



STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Slaggning, fouling och korrosion vid koleldning - Litteraturstudie

Margaretha Bengtsson
Göran Blomqvist

Slaggning, fouling och korrosion vid koleldning — Litteraturstudie

Margaretha Bengtsson, Studsvik Energiteknik AB
Göran Blomqvist, Studsvik Energiteknik AB

STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING
BOX 6405 · 113 82 STOCKHOLM · TEL. 08/ 34 09 80

April 1985
ISSN 0282-3772

SAMMANFATTNING

Föreliggande litteraturstudie behandlar slaggnings, fouling och korrosion. Hur allvarliga problem som uppstår i detta hänseende i samband med koleldning beror i hög grad både av kolets egenskaper och pannans konstruktion och drift. Området är mycket omfattande och i föreliggande studie har vi försökt plocka in endast de väsentligaste parametrarna.

Varje fall i en panna kan ej refereras endast med några rader på grund av de många ingående parametrarna, varför endast ett fåtal sådana fall har medtagits.

På kolsidan är bl a följande egenskaper viktiga för slaggnings: svavelhalt, natriumhalt, järnhalt, kalciumhalt, förhållandet mellan basiska och sura komponenter, slaggningsindex R_s , beräknad slaggviskositet, askmjukning och askbelastning.

Fouling är bl a beroende av följande kolegenskaper: natriumhalt, svavelhalt, kloridhalt, fosforhalt, förhållandet mellan basiska och sura komponenter, foulingindex R_F , askmjukning, närvaro av lågreaktivt kol.

Korrosion stimuleras bl a av hög svavelhalt, kloridhalt och kaliumhalt.

I pannan för slaggnings känsliga situationer: hög värmebelastning i förhållande till kolets egenskaper, otillräcklig mixning, stråkbildning, reducerande miljö, kontakt flamma-ugnsvägg, brist på avkylningssträcka för smälta partiklar i flammen, om sotblåsning ej fungerar.

Fouling uppstår speciellt om gasen ej kylts tillräckligt före konvektionsdelen i förhållande till det använda kolet.

1984-09-20

SUMMARY

Slagging and Fouling during pf-coal firing - a literature review

Slagging and fouling are depending on fuel properties and on design and operation of the boiler. Therefore boilers designed for coals with severe slagging or fouling properties can operate satisfactory while the same coal might cause a lot of trouble in another boiler designed for a higher thermal load and a none slagging coal.

The following situation in the boiler are specially phrown to slagging:

- high thermal load
- recirculation of large particles to the burner
- flame contact to wall
- inproper mixing giving partly reducing atmosphere
- some improperly burned particles
- high ashload especially if the ash has large low melting particles falling down near the burner.

Fouling problems are generally much more severe in boilers using lignites especially if Na and S content are high in the lignite. Thus those types of coals need boilers specially designed with a large furnance part and convection part of special design.

In the coal the level of the following parameters are of importance for slagging:

- sulphur content
- sodium content

1984-09-20

- B/A ratio
- R_S and R_F values
- Fe-content
- Cu-content
- calculated slag viscosities: η_{1260} , η_{1426}
- ash softening and melting behaviour
- presence of low reactive coal
- ash level and distribution.

For fouling the following parameters are of importance:

- sodium content (especially as Cl or organic bound)
- sulphur content
- chloride content
- potassium content
- phosphorous content
- B/A-value
- R_F value
- presence of low reactive coal.

For corrosion high levels of sulphur, volatile potassium, chloride and ashes may introduce attack on metal surfaces facilitating strongly bound slag deposits.

1984-09-20

SAMMANFATTNING

Föreliggande litteraturstudie behandlar slaggning, fouling och korrosion. Hur allvarliga problem som uppstår i detta hänseende i samband med koleldning beror i hög grad både av kolets egenskaper och pannans konstruktion och drift. Området är mycket omfattande och i föreliggande studie har vi försökt plocka in endast de väsentligaste parametrarna.

Ur slaggningssynpunkt är följande egenskaper hos kolet kritiska:

- svavelhalten i kolet
- natriumhalten i kolet
- järnhalten i kolet
- kalciumhalten i kolet
- förhållandet mellan basiska och sura komponenter i kolaskan
- beräknat slaggningsindex
- beräknat foulingindex
- beräknade slaggviskositeter vid 1260°C och 1426°C
- askans mjuknings- och smältningsförlopp
- askbelastningen

För fouling är följande kolegenskaper kritiska:

- natriumhalten i kolet (i synnerhet för brunkol)
- svavelhalten i kolet
- klorhalten i kolet
- fosforhalten i kolet

1984-09-20

- förhållandet mellan basiska och sura komponenter i kolaskan
- foulingindex

Korrosion stimuleras av hög svavelhalt, klorhalt och kaliumhalt.

Följande situationer i pannor är speciellt kritiska ur slaggningssynpunkt:

- hög termisk belastning
- recirkulering av stora partiklar tillbaka till brännarzonen
- om flamman når pannväggen
- otillräcklig mixning, vilket kan ge stråk med reducerande atmosfär
- partiklar som brinner ut långsamt
- hög askbelastning, i synnerhet om stora lågsmältande askpartiklar träffar pannväggarna

För fouling är följande pannegenskaper kritiska:

- Tillräckligt stor eldstad för att temperaturen vid inträdet i överhettaren ska vara tillräckligt låg (speciellt låg för brunkol med hög natriumhalt)
- Tillräcklig värmebortledningskapacitet i konvektionsdelen
- Tubarrangemangets utseende
- Gashastigheter genom konvektionsdelen

Slaggning och/eller fouling kan inträffa i en panna medan fenomen ibland i samma panna kan kontrolleras genom lastreduktion. Andra pannor kan t o m elda samma kol utan besvär.

Vilka fenomen som inträffar hänger således intimt samman med många olika faktorer.

STUDSVIK ENERGITEKNIK AB

STUDSVIK/EB-84/73

1984-09-20

Projekt B1 311

Margaretha Bengtsson
Göran Blomqvist

Stiftelsen för Värmeteknisk
Forskning

SLAGGNING, FOULING OCH KORROSION VID KOLELDNING - EN LITTERATUR-
STUDIE

Slutrapport för nivå 1-projektet inom Kolkaraktäriseringsprojektet.

Godkänd av

Arvids Bengt

1984-09-20

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	<u>Sid</u>
1. INLEDNING OCH PROBLEMSTÄLLNING	1
1.1 Inledning	1
1.2 Problemställning	1
2. ORSAKER TILL BELÄGGNINGAR OCH KORROSIONSFENOMEN SOM UPPTRÄDER I FÖRBRÄNNINGSANLÄGGNINGAR	2
2.1 Definition av slaggning, fouling och korrosion	2
2.2 Några faktorer som påverkar slaggning	2
2.3 Några faktorer som påverkar fouling	3
2.4 Några faktorer som påverkar korrosion	4
2.5 Några konsekvenser av slaggning och fouling	4
3. BESKRIVNING AV PÅSLAGSMEKANISMER	6
3.1 Påslagsmekanismer ur pannteknisk synpunkt	6
3.2 Beskrivning av beläggningsfenomen ur kemisk och fysikalisk synvinkel	11
3.2.1 Slaggningspåslag	11
3.2.2 Fouling	17
3.3 Mineral i kol - slaggning fouling	19
3.3.1 Mineral i kol	19
3.3.2 Metoder att studera mineral i kol	21
3.3.3 Exempel på möjliga reaktionsvägar för några kolmineral samt på smältpunkter för förekommande eller bildade komponenter	21
3.3.4 Densiteter för några vanliga kolmineral och exempel på inverkan av askfördelning och sammansättning i olika densitetsfraktioner	32

	<u>Sid</u>
4. RÖKGASSIDIG KORROSION	37
4.1 Inverkan av vissa mekanismer vid rökgassidig högtemperaturkorrosion	37
4.1.1 Korrosion i oxiderande miljö	37
4.1.2 Korrosion i reducerande miljö (sulfidinducerad korrosion)	39
4.2 Tillförsel av alkali till korrosionsytorna samt inverkan av klorid	40
4.3 Bildning av alkali-järn-trisulfat ur järnoxid	42
4.4 Korrosion i rosteldade anläggningar	43
4.5 Åtgärder för att minska korrosionsskadorna	44
5. SLAGGNING-FOULING OCH KORROSION I PANNOR	45
5.1 Inledning	45
5.2 Kopplingar mellan värmeöverföring och beläggningar	45
5.3 Speciella förhållanden i pannor som påverkar askans sintringstemperatur	47
5.4 Kolpulvereldade pannor	48
5.4.1 Dimensioneringsprinciper för kolpulvereldade pannor	48
5.4.2 Inverkan av brännarplacering och inställning	52
5.5 Två extrema slaggningsfall från två olika amerikanska kraftverkspannor	60
5.5.1 Svår slaggningsfall i Mill Creek-pannan	63
5.5.2 Lätt slaggningsfall i Morgan-town-pannan	65
5.6 Ur foulingsynpunkt känsliga områden vid pulvereldning	69
5.7 För korrosion känsliga områden	73

	<u>Sid</u>
5.8 Slaggnings och fouling vid rosteldning respektive stokereldning	74
5.9 Slaggnings och fouling vid eldning i fluidbäddar	75
5.10 Slaggnings och fouling vid eldning av torv och biomassa	75
5.11 Additiver för att minska slaggnings och fouling	76
6. PROVNINGSMETODER FÖR SLAGGNINGS- OCH FOULINGBENÄGENHET	78
6.1 Inledning	78
6.2 Vanliga analyser och bestämningar på kolaskor	79
6.2.1 Askanalys och asksammansättning	79
6.2.2 Asksmältningsförlopp	80
6.3 Syra/bastalet, slaggnings- och foulingindex	81
6.4 Beräkning av slaggviskositeter	83
6.4.1 Beräkning av slaggviskositeter ur askanalysen	83
6.4.2 Beräkning av slaggviskositet ur smältpunktsdata och askanalys	85
6.5 Analysmetoder för bestämning av kolaskans viskositet för bedömning av slaggnings- och slaggegenskaper	86
6.5.1 Penetrationsviskosimetrar	87
6.5.2 Användning av indirekta mätmetoder för uppskattning av askans viskositet	90
6.6 Mätning av tryckhållfastheten på sintrad flygaska för bedömning av foulingtendens och påslagens hårdhet (= crushing strength)	92
6.7 Sonder för studier av slaggnings och fouling	98
6.7.1 Sondstudier i Finland	98
6.7.2 Sonder och pilot plants för studier av påslag	99

	<u>Sid</u>
7. SLUTSATSER	106
7.1 Från slaggningssynpunkt besvär- liga kolegenskaper	106
7.2 Några kolegenskaper som bidrar till fouling	106
7.3 Pannegenskaper känsliga för slaggning	107
7.4 Några pannegenskaper känsliga för fouling	108
REFERENSER	109

1984-09-20

ACKNOWLEDGEMENT

Vi tackar härmed Stiftelsen för Värmeteknisk
Forskning för finansiering av denna litteratur-
studie.

1984-09-20

1. INLEDNING OCH PROBLEMSTÄLLNING

1.1 Inledning

Föreliggande litteraturstudie har utförts på uppdrag av Stiftelsen för Värmeteknisk Forskning. Göran Blomqvist har bidragit med en del litteraturinsamlingar samt författat avsnitten 3.2, 6.5, 6.6 och kapitel 4.

1.2 Problemställning

I denna litteraturstudie görs ett försök till en närmare beskrivning av slaggningsfenomen och fouling i koleldade pannor. Dels redovisas var slaggnings respektive fouling förekommer. Slaggnings och fouling är fenomen som i hög grad påverkas av bl a ingående bränslets oorganiska och organiska beståndsdelar, pannans dimensionering och dess driftsätt.

Försök att analysera påverkan av de olika faktorerna och försök att i labbskala förutsäga eller testa benägenheten för slaggnings respektive fouling har refererats. Dessutom har några förebyggande åtgärder mot slaggnings respektive fouling redovisats.

Kortfattat berörs även korrosion i koleldade förbränningsanläggningar.

1984-09-20

2. ORSAKER TILL BELÄGGNINGAR OCH KORROSIONSFENOMEN SOM UPPTÄDER I FÖRBRÄNNINGSANLÄGGNINGAR

2.1 Definition av slaggnings, fouling och korrosion

Enligt bl a Hein (ref 1 och 2) definieras slaggnings och fouling på följande sätt:

Vid slaggnings ingår en fas där hela beläggningen eller delar därav genomgår ett flytande tillstånd. Fenomenet sker oftast vid en temperatur över $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ (1300°K).

Vid fouling binds beläggningen samman av reaktion i fast fas, företrädesvis sintring. Temperaturen ligger oftast under 1000°C . Beläggningen angriper ej själva tubmaterialet.

Andra (ref 19, 20) menar att slaggnings är fenomen, vilka uppträder på de delar som ser flammen, medan övriga beläggningar karaktäriseras som fouling.

I pannan kan högtemperaturkorrosion förekomma i temperaturintervallet 1000°C - 1500°C , varvid t ex tubmaterialet angrips.

2.2 Några faktorer som påverkar slaggnings

Om slaggnings inträffar eller ej beror bl a på följande faktorer:

1. Kolets egenskaper (bl a storleksfördelning, fukthalt, askhalt, asksammansättning, mineralsammansättning och fördelning, petrografisk sammansättning).
2. Pannans dimensionering (både storleksmässig och geometrisk utformning, närvaron av delar med mycket hög värmebelastning).

1984-09-20

3. Brännararrangemang och brännarinställning (kol och luftfördelning).
4. Hastighets- och temperaturfördelning i pannan.
5. Områden med reducerande atmosfär.
6. Direktkontakt mellan flamma och eldstadsvägg.
7. Eldningseffekt i förhållande till panndimensionering och kolets egenskaper.
8. Sotblåsning (effektivitet, frekvens).

Beroende på att både viktiga parametrar för panna och kolet påverkar slagging, kan ett kol vara slaggande i en panna under vissa betingelser, medan andra användare ej upplever problem med kolet.

Heitmann (ref 4) rapporterade t ex att slaggningsproblem från Wilhelmshafen vid användning av polska kol, medan t ex Kraftvärmeverket i Västerås ej upplever de polska ångkolen som slaggande.

Det finns t o m fall där man tagit största möjliga hänsyn till att förebygga slagging men ändå fått slaggningsfenomen, vilka man ej kunnat förklara (ref 3).

2.3 Några faktorer som påverkar fouling

Fouling uppträder vid lägre temperaturer än slagging. Fouling förekommer huvudsakligen i konvektionsdelen. Viktiga faktorer som påverkar fouling:

1. Kolegenskaper (koltyp, askanalys, askhalt, halter av bl a Na, S och Cl).
2. Panndimensionering (speciellt av konvektionsdelen finns strålningsskärm).

1984-09-20

3. Sotblåsning (typ, effektivitet, frekvens).
4. Pannans last t ex temperaturen vid ingång i överhettardelen.
5. Partikeltäthet, storlek och hastighet.
6. Hastighetsfördelning för förbränningsgas och askpartiklar.

Även i detta fall är graden av fouling en funktion av såväl panna, driftsätt och kolegenskaper.

2.4 Några faktorer som påverkar korrosion

Korrosion påverkas bl a av:

1. I kolet ingående aggressiva komponenter (t ex Na, S, Cl).
2. Kolsammansättning (till fouling alt slaggningsbidragande egenskaper, vilka kan utgöra startpunkter för korrosion).
3. Oxiderande resp reducerande atmosfär (t ex kan låg NO_x-brännare bidra till lokala zoner med^x reducerande atmosfär).
4. Bl a nära brännare kan närvaron av oförbränt kol medverka till sulfidkorrosion.

2.5 Några konsekvenser av slaggnings och fouling

När slaggnings eller fouling förekommer bidrar beläggningarna till en försämrade värmeöverföring. Ju tjockare beläggningarna blir desto mer försämras värmeöverföringen, vilket kan leda till en ännu snabbare beläggningstillväxt. I svåra fall kan det stadium uppnås där pannan måste tas ur drift. Sänkt tillgänglighet och reparationer blir konsekvenserna.

För att undvika att komma i detta läge är en vanlig metod att sänka lasten så att beläggningsgraden hålls i schack.

1984-09-20

Via lastvariationer kan också en del beläggningar fås att lossna, både på överhettarytor och i pannan ibland.

Längre fram i den här rapporten kommer mekanismer för bildning av påslag och även metoder att få påslag att lossna att behandlas.

1984-09-20

3. BESKRIVNING AV PÅSLAGSMEKANISMER

3.1 Påslagsmekanismer ur pannteknisk synpunkt

Partiklar i gasströmmen kan med avseende på vidhäftningsegenskaper indelas i

- 1) kemiskt inerta partiklar (m_i)
- 2) partiklar med sintringsegenskaper (m_s)
- 3) partiklar som avstöts (m_{zer})

Överst i Figur 3.1 visas hur partiklar träffar en yta, avsätts eller stötts bort. Beroende på bl a partiklarnas egenskaper enligt ovan och deras hastighet påverkas intensiteten för påslagens uppbyggnad respektive avnötning, vilket också framgår av Figur 3.1.

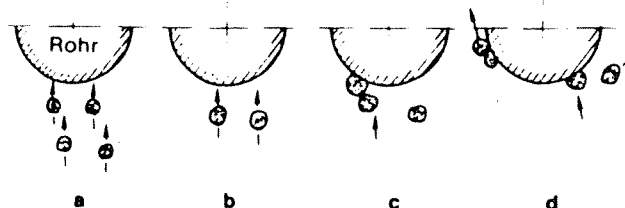
I den övre kurvan beskrivs separat både intensiteten för bildning respektive avstötning av påslag. Den nedre kurvan beskriver intensiteten för det kvarstannande påslaget.

1984-09-20

MECHANISM OF DEPOSIT FORMATION

Påslagsuppbyggnad
BUILD-UP OF DEPOSITS

Bildning - Avstötning
FORMATION - DESTRUCTION



Asche $\begin{cases} \text{inert (i)} \\ \text{sinternd (s)} \end{cases}$

$$m = m_i + m_s$$

Uppbyggnadshastighet för påslag

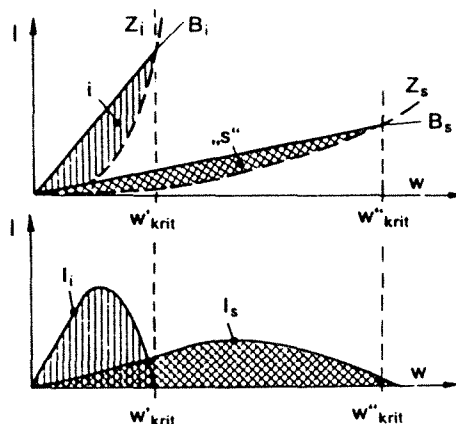
INTENSITY OF DEPOSIT FORMATION (nach Eppik und Mikk)

$$I_i = C_A \rho \cdot G \left[\underbrace{\frac{m_{i,s}}{m} \left(1 - \frac{m_{zer i,s}}{m_{i,s}} \right) \cdot \eta_b \cdot w}_{\text{Bildning (B)}} - \underbrace{\eta_{zer f_s} \frac{m_{zer i,s}}{m_{i,s}} w^3}_{\text{Avstötning (Z)}} \right]$$

Verschmutzung
FOULING

Verschlackung
SLAGGING

Ansatzzerstörung
(z.B. durch die Rußbläser)
DESTRUCTION



$$\begin{aligned} w'_{krit} &\sim 10 \div 12 \text{ m/s} \\ w''_{krit} &> 20 \text{ m/s} \end{aligned}$$

VGB-Essen

Intensität der Ansatzentstehung
INTENSITY OF DEPOSIT FORMATION⁽³⁾

w = inkommande partiklars hastighet (particle velocity)

C_A = partikelkoncentration (particle cons)

ρ = specifik vikt på partiklar (density)

η_b och η_{zer} = viskositeter för påslagsbildande (b) resp de komponenter som avstöts (z)

B_i och B_s uppbyggnad av påslag av inerta "i" resp "s" sintrande komponenter

Z_i och Z_s bortstötning av påslag

I_i och I_s kvarstannande påslag $B_i - Z_i$ resp $B_s - B_i$.

Figur 3.1

Bildning av beläggningar av kemiskt inert aska m_i respektive aska med sintrande egenskaper m_s .

1984-09-20

Påslagsbildningen är linjärt proportionell mot strömningshastigheten " w ". Avstötningssintensiteten " I_s " för att ett påslag stöts av är beroende av strömningshastigheten w^3 .

Både påslag och avstötning tilltar linjärt med askkoncentrationen i rökgasen C_A .

Intensiteten för bildning av påslag kan då beskrivas med formeln i Figur 3.1 (ref 3).

Påslaget ökar vid måttlig hastighetsökning. Vid ytterligare hastighetsökning ökar avstötningen snabbare än beläggningstillväxten.

I påslagshänseende används w'_{krit} 1:a kritiska hastigheten och w''_{krit} 2:a kritiska hastigheten enligt nedan.

Vid den kritiska hastigheten w'_{krit} är avstötningen av inerta askpartiklar lika stor som påbyggnaden, vilket förhindrar beläggning av inerta askpartiklar.

Då emellertid de sintrande askbeståndsdelarna kräver högre hastigheter för avstötning än inerta askpartiklar fortsätter påbyggnad av vidhäftande påslag även vid hastigheter över w'_{krit} .

Först vid w''_{krit} uppnås den andra kritiska strömningshastigheten då även de sintrande beståndsdelarna slås bort.

Värdena för de kritiska hastigheterna för respektive fall beror av koltypen. Vanliga värden:

1:a kritiska hastigheten w'_{krit} ~10-12 m/s
2:a "- w''_{krit} ~20 m/s

1984-09-20

På grund av att andelen inert aska är hög i konvektionsdelen av en panna överväger där lösa påslag, vilka kan avlägsnas via t ex laständring eller sotblåsning.

Med ökande temperatur ökar andelen kemiskt aktiva askbeståndsdelar med sintringsegenskaper, varvid förutsättningarna för påslag ökar.

Oftast ligger hastigheterna i förbränningsrummet på en så låg nivå att en ökning av hastigheten (w) medför ökad slaggningsintensitet I_s .

Ingen av de nu använda testmetoderna för kolaskor säger något om avstötningsbenägenheten för påslag.

Ju högre hastigheten vid sotblåsningen är i förhållande till w''_{krit} desto effektivare blir sotblåsningen. Dessutom inverkar den snabba avkylningen vid sotblåsning på beläggningarna. (Temperaturväxlingar kan ge sprickbildningar.)

Intensiteten för slaggbildning är kraftigt temperaturberoende. Detta kan beskrivas i följande formel:

$$I_s = \frac{m_{an}}{A_{an}} = \frac{B_k \cdot A_{(i \cdot roh)} \cdot \rho}{A_{an}} \cdot \frac{\exp(K(\frac{T}{T_o} - 1)) - 1}{100}$$

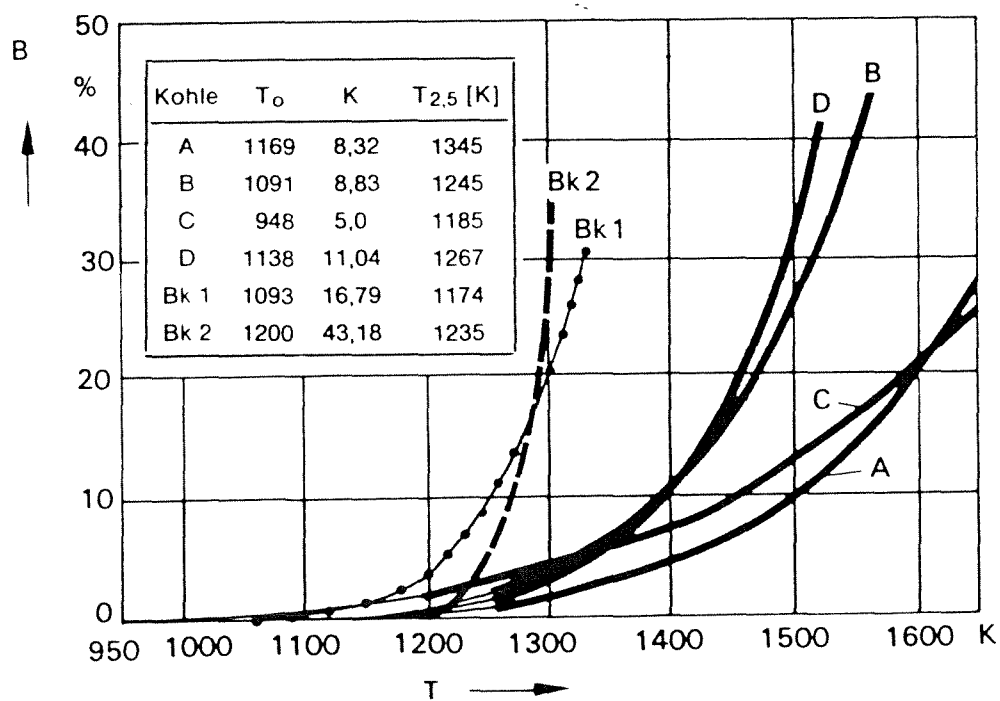
Slaggningsintensiteten I_s ($\frac{\text{påslaget}}{\text{ytenhet}}$) ökar linjärt med askmängden/ytenhet och exponentiellt med asktemperaturen. Resten i formeln utgörs av apparatberoende konstanter.

K kallas slaggningskoefficient
 T_o är den teoretiska temperaturen där slaggningen börjar.

1984-09-20

Askanalys för de i Figur 3.2 beskrivna kolen (3)

Kohle	K	T_o K	$T_{2.5}$ K	Aschezusammensetzung %										
				SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Mn ₃ O ₄	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O
A	8.32	1169	1345	38.8	20.6	22.6	0.1	0.8	4.4	2.6	6.2	0.1	0.5	2.3
B	8.83	1091	1245	43.1	7.9	26.1	0.2	1.1	5.8	3.8	6.5	0.4	3.1	2.1
C	5.0	948	1185	52.5	13.8	21.9	0.0	0.0	2.4	1.5	2.4	0.2	0.3	2.3
D	11.04	1138	1267	50.8	8.3	24.0	0.0	1.0	3.0	3.0	3.7	0.2	3.1	2.9
Bk 1	16.74	1093	1174	44.5	18.3	12.6	0.31	1.2	9.6	2.7	8.5	0.57	1.13	0.51
Bk 2	43.18	1200	1234	53.3	10.6	26.4	0.07	3.6	2.2	1.6	0.97	0.39	0.34	0.56

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON SLAGGING INTENSITY
DEFINED BY K AND T_o (3)

Figur 3.2

Slaggningsintensitet B som funktion av temperaturen.

1984-09-20

Storheterna K och T_0 bestäms experimentellt.

I Figur 3.2 redovisas resultat från VGBs slaggu-
gn.

De först mätbara slaggpåslagen ligger på 2-3 %
av tillförd aska. Den temperatur då slaggnings-
påslaget motsvarar 2.5 %, benämns $T_{2.5}$.

3.2 Beskrivning av belägningsfenomen ur kemisk och fysikalisk synvinkel

3.2.1 Slaggningspåslag

Nedanstående beskrivning följer i huvudsak Raask
(1973) (ref 13). Om ett rent metallrör placeras
i en gasström med fina partiklar bildas som ett
första steg ett tunt lager med en tjocklek
understigande 1 μm . Eftersom lagret avsätts runt
om brukar man utgå från att deponeringen beror
på elektrisk attraktion av positivt laddade
partiklar. Deponeringen upphör när skiktet
blivit så tjockt att det blivit elektriskt
isolerade.

Den första anlagringen på den sida av röret som
är vänt mot gasströmmen, sker under inverkan av
krafter med kort räckvidd som van der Waalskrafter,
ytspänning och mekanisk vidhäftning på
rörets yta. De kan inte leda till någon massiv
ansamling av material. De krafter, som håller
fast detta skikt vid en oxiderad metallyta är
dock ofta betydande (Figur 3.3) speciellt vid
ferritiskt stål och skiktet kan normalt inte
avlägsnas vid sotblåsning. Bindningen är av
samma typ som emaljbindningen vid järn och det
bindande skiktet innehåller ca 25 % järnoxid.
Skiktet har också en värmeutvidgningskoeffi-
cient, som är anpassad till ferritiskt stål.
Vidhäftningen blev mycket sämre hos austenitiskt

1984-09-20

stål, som har en ca 50 % högre värmeutvidgningskoefficient än silikatskiktet. Närvaron av krom motverkar också tillförseln av järn till silikatskiktet. Man kan minska vidhäftningen vid metaller genom tillsats av kopparoxyklorid, som framgår av Figur 3.3.

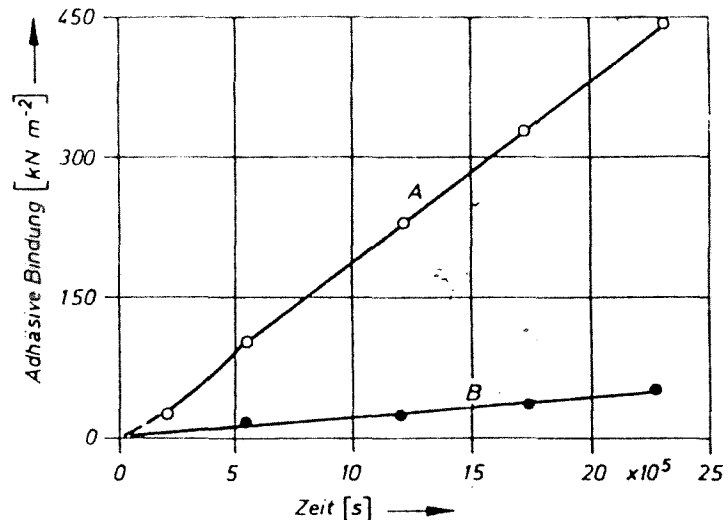


Bild 4. Bindungsstärke zwischen einer Kohlenascheablagerung und ferritischem Stahl bei 900 K.

A: unbehandelte Asche; B: Asche mit 0,01 ppm Kupferoxyklorid (13)

Figur 3.3

Van der Waalskrafter vilka binder den primära beläggningen vid en ferritisk stályta vid 900°K.

A obehandlad aska

B aska med 0.01 ppm kopparoxidklorid

Uppkomsten av mera massiva fastsittande avlagringar kräver att primärt relativt luckra avlagringar sintrar på de ytor på vilka de primärt har avsatts. På grund av pannornas konstruktion kommer man alltid att få askavlagringar på överhettarrör o d, och inga pulvereldade torrbottenanläggningar skulle kunna bibehållas i drift om man inte hade regelbundet återkommande s k sotblåsningar.

Man kan visa att nästan alla mineralpartiklar kommer att omformas till avrundade former i

1984-09-20

flamman. Villkoret är att de skall ha en viskositet på $10^3 - 10^5 \text{ Nsm}^{-2}$, och ha en tillräckligt lång uppehållstid i flammen. Figur 3.4 visar att man vid temperaturer på ca 1300°C får en nästan

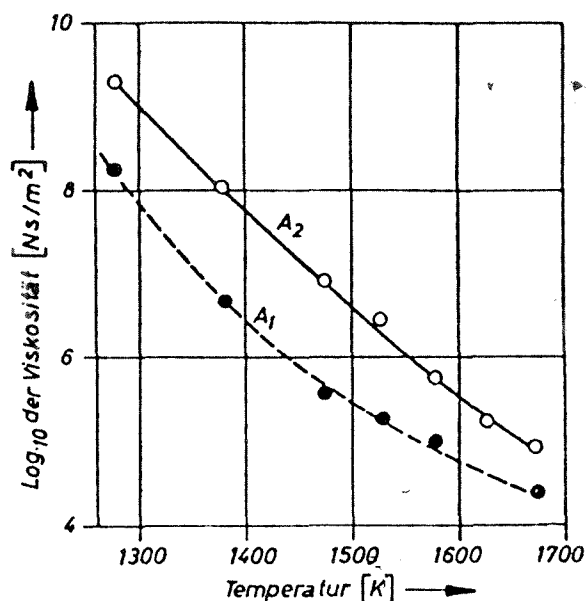


Bild 8. Schlackeviskositäten. (13)

A1: unbehandelte Schlacke;

A2: Schlacke mit Kupferoxychlorid

Figur 3.4

Slaggviskositet som funktion av temperaturen.

A1 Normal slagg

A2 Slagg med kopparoxyklorid

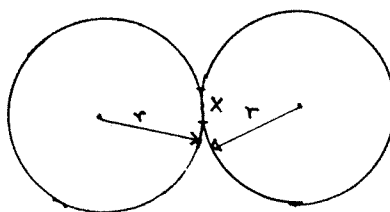
$$^{\circ}\text{C} \quad ^{\circ}\text{K} - 273$$

fullständig omlagring till smälta "runda" partiklar. Eldstadstemperaturen är i allmänhet avsevärt högre. Endast korn av ren kvarts behåller sin ursprungliga form. Man kan därför anta att de avlagrade kornen är sfäriska när de avsätts på ytan. Man antar dessutom i en första approximation att de har en likformig sammansättning och att de utgör ett glas, dvs övermättade lösningar av de mineral, som vid uppnådd termodynamisk jämvikt skulle falla ut ur smältan (spineller, mullit). Som framgår av andra delar av denna redogörelse är inget av dessa antaganden

1984-09-20

generellt giltigt. Det förekommer dels att enstaka mineralkorn, framför allt omvandlat pyrit, kommer att uppträda som enstaka "droppar" med betydligt lägre viskositet än askans huvudmängd och utgör ett kitt mellan icke-sintrade askbeståndsdelar, dels att man får utfällningar som mer eller mindre radikalt minskar beläggningarnas hållfasthet.

Den viktigaste mekanismen vid askans sintring är brygg-bildning, dvs två intilliggande korn förenar sig utefter en del av ytan så att man får en kropp med en genomskärningsyta motsvarande en åtta.



Figur 3.5

Frenkel (1945) (ref 14) visade att x som funktion av tiden kan uttryckas

$$x^2 = \frac{3\sigma r t}{2\pi\eta}$$

där η är viskositeten, σ ytspänningen, r partikelns radie och t tiden. Man har visat att ytspänningen inte ändras mycket med tiden och för kolaska ligger vid ca 0.3 Nm^{-1} (ref 15, 1966). Reid, ref 16, har påpekat att variationer i ytspänningen kan föreligga). Slaggens viskositet är dock starkt temperaturberoende och kommer att vara hastighetsbestämmande. Figur 3.6 (ref 17) visar vilka tider det tar för uppkomsten av en

1984-09-20

brygga med $x=0.1$ resp 0.5 vid olika viskositeter. Av kurvan framgår klart att man får en långsam sintring också vid mycket höga viskositeter, $10^9 - 10^{10} \text{ Nsm}^{-2}$ för partiklar på $50 \mu\text{m}$, för mindre partiklar vid viskositeter upp mot

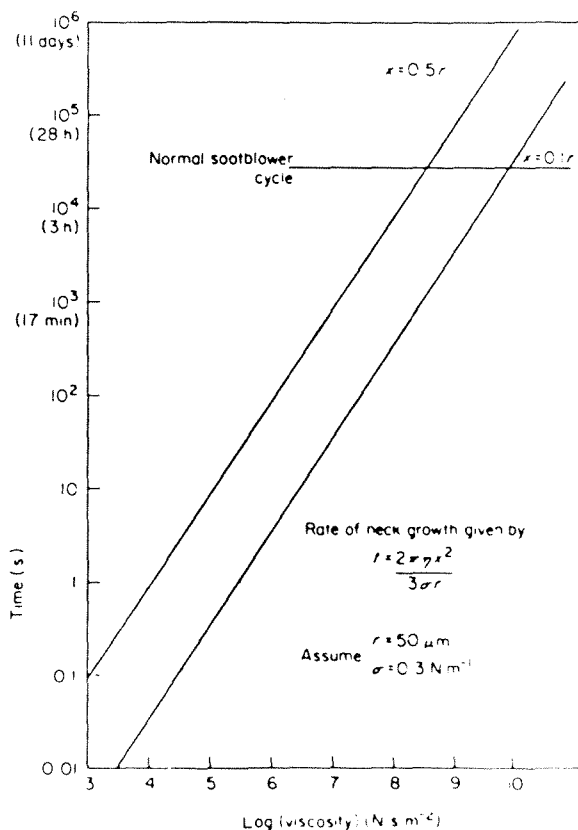


Fig. 2. The relationship between viscosity and rate of neck-growth between ash particles (17)

Figur 3.6

Samband mellan viskositet och "kols tillväxt-hastighet" mellan askpartiklar.

10^{11} Nsm^{-2} . Det måste påpekas att man ofta överskrider den kritiska viskositeten, dvs underskrider den temperatur vid vilken utfällning skulle ske om man hade termodynamisk jämvikt. Som framgår av andra delar av denna rapport är man för uppskattning av värden på viskositeten $>10^8 \text{ Nsm}^{-2}$ tvungen att använda andra fysikaliska egenskaper, som har ett temperaturberoende likartat det som gäller för viskositeten. Exempel på sådana egenskaper är

1984-09-20

elektrisk ledningsförmåga och termomekaniska egenskaper (ref 18).

Raask (1973) har infört begreppen långsam sintring, som vid 10 timmars upphettning ger $x=0.1$ r, snabb sintring som ger $x=0.1$ r för r 0.5 - 50 μ efter 2 min och mycket snabb sintring, som ger $x=0.1$ r efter 1 s. Han har indelat förekommande engelska kol i tre klasser A, B och C, som framgår av Tabell 3.1.

Tabell 3.1

Sintringsförhållanden för kolaska

VGB KRAFTWERKSTECHNIK 53
Heft 4 April 1973

E. Raask: Verschlackungen
Verschlackungsmechanismen

Tafel 1. Sinterverhalten von Kohlenaschen.

Kennzeichnung der Kohlenasche	A	B	C
Järnoxidhalt i askan Gew.-% Fe_2O_3	3- 8	8-15	15-23
SiO_2 - Förhållande $\text{SiO}_2 \cdot 100$	72-80	65-72	50-65
$\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}$			
Långsam sintring, °K	1350-1450	1250-1350	1150-1250
Snabb sintring, °K	1450-1550	1350-1450	1250-1350
Mycket snabb sintring, °K	1550-1700	1450-1600	1350-1500

Indelningen har gjorts efter SiO_2 -kvot och järnoxidhalt i askan. Kol tillhörande grupp A ger i allmänhet inga slaggningsproblem, medan kol tillhörande grupp C generellt ger stora problem. För eldning av kol av typ B erfordras en viss omsorg, dvs man måste framför allt undvika hög temperatur på beläggningarna och reducerande atmosfär. Raask anger att en höjning

1984-09-20

av beläggningstemperaturen med 25^oK och övergång från oxiderande till reducerande atmosfär kan öka slaggningshastigheten tiofaldigt.

3.2.2 Foulning

"Foulning" definierades i kapitel 2 och förekommer i pannans konvektionsdelar.

Foulning-beläggningar anses vara resultatet av kondensation på värmeväxlarerören av de alkali-metaller, som förgasas i förbränningszonen. Speciellt natriumföreningar kan bilda lågsmältande föreningar med andra komponenter i flygaskan. Exempel på viktiga sådana komponenter (ref 33 Hein et al) framgår av Tabell 3.2 och 3.3.

För amerikanska öststatskol antar man att komplexa alkali-järnsulfater skall vara av stor betydelse. Dessa är också av avgörande betydelse för korrosionen på värmeväxlarrören (se kap 4). För västamerikanska kol citerar Mraw uppgifter från GFETC (Grand Forks Energy Technology Center) att natrium, kalcium och kisel inverkar genom en komplex växelverkan. De lågsmältande föreningarna bildar ett klister som infångar

Tabell 3.2

Lågsmältande askkomponenter

Tafel 2. Schmelzpunkte von in Feuerräumen auftretenden Verbindungen. (33)

Verbindung	Schmelzpunkt, K
Sulfate: Na ₂ SO ₄ K ₂ SO ₄ Na ₃ K ₃ Fe ₂ (SO ₄) ₆	1157 1349 825
Sulfide: Na ₂ S K ₂ S FeS FeS ₂	1448 1113 1468 1444
Chloride: NaCl	1072
Silicate: Na ₂ O · 2 SiO ₂ Na ₂ O · SiO ₂ CaO · SiO ₂ CaO · Al ₂ O ₃ · 2 SiO ₂ K ₂ O · Al ₂ O ₃ · 6 SiO ₂ Na ₂ O · Al ₂ O ₃ · 6 SiO ₂	1147 1362 1817 1826 1423 1391

°C
871
1544
1150
1118

1984-09-20

Tabell 3.3

Eutektiska blandningar med låga smältpunkter

Tafel 3. Eutektische Mischungen mit niedrigen Schmelzpunkten. (33)

System	Schmelzpunkt, K
reine Oxide:	
CaO — Fe ₂ O ₃	1478 1205
CaO — FeO	1406 1133
CaO — SiO ₂	1709 1436
schwefelhaltige Verbindungen:	
Na ₂ SO ₄ — NaCl	898 625
Na ₂ SO ₄ — CaSO ₄	1191 918
Na ₂ SO ₄ — CaSO ₄ — K ₂ SO ₄	1118 — 1206 845
Na ₂ S — FeS	913
FeS — FeO	1213
CaS — CaSO ₄	1123 850
Silicate:	
SiO ₂ — Al ₂ O ₃ — CaO	1438 — 1533 1165 1260
SiO ₂ — Al ₂ O ₃ — Fe ₂ O ₃	1346
SiO ₂ — Al ₂ O ₃ — K ₂ O	1023
SiO ₂ — CaO — Na ₂ O	998 725
SiO ₂ — CaO — K ₂ O	1007 730
CaO — FeO — SiO ₂	1366 1043
CaO — FeO — SiO ₂ — MgO	< 1320 1047

andra infallande askpartiklar och ger upphov till en tjockare beläggning. I ett antal arbeten har Wibberley och Wall (1982 62) kunnat visa att närvaron av natriumoxidånga kan ge upphov till ett silikatlager med låg viskositet på partiklar som gör det möjligt att de ansamlas på en metallyta.

En annan mekanism, som föreslagits av Stinespring, innebär att natrium diffunderar till mineralcornens yta. Detta ger därvid uppkomst av lättsmälta silikater, som lätt kan klibba vid metallytor och tidigare avsatta beläggningar.

De empiriska observationerna antyder att det framför allt är natrium som påverkar fouling-benägenheten. Kaliums roll är mera osäker. Det kan dock påpekas att närvaro av klorid i kolet enligt Raask medför att en del av det från början silikatbundna kaliet kommer att förgöras och sannolikt bilda kaliumsulfat. Den mest

1984-09-20

uppenbara konsekvensen av denna reaktion är risken för en starkt ökad sulfatinducerad korrosion. Den kommer därför att behandlas mera i detalj i kap 4. Korrosion av metallytor är som ovan påpekats en av de faktorer som medverkar till att ökad tendens till fouling.

3.3 Mineral i kol - slaggnings fouling

Inom detta avsnitt presenteras i avsnitt 3.3.1 vilka mineraler som förekommer i kol. Viktiga reaktioner för mineralerna, varvid bl a lågsmltande komponenter respektive till fouling bidragande föreningar kan bildas behandlas i avsnitt 3.3.3.

Densiteter och bindningsformer för olika oorganiska komponenter och hur detta inverkar på slaggnings- respektive foulingtendens berörs i avsnitt 3.3.4.

3.3.1 Mineral i kol

Vid de inaskningar som görs för konventionell askanalys och asksmältningssförlopp förstörs i hög grad de ursprungliga oorganiska beståndsdelarna, mineral. För att veta hur olika föreningar föreligger i kolet måste vi därför studera mineralerna direkt.

I Tabell 3.4 från ref 23 anges vanliga mineral i kol. I Tabell 3.5 anges mindre vanliga mineral.

I de flesta kol dominerar leror. Kaolinleror uppför sig vid förbränning betydligt gynnsammare än t ex illitleror ur slaggningsynpunkt.

1984-09-20

Tabell 3.4

I kol vanliga mineralgrupper och mineral samt deras kemiska huvudsammansättning (23)

Mineralgrupp	Mineral	Huvudsaklig sammansättning
Skifferleror	Muskovit	$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$
	Illit	$2K_2O \cdot 3MeO \cdot Al_2O_3 \cdot 24SiO_2 \cdot 12H_2O$ (där Me = Fe, Ca, Mg)
	Montmorillonit	$Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$ (delvis substitut av Al_2O_3 med MgO, CaO, K_2O och Na_2O)
Koalinleror	Koalinit	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
	Halloyit	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$
Kvarts	Kvarts	SiO_2
Sulfider	Pyrit och markasit	FeS_2
Karbonater	Kalcit	$CaCO_3$
	Dolomit	$CaCO_3 \cdot MgCO_3$
	Ankerit	$CaCO_3 \cdot FeCO_3$
	Siderit	Några Fe kan substitueras av Mg och Mn $FeCO_3$
Klorider	Halit	$NaCl$
	Sylvit	KCl

Tabell 3.5

Mindre allmänna mineral (23)

Mineral	Huvudsammansättning
Fältspat	$(KNa)_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
Hornblende	$CaO \cdot 3FeO \cdot 4SiO_2$
Klorit	$5(FeMg)O \cdot Al_2O_3 \cdot 3.5SiO_2 \cdot 7.5H_2O$
Gips	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Apatit	$9CaO \cdot 3P_2O_5 \cdot CaF_2$
Zirkon	$ZrO_2 \cdot SiO_2$
Epidot	$4CaO \cdot 3(AlFe)O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$
Biotit	$K_2O \cdot 6(MgFe)O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$
Magnetit	Fe_3O_4
Hämatit	Fe_2O_3
Ilmenit	$TiO_2 \cdot FeO$

1984-09-20

3.3.2 Metoder att studera mineral i kol

Mineral i kol kan studeras direkt i svepelektronmikroskop SEM. Koncentrering av mineral kan även ske med lågtemperaturinaskning.

Inaskning vid 815°C förstör flera av de ursprungliga mineralens uppbyggnad. För att kunna göra bestämningar på vilka mineral som ingår kan inaskning ske vid $\sim 125^{\circ}\text{C}$ under ~ 20 h (låg temperaturinaskning, LTA).

Därefter kan analys göras av de flesta mineral med t ex röntgendiffraktion, scanning elektronmikroskop (SEM) och i vissa fall via infraröd spektroskopi (IR) resp via differentiell termisk analys (DTA).

De olika analysmetoderna kompletterar varandra.

3.3.3 Exempel på möjliga reaktionsvägar för några kolmineral samt på smältpunkter för förekommande eller bildade komponenter

Koalinit och illit visar skilda reaktionsmönster vid förbränning. Möjliga reaktionsmönster enligt Hein 1983 framgår av Tabell 3.6.

Som framgår av Tabell 3.6 bildar illit glasfaser redan $>900^{\circ}\text{C}$.

Möjliga reaktioner med kalцит framgår av Tabell 3.7.

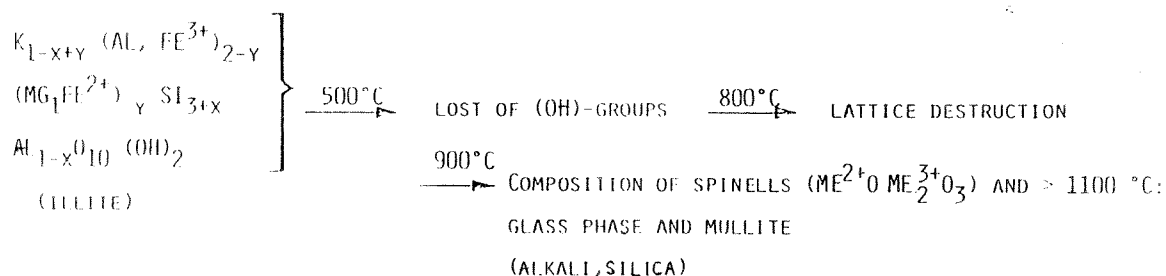
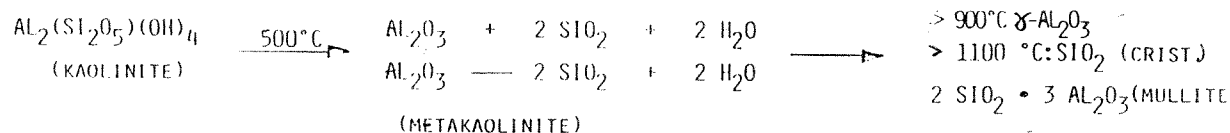
Möjliga reaktioner för pyrit framgår av Tabell 3.8.

1984-09-20

Tabell 3.6

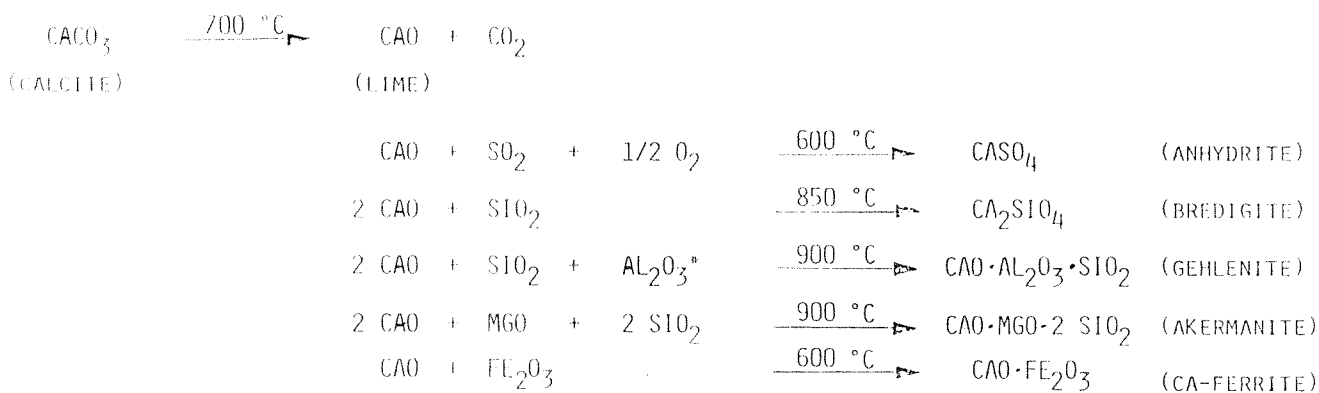
Möjliga reaktionsvägar för kaolinit resp illit.

POSSIBLE PHASE CHANGES OF CLAYS (KAOLINITE, ILLITE) DURING COMBUSTION (1)



Tabell 3.7

Möjliga reaktioner för kalcit under förbränning

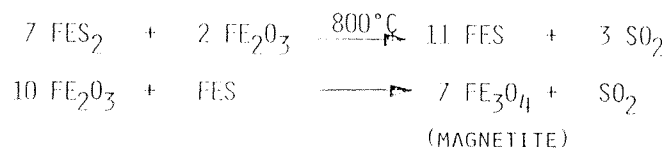
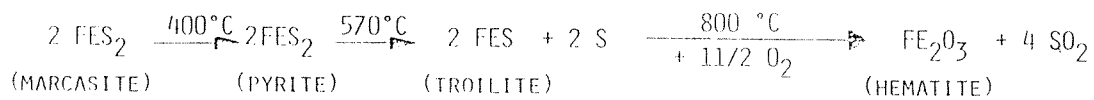
POSSIBLE PHASE CHANGES OF CaCO_3 (CALCITE) DURING COMBUSTION (1)

* E.G. FROM CLAY

1984-09-20

Tabell 3.8

Möjliga reaktioner för pyrit vid förbränning

POSSIBLE PHASE CHANGES OF FeS_2 (PYRITE/MARCASITE) DURING COMBUSTION (1)

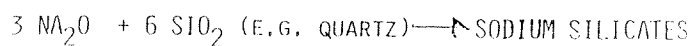
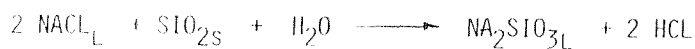
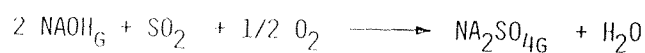
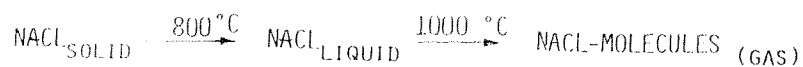
* E.G. FROM CLAYS

1984-09-20

Tabell 3.9

Tänkbara reaktioner för NaCl vid förbränning

POSSIBLE PHASE CHANGES OF NaCl (HALITE) DURING COMBUSTION (1)



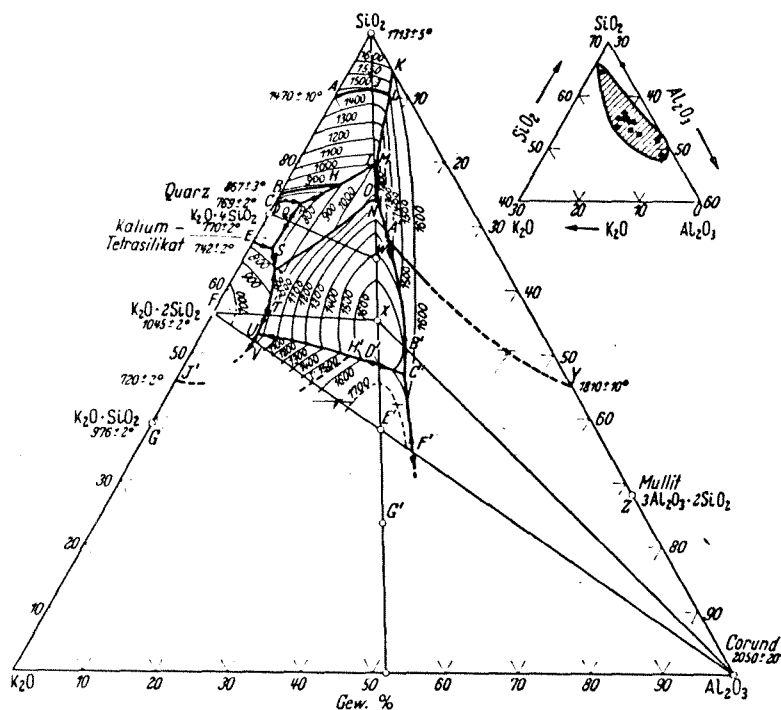
NA - ONE OF THE NORMAL-GLASS-COMPONENTS (NA-, CA-, SI-OXIDES)

1984-09-20

Några tänkbara reaktioner för NaCl framgår av Tabell 3.9. Observera att så lågsmltande eutektika som 630 resp 770°C kan bildas.

Andra lågsmltande föreningar med Na som Na_2O framgår av det ternära fasdiagrammet i Figur 3.9.

Analoga lågsmltande föreningar som med natrium kan även bildas med kalium enligt Figur 3.7. Det streckade fältet i Figur 3.7 markerar vanliga kolassammansättningar.

Abb. 84. System $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O}$ (nach SCHAIRER und BOWEN)

(26)

Figur 3.7

Ternärt fasdiagram för systemet $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$.

Reaktioner mellan kalcit och lermineral kan ge föreningar i det ternära diagrammet $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ i Figur 3.8. Här ligger smältpunkterna relativt högt.

1984-09-20

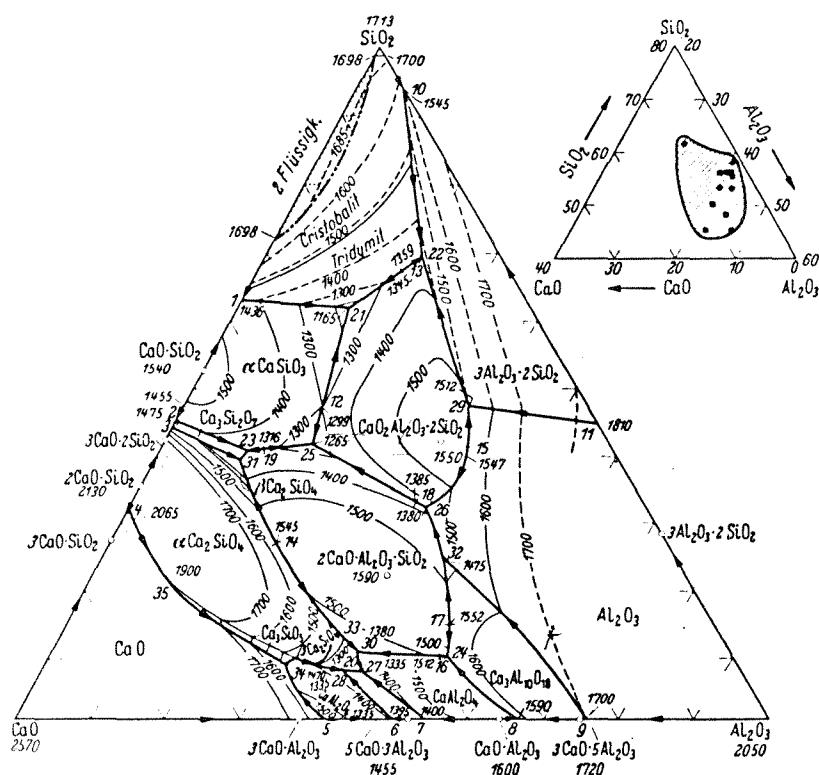


Abb. 82. System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ (nach RANKIN ergänzt und berichtigt von GREIG und WRIGHT)

(26)

Figur 3.8

Ternärt fasdiagram CaO-Al₂O₃-SiO₂.

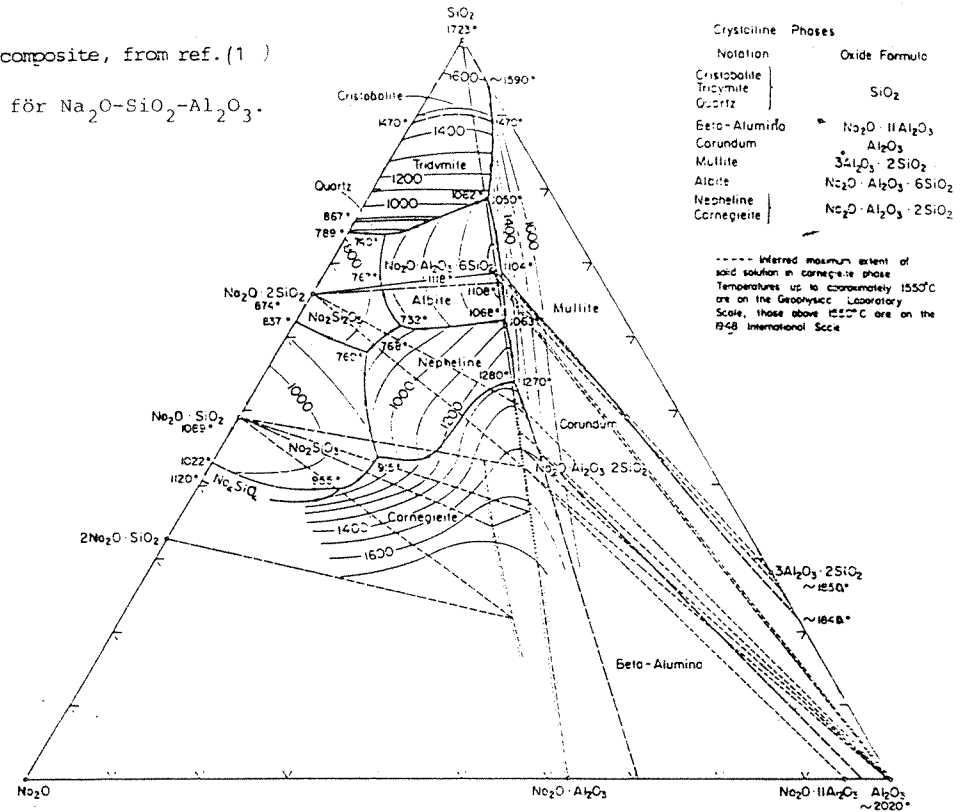
När järn ingår, i synnerhet som FeO, kan föreningar med lägre smältpunkter (ner till 1073°C) bildas enligt Diagram 3.9.

Emellertid är verkligheten ännu mer komplicerad då fler än tre komponenter inverkar samtidigt på vilka lågsmältande föreningar som bildas. I t ex Figur 3.10 ingår fyra komponenter.

En mycket viktig faktor för vilka föreningar som bildas är även rådande gasatmosfär. De faktiska smältpunkterna i pannan för dessa komponenter påverkas också av gasatmosfären.

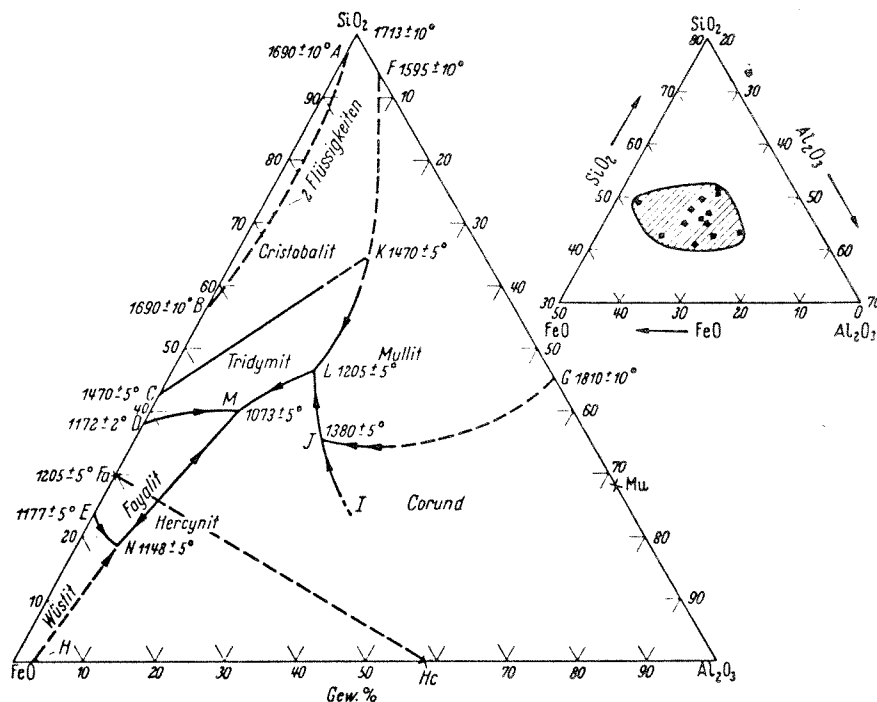
1984-09-20

System $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$; composite, from ref. (1)
 Ternärt fasdiagram för $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$.



Figur 3.9

Ternärt fasdiagram $\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$.

Abb. 83' System $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{FeO}$ (nach SCHAIRER)

(26)

1984-09-20

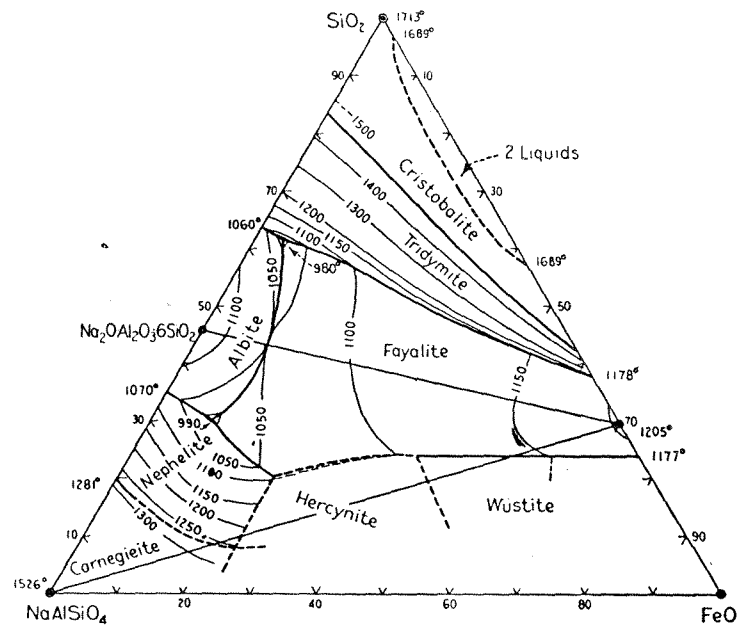
(7) $\text{Na}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 

Fig. 302.—System $\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; hercynite equilibria are not ternary.

N. L. Bowen, *Am. J. Sci.*, **33**, 9 (1937).

Figur 3.10

Fasdiagram med fyra komponenter.

I Tabell 3.10, 3.11 och 3.12 redovisas smältpunkter för ett antal föreningar som föreligger i kolet eller kan bildas i förbränningen.

1984-09-20

Tabell 3.10

Smältpunkter för ingående föreningar

DIRECT MELTS (1)

		°C	°K	°F
- Sulfater	Na_2SO_4	884	1157	1623
	K_2SO_4	1071	1344	1950
	MgSO_4	1127	1400	2060
	$\text{Na}_3\text{K}_3\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_6$	552	825	1025
- Sulfider	Na_2S	1175	1448	2147
	K_2S	840	1113	1544
	FeS	1188	1461	2106
	FeS_2	1171	1444	2140
- Klorider	NaCl	800	1073	1472
- Silikater	$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	1544	1817	2811
	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$	1553	1826	2763
	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6 \text{SiO}_2$	1150	1423	2102
	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6 \text{SiO}_2$	1118	1391	2041
	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2 \text{SiO}_2$		1147	
	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$		1362	

1984-09-20

Tabell 3.11

Smältpunkter för eutektika som kan bildas

EUTECTICS (1)

	°C	°K	°F
- Oxidblandningar:			
CaO + Fe ₂ O ₃	1205	1478	2201
CaO + FeO	1133	1406	2071
CaO + SiO ₂		1709	
- Blandningar där även S- ingår:			
Na ₂ SO ₄ + NaCl	721	898	1330
CaSO ₄ + CaS	850	1123	1562
CaSO ₄ + Na ₂ SO ₄	918	1191	1684
MgSO ₄ + Na ₂ SO ₄	680	953	1256
CaSO ₄ + Na ₂ SO ₄ + K ₂ SO ₄	845 - 933	1118 - 1206	1553 - 1711
FeS + FeO	940	1213	1724
Na ₂ S + FeS	661	913	1222
- Silikater:			
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + CaO	1265	1438 - 1533	2309
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	1073	1346	1963
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + K ₂ O	695	968	1283
SiO ₂ + CaO + K ₂ O	730	1003	1346
SiO ₂ + MgO + K ₂ O	700	973	1292
SiO ₂ + Na ₂ O + K ₂ O	540	813	1004
CaO + FeO + SiO ₂		1366	
CaO + FeO + SiO ₂ + MgO		< 1320	

1984-09-20

Tabell 3.12

Fastfasreaktioner till lågsmältande komponenter

SOLID/SOLID REACTIONS (1)

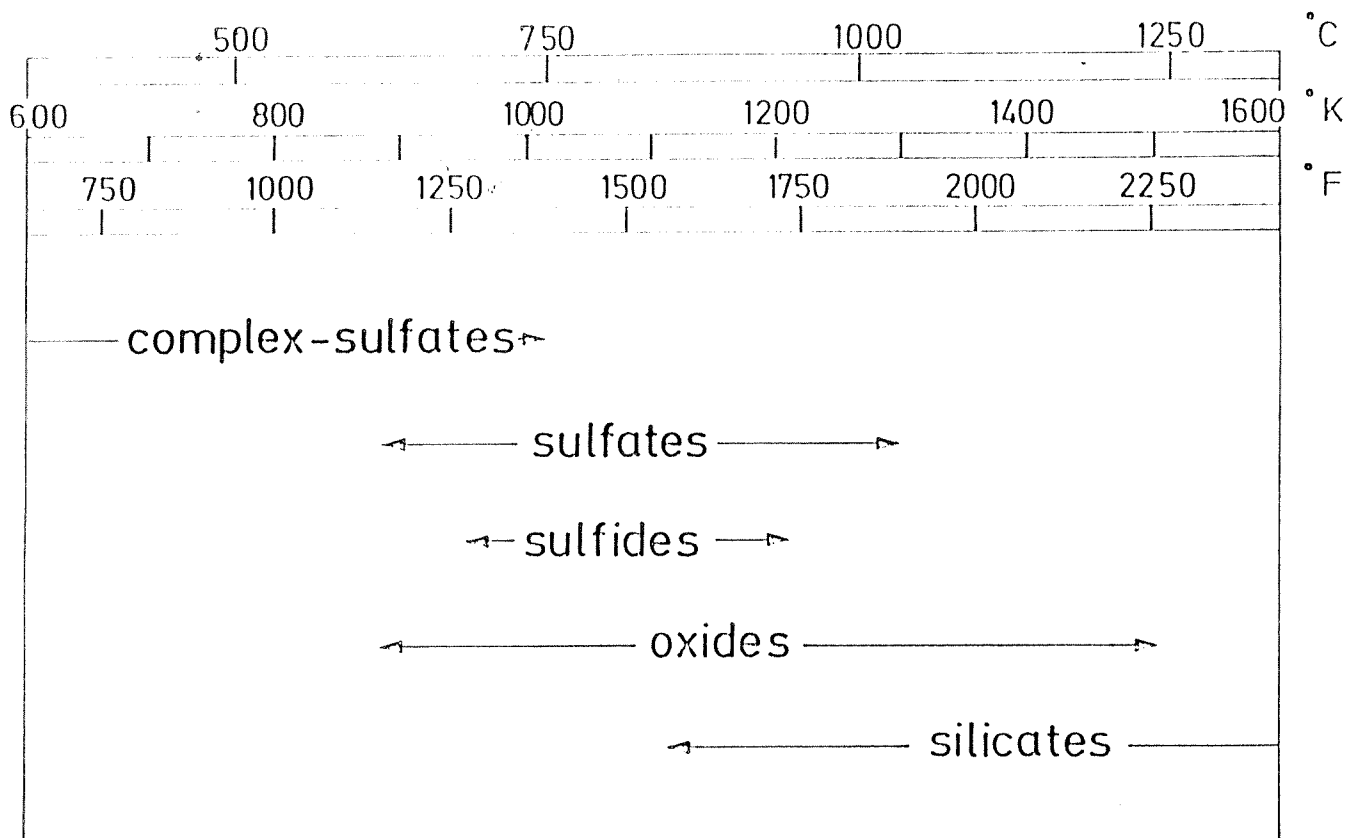
			°C	°K	°F
			STARTING AT:		
- Oxider:	MgO	Fe ₂ O ₃	697	970	1287
	CaO	Fe ₂ O ₃	597	870	1107
- Silikater	MgO	SiO ₂	747	120	1377
	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	577	850	1070
	CaO	SiO ₂			
	CaO	FeO SiO ₂			
	2 CaO	Al ₂ O ₃ SiO ₂			
	2 CaO	MgO 2 SiO ₂			

Av Figur 3.11 framgår inom vilka temperaturintervall som olika typer av föreningar utgör de "bindande komponenterna".

Som framgår av Figur 3.11 och Tabell 3.13 svarar vid de lägsta temperaturerna komplexa sulfater och fosfater för bindningen. Dessa låga temperaturer återfinns i konvektionsdelen där sulfater, i synnerhet Na₂SO₄ och i lägre grad även t ex K₂SO₄, kan kondensera på tuberna och bidra till fouling. Om natriumhalten är hög och föreligger som i en del ligniter till väsentlig del som bundet i en del ligniter, utkondenseras dess salter i än högre grad i foulingtemperaturområdet, vilket enligt Figur 5.4 bidrar till att pannan måste kraftigt dimensioneras upp.

1984-09-20

Temperature Range for Main Bonding Compounds (1)



Figur 3.11

Temperaturområden där olika föreningar utgör bindekomponenter.

Tabell 3.13

Tabelle 72. Temperaturbereich für die Existenz verschiedener Bindemittel in Ansätzen (26)

Temperaturbereich (im Ansatz)	Bestandteile des Bindemittels
400— 600 °C	Alkali-Eisen-Sulfate, Alkali-Aluminium-Sulfate, Alkali-Phosphate, Erdalkali-Phosphate, Silikate, Erdalkali-Sulfate
600— 800 °C	Silikate, Erdalkali-Sulfate, Erdalkali-Phosphate (zurücktretend)
800—1000 °C	Silikate, Erdalkali-Sulfate zurücktretend, Beginn der Sintererscheinungen
über 1000 °C	Sinterung der Schlackeglaskügelchen

3.3.4 Densiteter för några vanliga kolmineral och exempel på inverkan av askfördelning och sammansättning i olika densitetsfraktioner

Komponenter med speciellt hög täthet ($>2.8 \text{ g/cm}^3$) segrergera i samband med förbränningen och ge

1984-09-20

upphov till en slagg med låg smältpunkt. Som framgår av Tabell 3.14 från ref 23 har pyrit den allra högsta densiteten för kolmineral. Mineralfritt kol ligger mestadels inom densitetsområdet $\sim 1.3 - 1.49 \text{ g/cm}^3$.

Tabell 3.14

Mineraler eller mineralslag samt deras densitet (23)

Mineral eller grupp	Densitet
Järnsulfider (pyrit, marcasit)	5
Siderit	3.8
Ankerit	3.5-3.8
Kalcit	2.7
Dolomit	2.9
Kvarts	2.65
Lermineral	2.3-2.6

Bryers 1984 (ref 27) ansåg att denna densitets-segregation kunde förklara varför vissa kol med hög asksmältpunkt var slaggande trots ej "farlig" askanalys.

Genom att studera askhalt, askanalys och egenskaper för olika densitetsfraktioner kan också avgöras om ytterligare koltvätt borde vara gynnsam ur slaggningssynpunkt.

Dinner i ref 21 anger att ett kraftigt slaggande USA-kol med hög andel aska i densitetsfraktionen $>1.6 \text{ g/cm}^3$ efter tvättning borde ge avsevärt mindre slaggning.

Vid pulvereldning har stora korn eller korn med hög densitet ett annat uppträdande än lättare resp mindre kolkorn.

1984-09-20

Enligt Leikert K (ref 31) är återcirkulering av stora partiklar en vanlig orsak till slaggpåslag på brännarväggen, där brännarna sitter speciellt, och de sitter tätt och kan "störa" varandra.

Även i våra egna undersökningar har vi iakttagit att stora mineralkorn med låg smältpunkt kan avsätta sig och bidra till slagging.

Som framgår av Figur 3.12 för kol A och C från Borio 1979 (ref 32) kan i en del kol järn anrikas kraftigt i de tyngre fraktionerna, medan för kol B och C har alkali anrikats i de lättare fraktionerna.

Beläggningar i lägre delen av eldstaden kan vara starkt anrikade på järn i jämförelse med kolaskan, varför kol C och A borde ge dessa typer av beläggningar, eftersom Fe i dessa återfinns i fraktionerna med hög densitet.

1984-09-20

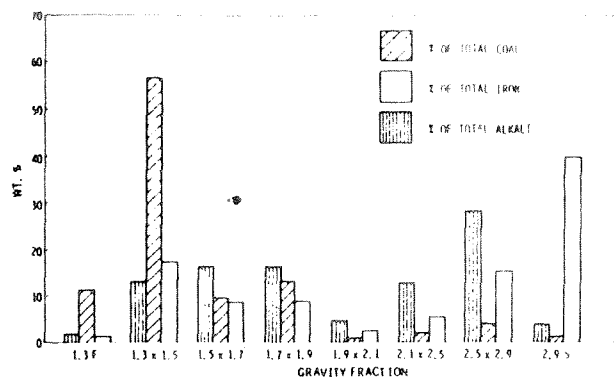


Fig. 3 Coal, iron and alkali content of various gravity fractions Coal A

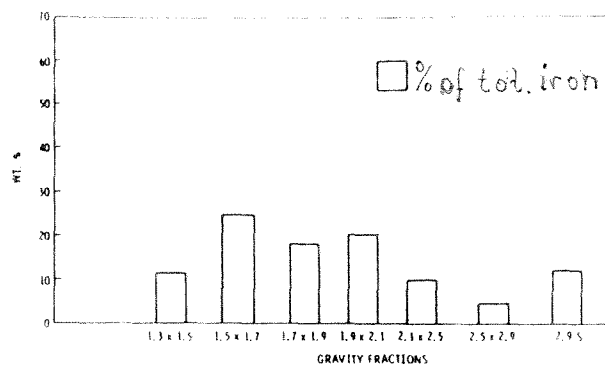


Fig. 6 Iron content of various gravity fractions Coal B

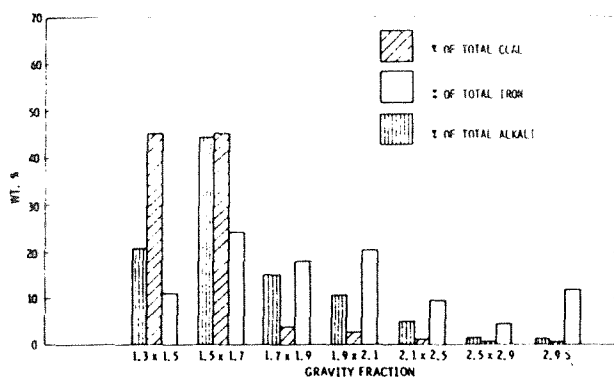


Fig. 4 Coal, iron and alkali content of various gravity fractions Coal B

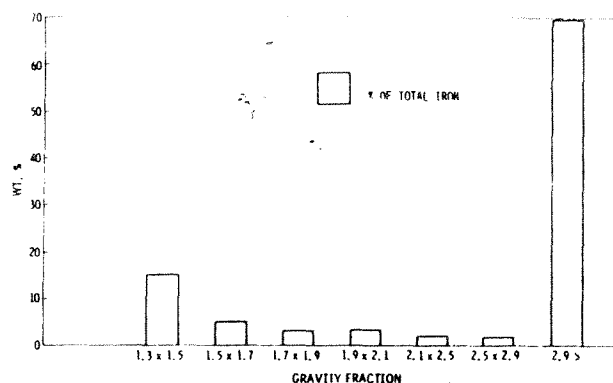


Fig. 7 Iron content of various gravity fractions Coal C

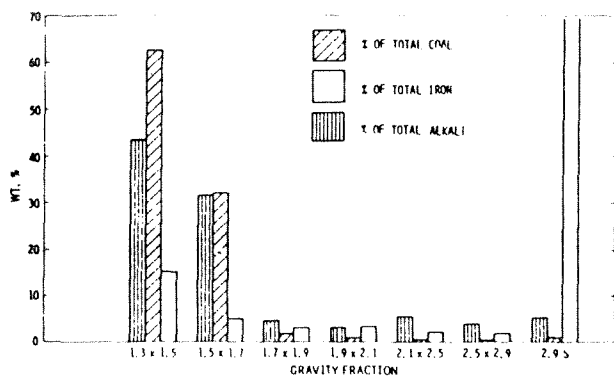


Fig. 5 Coal, iron and alkali content of various gravity fractions Coal C

Total iron compared with segregated iron

Coal	Percent Iron in entire coal ash	Total percent iron in 2.9 sink fraction
A	9.5 (2)*	39.9 (2)*
B	15.5 (3)	11.9 (1)
C	8.9 (1)	69.7 (3)

* Numbers in parentheses indicate order of increasing iron values.

Table 7 Total alkali compared with segregated alkali

Coal	Percent Alkali in entire coal ash	Total alkali in 1.7 float fraction
A	3.7 (3)*	30.0 (1)*
B	3.4 (1)	66.2 (2)
C	3.5 (2)	76.2 (3)

* Numbers in parentheses indicate order of increasing alkali values.

(32)

Figur 3.12

Fördelning av järn, kol och alkali efter densitetsseparation av kol A, B och C.

Att möjligheter för bl a järnkomponenter att segregera i pannor leder till lågsmältande komponenter framgår av Tabell 3.15, hämtad från ref 21.

1984-09-20

Där redovisas resultat från undersökningar av beläggningar i SEM. Bindningskomponenterna är starkt anrikade på järn, kalcium och svavel i förhållande till kolens medelanalys. (Dessa återfinns i Tabell 5.2.)

Under avsnitt 5.7 behandlas segregering av järnrika komponenter och deras inverkan på slaggbildning.

Tabell 3.15

SEM-analys av olika partiklar och områden i en pannbeläggning

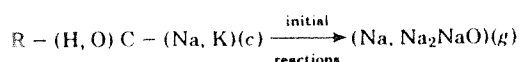
COMPOSITION OF VARIOUS CONSTITUENTS IN THE PORTION OF
THE FURNACE DEPOSIT SHOWN IN FIGURE 9-8 (21)

Particle or Area	EDS Analysis, percent of total counts							
	Si	Al	Fe	S	Ca	K	Ti	Mg
7	47	41	7	0	10	5	0	0
8	58	29	8	0	6	3	2	0
9	49	27	7	0	2	5	3	7
10	2	0	96	0	2	0	0	0
bindemassa 11 (boundary)	5	2	63	6	25	0	0	0
12	15	5	17	0	60	0	0	3
bindemassa 13 (boundary)	7	2	47	8	37	0	0	0

När alkali föreligger i de tyngre fraktionerna kan det föreligga i t ex leror eller fältspalter, vilka förångas i lägre grad än organiskt bunden alkali vid förbränning.

Sannolikheten för en stor andel organiskt bunden alkali är hög om alkali anrikas i de lättare fraktionerna som för kol B och C. Denna organiskt bundna alkali bidrar i hög grad till fouling.

Primära reaktioner:



1984-09-20

4. RÖKGASSIDIG KORROSION

Rökgassidig korrosion ingår inte direkt i området slagging-fouling. De förändringar i pannans konstruktionsmaterial, som uppkommer vid korrosion vid temperaturer över 350°C har dock ett fundamentalt samband med de första stegen i slagging-fouling-förlopp, och de påverkar starkt beläggningarnas vidhäftning vid underlaget. Förekomsten av slaggbeläggningar påverkar å andra sidan starkt vissa korrosionsförlopp. Det har därför verkat angeläget att i detta sammanhang också behandla vissa synpunkter på rökgassidig korrosion vid högre temperaturer. Det synes däremot inte finnas skäl att behandla korrosionsproblem i pannans lågtemperaturdel (ESP, slangfilter etc).

Torsten Holm har 1982 utfört en mera omfattande sammanfattning av litteratur om rökgassidig korrosion (38) för STUs räkning. Denna framställning har delvis legat till grund för texten i detta kapitel, och vi hänvisar till den för en mera detaljerad information.

4.1 Inverkan av vissa mekanismer vid rökgassidig högtemperaturkorrosion

Man kan i princip skilja på två grupper av korrosionsfenomen:

- Korrosion i oxiderande atmosfär
- Korrosion i reducerande miljö (sulfid-inducerad korrosion)

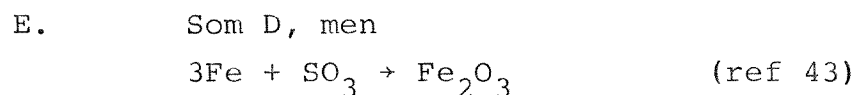
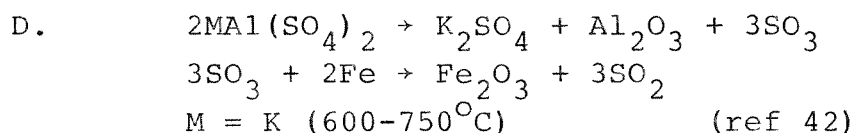
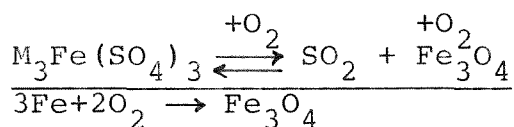
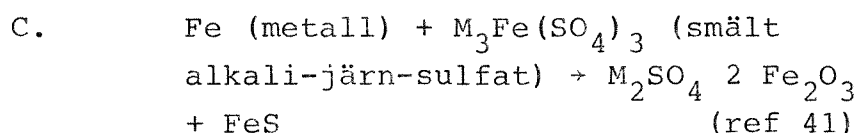
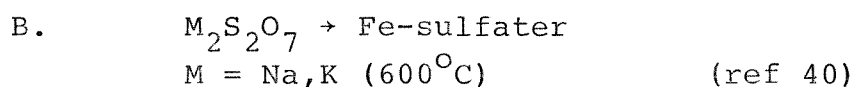
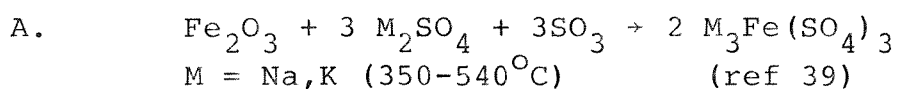
4.1.1 Korrosion i oxiderande miljö

Som framgår av Holms redogörelse (ref 38) finns flera olika möjliga reaktioner för rökgassidig högtemperaturkorrosion i pannor. De flesta

1984-09-20

baseras på en reaktion mellan metallen och smältor. Utan att ta ställning till frågan om gasfasreaktioner ibland kan vara viktiga kommer framställningen här att behandla endast smältor eftersom dessa är viktigast för sambandet mellan korrosion och slagging-fouling.

Hein (ref 1) anger följande 5 reaktionsmekanismer



Vid samtliga dessa reaktioner spelar bildning av alkalisulfater och deras transport till de korroderande ytorna en väsentlig roll. Denna transport kommer därför att diskuteras mera i detalj i mom 4.2.

Av de angivna reaktionsmekanismerna syns A vara dominerande åtminstone i området $>600^\circ\text{C}$. Enligt Nelson och Cain (ref 41) kommer man att få en

1984-09-20

direkt reaktion mellan $\text{Me}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ och järn vid temperaturer över 550°C . Reid (ref 44) påpekar att såväl direkt angrepp på metallen som upplösning av oxidskiktet följt av förnyad oxidation med syre förmodligen båda är viktiga mekanismer. Ytterligare en möjlig reaktionsmekanism är att korrosionsbeläggningarna består av alkali-aluminiumsulfat och bildats genom reaktioner mellan askbeståndsdelarna. Denna mekanism har föreslagits av Baker et al (ref 42) och synes bekräftas av analyser publicerade av Adams & Raask (ref 45).

Reaktioner enligt mekanism B är osannolika då de förutsätter mycket höga SO_3 -halter, som inte normalt kan förekomma i rökgaser (större än totala svaveldioxidhalten i rökgasen).

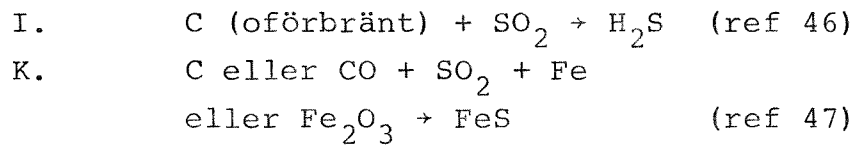
Mekanism A belyses i mom 4.3.

4.1.2 Korrosion i reducerande miljö (sulfid-inducerad korrosion)

Intresset för korrosion i reducerande miljö har ökat framför allt på grund av införandet av s k låg- NO_x -brännare, där den första delen av förbränningen kan ge upphov till en reducerande miljö på vissa värmemottagande ytor. Enligt Hein (ref 1) kan oförbränt kol reducera svaveldioxid enligt reaktionerna I och K.

Sulfidering kan ske genom inverkan av pyrit speciellt om partiklarna träffar varma metall- ytor, då man får svåra metallangrepp. Detta kan ske om kolet innehåller relativt stora pyritkorn.

1984-09-20



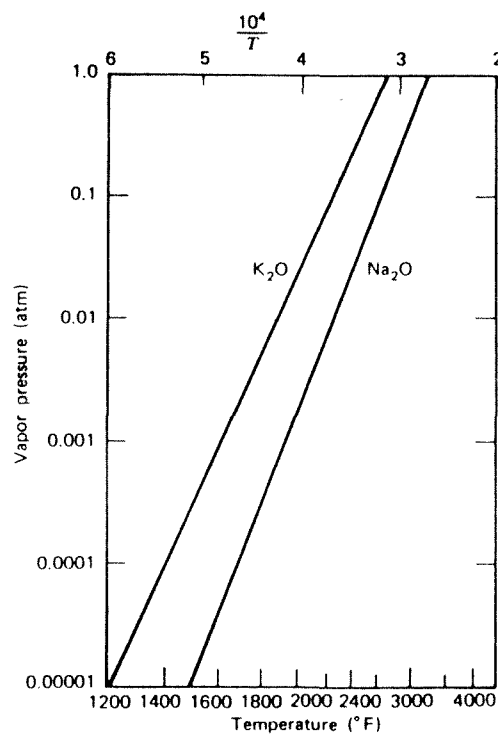
Cutler och Raask (ref 48) har visat att man i brännarzonen kan få korrosionsangrepp på flera hundra nanometer per timme (nmh⁻¹) om man har avsättning av oförbränt kol eller mycket höga CO-halter. Detta skall jämföras med normalt 40 nmh⁻¹. De förhöjda korrosionshastigheterna medför en aktningsvärd reduktion av materialets livslängd. Det bör observeras (ref 38) att sulfidisk korrosion ger upphov till korngränsangrepp på de flesta legeringsmetaller, som används för att förbättra stålets kemiska och mekaniska resistens.

4.2 Tillförsel av alkali till korrosions- ytorna samt inverkan av klorid

Som nämnts ovan spelar alkalisulfater en viktig roll vid nästan alla de reaktionsmekanismer, vid vilka det bildas korrosiva beläggningar på järn- och stålytor i oxiderande miljö. På grund av den katalyserande effekten, som Fe₂O₃ har på omvandlingen av SO₂ till SO₃ kan alkalioxider lätt omvandlas till sulfater (ref 1).

En del av de alkalimetaller som ingår i kol kommer att förångas i flammen. Alkalioxidernas ångtryck framgår av Figur 4.1.

1984-09-20

Figure 21.5 Vapor pressure of alkali oxides.¹⁵

Figur 4.1

Alkalioxidernas ångtryck (ref 44, 49).

Man ser att ångtrycket för K_2O är en storleksordning större än för Na_2O . Förångat K synes spela den största rollen vid bildning av de korrosiva beläggningarna, medan speciellt andelen av lätttrörligt Na är av betydelse för den andel av bränslets kalium, som kommer att frigöras vid förbränningen. Vid uppkomsten av foulingbeläggningar tycks Na spela en större roll än K att döma av analysen av faktiska beläggningar. Som Reid (ref 44) påpekar är förångning av alkalioxiderna ett problem, där man fortfarande har betydande oklarhet.

Inverkan av klorider på korrosionen i pulvereldade torrbottenpannor verkar i huvudsak vara en följd av påverkan på primärt silikatbundet kalium, som inte direkt är förångbart.

1984-09-20

4.3 Bildning av alkali-järn-trisulfat ur järnoxid

Reaktionen beskrivs enligt A i 4.1.1 och fordrar relativt höga SO_3 -halter, väsentligt högre än i rökgasen. SO_2 kan oxideras till SO_3 under katalytisk inverkan av järnoxider, speciellt Fe_2O_3 (ref 54). Reaktionen illustreras av Figur 4.2.

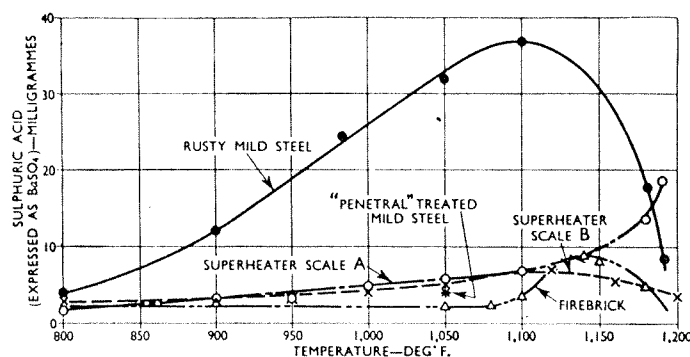


Fig. 11. Variation in Weight of Sulphuric Acid with Temperature

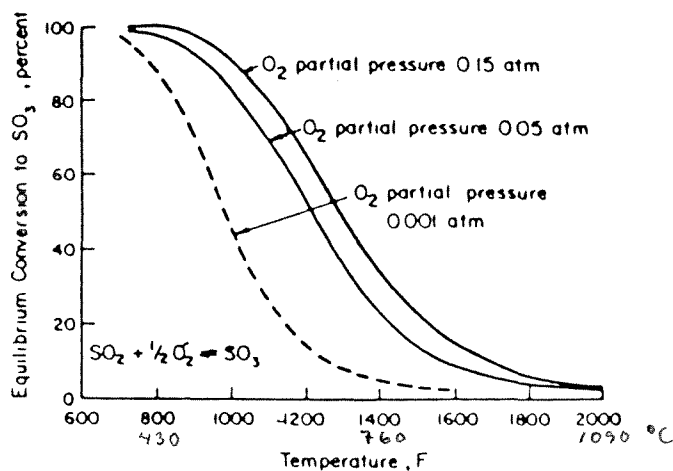
—●— Rusty mild steel.
 —△— Firebrick.
 —○— Superheater scale A.
 —x— Superheater scale B.

Figur 4.2

Katalytisk bildning av SO_3 mätt som svavelsyra (ref 54).

De erforderliga SO_3 -halterna för sulfatbildningen är av storleksordningen 2 000 ppm. Dessa halter uppnås klart genom katalytisk oxidation av rökgasens SO_2 (ref 38, 44) även vid normala SO_3 -halter i rökgasen (25 - 75 ppm), vilket motsvarar 1 - 3 % av den föreliggande SO_2 -koncentrationen (ref 48). Enligt Krause et al (ref 55) kan man ha SO_3 -halter på 200 ppm 5 mm från en yta och 1 500 - 2 000 ppm 0.1 mm från ytan. Figur 4.3 visar SO_2 - O_2 - SO_3 -jämviktens temperaturberoende.

1984-09-20



Figur 4.3

SO_2 - O_2 - SO_3 -jämviktens temperaturberoende (ref 56).

Järnets förekomstformer i flygaskan spelar i allmänhet en roll vid omvandlingen av SO_2 till SO_3 (ref 44). Detta innebär att järnets bindningssätt är av betydelse. Försök som refereras av Holm (ref 38) visar att $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ är effektivare som katalysator än $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ och denna i sin tur effektivare än Fe_3O_4 .

Kravet på relativt höga jämviktskoncentrationer av SO_3 vid bildningen av sulfaten medför att huvuddelen av de trisulfatinducerade skadorna sker under slaggbeläggningar (ref 44).

4.4 Korrosion i rosteldade anläggningar

Korrosion i wanderrostar har behandlats av Kautz et al (ref 57). Den väsentligaste skillnaden i förhållande till pulverförbränning är förekomsten i allvarlig skala av klorid- eller sulfidinducerad korrosion genom lokal förbränning under reducerande betingelser på eller nära den korroderande metallytan. Klorid ger upphov till FeCl_3 genom direkt inverkan av HCl på stålet. Också sulfidkorrosion förekommer som en följd av lokalt reducerande miljöer. Vid temperaturer

1984-09-20

över 570°C får man bildning av trisulfater på samma sätt som i pulvereldade anläggningar. Reaktionsmekanismen för dessa har behandlats tidigare.

4.5 Åtgärder för att minska korrosions- skadorna

Hein (ref 1) anger följande:

- undvik slagging
- undvik reducerande betingelser
- undvik oförbränt kol i beläggningar
- (späd ut svaveloxider)
- byt rörmaterial (ferritiskt-austenitiskt)

Till detta kan läggas att man bör välja kol med låg svavel- och klorhalt.

Kalium i kol föreligger i form av silikaterna illit och muskovit. Raask har simulerat upphettningensförloppet i en förbränningsanläggning genom förbränning i en kalorimeterbomb och mätt frigjort kalium. Vid närvaro av NaCl har Raask (ref 50) visat att man kan få en frigörelse av upp till 40 % av det kalium, som ingår i kolet. Detta bidrar då till bildningen av sulfat.

1984-09-20

5. SLAGGNING-FOULING OCH KORROSION I PANNOR

5.1 Inledning

Inom detta avsnitt berörs först hur värmeöverföringen förändras vid påslag (avsnitt 5.2).

I avsnitt 5.3 berörs hur några speciella förhållanden i pannor påverkar kolaskans sintringstemperatur.

Under avsnitt 5.4 behandlas summariskt var olika påslagstyper inträffar.

Dimensioneringsprinciper för kolpulverpannor berörs i avsnitt 5.5.

Hur brännarnas placering, inställning och typ kan inverka på slaggning framgår av avsnitt 5.6. Hur kolegenskaper och driftsätt påverkar slaggning exemplifieras i avsnitt 5.7.

Fouling behandlas i avsnitt 5.8.

Kortfattat berörs i slutet av kapitlet korrosion samt något om slaggning och fouling i fastbränslepannor som ej är kolpulvereldning.

5.2 Kopplingar mellan värmeöverföring och beläggningar

Vid god utbränning av flygaskan ligger dess temperatur ca 100-200°C lägre än förbränningsgasens temperatur i konvektionsdelen.

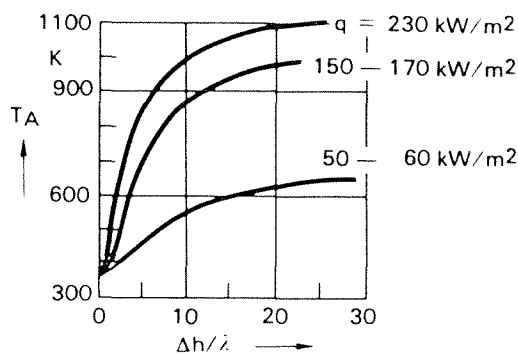
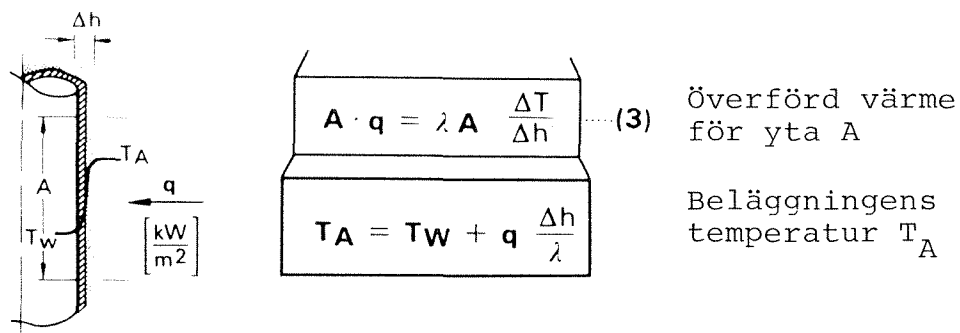
Om emellertid beläggningar bildas sjunker kyleffekten och partiklarnas temperatur ökar därvid, varvid beläggningsintensiteten succes-

1984-09-20

sivt ökar. Detta fenomen blir kraftigare ju högre K är och desto högre värmebelastningen är.

K betecknar här slaggningskoefficient, vilken är en storhet som kan bestämmas experimentellt för varje kol. I Figur 3.2 visades hur påslagen ökar med temperaturen, vilket utgjorde basen för bestämning av K .

Hur beläggningstjockleken på t ex tuber påverkar värmeöverföringen illustreras i Figur 5.1.



Einfluß der Wärmebelastung auf die Wandtemperatur
INFLUENCE OF HEAT RELEASE ON TUBE WALL TEMPERATURE
 VGB - Essen (7)

Figur 5.1

Väggtemperaturen som funktion av överförd värme vid olika laster (7).

1984-09-20

5.3 Speciella förhållanden i pannor som påverkar askans sintringstemperatur

Sintringstemperaturer minskar vid följande förhållanden:

- 1) vid reducerande atmosfär.
- 2) ju högre förbränningstemperaturen är i intervallet 1100-1400 °C.
- 3) ju högre fukthalten är.

I Figur 5.2 framgår närmare hur dessa faktorer inverkar.

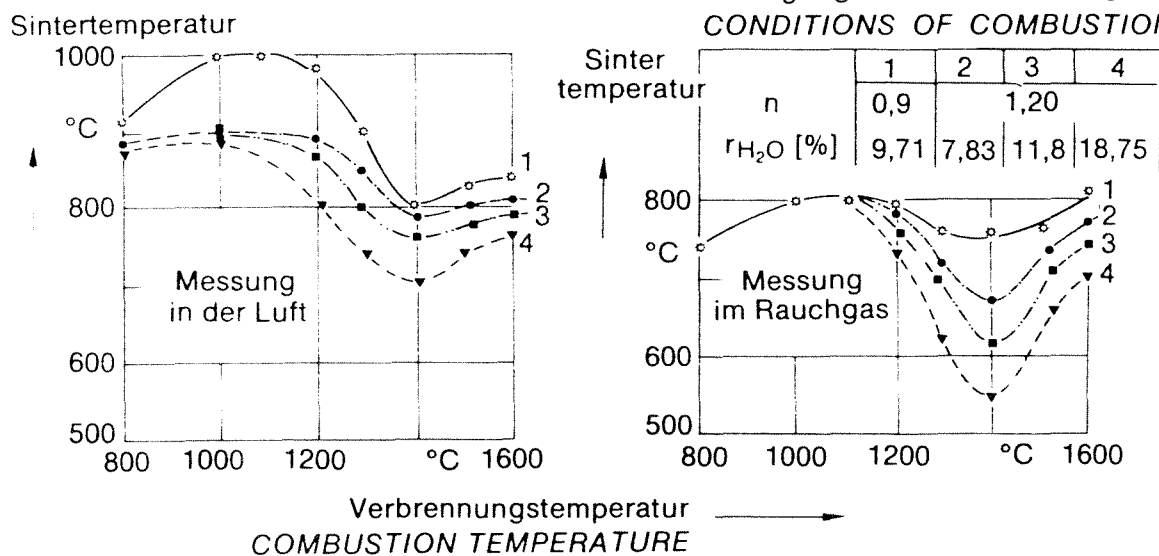
Aschezusammensetzung *ASH COMPOSITION*

SiO₂ = 27,0%; Al₂O₃ + TiO₃ = 7,7%;
 Fe₂O₃ = 15,0%; Na₂O + K₂O = 0,4%;
 CaO = 30,6%;
 MgO = 4,6%;
 SO₃ = 14,7%;

n — Luftverhållnissahl

r_{H₂O} — Feuchtigkeit in der Brennkammer

Bedingungen der Verbrennung *CONDITIONS OF COMBUSTION*



Einfluß der Verbrennungsbedingungen auf die Sintertemperatur der erzeugten Asche

*INFLUENCE OF COMBUSTION CONDITIONS ON SINTER
TEMPERATURE OF PRODUCED ASH (3)*

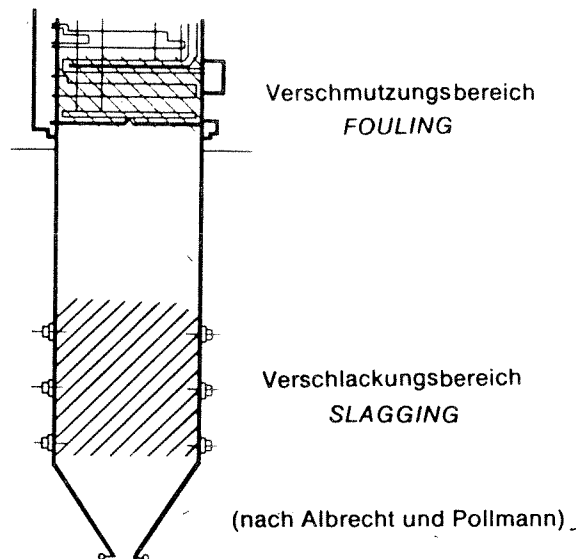
Figur 5.2

Sintringstemperaturer.

1984-09-20

5.4 Kolpulvereldade pannor

I kolpulvereldade pannor är zonen i området där brännarna sitter känsliga för slaggpåslag medan fouling företrädesvis äger rum i konvektionsdelen. Praktiska erfarenheter visar även att bildningar av slag under brännarna kan vara betydande. Detta illustreras i Figur 5.3.



Verschlackungs- und Verschmutzungszonen in einer Trockenfeuerung (3)
ZONES OF SLAGGING AND FOULING OF A DRY BOTTOM BOILER

Figur 5.3

Känsliga områden för slagging resp fouling.

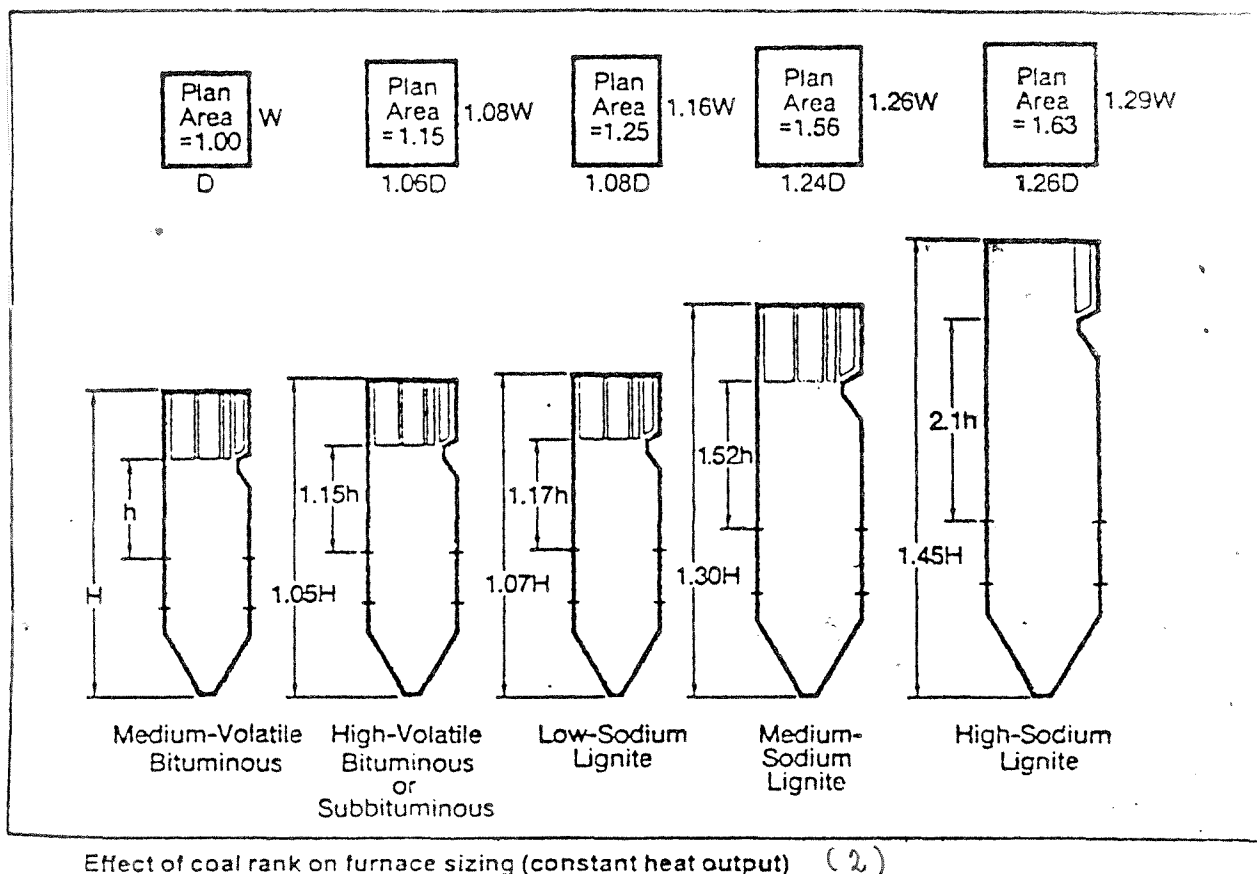
5.4.1 Dimensioneringsprinciper för kolpulvereldade pannor

Bestämmande för hur pulvereldade pannor dimensioneras är för lågflyktiga samt ej alltför högflyktiga bituminösa kol tillräcklig uppehållstid för utbränning.

För bituminösa kol med mycket hög flykthalt resp subbituminösa kol dimensioneras pannorna större. Ett skäl för detta är att bränslen med lägre värmevärde ger lägre flamtemperatur, varför kylningen måste begränsas. Dessutom måste

1984-09-20

eldstadsvolymen vara tillräckligt stor för att klara foulingproblem i konvektionsdelen. Exempel på dimensionering av olika pannor framgår av Figur 5.4 hämtad från Hein (ref 2).



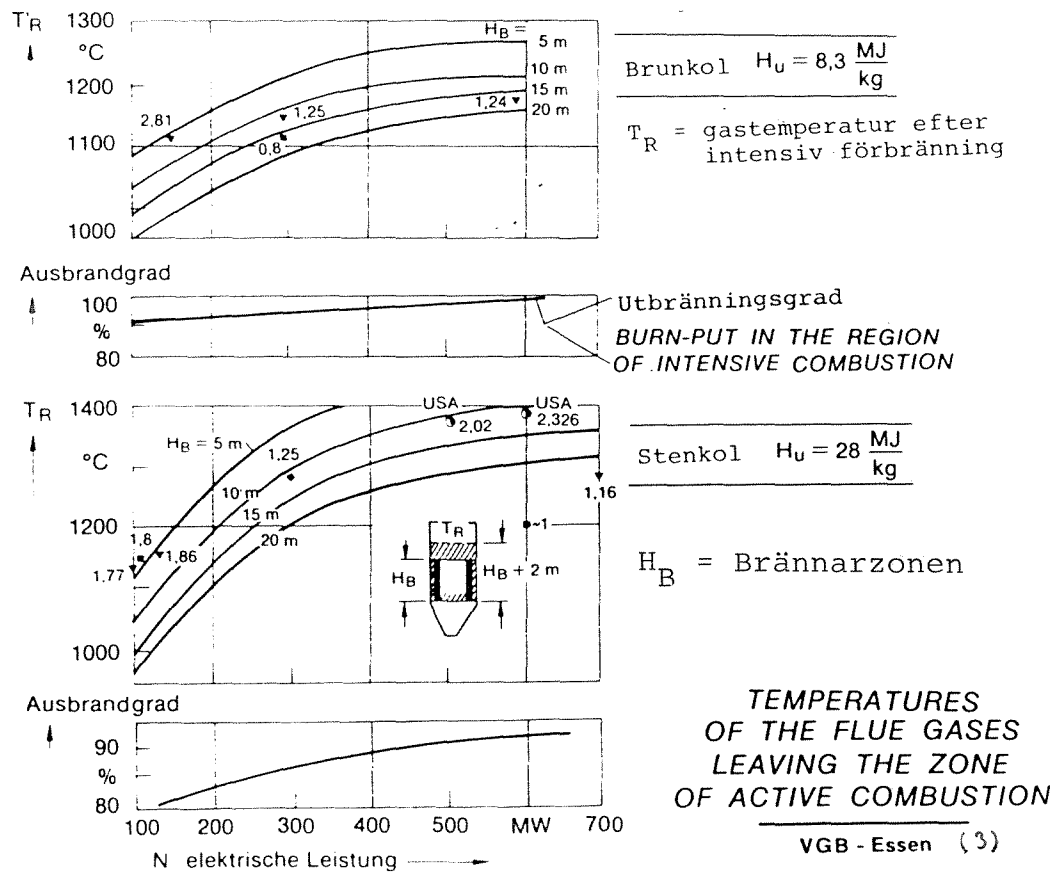
Figur 5.4 .

Exempel på schematisk dimensionering av några pannor med olika bränslen.

Beroende på brännararrangemang, värmevärde för kolet, dess flykthalt, reaktivitet och storleksfördelning sker den intensiva förbränningen i olika stora zoner i pannan. Därvid uppnås olika gastemperaturer (T_R) efter att den intensiva förbränningen har avslutats. I figuren nedan anges temperaturen 2 m ovanför översta brännarplanet.

Ju större utlagd effekt pannan har desto högre blir gastemperaturen T_R enligt Figur 5.5.

1984-09-20



Figur 5.5

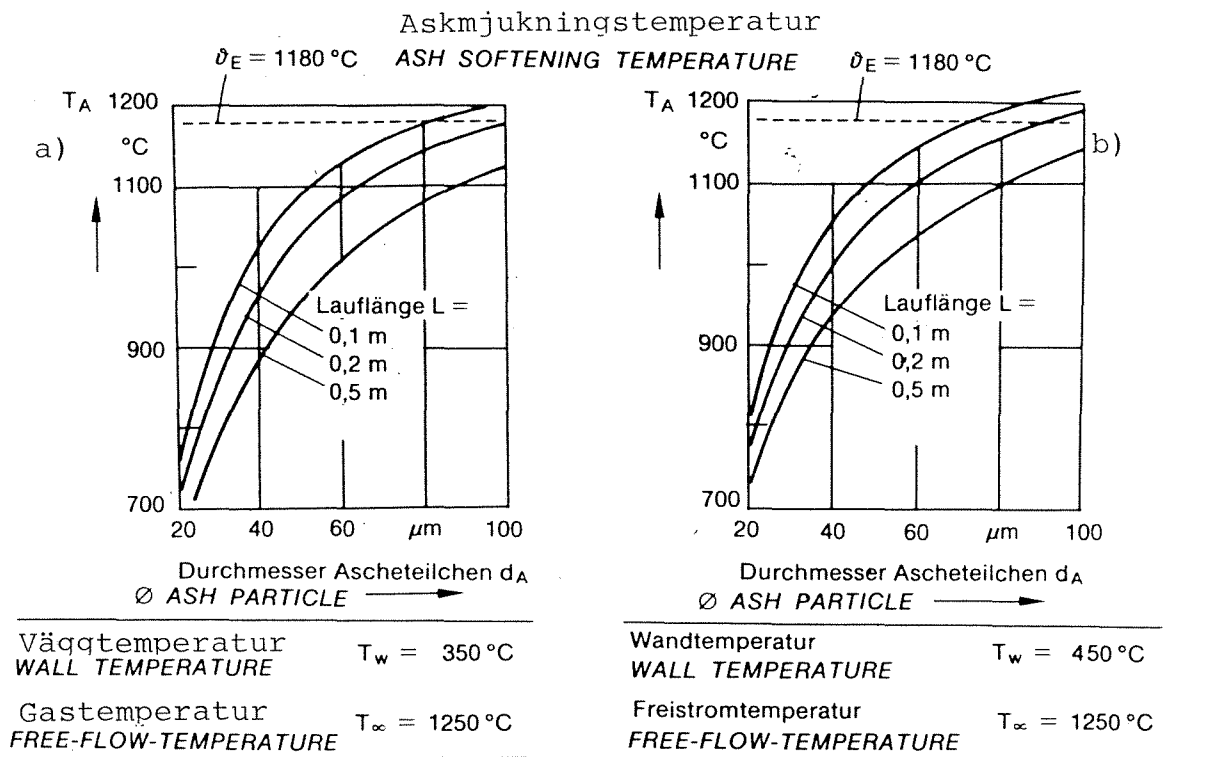
Tendenser för rökgastemperaturer efter zonen med intensiv förbränning för olika pannstorlekar och bränslen.

Av Figur 5.5 framgår också att brunkol brinner ut väsentligt snabbare än stenkol samt att gastemperaturerna T_R även ligger väsentligt lägre för brunkol än stenkol.

Utbränningsgraden för stenkol är högre i anläggningar med högre effekt.

I moderna stora anläggningar finns en tendens till att den intensiva förbränningen sker vid allt högre temperaturer. (Detta gäller dock ej vid låg NO_x -brännare.)

1984-09-20



(nach Lösel und Schmücker)

Ascheabkühlungseffekt**EFFECT OF TEMPERATURE REDUCTION OF THE ASH**

VGB - Essen (3)

Figur 5.6

Avkylningshastigheten för askpartiklar med olika storlekar.

Därför blir stora moderna anläggningar ännu känsligare för slaggpåslag än mindre och äldre anläggningar.

En stegring av gastemperaturen på max 50°C inom intervallet $1100\text{--}1300^\circ\text{C}$ kan markant öka slaggningsintensiteten.

Hur temperaturen ändras för olika stora partiklar i en varm gasström nära en kallare vägg framgår av Figur 5.6. De stora partiklarna har hela tiden en väsentligt högre temperatur än små partiklar.

1984-09-20

5.4.2 Inverkan av brännarplacering och -----inställning-----

Om flammen berör någon vägg, kan påslag bildas där.

Även en alltför tät placering av brännare på en fronteldad panna gav enligt Harn (ref 5) kraftiga påslag på brännarväggen. Efter ökning av avståndet mellan brännarna upphörde slaggingen.

I samband med tangentiell eldning kan coanda-effekten få delar av flammorna att slicka väggarna enligt Figur 5.7 vilket medför slaggpåslag. Både temperatur och hastighetsfördelning även i övre delen av pannan blir väsentligt ojämna i Figur c då flammen berör väggen. Risken för påslag ökar då zoner med hög temperatur och låg hastighet därvid skapas.

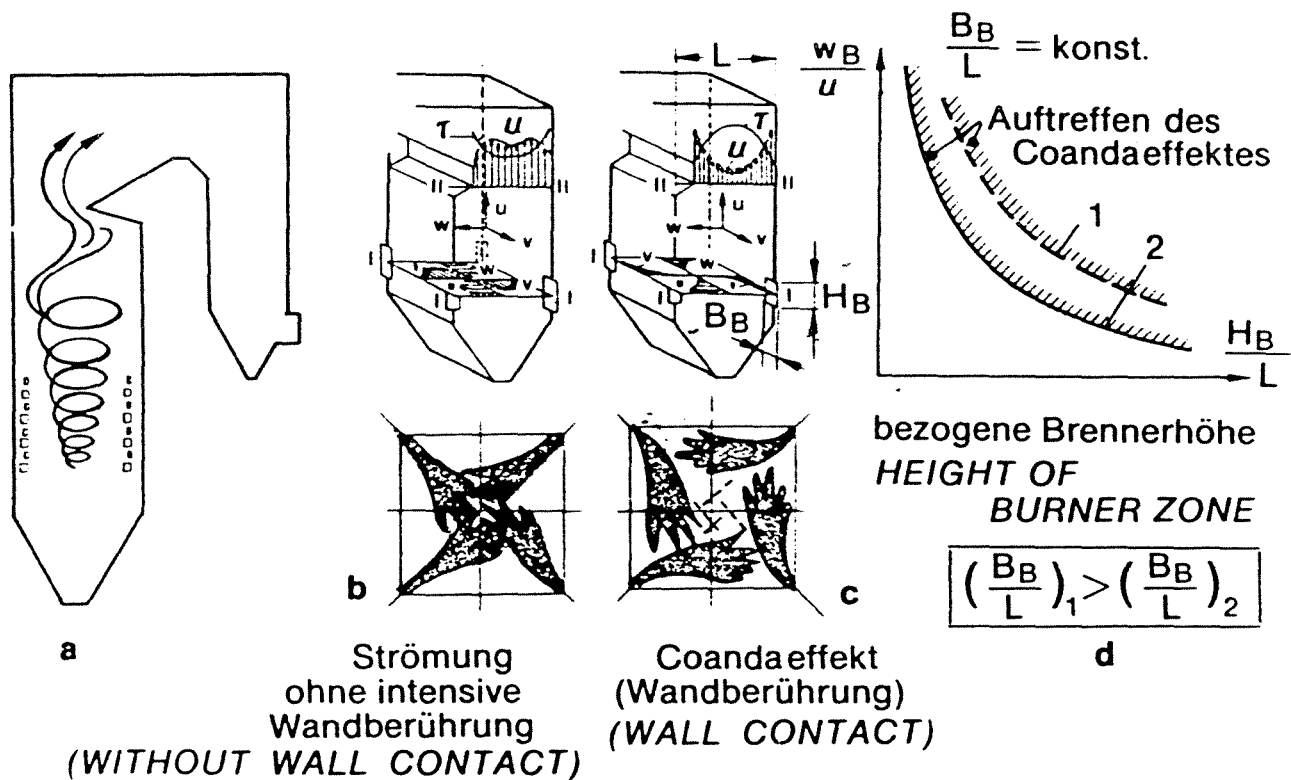
Av Figur 5.8 från Hein 1977 (ref 7) framgår att för brunkol (eldat vid låg temperatur) sker de kraftigaste påslagen på väggarna inom 2.5 m från brännarna.

Gastemperaturerna vid väggen var $\sim 750-800^{\circ}\text{C}$ och den kylda ytans temperatur var $\sim 500^{\circ}\text{C}$.

De kraftigaste påslagen innehöll väsentligt mer S än de tunnare påslagen, medan Na-halten var relativt jämn i de olika påslagen.

De minsta beläggningarna erhöles då även Ca-halten var hög, vilket inverkar gynnsamt hos brunkol för minimering av beläggningar.

1984-09-20

VGB
Essen

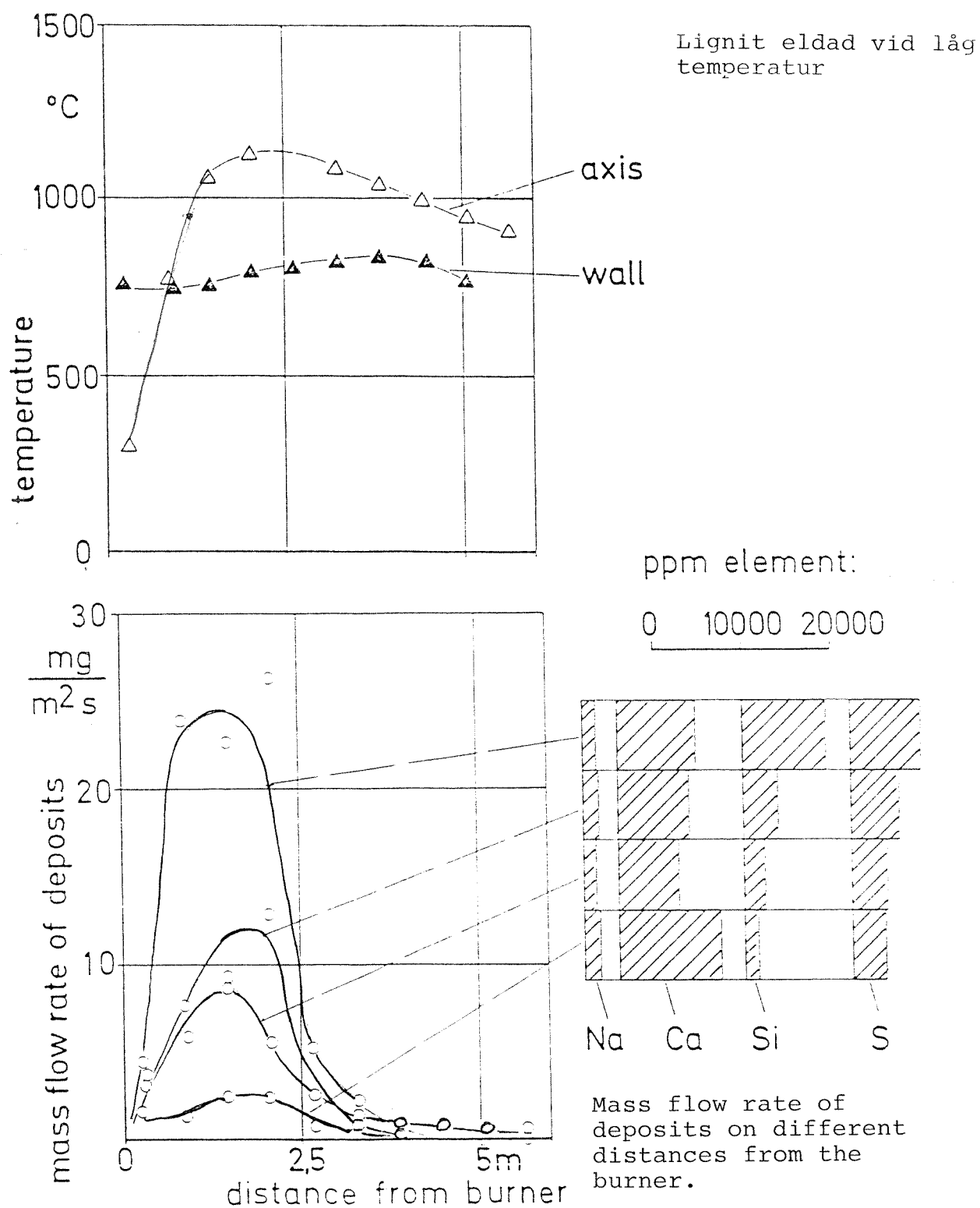
Rauchgasströmung in einer Trockenfeuerung (3)

FLUE GAS FLOW IN A DRY BOTTOM FIRING

Figur 5.7

Hastighets- och temperaturfördelning i en tangentiellt eldad panna med väggberöring resp utan väggberöring av flammorna.

Av Figur 5.9, hämtad från Hein 1983 (ref 1), framgår att andelen svavel som S^{2-} i flygaskan kan minskas och därmed mängden beläggningar på ugnsväggen om brännarutloppet utformas koniskt istället för rakt.



Beläggningssintensiteten på en yta
med temperaturen 500°C

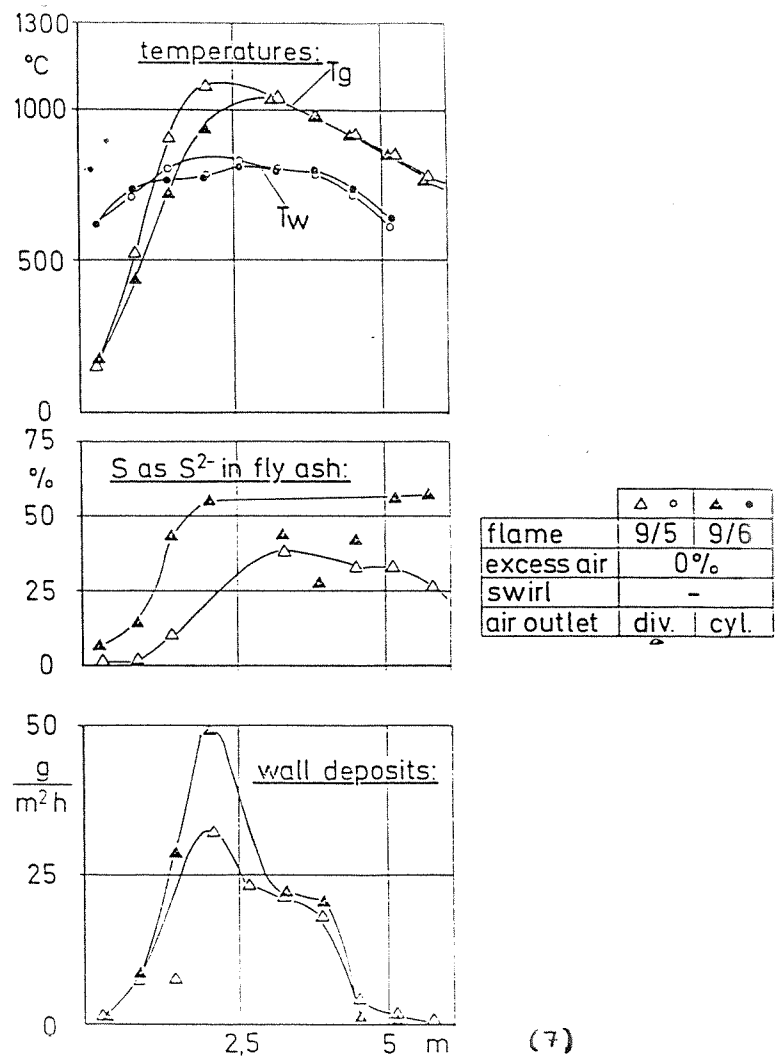
(7)

Figur 5.8

Påslagsintensiteten på brännkammareväggar som funktion av avstånd till brännare, med exempel på olika påslagssammansättningar.

1984-09-20

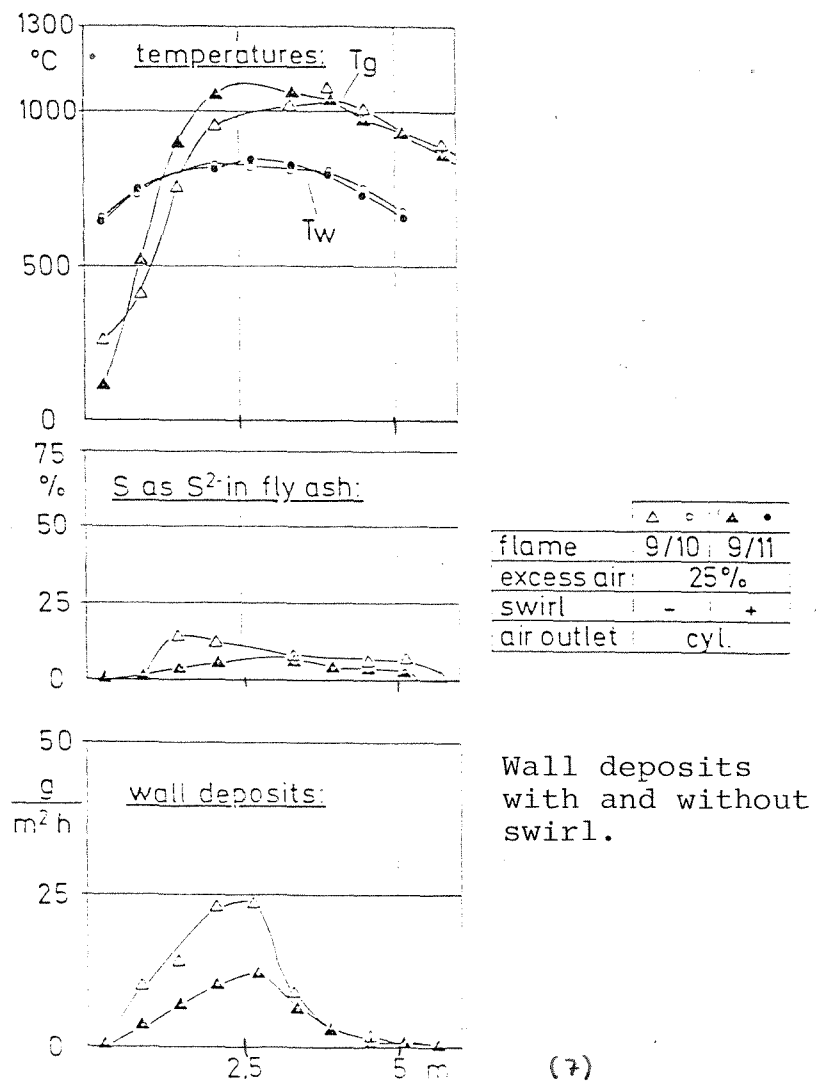
Förutom förbränningsgasernas temperatur inverkar även förbränningsprodukterna på slaggningsbenägenheten.



Figur 5.9

Inverkan av rakt respektive koniskt brännarutlopp.
Influence of air outlet on deposit formation.

1984-09-20



Figur 5.10

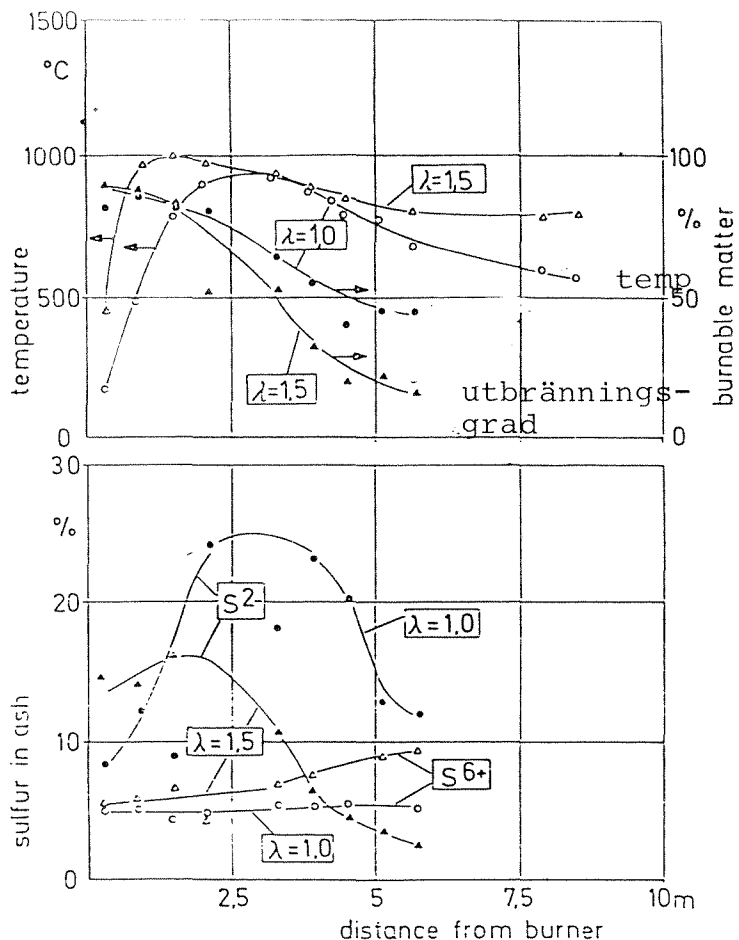
Flamtemperatur T och väggtemperatur T_w , S som S^2 samt slaggpåslag på pannväggen vid förbränning av brunkol med Δ respektive utan swirl $\bullet$.

En liknande effekt uppnås enligt Figur 5.10 om swirl (tangentiell rotation på luften, vilket förbättrar omblandningen i flaman och minimerar stråkbildning) används i brännaren.

S^2 bildas under reducerande förhållanden och medverkar till bildning av t ex lågsmltande föreningar t ex FeS.

1984-09-20

Andelen svavel som S^{2-} var enligt Figur 5.11 väsentligt högre vid stökiometrisk eldning ($\lambda=1.0$) än vid luftöverskottet 50 % ($\lambda=1.5$).



Influence of excess air level (7)

Figur 5.11

Svavel som S^{2-} respektive S^{6+} längs flammen vid luftfaktorn $\lambda=1.0$ och $\lambda=1.5$.

Ett högt luftöverskott medför således en minskning av andelen S^{2-} , vilket är gynnsamt ur slaggningssynpunkt.

Ett högt luftöverskott medför dålig bränsleekonomi, varför man i moderna pannor eftersträvar att ligga på ett så lågt luftöverskott som möjligt.

1984-09-20

Metoden att via swirl förbättra omblandningen i flamman och därigenom minska S^{2-} -bildningen tillämpas däremot i hög grad i praktiken.

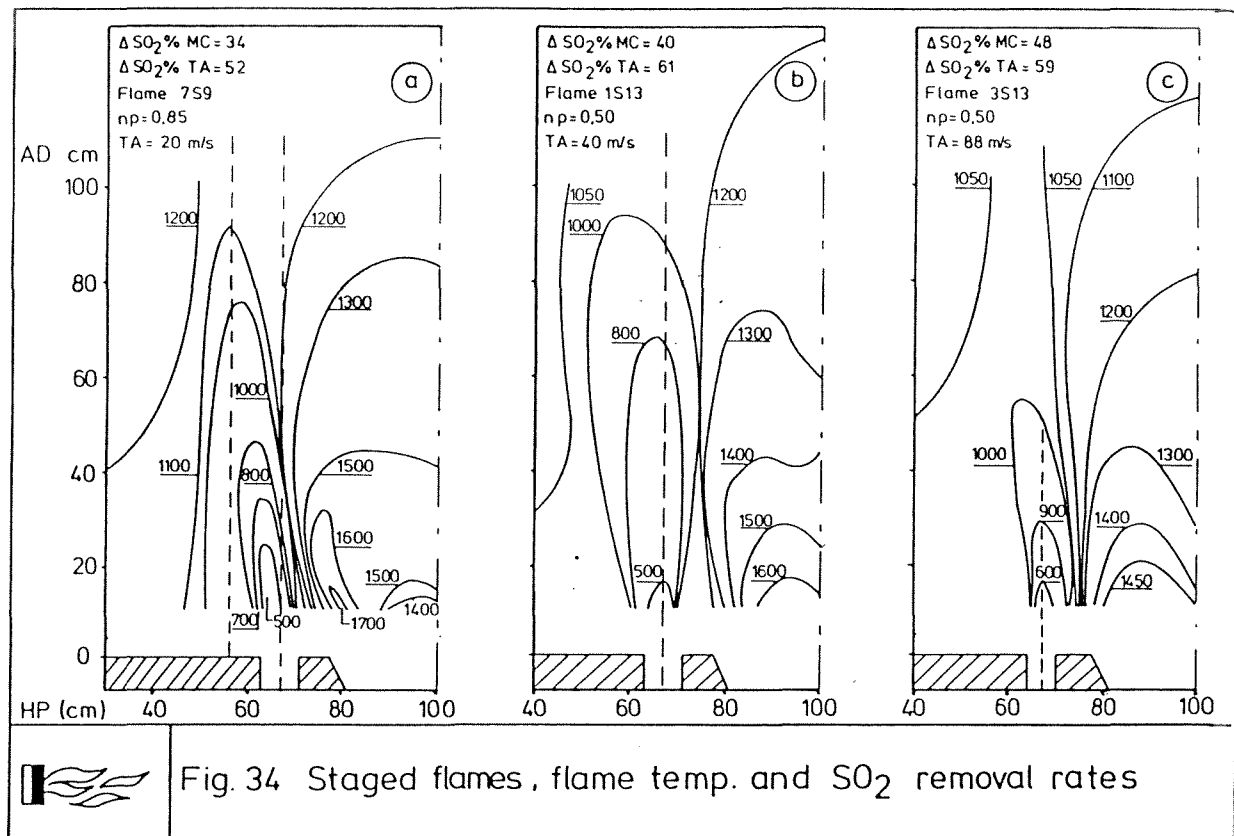
5.4.2.1 Speciella slaggnings- och foulingproblem vid låg NO_x -brännare med och utan kalkinsprutning

Låg- NO_x -brännare karaktäriseras av att man i en zon nära bränsletillförseln har en reducerande miljö på grund av substökiometrisk tillförsel av luft. Denna miljö förändras efter insprutning av tertiärluften till oxiderande. I Figur 5.12 visas temperaturfördelningen i flamman från låg NO_x -brännare.

Det är uppenbart att riskerna för slaggnings i den reducerande miljön är ganska stora. Järn förekommer huvudsakligen i tvåvärd form, vilket bidrar till att ge lättsmälta slaggar (Raask 1973 ref 13) åtminstone för kol med höga järnhalter. Som redan berörts ger en förhöjning av luftöverskottet en sänkning av slaggningsbenägenheten.

Med utgångspunkt från resonemanget i kapitel 3 verkar det uppenbart att man får relativt låga slaggningsstendenser i de delar av förbränningszonen som ligger efter insprutningen av tertiärluft. Man har i dessa områden dels luftöverskott, vilket bör garantera att allt Fe föreligger i trevärd form, dels förhållandevis låga flamtemperaturer, vilket också bidrar till att göra en omfattande slaggnings osannolik.

1984-09-20



Figur 5.12

Temperaturfördelning i några låg- NO_x -flammar.

Man bör vid låg- NO_x -brännare observera risken för allvarlig sulfidkorrosion på grund av att FeS är lösligt i större halter i slagg vid låga syrehalter än vid högre halter (ref 58).

Enligt (ref 59) betyder hela strömningsbilden mycket speciellt i större pannor (där förutsättningarna ofta är besvärligare) vid bedömning av om kalkinjektion kan ha förutsättningar att fungera utan alltför besvärande påslag.

Förutom problem med igensättningar har det i praktisk drift bl a i Tyskland (ref 67) visat

1984-09-20

sig svårt att både uppnå låga NO_x -halter och samtidigt låg halt oförbränt i askan. Eftersom närvaron av oförbrända kolrester bidragit till belägningsproblem i praktiska fall finns här ett ytterligare riskmoment.

5.5 Två extrema slaggningsfall från två olika amerikanska kraftverkspannor

EPRI har bl a tillsammans med Battelle och Penn State genomfört en studie av slaggningsfenomen i sex olika kolpulvereldade pannor i effektområdet 350 - 600 MW.

Nedan refereras exempel från de två mest extrema fallen med lätt slaggnings i en pannan i Morgantown respektive kraftig slaggnings i en panna i Mill Creek.

Arbetet har letts hos Battelle av H R Hazard och från EPRI:s sida har J P Dimmer varit ansvarig (ref 21). Rapporten har tagits fram från mikro-fiche, varför figur- och tabellkvaliteten ej är den bästa.

1984-09-20

Tabell 5.1

Några design och driftsdata vid körda försök för bl a Mill Creek med kraftig slaggnings och i Morgantown, där endast lätt slaggnings förekom.

TABLE 3-1. BOILER CHARACTERISTICS (21)

Boiler	Labadie	Mill Creek	Cliffside	Morgantown	Montour
<u>Design Conditions (1)</u>					
Boiler rating, MW	600	350	600	625	750
Steam flow, 10 ⁶ lb/hr	4.08	2.32	4.06	4.25	5.70
Steam press, SH outlet, psi	2625	2600	2625	3810	3830
Steam temp SH outlet, F	1005	1005	1005	1005	1005
Steam press, RH outlet, psig	613	586	592	724	678
Steam temp, RH inlet, F	642	635	644	585	572
Steam temp, RH outlet, F	1005	1005	1005	1001	1005
Feedwater temp, F	488	485	488	509	555
<u>Furnace Dimensions, ft</u>					
Height, ashpit to nose	130	115	130	104	103
Width	56	45	56	63/2	84/2
Depth	49	39	49	34	41
Net heat input, 10 ⁶ Btu/hr (2)	5672	3242	5675	5596	7346
<u>Design heat release rates</u>					
10 ⁶ Btu/ft ² plan area	2.06	1.90	2.06	2.57	2.15
10 ³ Btu/ft ³ furnace vol	12.35	14.10	12.35	18.00	14.70
10 ³ Btu/ft ² wall area (3)	191.2	171.3	191.2	186.0	194.4
Coal ash content, percent	8.9	11.3	8.9	13.7	14.4
<u>Test Conditions</u>					
Generator output, MW	555	297	576	563	748
Steam flow, 10 ⁶ lb/hr	3.64	1.94	3.74	4.00	6.06
Percent of design MW	92.5	84.9	96.0	90.1	99.7
Percent of design steam flow	89.2	83.5	91.7	94.1	106
Net heat in, t, 10 ⁶ Btu/hr	5059	2707	5204	5266	7787
<u>Test heat-release rates</u>					
10 ⁶ Btu/ft ² plan area	1.84	1.59	1.09	2.28	2.28
10 ³ Btu/ft ³ furnace vol	11.02	11.77	11.33	16.94	15.60
10 ³ Btu/ft ² wall area	170.6	143.0	175.3	175.0	205.6
Coal ash content, percent	11.8	15.0	15.3	13.8	14.6
<u>Furnace gas temperatures, F</u>					
Above burners	2638	2569	2607	2738	2513
Above nose	2256	2211	2277	2299	2409
Flue-gas oxygen, percent	5.1	4.5	3.6	2.8	5.3
Furnace slagging impact	Severe	Severe	None	Slight	Moderate

- (1) Maximum continuous boiler rating.
 (2) Net heat input = coal low heat value + heat in preheated air - carbon loss.
 (3) Area up to point of furnace nose, including upward projected area.
 (4) Calculated from design value by ratio of steam flow rates.

1984-09-20

Tabell 5.2

Data för körda kol i bl a Mill Creek (V Kentuckykol) där slaggningen var svår och Morgantown (Pennsylvania kol) där endast lätt slaggning förekom.

TABLE 3-2. SUMMARY OF COAL AND ASH CHARACTERISTICS (21)
Dry basis

	Labadie 1	Labadie 4	Mill Creek	Cliffside	Morgantown	Montour
Carbon	67.57	68.82	67.46	71.97	72.78	74.01
Hydrogen	5.17	5.29	5.07	4.75	4.62	4.64
Oxygen	9.76	8.24	6.23	5.44	5.90	4.33
Nitrogen	1.28	1.36	1.33	1.33	1.42	1.34
Sulfur	3.28	3.62	4.23	1.74	1.40	1.06
Ash	12.63	12.78	14.96	15.26	13.84	14.62
Low temp. ash	15.5	14.7	14.7	18.9	16.8	16.7
Vol matter	38.68	39.83	38.54	30.28	25.01	25.33
Fixed Carbon	46.69	48.39	46.10	54.46	61.15	60.05
HEV, Btu/lb	12,468	12,465	12,289	12,608	12,993	13,231
Ash Analyses						
SiO ₂	53.5	51.8	45.5	55.0	50.9	54.3
Al ₂ O ₃	19.7	19.2	18.5	26.5	27.3	27.8
Fe ₂ O ₃	17.0	19.8	24.5	10.4	14.1	7.97
TiO ₂	1.02	1.00	0.93	1.25	1.42	1.36
MgO	1.07	1.04	0.99	1.39	1.09	1.12
CaO	4.70	4.08	6.25	1.76	1.63	4.10
K ₂ O	0.51	0.53	0.44	0.48	0.26	0.33
K ₂ O	2.36	2.30	2.59	3.61	2.65	2.68
P ₂ O ₅	0.16	0.12	0.19	0.16	0.47	0.31
Coal minerals, percent of low-temp. ash						
Quartz	25	20	20	20	15	15
Pyrite	20	20	30	7	10	5
Calcite	5	5	10	1-5	0	1-5
Gypsum	1-5	1-5	1-5	1-5	1-5	1-5
Kaolinite	20	20	20	20	30	35
Illite + MLC	25	25	20	40*	30	35
FeSO ₄	1-5	1-5	1-5	5-10	0	0
Ash fusion temperatures, F, Oxidizing atmosphere						
ID	2220	2380	2280	2540	2570	2660
Softening	2400	2400	2360	2560	2680	2720
Hemisphere	2420	2440	2380	2620	2700	2740
Fluid	2480	2500	2420	2640	2720	2760
Reducing atmosphere						
Initial def.	2020	1980	1940	2320	2460	2460
Softening	2140	2060	2041	2560	2530	2530
Hemisphere	2220	2120	2140	2620	2560	2540
Fluid	2300	2260	2200	2680	2650	2660
Silica percentage	70	68	59	81	75	80
Base/acid ratio	.35	0.39	0.54	0.21	0.25	0.19
Slag visc/2600F	150	100	28	800	325	800
Slagging factor	1.13	1.39	2.26	0.25	0.35	0.21
	Med.	Med.	High	Low	Low	Low

* Illite + Montmorillite

1984-09-20

I Tabell 5.1 beskrivs närmare design respektive driftparametrar för de båda pannorna, medan data för använda kol framgår av Tabell 5.2.

5.5.1 Svår slaggning i Mill Creek-pannan

I Mill Creek finns en panna med tangentiell eldning designad för 360 MW. I denna eldades ett kraftigt slaggande väst Kentucky kol. Bl a hög pyrithalt, högt b/a-förhållande och en hög slaggningsfaktor och låg slaggviskositet tyder på att kolet är slaggande.

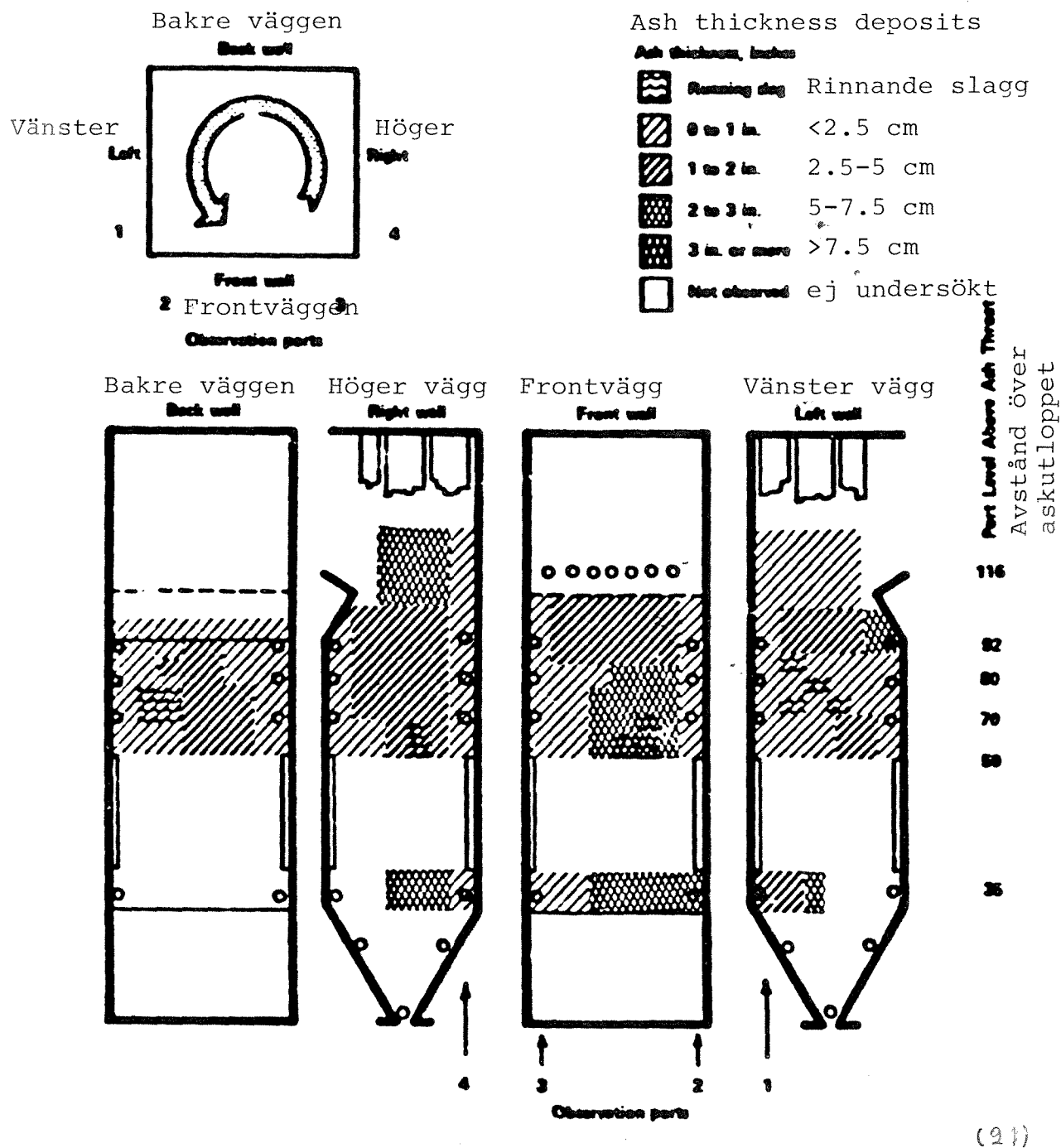
Vid lasten 325 MW började slagg bildas ovanför översta brännarna. Slaggzonen steg allt högre upp i pannan och slagg började rinna ned längs väggarna efter 3 - 4 timmar. Efter 8 - 10 timmar vid denna last var besvären så svåra att pannan måste tas ur drift. Även överhettarnas kylande kapacitet var för låg för att klara denna last och sotblåsarna täpptes till av den rinnande slaggen.

Vid testning under 5 dagar med lasten 297 MW, med de 62 sotblåsarna (400 psi ånga) i drift, bildades påslag enligt Figur 5.13. Påslagen var >5 cm tjocka. Ca 6 m ovanför brännarna fanns flytande slagg på alla väggar.

I området strax under och ovanför brännarna fanns smälta påslag på väggarna, vilka ej kunde avlägsnas med sotblåsarna. I hörnen bildades dock lösare beläggningar, vilka kunde avlägsnas med sotblåsning.

Högre upp bildades först en porös sintrad askbeläggning med tjockleken upp till ~5 cm. Om

1984-09-20



Figur 5.13

Exempel på panna med svåra slaggningsproblem.

denna ej avlägsnades bildades en hård sintrad skorpa vilken senare smälte på ytan, varefter sotblåsaren ej längre kan avlägsna beläggningen.

1984-09-20

Vid lastsänkning under natten till ~100 MW ramlade en del av påslaget ner från väggarna.

Trots den allvarliga slaggnings i Mill Creek var:

- 1) Den termiska belastningen lägre i denna än i de övriga fem testade ångpannorna
- 2) Luftöverskottet var högre än i de övriga testerna
- 3) Fördelningen av järn i både askor och påslag var jämn
- 4) Densitetsseparation gav hela 342% av askan i fraktionen $>1.6 \text{ g/cm}^3$ och denna aska hade mycket låg viskositet vid 1260°C .

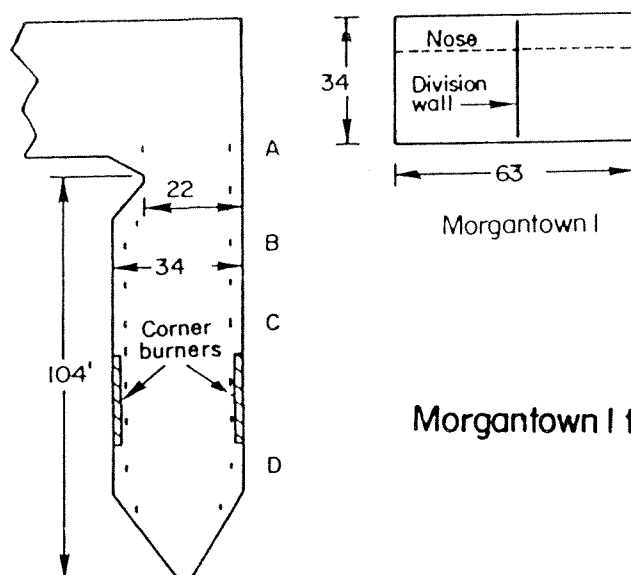
Troligen skulle därför slaggningsstendensen väsentligen minska om kolet tvättades.

5.5.2 Lätt slaggnings i Morgantown-pannan

Även pannen i Morgantown var tangentiellt eldad, men med delad eldstad (Figur 5.14).

I Figur 5.14 har olika nivåer markerats med A, B, C och D. Gastemperaturen på dessa nivåer har uppmätts i de olika pannorna och rapporterats i Tabell 5.3. Lägg märke till den mycket höga temperaturen ($\sim 1500^\circ\text{C}$) i Morgantown-pannan så högt upp i pannen som vid B.

1984-09-20



Morgantown I twin furnace (21)

Figur 5.14

Morgantown 1 med tvillingeldstad och hörnbrännare.

Tabell 5.3

Gastemperaturer på olika nivåer i de undersökta pannorna.

TABLE 6-1. SUMMARY OF GAS TEMPERATURE DATA (21)

Unit	Position	Elevation, ft		Avg. gas temp, F	
		above ash throat	above burners		
Labadie 1	A	138	56	2232	
Labadie 4	A	138	56	2345	
	B	120	38	2537	
	C	90	8	2638	°C
	D	38	--	2517	
→ Mill Creek	A	116	54	2248	~ 1240
	B	92	30	2469	~ 1350
	C	70	8	2572	~ 1400
	D	35	--	1943	~ 1055
Cliffside	A	138	56	2356	
	B	113	31	2561	
	C	90	8	2607	
	D	38	--	2218	
→ Morgantown	A	121	57	2299	~ 1300
	B	83	31	2738	~ 1500
Montour	A	118	43	2413	
	B	96	21	2444	

1984-09-20

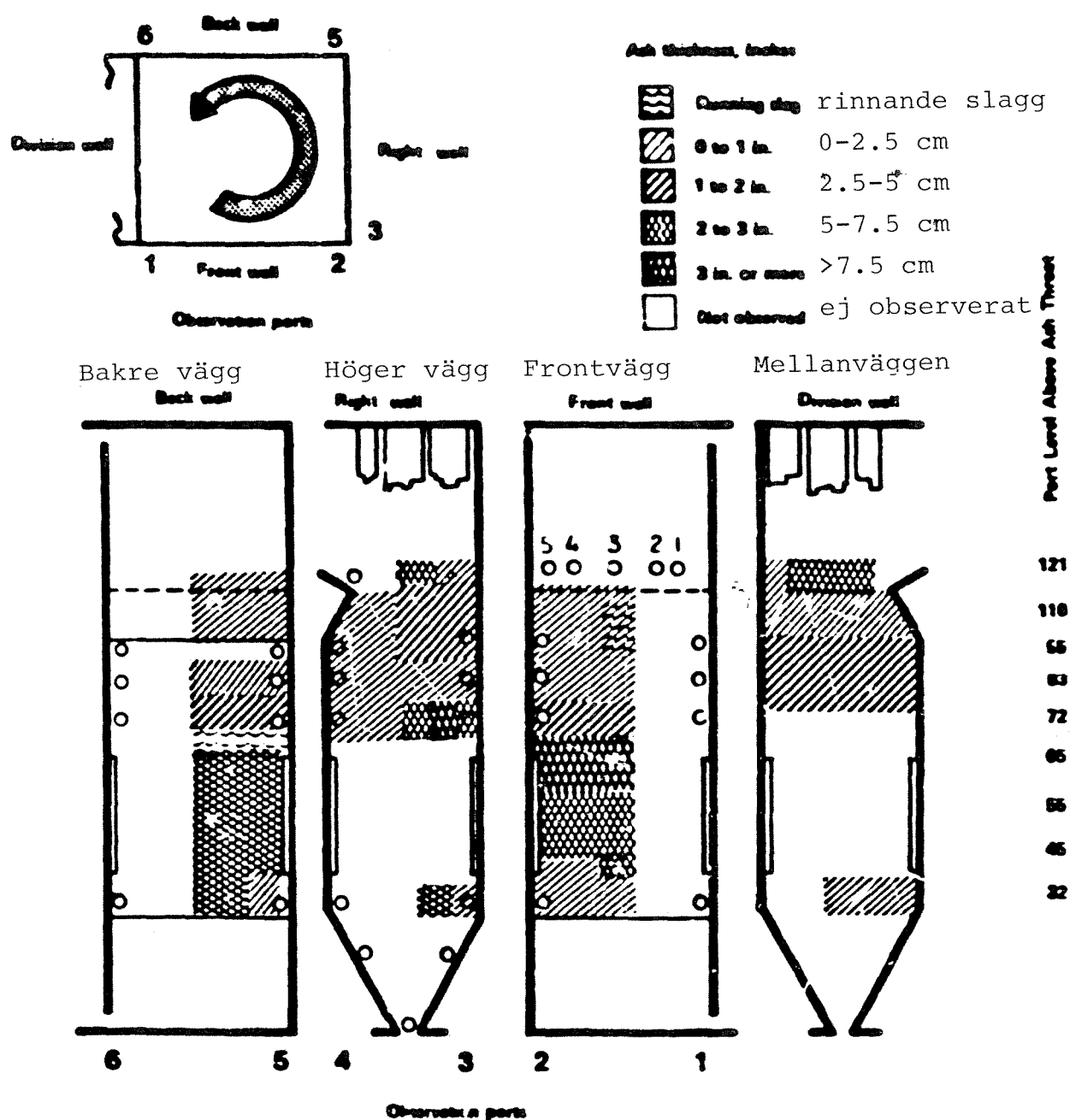


Figure 5-8. Furnace Ash Deposits, Morgantown Boiler 1
(As viewed from inside of furnace) (21)

Figur 5.15

Beläggingsbilden i Morgantown.

Pannan är överkritisk och producerar ånga med trycket ~ 260 bar och temperaturen 1000°F (530°C).

1984-09-20

Vanligen körs pannan med effekten 580 MW under 3 timmar dagligen och under natten endast ~200 MW. Sotblåsarna används endast vid behov (sällan). Temperaturen intill överhettarna ligger på hela 2300°F ($\sim 1260^{\circ}\text{C}$) och på nivån 25 m från pannbotten var temperaturen hela 2738°F ($\sim 1500^{\circ}\text{C}$).

I Figur 5.15 beskrivs närmare påslagsbilden i Morgantown. Nästan "jämvikt" mellan påslagsbildning och avlägsnande rådde.

I jämförelse med de 5 andra anläggningarna var i Morgantown pannan:

- 1) Temperaturen och den termiska belastningen den högsta
- 2) Luftöverskottet 22 % det näst lägsta
- 3) Askpåslagen var anrikade på järn med ~50 % över kolaskans nivå (17 - 27 % mot 14 % Fe i askan).

Segrering av askan hade således skett varvid beläggningarna hade lägre smältpunkt än kolaskan. Beläggningarna hade dock så hög viskositet vid 2600°F ($\sim 1430^{\circ}\text{C}$) att de ej var besvärande.

Vid densitetsseparation erhöles 7.2 % av aska i fraktionen $>2.8 \text{ g/m}$.

Askanalys visade att de 7.2 % av askan som densitetsmässigt låg på $>2.8 \text{ g/cm}^3$. I denna fraktion var järnhalten på 86 %. Den hade en beräknad askviskositet vid 1260°C på endast tre poise. Denna fraktion skulle i pannan vara mycket lättflytande, men på grund av den låga andelen var besvären ändå endast "lätta".

1984-09-20

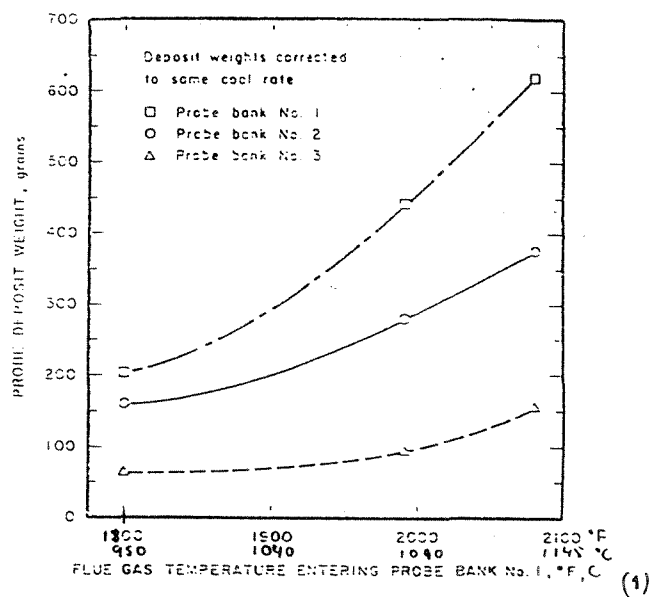
5.6 Ur foulingsynpunkt känsliga områden vid pulvereldning

Fouling beror på bl a partiklarnas natur, hastighet och temperatur när de träffar överhettartubbytor.

Beroende på kolaskans sammansättning måste anpassning ske till en tillräckligt låg temperatur för att ej ge för tjocka påslag.

För speciellt foulingkänsliga kol, t ex vissa brunkol, dimensioneras pannan med mycket stor eldstad för att temperaturen ska vara tillräckligt låg vid inträdet i överhettarzonen (jfr Figur 5.4).

Exempel på påslagsmängdens ökning med temperaturen för brunkol framgår av Figur 5.16 från ref 1.



Figur 5.16

Beläggningsmängd som funktion av rökgastemperatur vid sond 1. Sond 2 och 3 var placerade vid högre rökgastemperatur.

1984-09-20

Förutom förbränningsgasernas temperatur inverkar i hög grad flygaskans sammansättning på avsättningarna.

Som tidigare nämdes i kapitel 3 påverkades påslagens egenskaper av flygaskans kemiska sammansättning. I synnerhet närvaron av förångbar natrium respektive hög svavelhalt inverkar kraftigt. Dessutom inverkar stofthalt och flamtemperatur på hållfastheten för de påslag som erhålls i konvektionsdelen.

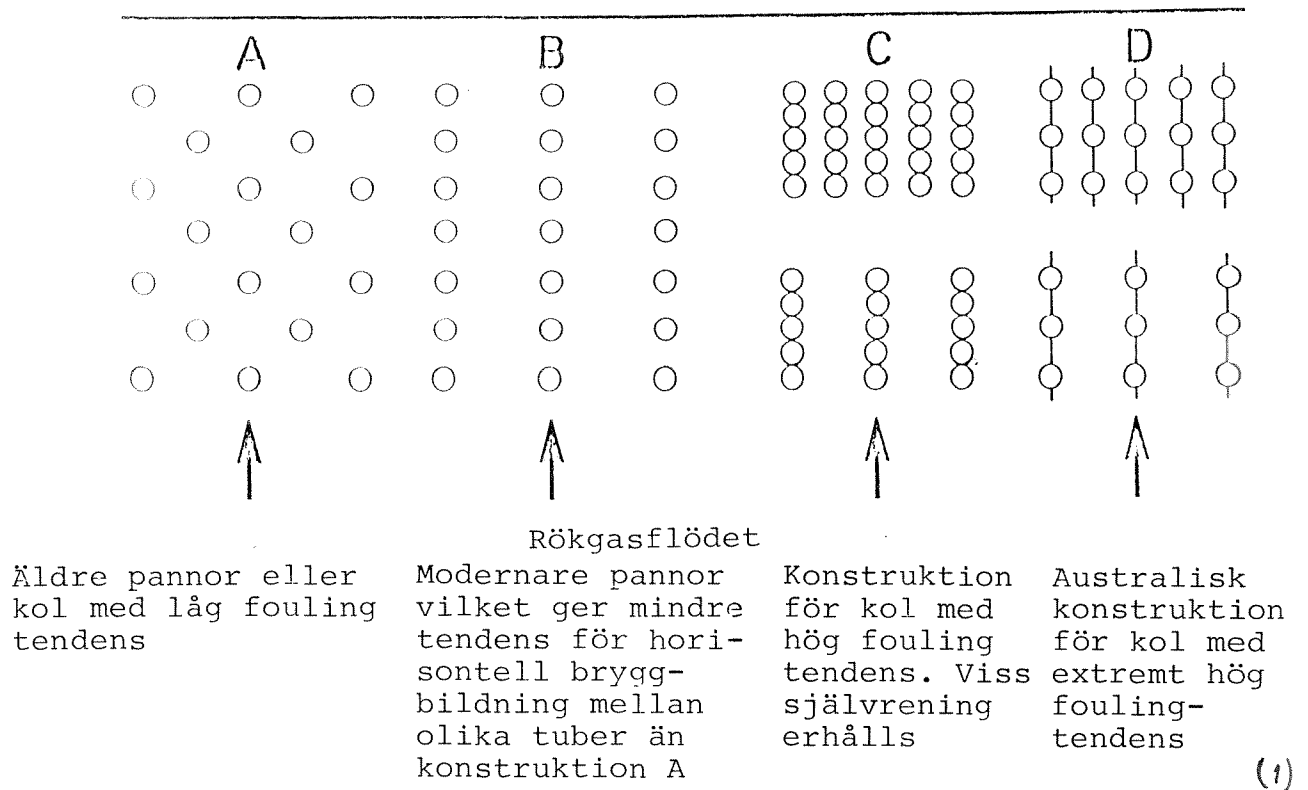
En hårdare sintrad flygaska bör medföra att en större del av påslaget stannar kvar på tuberna.

Som skydd för strålning från flamma monteras i en del pannor avskärmningsplåtar före överhettarna, vilket minskar foulingtendensen (ref 8).

Som framgick under avsnitt 3.1 var hastigheten viktig för såväl påslag som avstötning av påslag. I Figur 5.17 anges hur tuberna kan arrangeras för olika kol efter deras foulingtendens.

1984-09-20

Influence on growth rate via construction



Figur 5.17

Exempel på olika tubarrangemang med hänsyn till kolets foulingtendens.

Känsligast är som regel de delar i överhettarna som först träffas av gasen. Där kan stora beläggningsspaket hänga ner. Några exempel refereras nedan.

Mycket kraftiga hårda hängande påslag erhöles på de nedersta överhettardelarna enligt Buxmann 1984 (ref 6) vid eldning av spansk lignit. Dessa kraftiga slaggpåslag erhöles, trots att bränslet hade en hög askmjukningstemperatur enligt labtester.

Vid eldning av ett kraftigt slaggt brunkol, Yallourn, rapporterade Bell 1984 (ref 10) att två nya 375 MWs ångpannor endast kunde hållas idrift ~1 000 tim då ånga med trycket 16.8 MPa producerades. Äldre pannor med 12.4 MPa ånga

1984-09-20

kunde däremot hållas idrift ~8000 tim mellan genomgripande rengöringar.

Det högre ångtrycket medförde att konvektionsdelen blev väsentligt känsligare för fouling samt att fouling även inträffade efter kortare drifttid i pannan.

För att minska foulingen i de nya pannorna har bl a modifieringar gjorts för att:

- 1) minska segregeringen av bränslet
- 2) "burner throat" geometrin har ändrats
- 3) luftöverskottet har ökats
- 4) 40 ångsotblåsare har installerats på pannväggarna
- 5) gastemperaturen har sänkts vid inträdet till överhettarna.

Breucker H 1984 (ref 11) rapporterade att brunkol med hög salthalt måste uppmärksammas vid design av ångpannor så att slaggning/fouling och korrosion minimeras, vid bl a brännarval och arrangemang för att erhålla en så låg förbränningstemperatur som möjligt.

Korrosionsbeständigt material måste väljas i överhettare och värmeväxlare. Tubarrangemanget, design, ekonomisern och luftförvärmare måste möjliggöra en enkel rengöring. Med hänsyn till Cl- och S-halt måste kolet härvid betraktas.

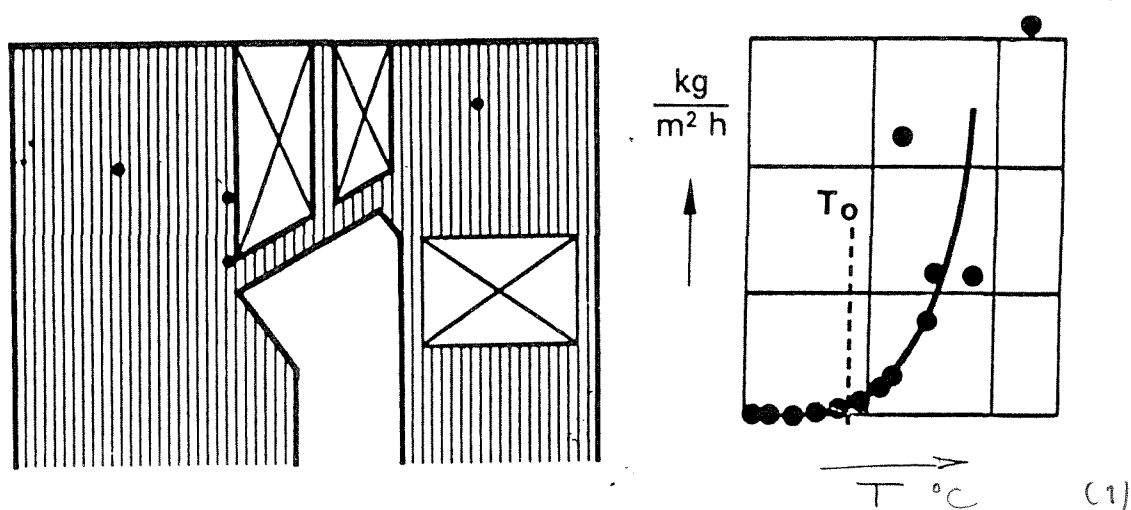
Sammanfattningsvis är i regel brunkol väsentligt mer fouling benägna än stenkol. Emellertid inverkar även i stenkol bl a närvaron av Na, S och Cl på fouling benägenheten. Förekomstformerna för några av de kritiska elementen för fouling beror på inkolningsgraden, varför vissa

1984-09-20

av dessa element kan ha en betydligt starkare effekt på fouling för brunkol än för bituminösa kol.

Foulingproblemen är i regel mycket mindre för bituminösa kol än för brunkol, där mycket omfattande rengöringar oftast sker åtminstone 1 ggr per år.

Foulingbenägenheten för kol kan bestämmas genom att placera flera kylda sonder i överhettarna och i deras närhet enligt Figur 5.18, hämtad från ref 1. Påslagsmängden plottas mot gastemperaturen varefter man kan avgöra om lasten i pannan kan höjas utan att alltför stor ökning av beläggningarna sker.



Figur 5.18

Testning av foulingbenägenheten i närheten av överhettarzonerna.

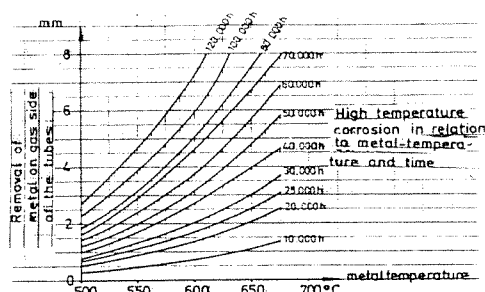
5.7 För korrosion känsliga områden

För kolpulvereldade amerikanska kraftverk svarade enligt Heap 1984 (ref 24) korrosion på överhettartuber för de längsta driftbortfalls-

1984-09-20

tiderna. I synnerhet är känsligheten för korrosion hög om hårda delvis smälta påslag först har bildats på tuben. Med temperaturen ökar angreppen enligt nedan (ref 66).

Enligt Kautz 1984 (ref 25) har andelen påslag av smält slaggt ökat med en mer modern design och driftsätt med högre värmebelastningar på pannan i väggarna bl a i närheten av brännarna samt på överhettartuber. Samtidigt som dessa påslag föreligger förekommer ofta även korrosion.



5.8 Slagging och fouling vid rosteldning respektive stokereldning

Vid både rosteldning och stokereldning används kol i storleksintervallet 8 - 25 mm och ända upp till 40 mm.

Därför blir andelen flygaska ($\sim <20\%$) väsentligt lägre än från kolfpulvereldning där $\sim 80 - 90\%$ avgår som flygaska.

Dessutom är förbränningstemperaturen väsentligt lägre än vid kolfpulvereldning.

Dessa två faktorer ger lägre stoftbelastning och lägre gastemperatur i panna och överhettare, vilket minskar både slaggnings- och foulingtendensen.

1984-09-20

Slaggpåslag på väggar i dessa typer av anläggningar kan inträffa om andelen "fines" i kolet är för hög. Detta resulterar i genomblåsningar i bädden, varvid en del endast delvis förbrända fines kan ge påslag på pannväggen (ref 3).

Andra fall då slaggnings kan inträffa är när lasten är alltför hög. Mycket höga laster hade körts i en liten rostpanna eldad med polska kol under betsäsongen så att slaggen rann ner längs väggarna.

5.9 Slaggnings och fouling vid eldning i fluidbäddar

Liksom vid rosteldning och stokereldning ligger temperaturerna väsentligt lägre vid eldning i fluidbäddar än vid kolpulvereldning. Därför förekommer både slaggningsfenomen och i synnerhet fouling i väsentligt mindre utsträckning än vid kolpulvereldning.

Enligt W Voss 1984 (ref 11) hade sedan 1979 i en fluidbädd endast porösa beläggningar erhållits mestadels bestående av kol på väggarna i fluidiseringszonen. Detta inverkar ej menligt på processen och i överhettardelen var beläggningstendensen så låg att sotblåsare ej behövs.

Praktiska erfarenheter visar att även vid normala drifttemperaturer kan bädden sintra ihop om t ex föroreningar följer med kolet (ref 12).

5.10 Slaggnings och fouling vid eldning av torv och biomassa

Flis och bark har en väsentligt mer alkalisk aska än kol. Glasaktig slagg bildas om föroreningar som sand följer med materialet in (smält-

1984-09-20

punkten sänks då). Sådana incidenter har inträffat i samband med fliseldning respektive barkeldning.

Träpulver ger på grund av partikelstorleken och den låga fukthalten väsentligt högre förbrännings-temperatur än flis. Detta ger högre benägenhet för slaggpåslag. Vid dimensionering av träpulvereldade anläggningar måste därför hänsyn tas både till bränslets reaktivitet och höga flamtemperatur.

Biobränslen och torv kan ha mycket varierande värmevärde (huvudsakligen beroende på varierande fukthalter) vilket kan medföra driftstörning, varvid slagging kan inträffa.

Vid fuktvariationer uppstår således lätt störningar i värmebalansen, vilket kan vara svårt att parera.

5.11 Additiver för att minska slagging och fouling

Det är ej praktiskt möjligt att göra några större tillsatser vid koleldning för att ändra t ex askans smältförlopp. Mer lovande är små tillsatser av aktiva substanser av t ex kopparoxyklorid.

Raask och Kiss 1972 (ref 64) har funnit att en tillsats på några ppm av askan av kopparoxyklorid verkade motverka oönskad asksmältning i en koleldad anläggning i England.

Vid låg syrehalt sker förångning till CuCl , vilket troligen faller ut på ytor och partiklar som finfördelad Cu_2O . Därvid underlättas kristallisation och viskositeten på askans yta ökas, varför slaggingstendensen minskas.

1984-09-20

En annan teori är att FeO reducerar Cu_2O till Cu som faller ut som ett tunt skikt på panntuberna. Slaggens vidhäftning på dessa ytor försvåras.

Även tillsats av MgO har visat positiva effekter i samband med både kol och oljeeldning. Troligen reagerar MgO med SO_3 , varvid en lägre andel SO_3 blir disponibel för reaktion med Na.

1984-09-20

6. PROVNINGSMETODER FÖR SLAGGNINGS- OCH FOULINGBENÄGENHET

6.1 Inledning

Den säkraste metoden att testa hur ett kol beter sig i slaggnings- resp foulinghänseende är givetvis att elda det i en konventionell panna.

För att söka undvika de drastiska påslag, som därvid skulle kunna uppkomma har ett antal provningsmetoder och empiriska formler utvecklats.

De enklaste metoderna utgörs av analys av bl a askhalt, asksammansättning och smältpunktsförlopp, vilka behandlas i avsnitt 6.2.

Baserat på hur kända kol uppträtt i förbränningsanläggningar har ett antal olika index framräknats ur kolets och kolaskans kemiska analys. Detta behandlas i avsnitt 6.3.

Som framgick av kapitel 3 utgör slaggviskositet en viktig egenskap för bedömning om slaggbildas eller ej. Beräkningsmetoder för slaggviskositet redovisas i avsnitt 6.4.

Direktmätning av askviskositet är svår att genomföra. Använda mätmetoder redovisas i avsnitt 6.5.

Under avsnitt 6.6 beskrivs "crushing strength", en annan sällsynt provningsmetod för kolaskor, med vars hjälp foulingbenägenheten för kolaskor kan förutsägas.

1984-09-20

Genom att använda sonder kan slaggnings- och foulingfenomen lokalt studeras i pannor eller testriggar. Detta behandlas i avsnitt 6.7.

6.2 Vanliga analyser och bestämningar på kolaskor

6.2.1 Askanalys och asksammansättning

Vid konventionell bestämning av askhalt sker inaskning vid 815°C i luft under minst 12 h.

På detta prov görs sedan kemisk askanalys, varvid följande element bestäms:

SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O , Na_2O , Li_2O , P_2O_5 , SO_3

Oberoende av hur elementen förekommer uttrycks de i oxidform enligt ovan.

Ur beläggningssynpunkt är även svavelhalten intressant, vilken t ex kan bestämmas med Leco-instrument direkt på kolet.

Även separat bestämning görs av klorhalten. Dels kan totalklorhalt bestämmas och dels vattenlös-
lig klorhalt efter urlakning.

Beroende på halten av klorid respektive natrium i kolet rankas kolen i foulinghänseende enligt nedan:

Foulingtendens	låg	medel	hög	mycket hög
% Cl	<0.2	0.2-0.3	0.3-0.5	>0.5
% Na (bit kol)	<0.5	0.5-1.0	1.0-2.5	>2.5

1984-09-20

6.2.2 Asksmältningsförlopp

Samma aska som erhålls vid askanalys pressas sedan upp till en brikett (kubisk enligt ISO eller konisk enligt ASTM) på vilken asksmältförloppet studeras.

Provet upphettas med en hastighet på $\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Bestämningen kan utföras i luft eller i t ex reducerande atmosfär.

Följande moment noteras:

- 1) mjukning: när de skarpa hörnen eller toppen rundas av
- 2) halvsfärisk punkt: då provet har denna form
- 3) flyt: då prover flyter ut

Temperaturen för dessa olika moment rapporteras.

I regel ligger temperaturerna lägre i reducerande atmosfär, bl a beroende på att järnet då delvis behåller ett lägre valenstal. Detta framgår av Figur 6.1 från Sehgal 1974 (ref 22).

1984-09-20

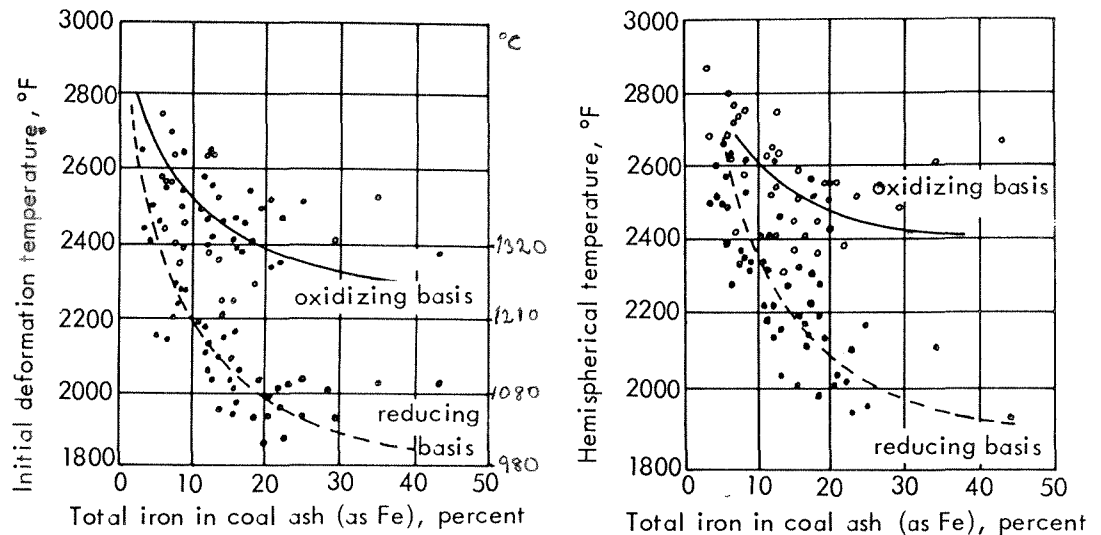


FIGURE 3. Influence of iron on coal ash fusion temperatures (22)

Figur 6.1

Inverkan av järn på asksmältförloppet i oxiderande resp reducerande atmosfär.

6.3 Syra/bastalet, slaggnings- och fouling-index

Förhållandet mellan basiska (B) och sura (A) komponenter (B/A) i kolaskan är ett viktigt mått för bestämning av graden av reaktion som bör erhållas mellan olika komponenter.

$B = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ i % i askan

$A = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ i % i askan

Ett lågt B/A (<0.25) indikerar en relativt hög smältpunkt för askan och en låg grad av reaktion mellan sura och basiska komponenter.

Slaggningsindex R_s beräknas som:

$$R_s = B/A \cdot S$$

där S är svavelhalten i % i kolet.

Foulingindex R_f beräknas som

1984-09-20

$$R_F = B/A \cdot Na_2O$$

där Na_2O är denna halt i % i kolaskan.

Enligt Asplund 1982 (ref 28) indikerar dessa index:

$R_S < 0.6$ indikerar liten eller ingen slagging

$R_S > 2.6$ indikerar risk för kraftig slagging

$R_F < 0.2$ indikerar liten beläggingsgrad

$0.2 \leq R_F < 0.5$ indikerar medelstor beläggingsgrad

$0.5 \leq R_F < 1.0$ indikerar hög beläggingsgrad

$R_F \geq 1.0$ indikerar kritiskt hög beläggingsgrad

Förutom dessa index som är begränsade till kolaskor av bituminös typ, dvs

$$\% Fe_2O_3 > CaO + MgO$$

finns ett antal ytterligare index, vilka i hög grad framtagits för kol från ett begränsat område.

För ett antal olika kol har i ref 16 askans mjukningspunkt plottats mot totala halten av basiska komponenter i kolaskan (Figur 6.2). Mycket låg halt basiska komponenter ger de högsta mjukningspunkterna medan de lägsta mjukningspunkterna uppnås vid ~35 - 70 % basiska komponenter.

1984-09-20

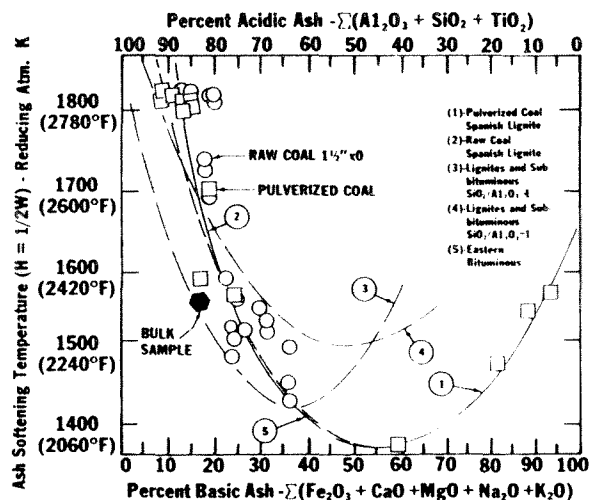


Fig. 5 Ash softening temperatures versus percent basic ash (16)

Figur 6.2

Askmjukningspunkter som funktion av andelen basiska komponenter.

6.4 Beräkning av slaggviskositeter

6.4.1 Beräkning av slaggviskositeter ur askanalysen

För att förutsäga ett kols slagggande egenskaper kan askans viskositet beräknas vid 2600°F (1426°C) respektive vid 2300°F (1260°C), dvs $\eta_{1427^\circ\text{C}}$ resp $\eta_{1260^\circ\text{C}}$.

Beräkningsmetodiken har hämtats från ref 21.

$$\log \eta_{1427} = \frac{100 \cdot \text{SiO}_2}{\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}} \times 0.05784 - 1.8452$$

Viskositeten uttrycks i poise.

Beräkning av η_{1260} :

1. Normalisera $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}$ till $\Sigma 100$

1984-09-20

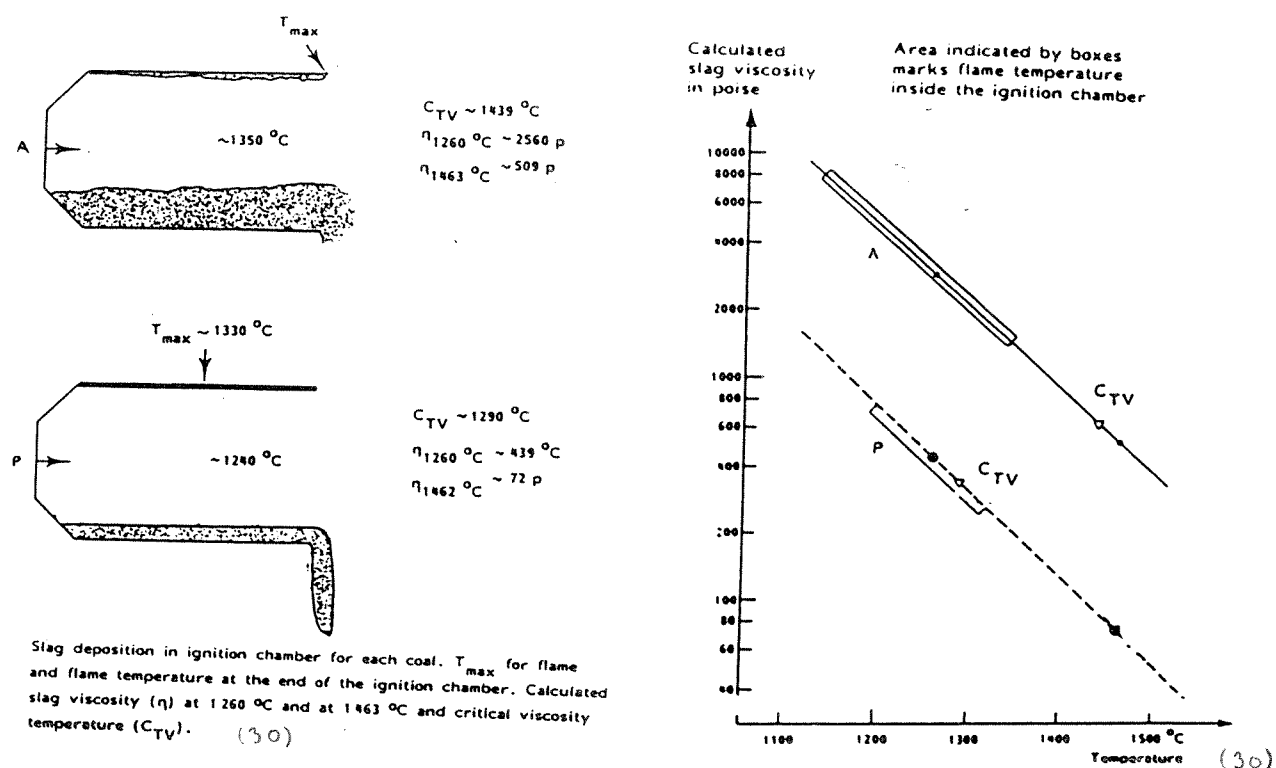
$$2. \quad M = 0.00835 \cdot \% \text{SiO}_2 + 0.00601 \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 0.109$$

$$3. \quad C = 0.0415 \cdot \% \text{SiO}_2 + 0.0194 \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.0275 \cdot \% \text{Fe}_2\text{O}_3 + 0.0160 \text{ CaO} - 3.92$$

$$4. \quad \log \eta_{1260} = \frac{10^7 \cdot M}{(T-150)^2} + C \quad \text{där } T=1260^\circ\text{C}$$

Låga viskositeter indikerar tendenser för bildning av lågsmältande slaggar.

Praktiska erfarenheter (ref 30) visade att vid låg beräknad viskositet erhöles en lättflytande glasaktig smältslagg medan högt viskositetstal gav en massiv sintrad slagg (Figur 6.3).



Figur 6.3

Beräknade slagviskositeter och C_{TV} för kol A och P samt slaggbilden för dessa kol.

Enligt ref 63 rankas slaggningsstendensen (rating)

1984-09-20

enligt följande med utgångspunkt från T_{250} , den temperatur där beräknade viskositeten blir 250 poise.

T_{250}	>2325 [°] F (>1270 [°] C)	2550-2100 [°] F (1400-1150 [°] C)	2275-2050 [°] F (1250-1100 [°] C)	<2200 [°] F (<1210 [°] C)
slagg- nings- tendens	låg	medium	hög	mycket hög

6.4.2 Beräkning av slaggviskositet ur smält- -----punktsdata och askanalys-----

Från ref 22 har Figur 6.4 hämtats, där asksmält-
punkt och askanalys används för att förutsäga
askans viskositet.

SiO_2 -förhållandet definieras som:

$$= \frac{\text{SiO}_2 \cdot 100}{(\text{SiO} + \text{Fe O} + \text{CaO} + \text{MgO})}$$

1984-09-20

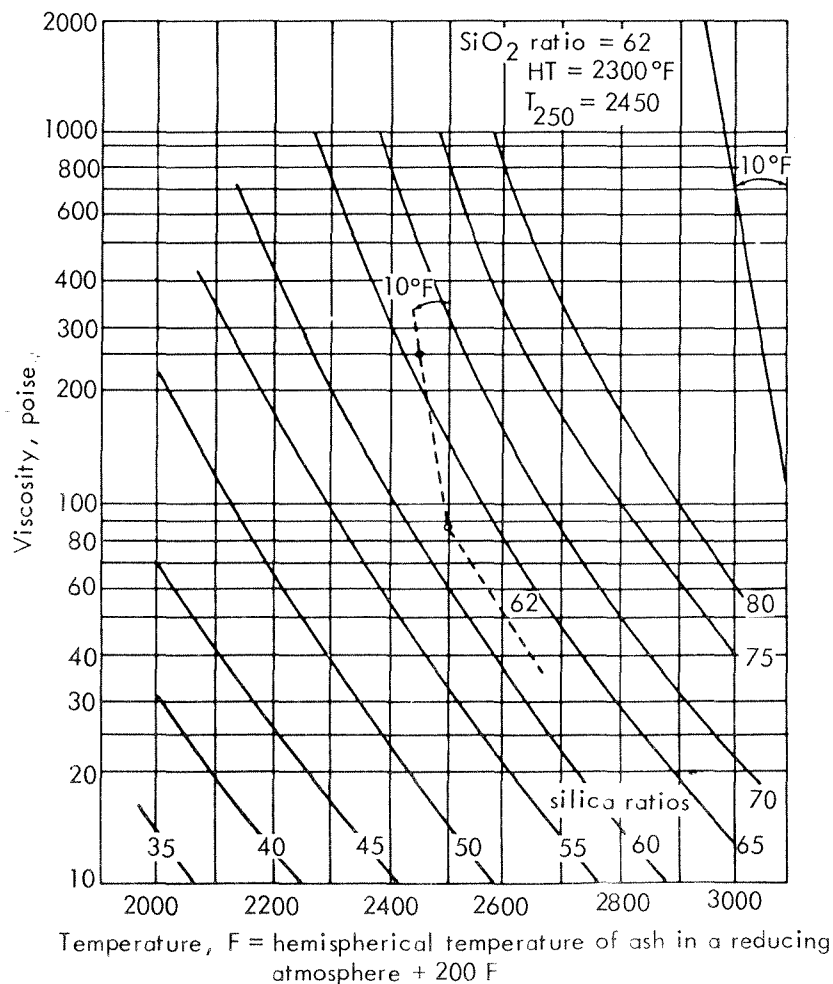


FIGURE 4. Slag viscosity from ash fusibility and mineral analysis (2,2)

Figur 6.4

Slaggviskositet som funktion av asksmälttemperatur och SiO₂-förhållande.

6.5 Analysmetoder för bestämning av askaskans viskositet för bedömning av slaggnings-tendens och slaggegenskaper

Viskositeten uttrycks vanligen i poise eller N sek/m².

1 N sek/m² motsvarar 10 poise.

Som framgår av beskrivningen av sintringsförloppet i mom 4.1 är askans viskositet vid den temperatur, som råder på en deponeringsyta den faktor, som bestämmer förekomst och omfattning

1984-09-20

av slaggnings på ytan. Det framgår också att de askviskositeter, som är intressanta är av storleksordningen 10^4 N sek m^{-2} och uppåt 10^{11} N sek m^{-2} . Detta medför, att de mätningssmetoder, som används för bestämning av viskositeten i relativt lättflytande slagger med rotationsviskosimeter inte kommer att täcka det intressanta mätområdet. Man får istället använda penetrationsviskosimetrar och mätning av sekundära faktorer, som är korrelerade till viskositeten. Exempel på sådana sekundära faktorer är förändringar av den aktuella produktens krympning och ledningsförmåga.

6.5.1 Penetrationsviskosimetrar

En viskosimeter lämplig för bestämning av viskositeter inom området $10^2 - 10^8$ N sek m^{-2} har beskrivits av Gibb 1981 (ref 17). Dess allmänna utformning framgår av Figur 6.5. Den utgör en vidare utveckling av likartade apparater som tidigare tagits fram för mätningar på silikatsmältor.

Ett par prov av smältaska hålls i centrum av en högtemperaturugn och en motbalanserad penetrationsanordning är fritt upphängd i ett block. Man avlägsnar vikter från motvikten så att penetrationsspetsen kan tränga ner i provet. Provets viskositet beräknas med penetrationshastigheten, belastningen och penetrationsdjupet.

1984-09-20

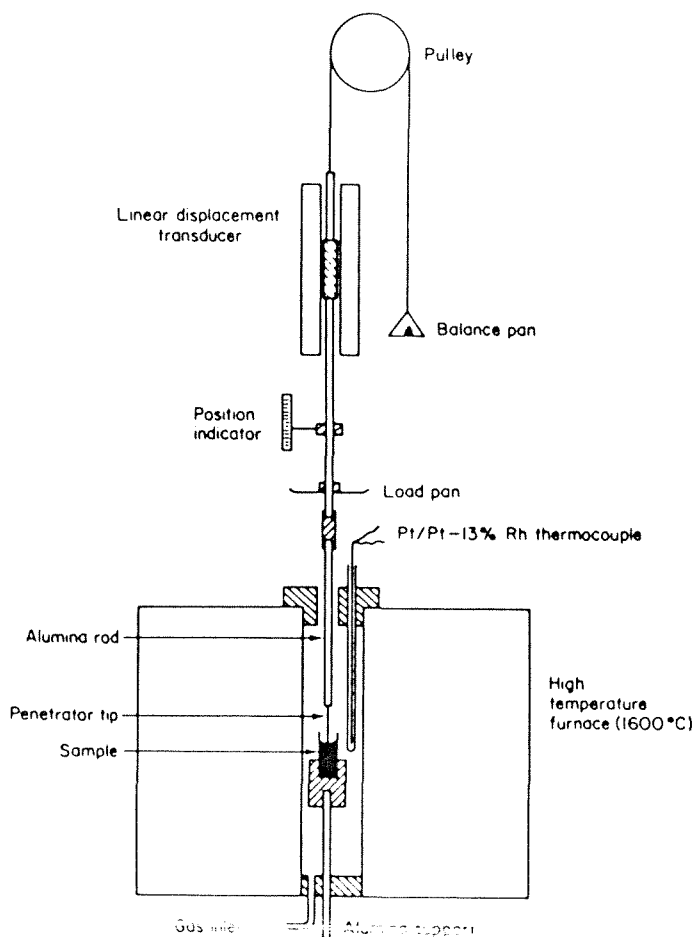


Fig. 3. Diagram of rod-penetration viscometer. (17)

Figur 6.5

Utrustning för mätning av askans viskositet.

Provet innehåller i en 100 mm djup degel, som består av Pt-10 % Rh för arbeten i oxiderande atmosfär och av molybden för arbeten i reducerande atmosfär. Pt-Rh-deglarna kan användas flera gånger efter rengöring med HF, medan Mo-deglarna endast används en gång. Vid oxiderande atmosfär fylls smält aska direkt i degeln, medan man vid reducerande atmosfär smälter askan direkt i degeln i flera portioner.

Vid genomförandet av försöket upphettas askan först vid 1550°C och hålls vid denna temperatur under 15 min. Den kyls därefter ned i allmänhet 20°C/min (eller så mycket som möjligt) till den

1984-09-20

Önskade provningstemperaturen och hålls vid denna under 10 min. Man genomför sedan mätningen vid den angivna temperaturen, provet upphettas åter till 1550°C, varefter mätningen genomförs vid ytterligare en temperatur. Penetrationsanordningen inträngningsdel ($\phi \sim 1.5$ mm) byts för varje prov. Den dras upp ur smältan vid 1550°C för varje temperatur.

Man kan beräkna viskositeten ur formeln

$$\eta = \frac{W}{UL} \times 2.50 \times 10^3 \text{ N s m}^{-2}$$

där W är penetrationsbelastning i g, U är penetrationshastigheten. Penetrationsdjupet L i den punkt vid vilken tangenten dras framgår av avståndet från punkten till penetrationskurvans nollinje.

Noggrannheten hos mätningarna testades mot ett standardglas med kända viskositeter. Som framgår av Tabell 6.1 är avvikelser i log η mellan mätningar med denna viskosimeter och de angivna värdena högst av storleksordningen 1 %.

Tabell 6.1

Jämförelse av mätta och beräknade viskositeter för glasstandarder

Comparison of known and experimentally derived viscosities for a standard glass

Temperature (°C)	log (viscosity) (N s m ⁻²)		
	Theoretical	Measured	Difference
864	4.62	4.68	+ 0.06
848	4.81	5.84	+ 0.03
822	5.14	5.15	+ 0.01
785	5.66	5.65	- 0.01
768	5.93	5.92	- 0.01
747	6.28	6.29	+ 0.01
714	6.89	6.93	+ 0.04
685	7.51	7.51	—

Figur 6.6 visar viskositetens temperaturberoende

1984-09-20

för ett antal kolaskor. Som man kan vänta sig uppkommer avvikelser baserade på utkristallisation av kristallin fas för några askor eftersom temperaturen för kritisk viskositet t_{ex} har underskridits. För reducerande miljöer kommer viskositeten att vara lägre vid samma temperatur för de flesta kolaskorna eftersom FeO har högre löslighet i silikatsmältor än Fe_2O_3 .

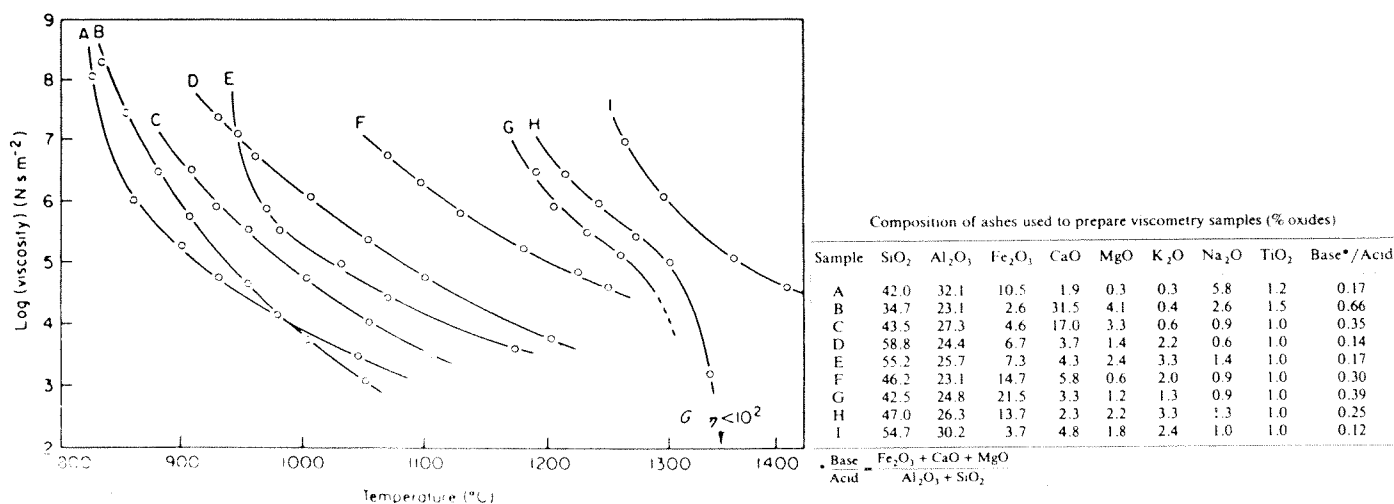


Fig. 4. Viscosity-temperature relationships for a variety of coal ashes (viscosities measured after cooling from 1550°C). (17)

Figur 6.6

Viskositeten för några kolaskor som funktion av temperaturen. Askornas analys anges i tabellen.

Som ett index för bedömning av slaggningsrisk har $T_v(6)$, den temperatur som motsvarar viskositeten $\log \eta = 6$ föreslagits, där η mäts i $N s/m^2$.

6.5.2 Användning av indirekta mätmetoder för uppskattning av askans viskositet

Den ovannämnda metoden för direkt bestämning av askans viskositet är tidsödande och har nackdelen att den ej ger mätvärden för $\log \eta > 8$. Raask 1979 (ref 18) har därför prelimi-

1984-09-20

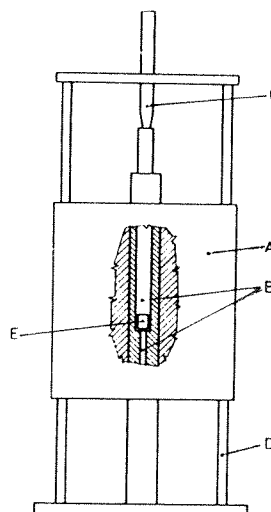


Fig. A Furnace assembly for ash shrinkage and conductance measurements: A Furnace; B Conductance leads and thermocouple; C Displacement probe; D Furnace has balanced lowering and raising action; E Sample (18)

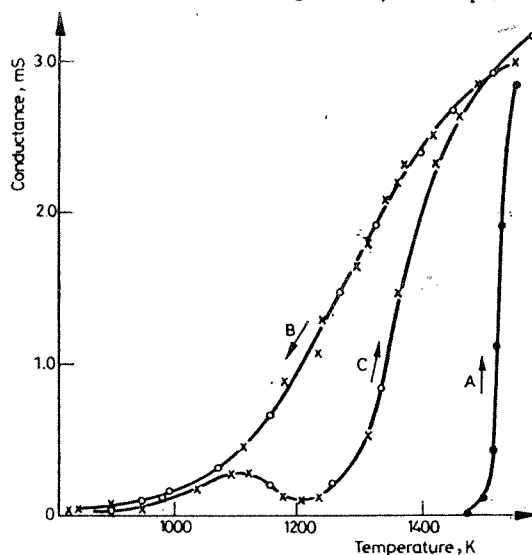


Fig. B Conductance measurement in heating microscope — Leigh Creek ash: A — First heating; B — Cooling; C — Reheating (18)

Figur 6.7

Indirekta metoder för viskositetsbestämningar. Krympning och konduktansbestämning i Figur A respektive konduktansmätningar i varmmikroskop i Figur B.

närt studerat användningen av andra parametrar, speciellt elektrisk ledningsförmåga och krympning. Han använde ett Leitz upphettningmikroskop och en anordning som i Figur 6.7. Preliminära data antyder att slaggande askor har en ledningsförmåga som är någon tiopotens högre än

1984-09-20

icke-slaggande askor. För de flesta kol verkar det också som om krympningen skulle vara större för slaggande än för icke-slaggande kol. De preliminära data, som anges av Raask, är dock inte tillräckliga för att etablera mätningar av elektrisk ledningsförmåga och krympning som indikering på slaggningsbenägenheten.

6.6 Mätning av tryckhållfastheten på
sintrad flygaska för bedömning av
foulingtendens och påslagens hårdhet
(= crushing strength)

En metod för bestämning av askans sintringsbenägenhet, vars resultat åtminstone för vissa kol visar en god överensstämmelse med foulingbenägenheten, är bestämning av tryckhållfastheten som funktion av temperaturen hos cylindrar tillverkade av flygaska och upphettade till temperaturer mellan 700°C och 1100°C (ref 34).

Den aska, som skall undersökas, kan antingen tas ut från en förbränningsanläggning eller tillverkas i en lämpligt utformad anordning för förbränning i laboratorieskala. Den kolaska, som tillverkas för genomförande av askmjukningsbestämningar enligt ISO eller ASTM eller vid bestämning av askhalt kan inte användas.

Det experimentella förfarandet vid provtagning från aktuella förbränningsanläggningar är följande:

Man insamlar 220 - 340 g flygaska vid utloppet av luftförvärmaren men före askavskiljningsanordningen. Askan siktas till en kornstorlek under 100 mesh. De partiklar, som ej passerar första gången, krossas och siktas igen tills allt går igenom. Askan upphettas sedan till

1984-09-20

konstant vikt vid 480°C för att driva ut allt vatten och förbränna eventuellt resterande kol. Den kolfria torra askan pressas till en cylinder med ca 2 cm höjd i en anordning enligt Figur 6.8. Det totala kompressionstrycket är ca 1 MPa. Efter tillverkningen placeras provkropparna i en exikator. I allmänhet tillverkar man 24 provkroppar för varje aska.

Vid sintringen placeras askcylindrarna i en elektrisk ugn inom en zon med enhetlig temperatur. De upphettas kontinuerligt till den fastställda temperaturen under en period på 1.5 tim-

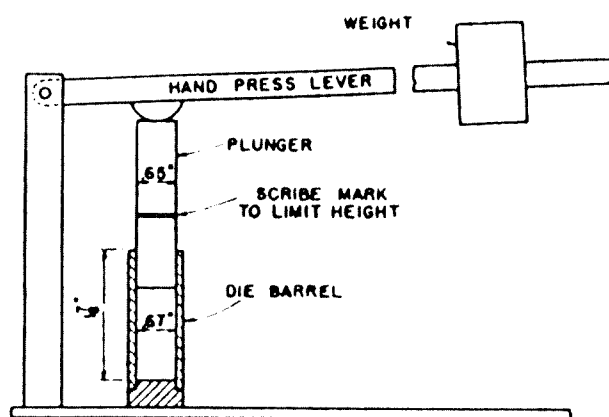


FIG. 3 EQUIPMENT FOR FORMING RAW SAMPLES BEFORE SINTERING (34)

Figur 6.8

Utrustning för tillverkning av kutsar för sintring.

mar, hålls vid temperaturen under 15 timmar och får svalna i ugnen under 2.5 timmar. De angivna tiderna bör följas för att undvika att interna spänningar som kan störa testresultatet byggs upp. När kutsarna svalnat tillräckligt slipas ändytorna för att avlägsna ojämnheter och dylikt från sintringen. Man kontrollerar att ändytorna är parallella och vinkelräta mot cylinderns axel. Kutsarna placeras sedan i en apparatur för hållfasthetsprovning av metallurgiska prov och

1984-09-20

tryckhållfastheten bestäms (Figur 6.9). Medelvärdet av 6 kutsar anges som tryckhållfastheten hos den sintrade flygaskan vid den undersökta sintringstemperaturen.

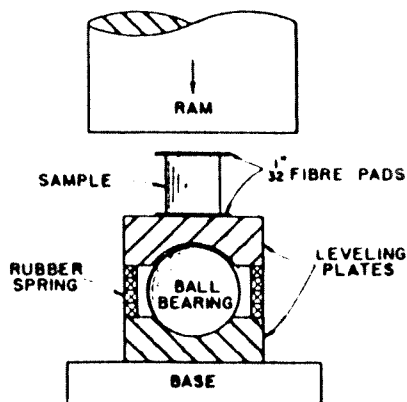


FIG. 4 EQUIPMENT FOR CRUSHING SINTERED SAMPLES (34)

Figur 6.9

Utrustning för krossning av sintrade prover.

För att bestämma sintringshållfasthetens temperaturberoende genomförs i allmänhet mätningar vid fyra temperaturer. Dessa väljs för askor från kol, som kan ge foulingproblem, inom området $700 - 815^{\circ}\text{C}$ och för askor, som ej ger foulingproblem $200 - 275^{\circ}\text{C}$ högre. Valet av temperaturintervall kan i allmänhet göras med utgångspunkt från kolets natriumhalt (Figur 6.11).

Experimentella resultat

Vid de försök, som gjorts med aska från förbränning av kol från centrala Illinois, har man konstaterat

- Det typiska sintringsförloppet innebär att askkutsen först krymper och blir hårdare. När den uppnått en tillräckligt hög temperatur börjar den svälla och spricka (nedåtgående kurvan för

1984-09-20

Christian Co, Figur 6.10). Endast den stigande delen av kurvan är av intresse.

- Aska från kol, som ger upphov till fouling, uppnår en betydligt högre tryckhållfasthet vid mycket lägre temperatur än aska från kol, som ej ger foulingproblem (Figur 6.11). Alla undersökta kol kommer från centrala Illinois.
- De undersökta kolen visar en klar korrelation mellan natriumhalt och foulingtendens (Figur 6.12).

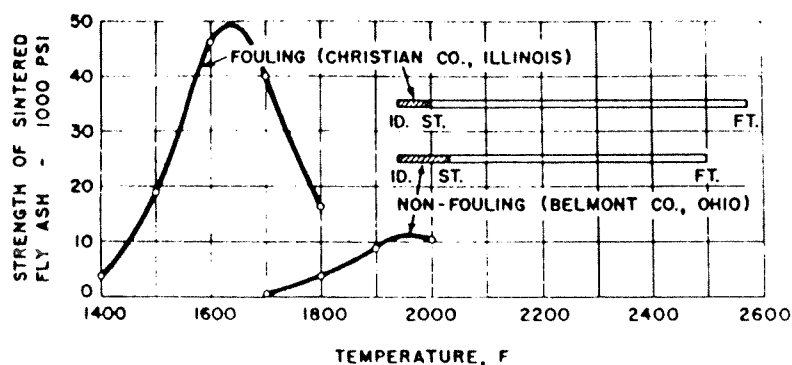


FIG. 5 COMPARISON OF SINTERED STRENGTHS AND ASH-FUSION TEMPERATURES FOR A FOULING AND A NONFOULING COAL (34)

Figur 6.10

Jämförelse mellan tryckhållfastheten och askmjukningsbetingelserna för ett kol som ger fouling respektive ett som inte ger fouling.

ID = Askmjukning

FT = Askan blir flytande

1984-09-20

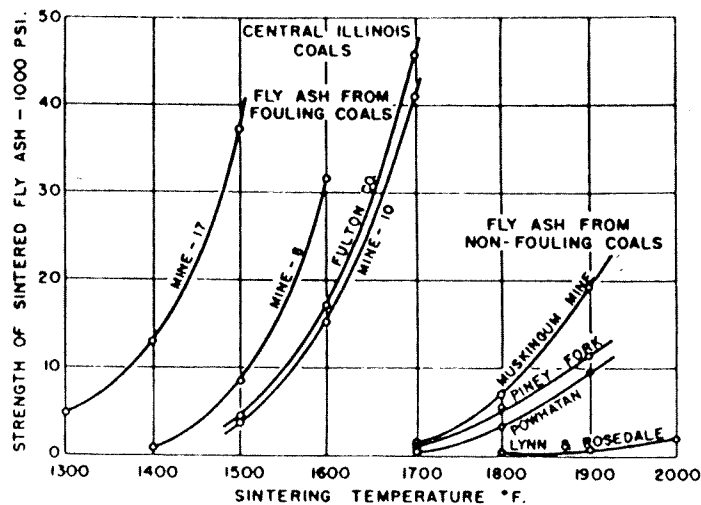


FIG. 7 STRENGTH OF SINTERED FLY ASH FROM FOULING AND NON-FOULING COALS (34)

Figur 6.11

Tryckhållfasthet hos sintrad flygaska för några foulade och några icke foulade kol.

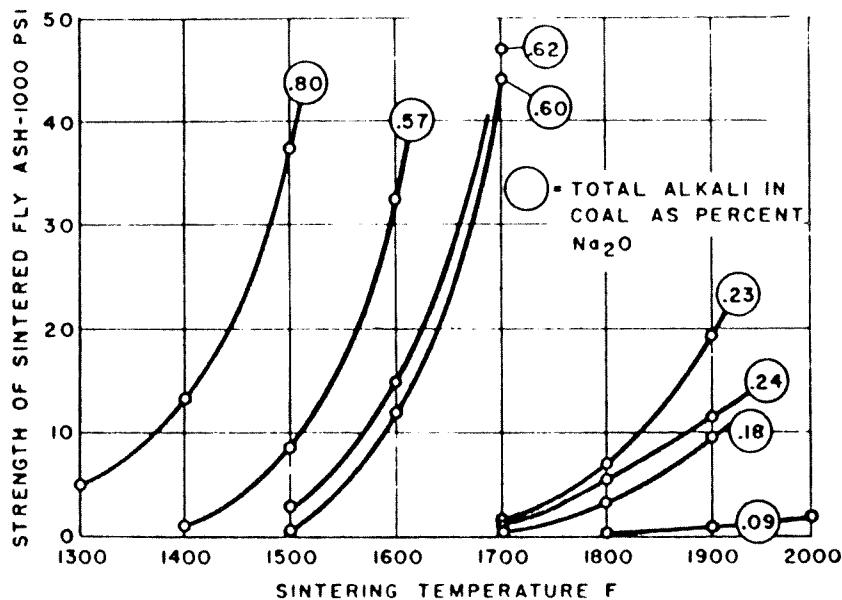


FIG. 8 EFFECT OF ALKALI CONTENT IN COAL (35)

Figur 6.12

Inverkan av kolens halt av alkali (som % Na_2O) på tryckhållfastheten för sintrad flygaska vid olika temperaturer.

-

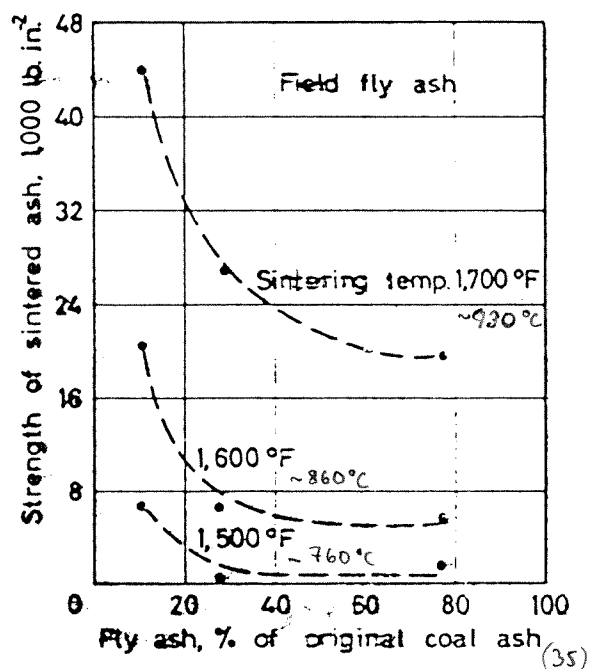
Tryckhållfastheten hos kutsarna ökar vid högre temperatur och längre sinteringstider. Detta indikerar en ökning

1984-09-20

av beläggningarnas hårdhet och bindning till underlaget vid höga temperaturer och långa tidsmellanrum mellan sotblåsningarna.

- Om askbelastningen (mängden flygaska i förhållande till den totala mängden aska) är låg kommer cylindrarnas tryckhållfasthet att öka för ett och samma kol vid i övrigt lika förhållanden (ref 35). Effekten är speciellt märkbar vid askbelastningar under 25 %. Orsaken är sannolikt att man i dessa fall har en överföring av alkali och speciellt natrium till de finkorniga askpartiklarna (Figur 6.12).
- Man kan använda aska från en lämpligt utformad provförbränningsanläggning för tillverkning av kutsar för bestämning av tryckhållfasthet. Det finns mindre avvikelser mellan denna aska och den faktiskt uppsamlade flygaskan, men hållfasthetsdata från denna aska ger avsevärt bättre resultat än konventionella mätningar av askmjukningsbetingelserna.

1984-09-20



Figur 6.12

Inverkan av askbelastning på tryckhållfastheten hos sintrad flygaska.

6.7 Sonder för studier av slaggnings respektive fouling

6.7.1 Sondstudier i Finland

Studier av slaggnings och fouling i en koleldad tangentiellt eldad panna har genomförts av bl a Hupa 1984 (ref 60).

För slaggnings placerades en böjd sond nära pannväggen ~6 meter från brännaren där lågan ej slog i väggen. Från sonden kunde en ring med bredden ~1 cm och diametern ~3 - 4 cm plockas loss.

Vid foulingstudier placerades sonden i närheten av överhettarna.

Hela sonden kunde placeras i svepelektronmikroskopet SEM för analys. Bl a konstaterades

1984-09-20

att det första skiktet som belade sonden skilde sig från de beläggningar som senare byggde på.

Bl a återfanns långsmala kristaller av Na_2SO_4 på foulingsonden.

Provningstiderna varierade från några minuter upp till ~4 timmar.

6.7.2 Sonder och pilot plants för studier av -----påslag-----

Vid EER enligt (ref 59) användes för slaggnings-
påslag platta järnplåtar av storleken ~12 x 20 cm. Godstjockleken var ~20 mm och runda kanaler med diametern ~12 mm hade borrarats i godset för att minska dess värmeledningsförmåga. Utanför detta avsnitt fanns en vattenkyld platt kammare med höjden ~2 cm. Genom att mäta vattentemperaturen på in- och utgående vatten samt ur data på temperaturer i platta, kunde värmeöverföringen beräknas. Dessa sonder monterades in i olika anläggningar, t ex i vertikalugn respektive 30 MW-pannan.

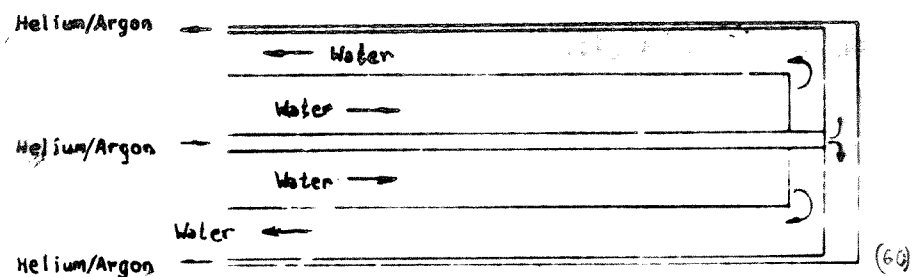
För fouling fanns i en speciell vertikal ugn efter den vertikala delen där slaggen avskiljs fannspaket med foulingsonder. Dessa var ~12 cm långa dubbelmantlade och kylde med luft.

Även dessa sonders påslag dokumenterades med foto plus beskrivning, dvs utan analyser.

Wagoner 1982 (ref 60) beskriver en sond enligt Figur 6.13, vilken både kyla av vatten och en blandning av helium och argon för att hålla en konstant temperatur på 800^oF för simulering av en tub i ugnsväggen.

1984-09-20

För undersökning av foulingpåslag används enklare sonder som endast är vattenkylda.



Figur 6.13

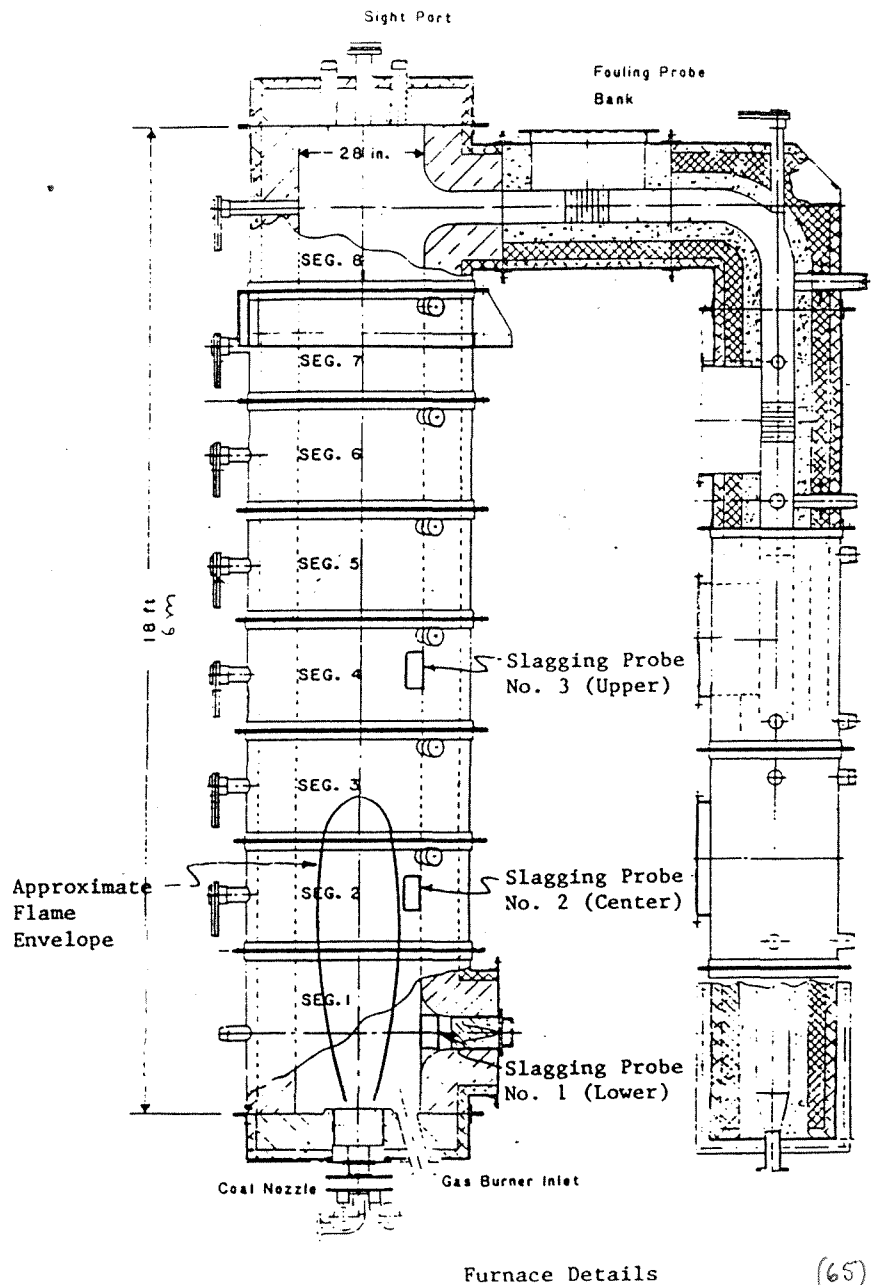
Sond för simulering av slaggning på stigarrör i pannvägg.

Foster Wheeler i USA (ref 64) respektive CEGB i England (ref 65) har "pilot plant" pulverpannor utrustade med ett antal provtagningssonder för slaggning respektive fouling.

I motsats till EERs toppeldade vertikalugn arbetar CEGB och Foster Wheeler med pilot plants med brännaren i botten.

CEGBs rigg är utrustad för automatisk drift, varför mer - "långtids - försök" kan köras i denna rigg.

1984-09-20



Figur 6.14

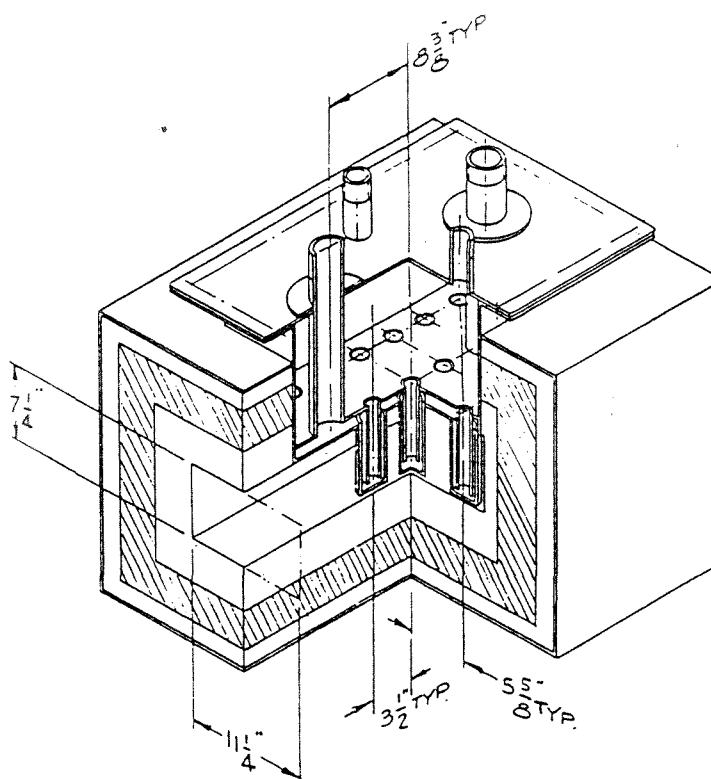
Testugn för studier av slaggning och fouling.

I Figur 6.14 beskrivs närmare Foster Wheelers anläggning för eldning av ~20 kg kol/h. Ugnen är ~6 m hög och diametern är ~7 dm. Uppehållstiden blir ~3 - 4 sek i ugnen vid full last och luftöverskottet ~15 %.

1984-09-20

Den simulerade överhettardelen har tvärsnittet 17.5 x 37.5 cm. Gashastigheten i ugnsdelen blir ~1.6 m/s och i överhettardelen ~13 m/s. Vid den refererade försöksserien var temperaturen ~1090°C vid utträdet ur ugnsdelen.

För uppsamling av foulingprov fanns 3 provbanker i rostfritt stål om vardera 3 rör med diametern ~8 cm på varje rör. Utseendet för varje enhet framgår närmare av Figur 6.15.



Schematic of Fouling Probe in Flue Duct (65)

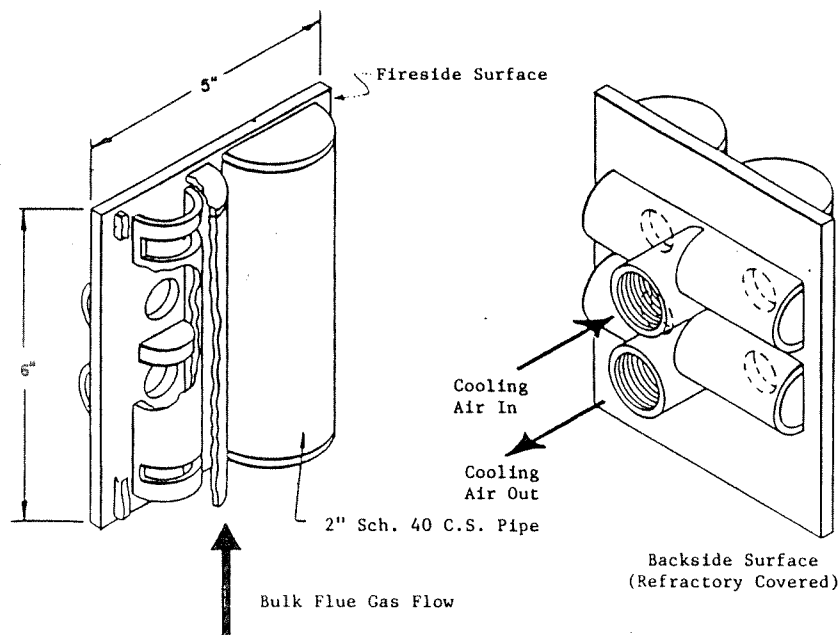
Figur 6.15

Foulingsond.

Sonderna luftkyls för att uppnå yttemperaturer liknande konventionella förbränningsanläggningar. Inborrade termoelement finns i sonderna.

1984-09-20

Foulingtubernas temperatur hålls vid $\sim 480 - 590^{\circ}\text{C}$.



Slagging Probe (65)

Figur 6.16

Slaggningssond.

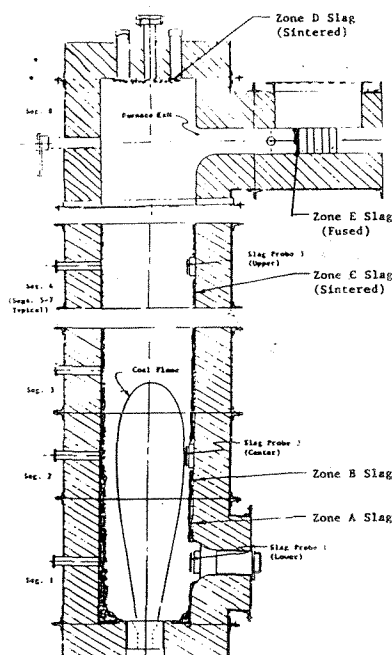
Slaggningssonderna (Figur 6.16) består av 2-tums "Schedule 40"-rör monterade parallellt på en 6 mm tjock platta.

Temperaturen styrs även i dessa sonder med tryckluft och termoelement finns på yttersta tubytan. Liksom i konventionella pannor består de ytor där slaggen kan fastna av kolstål. Sondernas temperatur anpassas till temperaturer från 430 till över 530°C .

I Figur 6.14 anges olika typer av slagg som erhöles vid eldning av 5 olika kol under 9 - 16 timmar.

1984-09-20

För de kol som endast var lite slaggande hade påslagen i zon A - C oftast en liknande samman-



The Location of Various Types of Slag Formed in the Furnace (65)

Figur 6.17

Slaggpåslag.

sättning som kolets aska. Dock var oftast det innersta skiktet anrikt på kalium.

De kraftigaste påslagen erhöles från Upper Free Port trots att detta kol hade den högsta askmjukningstemperaturen. Dess aska var emellertid mycket inhomogen, varför lågsmältande askor återfanns i fraktioner med hög densitet enligt Tabell 6.2.

Påslagen analyserades i Scanning Electron Microscope (SEM), varvid huvudbeståndsdelarna i zon A - C var Al och Si med förhöjda halter av Fe, K, Ca, S och Ti. I zon D hade stora partiklar ($<40\text{ }\mu\text{m}$) med höga Fe-halter sintrat fast för några av kolen.

1984-09-20

Tabell 6.2

Askhalt, järnhalt i askan resp i sjunkfraktionen
2.85, askmjukningstemperatur samt slaggning

Comparison of Percent Ash, Percent Iron in Ash,
Percent Iron in Sink 2.85 Gravity Fraction of Coal
and Ash Softening Temperatures for the Coals Tested

	Kentucky No. 11	Illinois No. 6	Kentucky No. 9	Lower Freeport	Upper Freeport
Percent Ash in Coal (%) As Rec'd.	14.90	9.36	18.01	16.43	23.58
Percent Fe ₂ O ₃ in Ash (%)	21.5	18.5	17.2	10.3	16.6
Percent Fe ₂ O ₃ in sink 2.85 gravity frac- tion of coal	0.225	0.159	0.623*	1.56	1.67†
Ash Soft. Temp. (Hem., Red.) °F	2130	2080	2368	2443	2245
Slaggning:	Ingen Lätt	Medel	Kraf- tig		Mkt kraftig
* Includes sample from the -105/+74μ and -74/+44μ size fractions only					
† Includes sample from the -297/+140μ, -140/+44μ, and -44μ size fractions only					

(65)

De slaggande kolen gav även i zon E ett järnrikt
smält påslag.

I dessa typer av pilotskaleanläggningar kan
närmare undersökningar göras som ger en ökad
förståelse, varför och hur olika typer av
slaggning respektive fouling uppträder.

Under vårens eldningskampanj i Studsviks värme-
kraftcentral har en enkel luft- och vattenkyld
sond för uppsamling av påslag använts. Dessa kan
närmare studeras i SEM (se omslagsbilden).

En mer avancerad sond där även värmefflödet ska
kunna mätas har ritats och är under tillverk-
ning.

1984-09-20

7. SLUTSATSER

Slaggning och fouling vid koleldning är fenomen som både beror på kolegenskaper och pannans utformning och driftssätt. Design och drift av pannor för att helt undvika beläggningar är ofta ej ekonomiskt rimligt, varför man kör så att en del beläggningar bildas, vilka avlägsnas vid oftast planerade stopp.

7.1 Från slaggningssynpunkt besvärliga kolegenskaper

Följande kolegenskaper kan medverka till slaggning:

- 1) Hög S-halt i kolet
- 2) Hög Na-halt i kolet, speciellt kloridbundet eller organiskt bundet natrium
- 3) Låg askmjukningstemperatur
- 4) B/A, vilka resulterar i $R_s > 2.6$ eller $R_F \geq 1$
- 5) En asksammansättning som ger låga beräknade viskositeter
 η_{1260} resp η_{1426}
- 6) Hög Fe-halt
- 7) Hög Ca-halt
- 8) I kolet ingående stora mineralpartiklar med låg smältpunkt, t ex pyriter och fältspalter
- 9) Närvaron av svårförbränt kol

7.2 Några kolegenskaper som bidrar till fouling

Följande egenskaper bidrar bl a till fouling:

1984-09-20

- 1) Hög Na-halt speciellt lätt förångbar Na, dvs organiskt bunden respektive NaCl
- 2) Hög S-halt i kolet
- 3) Lignitiskt kol accentuerar faktorerna ovan starkt
- 4) Högt B/A som ger högt $R_S > 2.6$ (hög risk) respektive högt $R_F > 1$ (hög risk)
- 5) Hög halt förångbar kalium
- 6) Hög fosforhalt
- 7) Närvaro av svårförbränt kol

7.3 Pannegenskaper känsliga för slaggning

- 1) Stora pannor (moderna) kan vara mer känsliga för slaggning, eftersom eldstadsbelastningarna är högre än i äldre respektive mindre pannor. Värmebelastningen/ytenhet måste anpassas till det eldade kolet
- 2) En design där, inom de närmaste ~3 m från pannan, ej bildade smälta partiklar hinner svalna innan de når eldstadsytan
- 3) En brännarinställning som ger
 - a) en flamma som delvis träffar ugnsväggen (oftast hörnbrännare)
 - b) stråkbildning i pannan kan bli a ge:
 - c) delvis reducerande atmosfär
 - d) delvis oförbränt kol som kan träffa pannväggarna
 - e) ojämn värmeöverföring
 - f) återcirkulering av större partiklar, vilka kan slagga på brännarväggen
- 4) Anpassning av panndriften till det aktuella kolets egenskaper

1984-09-20

7.4 Några pannegenskaper känsliga för fouling

Följande pannegenskaper är bl a viktiga ur
foulingsynpunkt:

- 1) Tillräckligt låg gastemperatur måste uppnås före inträdet i överhettarna
- 2) Denna temperatur är i hög grad beroende av det eldade kolets egenskaper
- 3) Avskärmningar så att flamman ej syns till överhettardelen
- 4) Ett tubarrangemang som har avpassats till det eldade kolets foulingegenskaper
- 5) Gashastighetens avpassning till påslagsbildning respektive avstötning

1984-09-20

REFERENSER

1. HEIN
Föredrag "Ash Deposit Formation: Slagging fouling and corrosion, factors influencing boiler design and operation", Coal combustion Course, Köpenhamn maj 1983.
2. HEIN
Gas-side problems with combustion of low calorific coals.
VGB konf Slagging, Fouling and Corrosion 1984-02-29--03-02.
3. ZELKOWSKI
Ingenieurtechnische Betrachtungen zu den Ursachen von Verschlackungen, Verschmutzungen und Korrosion.
VGB konf Slagging-Fouling and Corrosion in Thermal Power Plants
1984-02-28--03-02.
4. HEITMANN, H, GALLUS, M
Erfahrungen mit Verschlackungen und Verschmutzungen bei der Verbrennung von Steinkohlen.
Weltweiter Herkunft im NWK-Kraftwerk Wilhelmshaven.
VGB konf Slagging, Fouling and Corrosion 1984.
5. HARN, A J
Furnace geometry and slagging - A south African experience.
VGB konf Slagging, Fouling and Corrosion 1984.
6. BUXMANN, J
Slagging and fouling characteristics of Spanish brown coal.
VGB konf Slagging, Fouling and Corrosion 1984.
7. HEIN
Trans ASME. Inc Engr Power 99, 4, 1977.
8. WENT, J
Principles for design of boilers.
Kurs i Köpenhamn maj 1983.
9. ATTIG
A laboratory method of evaluating factors affecting tube bank fouling in coal fired boilers.
Babcock & Wilcox, sept 1979.

1984-09-20

10. BREUKER, H et al
Problems with the firing of saliferous coals - brown coals - slagging fouling corrosion wear.
VGB konf Slagging, Fouling and Corrosion 1984.
11. VOSS, W
Special operational experiences and design for plants with fluidized bed combustion - Fouling when using different fuels.
VGB konf Slagging, Fouling and Corrosion 1984.
12. Praktiska erfarenheter från Enköping 1983.
13. RAASK
Verschlackungen in Steinkohlen gefeuerten Kesseln.
VGB. 53 Heft 4, 1973.
14. FEUNKEL, J S
Viscous flow at crystalline bodies under the action of surface tension. Journal of Physics, Moscow, Vol 9, s 385, 1945.
15. RAASK
Slag - coals interface phenomena. Trans ASME. J Eng Power, serie A, 88, 40-44, 1966.
16. BRYERS, R W
Influence of Mineral Matter in coal on fireside. Ash deposition. Trans ASME. Vol 101, sid 101, 1979.
17. GIBB, W H
The slagging and fouling characteristics of coals - 1.
Ash viscosity measurement for the determination of slagging propensity. Power Ind Research 1, 29-42, 1981.
18. RAASK, E
Sintering characteristics of coal ashes by simultaneous dilatometry-electrical conductance measurements. Journal of Thermal Analysis, Vol 16, s 91-102, 1979.
19. LIN, C J and WINEGARTNER, E C
Joint Power Generat. Conf ASME paper 81 - JPGC-Fu-8, 1981.

1984-09-20

20. MRAW, et al
The science of mineral matter in coal.
Ur Coal Science, Vol 2, M Gorbaty al,
1983.
21. DIMMER et al
Influence of coal mineral matter on
slagging of utility boilers.
CS-14 18 bl a av Batell, Penn State,
för EPRI 1980.
22. SEHGAL et al
Significance of calorific value,
ultimate analysis, ash fusion and
mineral analysis of ash.
Alberts Research "coal evaluation"
1974.
23. BENGTSSON, M
Petrografi för ångkol.
KHM-rapport 15, 1981.
24. HEAP
The impact of coal quality on power
plant coals due to the influence of
ash deposits.
VGB konf Slagging, Fouling and Corro-
sion 1984.
25. KAUTZ
Slagging, Fouling and Corrosion prob-
lems during combustion of hard coals
of world-wide origin.
VGB konf Slagging, Fouling and Corro-
sion 1984.
26. GUMZ, KIRSCH, MACKOWSKY
"Schlackenkunde" 1958.
27. BRYERS, R W
Influence of pyrits on furnace slagg-
ing.
VGB konf Slagging, Fouling and Corro-
sion 1984.
28. ASPLUND, F
Provelldning av kol i Hässelbyverket.
KHM-rapport 26, 1982.
30. BENGTSSON, M
Slagging and fouling behaviour of two
different coals in a 10 MW pf-boiler.
VGB konf Slagging, Fouling and Corro-
sion 1984.

1984-09-20

31. LEIKERT, K and MICHFELDER
Constructive measures for the reduction of slagging and fouling in the combustion chamber of bituminous coal-fired boilers.
VGB konf Slagging, Fouling and Corrosion 1984.
32. BORIO, R W, NARCISO, R R
The use of gravity separation techniques for assessing slagging and fouling potentials.
Trans ASME, Vol 101, okt 1979.
33. HEIN, K
Derzeitiger Kenntnisstand über rauchgasseitige Verschmutzung.
VGB Kraftwerkstechnik 63, Heft 4, April 1983.
34. BARNHART, D H, WILLIAMS, P C
The sintering test, an index to ash-fouling tendency.
Trans ASME 78 (1956) 1229-36.
35. BORIO, R W, GOETZ, G J, LEVASSEUR, A A
Slagging and fouling properties of coal ash deposits as determined in a laboratory test facility.
ASME, Winter Annual meeting in Atlanta, Georgia, Nov 28 - Dec 3 (1977).
36. BIEBER
VGB 54 (1974) 699-707.
Mitt VGB 48I (1968).
37. ELY, F G, BARNHART, D H
Chemistry of coal utilization.
Suppl volume, HH Lowry, ed N Y 1963, p 838-863.
38. HOLM, T
Rökgassidig korrosion på pann- och överhettartuber vid koleldning - en litteraturstudie.
STUDSVIK/EI-82/142 (82-08-17).
39. COREY, R C, BROSS, B J, REID, W T
Trans ASME, 1945, 289.
40. CROSSLEY, H E
J Inst Fuel 41.
41. NELSON, W, CAIN, C
Trans ASME (1960) 194.

1984-09-20

42. BAKER, D W C, FOUNTAIN, M J, HART, M J, HAY, K A
The control of high temperature fire-side corrosion.
2nd ed, Central Electricity Research Laboratories, 1974.
43. EFFERZ, P H
Maschinenschaden 41 (1968) 189.
44. REID, W T
Coal ash - it's effects on combustion systems.
Chapter 12, p 1389-1445 in Elliot, M A ed: Chemistry of coal utilization, Second supplementary volume, J Wiley & Sons.
45. ADAMS, A M, RAASK, E
Complex sulphates in coal-fired boiler deposits.
Proc of the Marchwood conference on Mechanism of Corrosion by Fuel Impurities, ed Johnson och Littler, Butterworths, London 1963.
46. BAUMAN, K
Sonderheft VGB Speisewassertagung 1974, 70.
47. FRENCH, D N
National Association of corrosion engineers.
Corrosion/80 Chicago, Illinois 1980.
48. CUTLER, A J B, RAASK, E
External corrosion in coal-fired boilers: assessment from laboratory data.
Corrosion Science 21, No 12, pp 789-800, 1981.
49. BREWER, L
Chem Rev 52, 1 (1953).
50. RAASK, E
The behaviour of potassium silicates in pulverized coal flames.
Mitteilungen VGB 48, 349 (1968).
51. RAASK, E
Creation, capture and coalescence of mineral species in coal flames.
J Inst Energy March 1984, pp 231-239.

1984-09-20

52. RAASK, E
Sulphate capture in ash and boiler deposits in relation to SO₂ emission. Progr Energy Combust Sci 8, 261-76 (1982).
53. HEDLEY, A B, BROWN, T D, SHUTTLEWORTH, A
Available mechanisms from a combustion gas stream. ASME paper 65 - WA/CD-4 (1965).
54. HARLOW, W F
Proc Inst Mech Engrs, vol 151, 1944, sid 293, Proc Inst Mech Engrs, vol 160, 1949, sid 359, Am Soc Mech Engrs Paper 56-A-159.
55. KRAUSE, H H, LEVY, A, REID, W T
Trans ASME J Eng Power jan 1968, 38-44.
56. MANNING, G H
Proc Inst Mech Engrs, vol 151, 1944, p 306.
57. KAUTZ, K, REICHEL, H-H, SCHWARZ, G
Zum Zusammenhang zwischen Kohleeigenschaften und den Auftreten von Verschlackungen, Verschutzungen und Korrosionen in Wanderrostkesseln. VGB Kraftwerkstechn 1983, 63(8), 701-6.
58. FINCHNAM, C J B, RICHARDSON
Behaviour of sulphur in silicate and alumina melts. Proc Royal Soc 1954, A223, p 40-49.
59. BENGTTSSON, M
Uppgifter inhämtade vid besök på EER, sept 1984.
60. HUPA, M, BACKMAN-SANDBERG, L
Slagging and fouling studies in coal-fired boilers using air cooled deposit prots. VGB konf Slagging, Fouling and Corrosion 1984.
61. WAGONER, C L
Measurement of fundamental properties characterizing coal minerals and fire-side deposits. DOE/PC/50266-2 1981.
62. WIBBERY, WALL
Fuel 61, 87-92, 93 1982.

1984-09-20

- 63. KISS, LOYD, RAASK
J Inst Fuel 45, 213-223, 1972.
- 64. BRYERS, R W, WALCHUK, O R
Influence of pyrites on furnace slagging.
VGB konf Slagging, Fouling and Corrosion 1984.
- 65. JONES, A R
Controlled ash deposition studies.
VGB konf Slagging, Fouling and Corrosion 1984.
- 66. CORTSEN, C E
An evaluation of coal properties and their influence on the utilization in power station.
Elsam Coal quality report nr 2, Febr 1978.
- 67. BENGTSSON, M
Anteckningar från besök vid Elkraft 1984-10-23.

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk Forskning och utveckling. Stiftelsens forkningsprogram är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem. Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Värmeverksföreningen
- Övrig industri

Värmeforsk samarbetar med Närings- och teknikutvecklingsverket (NUTEK).

STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Box 1765 · 111 87 Stockholm
Tek: 08-7900600 · Fax 08-796 00 37