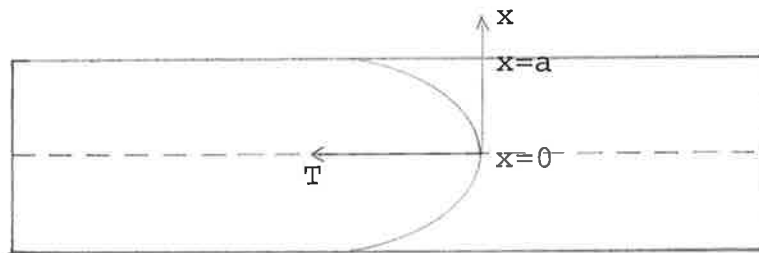


Fig. 9. Temperaturfördelning i ett ämne.

Detta ger

$$T_s(x) = T_s(-x) \quad (4.2.1.7)$$

Den energi som kommer in genom ytan måste befinna sig i jämvikt med den energimängd som per tidsenhet kan ledas in i ämnet. Om man anser att temperaturerna är kvasistationära erhålls den i ämnet bortledda energin av Fouriers ekvation för stationär värmeledning.

$$A_s K_s \frac{dT_s}{dx} \quad (4.2.1.8)$$

Yttemperaturen kan beräknas enligt

$$A_s K_s \frac{dT_s}{dx_s} = A_g F_{gs} \sigma (T_g^4 - T_s^4) + A_w F_{ws} \sigma (T_w^4 - T_s^4) + H_s A_s (T_g - T_s) \quad (4.2.1.9)$$

För att beräkna värmefördelningen i ämnet har vi använt Finita differensmetoden.

Ämnets temperaturfördelning approximeras till

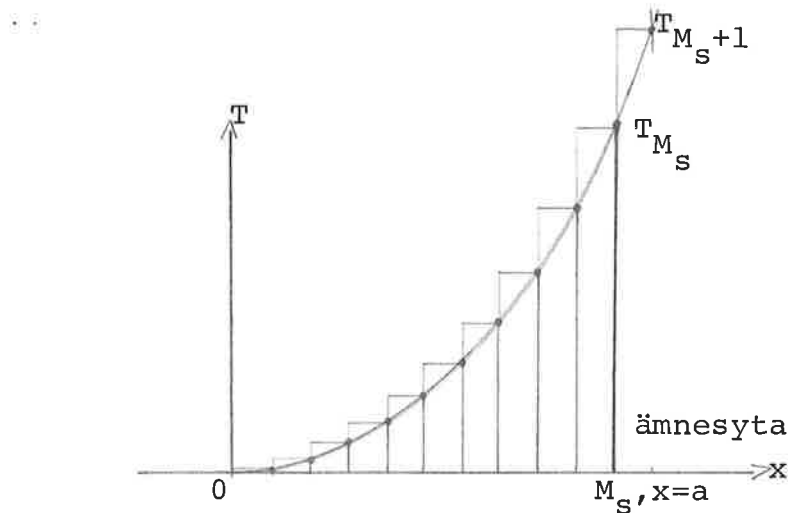


Fig. 12. Temperaturfördelningen appr. styckvis konst. Om indelningen göres tillräckligt fin (dx_s göres tillräckligt liten, $M_s = a/dx_s \times 2$ väljes tillräckligt stor), så blir felet p.g.a. detta antagande försumbart.

Värmeledningsekvationen skrivs som en differens-
ekvation

$$\rho_s C_{p_s} \frac{(T_n(t+dt) - T_n(t))}{dt} = K_s \frac{(T_{n-1}(t) - 2T_n(t) + T_{n+1}(t))}{(dx_s)^2} \quad (4.2.1.10)$$

där index n hänför sig till temperaturer i x -led som är numrerade från 0 till M_s .

Med hjälp av denna differensekvation kan ämnes-
temperaturen för tiden $t+dt$ beräknas ur temperatur-
värden vid tiden t .

Ekv. 4.2.1.10 kan skrivas

$$T_n(t+dt) = T_n(t) + \frac{K_s dt}{\rho C p_s (dx_s)^2} (T_{n-1}(t) - 2T_n(t) + T_{n+1}(t))$$

(4.2.1.11)

Då $T_M(t+dt)$ skall beräknas behövs en temperatur T_{M+1} . Denna får vi ur ekv. 4.2.1.9. som beräknar randvärdestemperaturen på ytan. T_{M+1} tilldelas denna temperatur.

Ekv. 4.2.1.9 får, omformad till differens-ekvation, utseendet

$$T_{M_s+1}(t) = T_{M_s-1}(t) + \frac{2dx_s}{A_s K_s} (A_s \sigma F_{gs} (T_g^4(t) - \frac{1}{K_s} T_{M_s}^4(t)) + A_s \sigma F_{ws} (T_w^4(t) - T_{M_s}^4(t)) + A_s H_s (T_g(t) - T_{M_s}(t)))$$

(4.2.1.12)

Med givna begynnelsevärden på alla temperaturer i ämnet och givna T_g och T_w kan temperaturfördelningen beräknas i ämnet både som funktion av parametern x i ämnet och som funktion av tiden. Detta har vi gjort med T_g och T_w tidsberoende enligt fig. 10 och fått yt- och mittemperatur på ämnet som överensstämmer med fig 10.

4.2.2 Värmeinflöde och värmefördelning i ugnsväggar.

Ugnsväggarna värms genom strålning och genom värmeledning från avgaserna och kyls av ämnena p.g.a. strålningsutbytet.

Beräkningen av värmefördelningen göres på samma sätt som för ämnet i kapitel 4.2.1, men med andra randvärdesekvationer och materialkonstanter. Värmeledningsekvationen för väggar

$$\rho C_p \frac{\partial T_w}{\partial t} = K_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} \quad (4.2.2.1)$$

Ugnsväggarna består av flera lager tegel med olika egenskaper samt bärande balkar av järn. Vi har emellertid antagit att väggen kan behandlas som homogen med materialkonstanter som då blir något slags medelvärden av de riktiga. Randvärdet på insidan blir analogt med (4.2.1.9) för ämnet

$$\begin{aligned} A_w K_w \frac{dT_w}{dt} &= A_w \sigma F_{gw} (T_g^4 - T_w^4) + A_w \sigma F_{sw} (T_s^4 - T_w^4) \\ &+ A_w H_w (T_g - T_w) \end{aligned} \quad (4.2.2.2)$$

Randvärdestemperaturen på yttersidan av ugnen har vi satt till en konstant temperatur. Efter att ha konfererat med ing Christer Enström vid Oxelösunds Järnverk har vi valt temperaturen till 70 C.

4.2.3 Modell och ekvationer för en kontrollvolym.

För en kontrollvolym gäller energi- och massbalans. Energitillflöde till en k.v. kommer från brännarna och med avgasernas värmeinhåll från k.v. med högre ordningstal samt strålning från närliggande kontrollvolymer. Energibortflöde sker till ämne och väggar genom strålning och konvektion samt med de utgående avgasernas värmeinhåll och till uppvärmning av gasen som finns i kontrollvolymen samt strålning till närliggande kontrollvolymer.

Energitillflöde genom brännarna = $q_b = \dot{m}_b (H_u + m_l \times H_l)$.

Massflöde genom brännarna = $\dot{m}_b (1 + m_l)$.

Energitillflöde genom avgaser = $q_{n+1} = \dot{m}_{in} C_p T_{g,n+1}$.

Massflöde med avgaser = \dot{m}_{in} .

Energibortflöde till ämne = $+q_s$.

Energibortflöde till väggar = q_w .

Energibortflöde till uppvärmning av gas = $+q_{kv}$:

$$q_{kv} = m C_p \dot{T}_{g,n}$$

Energibortflöde med avgaser = $q_n = \dot{m}_{ut} C_p T_{g,n}$.

Massbortflöde med avgaser = \dot{m}_{ut} .

Energitillflöde genom strålning = $q_{stråln,in}$.

Energibortflöde genom strålning = $q_{stråln,ut}$.

Energiflödesbalans

$$q_b + q_{n+1} - q_s - q_w - q_{k.v.} - q_n = 0 \quad (4.2.3.1)$$

Massflödesbalans

$$\dot{m}_b (1 + m_l) + \dot{m}_{in} - \dot{m}_{ut} = 0 \quad (4.2.3.2)$$

I energiflödesbalansen har vi ej tagit med $q_{stråln,ut}$ eller $q_{stråln,in}$ eftersom vi antar att de är lika stora. Antagandet bygger på att närliggande kontrollvolymer är antingen helt symmetriska med eller har endast liten skillnad i väggtemperaturen jämfört med aktuell kontrollvolym, så instrålad effekt bör vara lika stor som utstrålad effekt.

Den energimängd som går in i ämnet på en viss tidsenhet är

$$dtq_s = dt(q_{gs} + q_{ws} + q_{konv}) \quad (4.2.3.3)$$

Q_{gs}, q_{ws} är energiinflöde p.g.a. strålningsutbyte med gasen resp. väggen. Betrakta t ex q_{ws}

$$q_{ws} = aT_w^4 - bT_s^4 \quad (4.2.3.4)$$

Koefficienterna a och b är invecklade funktioner av areorna, emissionskoefficienter för gasen, väggen och ämnet och de geometriska synfaktorerna som anger hur mycket av en ytas utstrålade energi som träffar den andra ytan. I koefficienterna a och b har vi tagit med absorptionen i gasen men låtit emission av gasen behandlas som en fristående yta analogt med en väggyta. Det finns andra teorier där man tar hänsyn till även emissionen i koeff. a och b . Dessa alternativa härledningar finns i [5] och [1]. Se vidare appendix.

Summan av q_{gs} och q_{ws} ger energiinflöde p.g.a. strålning

$$s_{11}T_s^4 + w_{11}T_w^4 + g_{11}T_g^4 \quad (4.2.3.5)$$

Nettoenergiinflöde i ämnet per tidsenhet blir

$$q_s = s_{11}T_s^4 + w_{11}T_w^4 + g_{11}T_g^4 + g_{12}T_g + s_{12}T_s \quad (4.2.3.6)$$

Denna energimängd skall ledas in i ämnet.

Ämnet kommer därvid att värmas upp, men eftersom järn har en begränsad värmeledningsförmåga kommer endast ett ytskikt att hinna värmas upp under ett kort tidsintervall.

Temperaturhöjningen i detta ytskikt sker enligt:

$$q_s = dx_s A_s \rho_s C_{p_s} \frac{dT_{M_s}}{dt} \quad (4.2.3.7)$$

Ekv. (4.2.3.6) och (4.2.3.7) ger, skriven som differensekv.

$$T_{M_s}(t+dt) = \frac{dt}{dx_s A_s \rho_s C_{p_s}} (s_{11} T_s^4 + s_{12} T_s + w_{11} T_w^4 + g_{11} T_g^4 + g_{12} T_g) + T_{M_s}(t) \quad (4.2.3.8)$$

På samma sätt erhålles yttemperaturen för väggen.

$$T_{M_w}(t+dt) = \frac{dt}{dx_w A_w \rho_w C_{p_w}} (s_{21} T_s^4 + w_{21} T_w^4 + w_{22} T_w + g_{21} T_g^4 + g_{22} T_g) + T_{M_w}(t) \quad (4.2.3.9)$$

Energibalansen kan skrivas

$$q_{k.v.} = q_b + q_{n+1} - q_s - q_w - q_n$$

enligt ekv. (4.2.3.1). Detta är ekvivalent med.

$$m C_{p_g} \frac{dT_g}{dt} = q_b + q_{n+1} - q_s - q_w - q_n \quad (4.2.3.10)$$

Skriven som en differensekvation ger ekv.

(4.2.3.10) ett uttryck för gastemperaturen, ett tidssteg framåt, i en kontrollvolym som funktion av yttertemperatur för ämne och vägg.

$$T_g(t+dt) = T_g(t) + \frac{dt}{mCp_g}(q_b + q_{n+1} - q_s - q_w - q_n)$$

(4.2.3.11)

Med ekv. (4.2.3.8), (4.2.3.9) och (4.2.3.11) kan yttemperaturerna på ämne och vägg samt gastemperaturen successivt beräknas för nya tider. För tillräckligt litet dt är beräkningen stabil.

5 Beskrivning av simuleringsprogram.

5.1 Beskrivning av program slabtemp.

5.1.1 Vad gör programmet?

Med utgångspunkt från de temperaturprofiler som ugnsfabrikanten har gett för gas- och väggtemperaturer beräknar program slabtemp temperaturen för ämnet utefter ugnen. Se fig. 10 vilken visar temperaturkurvor för gas och vägg samt för ämne, vilken vi då med program slabtemp ska beräkna. Målet för programmet är att ge samma ämnestemperaturer som ugnsfabrikantens temperaturkurva ger. Kurvorna gäller i detta fall för en kapacitet av 75 ton per timma. Bilden ovanför kurvorna visar ugnen sedd från sidan med de olika oljebrännarna och ugnsektorerna utritade.

5.1.2 Hur fungerar programmet?

Programmet använder Fouriers värmeledningsekvation. För närmare beskrivning se kap. 4.2.1. Värmeledningsekvationen löses med Finita differensmetoden med randvärden. Temperaturen på ämnesytan beräknas med hjälp av gas- och väggtemperaturer. Se fig 13.

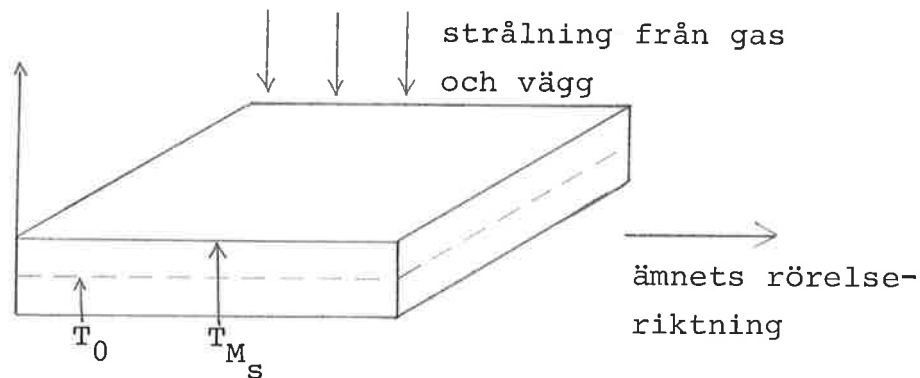


Fig 13.

Yttemperaturen T_{M_s+1} beräknas med hjälp av temperaturer för vägg och gas. För temperaturer i ämnet mellan T_0 och T_{M_s} användes Finita differensmetoden. Randvärdet $y = -1$ sätts lika med temperaturen för $y = 1$. Detta på grund av den symmetriska värmefördelningen i ämnet.

Programmet följer ett ämne som skjuts in i ugnen. Då ämnet skjuts in håller det rumstemperatur. Då ämnet plockas ut 4.3 timmar senare, håller det en temperatur av 1280°C . I programmet anger "time" hur länge ämnet har legat inne i ugnen. Eftersom ämnet förflyttas med konstant hastighet vet vi var i ugnen ämnet är beläget.

Programmet är uppbyggt av ett antal procedurer som anropas ihuvudprogrammet. Beskrivningen nedan följer flödesschemat i kap. 6.1.

Startup.

I denna procedur:

- ges numeriska värden på fysikaliska storheter.
- sätts begynnelsestemperatur för ämnet, vilken antas vara rumstemperatur.

- frågar operatören efter:
 - ämnestjocklek, a .
 - hur fin indelning av ämnet, antalet
 - segment, M_s . Se kap 4.2.1 speciellt fig. 12.

F är en konstant som används för att få värmeledningen i ämnet att stämma överens med värmeledningen i fig. 10. Till det att man fått kurvor med bättre verifikation får man acceptera F .

I startup beräknas också värde på dt . För att programmet ska exekveras så snabbt som möjligt beräknas högsta möjliga värde på dt . Storleken på dt begränsas av talet r . r ska vara lägre än 0.5 för att den numeriska metoden ska vara stabil.[7] Därför beräknas dt för det fall dt är ogynnsammast. Detta värde hålls sedan konstant. Att det i programmet beräknade dt är det lägsta, ger högsta värde på r , inses genom studium av ekvationen i programmet samt i diagram 11.

Temperaturkurvorna i fig. 10 är approximerade med streckvis räta linjer. G_{sk} , w_{allk1} , w_{allk2} , w_{allk3} är lutningskoefficienter, i olika ugn-intervall, för dessa temperaturkurvor.

F_{ws} och F_{gs} är faktorer vilka fåtts genom sammanslagning av geometriska faktorer och emissionskoefficient. Emissionskoefficienten är temperaturberoende.

Värden på F_{ws} och F_{gs} är funna dels på teoretisk väg [1] dels på praktisk väg.

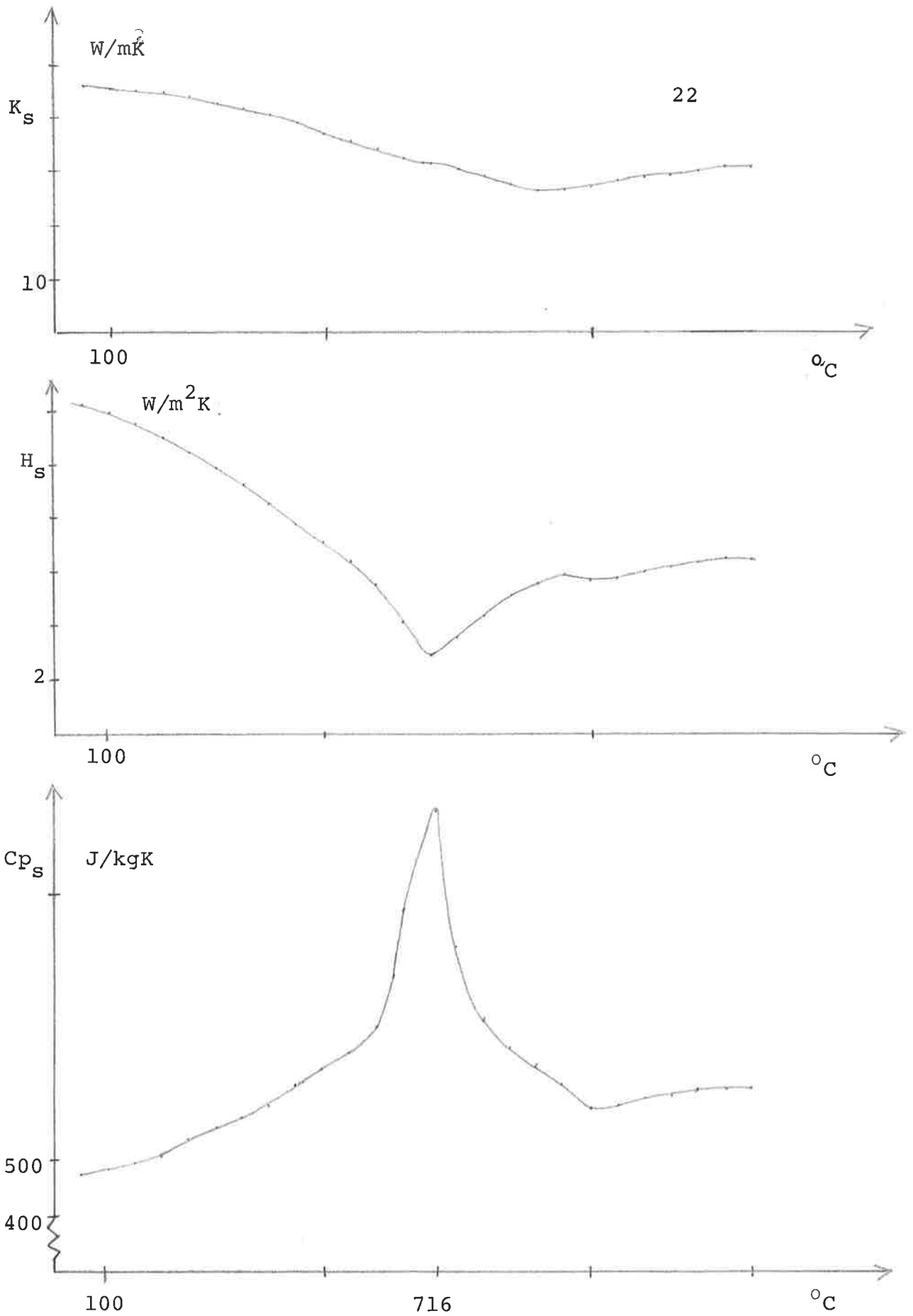


Diagram 11. Diagrammet ger K_S , H_S och C_{p_S} :s temperaturberoende. Diagrammet bygger på polynomanpassning given av Oxelösunds Järnverk.

Headline.

Proceduren ger utskrift på radskrivare av olika storheter och värden för den aktuella körningen.

Writevector.

Proceduren skriver ut de nya temperaturerna på radskrivare tillsammans med aktuell tid samt värden på r , C_{p_s} , K_s och H_s . Temperaturen längst till vänster är mitten temperaturen för ämnet, temperaturen längst till höger ger yttemperaturen.

Newtemp.

I proceduren beräknas nya temperaturer för ämnet ett tidssteg, dt , framåt. C_{p_s} , K_s och H_s är temperaturberoende. Dessa beräknas, varje gång proceduren anropas, med hjälp av polynom-anpassningar givna av Oxelösunds Järnverk. Se diagram 11. De beräknade värden på C_{p_s} , K_s och H_s behålls sedan konstanta under resten av proceduren.

Ämnets temperaturer beräknas nu med hjälp av tidigare beskrivna ekvationer. Temperaturvärden för gas och vägg hämtas från gjorda approximationer av gas och väggkurvor.

5.1.3 Resultat.

Som första ansats har konstanta koefficienter använts (dvs. ej temperaturberoende). Detta gav en hygglig approximation av kurvan för ämnet i fig. 10. Efter att ha infört temperaturberoendet i koefficienter förbättrades resultatet ytterligare. Resultat av simuleringen syns i kap. 6.1.

5.2 Beskrivning av program walltemp.

Program walltemp beräknar temperaturprofilen för väggen. Programmet har samma uppbyggnad och fungerar på samma sätt som program slabtemp. Walltemp har till uppgift att med hjälp av temperaturer för ämne och gas beräkna väggtemperaturen. Den beräknade väggtemperaturen ska då i möjligaste mån följa temperaturprofilen för väggen som är given i fig. 10.

För beskrivning av programmet se beskrivning av program slabtemp. Fysikaliska storheter som skiljer sig från slabtemp är:

C_{p_w} , värdet är hämtat från diagram 14.

K_w , värdet är hämtat från diagram 14.

Diagram 13 och 14 är givna av Oxelösunds Järnverk.

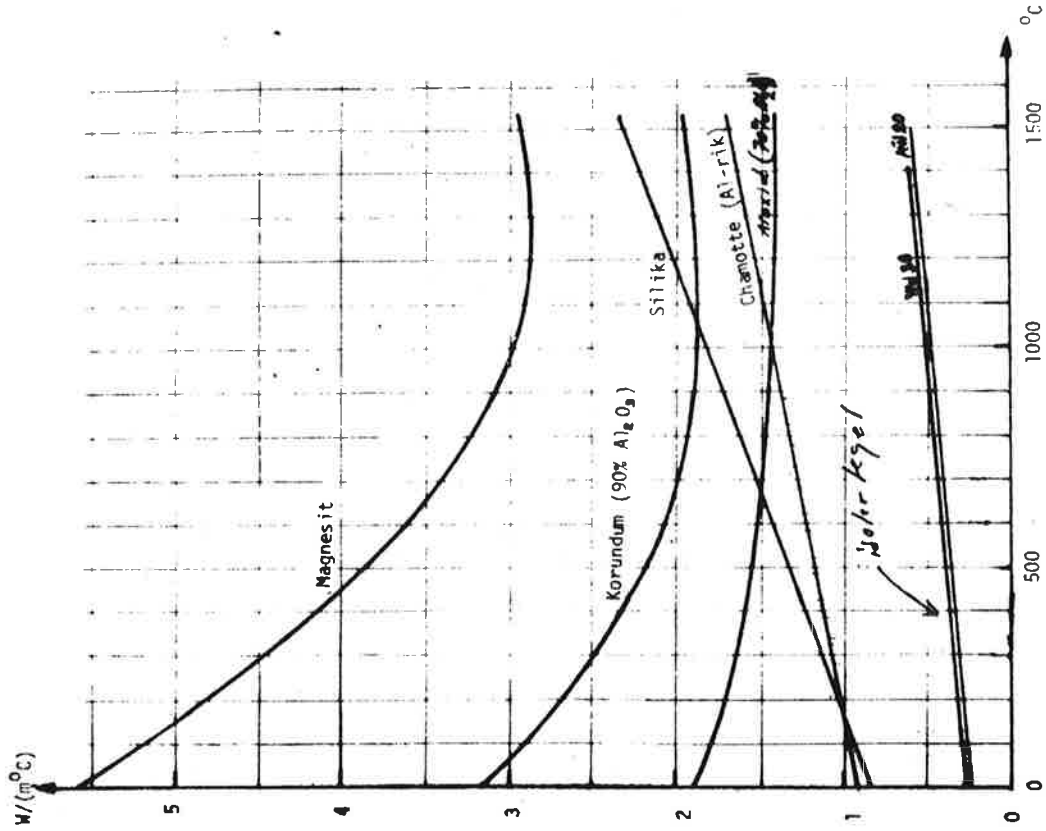
ρ_{aaw} , densiteten för väggen.

F_{gw} och F_{sw} är emissions- och geometrisk faktor för strålning gas-vägg resp. ämne-vägg.

Resultat.

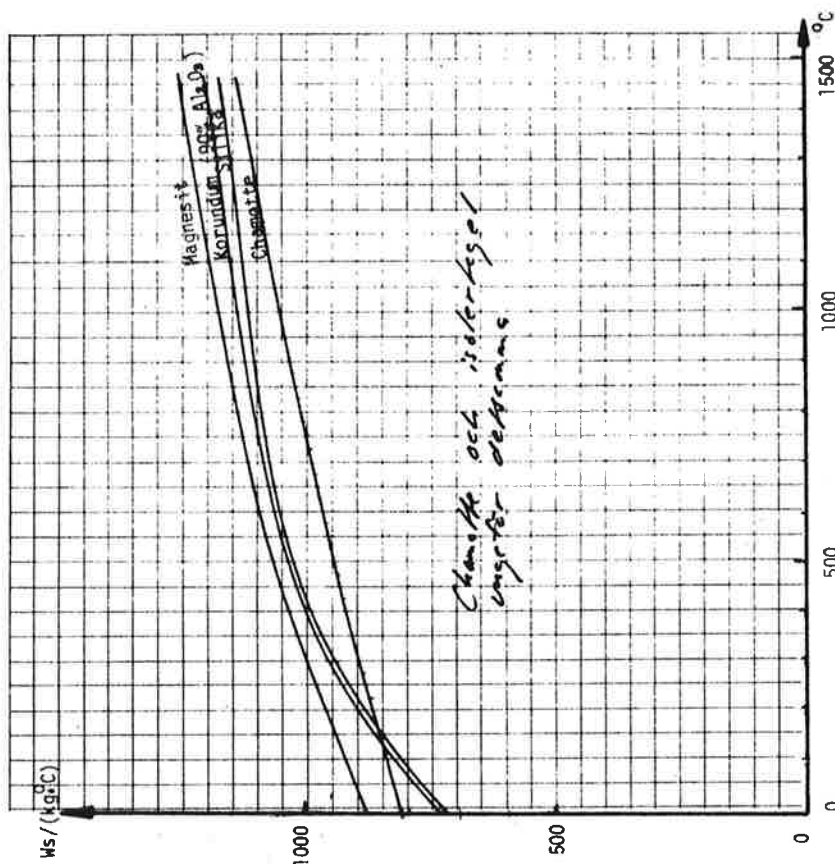
Resultatet från programmet följer fabrikantkurvan med hygglig noggrannhet. Detta gör den utan att behöva använda temperaturberoende koefficienter. Resultat av simuleringen syns i kap. 6.2.

Värmeledning - Diagram



Värmeledningsförmågan för olika elfasta material som funktion av temperaturen.

Värmeledning - Diagram



Effektiva isobara värmekapaciteterna mellan 0 $^{\circ}C$ och 1500 $^{\circ}C$ för olika tegelsorter

Chamotte 45% Al_2O_3 , 50% SiO_2	verklig densitet 2650-2750
Magnesit 90% MgO , 5% SiO_2	3400-3600
Silika 95% SiO_2	2300-2380
Korundum 90% Al_2O_3 , rest SiO_2	3550-3650

Porositet för alla omkring 20%

Diagram 14. Värmekapacitet och värmegenomgångsförmåga för ugnsväggen.

5.3 Beskrivning av program ugn.

Programmet avser att med hjälp av bränsle som inparameter beräkna temperaturer för gas, vägg och ämne. Till detta användes de båda programmen slabtemp och walltemp, då som procedurer. Flödesschemat i kap 6.4.1 visar hur programmet är tänkt att fungera.

Hela ugnen antas innehålla N kontrollvolymer lika många som det finns ämnen. Vid beräkning av nya temperaturer, $t+dt$, börjar man i N :te k.v. med att beräkna $T_g(t+dt)$ samt yttemperaturer för T_s och T_w enligt ekv. (4.2.3.8) - (4.2.3.11). Därefter beräknas värmefördelningen för ämne och vägg. På samma sätt göres därefter beräkningar för k.v. $N-1$, k.v. $N-2$, ... k.v. 1. Därefter tillbaka till k.v. N för att beräkna nya temperaturer för $t+2dt$ o.s.v. Efter en viss tid, t_f , flyttas alla ämnen i ugnen från en k.v. till den k.v. med närmast högre ordningstal. Det ämne som ligger i k.v. N kommer således att plockas ut ur ugnen. T_f är vald så att $N \times t_f$ är lika med den tid som ett ämne ligger inne i ugnen.

Som styrsignal användes bränslemängden per tidsenhet, alltså hur många kilogram olja som förbränns per tidsenhet.

Vid denna förbränning åtgår luft. Det som sprutas in igenom brännarna är en bränsle-luftblandning där luften är förvärmad till cirka 400°C . För att veta hur mycket massa som går in igenom brännarna tog vi kontakt med ett oljebolag och fick genom dem en uppskattning av oljans beståndsdelar. Med vetskap om dessa kunde vi beräkna hur mycket luft som måste till för att en fullständig förbränning av oljan ska ske. Se tabell 15.

Grundämne i bränsle g/kg	Grund- ämnets mol- vikt.	mol/kg	Mgd O ₂ för förbr. mol	Förbränningsgaser			
				CO ₂ mol/kg	SO ₂ mol/kg	H ₂ O mol/kg	N ₂ mol/kg
C 866	12	72.2	72.2	72.2	-	-	296.1
H ₂ 109	2	54.5	27.3	-	-	54.5	101.6
S 10	32	0.31	0.3	-	0.31	-	1.2
rest 15							
s:a 1000			99.8	72.2	0.31	54.5	398.9

Tabell 15. Tabell innehållande beräkning av luft- och avgasflöde.

I tabell 15 erhålls nödvändigt antal mol O₂ för att få fullständig förbränning av allt brännbart i oljan. Det behövs alltså 99.76 mol O₂ vilket svarar mot 3.19 kg O₂ vilket ger att det måste till 15.1 kg luft per kg bränsle. Detta gäller om bränsle-luftblandningen blir fullständigt blandad, i praktiken får man sätta till ett luftöverskott för att få en så fullständig förbränning som möjligt. Detta luftöverskott är enligt [8] mellan 20-100%. Vi antar 50% luftöverskott och får då 22.6 kg luft per kg bränsle.

5.4 Beskrivning av program testugn.

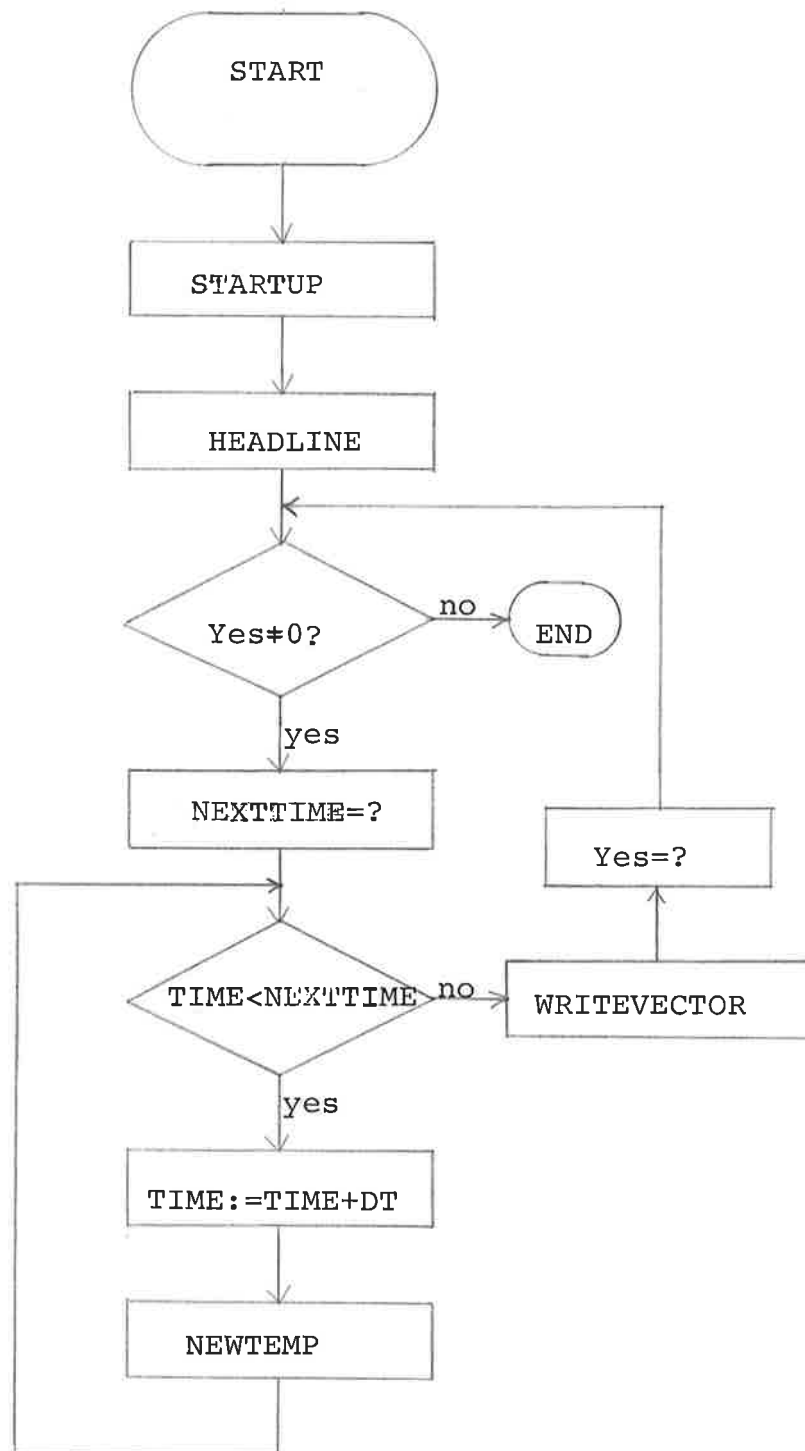
Detta är en förenklad version av ugnsprogrammet. Beräkningar göres endast för en kontrollvolym. Olika koefficienter som användes är endast uppskattade för att ge någorlunda rimlig storleksordning. Detta för att få ett så enkelt och lättöverskådligt program som möjligt. Koefficienterna i detta program är givetvis inte temperaturberoende. Programmet ger endast utskrift på bildskärm. Flödeschema och programlista finns i kap. 6.3.

Syftet med programmet är att undersöka olika möjligheter till att lösa ekvationsystemet som uppkommer då gastemperatur samt yttemperatur på ämne och vägg ska beräknas. Se kap. 4.2.4. Programmet startar med $t=0$ och alla temperaturer är satta till 293 K, rumstemperatur. I nuvarande version av programmet löses först $T_g(t+dt)$ ut ur energiekvationen för kontrollvolymen. Därefter beräknas $T_s(t+dt)$ och $T_w(t+dt)$. Felet E , som man gör genom att inte lösa ekvationsystemet, beräknas. Om felet är för stort minskas steglängden dt . Vid ett litet fel E ökas steglängden.

Den använda metoden fungerar. Vid låga temperaturer omkring 400-500 K kan steglängden hållas till 1.5 s. Vid högre temperaturer minskas steglängden till 0.3 s med den feltolerans som nu är given i programmet.

6 Programlistor och simuleringsresultat.

6.1 Flödesschema för Slabtemp.



```

type vector=array[-1..51] of real;
var Ts1,Ts2,TUT :vector;
var gask,kon1,kon2,kon3,dxs,dt,Ks,Hs,raas,Cps,a,time,nexttime,r,
SIGMA,wallk1,wallk2,wallk3,TGUT,TWUT,Te,Te2,Te3,F,Fgs,Fws :real;
var Ms,i1,i2,rows :integer;
var LP:text;

```

```

/* This function gives the walltemperature at a given time=====*/

```

```

Function Tw(time:real):real;
begin
  if time <= 7250.0 then
    Tw:=wallk1*time + 863.0
  else begin
    if time <= 9230.0 then
      Tw:=wallk2*(time-7250.0) + 1457.0
    else
      Tw:=wallk3*(time-9230.0) + 1506.0
    end;
  end;
end;

```

```

/* This function gives the gastemperature at a given time =====*/

```

```

Function Tg(time:real):real;
begin
  if time <= 6980.0 then
    Tg:=gask*time + 1023.0
  else
    Tg:= 1558.0;
  end;
end;

```

```

Procedure WRITEVECTOR(C:vector; time:real);
var nrows :integer;
begin
  TGUT := Tg(time) - 273.0;
  TWUT := Tw(time)-273.0;
  i1 := 0;
  repeat
    TUTC[i1] := C[i1] - 273.0;
    i1:= i1 + 1;
  until i1=Ms+1;
  writeln(LP,' ');
  writeln(LP,'time=',time:6:3,' Tg=',TGUT:6:0,' Tw=',TWUT:6:0);
  writeln(LP,'Ks=',Ks:6:2,' W/m*K, Cps=',Cps:6:2,' Ws/Kg*K, r=',kon1);
  writeln(LP,'at time = ',time:6:3,' the temperature is' );
  nrows:=trunc(Ms/10);
  for i1:=0 to (nrows-1) do begin
    for i2:=0 to 9 do
      write(LP,TUTC[10*i1+i2]:6:3,' ');
    writeln(LP,' ');
  end;
  for i2:=0 to (Ms-10*nrows) do
    write(LP,TUTC[10*nrows+i2]:6:3,' ');
  writeln(LP,' ');
end;

```

```

Procedure HEADLINE;
begin
  writeln(LP,' ');
  writeln(LP,'This program gives the slabtemperature at a given time');
  writeln(LP,' ');
end;

```

```

writeln(LP,' Constants' );
writeln(LP,' Slabthickness =',a:6:3,' m' );
writeln(LP,' dxs =',dxs:6:3,' m' );
writeln(LP,' dt =',dt:6:3,' s' );
writeln(LP,' Gask =',gask:6:3,' K/s' );
writeln(LP,' Wallk1 =',wallk1:6:3,' K/s' );
writeln(LP,' Wallk2 =',wallk2:6:3,' K/s' );
writeln(LP,' Wallk3 =',wallk3:6:3,' K/s' );
writeln(LP,' raas =',raas:6:3,' kg/m**m**m' );
end;

```

Procedure STARTUP;

```

begin
  rewrite(LP,'LP:');
  /* giving constants their values =====*/
  write('Slabthickness (in m) =');
  read(a);
  write('Number of steps in space ( Ms less or equal 50) Ms= ');
  read(Ms);
  gask := 0.077;
  wallk1 := 0.082;
  wallk2 := 0.025;
  wallk3 := 0.0075;
  SIGMA :=5.7E-08;
  yes := 1;
  raas := 7801.7; /* Density for the slab kg/m**m**m */
  dxs := a/(2*Ms);
  r := 0.45;
  Cps := 475.0;
  Ks := 45.8;
  F := 0.4;
  dt := trunc(r*raas*F*Cps*dxs*dxs/Ks);
  time:=0.0;

  /* giving the slab startup temperatures =====*/

  i1:= -1;
  repeat
    Ts1[i1]:=293;
    Ts2[i1]:=293;
    i1:=i1 + 1;
  until i1= Ms + 2;
end;

```

Procedure NEWTEMP(A,B:vector;time:real);

```

begin
  Te := Ts1[Ms]-273.0;
  Te2 := Te*Te;
  Te3 := Te2*Te;
  if Te<=625.0 then begin
    Ks := 45.8+1.02E-02*Te-8.44E-05*Te2+5.91E-08*Te3;
    Hs := 12.4-7.26E-04*Te-3.35E-05*Te2+2.71E-08*Te3;
    Cps := 475+5.6E-02*Te+6.86E-04*Te2; end
  else begin
    if Te <= 825.0 then begin
      Ks := 49.4-2.55E-02*Te;
      Hs := 137-0.373*Te+2.59E-04*Te2;
      Cps := -2.72E04+79.2*Te-5.53E-02*Te2; end
    else begin
      Ks := 227-0.57*Te+5.29E-04*Te2-1.59E-07*Te3;
      Hs := 55.2-0.132*Te+1.16E-04*Te2-3.33E-08*Te3;
    end
  end

```

```

end;
end;
kon1:=Ks*dt/(raas*F*Cps*dxs*dxs);
kon2:= 2.0*dxs/Ks;
kon3:= 2.0*dxs*Hs/Ks;
for i2 := 0 to Ms do begin
  Ts2[i2]:= Ts1[i2] + kon1*(Ts1[i2-1]-2*Ts1[i2]+Ts1[i2+1]);
end;
Ts2[-1] := Ts2[1];
Fgs := 1.4*(0.92-ln(Ts2[Ms])/9.0);
Fws := 0.5*(0.92-ln(Ts2[Ms])/9.0);
Ts2[Ms+1]:=Ts2[Ms-1]+kon2*(SIGMA*(Fgs*(sar(sar(Tg(time)))-
  sar(sar(Ts2[Ms]))) + Fws*(sar(sar(Tw(time)))-sar(sar(Ts2[Ms]))) +
  kon3*(Tg(time)-Ts2[Ms]));
for i1:= -1 to Ms+1 do begin
  Ts1[i1]:=Ts2[i1];
end;
end;
end;

/* MAIN PROGRAM =====*/

begin
  STARTUP;
  HEADLINE;
  while yes <> 0 do begin
    write ('nexttime = ');
    read (nexttime);
    while time < nexttime do begin
      time := time + dt;
      NEWTEMP(Ts1, Ts2, time);
    end;
    WRITEVECTOR(Ts1, time);
    write ('yes= ');
    read(yes);
  end;
  close (LP);
end.

```

This program gives the slabtemperature at a given time

Constants

Slabthickness = 0.245 m

dxs = 0.024 m

dt = 0.000 s

Qask = 0.077 K/s

Wallk1 = 0.082 K/s

Wallk2 = 0.025 K/s

Wallk3 = 0.008 K/s

raas = 7801.700 kg/m**m

time= 776.000 Tg= 810. Tw= 654.

Ks= 45.41 W/m**K, Cps= 503.77 Ws/Kg**K, r= 3.849836E-01

at time = 776.000 the temperature is

128.063 129.704 134.631 142.859 154.408 169.312

time= 1552.000 Tg= 870. Tw= 717.

Ks= 43.01 W/m**K, Cps= 550.75 Ws/Kg**K, r= 3.334945E-01

at time = 1552.000 the temperature is

249.010 250.846 256.360 265.573 278.521 295.251

time= 2328.000 Tg= 929. Tw= 781.

Ks= 39.72 W/m**K, Cps= 616.49 Ws/Kg**K, r= 2.751359E-01

at time = 2328.000 the temperature is

363.914 365.993 372.240 382.684 397.375 416.384

time= 3104.000 Tg= 989. Tw= 845.

Ks= 36.34 W/m**K, Cps= 696.17 Ws/Kg**K, r= 2.229475E-01

at time = 3104.000 the temperature is

470.113 472.466 479.536 491.363 508.013 529.580

time= 3880.000 Tg= 1049. Tw= 908.

Ks= 33.25 W/m**K, Cps= 778.94 Ws/Kg**K, r= 1.822973E-01

at time = 3880.000 the temperature is

567.585 570.221 578.148 591.421 610.135 634.418

time= 4656.000 Tg= 1109. Tw= 972.

Ks= 31.19 W/m**K, Cps= 1157.12 Ws/Kg**K, r= 1.151113E-01

at time = 4656.000 the temperature is

639.625 642.571 651.442 666.338 687.432 714.971

time= 5432.000 Tg= 1168. Tw= 1035.

Ks= 28.99 W/m**K, Cps= 764.26 Ws/Kg**K, r= 1.619985E-01

at time = 5432.000 the temperature is

716.272 719.634 729.747 746.690 770.584 801.576

time= 6208.000 Tg= 1227. Tw= 1098.

Ks= 26.55 W/m**K, Cps= 580.81 Ws/Kg**K, r= 1.951966E-01

at time = 6208.000 the temperature is

850.773 854.187 864.412 881.389 905.021 935.165

time= 6976.000 Tg= 1287. Tw= 1162.

Ks= 27.56 W/m**K, Cps= 610.45 Ws/Kg**K, r= 1.928461E-01

at time = 6976.000 the temperature is

970.961 973.953 982.909 997.756 1018.378 1044.613

time= 7752.000 Tg= 1285. Tw= 1197.

Ks= 28.77 W/m**K, Cps= 624.38 Ws/Kg**K, r= 1.968047E-01

at time = 7752.000 the temperature is

1068.581 1070.699 1077.008 1087.373 1101.577 1119.317

time= 8528.000 Tg= 1285. Tw= 1216.

Ks= 29.58 W/m*K, Cps= 630.86 Ws/Kg*K, r= 2.002842E-01
at time = 8528.000 the temperature is
1135.886 1137.306 1141.539 1148.497 1158.043 1169.985

time= 9304.000 Tg= 1285, Tw= 1234,
Ks= 30.07 W/m*K, Cps= 633.97 Ws/Kg*K, r= 2.025711E-01
at time = 9304.000 the temperature is
1182.019 1182.987 1185.872 1190.617 1197.126 1205.266

time= 10080.000 Tg= 1285, Tw= 1239,
Ks= 30.33 W/m*K, Cps= 635.40 Ws/Kg*K, r= 2.038873E-01
at time = 10080.000 the temperature is
1213.476 1214.121 1216.043 1219.203 1223.536 1228.955

time= 10856.000 Tg= 1285, Tw= 1245,
Ks= 30.48 W/m*K, Cps= 636.08 Ws/Kg*K, r= 2.046275E-01
at time = 10856.000 the temperature is
1234.576 1235.009 1236.298 1238.419 1241.330 1244.972

time= 11632.000 Tg= 1285, Tw= 1251,
Ks= 30.56 W/m*K, Cps= 636.41 Ws/Kg*K, r= 2.050491E-01
at time = 11632.000 the temperature is
1248.854 1249.148 1250.025 1251.468 1253.451 1255.936

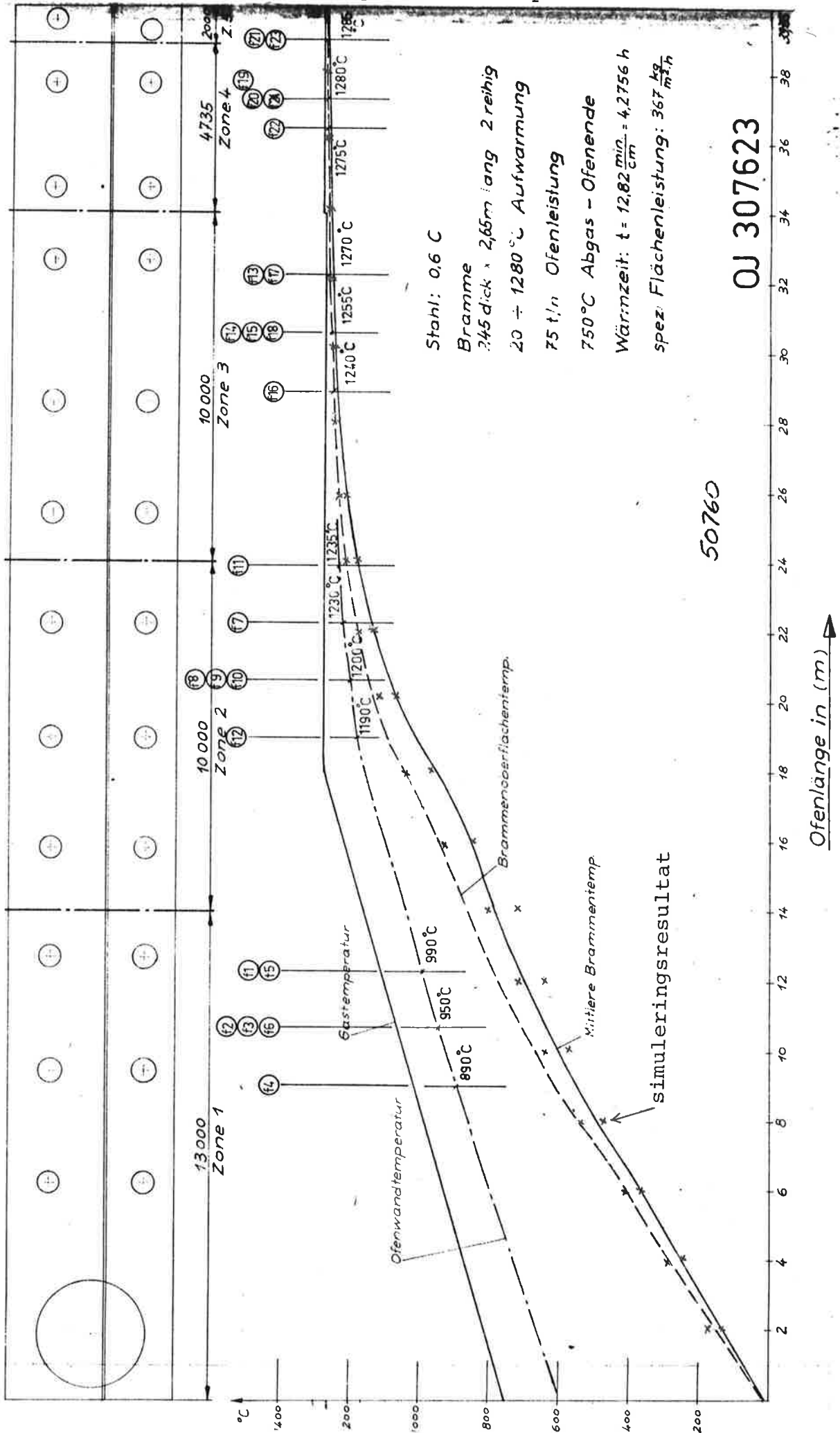
time= 12408.000 Tg= 1285, Tw= 1257,
Ks= 30.60 W/m*K, Cps= 636.57 Ws/Kg*K, r= 2.052959E-01
at time = 12408.000 the temperature is
1258.577 1258.782 1259.393 1260.399 1261.783 1263.519

time= 13176.000 Tg= 1285, Tw= 1263,
Ks= 30.63 W/m*K, Cps= 636.65 Ws/Kg*K, r= 2.054502E-01
at time = 13176.000 the temperature is
1265.494 1265.640 1266.075 1266.793 1267.782 1269.027

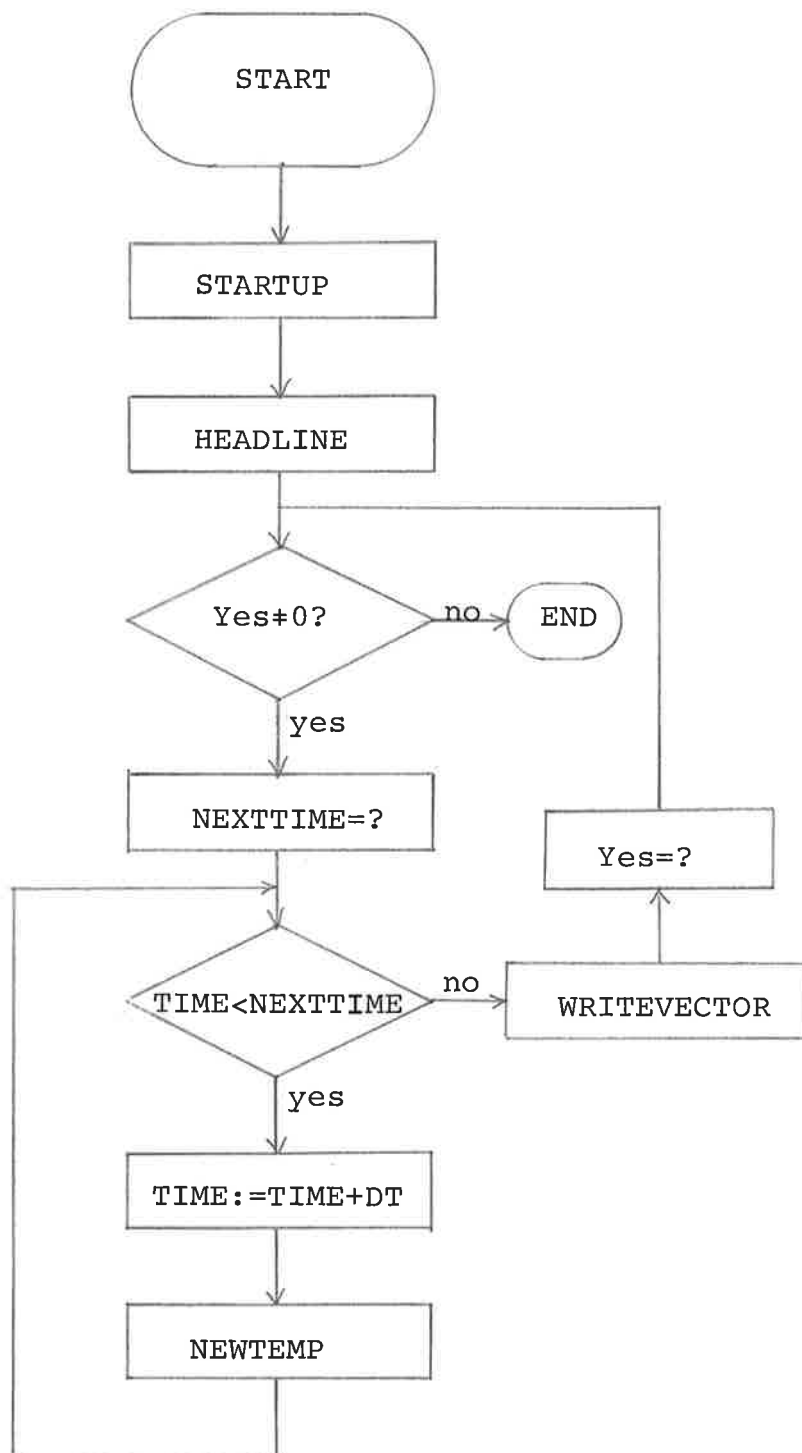
time= 13952.000 Tg= 1285, Tw= 1268,
Ks= 30.64 W/m*K, Cps= 636.70 Ws/Kg*K, r= 2.055505E-01
at time = 13952.000 the temperature is
1270.504 1270.612 1270.934 1271.465 1272.199 1273.124

time= 14728.000 Tg= 1285, Tw= 1274,
Ks= 30.66 W/m*K, Cps= 636.72 Ws/Kg*K, r= 2.056195E-01
at time = 14728.000 the temperature is
1274.281 1274.364 1274.613 1275.023 1275.591 1276.310

time= 15504.000 Tg= 1285, Tw= 1280,
Ks= 30.66 W/m*K, Cps= 636.73 Ws/Kg*K, r= 2.056701E-01
at time = 15504.000 the temperature is
1277.260 1277.327 1277.528 1277.861 1278.322 1278.909



6.2 Flödesschema för programmet Walltemp




```

type vector=array[-1..51] of real;
var Tw1,Tw2,TUT : vector;
var gask,slabk1,slabk2,slabk3,slabk4,slabk5,kon0,kon1,kon2,kon3,SIGMA,
dt,dxw,Kw,Hw,Fsw,Fsw,raaw,Cpw,b,time,nexttime,r,TGUT,TSUT : real;
var Mw,i1,i2,yes : integer;
var LP:text;

```

```

/* This function gives the slabtemperature at a given time=====*/

```

```

Function Ts(time:real):real;
begin
  if time <= 3874.0 then
    Ts:=slabk1*time + 293.0
  else begin
    if time <= 7747.0 then
      Ts:=slabk2*(time-3874.0) + 873.0
    else begin
      if time <= 9607.0 then
        Ts:=slabk3*(time-7747.0) + 1329.0
      else begin
        if time <= 11892.0 then
          Ts:=slabk4*(time-9607.0) + 1473.0
        else begin
          Ts:=slabk5*(time-11892.0) + 1528.0;
        end
      end
    end
  end
end
end
end;

```

```

/* This function gives the gastemperature at a given time =====*/

```

```

Function Tg(time:real):real;
begin
  if time <= 6980.0 then
    Tg:=gask*time + 1023.0
  else
    Tg:=1558.0;
end;

```

```

Procedure WRITEVECTOR(C:vector; time:real);
var nrow:integer;
begin
  TGUT := Tg(time) - 273.0;
  TSUT:= Ts(time)-273.0;
  i1 := 0;
  repeat
    TUTE[i1] := C[i1] - 273.0;
    i1:= i1 + 1;
  until i1=Mw+1;
  writeln(LP,' ');
  writeln(LP,'time=',time:6:3,' Tg=',TGUT:6:0,
           ' Ts=',TSUT:6:0,' ');
  writeln(LP,'at time = ',time:6:3,' the temperature is' );
  nrow:=trunc(Mw/10);
  for i1:=0 to (nrow-1) do begin
    for i2:=0 to 9 do
      write(LP,TUTE[10*i1+i2]:6:3,' ');
    writeln(LP,' ');
  end;
  for i1:=0 to (Mw-10*nrow) do

```

```

write(LP,TUTC10*nrows+i1]:6:3,' ');
writeln(LP,' ');
end;

```

Procedure HEADLINE:

```

begin
  writeln(LP,' ');
  writeln(LP,' This program gives the walltemperature at a given time ');
  writeln(LP,' ');
  writeln(LP,' Constants ');
  writeln(LP,' wallthickness =',b:6:3,' m ');
  writeln(LP,' dxw =',dxw:6:3,' m ');
  writeln(LP,' dt =',dt:6:3,' s ');
  writeln(LP,' Gask =',gask:6:3,' K/s ');
  writeln(LP,' slabk1 =',slabk1:6:3,' K/s ');
  writeln(LP,' slabk2 =',slabk2:6:3,' K/s ');
  writeln(LP,' slabk3 =',slabk3:6:3,' K/s ');
  writeln(LP,' Kw =',Kw:6:3,' W/m**K ');
  writeln(LP,' Hw =',Hw:6:3,' W/m**m**K ');
  writeln(LP,' Fgw =',Fgw:6:3,' ');
  writeln(LP,' Fsw =',Fsw:6:3,' ');
  writeln(LP,' raaw =',raaw:6:3,' kg/m**m**m ');
  writeln(LP,' Cpw =',Cpw:6:3,' Ws/Kg**K ');
  writeln(LP,' kon0 =',kon0,' ');
  writeln(LP,' kon1 =',kon1,' ');
  writeln(LP,' kon2 =',kon2,' ');
  writeln(LP,' r =',kon0,' ');
end;

```

Procedure STARTUP:

```

begin
  rewrite(LP,'LP:');
  /* giving constants their values =====*/
  write('wallthickness (in m) =');
  read(b);
  write('Number of steps in space ( Mw less or equal 50) Mw= ');
  read(Mw);
  gask := 0.077;
  slabk1 := 0.150;
  slabk2 := 0.117;
  slabk3 := 0.078;
  slabk4 := 0.024;
  slabk5 := 0.0086;
  Fgw := 0.72;
  Fsw := 0.4;
  Kw := 1.4;
  Cpw := 950.0;
  Hw := 20.0;
  yes := 1;
  SIGMA := 5.7E-08;
  raaw := 1762.0;
  dxw := b/Mw;
  r := 0.005;
  dt := trunc(r*raaw*Cpw*dxw*dxw/Kw);
  kon0 := Kw*dt/(raaw*Cpw*dxw*dxw);
  kon1 := 2.0*dxw/Kw;
  kon2 := 2.0*dxw*Hw/Kw;
  time := 0.0;

  /* giving the wall startup temperatures =====*/

  kon3 := (863-350)/(Mw+1);

```

```

Tw1[-1] := 350;
Tw2[-1] := 350;
for i1:= 0 to Mw+2 do begin
  Tw1[i1] := Tw1[i1-1] + kon3;
  Tw2[i1] := Tw2[i1-1] + kon3;
end;
end;

```

```

Procedure NEWTEMP(A,B:vector;time:real);
begin
  for i1 := 0 to Mw do begin
    Tw2[i1] := Tw1[i1] + kon0*(Tw1[i1-1]-2*Tw1[i1]+Tw1[i1+1]);
  end;
  Tw2[-1] := 350;
  Tw2[Mw+1] := Tw2[Mw-1] + kon1*(SIGMA*(Fsw*(sar(sar(Ta(time)))
-sar(sar(Tw2[Mw]))) + Fsw*(sar(sar(Ta(time))) - sar(sar(Tw2[Mw]))))
+kon2*(Ta(time)-Tw2[Mw]));
  for i1:= -1 to Mw+1 do begin
    Tw1[i1] := Tw2[i1];
  end;
end;
end;

```

```

/* MAIN PROGRAM =====*/

```

```

begin
  STARTUP;
  HEADLINE;
  while yes <> 0 do begin
    write ('nexttime = '); read (nexttime);
    while time < nexttime do begin
      time := time + dt;
      NEWTEMP(Tw1, Tw2, time);
    end;
    WRITEVECTOR(Tw1, time);
    write ('yes= '); read(yes);
  end;
  close (LP);
end.

```

```

IIII

```

This program gives the walltemperature at a given time

Constants

wallthickness = 0.400 m
 dxw = 0.080 m
 dt = 38.000 s
 Gask = 0.077 K/s
 slabk1 = 0.150 K/s
 slabk2 = 0.117 K/s
 slabk3 = 0.078 K/s
 Kw = 1.400 W/m**K
 Hw = 20.000 W/m**m**K
 Fwg = 0.720
 Fws = 0.400
 raaw = 1762.031 kg/m**m**m
 Cpw = 950.000 Ws/Kg**K
 kon0 = 4.965860E-03
 kon1 = 1.142857E-01
 kon2 = 2.285714E+00
 r = 4.965860E-03

time= 798.000 Tg= 811. Ts= 140.
 at time = 798.000 the temperature is
 162.500 248.000 333.502 419.114 508.201 666.009

time= 1558.000 Tg= 870. Ts= 254.
 at time = 1558.000 the temperature is
 162.500 248.001 333.537 419.793 517.079 724.938

time= 2356.000 Tg= 931. Ts= 373.
 at time = 2356.000 the temperature is
 162.500 248.010 333.674 421.437 530.510 787.653

time= 3116.000 Tg= 990. Ts= 487.
 at time = 3116.000 the temperature is
 162.502 248.036 333.973 424.076 546.762 849.792

time= 3876.000 Tg= 1048. Ts= 600.
 at time = 3876.000 the temperature is
 162.507 248.094 334.513 427.883 566.094 914.356

time= 4674.000 Tg= 1110. Ts= 694.
 at time = 4674.000 the temperature is
 162.520 248.213 335.413 433.224 589.309 980.969

time= 5434.000 Tg= 1168. Ts= 783.
 at time = 5434.000 the temperature is
 162.543 248.402 336.656 439.620 613.733 1044.819

time= 6232.000 Tg= 1230. Ts= 876.
 at time = 6232.000 the temperature is
 162.586 248.709 338.426 447.707 641.557 1112.689

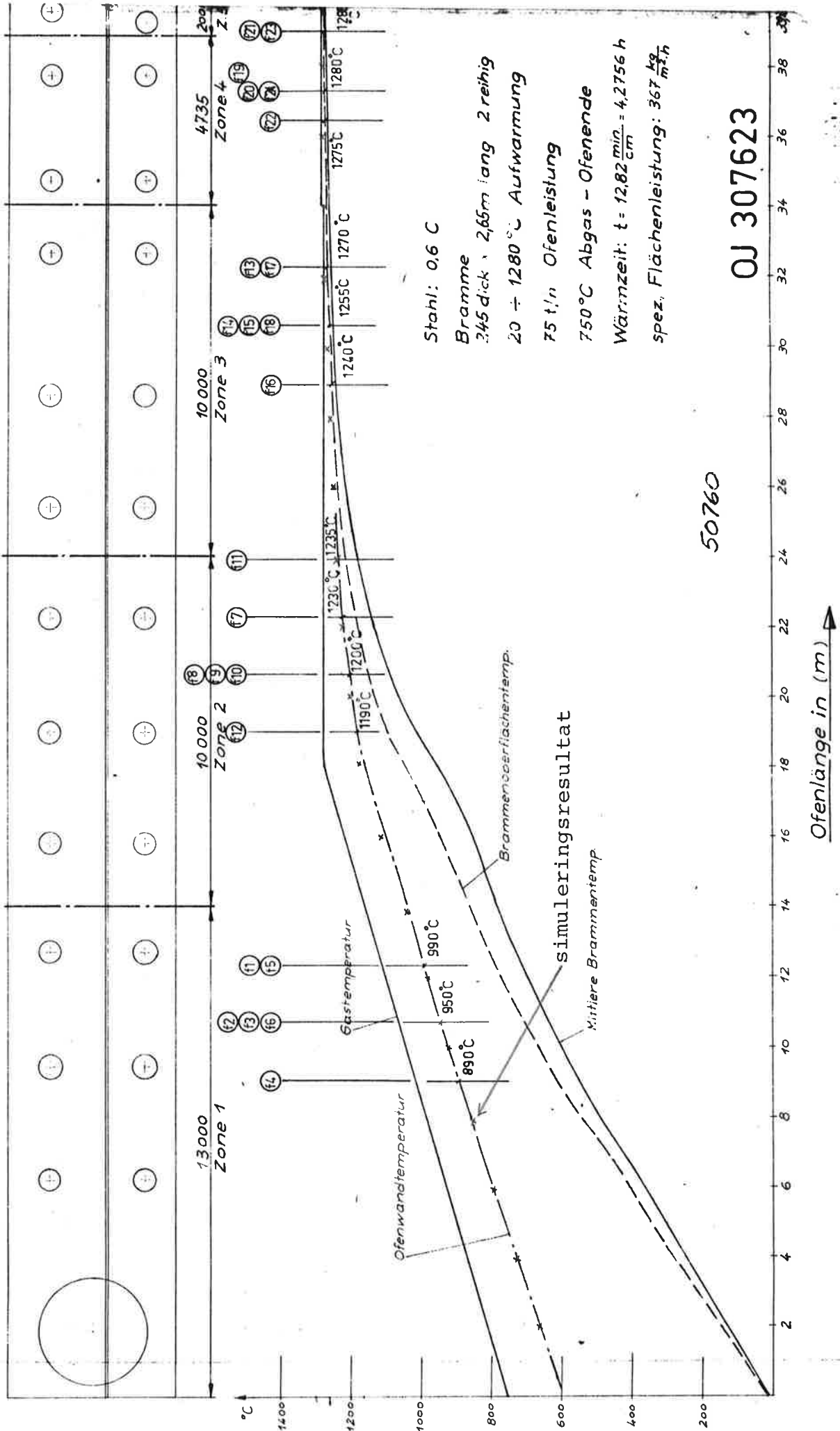
time= 6992.000 Tg= 1285. Ts= 965.
 at time = 6992.000 the temperature is
 162.653 249.130 340.605 456.701 669.939 1178.040

time= 7752.000 Tg= 1285. Ts= 1055.
 at time = 7752.000 the temperature is
 162.751 249.702 343.302 466.881 698.174 1201.564

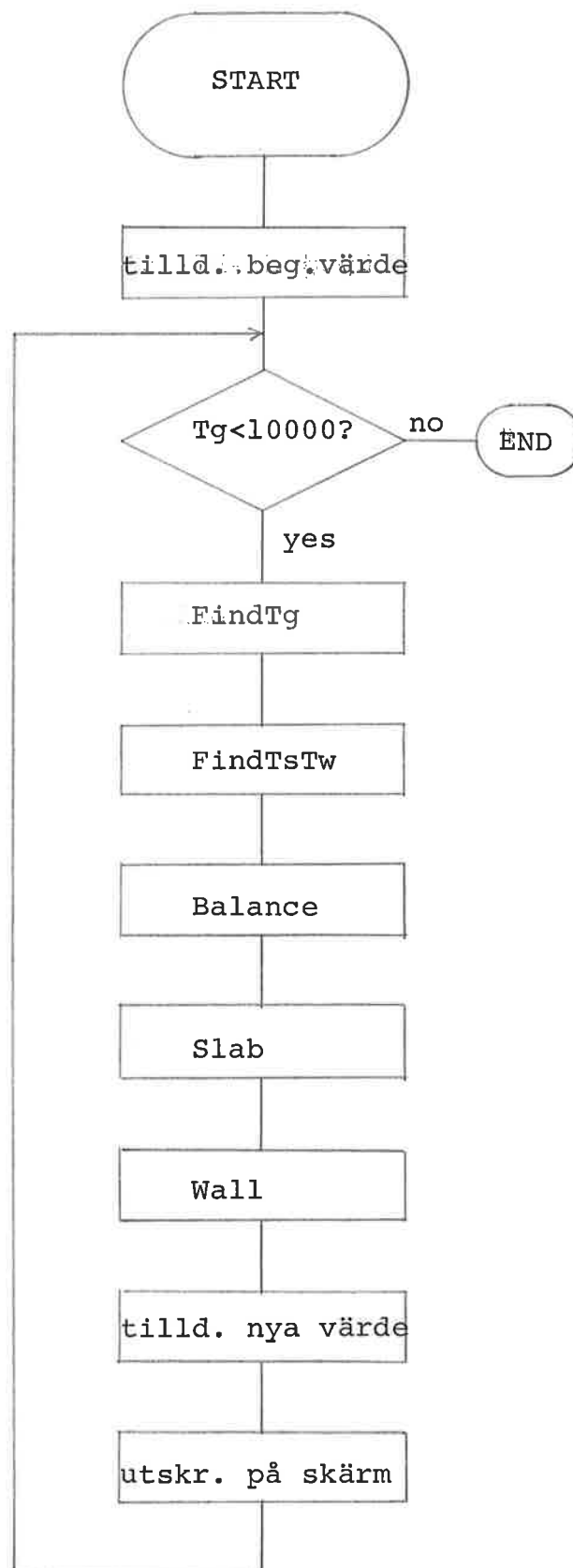
time= 8550.000 Tg= 1285. Ts= 1118.
 at time = 8550.000 the temperature is

162.900	250.492	346.708	478.507	725.324	1219.845
time= 9310.000 Tg= 1285. Ts= 1177.					
at time = 9310.000 the temperature is					
163.094	251.445	350.483	490.146	749.033	1237.676
time= 10108.000 Tg= 1285. Ts= 1212.					
at time = 10108.000 the temperature is					
163.363	252.672	354.964	502.717	772.088	1250.417
time= 10868.000 Tg= 1285. Ts= 1230.					
at time = 10868.000 the temperature is					
163.690	254.067	359.676	514.821	791.814	1256.757
time= 11628.000 Tg= 1285. Ts= 1249.					
at time = 11628.000 the temperature is					
164.094	255.687	364.766	526.876	809.644	1263.203
time= 12426.000 Tg= 1285. Ts= 1260.					
at time = 12426.000 the temperature is					
164.608	257.626	370.453	539.354	826.633	1267.676
time= 13186.000 Tg= 1285. Ts= 1266.					
at time = 13186.000 the temperature is					
165.188	259.694	376.136	550.974	841.177	1270.203
time= 13984.000 Tg= 1285. Ts= 1273.					
at time = 13984.000 the temperature is					
165.895	262.088	382.323	562.824	854.982	1272.846
time= 14744.000 Tg= 1285. Ts= 1280.					
at time = 14744.000 the temperature is					
166.664	264.565	388.373	573.736	866.957	1275.360
time= 15504.000 Tg= 1285. Ts= 1286.					
at time = 15504.000 the temperature is					
167.526	267.220	394.531	584.265	877.961	1277.872
time= 15504.000 Tg= 1285. Ts= 1286.					
at time = 15504.000 the temperature is					
167.526	267.220	394.531	584.265	877.961	1277.872

Resulat från simulering med walltemp



6.3 Flödesschema för programmet Testugn



```

Program testuch:
var a11, a21, w11, w21, a11, a21, C00, C01, a00, a01, A0, A1, a02, a03, E,
T00, T01, T0, T1, T2, T3, T4, T5, m, n, a1, a2, a3, a4, dt, H, a,
C00, a, T00, kon1, kon2, t, min, T00lus : real;
var i1: integer;
type vector=array[0..5] of real;
var T1, T2, T1, T2:vector;

```

```

Procedure slab;

```

```

begin
  T1[4]:=T2;
  T1[-1]:=T1[1];
  for i1:=0 to 3 do begin
    T2[i1]:= T1[i1]+kon1*(T1[i1-1]-2.0*T1[i1]+T1[i1+1]);
  end;
  for i1:=-1 to 3 do begin
    T1[i1]:=T2[i1];
  end;
end;

```

```

Procedure wall;

```

```

begin
  T2[4]:=T1;
  T2[-1]:=343;
  for i1:=0 to 3 do begin
    T2[i1]:=T1[i1]+kon2*(T1[i1-1]-2.0*T1[i1]+T1[i1+1]);
  end;
  for i1:=-1 to 3 do begin
    T1[i1]:=T2[i1];
  end;
end;

```

```

Procedure FindT1T2;

```

```

begin
  T1 := dt/(a00*a01*a02*a03*C00)*(a11*exp(-a01*T1)+w11*exp(-a01*T2)+
  a11*exp(-a01*T3))+T00;
  T2 := dt/(a00*a01*a02*a03*C01)*(a21*exp(-a01*T1)+w21*exp(-a01*T2)+
  a21*exp(-a01*T3))+T01;
end;

```

```

Procedure FindT0;

```

```

begin
  a := m*(T0-T00) + n*(T1-T10);
  T0 := (m*n*dt+min*T00lus*C00*dt-a-(m+n)*C00*T0*dt
  +m*C00*T1)/(m*C00);
end;

```

```

Procedure BALANCE;

```

```

begin
  a1 := m*n*dt;
  a2 := T0*C00*dt*(min+m);
  a3 := min*C00*dt*T00lus;
  a4 := (T0-T00)*C00*m;
  a := m*(T0-T00)+n*(T1-T10);
  E := a1+a3-a-a2-a4;
  if abs(E) > 1E05 then dt := dt * 0.05;
  if abs(E) < 1E03 then dt := dt * 0.05;
end;

```

```

/*MAIN PROGRAM=====

```

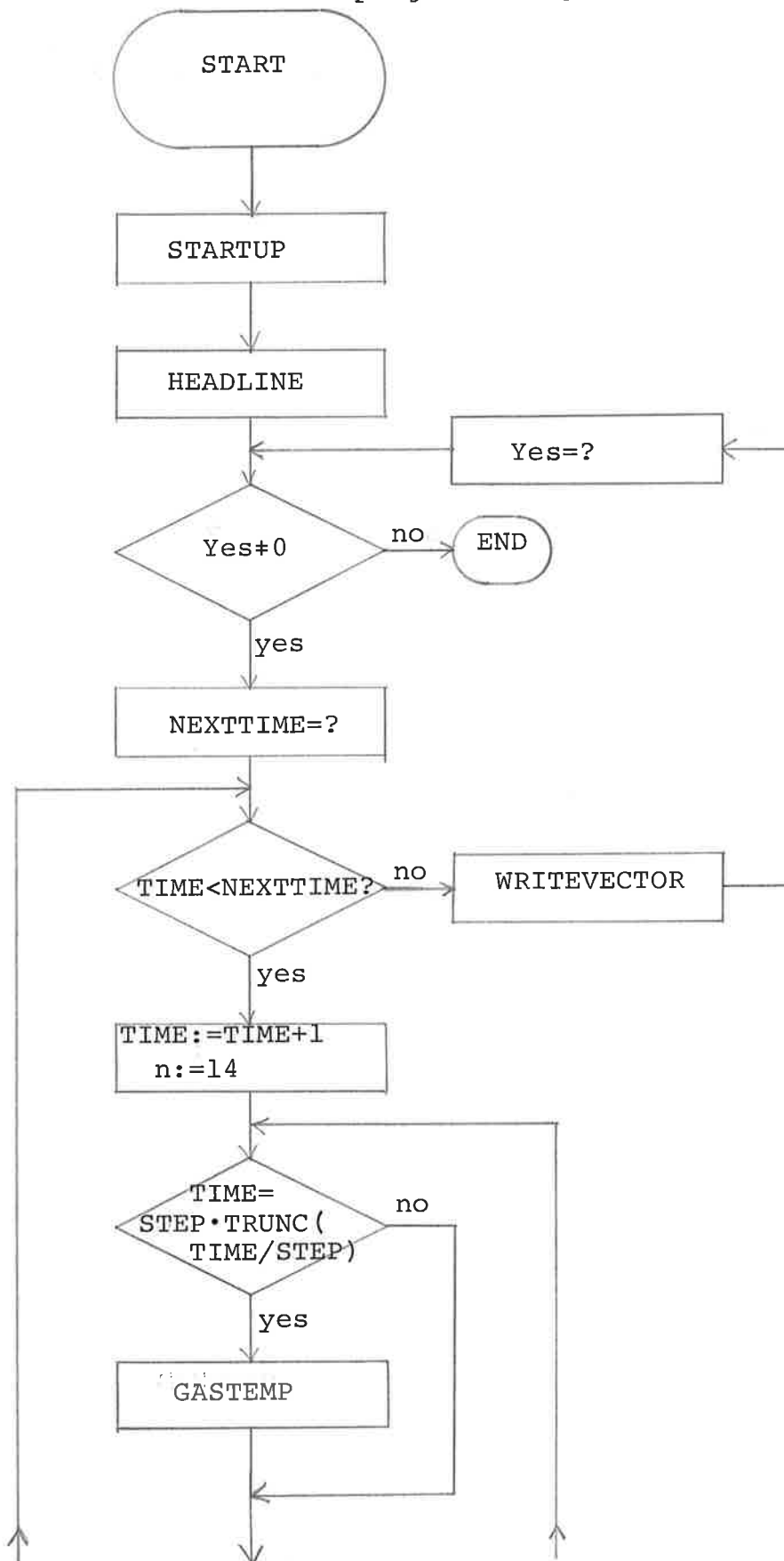


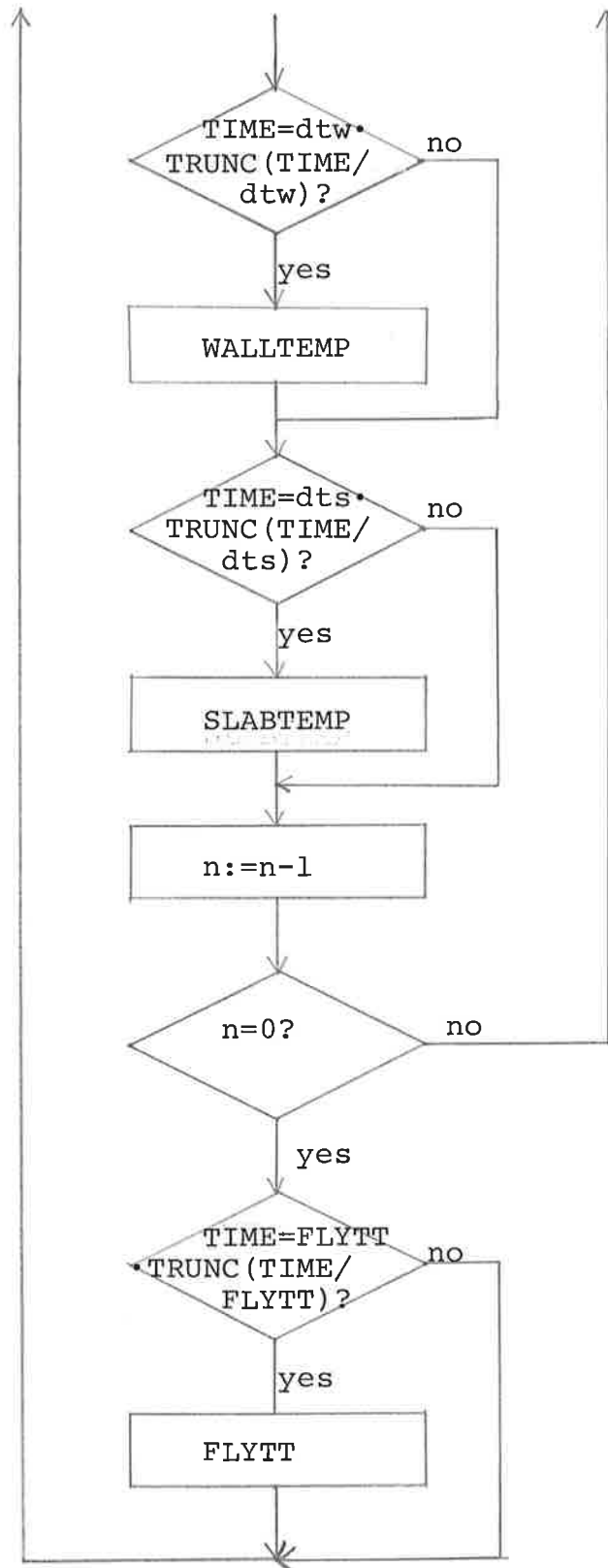
```

begin
  a11:=-1.14E-05; w11:=3.80E-04; a11:=7.4E-04;
  a21:=2.93E-06; w21:=-7.93E-06; a21:=5.0E-06;
  kon1:=68E-03;
  kon2:=1.8E-03;
  for i1:=-1 to 4 do begin
    Ts1[i1]:=293; Tw1[i1]:=293;
  end;
  Ts:=293;
  Tw:=293;
  Tco:=293;
  Twc:=293;
  Te:=293;
  Tco:=293;
  Tcoo:=293;
  Twco:=293;
  Tenplus:=293;
  write('win=' ); read(win);
  write(' dt = ' ); read(dt);
  t:=1;
  raas:=7500; raaw:=1750;
  Ccs:=500; Ccw:=950; Ccg:=1250;
  dxs:=3E-02; dxw:=0.1;
  As:=7.58; Aw:=30.0;
  m:=60; mb:=0.48;
  z:=raas*(Ccs*dxs*As); w:=raaw*(Ccw*dxw*Aw);
  n:=4E06;
  while Tc<10000 do begin
    FindTe;
    FindTeTw;
    BALANCE:slab;wall;
    Tco:=Te; Tcoo:=Tco; Twco:=Tw; Tco:=Te; Twc:=Tw;
    Tenplus:=Ts; t:=t+dt;
    writeLn('Te=',Te,' Tco=',Tco,' dt=',dt,' E=',E,' t=',t:5:0);
  end;
end;

```

6.4 Flödesschema för programmet Ugn





7 Slutord.

Arbetet startade med sökning i litteraturen och läsning av densamma, dels för att bättra på våra egna kunskaper och dels för att undersöka om liknande projekt har utförts och om i så fall om dessa resultat var användbara för vårt arbete. Något som var direkt användbart fann vi ej men [1] och [6] har varit av stor betydelse för arbetets utformande.

Vi försökte på ett tidigt stadium definiera och avgränsa problemet samt sätta upp ett mål. Vi har dock inte hunnit fram till det mål vi hade tänkt oss; att få en färdigt fungerande modell. Detta mycket beroende på att vi underskattade problemet och att det visade sig behövas mer djuplodade funderingar än vi från början tänkt oss.

Efter att ha ställt upp de ekvationer och samband, som vi antar gäller för ugnen, övergick vi till att försöka verifiera dessa. Uttestningen har vi gjort mot de kurvor för temperaturfördelningen i ugnen som ugnsfabrikanten har uppgett. Detta har kanske varit bristfälligt då vi inte vet hur pass väl dessa temperaturprofiler stämmer med verkligheten. Användandet av dessa kurvor var för oss enda möjligheten, för att kunna verifiera modellen.

Vi började med att enbart beräkna temperaturer för ämne med givna temperaturer för vägg och gas enligt ugnskurvorna. På samma sätt, som för ämnet, gjorde vi för väggen. Att få resultaten från dessa två program att överensstämma med givna kurvor mötte inga större svårigheter. Resultaten

från dessa får anses vara så bra att något arbete på dessa tills vidare ej behövs.

Efter detta har vi försökt simulera hela ugnen. Med hjälp av bränslet som inparameter har vi i vår modell försökt att få upp temperaturprofiler som överensstämmer med de givna kurvorna. Detta stötte på problem. Lösning av ekvationssystem för gas, vägg och ämnestemperaturer gick inte som väntat och vi fick förbättra ugnsekvationerna. Program testugn är ett förenklat program som löser ovan beskrivna ekvationssystem för en kontrollvolym.

För fortsatt arbete kan program testugn utvecklas vidare till att gälla hela ugnen enligt flödesschema för program ugn.

Ekvationssystemet kan ev. lösas genom användandet av Newton-Raphson i tre dimensioner eller implicita numeriska metoder.

8 Källförteckning.

- 1 Warren M Rosenow et al. Handbook of heat transfer. - McGraw&Hill. New York 1973.
- 2 Persson, Å. Stegbalksugnar, slutrapport av Åke Persson. - Jernkontorets forskning. 1974.
- 3 Driftsinstruktion. - Intermelt AB. Stockholm 1971.
- 4 Reinitzhuber. Die Einflüsse auf den Wärmeübergang in Industrieöfen, Gruppe D, nr 1081. Düsseldorf 1972.
- 5 Sparrow, E M & Cess, R D. Radiation heat transfer. - Brooks/Cole publishing company. California 1966.
- 6 Yvon, J P. Contrôle optimal d'un four industriel, rapport Laboria no 22. Le Chesnay 1973.
- 7 Smith, G D. Numerical solution of partial differential equations. - Oxford University Press. London 1969.
- 8 Björk, L. Förbränningslära. - VBV, TLTH. Lund 1967.

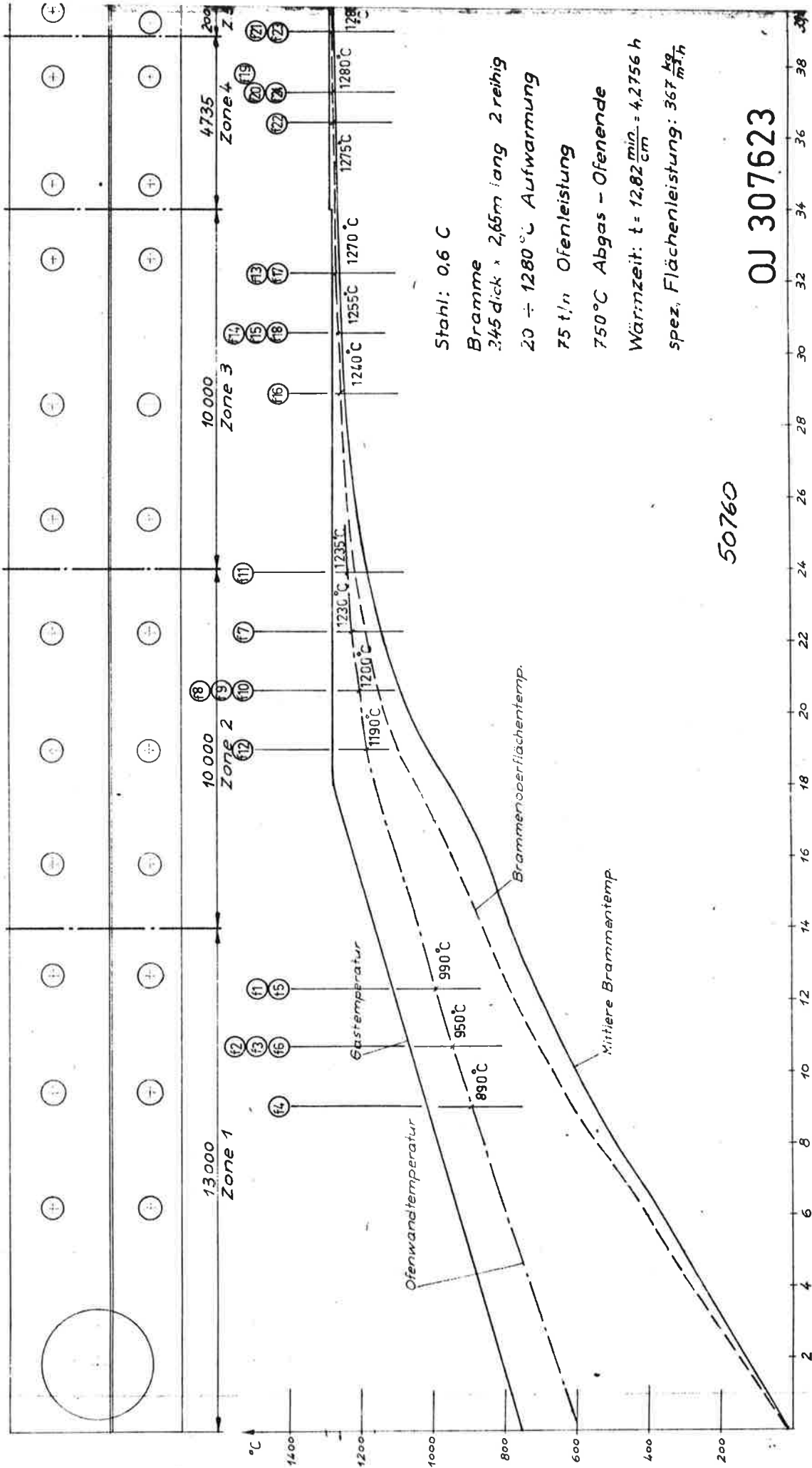
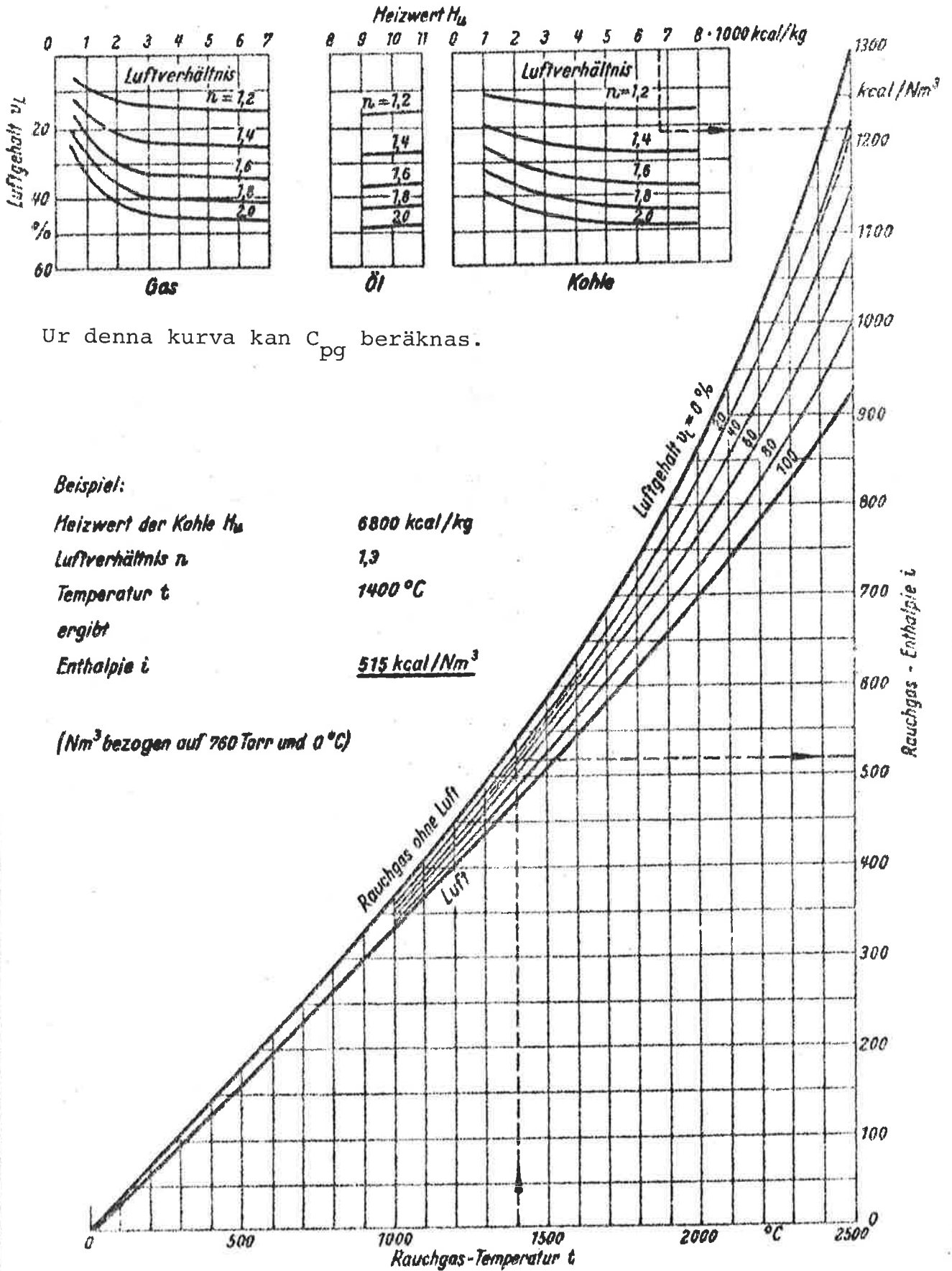


Fig. 10. Värmefördelningen för gas, vägg och ämne i ugnens längsriktning.

Figur. 16

Rauchgase
Enthalpie, Temperatur und Luftgehalt



Ur denna kurva kan C_{pg} beräknas.

Beispiel:

Heizwert der Kohle H_u 6800 kcal/kg

Luftverhältnis n 1,3

Temperatur t 1400 °C

ergibt

Enthalpie i 515 kcal/Nm³

(Nm³ bezogen auf 760 Torr und 0 °C)

Nach Rosin-Fehling: Das i, t -Diagramm der Verbrennung. Berlin 1929.

Dorfmann: Neuzeitliche Kesselberechnung. Arch. f. Wärmewirtsch. Bd. 13 (1932) S. 47-50. W. Goldstern

Appendix.

Två kroppar 1 och 2 med ytorna A_1 och A_2 ligger med dessa ytorna riktade enligt fig. A1.

Från en varm kropps yta strålar värme ut i alla riktningar enligt Stefan-Boltzmanns lag

$$q_1 = A_1 \sigma T_1^4 \epsilon_1 \quad (A1)$$

Där A_1 är ytans storlek
 σ är Stefan-Boltzmanns konstant
 T_1 är ytans temperatur
 ϵ_1 är emissionskoefficienten.

Emissionskoefficienten är ett tal mellan 0 och 1 där 1 motsvarar strålning från en svart kropp och 0 motsvarar en fullständigt blank yta, som har reflektionskoeff. ρ ($\rho = (1 - \epsilon)$).

Andra storheter som kommer att användas i den följande härledningen är α : absorptionskoefficienten ($\alpha = \epsilon$).

F_{12}, F_{21} är geometriska faktorer, som är förhållandet mellan den rymdvinkel som ytan 2 upptar sett i från ytan 1, och rymdvinkeln för halva rymden som 1 strålar ut i. Detta för faktorn F_{12} . För faktorn F_{21} gäller det omvända. Dessa faktorer är lösningar till ytintegraler som finns tabellerade för ett antal standardkonfigurationer. Se t. ex. Handbook of heat transfer. (McGraw&Hill 1973, kap. 15B.)

β_{12} är en faktor som ger hur mycket som absorberas i gasen av den effekt som strålar från 1 till 2. β_{12} är exponentiellt beroende av den väg, som strålningen går i genom gasen så $\beta_{12} = e^{-\beta \bar{\ell}_{12}}$ där $\bar{\ell}_{12}$ är ett medelvärde på strålningens väg från 1 till 2. Se t. ex. [1, kap. 15C].

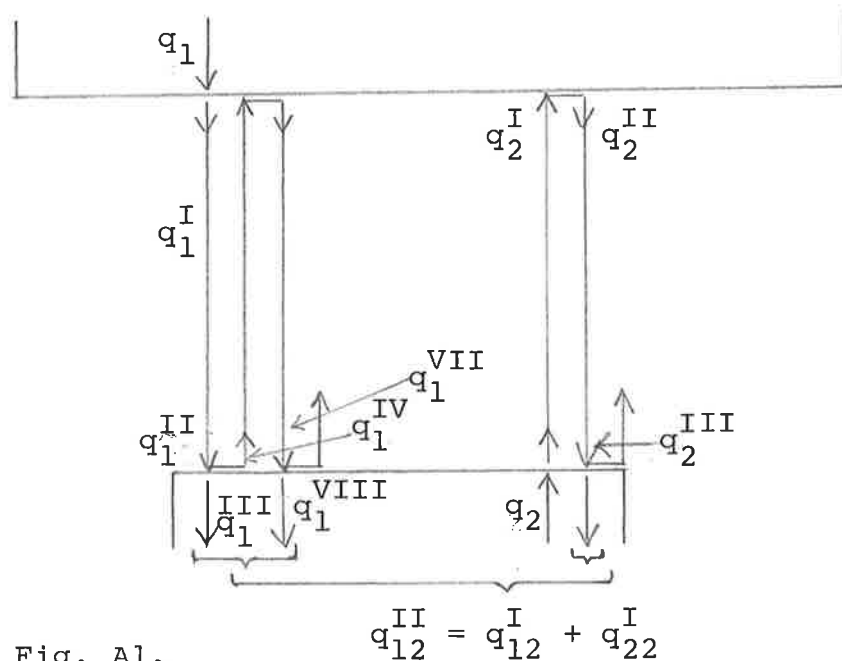


Fig. A1.

$$q_{12}^{II} = q_{12}^I + q_{22}^I$$

Den effekt som strålar ut ur 1 är

$q_1 = A_1 \sigma \epsilon_1 T_1^4$ enl. S-B:s lag. Av denna effekt är det $q_1^I = F_{12} q_1$ som kan träffa 2. Efter att q_1^I har gått i genom gasen återstår $q_1^{II} = \beta_{12} q_1^I = \beta_{12} F_{12} q_1$. Av denna effekt absorberas $q_1^{III} = \alpha_2 q_1^{II} = \alpha_2 F_{12} \beta_{12} q_1$ av 2. Resten $q_1^{IV} = \rho_2 F_{12} \beta_{12} q_1$ reflekteras. Varav

$q^V = F_{21} \beta_{21} \rho_2 F_{12} \beta_{12} q_1$ träffar 2. Reflekteras,

går i genom gasen och träffar 1 och är då

$q_1^{VII} = \rho_1 F_{21} \beta_{12} F_{21} \beta_{21} \rho_2 F_{12} \beta_{12} q_1$. Av denna

absorberas $q_1^{VIII} = \alpha_2 q_1^{VII}$. Resten reflekteras

och gör en resa till genom gasen, reflekteras

och träffar åter 2.

Av den effekt som strålar ut från 1 absorberas

då följande effekt.

$$\begin{aligned} q_{12}^I &= q^{III} + q^{VIII} + q^{XIII} + \dots = \\ &= \alpha_2 \beta_{12} F_{12} q_1 (1 + \rho_1 \rho_2 F_{12} F_{21} \beta_{12} \beta_{21} + (\rho_1 \rho_2 F_{12} F_{21} \beta_{12} \beta_{21})^2 + \\ &+ \dots) = \frac{\alpha_2 \beta_{12} F_{12} q_1}{1 - \rho_1 \rho_2 F_{12} F_{21} \beta_{12}^2} \end{aligned} \quad (A2)$$

Av den effekt som 2 själv strålar ut reflekteras

en del (q_2^{II}) tillbaka från 1 och därefter sker

absorbtionen av denna på samma sätt som för q_1

$$\text{och ger } q_{22}^I = \frac{\alpha_2 \beta_{12} F_{12} q_2^{II}}{1 - \rho_1 \rho_2 F_{12} \beta_{12}^2} \quad \text{där}$$

$$q_{22}^{II} = F_{21} \beta_{21} \rho_1 A_2 \epsilon_2 \sigma T_2^4 \quad (A3)$$

Summan av all absorberad effekt i 2 vid

strålningsväxelverkan med 1 blir

$$q_{12}^{II} = \frac{\alpha_2 \beta_{12} F_{12} A_1 \sigma \epsilon_1 T_1^4 + \alpha_2 \beta_{12}^2 F_{12} F_{21} \rho_1 A_2 \sigma \epsilon_2 T_2^4}{1 - \rho_1 \rho_2 F_{12} F_{21} \beta_{12}^2} \quad (A4)$$

Nettoeffekten in i 2 är

$$q_{12} = q_{12}^{II} - q_2 \quad (A5)$$

ger

$$q_{12} = \frac{a_{12}T_1^4 - b_{12}T_2^4}{c_{12}} \quad (\text{A6})$$

där

$$a = A_1 \sigma \epsilon_1 F_{12} \beta_{12} \epsilon_2 \quad (\text{A7})$$

$$b = A_2 \sigma \epsilon_2 (c - F_{21} F_{12} \beta_{12}^2 \rho_1 \epsilon_2^2) \quad (\text{A8})$$

$$c = 1 - \rho_1 \rho_2 F_{12} F_{21} \beta_{12}^2 \quad (\text{A9})$$

En kontrollvolym är ett slutet rum med ett ändligt antal ytor, som var och en netto-emitterar eller nettoabsorberar energi beroende på temperatur i förhållande till varandra och i gasen.

Ytorna utgörs av A och B ugnsväggar, G ämnesyta och E och F fiktiva ytor som anger symmetriplan och C och D kontrollvolymgräns.

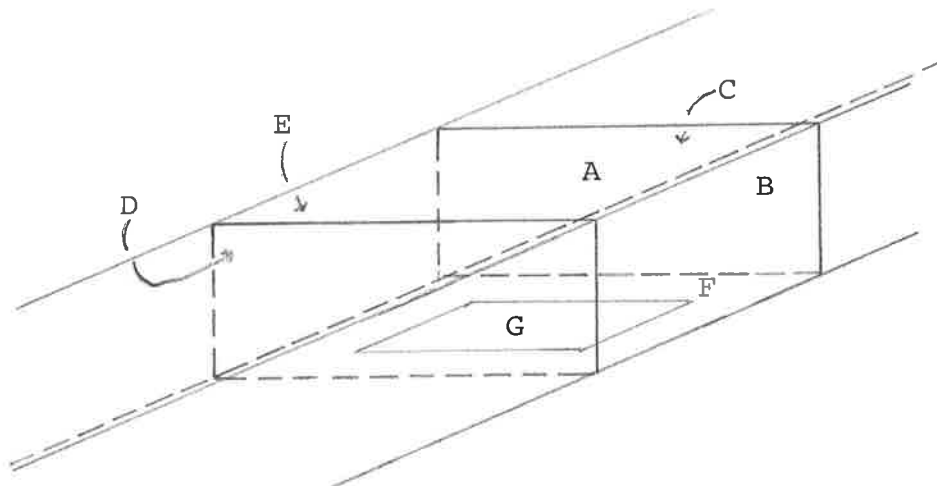


Fig. A2. Kontrollvolymens olika begränsningsareor.

Med tidigare härledda formel för nettoinflöde i en yta p.g.a. strålningsutbyte kan nettoinflödet in i ämnet skrivas som summan av nettoenergiinflöde p.g.a. växelverkan med övriga ytor i kontrollvolymen.

Energiflödet q_{AG} är nettoenergin in i kroppen med ytan G vid strålningsväxeln med A. Nettoenergiflödet in i yta G, som är ytan på ämnet, är då vid växelverkan med väggar

$$q_{w,s} = q_{AG} + q_{BG} + q_{EG} + 2q_{CG} \quad (A10)$$

Gasen strålar också energi ner på ämnet. Detta strålningsutbyte har approximerats så att gasen antages bestå av ett antal kroppar liggande på varandra mellan ämnet och väggen. Var och en av dessa "gaskroppars yta" har strålningsutbyte med ämnet.

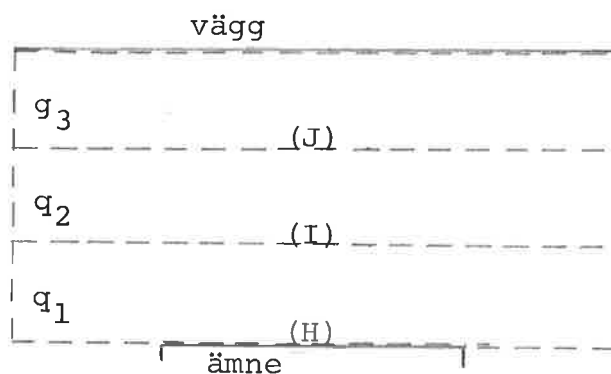


Fig. A3. Gasens indelning i olika delvolymer.

Ytorna H, I och J är ytorna till "gaskropp" g_1, g_2 och g_3 resp. Vid strålningsutbyte med dessa erhåller ämnet nettoenergiflödet som ett medelvärde av energiflödena q_{HG} , q_{IG} och q_{JG} alltså

$$q_{GS} = (q_{HG} + q_{IG} + q_{JG})/3 \quad (A11)$$

Ju fler gaskroppar man delar in gasvolymen, mellan ämne och vägg, i desto större noggrannhet hos approximationen. Samma nettoenergiinflöde i ämnet vid strålningsväxeln med angivningen i ugnen är

$$q_s = q_{ws} + q_{gs} \quad (A12)$$

Ekvation (A10) består av en summa av ekvationer av typ (A6) med index på de ingående storheterna refererande till respektive ytor. Ekvation (A10) kan skrivas

$$q_{ws} = T_w^4 \times \sum_i \frac{a_{iG}}{c_{iG}} - T_s^4 \times \sum_i \frac{b_{iG}}{c_{iG}} \quad (\text{A13})$$

Där i genomlöper A, B, E och C.

Ekvation (A11) kan på samma sätt skrivas

$$q_{gs} = (T_g^4 \times \sum_j \frac{a_{jG}}{c_{jG}} - T_s^4 \times \sum_j \frac{b_{jG}}{c_{jG}}) / 3 \quad (\text{A14})$$

Netto energiinflöde in i ämnet per tidsenhet är (A12). Med (A13) och (A14) insatta i (A12) erhålls

$$q_s = s_1 T_s^4 + w_1 T_w^4 + g_1 T_g^4$$

där

$$s_1 = - \left(\sum_j \frac{b_{jG}}{3c_{jG}} + \sum_i \frac{b_{iG}}{3c_{iG}} \right)$$

$$w_1 = \sum_i \frac{a_{iG}}{c_{iG}}$$

$$g_1 = \sum_j \frac{a_{jG}}{3c_{jG}}$$

där j genomlöper H, I och J.

En lista på innehållet i disketten.

WALLTE.OBJ	16	
WALLTE.PAS	9	8-MAR-79
WALLTE.MAC	43	8-MAR-79
SLABTE.MAC	44	8-MAR-79
SLABTE.OBJ	15	8-MAR-79
WALLTE.SAV	19	8-MAR-79
SLABTE.PAS	9	8-MAR-79
SLABTE.SAV	20	8-MAR-79
UGN .PAS	24	
TSTUGN.PAS	5	
TSTUGN.SAV	13	
TSTUGN.OBJ	9	
TSTUGN.MAC	27	
< UNUSED >	227	
13 FILES, 253 BLOCKS		
227 FREE BLOCKS		