



**STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT**  
**SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE**

**RAPPORT**  
**REPORT      No 21**

**Tekniska egenskaper hos  
restprodukter från kolförbränning  
– en laboratoriestudie**

**BJÖRN MÖLLER**  
**GÖRAN NILSON**

**LINKÖPING 1983**





**STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT  
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE**

**RAPPORT  
REPORT      No 21**

**Tekniska egenskaper hos  
restprodukter från kolförbränning  
– en laboratoriestudie**

**BJÖRN MÖLLER  
GÖRAN NILSON**

**LINKÖPING 1983**

ISSN 0348-0755

## FÖRORD

Föreliggande rapport har tillkommit på uppdrag och be-  
kostnad av projekt Kol-Hälsa-Miljö.

I rapporten redovisas tekniska egenskaper och kemisk  
sammansättning för olika restprodukter erhållna vid  
kolförbränning och rökgasavsvavling.

För projektets genomförande har ett stort antal labora-  
torieförsök utförts dels vid Statens geotekniska institut  
och dels vid Tekniska högskolan i Lund, avd f Geoteknik.

Rapporten har också utgivits som teknisk rapport av KHM  
med rapportnummer 48.

Författarna vill rikta ett varmt tack till civ ing Lars-  
Erik Johannesson och ing Tore Pettersson vid Tekniska  
högskolan i Lund och laboratorieassistent Inga-Maj  
Svensson vid SGI för väl utförda undersökningar och ett  
gott samarbete.

Linköping augusti 1983

Björn Möller

Göran Nilson

## SUMMARY

This report is the result of a laboratory study of technical properties of some waste products from different kinds of coal combustion processes and flue gas desulfurization. Three fly ashes from pulverized coal combustion, two fly ashes from grate firing, one fly ash from an oil combustion, four bottom ashes and two kinds of flue gas desulfurization products (wet-dry FGD and wet FGD) have been investigated. A mixture of fly ash and FGD-products have also been studied. In chapter 10 a comparison of the examined waste products and three fly ashes from a literature review is made. The investigations have comprised chemical analyses, microstructure, general technical parameters, compaction properties, strength and strain properties and permeability, Table 4.1:1 (p 10).

The wastes are derived from combustion of coal of different origin. Specifications of the plants and analyses of the coal can be found in Table 3.1:1 (p 7).

A determination of the chemical compounds of the fly ashes shows that the main compounds are  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_3$ . The chemical analyses of bottom ash show approximately the same contents and amounts as that of the fly ashes, Table 7.1:1 (p 57). Table 8.1:1 (p 66) shows that the waste from the wet-dry FGD-process contains about 40% lime, 40% fly ashes and about 7% total sulphur. The main chemical compounds in wet FGD-products are calcium sulphite (~45%) and calcium sulphate (~30%).

A review of the microstructure of the waste products, Table 10.1:2 (p 102), shows that the fly ash from pulverized coal combustion mainly consists of grains with spherical forms and that the fly ash from grate firing mainly consists of grains with irregular shape, often porous. Bottom ash is a material with irregular grain structure, often aggregated. The wet-dry FGD-products consists of small, porous particles made up to aggregates moulded to fluffy forms.



This product also contains 30-40% fly ash as spherical grains. The wet FGD-product has a microstructure with thin flakes, sometimes formed like roses. General technical parameters such as specific gravity, specific area, characteristic grain size, uniformity coefficient and classification according to standardized soil classification (Swedish) can be found in Table 10.2:1 (p 103) and in Figure 10.2:1 (p 105).

Compaction curves, according to modified proctor, in Figure 10.3:1 (p 106) and Table 10.3:1 (p 108) show that pulverized coal fly ash has a maximum dry density of 1.3 to 1.5 t/m<sup>3</sup> at optimum water content 18-21% (of dry weight). Fly ashes from grate firing have a maximum dry density of 1.0 to 1.3 t/m<sup>3</sup> at an optimum water content of 18-19%. Corresponding values of maximum dry density for bottom ashes is 0.7-0.8 t/m<sup>3</sup>. For grinded bottom ash (sand fraction) the maximum dry density is about 1.13 t/m<sup>3</sup> at an optimum water content of 30%. Maximum dry density for the wet-dry FGD-product is 1.20 t/m<sup>3</sup> at optimum water content 36% and for the wet FGD-product 1.28 t/m<sup>3</sup> at 33%.

The compression strength for pulverized coal fly ash, Figure 10.4:1 (p 110), can be expressed as:

$$\sigma = a \log(t) + b \cdot R_D + d$$

and for the wet-dry desulfurization product

$$\sigma = a \cdot t + b \cdot R_D + c \cdot w + d$$

where

$\sigma$  = compression strength

$t$  = curing time

$R_D$  = compaction degree

$w$  = water content

$a, b, c, d$  = constants

These constants  $a$ ,  $b$ ,  $c$  and  $d$  can be depending on the con-

tent of  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  and free lime, the specific area and the content of unburnt coal. Consequently, such parameters which are affected of coal quality, combustion technique, operation, ash separation and handling. These parameters can be affected after the waste products have left the plant. The test results show that pulverized coal fly ash and wet-dry desulfurization products have a compression strength of more than 1000 kPa, while fly ash from grate firing only has a compression strength in the interval of 50-100 kPa. Mixtures of fly ash and wet-dry desulfurization products can have compression strengths about 2500 kPa after 90 days of curing. The increase in compression strength of compacted fly ash will almost reach an end after 28 days of curing, and after that time the strength will be almost constant. However, the compression strength of the wet-dry desulfurization product will increase continuously as well as for the mixtures with fly ash. The compression strength is also depending on curing temperature (higher temperature gives higher strength).

Triaxial tests on the fly ash, Figure 10.4:3 (p 115), give a friction angle in the interval  $40-45^\circ$  which seems to be independent of the curing time. The cohesion increases with curing time like the compression strength described above.

The consolidation properties of the fly ashes and the wet-dry desulfurization products are very good. Compression modulus of about 100-300 MPa have been measured in the stress interval of 1-8 MPa.

The permeability coefficients of fly ashes and wet-dry desulfurization products are very much affected of the compaction degree, Figure 10.5:1 (p 116). At a compaction degree of 0.90 the coefficient is  $4 \cdot 10^{-7}$  m/s for pulverized coal fly ash,  $\sim 5-9 \cdot 10^{-6}$  m/s for the fly ash from grate firing,  $3 \cdot 10^{-8}$  m/s for the wet-dry desulfurization product and  $\sim 7 \cdot 10^{-9}$  m/s for wet desulfurization product. Mixtures of fly ash and the wet-dry desulfurization product have a permeability coefficient of about  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s.



INNEHÅLLSFÖRTECKNING		sid
1.	SAMMANFATTNING	1
2.	INLEDNING	4
2.1	Bakgrund	4
2.2	Syfte	5
3.	UNDERSÖKTA MATERIAL	6
3.0	Allmänt	6
3.1	Restprodukternas bakgrund	6
4.	FÖRSÖKENS OMFATTNING	9
4.0	Allmänt	9
4.1	Försöksprogram	9
5.	BESKRIVNING AV ANVÄNDA FÖRSÖKSMETODER OCH DEFINITIONER	12
5.1	Bestämning av kemiska huvudkomponenter	12
5.2	Bestämning av specifik yta	12
5.3	Bestämning av vattenkvot	12
5.4	Bestämning av korndensitet	13
5.5	Bestämning av kornfördelning	13
5.6	Bestämning av packningsegenskaper	14
5.7	Bestämning av hållfasthet ur enaxliga tryckförsök	15
5.8	Bestämning av hållfasthet ur triaxialförsök	16
5.9	Bestämning av deformationsegenskaper	19
5.10	Bestämning av permeabilitet	20
5.11	Bestämning av temperaturens in- verkan på hållfastheten	21
6.	RESULTAT FRÅN UNDERSÖKNINGARNA AV FLYGASKA	22
6.0	Allmänt	22
6.1	Kemiska huvudkomponenter	22

6.2	Mikrostruktur	24
6.3	Allmänna tekniska parametrar	29
6.4	Packningsegenskaper	33
6.5	Hållfasthets- och deformationsegenskaper	36
6.5.1	Enaxliga tryckförsök	36
6.5.2	Triaxialförsök	46
6.5.3	Kompressionsförsök	51
6.6	Permeabilitetsförsök	53
7.	RESULTAT FRÅN UNDERSÖKNINGAR AV BOTTENASKA	57
7.0	Allmänt	57
7.1	Kemiska huvudkomponenter	57
7.2	Mikrostruktur	58
7.3	Allmänna tekniska parametrar	61
7.4	Packningsegenskaper	62
8.	RESULTAT FRÅN UNDERSÖKNINGAR AV AVSVAVLINGSPRODUKTER	65
8.0	Allmänt	65
8.1	Kemiska huvudkomponenter	65
8.2	Mikrostruktur	67
8.3	Allmänna tekniska parametrar	69
8.4	Packningsegenskaper	71
8.5	Hållfasthets- och kompressions- egenskaper	73
8.5.1	Enaxliga tryckförsök	73
8.5.2	Triaxialförsök	82
8.5.3	Kompressionsförsök	85
8.6	Permeabilitetsförsök	87
9.	RESULTAT FRÅN BLANDNING AV FLYGASKA OCH RÖKGASAVSVAVLINGSPRODUKT	89
9.0	Allmänt	89
9.1	Kemiska huvudkomponenter	89
9.2	Allmänna tekniska parametrar	90
9.3	Packningsegenskaper	92
9.4	Hållfasthetsegenskaper	93
9.5	Permeabilitetsförsök	96

VII

10.	JÄMFÖRELSE AV OLIKA RESTPRODUKTERS EGENSKAPER	98
10.0	Allmänt	98
10.1	Kemiska huvudkomponenter	98
10.2	Allmänna tekniska parametrar	103
10.3	Packningsegenskaper	106
10.4	Hållfasthetsegenskaper	109
10.5	Permeabilitet	116
11.	REFERENSER	118



## 1. SAMMANFATTNING

I föreliggande rapport redovisas tekniska egenskaper hos restprodukter från olika typer av kolförbränning och rökgasavsvavling. Således har tre flygaskor från kolpulvereldning och två askor från wanderrosteldning undersökts samt en flygaska från oljeförbränning. Vidare har fyra bottenaskor och två rökgasavsvavlingsprodukter ingått i undersökningen. Dessutom har blandningar av flygaska och avsvavlingsprodukter undersökts. I rapportens sammanfattande kapitel har också tre flygaskor från litteraturen tagits med som jämförelse. Undersökningen har omfattat bestämning av kemiska huvudkomponenter, mikrostruktur, allmänna tekniska egenskaper, packningsegenskaper, hållfasthetsegenskaper, deformationsegenskaper och vattengenomsläpplighet. Försöksprogrammet framgår av Tabell 4.1:1 (sid 10).

Restprodukterna härrör från förbränning av kol med olika ursprung. Sammanställning av data från respektive anläggning och kol framgår av Tabell 3.1:1 (sid 7) och i Tabell 3.1:2 (sid 8) redovisas askans kemiska sammansättning utförd i samband med kolanalys i laboratorium.

Flygaskans kemiska huvudkomponenter, Tabell 6.1:1 (sid 23) visar att den till största delen består av kiseloxid, aluminiumoxid och järnoxid. Halten oförbränt kol från kolpulvereldning är mindre än 4% medan den från wanderrosteldning är ca 30%. Analys av bottenaska visar på ungefär samma kemiska innehåll och mängder som flygaska, Tabell 7.1:1 (sid 57). Analys av avsvavlingsprodukternas kemiska huvudbeståndsdelar (Tabell 8.1:1, sid 66) visar att den våttorra produkten innehåller ca 40% flygaska, 40% kalk och 7% totalsvavel. De kemiska huvudbeståndsdelarna för den våta avsvavlingsprodukten är ca 45% kalciumsulfid och ca 30% kalciumsulfat.

En sammanfattning av restprodukternas mikrostruktur i Tabell 10.1:2 (sid 102) visar att flygaska från kolpulvereldning i huvudsak består av sfäriska korn medan flygaska

från wanderrosteldning består av korn med oregelbunden form varav många är porösa. Bottenaskan består av korn med oregelbunden struktur ofta sammansmälta till större aggregat. Den våt-torra avsvavlingsprodukten består av luddiga mindre partiklar som är sammansatta till större. Den våta avsvavlingsprodukten består av tunna flak ibland bildande rosform. Allmänna tekniska parameterar såsom torrdensitet, specifik yta, karaktäristiska kornstorlekar, graderingstal och klassificering enligt jordartsbeteckningar framgår av Tabell 10.2:1 (sid 103) och Figur 10.2:1 (sid 105).

Packningskurvor, redovisade i Figur 10.3:1 (sid 106) och Tabell 10.3:1 (sid 108), visar att flygaskor från kolpulvereldning har en maximal torrdensitet mellan 1,3-1,5 t/m<sup>3</sup> och en optimal vattenkvot mellan 18-21%. Flygaskor från wanderrosteldning har en maximal torrdensitet på mellan 1,0 och 1,3 t/m och en optimal vattenkvot på 18-19%. Motsvarande värden för bottenaska är 1,13 t/m<sup>3</sup> och 30% och för våt-torra avsvavlingsprodukten 1,20 t/m<sup>3</sup> och 36%.

Undersökningen visar att tryckhållfastheten, se Figur 10.4:1 (sid 110) för en flygaska kan beskrivas med sammanfattningen

$$\sigma = a \log(t) + b \cdot R_D + d$$

och för den våt-torra avsvavlingsprodukten

$$\sigma = a \cdot t + b \cdot R_D + c \cdot w + d$$

där

$\sigma$  = tryckhållfastheten

$t$  = härdningstiden

$R_D$  = packningsgraden

$w$  = vattenkvoten

$a, b, c, d$  = konstanter

Konstanterna  $a$ ,  $b$ ,  $c$  och  $d$  synes vara beroende av halten  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ , mängden fri kalk, specifik yta och halten

oförbränt. Dessa parametrar påverkas av kolkvalitet, förbränningsteknik, driftförhållande och sätt att avskilja restprodukterna. Däremot är de beroende parametrarna härdningstiden, packningsgraden och vattenkvoten sådana som går att påverka efter det restprodukten lämnat anläggningen. Undersökningen visar att flygaska från kolpulvereldning och våt-torr avsvavlingsprodukt kan ge hållfasthetsnivåer på över 1000 kPa medan flygaska från wanderrosteldning kan ge 50-100 kPa. Blandningar av flygaska och våt-torr avsvavlingsprodukt visar en hållfasthet på ca 2500 kPa efter 90 dygns härdning. Undersökningen visar också att flygaska uppnår nära nog sin sluthållfasthet efter 28 dygns härdning medan den våt-torra avsvavlingsprodukten visar fortsatt linjär tillväxt efter denna tidpunkt. Detta gäller också för blandningar mellan flygaska och våt-torr avsvavlingsprodukt men tillväxttakten är avsevärt större. Hållfasthetsnivån visar sig också vara starkt beroende av temperaturen under härdningstiden.

Triaxialförsök på flygaska, se Figur 10.4:3 (sid 115) visar en friktionsvinkel på  $40-45^{\circ}$  vilken synes vara oberoende av askans härdningsegenskaper. Däremot blir kohesionen beroende av härdningstiden och med samma utveckling som angivits ovan för tryckhållfasthet.

Kompressionsegenskaper för flygaska och våt-torr avsvavlingsprodukt är goda. Kompressionsmoduler på 100-300 MPa är vanliga i spänningsintervallet 1-8 MPa.

Permeabiliteten för flygaska och våt-torr avsvavlingsprodukt är beroende av bl a packningsgrad, se Figur 10.5:1 (sid 116). Vid packningsgraden 0,90 är permeabiliteten för flygaska från kolpulvereldning ca  $4 \cdot 10^{-7}$  m/s, från wanderrosteldning  $5-9 \cdot 10^{-6}$  m/s, våt-torr avsvavlingsprodukt  $3 \cdot 10^{-8}$  m/s och  $\sim 7 \cdot 10^{-9}$  m/s för våt avsvavlingsprodukt. Blandningar av flygaska och våt-torr avsvavlingsprodukt ger en permeabilitet på ca  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s.



## 2. INLEDNING

### 2.1 Bakgrund

I många länder sker i dag kolförbränning för produktion av elektricitet och värme. En väletablerad teknik finns och nya metoder utvecklas. Detta har medfört ökande satsning på kol, även i länder som ej har egen tillgång till detta energislag. Samtidigt ställs det ökande krav på att begränsa de negativa miljöeffekter som koleldning medför. Därför har ny miljövänligare teknik växt fram. Exempel på sådan är effektivare stoftavskiljning, svavelavskiljning från rökgaserna och ny förbränningsteknik såsom t ex virvelbäddsförbränning.

Kolförbränning lämnar stora mängder restprodukter, då askhalten normalt i kol är 10-15%. Vidare har ny teknik som t ex svavelavskiljning från rökgaserna ytterligare ökat mängden avfall. Traditionellt har restprodukterna deponerats på mer eller mindre lämpligt sätt och ställen.

Under de senaste 10 åren har man satsat mycket på att kunna återanvända dessa restprodukter, dels på grund av de negativa miljöeffekter detta avfall har på sin omgivning, dels på grund av insikten om möjlig ekonomisk återanvändning. Exempel på sådana användningsområden är cementtillverkning, byggnadsmaterial, fyllningar, jordförstärkning och landskapsåterställning.

Vid införandet av kolförbränning i Sverige är det därför viktigt att inhämta de kunskaper om vunna erfarenheter som vissa länder i dag har beträffande t ex restprodukternas egenskaper och återanvändning. Detta sker bl a genom projekt Kol-Hälsa-Miljö (KHM) delprojekt 3.

I en kolpulvereldad anläggning för produktion av 260 MW elektricitet inmatas ca 90 ton kol per timme. Vid en askhalt på 10-15% erhålls 9-13,5 t/h aska. Om rökgasavsvavling dessutom sker med s k våt-torr metod erhålls ytterligare

ca 6 ton avfall per timme under antagande att kolets svavelhalt är 1% och att en 80% svavelrening utföres. Dvs en sådan anläggning ger mellan 15 och 20 ton avfall per timme och vid en tillgänglighet på 8000 h/år erhålls således 120.000-160.000 ton avfall per år.

Avfallets tekniska och kemiska egenskaper varierar beroende på bl a kolets kemiska sammansättning, typ av förbränningsmetod, anläggningens verkningsgrad, driftförhållanden, avsvavlingsmetod och avfallshantering. Således är det många parametrar som styr avfallets slutliga kvalitet och därför är det angeläget att känna avfallets "bakgrund" enligt ovan.

## 2.2 Syfte

I föreliggande objekt har syftet varit att undersöka de tekniska och kemiska egenskaperna hos restprodukter från kolförbränning både med konventionell och ny teknik. Avsikten har också varit att tillhandahålla underlag för andra objekt inom KHM om avfall och dess tekniska egenskaper.

Tonvikten i undersökningen har lagts på att undersöka restprodukternas hållfasthets- och deformationsegenskaper samt vattengenomsläpplighet. Detta har föranletts av att stora användningsområden för dessa restprodukter i framtiden bedöms vara fyllningar för olika ändamål. Vidare är dessa parametrar väsentliga vid utvärdering av deponiers utformning och miljöpåverkan.

### 3.       UNDERSÖKTA RESTPRODUKTER

#### 3.0     Allmänt

Genom Kol-Hälsa-Miljö delprojekt 2 försorg har omfattande mätningar och provtagningar av restprodukter från kolförbränning vid olika typer av anläggningar skett. Tillvägagångssättet och resultat från dessa emissionsmätningar är i sin helhet redovisade inom KHM 2 och därför kommer här endast de för detta KHM 3 objekt väsentliga data att redovisas.

Beträffande definitioner av de olika restprodukterna hänvisas till rapport från KHM:s objekt 362/363. I deras rapport anges också överslagsmässiga beräkningsmetoder för bestämning av restproduktmängd från olika anläggningstyper.

Restprodukterna har levererats bl a till Statens geotekniska institut i oljefat eller plasttunnor.

Samtliga restprodukter utom flygaska från Ingå i Finland har levererats genom KHM 2:s försorg.

#### 3.1     Restprodukternas bakgrund

Totalt har sex olika flygaskor analyserats och undersökts inom ramen för detta projekt. Tre kommer från kolpulvereldade anläggningar i Asnaes i Danmark, Ingå i Finland och Wilhelmshafen i Tyskland. Två kommer från wanderrosteldade anläggningar i Perstorp och Norrköping och slutligen en aska från oljeeldning i Uppsala.

Vidare har fyra bottenaskor undersökts, nämligen från Asnaes, Wilhelmshafen, Perstorp och Norrköping. Uttagning av dessa askor har skett vid samma tillfälle som flygaskorna nämnda ovan.

Två olika rökgasavsvavlingsprodukter har undersökts, dels en från den s k våta processen och dels från den s k våt-

Tabell 3.1:1. Data från de olika anläggningarna och kolen under provtagningstillfället.

PLATS	DATUM	FÖRBRÄN- NINGSTYP	TILLF. ENERGI kolt/h	ANALYS AV KOL						SVAVELAV- SKILJNING % AV RÖK- GASSTRÖM
				URSPRUNGS- LAND	VÄRME- VÄRDE MJ/kg	FLYKTIG- HET %	FUKT %	ASKA %	SVAVEL %	
Asnaes	801104	Kolpulver	85+6 <sup>1)</sup>	okänt	27,30	30,0	2,6	16,9	0,83	-
Asnaes	800916	Kolpulver	-	Sydafrika	24,35	25,3	7,5	15,3	1,2	2,0
Ingå	810210	Kolpulver	2)	USA	26,75	28,9	7,1	11,6	1,16	-
Wilhelms- hafen	811202	Kolpulver	198	Sydafrika + USA	28,12	27,4	2,1	15,1	0,92	-
Wilhelms- hafen	811203	Kolpulver	201	Sydafrika + USA	27,98	27,2	2,2	15,5	0,93	24,1
Norrkö- ping	811118	Wanderrost	2	okänt	26,45	26,5	11,0	11,8	0,65	-
Perstorp	810323	Wanderrost	3,7	okänt	25,75	27,5	8,0	14,7	0,85	-
Uppsala <sup>3)</sup>	810408	Oljeeldning	277 <sup>3)</sup>	okänt	43,2 <sup>3)</sup>	-	0,4	0,025	2,2	-

1) Avser stödeldning med olja

2) Samma pannstorlek och typ som Asnaes

3) Oljeeldning

torra processen. Den förstnämnda erhöjls från en pilotanläggning vid Asnaesverket i Danmark där endast en liten del av rökgasströmmen renades. Den sistnämnda produkten erhöjls från Wilhelmshafen i Tyskland där ca 24% av rökasmängden renas från svavel.

I Tabell 3.1:1 visas data för anläggningar och där använt kol.

Av tabellen framgår att kolens askhalt har varierat mellan 11,6 och 16,9% och att svavelhalten ligger mellan 0,65 och 1,2%. Rökgasrening har skett vid två anläggningar men där har endast en del av rökgasströmmen renats. Vid Asnaesverket var det 2% och vid Wilhelmshafen ca 24% av rökgasströmmen som avskiljts för svavelavskiljning.

I Tabell 3.1:2 visas resultat av askanalyser från respektive kol och verk. Siffrorna har korrigerats med hänsyn till den halt oförbränt som blir kvar i askan efter förbränning i anläggningen.

De i tabellen förekommande värdena kan jämföras med analysresultaten från askor erhållna från samma anläggningar. Dessa är redovisade i kapitel 6. I jämförelsen bör även resultat från analys av bottenaskor invägas.

Tabell 3.1:2. Kemiska huvudkomponenter bestämda i samband med kolanalys (viktsprocent).

Anläggning	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Övrigt	Halt oförbränt
Asnaes	4,4	48	6,7	23	3,0	1,9	0,6	6,8	3,3
Wilhelmshafen	4,2	52	5,5	29	1,0	1,7	0,2	5,3	0,9
Norrköping	4,0	38	7,2	15	3,1	1,3	0,5	4,1	25
Perstorp	4,4	32	4,2	16	2,5	1,6	0,3	3,5	34

#### 4. FÖRSÖKENS OMFATTNING

##### 4.0 Allmänt

De olika restprodukterna har analyserats med avseende på kemiska huvudkomponenter, mikrostruktur, allmänna tekniska egenskaper, packningsegenskaper, hållfasthets- och deformationsegenskaper och permeabilitet. Varje restprodukt har ej undersökts i lika stor utsträckning utan omfattningen och detaljnivån har varierat med hänsyn till restproduktens relevans och likhet med övriga produkter.

##### 4.1 Försöksprogram

Av Tabell 4.1:1 framgår översiktligt försöksprogram för detta projekt. Tillvägagångssättet och provningsmetoder framgår av kapitel 5.

De kemiska huvudkomponenter som har bestämts är  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  och halten total svavel. Dessa analyser är utförda av AB Cementa i deras laboratorium i Slite.

För att få kännedom om mikrostrukturen hos respektive restprodukt har elektronsvepmikroskop-fotografering utförts på de produkter som anges i Tabell 4.1:1. Dessa undersökningar är utförda i samarbete med Universitet i Linköping.

Med allmänna tekniska egenskaper avses här kornfördelningskurva, glödgningsförlust (halt oförbränt), korndensitet, vattenkvot och specifik yta. Bestämningen av dessa egenskaper har skett på samtliga produkter där det har av tekniska skäl varit möjligt. Så har t ex ingen specifik yta kunnat bestämmas för flygaskor från wanderrostledning och bottenaskor. Anledningen är att de innehåller relativt stora korn.

Inpackningsförsök med tung laboratoriestampning har skett på samtliga produkter utom bottenaska.

Tabell 4.1:1. Försöksprogram.

Typ	Anläggning	Beteckning	Kemiska huvudkomponenter	Mikrostruktur	Allm tekn egens	Packn-egen-skaper	Hållfast-hetsegen-skaper <sup>1</sup>	Deforma-tions-egens	Permea-bilitet
Flygaska	Asnaes	D1S-ASKA 2-H	x	x	x	x	152 + 36	10	16
	Ingå	I1S-ASKA 1,2-H	x	x	x	x	0	0	0
	Wilhelmshafen	E1E-ASKA 1	x	x	x	x	10	0	0
	Norrköping	N2C-ASKA	x	x	(x)	x	10	0	2
	Perstorp	F2E-ASKA	x	x	(x)	x	10	0	2
	Uppsala	A1E-ASKA	x	x	x	x	0	0	0
Bottenaska	Asnaes	D1B-ASKA	x	x	(x)	(x)	0	0	0
	Wilhelmshafen	E1B-ASKA	x	x	(x)	x	0	0	0
	Norrköping	N2B-ASKA	x	x	(x)	(x)	0	0	0
	Perstorp	F2B-ASKA	x	x	(x)	(x)	0	0	0
Avsvavlings- produkt	Asnaes	D1F-FGD-H	x	x	x	x	156 + 36	10	16
	Wilhelmshafen	E1S-SLURRY 1-6	x	x	x	x	0	0	2
Flygaska + avsvavling	Asnaes		x		(x)	x	30	0	6

x = undersökning utförd

(x) = undersökning utförd i begränsad omfattning

<sup>1</sup>x+y = antal enaxliga tryckförsök + triaxialförsök



Hållfasthetsegenskaperna har bestämts på två sätt nämligen medelst triaxialförsök och enaxliga tryckförsök. De parametrar som undersökts huruvida de påverkar hållfastheten är packningsgrad, härdningstid och vattenkvot. Här har försöksprogrammets omfattning varierats. Så har t ex flygaska och våt-torra avsvavlingsprodukter från Asnaes utsatts för ett ambitiöst program där de båda försökstyperna för bestämning av hållfastheten har använts och de tre oberoende parametrarna varierats. I Tabell 4.1:1 har antalet hållfasthetsprovningar som utförts på respektive restprodukt angivits. Den första siffran anger antal enaxliga tryckförsök och i förekommande fall den andra antal triaxialförsök.

Deformationsegenskaperna har bestämts på 2 olika sätt nämligen med CRS-försök och enaxliga tryckförsök. Antalet provningar för de två förstnämnda sätten är angivet i tabellen. Försök har utförts på flygaska och avsvavlingsprodukt från provtagningen vid Asnaes-verket.

Slutligen har permeabiliteten bestämts på provkroppar monterade i triaxialcell. Permeabilitetens beroende av härdningstid och packningsgrad har undersökts och antalet provningar på respektive restprodukt har angivits i tabellen.

## 5. BESKRIVNING AV ANVÄNDA FÖRSÖKSMETODER OCH DEFINITIONER

### 5.1 Bestämning av kemiska huvudkomponenter

Bestämningen av kemiska huvudbeståndsdelar har utförts av Cementa AB cemlab. Huvudbeståndsdelarna CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO och K<sub>2</sub>O har analyserats med röntgenspektrometer. Na<sub>2</sub>O har bestämts med atomabsorbtiionsspektrometer. Svavelhalten totalt (anges S<sub>TOT</sub>) har analyserats med en svavelanalysator, där provet förbränns och gasen från denna förbränning upptas i HCl och därefter titreras med KJO<sub>3</sub>.

SO har gravimetriskt fällts som BaSO<sub>4</sub> med BaCl<sub>2</sub>. Oxiderbart SO<sub>3</sub> bestäms genom återtitrering av överskott I<sub>2</sub>-lösning med Na<sub>2</sub>S<sub>3</sub>O<sub>3</sub>. Ca(OH)<sub>2</sub> har bestämts genom återtitrering av överskott socker med HCl.

### 5.2 Bestämning av specifik yta

Undersökningen har utförts av Cementa AB cemlab enligt Blainemetoden, enligt Svensk Cementstandard B1-1960 och enligt Lea & Nurse.

### 5.3 Bestämning av vattenkvot

Bestämningen har utförts enligt Svensk standard SIS 027116. Provgnstorkas i 105 C i minst 15 timmar. Vägning sker sedan efter avsvälning. Rökgasreningsprodukten innehåller oftast en del hydratiserat vatten som också kan avgå vid torkning i 105 C vilket i sin tur kan ge upphov till felaktigheter i bestämd vattenkvot. Kemiskt bundet vatten bör inte räknas in i vattenkvoten. Undersökningen har visat att felaktigheter i vattenkvoten kan anses försumbara för denna typ av undersökning. Vattenkvoten w har bestämts enligt sambandet  $w = \frac{\text{vattnets massa}}{\text{massa torrt prov}} \cdot 100$ .

#### 5.4 Bestämning av korndensitet

Bestämningen har utförts enligt Svensk standard SIS 027115. Korndensitet är det mått på densiteten hos enskilda beståndsdelar och bestämningen utförs med pyknometer 25-250 ml beroende på provets kornstorlek.

Korndensiteten bestäms enligt

$$\rho_k = \frac{m_1}{V_{pyk} - \frac{m_2 - m_3}{\rho_w}}$$

där

- $\rho_k$  = korndensitet
- $m_1$  = massan torkat prov
- $m_2$  = massan pyknometer med prov och vatten
- $m_3$  = massan pyknometer med torkat prov
- $\rho_w$  = vattnets densitet
- $V_{pyk}$  = pyknometerens volym

#### 5.5 Bestämning av kornfördelning

Bestämningen har utförts enligt Svensk standard SIS 027123 och SIS 027124. Siktning, våtsiktning och sedimentationsanalys erfordras för att bestämma fullständiga kornfördelningskurvor.

Prov dispergeras i vatten och hålls sedan på tvättsikt med maskvidd 0,063 mm och siktram  $\phi 400$  mm. Materialet tvättsiktas med hjälp av vattenspolning och pensling tills det genomströmmande vattnet är klart. Kvarstannar material på sikten omhändertas och torkas. Det torkade provet siktas sedan på siktarna (enligt ISO 565-72) 0,063, 0,125, 0,250, 0,500, 1, 2, 4, 8 och 20 mm. Kvarstannande mängder på varje sikt vägs och kumulativ kornfördelning beräknas och uppritas.

För att kornfördelningen för material  $<0,063$  mm skall kunna bestämmas utförs sedimentationsanalys. Vid sedimentations-

analys får ett uppslammat (mtrl <2 mm) (suspension) sedimentera i en vätska, vanligen bestående av destillerat vatten och dispergeringsmedel. Kornstorleken beräknas med hjälp av Stoke's lag ur kornens sjunkhastighet.

Under sedimentationen förändras densiteten hos suspensionen såväl med djupet som med tiden.

Försöket utförs med provmängd 50-100 g och material  $d < 2$  mm. I rapporten redovisade kurvor är mätta med den s k vågkroppsmetoden.

Vid försöken har inte dispergeringsmedel använts då materialen har en tendens att flockulera mer med dispergeringsmedel än utan förmodligen p g a förekomst av svavelföreningar.

För att beskriva karakteristisk kornstorlek används  $d$  och  $d_{10}$  och graderingstalet  $C_U$ . Med  $d_{10}$  och  $d_{60}$  menas den kornstorlek som kornfördelningskurvan skär vid 10 respektive 60%. Graderingstalet definieras som  $C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$

$C_U < 5$	ensgraderad
$C_U 5-15$	mellangraderad
$C_U > 15$	månggraderad

#### 5.6 Bestämning av packningsegenskaper

Bestämningen är utförd enligt Svensk standard SIS 027109 tung laboratoriestampning som internationellt närmast motsvaras av modifierad proctor och modifierad AASHO metod C.

Delprov av materialet tas ut. En bestämd vattenmängd tillsätts så att tänkt vattenkvot så nära som möjligt erhålls. Om ett litet överskott av vatten tillsätts kompenseras avdunstningen. Vattnet och materialet blandas mycket noggrant. Materialet fylls på i packningscylindern i fem lika lager. Varje lager packas 25 gånger med stampen (fallvikten).

Packningsstampen flyttas så att stampningen blir jämnt fördelad över hela ytan. Då femte lagret packas skall materialet nå upp i skarvcylindern. Skarvcylindern tas sedan av och materialet planas i nivå med packningscylinderns överkant. Material och provcylinder vägs. Materialet tas ur provcylindern, torkas vid 105°C och vägs varefter vattenkvoten beräknas. Torrdensitet för det packade materialet beräknas därefter enligt

$$\text{torrdensitet } \rho_d = \frac{\text{massa torrt material}}{\text{provcylinderns volym}} \quad \text{ton/m}^3$$

#### 5.6.1 Tillverkning av provkroppar

Provkroppar för bestämning av hållfasthet och permeabilitet har tillverkats enligt samma princip som för packningsförsök, men med en utrustning i mindre skala för att erhålla provkroppar med diametern 50 mm och höjden 100 mm. Utrustning i 2-delad mässingscylinder med innermått  $\phi 50$  mm, höjd 100 mm med skarvningcylinder, mässingsstamp  $\phi 25$ , vikt 1,5 kg.

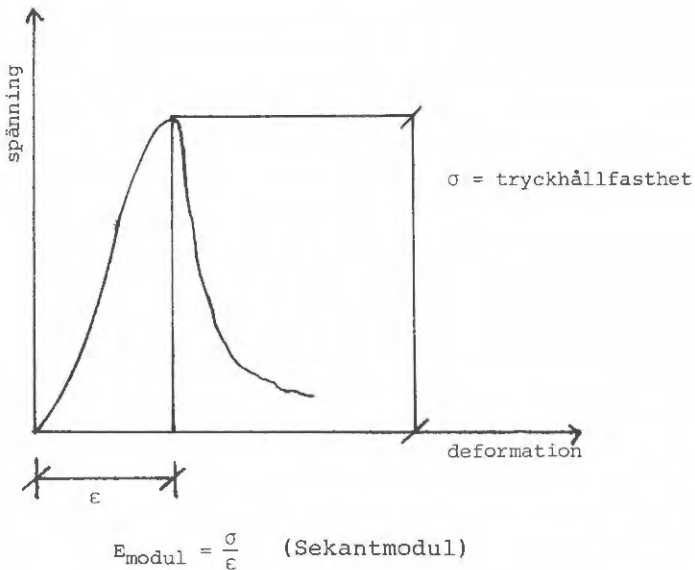
Provkroppar tillverkades med varierande densitet och vattenkvot enligt ett angivet schema. Vatten tillsätts en förutbestämd mängd material så att en viss vattenkvot erhålls. Efter noggrann inblandning packas 4 lager så att varje skikt erhåller eftersträvad densitet (packningsgrad). Efter att provet är färdigpackat delas mässingscylindern så att provet kan tas ut. Den färdiga provkroppen förpackas sedan i en plastpåse för att placeras i klimatrums (temp +7°C, relativ fuktighet 90%) tills förutbestämt provtagningsdatum inträder. Valda härdningstider är 1, 7, 28, 56 och 90 dygn.

#### 5.7 Bestämning av hållfasthet ur enaxliga tryckförsök

Enaxliga tryckförsök utförs med konstant deformationshastighet 0,5 mm/min med kontinuerlig registrering av spänningen.

Press: Wykeham & Farrance, 2 ton  
 Registreringsutrustning: X-Y-skrivare typ Farnell  
 Elektronisk kraftgivare för mätning av spänning  
 Elektronisk väggivare för mätning av deformation

Hållfastheten har bestämts i denna utrustning på provkroppar efter olika härdningstider med olika packningsgrader och vattenkvoter. Testade provkroppar är tillverkade enligt kap 5.6.1. Tryckhållfastheten och elasticitetsmodulen utvärderas enligt nedanstående figur.



#### 5.8 Bestämning av hållfasthet ur triaxialförsök

Två olika typer av försök har utförts, dels CIU-försök och dels CID-försök.

CIU = isotropt konsoliderade odränerade triaxialförsök

CID = isotropt konsoliderade dränerade triaxialförsök

Triaxialförsök är utförda på provkroppar tillverkade enligt kapitel 5.6.1.

Triaxialförsöken är utförda med konstant deformationshastighet 2 mm/timme och kontinuerlig registrering av vertikalspänning och portryck.

Spänningsnivåer vid vilka försöken är utförda är  $\sigma_3 = 30, 60$  och  $90$  kPa.

Utrustning: press typ Geonor Moscow  
 triaxialcell typ Geonor  
 elektroniska kraftgivare för mätning av vertikalspänning och portryck  
 elektronisk väggivare för mätning av deformation  
 dator för registrering av mätning från de olika givarna och för beräkning av försök  
 luftryckssystem används för applicerande av celltryck och s k back pressure.

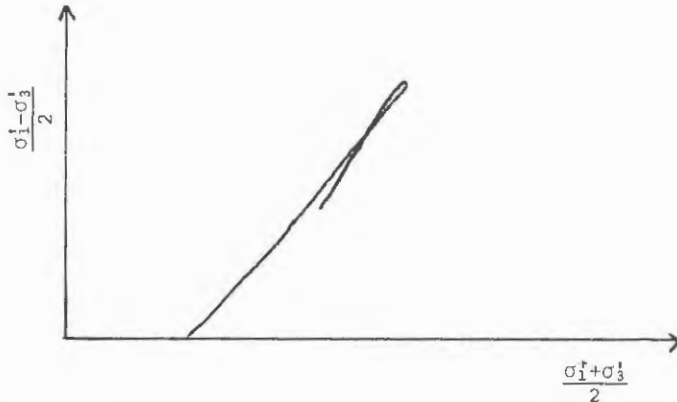
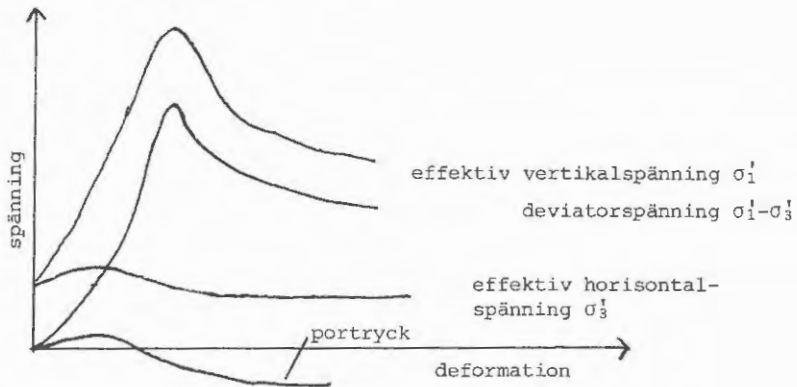
#### CIU-försök

Isotropt konsoliderade odränerade triaxialförsök

Provkropp med gummimembran placerad i triaxialcellen belastas isotropt genom ökning av celltryck till avsedd nivå. Ett s k back pressure ca 100 kPa påläggs för vattenmätning av provet. Celltrycket ökas med motsvarande belopp. Provet får konsolidera och vattenmättas under ett par timmer. Provet pressas sedan med konstant deformationshastighet 2 mm/timme under det att vertikalspänning, portryck och deformation registreras.

Följande principiella kurvor erhålls efter beräkning och bearbetning av resultaten.



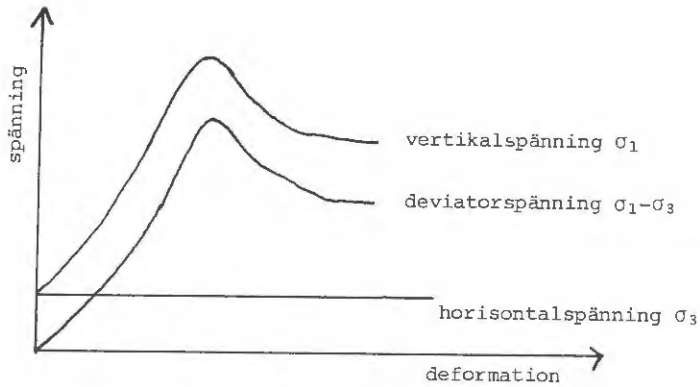


### CID-försök

Isotropt konsoliderade dränerade triaxialförsök

Provkropp med gummimembran placerad i triaxialcellen belastas isotropt genom ökning av celltryck till avsedd nivå. Provet får konsolidera utan vattenmätning. Provet har ej tillgång till vatten men kan dränera. Provet pressas med konstant deformationshastighet under det att vertikalspänning och deformation registreras.

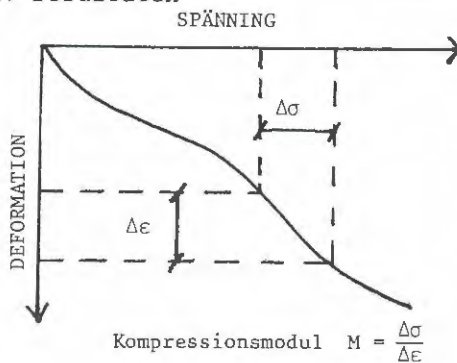
Följande principiella kurvor erhålls efter beräkning och bearbetning av resultaten.



### 5.9 Bestämning av deformationsegenskaper

Deformationsegenskaperna är bestämda enligt CRS-metoden, dvs kompression med konstant deformationshastighet 0,005 mm/min. Försöken är utförda i speciell ödometer av stål som klarar belastningar upp till 8000 kPa. Provet packas direkt i ödometerringen med diametern 75 mm till en provhöjd av 30 mm. Provet med ödometerringen förvaras sedan i kyl- och fuktrum tills avsett provningsdatum infaller. Spänning och deformation registreras med hjälp av elektroniska givare och datorutrustning.

Följande principiella kurvor erhålls efter beräkning och bearbetning av resultaten



### 5.10 Bestämning av permeabilitet

Permeabilitetsförsöken är utförda i en något modifierad triaxialutrustning. Fördelen med detta är att försöken kan utföras vid en kontrollerad spänningsnivå. Provkroppar tillverkade enligt 5.6.1 har använts till dessa försök. Provkropparna är alltså inpackade vid viss densitet och vattenkvot vilket innebär att de måste vattenmättas före permeabilitetsmätning.

Lufttryckssystem används för tryckapplicering. Proven har vattenmättats efter montering i triaxialapparaten. Horisontalspänningen (celltrycket) 60 kPa har bedömts vara en lämplig trycknivå vid permeabilitetsförsöken. Efter det att horisontalspänningen pålagts ökas trycket i en graderad kolonn med vatten (avlufat) upp till 20 kPa. Kolonnen står i förbindelse med provkroppen via ledningar. Vattnet fås då att strömma in genom provkroppens underdel och bildar en vattenmättad front som pressar den eventuella luften i provet mot provets överyta där vattnet också dräneras och upptas i ett mätglas. Detta pågår tills ingående vattenmängd är lika stor som utgående och inga luftblåsor är synliga i utgående ledningssystemet. Under mätningen efter vattenmättningsproceduren registreras tiden i sek för en viss volym genomströmmad vattenmängd. Ytterligare kontroll av vattenmätningen kan göras under mätningen genom att studera beräknad permeabilitet. Ökar permeabiliteten från mättillfälle till mättillfälle kan man anta att provet ej är vattenmättat.

Beräkning av permeabilitetsförsök utförda med konstant tryckhöjd utförs sedan enligt sambandet

$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot t \cdot h} \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

där

k = permeabilitet, m/s

Q = genomströmmad vattenmängd, cm<sup>3</sup> under tiden t

l = provets höjd, cm

A = provets tvärsnittsarea, cm

t = tid för genomströmning av vattenmängd Q, sek

h = tryckhöjd från vattenbehållarens vattenyta och provets överyta, cm

#### 5.11 Bestämning av temperaturens inverkan på hållfastheten

Provkroppar tillverkade enligt kap 5.6.1 har använts för bestämning av sambandet mellan hållfasthetstillväxt och härdningstemperatur.

De olika härdningstemperaturerna har satts till 7, 20, 40 och 60°C. Enaxliga tryckförsök enligt kap 5.7 har utförts efter härdningstiden 7 dygn för samtliga härdningstemperaturer. Packade provkroppar har omgivits med aluminiumfolie och plast för att undvika avdunstning av vatten. Provet har sedan placerats i ugn inställd på avsedd härdningstemperatur under 6 dygn. Därefter har hållfasthetsbestämning utförts.

## 6. RESULTAT FRÅN UNDERSÖKNINGAR AV FLYGASKA

### 6.0 Allmänt

Flygaska är det avfall från förbränning som avgår med rökgaserna. Askan filtreras ur rökgaserna ofta i flera steg för att erhålla en bättre avskiljningsgrad. De vanligaste filtermetoderna är elektrofilter, spärrfilter och cykloner.

Flygaska från koleldade kraftverk är oftast en produkt som i torrt tillstånd kan jämföras med ett friktionärt jordmaterial med samma korngradering. Men flygaska skiljer sig från jordmaterial efter packning och vattentillsats genom att hårdna med tiden och ge en ökad hållfasthet. Alla flygaskor uppvisar inte denna puzzolanska effekt. Flygaskornas egenskaper varierar bl a med kolkvalitet, kolets kornstorlek efter malningen och förbränningsteknik. Askan tas ut ur verken på flera olika sätt. Vanligast är dock att askan konditionerar, dvs 10-15% vatten tillsätts för att öka hanterbarheten. Även helt torr respektive uppslammad utmatning sker.

I detta kapitel kommer undersökningarna av flygaskor från några kolkraftverk och ett oljekraftverk att behandlas.

### 6.1 Kemiska huvudkomponenter

Flygaskans kemiska innehåll varierar med kolets kvalitet, sammansättning och förbränningsteknik. De dominerande beståndsdelarna är silikat, aluminiumoxid, järnoxid, kalciumoxid och oförbränt kol. Dessa är också av mycket stor betydelse för flygaskornas egenskaper. De viktigaste kemiska parametrarna för flygaskorna är halten  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  och halten oförbränt. De påverkar materialens packnings- och puzzolanska egenskaper. I Tabell 6.1:1 kan man utläsa halten  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 75-83\%$  och oförbränt kol = 0,9-3,6% för kolpulveraskorna från Asnaes, Ingå och Wilhelmshafen.

Motsvarande värden för de undersökta wanderrostaskorna är  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 44-47\%$ , oförbränt kol =  $25-33\%$  vilket är betydligt lägre respektive högre värden än för kolpulveraskor och ligger dessutom i en nivå där materialens egenskaper beräknas att försämrats något. Framför allt betyder de höga halterna oförbränt kol mycket i detta hänseende. Den höga halten oförbränt vid wanderrostförbränning beror troligtvis på det inmatade kolets kornstorlek och dålig förbränningseffektivitet. Halten kalk i kolaskor är också en väsentlig kemisk parameter, som påverkar askornas hållfasthet. Halterna  $\text{CaO} = 3,3-6,1\%$  angivna i Tabell 6.1:1 för kolaskorna är inte relevanta för halten fri kalk. Halten fri kalk för undersökta kolaskor beräknas ligga långt under de angivna värdena men detta har tyvärr ej analyserats. Den totala svavelhalten varierar i kolaskorna mellan  $0,1\%$  och  $0,4\%$  vilket är en förhållandevis låg nivå.

Tabell 6.1:1. Kemiska huvudbeståndsdelar hos flygaskor från olika kolförbränningsanläggningar och en oljeförbränningsanläggning i Uppsala. Siffrorna är i procent.

	flygaska Asnaes	flygaska Ingå	flygaska Norrköping	flygaska Perstorp	flygaska Uppsala	flygaska Wilhelmshafen
glödnings- förlust	3,3	3,6	25	33	65	0,9
CaO	5,4	3,3	6,1	5,9	0,8	4,0
$\text{SiO}_2$	49	53	32	30	1,9	53
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	8,0	7,0	10	7,9	2,7	5,3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	26	23	15	14	0,4	30
MgO	2,2	1,7	3,3	3,1	0,4	1,1
$\text{K}_2\text{O}$	2,0	2,4	1,6	1,5	0,1	1,9
$\text{Na}_2\text{O}$	0,8	0,7	1,2	0,5	3,7	0,2
S <sub>tot</sub>	0,4	0,2	0,4	0,3	6,8	0,1

Stora mängder  
Vanadin och  
Nickel ingår  
men har ej  
analyserats  
kvantitativt.

Flygaska från oljeförbränning skiljer sig helt från de övriga. Den innehåller inte samma huvudkomponenter och har mycket hög halt oförbränt och svavel. Den ger också vid lösning i vatten en mycket sur reaktion (pH ~1). Oljeaskan innehåller också stora mängder vanadin och nickel men dessa är ej analyserade kvantitativt, Tabell 6.1:1.

Färgen hos flygaskorna från kolpulverförbränning och oljeeldning är grå, medan den hos askorna från wanderrost är svart.

## 6.2 Mikrostruktur

Mikrostrukturen hos flygaskorna varierar beroende på bl a förbränningsteknik. Flygaskornas kornmorfologi i denna undersökning skiljer just i detta avseende. Kolpulveraskorna är genomgående sfäriska med enstaka inslag av korn med oregelbunden form. Wanderrostackorna däremot har huvudsakligen korn med oregelbunden form med inslag av sfäriska korn. Det inmatade kolets kornstorlek och förbränningstemperatur är av stor betydelse för bildandet av sfäriska korn och scenosfärer. Fig 6.2:1 - 6.2:4 visar exempel på kornmorfologin hos flygaskor från kolpulvereldning. I Fig 6.2:2 syns en uppsprucken scenosfär och i håligheten är andra sfäriska korn placerade. Fig 6.2:4 visar ett korn med oregelbunden form. Den typen av kornform kan sägas vara relativt ovanlig i kolpulveraskor. Den sfäriska kornformen hos flygaskorna från kolpulvereldning visar sig också genom att materialet "flyter" i torrt tillstånd.



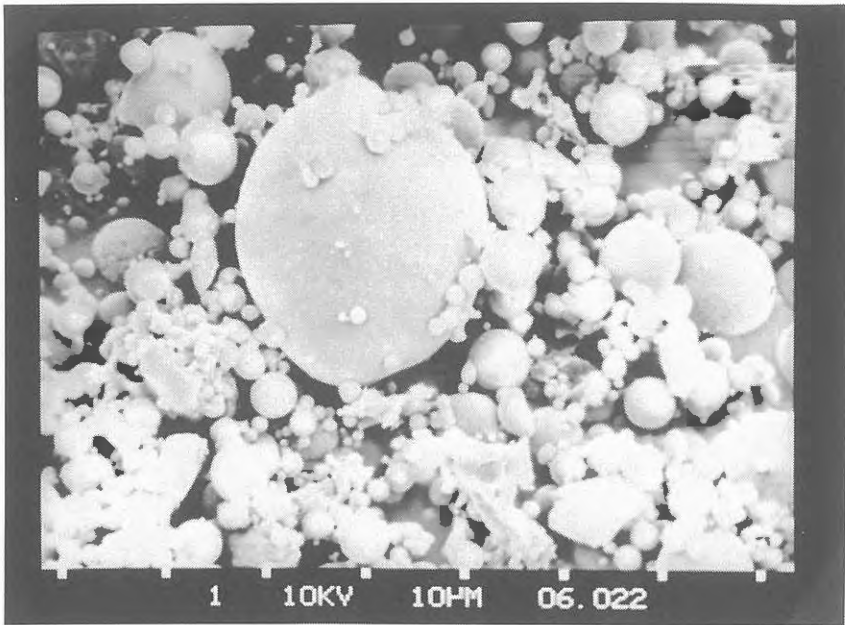


Fig 6.2:1. Mikrostruktur, flygaska från Asnaesverket (kolpulvereldning).

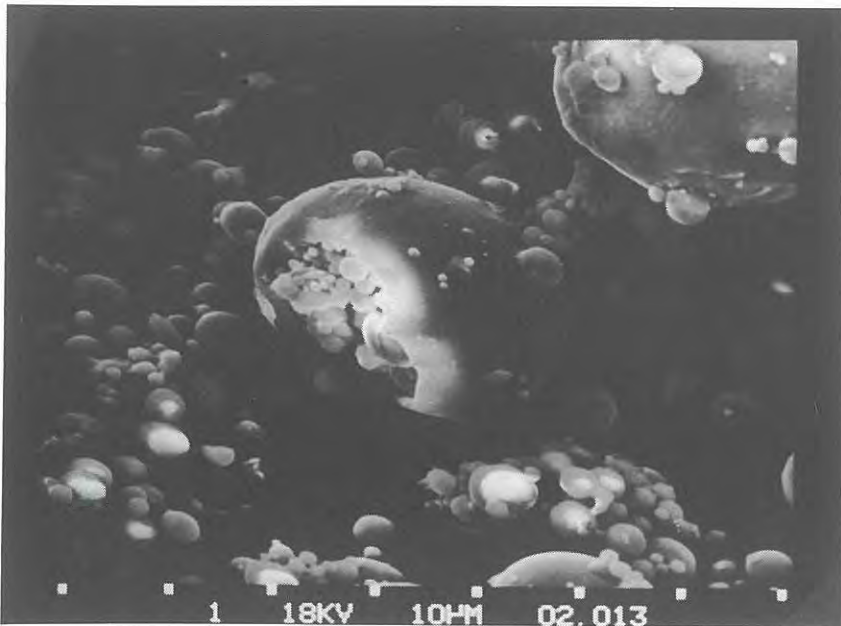


Fig 6.2:2. Mikrostruktur, flygaska från Ingåverket (kolpulvereldning).

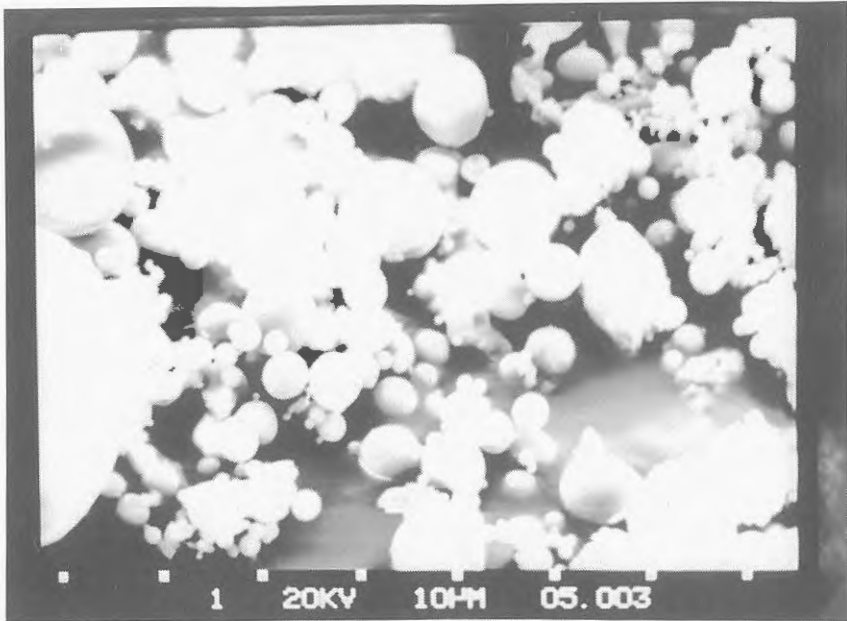


Fig 6.2:3. Mikrostruktur, flygaska från Wilhelmshafenverket (kolpulvereldning).

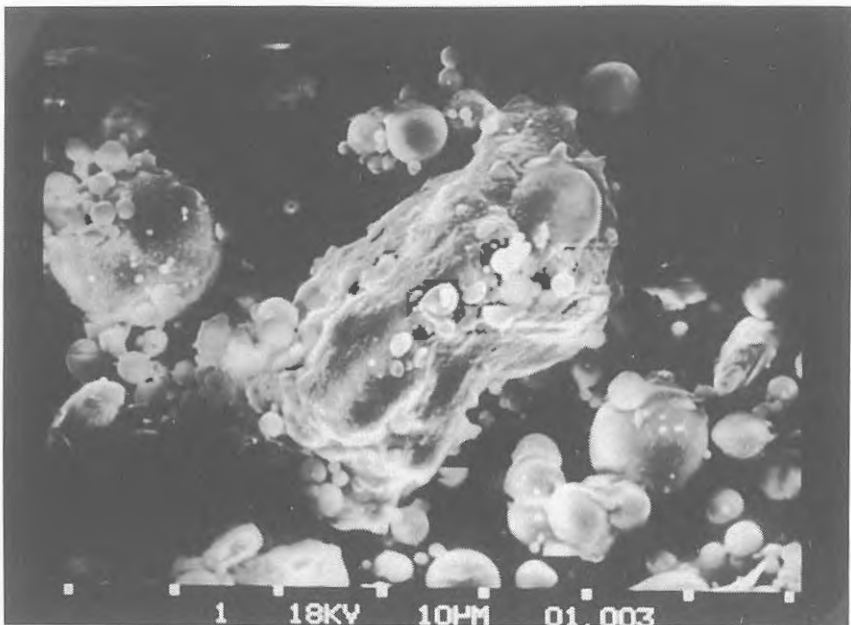


Fig 6.2:4. Icke sfärisk partikel i flygaska från Asnaesverket (kolpulvereldning).

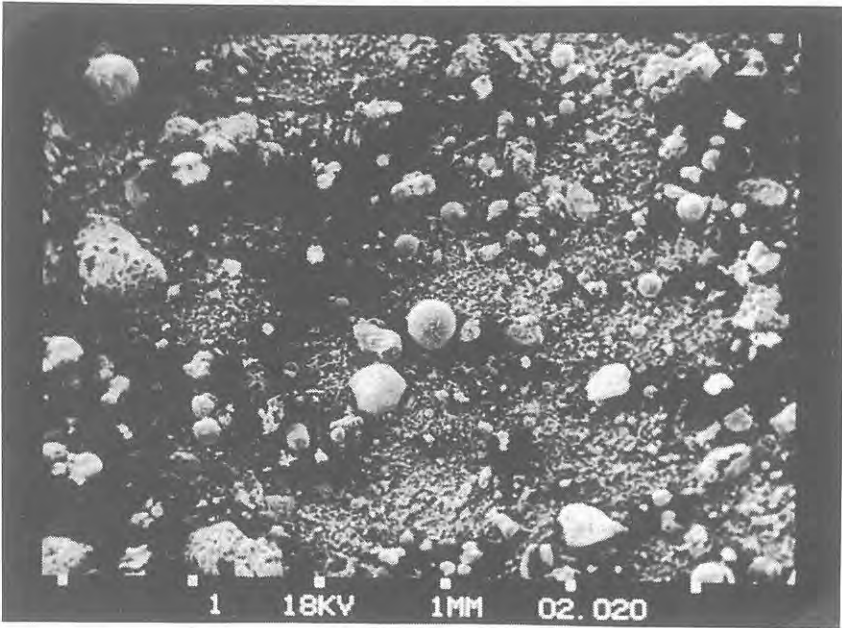


Fig 6.2:5. Mikrostruktur, flygaska från Norrköpingsverket  
(wanderrosteldning).

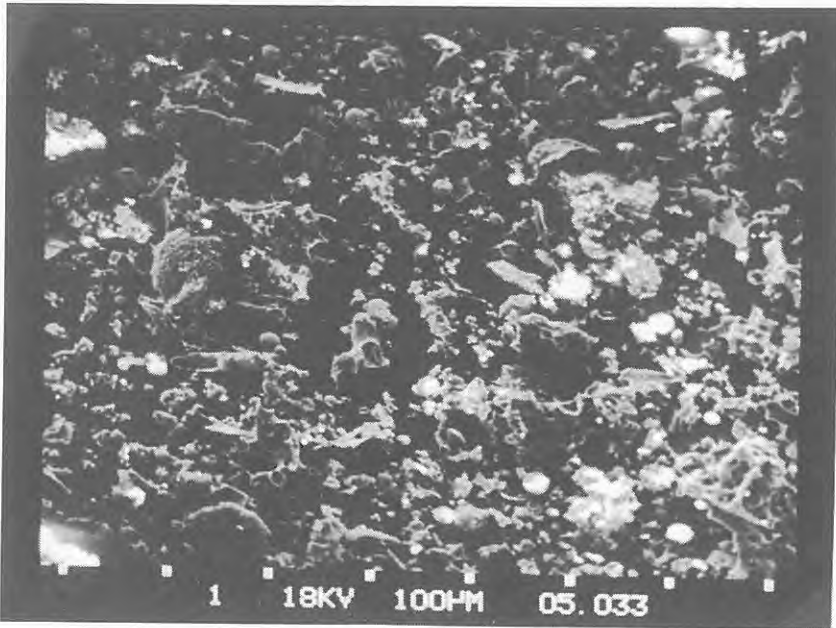


Fig 6.2:6. Mikrostruktur, flygaska från Perstorpsverket  
(wanderrosteldning).

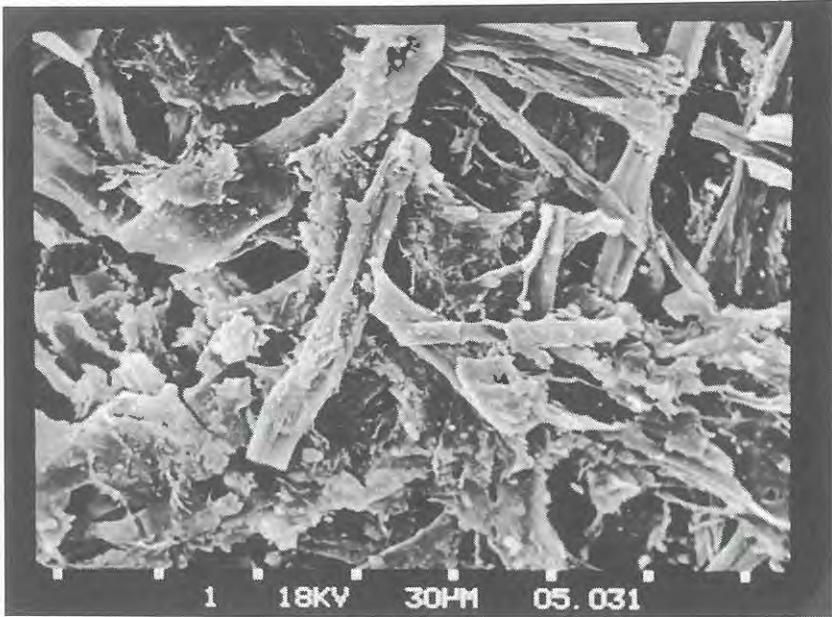


Fig 6.2:7. Fibrös struktur hos partikel i flygaska från Perstorp (wanderrosteldning).

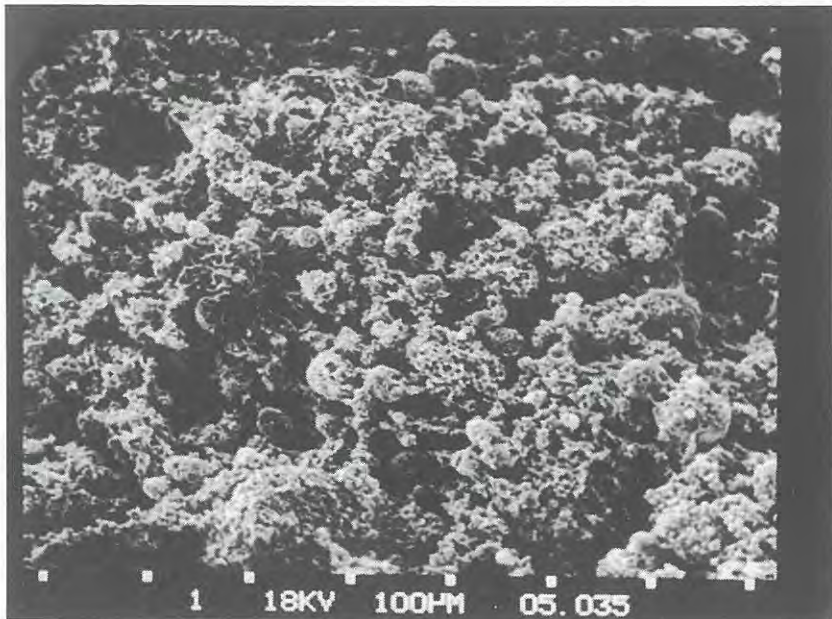


Fig 6.2:8. Mikrostruktur, flygaska från oljeeldat kraftverk, Uppsala (wanderrosteldning).



Fig 6.2:5 - 6.2:7 visar exempel på kornmorfologi hos flygaskor från wanderrosteldning där oregelbunden kornstruktur är dominerande. Typiskt för de sfäriska kornen hos wanderrostaska är att de är delvis täckta med tunna flagor. Wanderrostaskorna i denna undersökning har hög halt oförbränt material. I Fig 6.2:7 syns ett oförbränt kolkorn med fibrös struktur.

Fig 6.2:8 visar mikrostrukturer hos askan från oljeförbränning. Ingen speciell kornstruktur framträder utan materialet uppvisar en kompakt amorf struktur.

### 6.3 Allmänna tekniska egenskaper

Kornfördelningen för undersökta askor från kolpulveranläggningarna Asnaes, Ingå och Wilhelmshafen håller sig huvudsakligen inom siltfraktion där kornstorleken  $d_{10}$  för dessa askor är 4, 3 resp 20  $\mu\text{m}$ . Askan från Wilhelmshafen avviker från de övriga genom att vara mycket ensgraderad, graderingstalet  $C_U = 1,5$ . Materialen från Norrköping och Børstorp (Wanderrost) har något grövre kornfördelning än kolpulveraskorna och fördelar sig mer som en siltig sand och där  $d_{10}$  är 10 resp 30  $\mu\text{m}$ , se Fig 6.3:1. Den grövre kornfördelningen kan härledas till att kolet inte är lika finmalet vid wanderrostförbränning. I övrigt är samtliga askor utom Wilhelmshafen mellangraderade,  $C_U = 5-15$ . Flygaskan från oljekraftverket i Uppsala avviker vid kornfördelningen mycket från de övriga. Materialet är mycket finkornigt men analysen är osäker beroende på flockulering vid sedimentationsförsöket.

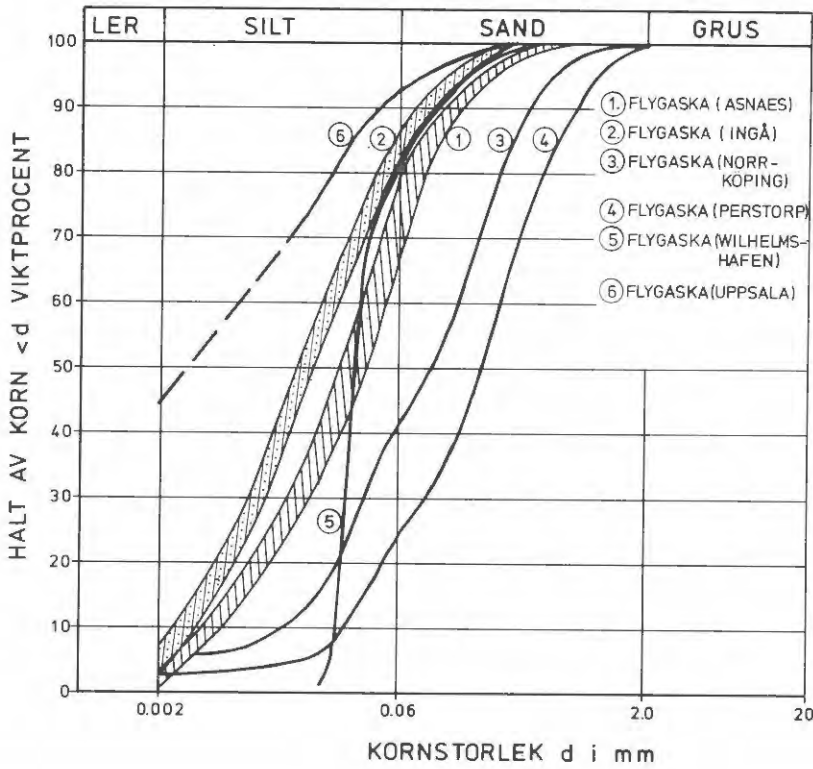


Fig 6.3:1. Kornfördelning hos flygaskor från olika kolförbränningsanläggningar och flygaska från oljeförbränning.

Bestämning av kornfördelning för askor uttagna från olika steg i elektrofiltreringen i Asnaesverket har utförts. Resultaten är redoviasde i Fig 6.3:2. Diagrammet visar att askan blir finare för varje steg. Eftersom den största mängden, 85%, aska tas ut i det första steget motsvaras närmast dess kornfördelning av den s k slutliga askan som är en sammanslagning från de tre filtren. Mängden hos andra och tredje steget är 10 respektive 5%.

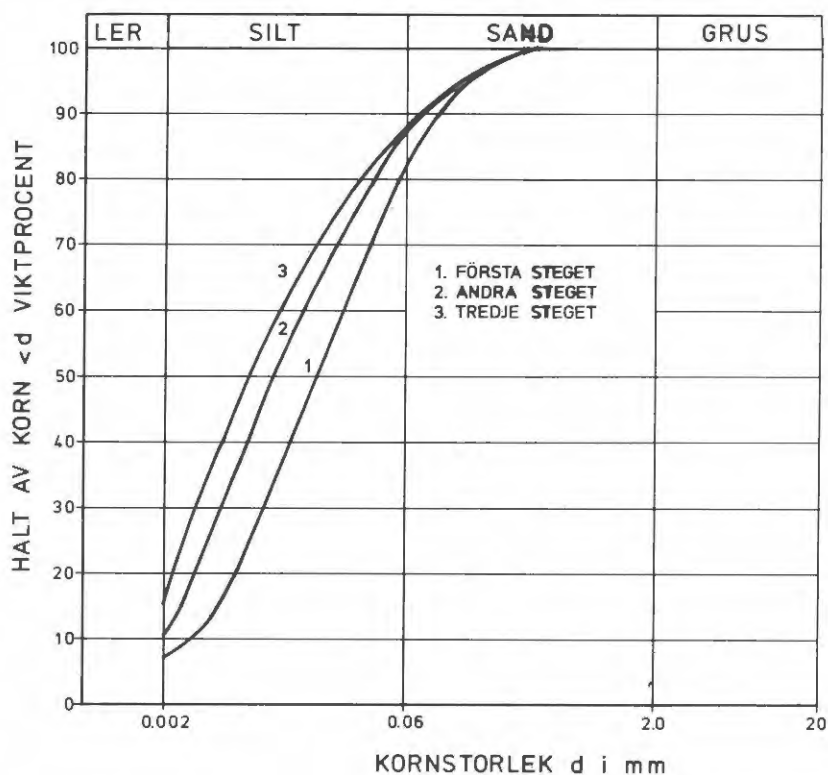


Fig 6.3:2. Kornfördelningen för flygaskor från olika elektrofilter, Asnaesverket.

Korn med hålrum o dyl som kunde ses i mikrobilderna i Fig 6.2:5-6.2:8, finns det effekter av vid bestämning av korndensiteten. Ingå och Perstorp har också lägre korndensitet, 2170-2220 kg/m<sup>3</sup>. Wilhelmshafen anges med värden på denna nivå men där framträder inte någon bildning av scenosfärer eller andra korn med hålrum. Samtliga korndensiteter 2170-2410 kg/m<sup>3</sup> för flygaskorna från kolförbränning ligger klart under motsvarande för jordmaterial som är ca 2800 kg/m<sup>3</sup>. Flygaskan från oljeförbränning avviker kraftigt från kolaskornas korndensitet, vilket är sannolikt med denna askas mikrostruktur och kemiska innehåll. Vad gäller vattenkvoterna kan det nämnas att värdena för Norrköping och Perstorp betyder att materialet kan vara något hygroskopiskt, Tabell 6.3:1.

I Tabell 6.3:1 visas glödgningsförlust eller halt oförbränt som även är kommenterad i kapitel 6.1. Variationerna är stora även mellan de olika bestämningarna i samma material. De relativt höga halterna för Norrköping respektive Perstorp 15-40% påverkar askornas egenskaper vilket kommer att behandlas vidare under kapitel hållfasthet. Värdena på halten oförbränt för de övriga kolaskorna, 0,7-4%, kan sägas ligga på en mycket rimlig nivå. Den mycket höga glödgningsförlusten för oljeaskan från Uppsala har inte fullständigt kunnat tolkas men en del beror av bortgången av svavel-dioxid vid glödgningen.

Tabell 6.3:1. Allmänna egenskapsparametrar hos flygaskor från olika kolförbränningsanläggningar. Flygaska från Uppsala kommer från oljeförbränning.

	flygaska Asnaes	flygaska Ingå	flygaska Norrköping	flygaska Perstorp	flygaska Uppsala	flygaska Wilhelmshafen
glödgnings- förlust %	1,4-3,3	3,4-3,6	19,6-25,4	14,9-39,7	63,7-65	0,73-0,86
vatten- kvot %	0	0,1	1,7	1,9	0	0,2
korn- densitet kg/m <sup>3</sup>	2260-2290	2180-2220	2370-2410	2170-2190	2730-2770	2200-2210
specifik yta m <sup>2</sup> /kg	539	298	-	-	-	270

Specifika ytan som visas i Tabell 6.3:1 har inte kunnat bestämmas på samtliga askor p g a deras grovkornighet. För Asnaes, Ingå och Wilhelmshafen där bestämningar har utförts ligger resultaten 270-539 m<sup>2</sup>/kg inom den nivån som kan anses normalt för flygaskor från kolpulvereldning.

Tabell 6.3:2 visar allmänna tekniska parametrar från askorna från de olika filtreringsstegen i Asnaesverket. Här kan man konstatera att specifika ytan ökar med ökad halt finare partiklar, se också Fig 6.3:2 där det framgår att askan blir finare i varje filtreringssteg.



Tabell 6.3:2. Allmänna parametrar från filtreringsstegen 1-3 i Asnaesverket.

	flygaska från olika elektrofilter		
	flygaska steg 1	flygaska steg 2	flygaska steg 3
glödgningsförlust %	1,2-1,7	1,8-3,0	2,0-3,1
vattenkvot %	0	0,2	0,2
korn-densitet kg/m <sup>3</sup>	2310	2380	2380
specifik yta m <sup>2</sup> /kg	315	452	572

Det bör nämnas att någon jämförelse mellan slutaskan och askorna från de olika filtreringsstegen i Asnaesverket inte kan göras då dessa är provtagna vid olika tillfällen.

#### 6.4 Packningsegenskaper

Den optimala vattenkvoten varierar mellan 17 och 20% för samtliga undersökta flygaskor. Egenskaperna för askorna från kolpulverledning (Asnaes, Ingå, Wilhelmshafen) avseende maximal torrdensitet efter tung laboratoriestampning enligt kapitel 5.6 är mycket lika. I Fig 6.4:1 kan man se att samtliga ligger på en nivå omkring 1,4 t/m<sup>3</sup>. Noterbart är att den optimala vattenkvoten ligger relativt långt ifrån vattenmättnadsgränsen, ca 8% lägre, vilket inte är normalt för jordmaterial. Detta förhållande ökar då man ser på torrdensiteterna för Norrköping och Perstorp, som har lägre maximala torrdensiteter, 1,28 t/m<sup>3</sup> respektive 0,99 t/m<sup>3</sup>. Skillnad mellan optimal vattenkvot och vattenmättnadsgräns för Perstorp är så stor som 36%. De låga värdena på torrdensitet, som erhållits för Norrköping respektive Perstorp, kan härledas till materialets kornstruktur, kantiga korn med hålrum. Det framgår av mikrobilderna att för Perstorps-

askan är denna kornstruktur mer genomgående än för Norrköpingsaskan, vilket också bekräftar av den betydligt lägre torrdensiteten i Fig 6.4:1. Flygaskorna har över lag lägre maximal torrdensitet än ett motsvarande jordmaterial, vilket kan ha betydelse för användningen av produkten t ex som lättare fyllning.

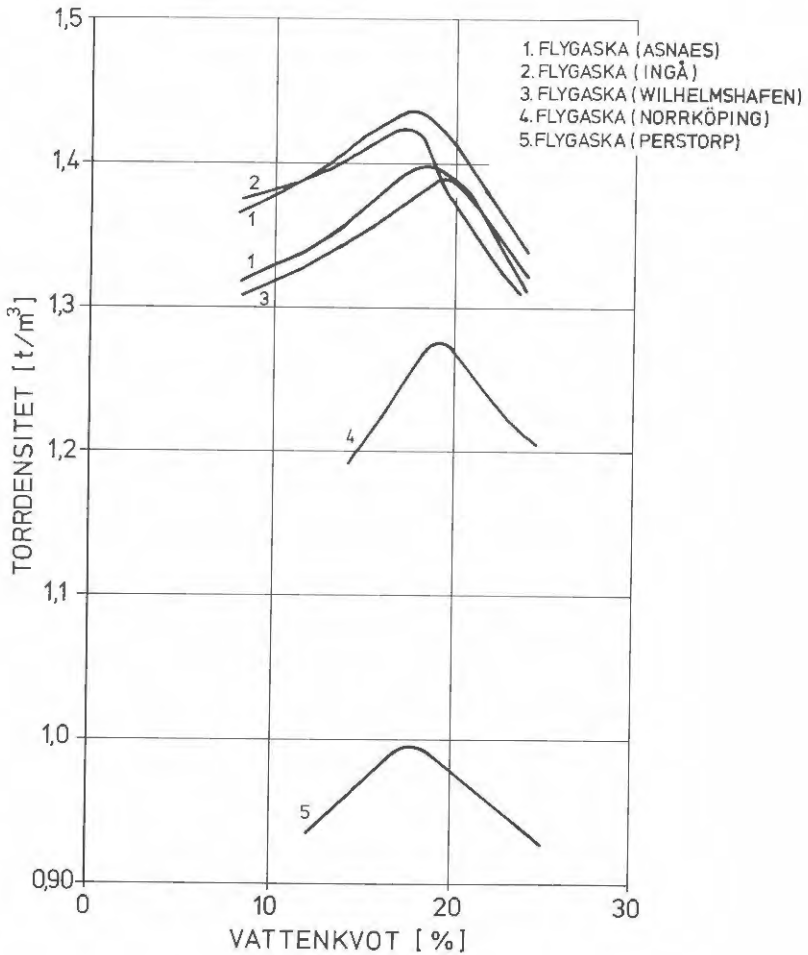


Fig 6.4:1. Packningsegenskaper för flygaskor från olika kol-förbränningsanläggningar.

Flygaskan från oljeförbränning, Uppsala, uppför sig mycket avvikande även ur packningshänseende, Tabell 6.4:1. Materialet kan ej undersökas på normalt sätt för bestämning av densiteten. Några försök att bestämma densiteten för detta material har ändå utförts. För samtliga tre bestämningar i Tabell 6.4:1 har askan ej kunnat packas medelst stampning utan har i stället pressats med handkraft. Någon jämförelse mellan packningsarbete och densitet har därför ej kunnat göras. Materialet har fått stå öppet med fritt lufttillträde i 2 veckor. En kraftig ökning av vattenkvoten har då skett och materialet har förändrat färg från grått till svart och dessutom blivit mycket kladdigt. Ökningen av vattenkvoten, till 0~35%, tolkas som att askan är hygroskopisk.

Tabell 6.4:1. Variationer på densitet hos flygaska från oljeförbränning, Uppsala.

	skrymdensitet t/m <sup>3</sup>	torrdensitet t/m <sup>3</sup>
material torkat 105°C stått 2 veckor med fritt lufttillträde kladdigt, svart färg	1,28	0,95
ej torkat stått 2 veckor med fritt lufttillträde kladdigt, svart färg	1,45	1,13
direkt ur förvaring utan lufttillträde ljusgrå färg	0,74	0,74

## 6.5 Hållfasthets- och deformationsegenskaper

## 6.5.1 Enaxliga tryckförsök

På flygaska från kolpulvereldade anläggningen vid Asnaesverket i Danmark har en omfattande försöksserie med enaxliga tryckförsök utförts. Dessutom har mindre försöksserier utförts på flygaska från två olika wanderrostanläggningar nämligen Norrköping och Perstorp och på flygaska från kolpulvereldning vid Wilhelmshafen i Västtyskland. Provkroppar som var 100 mm höga och 50 mm i diameter preparerades som beskrivits i kapitel 5.6.1.

Två typiska resultat från enaxligt tryckförsök på flygaska visas i Figur 6.5.1:1. Ur detta kraft-deformationssamband utvärderades maximal tryckhållfasthet och elasticitetsmodul enligt förfarande som beskrivits i kapitel 5.7.

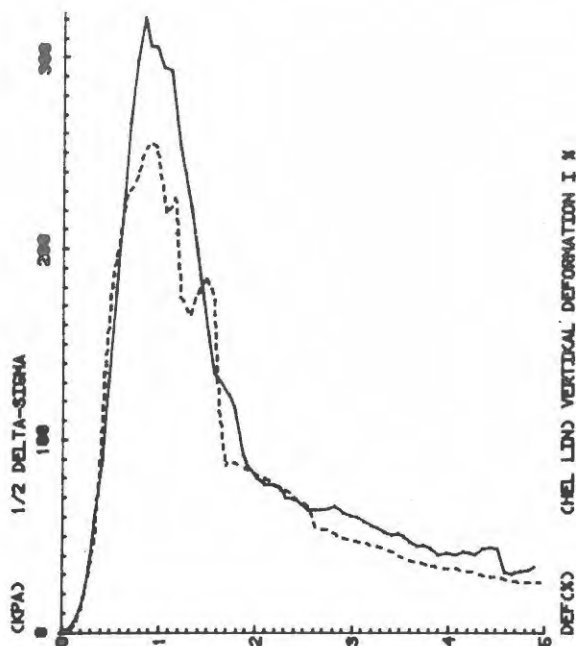


Fig 6.5.1:1. Typiska kraft-deformationsförlopp erhållna vid enaxliga tryckförsök på flygaska.

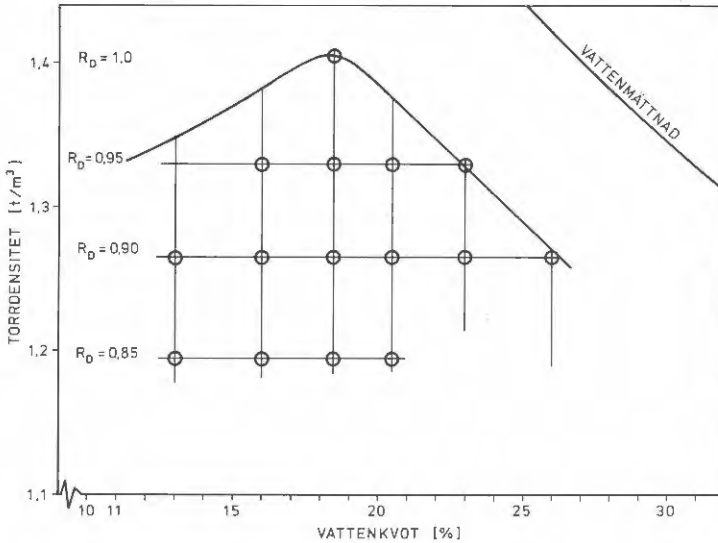


Fig 6.5.1:2. Packningskurva för flygaska från Asnaes med försökspunkter för enaxliga tryckförsök inlagda.

Totalt utfördes 152 enaxliga tryckförsök på flygaska från Asnaesverket. På grund av medelvärdesbildning av dubbelförsök resulterade detta i hälften, dvs 76 observationer med vardera 6 parametrar nämligen packningsgrad, härdningstid, vattenkvot, tryckhållfasthet, densitet och elasticitetsmodul.

På flygaskor från Norrköping, Perstorp och Wilhelmshafen utfördes en serie på 10 försök vid en och samma packningsgrad (0,90) och vid varierande härdningstid.

I Figur 6.5.1:3 visas för flygaska från Asnaesverket tryckhållfastheten som funktion av tiden vid packningsgraden 0,90. Av figuren framgår att askan har en hållfasthetsökning med härdningstiden, dvs en puzzolansk effekt föreligger. Det framgår också att den största hållfasthetsökningen inträffar under de första 28 dygnen. Därefter är hållfasthetstillväxten

ringa .

Den spridning i försöksresultat som framgår av figuren är en effekt av olika vattenkvot och att provkropparna ej är helt identiskt preparerade.

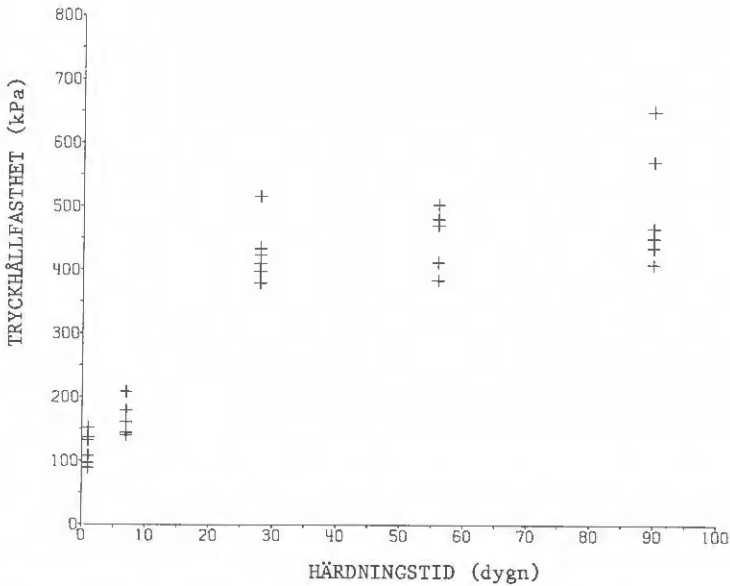


Fig 6.5.1:3. Tryckhållfasthetstillväxten med tider, vid packningsgraden 0,90 för flygaska från Asnaes.

Motsvarande samband finns för de olika packningsgraderna i figur 6.5.1:4 som visar medelkurvan för var och en av de i undersökningen förekommande packningsgraderna. Av figuren framgår att tryckhållfastheten ökar med ökande packningsgrad. Således är hållfastheten ca 300 kPa efter 28 dygn vid 0,85 packningsgrad medan vid 0,90 är den ca 400 kPa, dvs 33% ökning.

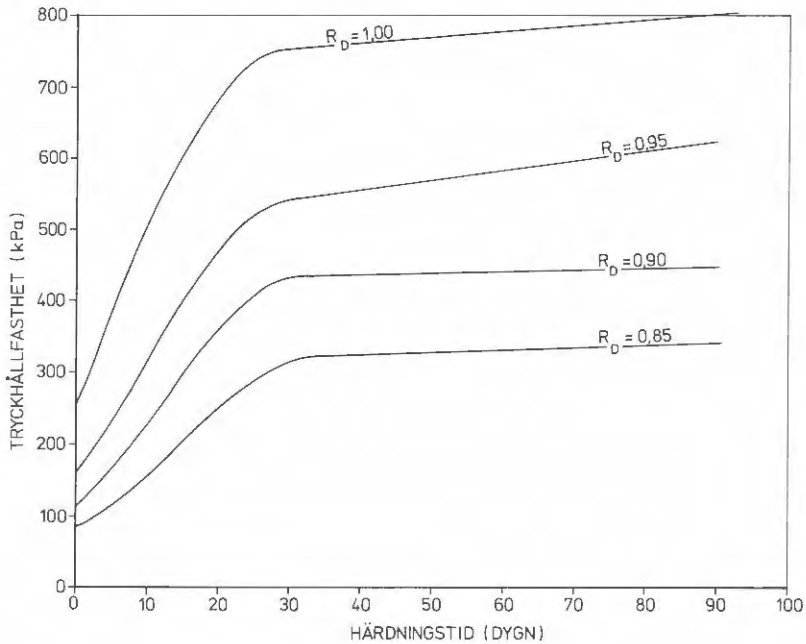


Fig 6.5.1:4. Tryckhållfastheten som funktion av härdningstid och packningsgrad för flygaska från Asnaes.

Förutom härdningstidens och packningsgradens inverkan på hållfastheten har också inverkan av vattenkvoten studerats. I figur 6.5.1:5 visas tryckhållfastheten som funktion av vattenkvoten vid packningsgraden 0,90. Av figuren framgår att hållfastheten är litet beroende av vattenkvoten i intervallet 12-28% även om en tendens finns till minskad tryckhållfasthet med ökande vattenkvot.

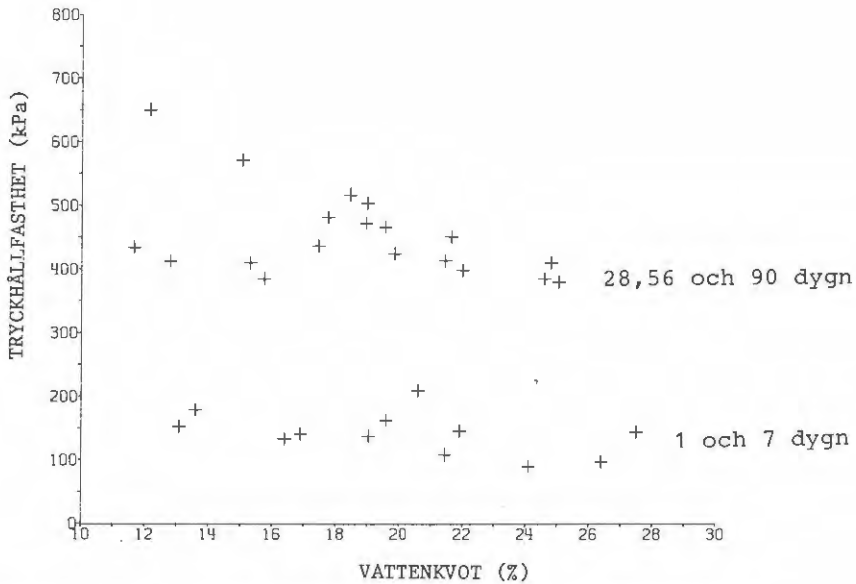


Fig 6.5.1:5. Tryckhållfastheten som funktion av vattenkvoten vid packningsgraden 0,90 för flygaska från Asnaes.

De två grupperingar av punkter som framgår i figur 6.5.1:5 är samma sak som syns i figur 6.5.1:3, nämligen att den undre gruppen är tryckhållfastheten efter 1 eller 7 dygn och den övre representerar hållfastheten efter 28, 56 eller 90 dygn. Detta innebär som tidigare nämnts att tryckhållfasthetsökningen sker inom de första 28 dygnen varefter den nära nog är konstant.

Ett annat sätt att redovisa sambanden enligt figur 6.5.1:3 och 4 är visat i figur 6.5.1:6.



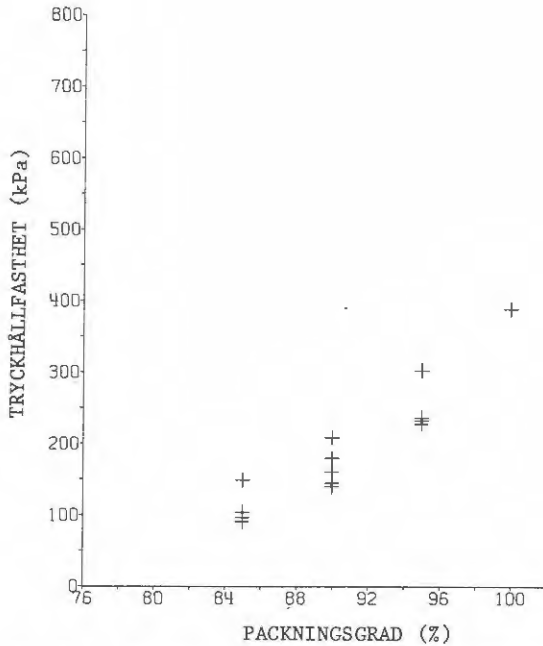


Fig 6.5.1:6. Tryckhållfastheten som funktion av packningsgraden efter 7 dygns härdningstid för flygaska från Asnaes.

Av figuren framgår att tryckhållfasthetstillväxten visar en tendens till att öka med ökande packningsgrad. Detta är en effekt av att vid tätare packning är antal kornkontakter större. I figur 6.5.1:7 visas medellinjerna av samma samband för olika härdningstider och där framgår att vid längre härdningstid är hållfastheten mer beroende av packningsgraden än vid kortare härdningstid.

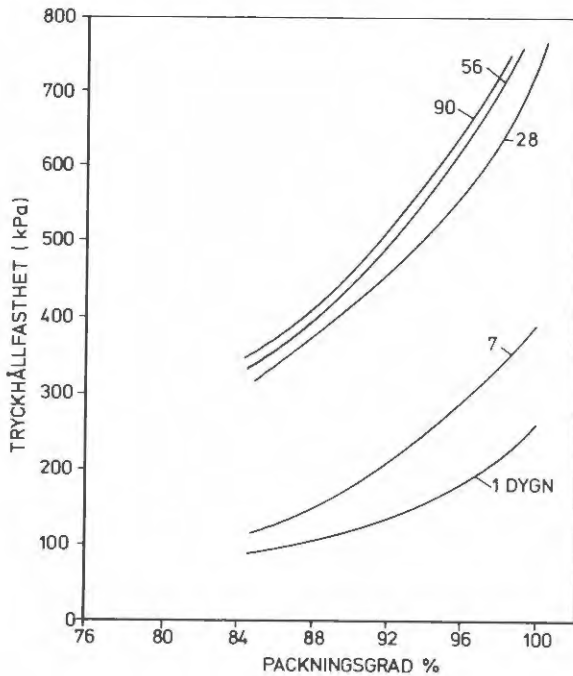


Fig 6.5.1:7. Hållfastheten som funktion av packningsgrad och härdningstid för flygaska från Asnaesverket.

En statistisk bearbetning av tryckhållfastheten som funktion av logaritmen för härdningstiden och packningsgraden har utförts. Det samband som erhöles med multipelregressionsanalys framgår av ekvation (1). Det erhålls med en multipelkorrelationskoefficient på 0,93 och signifikansen 99,5%.

$$\sigma = 212,3 \log (t) + 21,6 R_D - 1861 \quad (1)$$

där  $\sigma$  = tryckhållfastheten i kPa

$t$  = härdningstid i dygn

$R_D$  = packningsgrad i %

Ekvation (1) är det statistiska samband som också framgår av figur 6.5.1:7. Det skall framhållas att denna ekvation endast gäller för den undersökta askan från Asnaes i

intervallen  $R_D = 0,85-1,00$  och  $t = 1-90$  dygn men att förmodligen skulle sambandet gälla för andra flygaskor med andra konstanter.

Ur de enaxliga tryckförsöken har elasticitetsmodulen utvärderats. Samband mellan denna och tryckhållfastheten framgår av figur 6.5.1:8.

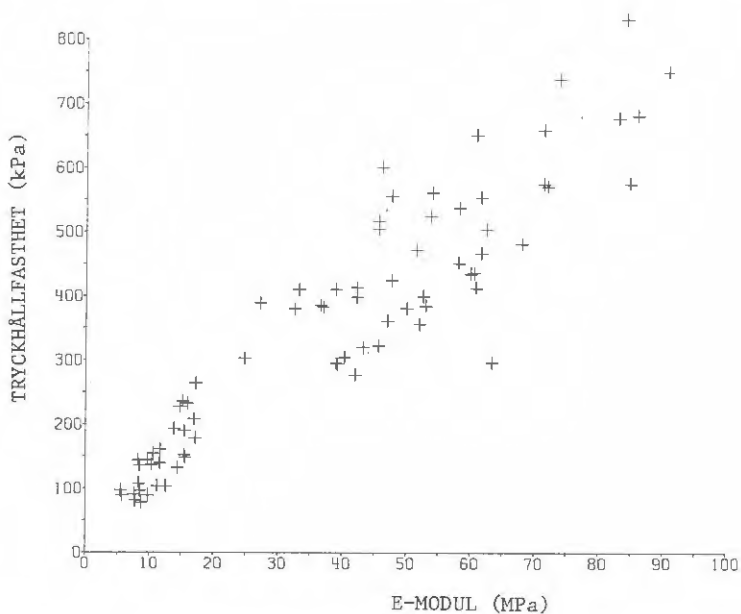


Fig 6.5.1:8. Hållfastheten som funktion av elasticitetsmodulen.

Av figuren framgår att E-modulen är linjärt beroende av hållfastheten. Dock är beroendet olika med hänsyn till vilket intervall man studerar. Vid en elasticitetsmodul på mindre än 20 MPa finns ett linjärt samband och över 20 MPa ett annat. Dessutom är spridningen större i det senare intervallet. Ett närmare studium av gränsen 20 MPa visar att samtliga punkter där representerar härdningstider på 7 dygn och mindre. Den större spridningen i det övre intervallet beror sannolikt på att brotten vid provning är betydligt sprödare här än i det lägre intervallet. Relationen mellan E-modul och tryck-

hållfasthet över 7 dygns härdningstid kan approximeras till att E-modulen är 100 ggr tryckhållfastheten-

På flygaska från Wilhelmshafen har en mindre försöksserie med enaxliga tryckförsök utförts. Provkroppar inpackades till  $R_D = 0,90$  vid optimal vattenkvot och härdades mellan 1 och 90 dygn. Två provningar utfördes vid varje härdningstid. I figur 6.5.1:9 visas tryckhållfastheten som funktion av härdningstiden. I princip visar figuren samma typ av

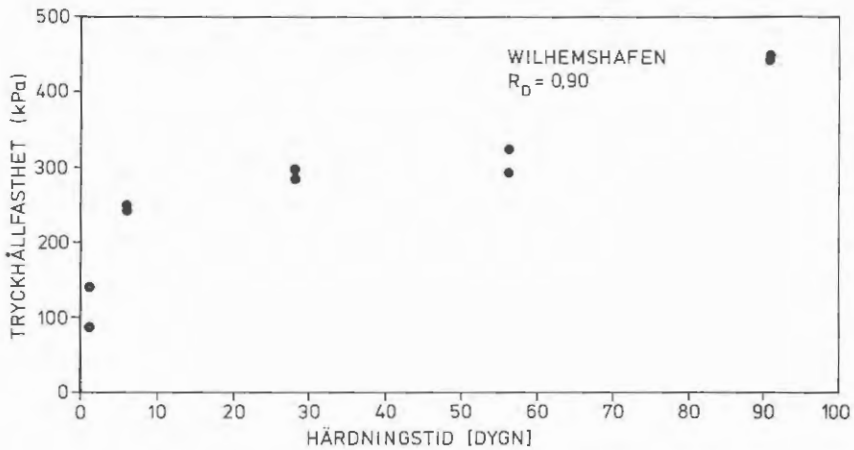


Fig 6.5.1:9. Tryckhållfastheten som funktion av härdningstiden vid  $R_D = 0,90$  och optimal vattenkvot för flygaska från Wilhelmshafen.

samband som ovan redovisats för Asnaesaskan. Emellertid framgår det att härdningshastigheten är större för denna aska och det förefaller som om härdningen skjuter ny fart efter 56 dygn. Dock är denna sista tendens osäker på grund av försöksmaterialets ringa omfattning.

En mera begränsad provning av enaxlig tryckhållfasthet har utförts på två flygaskor från wanderrostledning. Provkroppar från dessa flygaskor preparerades vid optimal vattenkvot och packningsgraden 0,90, dvs det packningskrav som man normalt eftersträvar i en fyllning av jordmaterial. Härdningstiden

varierade mellan 1 och 90 dygn och två provningar utfördes vid varje tidpunkt. I Figur 6.5.1:10 redovisas tryckhållfasthetens utveckling med härdningstiden. Av figuren framgår att askan från Norrköping visar en hållfasthetsökning med tiden vilket inte är fallet för askan från Perstorp.

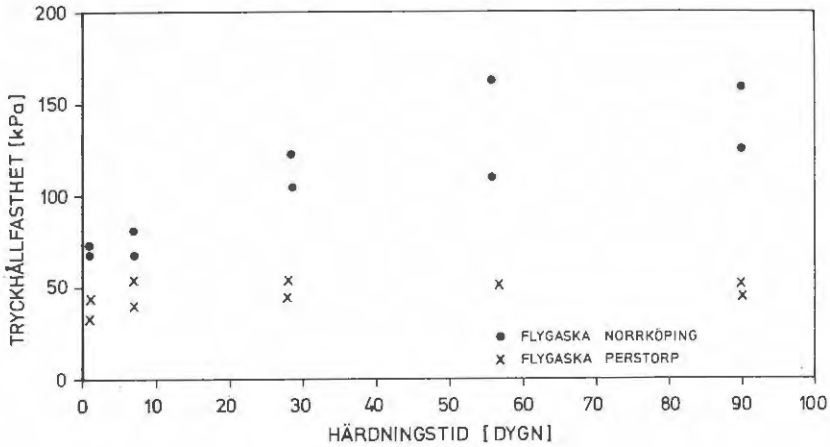


Fig 6.5.1:10. Hållfastheten som funktion av tiden för flygaska från två olika wanderrostanläggningar.

Skillnaden mellan askorna är dels som framgår av Tabell 6.1:1 att halten oförbränt är 33% för askan från Perstorp medan den är 25% för Norrköpingsaskan och dels att kornstorleksfördelningen enligt Figur 6.3:7 visar att Perstorpsaskan är något grovkornigare än Norrköpingsaskan. Dessutom framgår av elektronmikroskopfotograferingar, Figur 6.2:5 och Figur 6.2:6 att kornformen är mer oregelbunden i Perstorpsaskan än i Norrköpingsaskan.

Jämförs dessa två askor med askan från Asnaesverket, som har flera gånger högre tryckhållfasthet, gäller att denna har betydligt lägre halt oförbränt, är finkornigare och mer rundkornig.

Provkropparna i denna undersökning har härdats i klimatkammare med temperaturen ca  $7^{\circ}\text{C}$  och 100% relativ fuktighet. I syfte att undersöka huruvida härdningstemperaturen påverkar hållfasthetsnivån utfördes en undersökning där provkroppar inpackade vid  $R_D = 0,90$  och optimal vattenkvot härdades i 7 dygn vid olika temperaturer. Resultatet från denna undersökning framgår av figur 6.5.1:11.

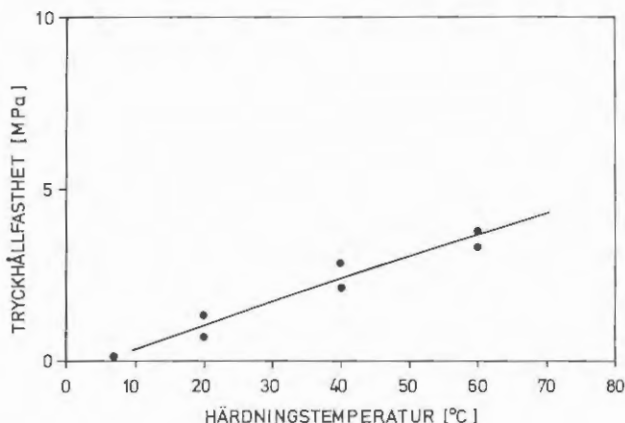


Fig 6.5.1:11. Tryckhållfastheten som funktion av härdningstemperaturen för Asnaesaska inpackad till  $R_D = 0,90$  och optimal vattenkvot härdade i 7 dygn.

Av figuren framgår att hållfastheten är starkt linjärt beroende av härdningstemperaturen. Således är tryckhållfastheten vid  $7^{\circ}\text{C}$  härdningstemperatur ca 175 kPa och vid  $60^{\circ}\text{C}$  ca 3500 kPa, dvs en 20-faldig ökning.

### 6.5.2 Triaxialförsök

Isotropt konsoliderade odränerade triaxialförsök har utförts med portrycksmätning. Proverna har vattenmättats med s k "back pressure". Vattenkvot på varje försökskropp är bestämd

efter försöken för att bekräfta vattenmättnad. Samtliga prover är inpackade vid optimal vattenkvot  $w = 18\%$ . Denna typ av försök har utförts för att bestämma effektivspänningar vid brott för olika konsolideringsspänningar. Det har visat sig på flygaskans sprödhet att mätning av portrycket vid brottspänning inte är möjlig. Eftersom brottet sker mycket snabbt hinner inte portrycksförändringen vid själva brottytan att överföras till mätpunkten. Effektivspänningarna kan därmed inte utvärderas, varför en utvärdering av effektiv inre friktionsvinkel  $\phi'$  och effektiv kohesion  $c'$  inte blir adekvat för de undersökta flygaskorna.

Lämplig metod att utvärdera resultaten från triaxialförsök är därför att studera skjuvhållfastheten som funktion av totalspänningarna där en utvärdering av  $\phi$  och  $c$  utförs, se Figur 6.5.2:1. Eftersom man då enbart utnyttjar totalspänningarna behöver man inte ta hänsyn till portrycket. Griffith's teori (1924) för spröda material har provats, men metoden befanns ej vara tillämplig på detta material.

En utvärdering av inre friktionsvinkeln  $\phi$  och kohesionen  $c$  är utförd med hjälp av Mohr's cirklar i totalspänningsdiagram.

Korrelationskoefficienten  $r$  i Tabell 6.5.2:1 visar att god överensstämmelse föreligger i resultaten, endast ett värde faller under  $r = 0,9$ .

Tabell 6.5.2:1. Utvärderade värden på inre friktionsvinkeln  $\phi$  och kohesionen  $c$  ur totalspänningarna med Mohr's cirklar. Isotropt konsoliderade odränerade triaxialförsök. Flygaska Asnaes.

Packningsgrad $R_D$	Härdningstid (dygn)	$\phi$ (grad)	$c$ (kPa)	Korrelationsfaktor $r$
0,85	7	31°	45	0,96
	28	44°	86	0,85
	56	44°	64	0,99
0,90	7	45°	41	0,98
	28	46°	107	0,99
	56	45°	99	0,98
1,00	7	54°	70	0,98
	28	54°	140	0,95
	56	58°	107	0,99

Ur resultaten kan man utläsa att friktionsvinkeln  $\phi$  ökar med ökad packningsgrad även om ökningen är mycket liten mellan  $R_D = 0,85$  och  $R_D = 0,90$ . Friktionsvinkeln 31° vid  $R_D = 0,85$  kan vara en effekt av att härdningen är långsammare vid låga packningsgrader. Kohesionen  $c$  ökar något med härdningstid speciellt mellan 7 och 28 dygn. Tabell 6.5.2:1 anger att värdet på  $c$  är lägre vid 56 dygn än vid 28 dygn. Resultatet måste tolkas så att ingen hållfasthetsökning äger rum efter 28 dygns härdningstid. I Figur 6.5.2:1 ges exempel på totalspänningsdiagram med utvärderade parametrar för isotropt konsoliderade odränerade försök.



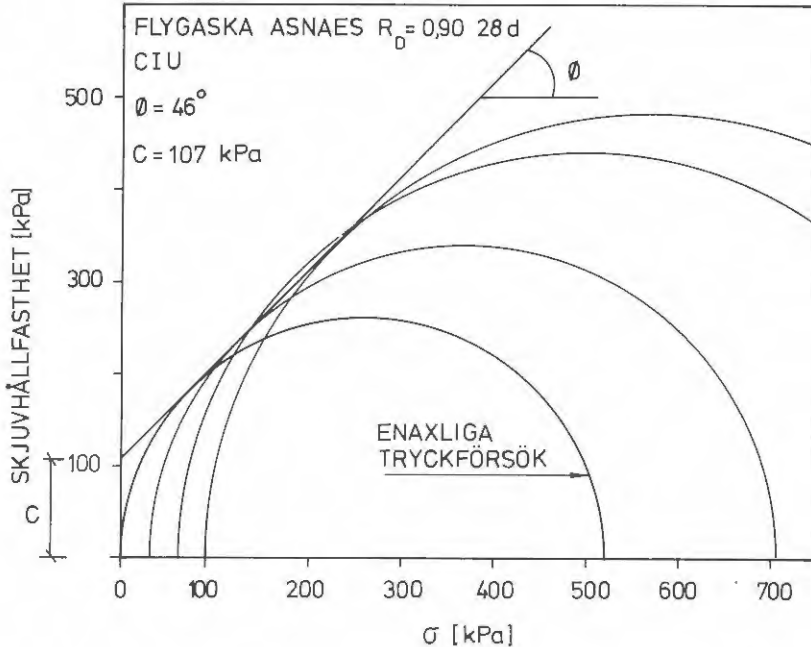


Fig 6.5.2:1. Exempel på totalspänningsdiagram för isotropt konsoliderade odränerade triaxialförsök på packad flygaska från Asnaes,  $R_D = 0,90$ , härdningstid = 28 dygn.

Inre friktionsvinkeln  $\phi = 44-58^\circ$  får anses vara höga värden, men normala jämfört med andra askor. Motsvarande värden för i Sverige mycket fasta jordar, t ex moränleror är  $\phi \approx 35^\circ$ . Värdet på kohesionen  $c$  är ca hälften av skjuvhållfastheten som erhållits vid enaxliga tryckförsök.

Av Tabell 6.5.2:2 framgår att spridningen på  $\phi$  är något större vid CID-försöken än vid motsvarande CIU-försök för  $R_D = 0,90$ .  $\phi$  varierar här mellan  $37^\circ$  och  $46^\circ$ . Kohesionen  $c$  tycks vara något större efter 28 respektive 56 dygn vid de dränerade försöken. Skillnaden är ca 25 kPa men samma tendens kvarstår dock att hållfastheten inte ökar efter 28 dygns härdningstid.

Tabell 6.5.2:2. Utvärderade värden på  $\phi$  och  $c$  ur totalspänningarna med Mohr's cirklar. Isotropt konsoliderade dränerade triaxialförsök. Flygaska Asnaes.

Packningsgrad $R_D$	Härningstid (dygn)	$\phi$ (grad)	$c$ (kPa)	Korrelationsfaktor $r$
0,90	7	46°	44	0,91
	28	37°	130	0,99
	56	40°	121	0,96

God korrelation har erhållits vid CID-försöken för varje försöksserie.

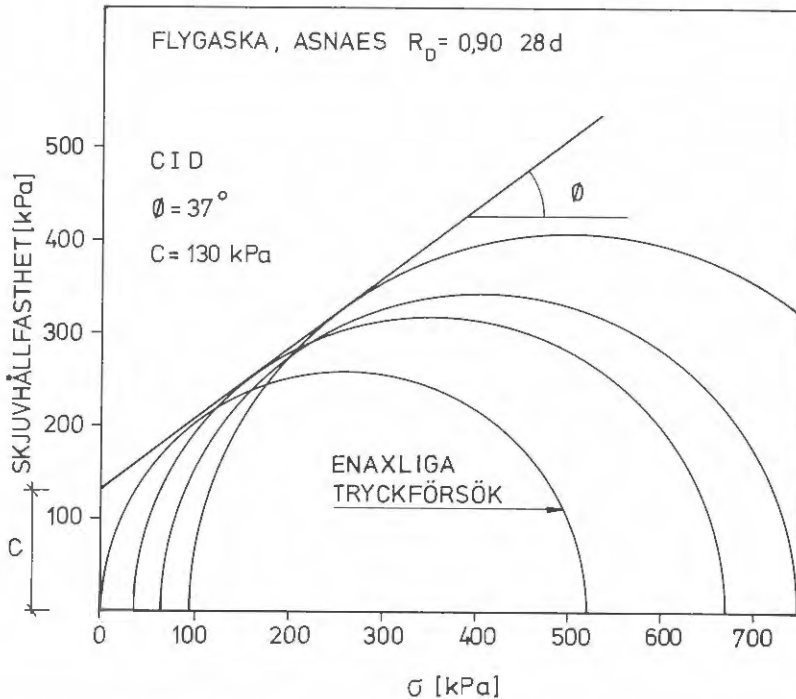


Fig 6.5.2:2. Exempel på totalspänningsdiagram för isotropt konsoliderade dränerade triaxialförsök på packad flygaska från Asnaes,  $R_D = 0,90$ , härningstid = 28 dygn.

Någon avgörande skillnad mellan odränerad (vattenmättad) och dränerad (icke vattenmättad) i försöksresultaten kan inte utläsas. Även om en jämförelse görs mellan redovisade spänningsdiagram i Fig 6.5.2:1 och Fig 6.5.2:2, så är  $\phi = 37^\circ$  för dränerade försök ett extremt lågt värde, liksom  $\phi = 31^\circ$  för  $R_D = 0,85$  7 dygn för odränerade försök. Vatteninnehållet tycks inte påverka försöksresultaten nämnvärt.

Noterbart är också att p g a brottytans lutning, mestadels större än  $63^\circ$ , kan inte en fri skjuvyta utbildas.

### 6.5.3 Kompressionsegenskaper

Kompressionsförsök har utförts på packad flygaska från Asnaes. Försöken är utförda på icke vattenmättat prov varför eventuella portryck ej uppmätts. Några portryck under försökets gång bör ej heller ha uppstått p g a den låga deformationshastigheten, 0,005 mm/min, i förhållande till materialets permeabilitet, inom potensen  $10^{-7}$  m/s. Packad flygaska kan inte betecknas som friktionsmaterial delvis p g a stora cementeringseffekter som åstadkoms genom det puzzolanska hårdandet. Detta visar sig i kompressionsförsök genom att en knyckpunkt utbildas på kurvan där kompressionsmodulen minskar markant, Fig 6.5.3:1. Speciellt är detta uttalat för kurvan  $R_D = 0,80$  vid ca 1 MPa spänning.

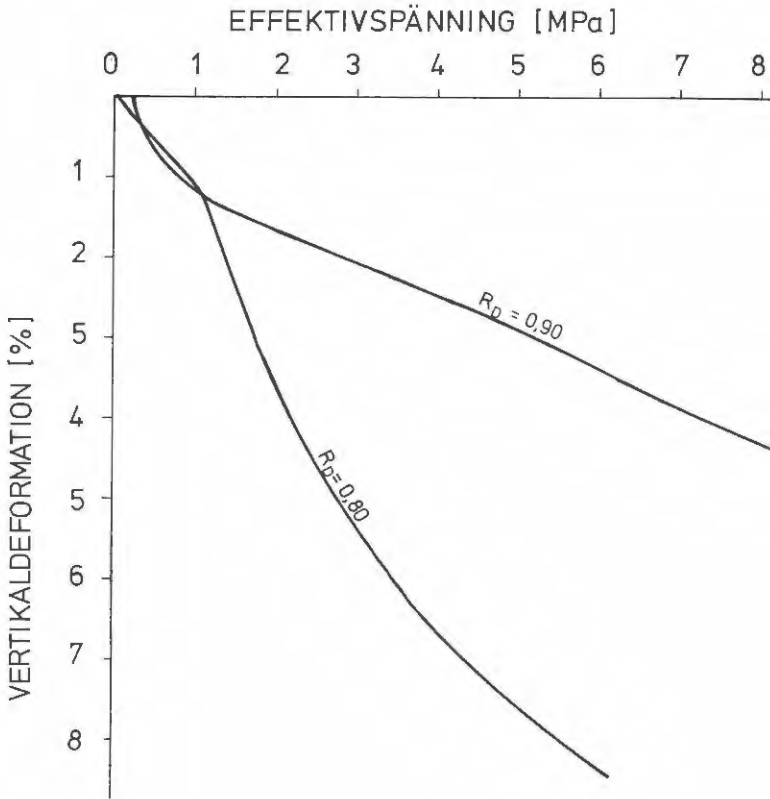


Fig 6.5.3:1. Spännings-deformationskurvor för flygaska från Asnaes vid olika packningsgrader, härdningstid 7 dygn.

$$\text{Kompressionsmodulen } M = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta \epsilon}$$

$\sigma'$  = effektivspänningar

$\epsilon$  = relativ deformation

Kompressionsmodulen  $M = 260$  MPa är ett medelvärde för kurvan  $R_D = 0,90$  i intervallet 1-8 MPa.

Kompressionsmodulen för kurvan  $R_D = 0,80$

lastintervallet 0-1 MPa  $M = 90$  MPa

    "    "    1,3-2 MPa  $M = 30$  MPa

Man ser att det är av avgörande betydelse för kompressions-egenskaperna vilken packningsgrad materialet har.

## 6.6 Permeabilitet

Permeabilitetsförsöken är utförda i triaxialapparat där allsidigt tryck är applicerbart och den påtvingade vatten genomströmningen kan ske med konstant tryck (gradient). Försöken har utförts på provkroppar inpackade vid optimal vattenkvot. Proven är sedan vattenmättade i försöksutrustningen. Försöken på flygaska från Asnaes har utförts för olika packningsgrader och efter olika härdningstider. Redovisade resultat i Fig 6.6:1 visar att något beroende av härdningstiden knappast existerar. Det tyder på att någon förändring av kornstrukturen efter härdning ej förekommer som kan påverka porvolymen. En viss spridning av permeabilitetsvärdena föreligger inom varje packningsgrad. I Fig 6.6:2 visas att permeabiliteten klart minskar med ökad

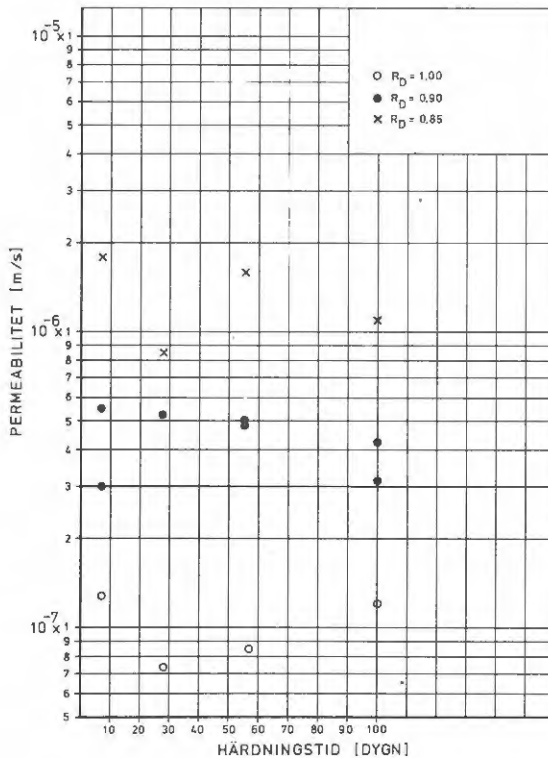


Fig 6.6:1. Permeabiliteten som funktion av härdningstiden för flygaska från Asnaes vid olika packningsgrader.

packningsgrad. För packningsgraderna 0,85-1,00 varierar permeabiliteten en hel tiopotens från  $\approx 1 \cdot 10^{-6}$  m/s ner till  $\approx 1 \cdot 10^{-7}$  m/s.

Erhållna permeabilitetsvärden för flygaskan från Asnaes motsvarar väl beräknade värden för jordmaterialet silt med motsvarande kornfördelning.

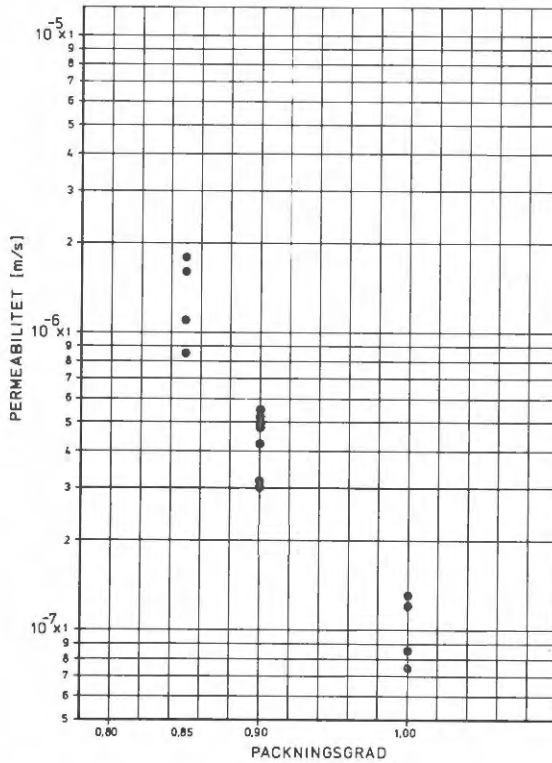


Fig 6.6.:2. Permeabiliteten som funktion av packningsgraden, flygaska från Asnaes.

För flygaskan från Norrköping och Perstorp är permeabiliteten  $5 \cdot 10^{-6}$  respektive  $1 \cdot 10^{-5}$ , Fig 6.5:3, vilket är betydligt högre än Asnaesaskan. Det kan man också förvänta med den grövre kornfördelning dessa wanderrostaskor har. Wanderrostaskorna är bara undersökta vid en packningsgrad 0,90 men vid två olika tidpunkter. Punkterna faller inom spridningsramen, varför något tidsberoende ej föreligger. Permeabilitetsvärdena stämmer väl överens med motsvarande jordmaterialet sandig silt med motsvarande kornfördelning.

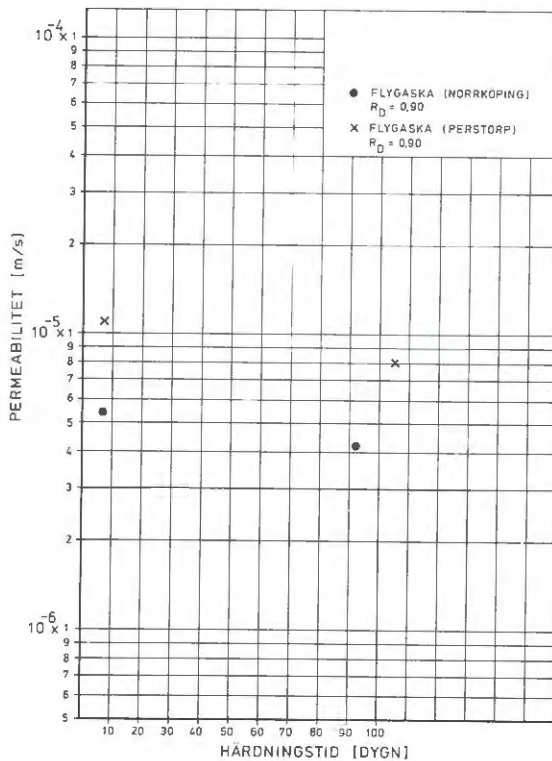


Fig 6.6:3. Permeabilitet som funktion av härdningstiden för flygaskor från wanderrostförbränning, Norrköping och Perstorp vid packningsgraden  $R_D = 20\%$ .

Permeabiliteten för flygaska från Wilhelmshafen ligger vid  $k = 3 \cdot 10^{-7}$  m/s för packningsgraden  $R_D = 0,90$ . Försöken är utförda vid två olika härdningstider, 7 och 56 dygn och samma värde på permeabiliteten har erhållits för båda tidpunkterna.



## 7. RESULTAT FRÅN UNDERSÖKNING AV BOTTENASKA

## 7.0 Allmänt

Bottenaska tas alltid ut ur förbränningsugnarnas bottnar. Bottnarna vid kolpulvereldning är antingen våta eller torra. Bottenaskorna i denna undersökning kommer från torr botten. Vidare har bottenaskor från wanderrost studerats. Bottenaska är mera en slagg än en aska. Den består av större bitar och stycken stelnad smälta. Då man tar ut bottenaskan från pannbottnarna kyler man den oftast med vatten.

## 7.1 Kemiska huvudkomponenter

Bottenaskorna har i huvudsak samma kemiska sammansättning som flygaska från samma anläggning. Något förvånande är den höga glödgningsförlusten hos materialet från Asnaes. Tabell 7.1:1. Den avviker kraftigt från värdet hos flygaskan. Bottenaskan från Wilhelmshafen är mald efter uttagning och kylning.

Tabell 7.1:1. Kemiska huvudbeståndsdelar för bottenaskor från Asnaes, Norrköping, Perstorp och Wilhelmshafen (mald). Siffrorna i procent.

	bottenaska Asnaes	bottenaska Norrköping	bottenaska Perstorp	bottenaska Wilhelmshafen
glödgnings- förlust	9,4	18	17	0,7
CaO	5,1	4,3	6,0	5,3
SiO <sub>2</sub>	46	45	42	54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,6	6,7	9,5	8,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19	20	19	27
MgO	2,7	3,0	3,6	0,9
K <sub>2</sub> O	1,6	2,1	2,0	1,5
Na <sub>2</sub> O	0,7	0,5	0,4	<0,1
S <sub>tot</sub>	0,5	0,2	0,1	<0,1

Av Tabell 7.1:1 framgår att halterna  $\text{SiO}_2$  och  $\text{Al}_2\text{O}_3$  för bottenaskorna från Norrköping och Perstorp är betydligt högre än för motsvarande värden i flygaskan från samma anläggningar. Detta gäller inte för de övriga bottenaskorna.

Bottenaskorna har inte de puzzolanska egenskaperna som flygaskorna har även om den kemiska sammansättningen är mycket lika. Bottenaskan liksom flygaskan består bl a av en amorf glasfas. Malning av bottenaska tycks inte påverka dess egenskaper.

## 7.2 Mikrostruktur

Bottenaskorna är relativt lika varandra i sin mikrostruktur. Korn med slät förglasad yta ibland något porös, innanför skalet mycket poröst, vilket ger kornen en mycket låg densitet. I Fig 7.2:1 visas exempel på förglasad kornyta med enstaka porer, materialet är från Perstorp. I Fig 7.2:2 och 7.2:3 kan man se brottytor i korn, bilden visar att kornen är mycket porösa, vilket är typiskt för slagg. I den malda bottenaskan från Wilhelmshafen har kornen mycket oregelbunden struktur och är ofta skarpkantade, vilket framgår av Fig 7.2:4. Kantigheten är en effekt av nedkrossningen av de större kornen med den förglasade mer släta ytan.

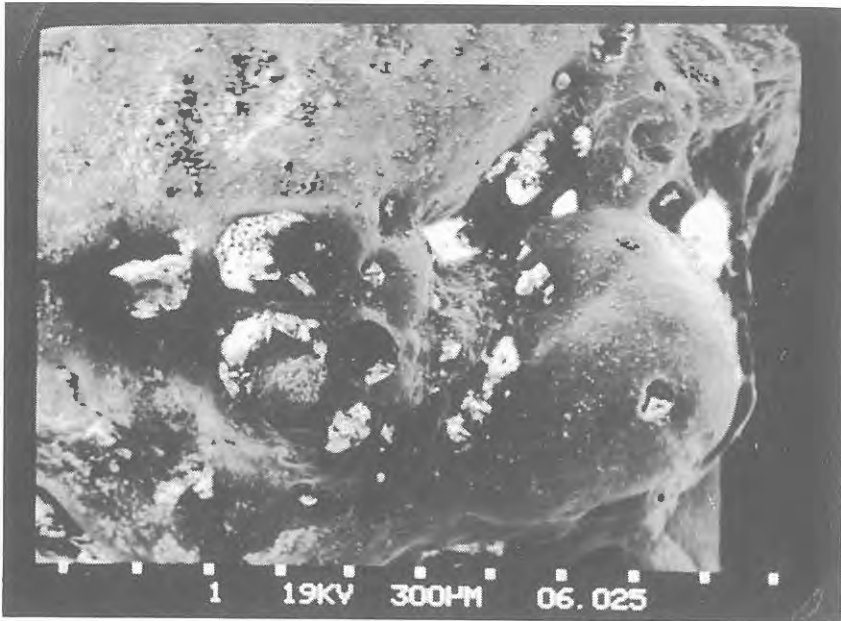


Fig 7.2:1. Kornyta hos bottenaska från wanderrosteldning i Perstorp.

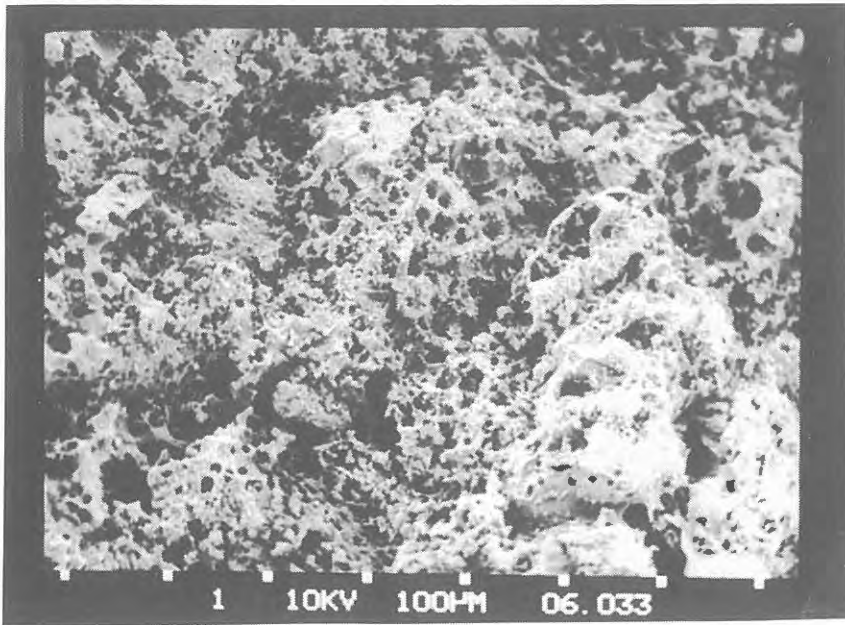


Fig 7.2:2. Brottyta hos korn från bottenaska wanderrosteldning i Norrköping.

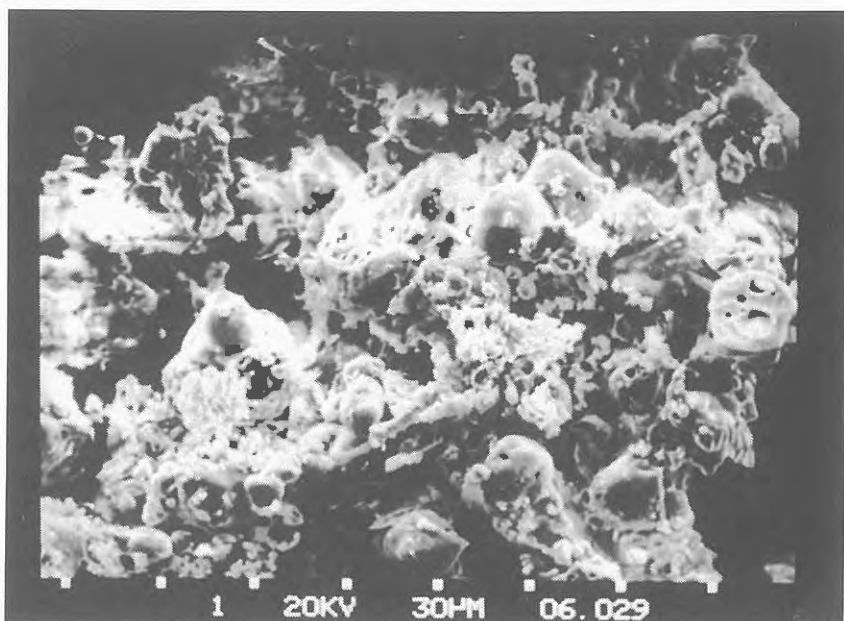


Fig 7.2:3. Brottyta hos korn från bottenaska kulpulvereldning i Asnaes.

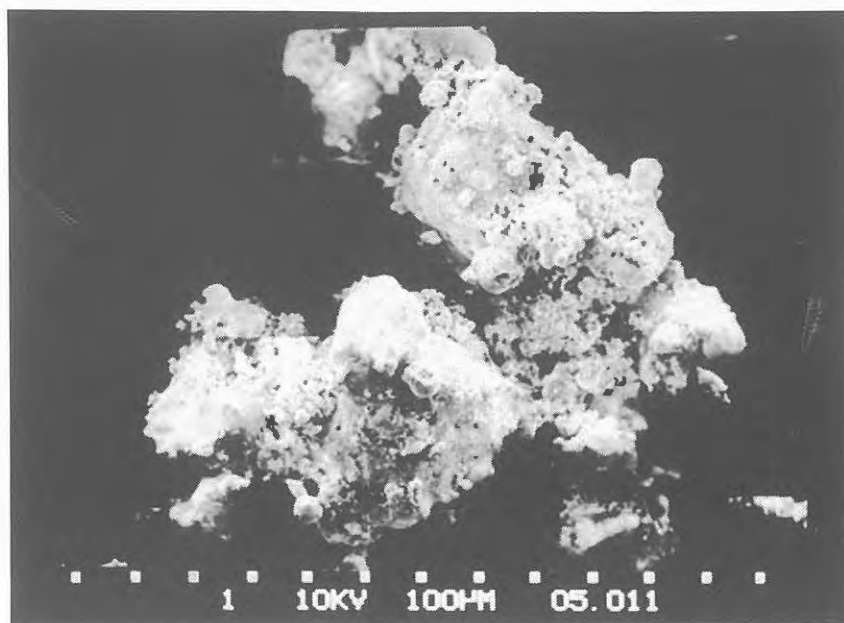


Fig 7.2:4. Korn från mald bottenaska kulpulvereldning i Wilhelmshafen.

### 7.3 Allmänna tekniska parametrar

Kornfördelningen hos bottenaskarna visar på ett grovt material jämfört med flygaska. Redovisade kurvor i Fig 7.3:1 är bestämda för material med kornstorlek mindre än 20 mm.

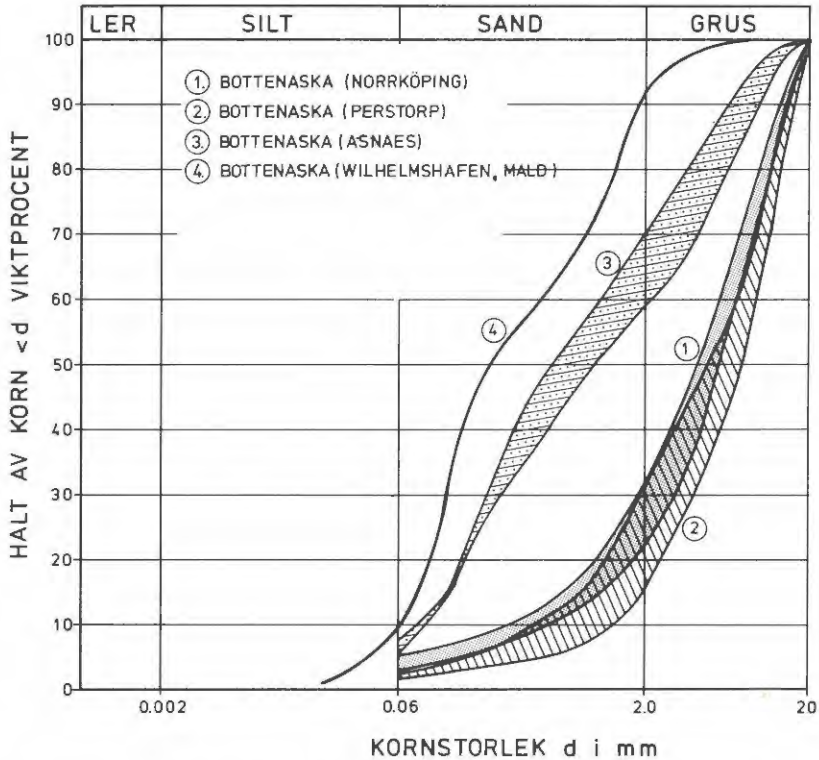


Fig 7.3:1. Kornstorleksfördelning hos bottenaskar från Asnaes, Norrköping, Perstorp och Wilhelmshafen. Bestämd på material med kornstorlek mindre än 20 mm.

Bottenaskan från Wilhelmshafen är mald varför den inte innehåller korn större än vad siktkurvan visar. Materialet kan betecknas som en sand. Däremot innehåller övriga bottenaskor 15-30% grövre korn än 20 mm. I dessa material förekommer ibland större slaggaggregat med kornstorlekar ända upp till 400 mm diameter. Även ännu större korn kan förmodligen förekomma. Bottenaskarna från Asnaes, Norrköping och Perstorp kan liknas vid ett stenigt grusmaterial, då är hänsyn tagen till material större än 20 mm. Kurvor med raster är spridningen av 5 st kornfördelningsbestämningar. De låga korndensiteterna, som redovisas

i Tabell 7.3:1, speglar bottenaskornas innehåll av inneslutna porer och hålrum. Korndensiteten ligger mellan 1820-2180 kg/m<sup>3</sup> för samtliga bottenaskor. Betydelsen av malningen för bottenaskan från Wilhelmshafen tycks inte vara så stor, som man kan förvänta sig. Wilhelmshafens densitet är obetydligt större.

Tabell 7.3:1. Allmänna tekniska parametrar för bottenaskor från Asnaes, Norrköping, Perstorp och Wilhelmshafen (mald).

	bottenaska Asnaes	bottenaska Norrköping	bottenaska Perstorp	bottenaska (mald) Wilhelmshafen
glödnings- förlust %	9	13,5-17,5	13,7-17,4	1,26-1,48
vatten- kvot %	40	27,2	31,6	74,5
korn- densitet kg/m <sup>3</sup>	1820-2000	2020-2030	2070-2140	2160-2180
specifik yta m <sup>2</sup> /kg	-	-	-	-

Bestämda vattenkvoter är bara ett mått på hur mycket vatten materialen innehåller efter transporten. En del av materialen kan vara torrare på grund av avdunstning.

Specifik yta har ej kunnat bestämmas för dessa material.

#### 7.4 Packningsegenskaper

Tung laboratoriestampning har inte utförts på de icke malda askorna. Eftersom en packning på traditionellt vis skulle innebära stora okontrollerade nedkrossningseffekter och därför inte skulle ge rättvisande resultat. Torrdensiteten för lösaste fyllning har bestämts. Resultaten ligger på en mycket låg nivå, 0,6-0,8 t/m<sup>3</sup>, som redovisas i Tabell 7.4:1.

Tabell 7.4:1. Torrdensiteten för lös och packad fyllning hos bottenaskor från Asnaes, Norrköping, Perstorp och Wilhelmshafen.

	bottenaska Norrköping	bottenaska Perstorp	bottenaska Asnaes	bottenaska Wilhelmshafen (mald)
lös fyllning torrdensitet $t/m^3$	0,78	0,66-0,73	0,66-0,68	0,68
packad fyllning lab.vibrering $t/m^3$	0,84	0,84	0,67	-
max. dens. tung stampning $t/m^3$	-	-	-	1,13

Efter packning medelst vibrering ökar densiteten något men ökningen är obetydlig. Genom vibrering erhålls en densitet som ligger nära maximal densitet vid tung laboriestampning. Materialens lätthet bekräftar ytterligare deras stora innehåll av hålrum. Densiteterna är mindre än hälften för motsvarande jordmaterial ( $\sim 2 t/m^3$ ).

I Fig 7.4:1 visas packningskurvan för den malda bottenaskan från Wilhelmshafen.

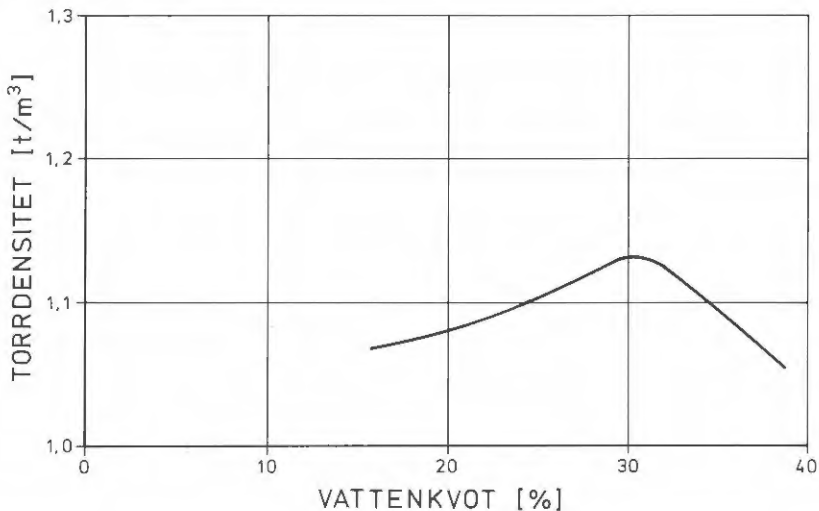


Fig 7.4:1. Packningskurva bestämd med tung laboriepackning för mald bottenaska från Wilhelmshafen.



Den maximala torrdensiteten för det malda materialet blir något högre (1,13 t/m<sup>3</sup>) än för de övriga, vilket beror just på malningen som ger mindre andel hålrum i materialet. Vattenmättnadsgränsen vid maximal torrdensitet är ~42%.



## 8. RESULTAT FRÅN UNDERSÖKNINGAR AV RÖKGAS- AVSVAVLINGSPRODUKTER

### 8.0 Allmänt

Rökgasavsvavlingsprodukterna kommer från en process i rökgasreningen där man minskar halten svaveloxider i rökgaserna. Det finns en mängd olika metoder att göra detta. Undersökta avsvavlingsprodukter kommer från 2 st olika typer av anläggningar. Den ena avsvavlingsprodukten är från en våt-torr pilotanläggning uppställd på Asnaesverket. Kalkslam förs in i en reaktor samtidigt med rökgaserna för att reagera med i rökgaserna förekommande svaveloxider. Slutprodukten är ett torrt pulver. Den andra avsvavlingsprodukten är från en våt anläggning i Wilhelmshafen. Kalkslam används även här som svaveloxidupptagare. Slutprodukten från denna anläggning är en materialsuspension i en blandning av färskt och salt vatten. Den torra avsvavlingsprodukten från Asnaes är relativt lätthanterlig i det torra tillstånd den förekommer. Man kan säga att man har ett bra utgångsläge för t ex deponering. Däremot är avsvavlingsprodukten från Wilhelmshafen uppslammad i vatten för att transport av materialet i rörledning 8 km till sedimentationsbassänger skall vara möjlig. Torrsubstanshalten i detta slam är ca 10%. Då uppslammat material får sedimentera ökar torrsubstanshalten till ca 50%, motsvarar  $w \sim 200\%$ . Avsvavlingsprodukten är även vid denna torrsubstanshalt relativt svårhanterlig. Materialet flyter. Oxidering av kalciumsulfit till kalciumsulfat i denna produkt ger materialet bättre hanteringsegenskaper.

### 8.1 Kemiska huvudkomponenter

Den våt-torra avsvavlingsprodukten från Asnaes har i stort samma huvudkomponenter som flygaska men att halterna avviker. Detta överensstämmer väl med det faktum att produkten innehåller 30-40% flygaska, vilket beror på att man inte har en fullständig avskiljning av flygaskan före avsvavlingssteget. Halterna för huvudkomponenterna är beräknade för värden för sannolika oxider för varje ämne. Halten CaO är inte enbart

fri kalk utan kalcium förekommer också i förening såsom karbonat, hydroxid, sulfid och sulfat. Den höga glödgningsförlusten 12% är bl a ett resultat av förbränning av karbonat och hydroxider. Halterna 16%  $\text{SiO}_2$  och 10%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i tabell 8.1:1 härstammar från flygaskan som ingår i rökgasavsvavlingsprodukten från Asnaes. Av tabell 8.1:1 framgår halten totalsvavel som är ~7%, vilket kan anses vara ett relativt lågt värde för en avsvavlingsprodukt, vilket i sin tur innebär att man har ett högt stökiometriskt värde. Den nedre delen i tabell 8.1:1 visar fördelningen mellan kalciumföreningarna som ingår. Man ser att en stor del av det upptagna svavlet återfinns som oxiderbar sulfid ~16%.

Tabell 8.1:1. Kemiska huvudkomponenter hos rökgasavsvavlingsprodukter från Asnaes och Wilhelmshafen, Halterna beräknade för varje ämne med sannolik oxid sammansättning. Siffrorna i procent.

	våt-torr rökgasav- lingsprodukt	våt rökgasavsvav- lingsprodukt
	Asnaes	Wilhelmshafen
glödgnings- förlust	12	21
CaO	42	37
$\text{SiO}_2$	16	1,5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,0	0,1
$\text{Al}_2\text{O}_3$	10	0,4
MgO	1,0	1,1
$\text{K}_2\text{O}$	0,4	0,3
$\text{Na}_2\text{O}$	0,2	1,8
Cl	0,5	2,0
$S_{\text{tot}}$	6,8	19
$\text{CaSO}_4$	5,5	(~30)
$\text{CaSO}_3$	16 (=oxiderbart)	(~45)
$\text{CaCO}_3$	17	-
$\text{Ca(OH)}_2$	18	-

Den våta rökgasavsvavlingsprodukten från Wilhelmshafen skiljer sig kemiskt från den våt-torra bl a genom att i stort inte innehålla någon flygaska, vilket också framgår av halterna för  $\text{SiO}_2$  1,5% och  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1,1% i tabellen. Materialet består i huvudsak av kalciumsulfit och -sulfatföreningar, vilka också ger den våta produkten dess egenskaper, framför allt kalciumsulfiten. Kalcium existerar också som karbonat och hydroxid. Halterna av oxiderbar kalciumsulfit (45%) och kalciumsulfat (30%), som visas i den nedre delen i tabell 8.1:1 är mycket approximativa då någon definitiv bestämning ej kunnat utföras.

## 8.2 Mikrostruktur

I den våt-torra rökgasavsvavlingsprodukten mikrostruktur som presenteras i figur 8.2:1 kan man klart urskilja flygaskan, som består av sfärer och är rikligt representerade. En porös massa som ibland tycks vara sammansatt till större aggregat omger flygaskekornen. Flygaskekornen har mindre flagor av det porösa materialet sittande på kornytan. Det porösa materialet dominerar i mikrostrukturen. Den porösa delen består huvudsakligen av kalciumhydroxid och kalciumoxid. Någon kristallstruktur från kalciumsulfiten har inte upptäckts i mikrostrukturen.

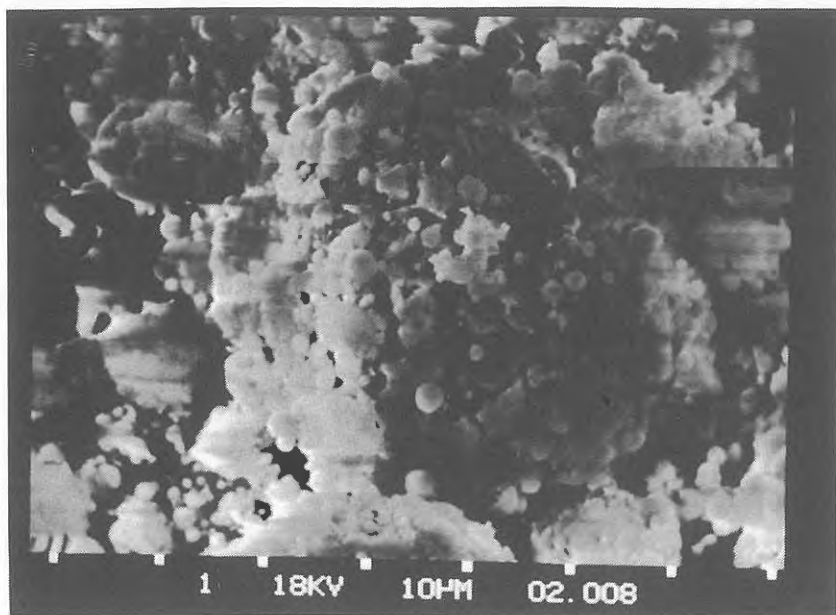


Fig 8.2:1. Mikrostruktur hos våt-torr rökgasavsvavlingsprodukt från Asnaes.

I figur 8.2:2 visas exempel på mikrostruktur hos våt rökgasavsvavlingsprodukt från Wilhelmshafen. Flata mycket tunna partiklar ibland sammansatta till större aggregat dominerar strukturen. Som framgår av figur 8.2:2 kan man ibland finna dessa rosformiga aggregat. Det som ger produkten dess karakteristiska utseende är huvudsakligen kalciumsulfiten. Brottytan från ett sedimenterat torkat material har studerats och där kan man utläsa att strukturen tättnar från provets överyta mot botten.

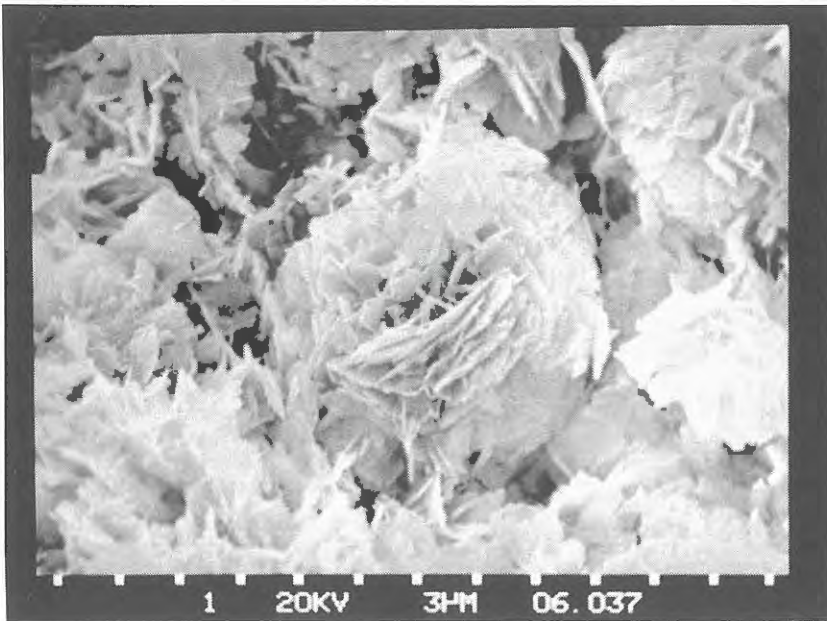


Fig 8.2:2. Mikrostruktur hos våt rökgasavsvavlingsprodukt från Wilhelmshafen.

### 8.3 Allmänna tekniska parametrar

De båda avsvavlingsprodukternas kornfördelning som redovisas i figur 8.3:1 ligger huvudsakligen i siltfraktionen. Kurvorna är sträckade p g a osäkerhet i resultaten. En okulär bedömning bekräftar dock avsvavlingsprodukternas uppträdande som silt. Sedimentationsanalys för bestämning av kornfördelningen har varit vanskelig att använda då materialet flockulerar i alla prövade lösningar. För Asnaesprodukten som är torr har stoftanalysator använts, men spridningen är stor även där, vilket framgår av figur 8.3:1. För Wilhelmshafenprodukten däremot är sedimentationsanalys utförd eftersom materialet måste analyseras vått. Diskuterbart är om det verkligen är adekvat att bestämma kornfördelningen på denna typ av material. Produkterna är mycket porösa och löst sammansatta i sin struktur, vilket gör att de är lätt sönderdelbara.

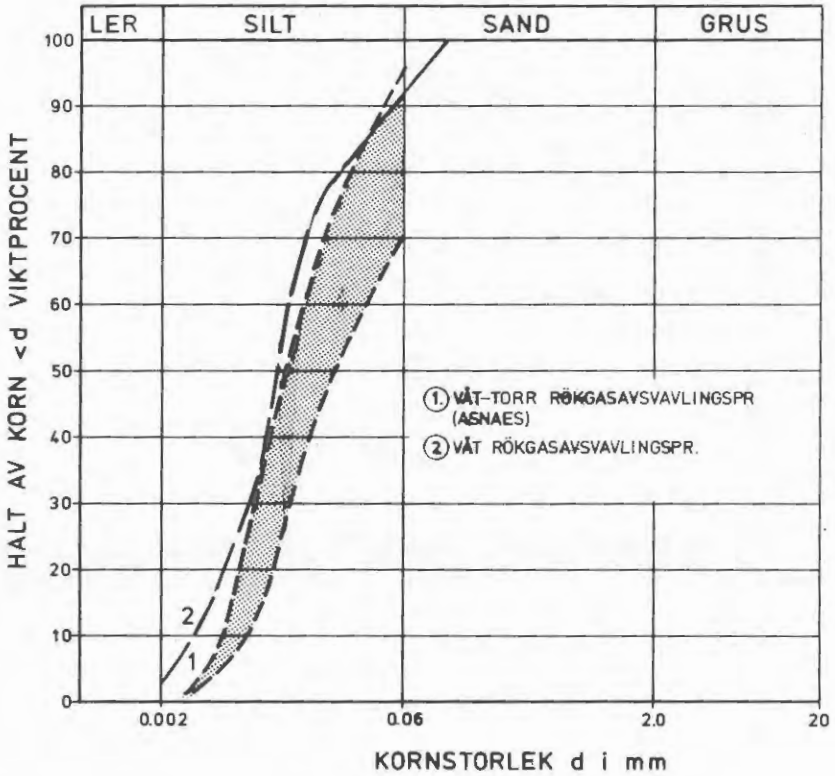


Fig 8.3:1. Kornfördelning för våt-torr och våt rökgasavsvavlingsprodukt, Asnaes och Wilhelmshafen.

Glödgningsförlusten redovisad i tabell 8.3:1 för både Asnaes och Wilhelmshafen är hög, 12% respektive 21%. Avsvavlingsprodukterna innehåller karbonater och hydratiserade föreningar som vid förbränning låter koloxid respektive vatten avgå och detta avspeglar sig som en massförlust vid glödning. För Asnaesmaterialen gäller att en liten del, ca 1%, kan betyda halt oförbränt p g a flygaskeinnehålllet. Vattenkvoten för produkten från Wilhelmshafen är bestämd på material som har sedimenterat och sedan det klara vattnet dekanterats av. Korndensiteten hos avsvavlingsprodukterna

är relativt hög, 2950 kg/m<sup>2</sup> för den våta avsvavlingsprodukten, vilket betyder att materialet i sin mikrostruktur är relativt kompakt. Det lägre, 2520 kg/m<sup>2</sup>, värdet för Asnaes-produkten beror delvis på halten flygaska.

Specifika ytan ~1240 m<sup>2</sup>/kg för Asnaesmaterialet är ett mycket högt värde, då jämfört med den undersökta flygaskan som inte har värden över 600 m<sup>2</sup>/kg. Detta konfirmerar ytterligare den komplexa strukturen rökgasavsvavlingsprodukten från Asnaes synes ha i mikrobilderna i figur 8.2:1.

Tabell 8.3:1. Allmänna parametrar för rökgasavsvavlingsprodukter från Asnaes och Wilhelmshafen.

	våt-torr rökgasavsvav- lingsprodukt	
	Asnaes	Wilhelmshafen
glödgnings- förlust %	11,1-12,9	20,7
vatten- kvot %	1,9	(150)
korn- densitet kg/m <sup>3</sup>	2460-2580	2920-2980
specifik yta, m <sup>2</sup> /kg	1220-1260	

#### 8.4 Packningsegenskaper

Tung laboratoriepackning enligt kapitel 5.6 har utförts för bestämning av packningskurvorna i figur 8.4:1. Den maximala torrdensiteten för Asnaesprodukten är 1,20 t/m<sup>3</sup> vid optimal vattenkvot 36%. Vattenmättnadsgränsen för Asnaesmaterialet vid maximal densitet är 44%. Asnaesprodukten vid optimal vattenkvot uppträder som ett relativt torrt material. Materialet känns inte fuktigt förrän vattenkvoten



överstiger 40%.

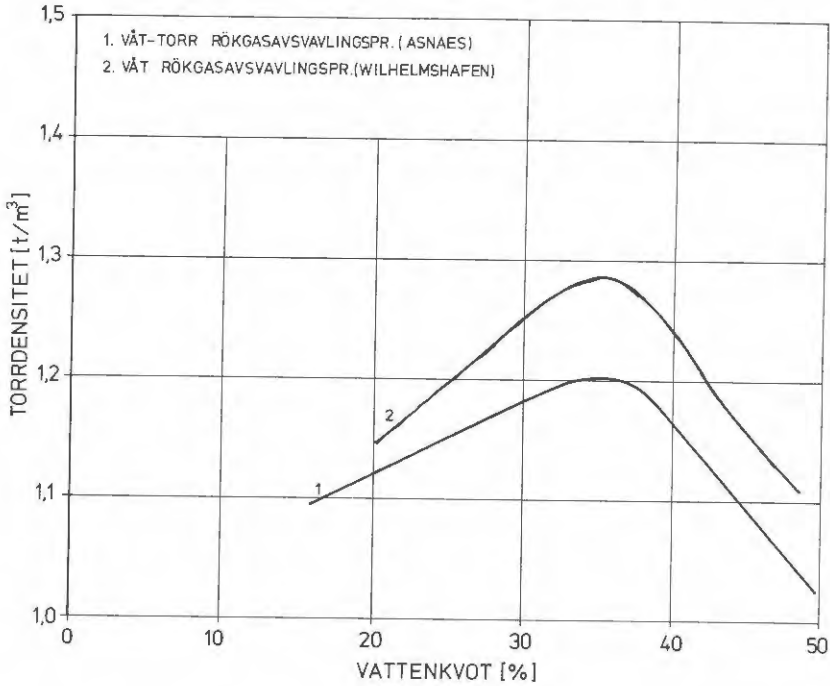


Fig 8.4:1. Packningsegenskaper hos rökgasavsvavlingsprodukter från Asnaes och Wilhelmshafen. Tung laboratoriepackning.

Av figur 8.4:1 framgår också att maximal torrdensitet för Wilhelmshafenprodukten är 1,28 t/m<sup>3</sup> vid optimal vattenkvot 33%. Vattenmättnadsgränsen vid maximal densitet är 44% även för detta material. Den våta produkten kan inte torkas vid packningsförsöken utan måste istället indunstas till våt vattenkvot varför bestämningen av en packningskurva är mycket tidskrävande.

För båda avsvavlingsprodukterna från Asnaes och Wilhelmshafen ligger maximal torrdensitet relativt lågt, vilket man kan förstå med materialens porösa och komplexa mikrostruktur.



## 8.5 Hållfasthets- och kompressionsegenskaper

### 8.5.1 Enaxliga tryckförsök

På samma sätt som för flygaskan från Asnaes har ett omfattande provningsprogram beträffande enaxliga tryckförsök utförts på våt-torr rökgasavsvavlingsprodukt från pilotanläggningen vid Asnaesverket. Provkropparna hade 50 mm diameter och höjden 100 mm och preparerades som beskrivits i kapitel 5.6.1.

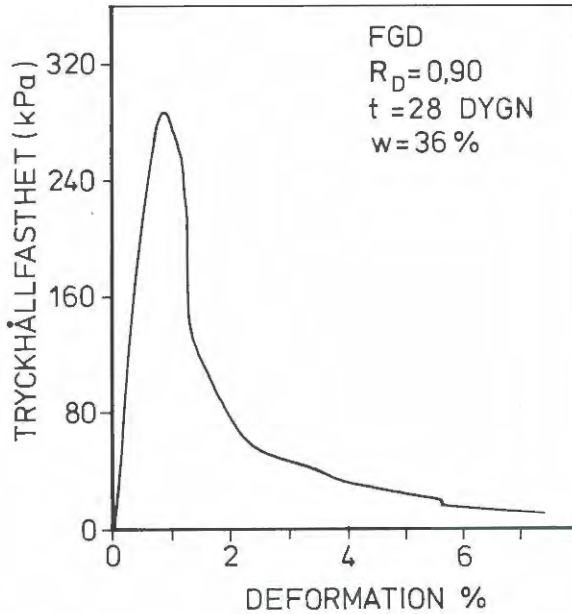


Fig 8.5.1:1. Typiskt kraft-deformationsförlopp vid  $R_D = 0,90$  och optimal vattenkvot härdad i 28 dygn för våt-torr avsvavlingsprodukt.

Försöksprogrammet är inlagt i inpackningskurvan som redovisas i figur 8.5.1:2. Provningar har skett på provkroppar inpackade vid packningsgraderna 0,80-1,0, vattenkvoterna 23-51% och härdningstiderna 1-90 dygn. Hållfasthetsprovning har utförts på två identiskt preparerade provkroppar och

hållfastheten har beräknats som medelvärde av dessa. Detta skedde i syfte att dels minska spridningen och dels att få en uppfattning om den.

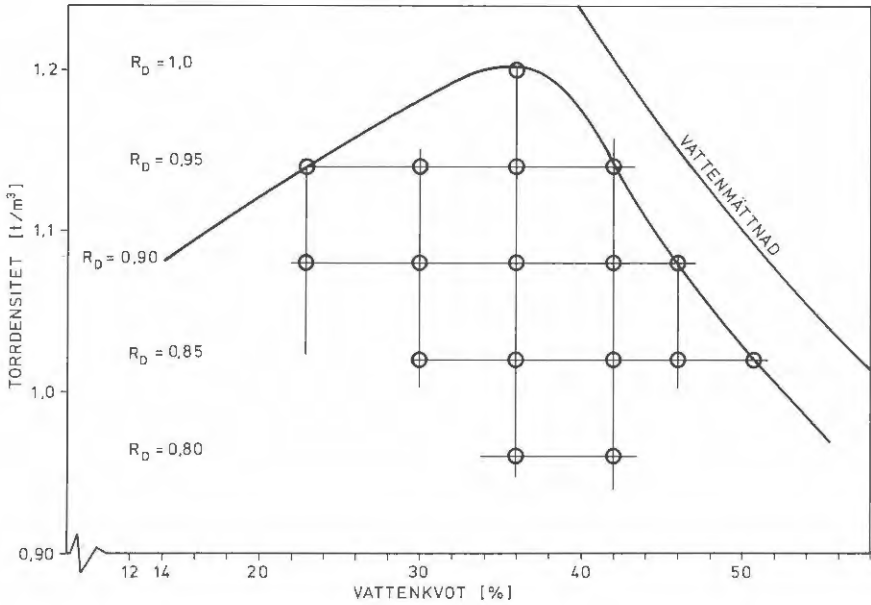


Fig 8.5.1:2. Försökspunkter för den våt-torra avsvavlingsprodukten inlagda i packningskurvan.

Totalt utfördes 156 st enaxliga tryckförsök. Detta resulterade i 76 observationer med vardera 6 parametrar, nämligen packningsgrad, härdningstid, vattenkvot, tryckhållfasthet, densitet och elasticitetsmodul.

I syfte att klarlägga vilka parametrar som tryckhållfastheten är beroende av utfördes linjär multipelregressionsanalys. Denna visade att alla 3 variablerna nämligen packningsgrad, härdningstid och vattenkvot hade inverkan på hållfastheten, dvs ett samband av typen enl ekvation (2) kan med tillräcklig

noggrannhet beskriva tryckhållfastheten

$$\sigma_{tr} = a + b \cdot R_D + c \cdot t + d \cdot w \quad (2)$$

där  $a, b, c, d$  = konstanter  
 $\sigma_{tr}$  = tryckhållfastheter  
 $R_D$  = packningsgrad  
 $t$  = härdningstid  
 $w$  = vattenkvot

I figur 8.5.1:3 visas hur tryckhållfastheten beror av härdningstiden vid packningsgrad  $R_D = 0,90$ . Av figuren framgår att hållfastheten ökar linjärt med tiden i hela tidsintervallet. Således sker en omedelbar kemisk reaktion efter inpackandet som ger en momentan hållfasthetsökning efter inpackningen till skillnad från flygaska där hållfastheten först vid 28 dygn börjar visa en linjär tillväxt med härdningstiden.

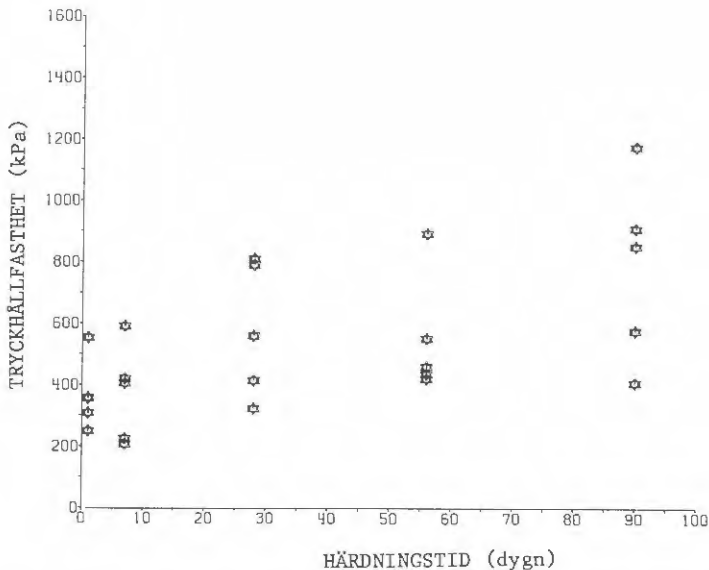


Fig 8.5.1:3. Tryckhållfastheten som funktion av härdningstiden vid packningsgraden 0,90 för våt-torr avsvavlingsprodukt.

Spridningen som visas i figuren förklaras av att hållfastheten också är beroende av vattenkvoten och på grund av brottets spröda natur finns också en spridning i försöksresultatet.

I figur 8.5.1:4 har de linjära samband som hållfasthetstillväxten visar med tiden för de i undersökningen förekommande packningsgrader redovisats.

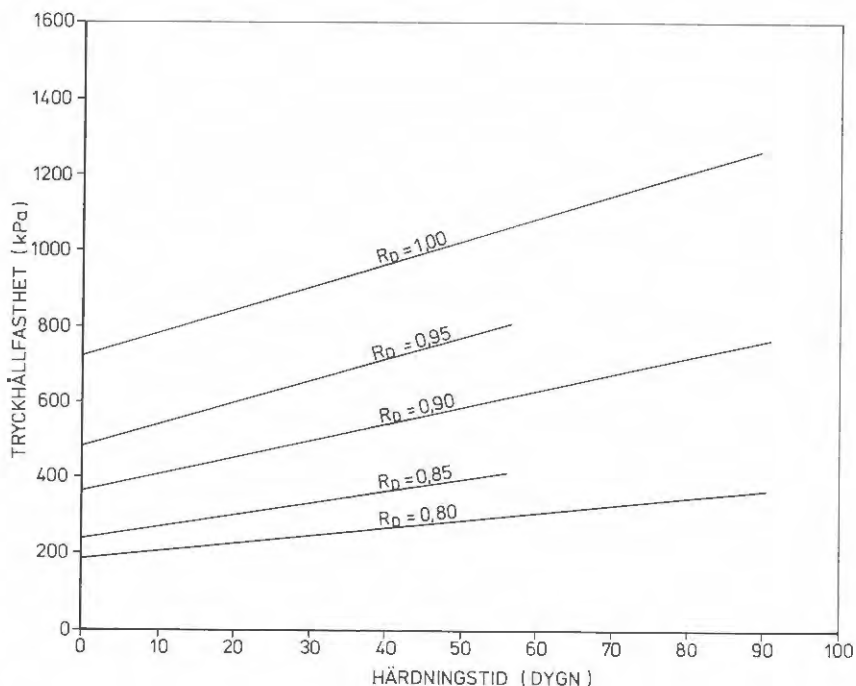


Fig 8.5.1:4. Hållfastheten som funktion av härdningstid och packningsgrad för våt-torr avsvavlingsprodukt.

Figuren visar att hållfastheten ökar med ökande packningsgrad och att ökningstakten tilltar ju större packningsgraden är. Således är hållfastheten efter 28 dygns härdning vid  $R_D = 0,85$  ca 330 kPa och vid  $R_D = 0,90$  ca 490 kPa. I figur 8.5.1:5 visas tryckhållfastheten som funktion av packningsgraden vid härdningstiden 28 dygn. Som framgår är spridningen relativt stor och beror förmodligen av orsaker som nämnts ovan.

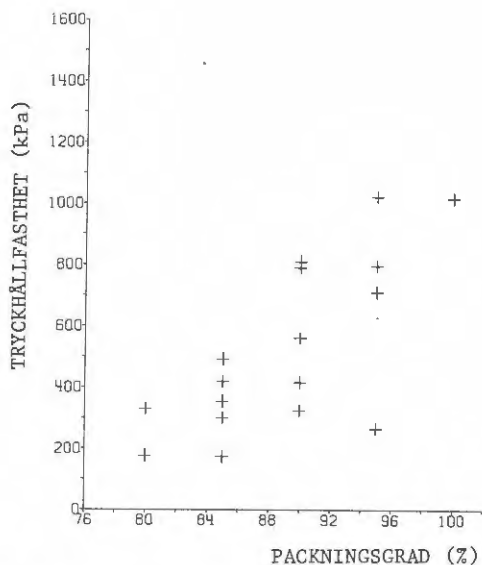


Fig 8.5.1:5. Tryckhållfastheten som funktion av packningsgraden vid en härdningstid av 28 dygn för avsvavlingsprodukt från våt-torra metoden.

I figur 8.5.1:6 har motsvarande medellinjer inlagts för samtliga i undersökningen förekommande härdningstider. Figuren visar det som tidigare nämnts, nämligen att hållfastheten ökar med ökande packningsgrad och att ökningstakten tilltar med växande packningsgrad.

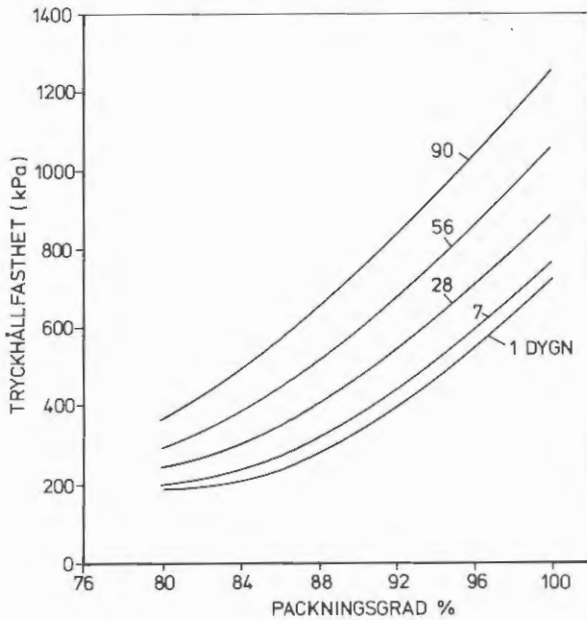


Fig 8.5.1:6. Tryckhållfastheten som funktion av packningsgrad och härdningstid för våt-torr avsvavlingsprodukt.

I figur 8.5.1:7 visas tryckhållfastheten som funktion av vattenkvoten och packningsgraden. Det framgår av figuren att hållfastheten minskar med ökande vattenkvot i det undersökta intervallet.

Här ovan har beskrivits hur hållfastheten påverkas av de enskilda parametrarna, packningsgrad, härdningstid och vattenkvot. Urförs en statistisk sammanvägning av de tre enskilda parametrarnas inverkan på tryckhållfastheten med linjär multipelregressionsanalys så erhålls ett samband enligt ekvation (3).

$$\sigma = 23,3 R_D + 3,9 t - 16,7 W + 1102 \quad (3)$$

Sambandet erhålls med multipelkorrelationskoefficienten 0,89 och signifikansen 99,99%. Beträffande beteckningar, se ekv (2).

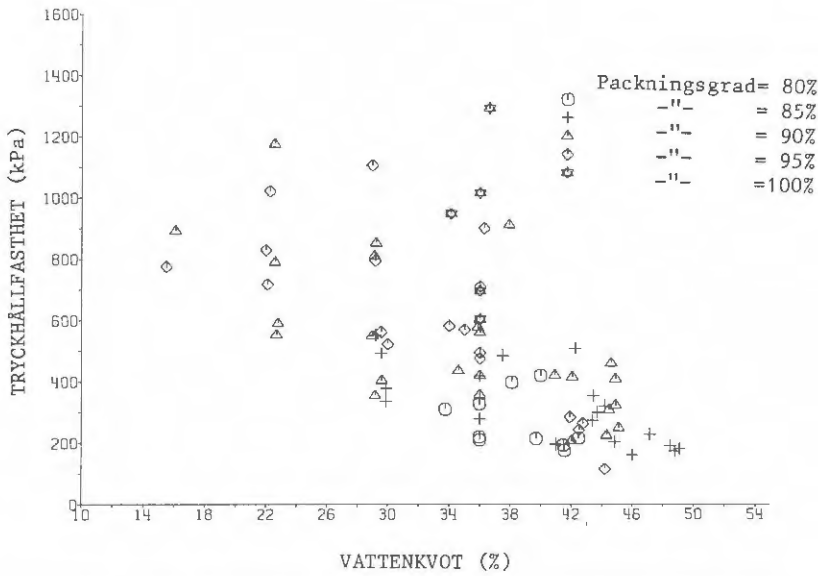


Fig 8.5.1:7. Hållfastheten som funktion av vattenkvoten och packningsgraden för våt-torr avsvavlingsprodukt.

För att utröna huruvida härdningstemperaturen påverkar hållfasthetsnivån har en undersökning motsvarande den som gjordes på flygaska från Asnaes utförts på den våt-torra avsvavlingsprodukten, se kapitel 6.5.1. Figur 8.5.1:8 visar tryckhållfastheten som funktion av härdningstemperaturen för provkroppar härdade i 7 dygn och med packningsgraden  $R_D = 0,90$ .

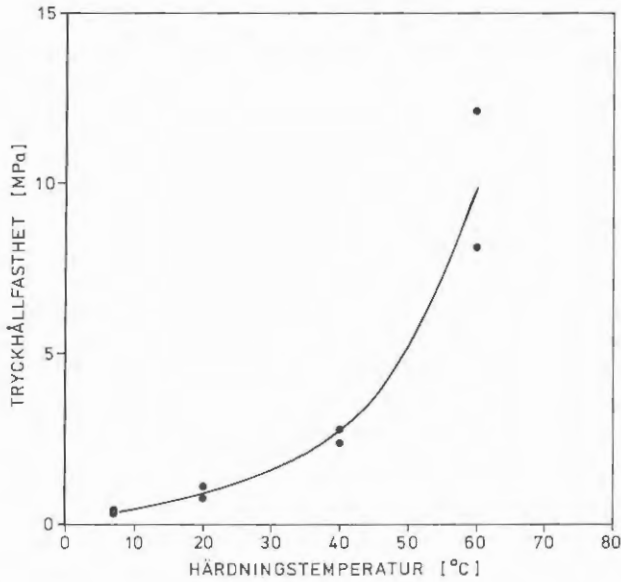


Fig 8.5.1:8. Tryckhållfastheten som funktion av härdningstemperaturen vid  $R_D = 0,90$  och 7 dygns härdningstid för torr avsvavlingsprodukt.

Figuren visar att tryckhållfastheten ökar exponentiellt med härdningstiden. Således erhålls en 25-faldig ökning när härdningstiden ökas från  $7^{\circ}\text{C}$  till  $60^{\circ}\text{C}$ .

Ur försöksresultaten har också utvärderats elasticitetsmodulen. Sambandet mellan denna och tryckhållfastheten framgår av figur 8.5.1:9.



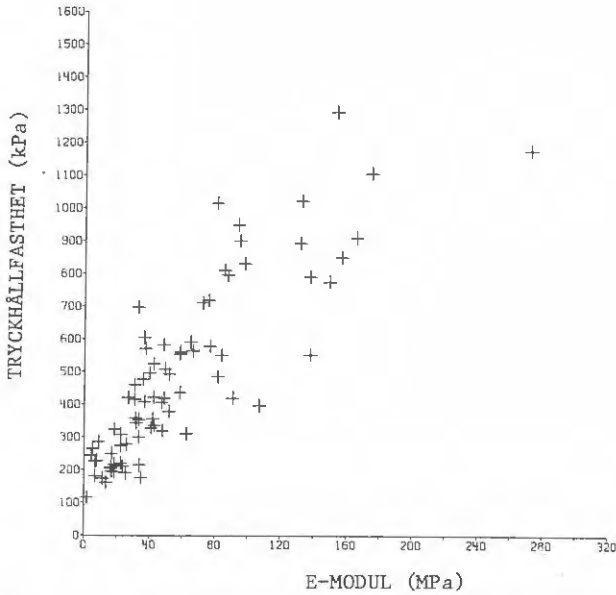


Fig 8.5.1:9. Tryckhållfastheten som funktion av E-modulen för våt-torr avsvavlingsprodukt.

Figuren visar att linjärt samband råder mellan tryckhållfasthet och E-modul även om spridningen är relativt stor, framför allt vid högre hållfastheter. Denna spridning beror troligen på att sprödheten i brott ökar med ökande hållfasthet. En linjär regression av punktsvärmen ger följande samband för den våt-torra avsvavlingsprodukten.

$$E = 153 \sigma - 16800 \quad (4)$$

där  $E$  = elasticitetsmodulen  
 $\sigma$  = tryckhållfastheten

Sambandet erhöles med korrelationskoefficienten 0,85.

## 8.5.2 Triaxialförsök

Försöken för rökgasavsvavlingsprodukten har utförts på samma sätt som för flygaskan i kapitel 6.5.2. Samma studie har gjorts i försök att utvärdera resultaten. Griffith's teori för spröda material har prövats och befunnits ej tillämplig. Utvärdering av  $\phi'$  och  $c'$  har ej heller kunnat användas för denna produkt. Utvärderingen har därför gjorts på samma sätt som i kapitel 6.5.2.

Utvärderingen av inre friktionsvinkeln  $\phi$  och kohesionen  $c$  är utförd enligt Janbu 1970. Inre friktionsvinkeln  $\phi$  blir endast något stabil för  $R_D = 1,00$  där värdet på  $\phi$  varierar  $42-47^\circ$ , se tabell 8.5.2:1. För packningsgraderna 0,80 och 0,90 tycks materialen ha sämre hållfasthet vid härdningstiderna 8 och 33 dygn.

Tabell 8.5.2:1. Utvärderade på  $\phi$  och  $c$  ur totalspänningsdiagram med hjälp av Mohrs cirklar. Isotropt konsoliderade odränerade triaxialförsök (CIU), våt-torr rökgasavsvavlingsprodukt från Asnaes.

Packningsgrad $R_D$	Härdningstid (dygn)	$\phi$ (grad)	$c$ (kPa)	Korrelationsfaktor $r$
0,80	8	$15^\circ$	96	0,83
	33	-	-	-
	63	$39^\circ$	58	0,90
0,90	8	$20^\circ$	144	0,65
	33	$19^\circ$	211	0,82
	63	$47^\circ$	103	0,90
1,00	8	$43^\circ$	141	0,89
	33	$42^\circ$	208	0,90
	59	$47^\circ$	179	0,80

Tabell 8.5.2:2. Utvärderade värden på  $\phi$  och  $c$  ur totalspänningsdiagram med hjälp av Mohrs cirklar. Isotropt konsoliderade dränerade triaxialförsök (CID), våt-torr rökgasavsvavlingsprodukt från Asnaes.

Packningsgrad $R_D$	Härddningstid (dygn)	$\phi$ (grad)	$c$ (kPa)	Korrelationsfaktor $r$
0,90	8	48°	86	0,96
	33	45°	149	0,80
	65	51°	98	0,92

Ur resultaten i Tabell 8.5.2:1 kan man dock utläsa att hållfastheten ökar med packningsgraden och att friktionsvinkeln  $\phi$  varierar mellan 15° och 47°. Resultaten från de dränerade (icke vattenmättade) försöken i Tabell 8.5.2:2 överensstämmer relativt väl med resultaten från CIU-försöken vid  $R_D = 1,00$ . Vid CIU-försök (icke vattenmättade) finns ingen tendens till lägre hållfasthet vid kortare härddningstider.

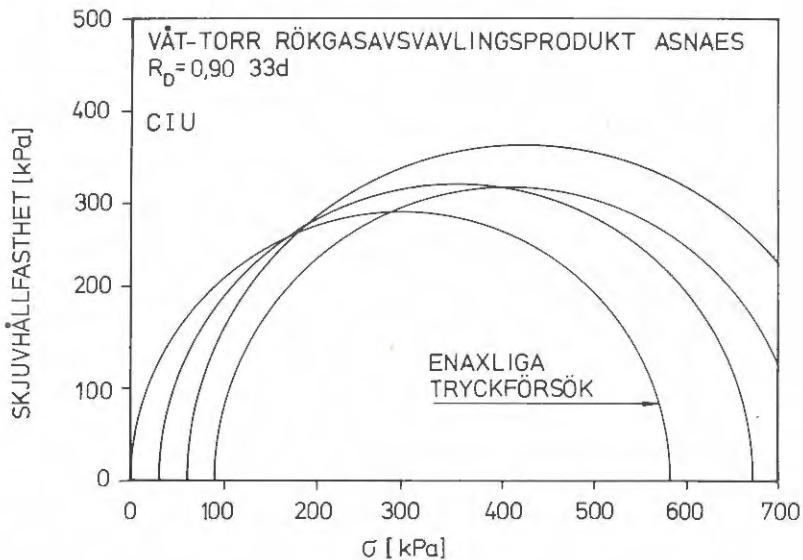


Fig 8.5.2:1. Exempel på totalspänningsdiagram för isotropt konsoliderade triaxialförsök (CIU),  $R_D = 0,90$ , härddningstid 33 dygn. Våt-torr rökgasavsvavlingsprodukt från Asnaes.

Ur totalspänningsdiagrammen i fig 8.5.2:1 och fig 8.5.2:2 kan man se att den inre friktionsvinkeln  $\phi$  knappast kan vara en verklig hållfasthetsparameter varken i de dränerade försöken eller de odränerade försöken eftersom skjuvhållfastheten knappast kan sägas öka mellan konsolideringsspänningarna 30, 60 och 90.

Fler försök och försök med större konsolideringsspänningsintervall bör utföras för att ge ett bättre statistiskt underlag för utvärderingen av hållfasthetsparametrarna. Ett bättre statistiskt underlag kan också ge klarhet i spridningens storlek.

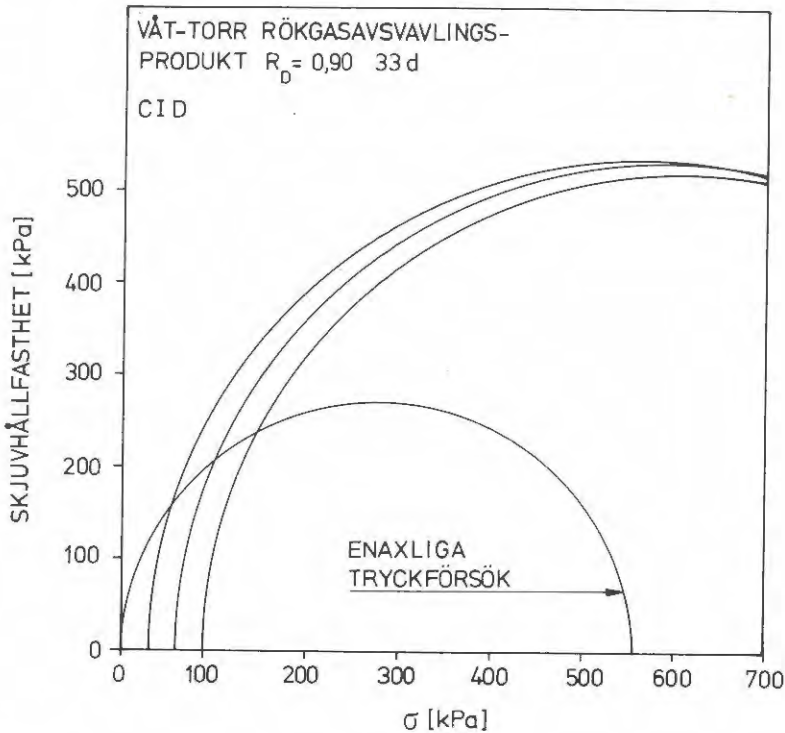


Fig 8.5.2:2. Exempel på totalspänningsdiagram för isotropt konsoliderade dränerade triaxialförsök (CID).  $R_D = 0,90$ , härdningstid 33 dygn. Våt-torr rökgasavsvavlingsprodukt från Asnaes.

## 8.5.3 Kompressionsegenskaper

Kompressionsförsök har utförts på avsvavlingsprodukten från Asnaes. Försöken har utförts på direktinpackade material enligt kapitel 5.9. Deformationshastigheten i försöken har varit 0,005 mm/min. Den låga hastigheten har använts delvis för att undvika eventuella portryck under försöken. Den första delen för de båda redovisade kurvorna i figur 8.5.3:1 upp till 1% vertikaldeformation är en effekt av dålig anläggning både för provets underdel mot ödometerbotten och för provets överdel mot stämpeln. Denna effekt är mycket svår att ta bort. Den första delen <1% på kurvorna bör därför inte räknas med i deformationsförloppet. Kompressionskurvorna för både  $R_D = 0,80$  och  $R_D = 0,90$  visar en krökning där kompressionsmodulen ökar markant. För  $R_D = 0,80$  ligger denna vid ca 1 MPa och för  $R_D = 0,90$  vid ca 2 MPa. Dessa knyckar motsvarar cementeringseffekter och packningsarbete i materialet. Kurvan  $R_D = 0,80$  ger mer än dubbelt så stor deformation som  $R_D = 0,90$  kurvan.

Kompressionsmodulen  $M = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon}$  beräknad för kurvorna ger följande värden.

$$R_D = 0,80$$

spänningsintervallet	0,5-1,0 MPa	M = 68 MPa
-"-	1,7-2,7 MPa	M = 31 MPa

$$R_D = 0,90$$

spänningsintervallet	1,0-2,0 MPa	M = 122 MPa
-"-	4,4-7,0 MPa	M = 75 MPa

Försöksresultaten visar också att deformationen inte är avtagande inom undersökt spänningsintervall. Max deformation för kurvan  $R_D = 0,80$  är 9,5% för lasten 3,5 MPa. Motsvarande för kurvan  $R_D = 0,90$  är 8% för lasten 7,5 MPa.

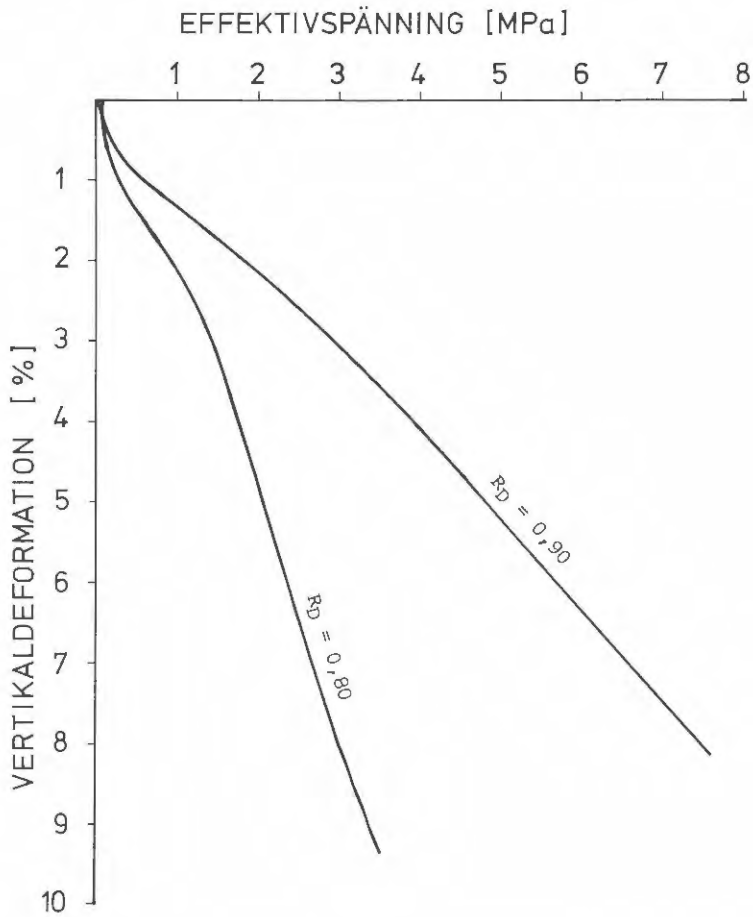


Fig 8.5.3:1. Spännings-deformationskurvor från kompressionsförsök på rökgasavsvavlingsprodukt Asnaes.  $R_D = 0,80$  och  $R_D = 0,90$ , härdningstid 7 dygn.

## 8.6 Permeabilitetsförsök

Permeabiliteten för den våt-torra avsvavlingsprodukten har bestämts enligt förfarandet beskrivet i kapitel 5.10. Provningsen utfördes på provkroppar med diametern 50 mm och höjden 100 mm. Provkroppar inpackades till packningsgraderna 0,80, 0,85, 0,90 och 1,00 och fick härda i 7, 75 och ca 100 dygn i klimatkammare med konstant temperatur om 7°C.

I figur 8.6:1 visas permeabiliteten som funktion av packningsgraden och härdningstiden. Det framgår att logaritmen för permeabiliteten är linjärt beroende av packningsgraden. Vid packningsgraden 0,90 och 100 dygns härdningstid är således permeabiliteten  $2 \cdot 10^{-8}$  m/s och motsvarande värde för packningsgraderna 0,80 och 1,00 är  $6,5 \cdot 10^{-8}$  m/s respektive  $7,5 \cdot 10^{-9}$  m/s.

Permeabiliteten kan knappast sägas vara beroende av härdningstiden. Som exempel kan nämnas vid  $R_D = 0,90$  är permeabiliteten  $3 \cdot 10^{-8}$  m/s vid härdningstiden 7 dygn och för härdningstiden 100 dygn är den  $2 \cdot 10^{-8}$  m/s. Motsvarande tendens finns vid andra packningsgrader. Skillnaden är så liten att den ryms inom ramen för noggrannheten i försöksutförandet.

Det har också visat sig att beroende om provkroppen packas in på den s kvåta sidan, dvs vid större vattenkvot än optimal vattenkvot erhålls permeabilitetsvärden som är flera gånger mindre än om motsvarande görs på den "torra sidan". Emellertid är försöksresultaten för få för att en djupare analys av detta kan låta sig göras.

Utförs en beräkning av permeabiliteten med en formel enligt ekvation (5) som grundar sig på effektiva korndiametern och portalet erhålls för  $R_D = 1,00$  permeabiliteten  $k = 8,4 \cdot 10^{-7}$  m/s och för  $R_D = 0,90$   $k = 1,2 \cdot 10^{-6}$  m/s.



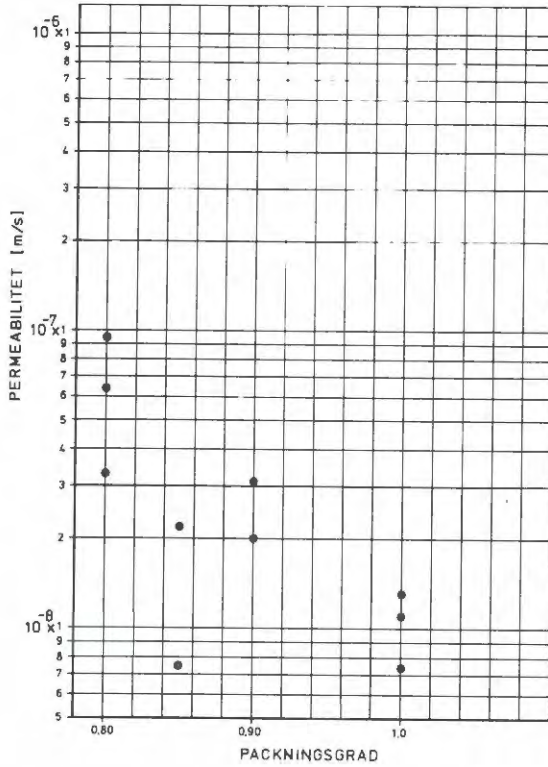


Fig 8.6:1. Permeabiliteten som funktion av packningsgraden och härdningstiden för våt-torr avsvavlingsprodukt.

$$k = 200 d_{10}^2 \cdot e^2 \quad (5)$$

$k$  = permeabiliteten i cm/s

$d_{10}$  = effektiva korndiametern i cm

$e$  = aktuellt portal

Dessa värden är ca 100 gånger högre än de som erhållits vid försöken.

Vid permeabilitetsförsök på våt avsvavlingsprodukt har för  $R_D = 1,00$  och  $R_D = 0,90$  permeabilitetsvärden erhållits som är  $k = 2 \cdot 10^{-9}$  m/s respektive  $k = 7 \cdot 10^{-9}$  m/s.



## 9. RESULTAT FRÅN BLANDNING AV FLYGASKA OCH AVSVAVLINGSPRODUKT

### 9.0 Allmänt

Förbränningen av kol ger flera olika restprodukter, t ex bottenaska, flygaska och avsvavlingsprodukt. En del av dessa produkter är sämre än andra med avseende på hanterbarhet, deponering och användbarhet. För att förbättra eller förändra egenskaperna kan blandningar av de olika produkterna vara en lösning. I detta kapitel redovisas blandning våt-torr avsvavlingsprodukt och flygaska, båda från Asnaesverket. I angivna blandningsförhållanden mellan flygaska och avsvavlingsprodukt har ej tagits hänsyn till den redan i avsvavlingsprodukten ingående flygaskamängden som är ca 40%. Om man gör en omräkning där man tar hänsyn till den redan befintliga askan motsvaras angivna blandningsförhållanden enligt följande

$$1:1 \Rightarrow 2,3:1$$

$$2:1 \Rightarrow 4,0:1$$

$$3:1 \Rightarrow 5,7:1$$

### 9.1 Kemiska huvudkomponenter

Tabell 9.1:1 visar den kemiska sammansättningen för blandningar mellan våt-torr avsvavlingsprodukt och flygaska från Asnaes. Någon större förändring av huvudkomponenterna sker inte utan halterna följer blandningsförhållandet med inblandade produkter.

Tabell 9.1:1. Kemiska huvudbeståndsdelar i blandningar mellan våt-torr rökgasavsvavlingsprodukt och flygaska från Asnaes.

	flygaska: rökgasavsvavlingsprodukt		
	1:1	2:1	3:1
glödgnings- förlust	6,8	5,3	4,6
CaO	22	18	15
SiO <sub>2</sub>	36	40	43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,6	5,3	5,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18	20	21
MgO	2,0	2,3	2,4
K <sub>2</sub> O	1,3	1,5	1,6
Na <sub>2</sub> O	0,4	0,4	0,5
S <sub>tot</sub>	3,4	2,6	2,3
CaSO <sub>4</sub>	3,2	2,5	2,5
CaSO <sub>3</sub>	10	7,0	5,6
CaCO <sub>3</sub>	8,9	6,5	5,6
Ca(OH) <sub>2</sub>	13	9,6	8,3

Det som mera markant har förändrat flygaskan är höjningen av kalkhalten, vilket också bör betyda en förbättring av dess egenskaper. I den nedre delen av tabell 9.1:1 kan man utläsa tillskottet av sulfid och sulfat i flygaskan med ökande andel avsvavlingsprodukt.

## 9.2 Allmänna tekniska parametrar

Kornfördelningen för blandningen flygaska och avsvavlingsprodukt har inte kunnat bestämmas enligt vad som tidigare redovisats i kapitel 8.4 då tillskottet av kalk ger flockulerings effekter. Men eftersom flygaskan har huvudsaklig kornfördelning i siltfraktion och avsvavlingsprodukten bedöms som ett material i siltfraktion kan man med god säkerhet säga att blandningarna liknar i kornstorlek ett siltmaterial.

Tabell 9.2:1. Specifik yta för blandningar flygaska - avsvavlingsprodukt från Asnaes.

blandningsförhållande flygaska: avsvavlingsprodukt

	1:1	2:1	3:1
specifik yta m <sup>2</sup> /kg	440	407	390

I tabell 9.2:1 redovisas den specifika ytan för blandningarna. Värdet på specifika ytan kan inte sägas följa blandningsförhållandet utan har i stället sjunkit drastiskt. Värdet för avsvavlingsprodukten enbart är 1260 m<sup>2</sup>/kg och för enbart flygaskan 539 m<sup>2</sup>/kg. Redovisade värden ligger samtliga under dessa. Dessutom minskar den specifika ytan ytterligare med ökad flygaskeinblandning.

### 9.3 Packningsegenskaper

Inpackningsförsök utfördes med tung laboratorieinpackning, se kapitel 5.6, på de olika blandningsförhållandena mellan flygaska och våt-torr avsvavlingsprodukt.

Resultaten av försöken är redovisade i figur 9.3:1 och tabell 9.3:1.

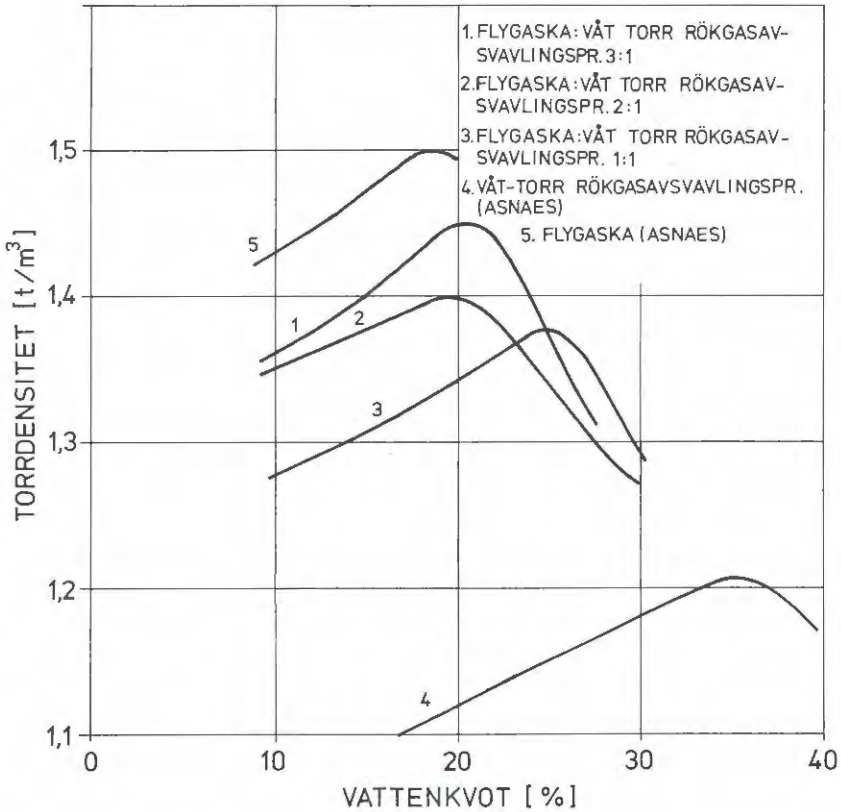


Fig 9.3:1. Resultat av tung laboratorieinpackning på olika blandningsförhållanden mellan flygaska och våt-torr avsvavlingsprodukt.

Av figuren framgår att ju större mängd flygaska som ingår i blandningen desto högre blir maximal torrdensitet, samtidigt som optimal vattenkvot tenderar att minska

Tab 9.3.1. Maximal torrdensitet och optimal vattenkvot för olika blandningsförhållanden mellan flygaska och våt-torr avsvavlingsprodukt (ASP).

Aska: ASP	$\rho_{\max}$ t/m <sup>3</sup>	W <sub>opt</sub> %
1:1	1,43	20,6
2:1	1,40	19,4
3:1	1,38	25,2

En jämförelse mellan erhållna värden för ren flygaska eller avsvavlingsprodukt visar att värdena på maximal torrdensitet och optimal vattenkvot influeras mest av den produkt som ingår till största delen, nämligen flygaska.

#### 9.4 Hållfasthetsegenskaper

En serie enaxliga tryckförsök utfördes på provkroppar med packningsgraden 0,90 och optimal vattenkvot för de ovan beskrivna blandningsförhållandena. Provkropparna fick härda mellan 1 och 95 dygn innan de provtrycktes. Två provkroppar preparerades för varje aktuell provningstidpunkt. Detta i syfte att få en uppfattning om spridningen i resultatet.

I figur 9.4:1 redovisas hållfastheten som funktion av härdningstiden för de olika blandningsförhållandena.

Av figuren framgår att hållfastheten hos provkropparna ökar starkt med härdningstiden och att ökningen tenderar att vara större vid längre härdningstid. Vidare framgår att spridningen i tryckhållfastheten blir större vid längre härdningstid. Detta beror förmodligen på att brottet då blir sprödare.

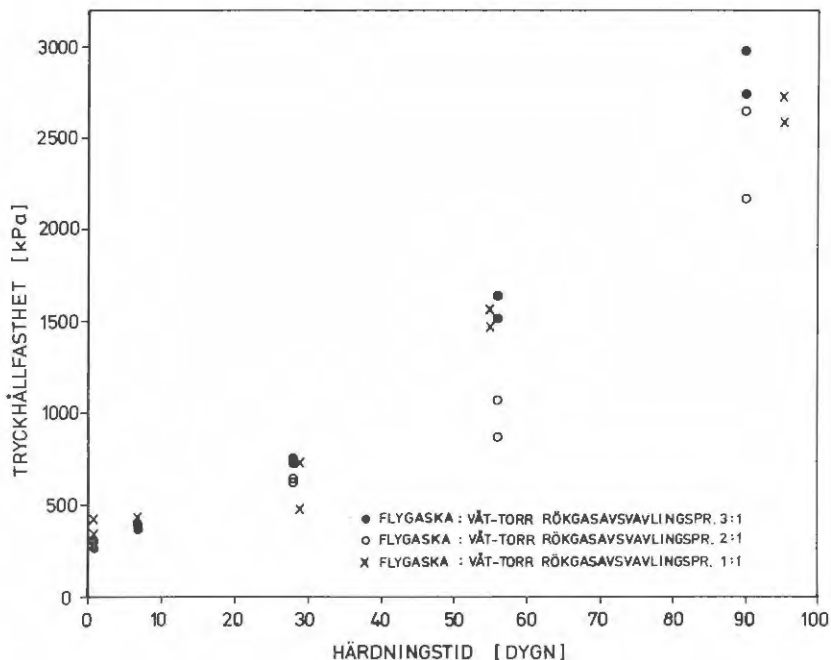


Fig 9.4:1. Tryckhållfastheten som funktion av härdningstiden för olika blandningsförhållanden mellan flygaska och torr avsvavlingsprodukt.

Av figuren framgår också att det inte finns någon signifikant skillnad mellan de olika blandningsförhållandena utan att tryckhållfastheten vid ca 90 dygns härdningstid är ca 2700 kPa och 300-400 kPa vid 1-7 dygn. Detta innebär att hållfastheten har ökat 8-9 gånger.

Resultaten visar att man ur hållfasthetssynpunkt har erhållit en betydligt bättre produkt genom blandning av flygaska och torr avsvavlingsprodukt än för vardera produkten.

Ur de enaxliga tryckförsöken utvärderades elasticitetsmodulen som en sekantmodul från den punkt där spänningen

börjar öka med deformationen till maximal hållfasthet. I figur 9.4:2 redovisas elasticitetsmodulen som funktion av tryckhållfastheten vid de olika blandningsförhållandena.

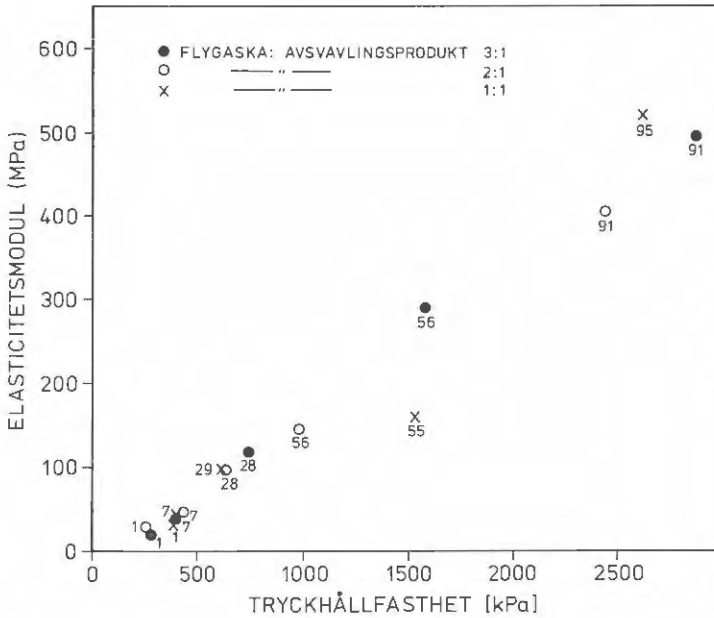


Fig 9.4:2. Elasticitetsmodulen som funktion av tryckhållfastheten för olika blandningsförhållanden mellan flygaska och våt-torr avsvavlingsprodukt.

Av figuren framgår att elasticitetsmodulen tillväxer linjärt med ökande tryckhållfasthet och att ingen sinifikant skillnad finns mellan de olika blandningsförhållandena utan att det endast är härdningstiden som bestämmer nivån på elasticitetsmodulen. En linjär regressionsanalys ger följande samband mellan modul och tryckhållfasthet

$$E = 32700 + 187 \sigma \quad (6)$$

där  $E$  = elasticitetsmodul i MPa  
 $\sigma$  = tryckhållfasthet i kPa

## 9.5 Permeabilitet

Permeabiliteten för de olika blandningsförhållandena mellan flygaska och våt-torr avsvavlingsprodukt bestämdes enligt sätt som är redovisat i kapitel 5.10.

Undersökningen är gjord på provkroppar som packats in till packningsgraden  $R_D = 0,90$  vid optimal vattenkvot. Dessa provades sedan efter att ha härdat i 7 och 95 dygn. Alla tre blandningsförhållandena provades på detta sätt.

I figur 9.5:1 är resultatet redovisat som permeabiliteten som funktion av härdningstiden.

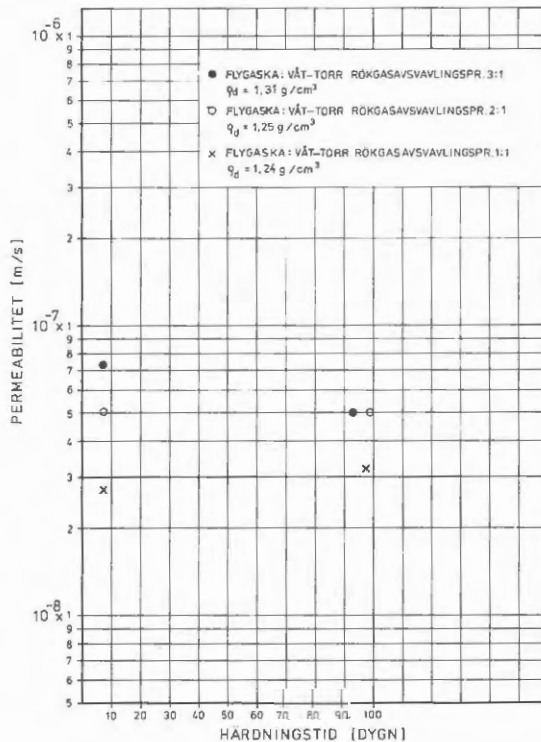


Fig 9.5:1. Permeabiliteten som funktion av härdningstiden för olika blandningar av flygaska och våt-torr avsvavlingsprodukt inpackade vid optimal vattenkvot och  $R_D = 0,90$ .



Av figuren framgår att permeabiliteten är oberoende av härdningstiden i det undersökta tidsintervallet. Det framgår också att permeabiliteten är beroende av blandningsförhållandet. Det visar sig att med ökande andel flygaska ökar permeabiliteten något. Sålunda erhålls för blandningsförhållandet aska:avsvavlingsprodukt 1:1 permeabiliteten  $k = 3 \cdot 10^{-8}$  m/s, för 2:1  $k = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s och för 3:1  $k = 6 \cdot 10^{-8}$  m/s. Dessa erhållna värden visar sig ligga mellan permeabiliteten för ren avsvavlingsprodukt och ren flygaska.

## 10. JÄMFÖRELSE MELLAN OLIKA RESTPRODUKTERS EGENSKAPER

## 10.0 Allmänt

I detta kapitel redovisas en jämförelse av tekniska egenskaper för de i denna undersökning förekommande produkterna. Dessa kommer också att i görligaste mån jämföras med några i litteraturen redovisade resultat från liknande undersökningar. Ur litteraturen har utvalts 3 st flygaskor som referens till vår undersökning. Dessa askor kommer från kolpulveranläggningar i Braehead, Skottland, Skelton Grange, England och Trenton Channel, USA.

Jämförelsen avser för de undersökta produkterna och för referensaskorna de olika egenskaper och parametrar som är angivet i kapitel 4. Således jämförs kemiskt innehåll, mikrostruktur, allmänna tekniska egenskaper, packningsegenskaper, hållfasthetsegenskaper, deformationsegenskaper och vattengenomsläpplighet.

Dessutom diskuteras i avsnitt 10.4 och 10.5 olika faktorer som påverkar framför allt flygaskors hållfasthet och permeabilitet.

## 10.1 Kemiska huvudkomponenter och mikrostruktur

De mest väsentliga beståndsdelarna kan sägas vara de kemiska komponenter som huvudsakligen bestämmer restprodukternas egenskaper. Dessa komponenter, som är  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ , fri kalk och oförbränt material, spelar en viktig roll för materialens puzzolanitet (cementerings). I tabell 10.1:1 redovisas samtliga undersökta produkter och flygaskorna från Trenton Channel, Braehead och Skelton Grange. De redovisade halterna för CaO är inte verklig andel fri kalk, vilken i allmänhet är mycket lägre. Analyser av halten fri kalk för Braehead och Skelton Grange har redovisats i litteraturen och är <0,01% respektive 0,03%, Sherwood och Ryley (1966), vilket är långt under beräknade värden CaO i tabell 10.1:1. Avsaknaden av fri kalk i flygaska kan eliminera puzzolaniteten, Lin et al (1971).

Motsvarande värden på halten fri kalk för undersökta askor i denna rapport är ej bestämda.

Halten  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  för flygaskorna från kolpulverförbränning redovisade i tabell 10.1:1 varierar mellan 74% och 86% vilket får sägas vara på en nivå som bör vara positivt för askornas egenskaper. Däremot är halterna för flygaskorna från rosteldning i Norrköping och Perstorp 44% respektive 47%. Betydelse för askornas egenskaper har också halten oförbränt, vilken är större än 25% i Wanderrostaskorna, medan för kolpulveraskorna är samtliga värden mindre än 5%. Hög restkolhalt i flygaska betyder oftast dålig förbränning, vilket då också bl a medför låg halt  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ , låg halt amorft glas och låg andel korn med sfärisk form.

Tabell 10.1:1. Jämförelse av de viktigaste kemiska komponenterna för olika kolrestprodukter.

		$\text{SiO}_2$ %	$\text{Al}_2\text{O}_3$ %	CaO %	halt oförbränt %
Flygaska	Asnaes	49	26	5,4	3,3
	Ingå	53	23	3,3	3,6
	Wilhelmshafen	53	30	4,0	0,9
	Trenton Channel	47	27	0,9	4,3
	Braehead	53	33	1,0	3,7
	Skelton Grange	49	25	2,3	1,4
	Norrköping	32	15	6,1	25
	Perstorp	30	14	5,9	33
	Uppsala (oljeaska)	1,9	0,4	0,8	65
Botten- aska	Asnaes	46	19	5,1	9,4
	Norrköping	45	20	4,3	18
	Perstorp	42	19	6,0	17
	Wilhelmshafen	54	27	5,3	0,7
Rökgasav- svavlings- produkt	(våt-torr) Asnaes	17	10	40	..
	(våt) Wilhelms- hafen	1,5	0,4	37	-

De låga värdena för halten  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  och de höga för halten oförbränt för Norrköpings- och Perstorspaskorna försämrar materialens egenskaper i de flesta avseenden. Lin et al (1971) och Sherwood och Ryley (1966) nämner att flygaskor med halt oförbränt större än 16% uppvisar låg puzzolanitet eller ingen. Andra undersökningar visar dock att halter oförbränt material större än 5-10% påverkar puzzolaniteten. Silikaterna ( $\text{SiO}_2$ ) förekommer som kristallin kvarts och tillsammans med  $\text{Al}_2\text{O}_3$  som mullit och glas i flygaska.

Flygaskan från oljeförbränning i Uppsala uppvisar helt avvikande sammansättning jämfört med övriga flygaskor. Det framgår av tabell 10.1:1 att halten  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  är mycket låg ~2% och att glödgningsförlusten är mycket hög ~65%. Huvudbeståndsdelarna är svavel (~7%), nickel och vanadin. Oljeaskan har inte heller med kolaskorna jämförbara egenskaper.

Bottenaskorna från Asnaes, Norrköping, Perstorp och Wilhelmshafen är mycket lika i sin sammansättning. De redovisade flygaskorna  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 61-81\%$ ,  $\text{CaO} = 4-3-6,0\%$ , halt oförbränt = 0,7-18%. De högre värdena kommer från Norrköping och Perstorp. Trots att dessa halter synes ligga på en relativt lämplig nivå visar inte bottenaskorna puzzolanska egenskaper.

Avsvavlingsprodukterna skiljer sig från flygaskorna och bottenaskorna. Avsvavlingsprodukterna utgörs huvudsakligen av kalciumsulfid, kalciumsulfat, kalciumkarbonat och kalciumhydroxid. Totalsvavelhalten för Wilhelmshafen är 19% och för Asnaes ~7%. Den våt-torra Asnaesprodukten innehåller relativt mycket flygaska (30-40%), vilket också ger den dess silikat- och aluminiumnehåll. Det som har visat sig som glödgningsförlust i dessa produkter är förbränning av karbonater ( $\text{CaCO}_3$ ) och en del svavelföreningar samt vatten. Därför kan den inte heller jämföras med askornas glödgningsförlust (halt oförbränt). Avsvavlingsprodukterna har i sig själva cementerande egenskaper p g a sitt kalk- och gipsinnehåll.

Vid blandningar mellan flygaska och avsvavlingsprodukter ökar puzzolaniteten jämfört med den man erhåller enbart i flygaska. Orsakerna är bl a den att avsvavlingsprodukterna ger ett tillskott av kalk, vilket ger förbättrande cementeringseffekter.

Mikrostrukturen anknyter för det mesta till materialets kemiska innehåll och sammansättning.

Kolrestprodukternas mikrostruktur har också relativt stor betydelse för deras egenskaper. En sammanställning över samtliga undersökta produkters karakteristiska kornstruktur redovisas i tabell 10.1:2. Flygaskornas korn, speciellt från kolpulvereldning, är till största delen sfäriska, enstaka korn är av oregelbunden form. De oregelbundna kornen är ibland porösa innehållande mindre sfärer. Flygaskorna innehåller ofta scenosfärer, ihåliga sfärer ibland öppna där mindre sfärer ofta är placerade. Halten sfäriska korn är långt ifrån lika stor i askan från Wanderrostförbränningen. Kornen från rosteldningen är oftast av oregelbunden form med håligheter, ibland också med fibröst (oförbränt kol) utseende. Bottenaskorna består av korn med betydligt större storlek än flygaska. Kornen har förglasat skal, ofta med håligheter. Innanför detta skal är kornen porösa. Sfäriska korn förekommer inte alls. Bottenaskor med mycket porös struktur ger mycket låga densiteter vid packningsförsök, se kapitel 10.3. Den mycket glasiga ytan kan möjligen vara bidragande till materialets obefintliga härdningsegenskaper.

Tabell 10.1:2. Sammanställning av olika kolrestprodukters typiska kornstruktur och färg.

Restprodukt		Typisk kornform och struktur	Färg
Flygaska Kolpulver- eldning	Asnaes Ingå Wilhelmshafen Trenton Channel Braehead Skelton Grange	Huvudsakligen sfäriska korn delvis scenosfärer. Enstaka icke sfäriska korn förekommer.	Grå
Flygaska Wander- rostald- ning	Norrköping Perstorp	Huvudsakligen korn med odefinierbar form. Sfäriska korn förekommer. Porösa och fibrösa korn.	Svart
Botten- aska	Asnaes Wilhelmshafen Norrköping Perstorp	Korn med odefinierbar struktur ofta sammansmälta till större aggregat. Innanför den glasiga ytan är varje korn poröst.	Svart
Rökgasavsvav- lingsprodukt	(Våt-torr) Asnaes  (Våt) Wilhelmshafen	I stort odefinierbar struktur. Porösa mindre partiklar sammansatta till större. Sfäriska korn från flygaska förekommer rikligt.  Tunna flak oftast sammansatta ibland i rosform.	Grå  Vit

Rökgasavsvavlingsprodukterna har en kornstruktur som mycket nära anknyter till deras kemiska innehåll. För Asnaesprodukten är det kalciumoxid och för Wilhelmshafenprodukten är det kalciumsulfid och sulfat. Kalciumoxiden i Asnaesprodukten uppträder i odefinierbar porös struktur ofta sammansatt såsom aggregat. Sfäriska flygaskapartiklar förekommer inbakade i detta. Den porösa till synes mycket lösa strukturen är förmodligen den del i produkten som ger materialet dess låga densitet  $1,2 \text{ t/m}^3$  vid den relativt höga optimala vattenkvoten 36%, se kapitel 10.3 och 8.4. Kalciumsulfiten som tycks dominera i Wilhelmshafenprodukten är mycket tunna flak med skarpa kanter ofta sammansatta till större aggregat. Denna bladliknande struktur är en av orsakerna till materialets vattenhållande egenskaper.



## 10.2 Allmänna tekniska parametrar

Kornfördelningen för olika kolrestprodukter varierar kraftigt beroende på varifrån produkten kommer i förbränningsprocessen. Avsvavlingsprodukternas kornfördelning ligger huvudsakligen inom siltfraktion (Tabell 10.2:1) och är ensgraderad  $C_U = 4$ . Den våta avsvavlingsproduktens kornfördelning är beroende av den kemiska sammansättningen, ju större andel kalciumsulfat desto grövre kornfördelning. Flygaskornas kornfördelning från kolpulverledning varierar mest med avseende på graderingstalet  $C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ . Askorna från Wilhelmshafen och Braehead är mycket ensgraderade,  $C_U = 1,5$  respektive 1,8 redovisas i Tabell 10.2:1. Dessa flygaskor tycks sakna den finare fraktion som finns i de övriga  $d_{10}$  för Braehead och Wilhelmshafen  $15 \mu\text{m}$  respektive  $20 \mu\text{m}$  ligger nästan en tiopotens högre än övriga kolpulveraskor. Graderingstalet ligger för de övriga flygaskorna inom intervallet ( $C_U = 5-15$ ) för mellangraderad kornfördelning. Samtliga flygaskor från kolpulverledning kan ändå liknas vid sandig silt.

Tabell 10.2:1. Sammanställning av allmänna tekniska parametrar för kolrestprodukter.

Restprodukt		Korn-densitet kg/m <sup>3</sup>	Specifik yta m <sup>2</sup> /kg	Karakteristisk kornstorlek $\mu\text{m}$		Graderings- tal $C_U = d_{60}/d_{10}$	Klassificering enligt jordarts- beteckningar	
				$d_{10}$	$d_{60}$			
Flygaska	Asnaes	2280	539	4	-	40	10,0	sandig Silt
	Ingå	2200	298	3	-	20	6,7	sandig Silt
	Wilhelmshafen	2210	270	20	-	30	1,5	sandig Silt
	Trenton Channel	2360	305	3	-	20	6,7	sandig Silt
	Braehead	2240	397	15	-	27	1,8	sandig Silt
	Skelton Grange	2130	360	4	-	25	6,2	sandig Silt
	Norrköping	2390	-	10	-	125	12,5	siltig Sand
	Perstorp	2180	-	30	-	300	10,0	siltig Sand
	Uppsala (oljeeldning)	2750	-	-	-	~6	-	-
	Botten- aska	Asnaes <sup>1)</sup>	1910	-	80	-	1600	20,0
Wilhelmshafen <sup>1)</sup>		2170	-	60	-	500	8,3	sandigt Grus, stenigt sandigt Grus, stenigt
Norrköping <sup>2)</sup>		2025	-	400	-	7000	17,5	
Perstorp <sup>2)</sup>		2100	-	700	-	8000	11,4	
Avsvav- nings- produkt	(våt-torr) Asnaes	2520	1240	(~5)	-	(~20)	(4)	Silt
	(våt) Wilhelms- hafen	2950	-	(~3)	-	(~12)	(4)	Silt

<sup>1)</sup> Bottenaskan från Wilhelmshafen är mald efter uttag varför den inte innehåller material >20 mm.

<sup>2)</sup> Kornfördelningen utförd på material <20 mm. Bottenaskorna innehåller ofta större slagstycken ~500 mm.

Flygaskor från Wanderrosteldning i Norrköping och Perstorp är något grövre än kolpulveraskorna och kornfördelningen kan jämföras med siltig sand. Wanderrostflygaskornas graderingstal anger också att de är mellangraderade. Bottenaskorna är i de här sammanhangen ett grovt material med relativt stor halt korn större än 20 mm, någon representativ bestämning har ej kunnat utföras. Slaggstycken med en storlek upp till diametern 400 mm förekommer. De flesta bottenaskor kan i huvudsak liknas vid stenigt grus. Flera bottenaskor visar graderingstal >15 som motsvarar månggraderad kornfördelning. Bottenaskornas korn är porösa och relativt lätt krossbara varför materialens kornstorlek är mycket lätt påverkbar. Bottenaskan från Wilhelmshafen är mald efter uttag, vilket medför att den inte innehåller kornstorlekar större än 20 mm. Den uppvisar också en mellangraderad kornfördelning i sandfraktion, se Tabell 10.2:1 och Figur 10.2:1. I Figur 10.2:1 redovisas en zonindelning av askprodukternas kornfördelning för att ytterligare illustrera materialens olika kornfördelning. Flygaska från kolpulverledning huvudsakligen siltmaterial, flygaska från Wanderrostförbränning huvudsakligen sandmaterial och bottenaska huvudsakligen grusmaterial. Den malda bottenaskan ligger för sig.

Korndensitet för samtliga flygaskor från koleldning är 2130-2390 kg/m<sup>3</sup>, vilket antyder porösa partiklar och bildning av scenosfärer. Jämförelse kan göras med jordmaterial som har korndensitet normalt i intervallet 2700-2800 kg/m<sup>3</sup>. Bottenaskorna ligger på ännu en något lägre nivå 1910-2170 kg/m<sup>3</sup>, vilket tyder på något stötträt halt inneslutna porer än för flygaskan. Bottenaskornas porositet visas ytterligare från packningsförsök i nästa kapitel 10. Den våta rökgasavsvavlingsprodukten från Wilhelmshafen har relativt hög korndensitet 2950 kg/m<sup>3</sup>, vilket beror av det kemiska innehållet av kalciumsulfit.

Specifika ytan för flygaskor har betydelse för askornas hållfasthetsegenskaper, speciellt att ökad specifik yta



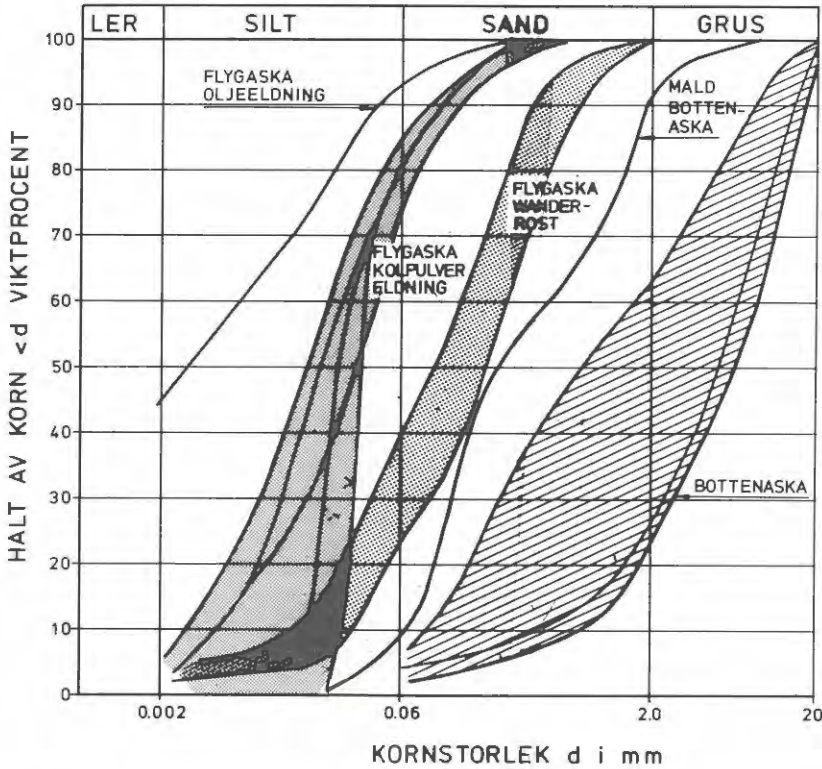


Fig 10.2:1. Sammanställning av olika kolrestprodukters kornfördelning.

ger ökad reaktionshastighet men har ej någon större effekt på hållfasthetens slutvärden, Lin et al (1971). Resultaten angivande specifika ytan redovisade i Tabell 10.2:1 hos flygaskor från kolpulvereldning  $270\text{--}539\text{ m}^2/\text{kg}$  är mycket normala och ligger inom intervallet för att åtminstone inte ge askorna försämrade egenskaper. Något direkt samband mellan kornfördelning och specifik yta tycks inte föreligga i en jämförelse mellan flygaskor från olika förbränningsanläggningar. I kapitel 6.3 framgår det dock att så är fallet i jämförelse mellan olika kornstorlekar i en flygaska från en anläggning. Värdet  $1240\text{ m}^2/\text{kg}$  är mycket högt för den våt-torra avsvavlingsprodukten speciellt i jämförelse med värdena på flygaska.

## 10.3 Packningsegenskaper

I Figur 10.3:1 visas att flygaskorna från kolpulvereldning ger något varierande värden för maximal torrdensitet 1,33-1,54 t/m<sup>3</sup> medan den optimala vattenkvoten är relativt konstant 18-21%.

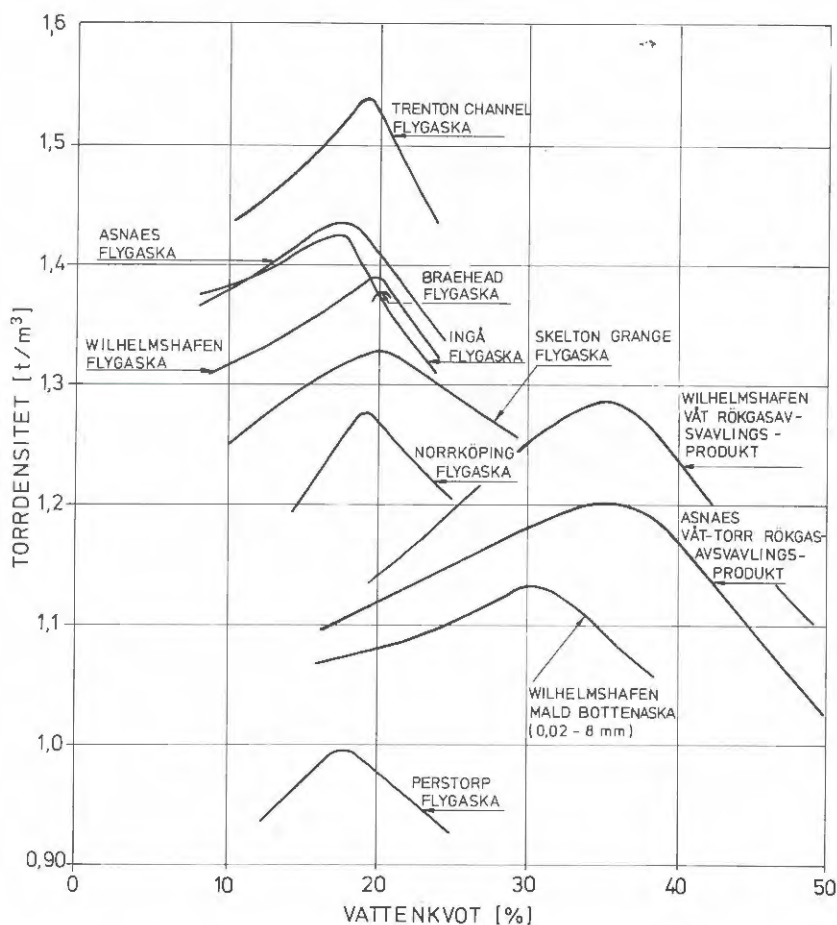


Fig 10.3:1. Packningsegenskaper för olika kolrestprodukter.

Maximal torrdensitet för jämförbara jordmaterial i siltfraktion ligger i nivån 1,7-1,8 t/m<sup>3</sup>. Noterbart är också att maximala torrdensiteten för flygaskorna från kolpulvereldning tycks ha ett samband med korndensiteten, dvs askan

med den största korndensiteten har också högst värde på maximal torrdensitet. T ex Skelton Grange  $\rho_k = 2130 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_d = 1,33 \text{ t/m}^3$ , Trenton Channel  $\rho_k = 2360 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_d = 1,54 \text{ t/m}^3$ . Dessutom kan man också säga att ju högre korndensitet desto närmre toppen på packningskurvan ligger gränsen för vattenmättnad, vilket redovisas i Tabell 10.3:4. Dessa egenskaper är förmodligen en följd av halten scenosfärer och andra porösa partiklar i flygaskan. Packningskurvorna för de olika askorna är utförda enligt olika standardmetoder. För flygaskorna från Braehead och Skelton Grange är bestämningen utförd enligt British Standard B.S.1377 (1961), vilken motsvarar svensk lätt laboratoriestampning. Dessa standardmetoder ger något lägre värden än vad som erhålls vid svensk tung laboratoriestampning och modifierad AASHO (amerikansk standard), som har använts för övriga produkter. Någon direkt jämförelse mellan resultaten från lätt respektive tung laboratoriestampning har ej funnits att tillgå.

Flygaskan från Norrköping och Perstorp, med som tidigare redovisade i kapitel 10.1 mycket porösa kornstrukturer, ger betydligt lägre maximala torrdensiteter. Värdet för Perstorsaskan är extremt lågt,  $\rho_d = 0,99 \text{ t/m}^3$ . Anmärkningsvärt är också materialens stora skillnad mellan optimal vattenkvot och vattenmättnadsgräns, 19-36% för Norrköpingsaskan och 18-55% för Perstorsaskan. Resultatet är förmodligen en effekt just av kornens stora innehåll av hålrum. En viss nedkrossning av kornen från Wanderrostaskorna vid packningsförfarandet är möjlig.

Tabell 10.3:1. Resultat från packningsförsök på olika kolrestprodukter.

Restprodukt		Optimal vattenkvot %	Maximal torrdensitet t/m <sup>3</sup>	Vattenmättnadsgräns vid max densitet %
Flygaska	Asnaes	18	1,43	26
	Ingå	18	1,42	25
	Wilhelmshafen	20	1,39	27
	Trenton Channel	19	1,54	23
	Braehead	21	1,38	28
	Skelton Grange	20	1,33	28
	Norrköping	19	1,28	36
	Perstorp	18	0,99	55
Bottenaska	Asnaes		0,67	
	Wilhelmshafen (mald)	30	1,13	42
	Norrköping		0,84	
	Perstorp		0,84	
Röksavsvavlingsprodukt	Asnaes (våt-torr)	36	1,20	44
	Wilhelmshafen (våt)	33	1,28	44

Bottenaskornas packningsegenskaper är bestämda på material mindre än 20 mm med vibreringsmetod för att undvika nedkrossning av materialet. För den malda bottenaskan från Wilhelmshafen är dock standardiserad tung packning utförd. Även här kan ytterligare en viss nedkrossning förväntas. Vid bestämning av maximal torrdensitet för bottenaskorna från Asnaes, Norrköping och Perstorp har mycket låga värden erhållits, 0,67-0,84 t/m<sup>3</sup>. Som jämförelse kan nämnas att torrdensiteten för lättklinker i motsvarande kornfördelning är 0,35-0,4 t/m<sup>3</sup>. Bottenaskan från Wilhelmshafen ger också en låg maximal torrdensitet (1,13 t/m<sup>3</sup>) trots malningen, som borde medföra att mindre andel hålrum erhållits. Materialet innehåller inte korn större än 8 mm efter malning. Materialets relativt höga optimala (30%) vattenkvot antyder att korn med en mer skarpkantad struktur har erhållits vid malningen.

Av tabell 10.3:1 framgår att den våt-torra rökgasavsvavlingsprodukten från Asnaes har en relativt låg maximal torrdensitet ( $1,20 \text{ t/m}^3$ ). Produktens låga densitet är mycket anmärkningsvärd med tanke på hållfasthetsegenskaperna, se kapitel 10.4. Materialets mycket porösa struktur och höga värde på specifika ytan ( $1240 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) ger hög optimal vattenkvot (36%). Avsvavlingsprodukten är mycket instabil för vattenkvoter över den optimala, vilket medför svårigheter t ex vid packning.

Den våta rökgasavsvavlingsprodukten från Wilhelmshafen har mycket lika packningsegenskaper med den våt-torra, som visas i figur 10.3:1 och tabell 10.3:1. Maximal torrdensitet för den våta produkten är  $1,28 \text{ t/m}^3$  vid optimal vattenkvot 33%. Vattenmättnadsgränsen för båda avsvavlingsprodukterna ligger på 44%.

#### 10.4 Hållfasthetsegenskaper

Ovan i kapitel 6.3, 8.3 och 9.3 har hållfasthetsegenskaper för flygaska, torr avsvavlingsprodukt och blandningar mellan dessa redovisats var för sig. Här nedan görs en sammanställning och jämförelse mellan dessa produkter och något om i litteraturen redovisade resultat.

Ovan har visats att dessa restprodukters hållfasthetsegenskaper kan påverkas genom att förändra dess relativa densitet  $R_D$ , härdningstid och vattenkvot. Detta är alla faktorer som endast är bundna till vad som görs med restprodukten först efter att den lämnat verket. Detta innebär att hållfastheten kan ökas från en nivå till en annan genom packning, vatteninblandning och härdning. Däremot bestäms den slutliga hållfasthetsnivån av sådana faktorer som förbränningsteknik, förbränningseffektivitet och kolets sammansättning. De tekniska parametrar som härvid kan förändras är kemiska huvudkomponenter, kornfördelningskurvan, halt oförbränt och kornform.



I Figur 10.4:1 visas hållfastheten som funktion av härdningstiden för de i denna undersökning provade restprodukterna och referensaskorna. Jämförelsen gäller vid optimal vattenkvot och packningsgraden  $R_D = 0,90$  med undantag för referensaskorna. Av figuren framgår att tryckhållfastheten tillväxer ringa eller måttligt för både flygaskan och torr avsvavlingsprodukt, medan däremot för blandningen mellan dessa produkter i proportionerna 1:1, 2:1 och 3:1 ger en stark hållfasthetstillväxt med tiden.

Av figuren framgår vidare att den undersökta flygaskan från Asnaesverket når en stor del av sin hållfasthetsökning under de 28 första dygnen medan däremot den torra avsvavlingsprodukten och blandningarna inte vid 90 dygn har nått sin slut-

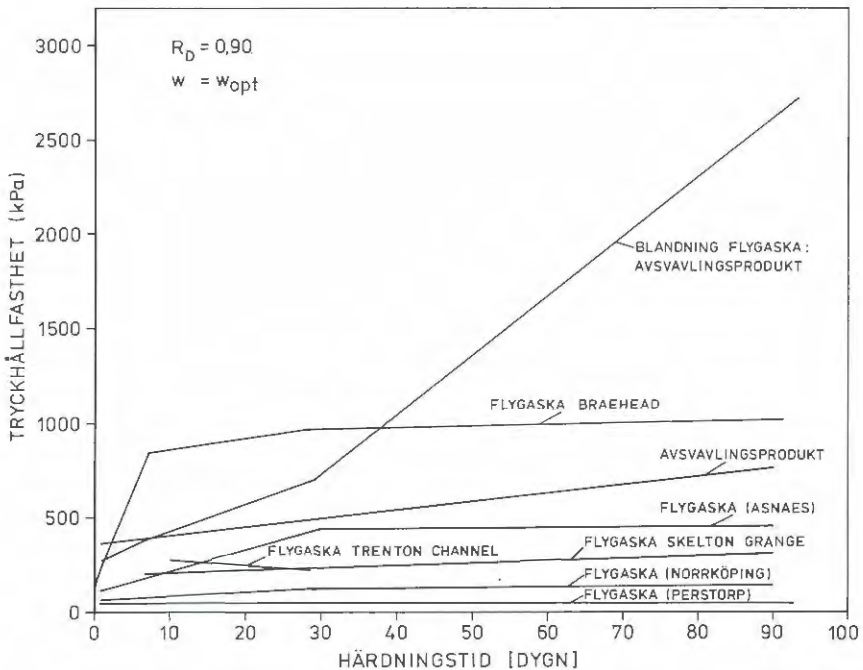


Fig 10.4:1. Tryckhållfastheten som funktion av härdningstiden för undersökta restprodukter.

hållfasthet. Samma är förhållandet för blandning mellan flygaska från Asnaes och våt-torr avsvavlingsprodukt med undantaget att ökningstakten är mångfalt större med härdningstiden. Referensaskor från Braehead visar en snabb hållfasthetstillväxt upp till 7 dygns härdning och tiden därefter ringa hållfasthetsökning. Flygaskan från Skelton Grange visar ungefär samma mönster som Norrköpingsaskan medan askan från Trenton Channel visar en minskning av hållfastheten mellan 10 och 28 dygn. Denna minskning förmodas dock ligga inom felmarginalen och kan alltså förmodas ligga på konstant nivå.

Att hållfasthetsnivån blir lägre för flygaskorna från wanderrosteldning beror bl a av , som tidigare påpekats kornform, kornstorleksfördelning och halten oförbränt. I litteraturen finns undersökningar beskrivna som visar hur hållfastheten beror av halten oförbränt, specifik yta, summan av kisel- och aluminiumoxider, innehåll av fri kalk och korndensitet. (Se tex Sutherland 1964, Sherwood 1966, 1974, Lin 1971.)

Hög halt oförbränt synes påverka den absoluta hållfasthetsnivån. Förklaringen till detta anges vara att det oförbrända ligger på flygaskekornets yta och därmed reduceras den yta som är tillgänglig för puzzolansk reaktion. Dessutom finns det oförbrända som stavar mellan kornen och minskar därmed möjligheterna till effektiv kornkontakt och packning. Det har konstaterats att aska innehållande mindre än 10% oförbränt kan härdas till höga hållfastheter medan askor med 30% eller mera inte visar någon som helst puzzolansk reaktion (lin 1971). Dessa iakttagelser motsägs inte av resultat från denna undersökning.

Specifika ytan hos flygaska påverkar den puzzolanska reaktionens hastighet. Sålunda har en flygaska med hög specifik yta större partikelkontaktyta tillgänglig för omedelbar puzzolansk reaktion (Lin 1971). Därför har ofta specifik yta använts med framgång för korrelation med korttidshållfastheten efter 28 dygns härdningstid. Motsägande uppgifter visar Sutherland (1964) för fyra skotska askor. Han visar att hållfastheten minskar med ökande specifik yta. Att så motsägande uppgifter föreligger torde vara en effekt av att det är svårt att isolera inverkan av enskilda parametrar på hållfastheten. De i denna undersökning erhållna värdena på specifik yta från kolpulvereldade kolkraftverk ligger i intervallet 270-339 m<sup>2</sup>/kg vilket utgör ungefär undre och övre gränserna för de av t ex Sutherland (1964), Lin (1971) och Sherwood (1975) redovisade askorna.

Kisel- och aluminiumoxiderna är huvudbeståndsdelarna i en puzzolan som i sig själv har ringa eller inga cementerings-egenskaper men vid reaktion med fri kalk och vatten får sådana. Thorne och Watt (1965) har i sin undersökning visat att den puzzolanska aktiviteten främst äger rum i askornas glasiga partiklar som främst består av SiO<sub>2</sub> och Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Då erhålls som resultat att hållfastheten ökar med ökande innehåll SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> och speciellt god korrelation erhålls vid långa härdningstider, dvs när askan nått sin sluthållfasthet. De i denna undersökning använda askorna, se tabell 10.1:1, ligger beträffande SiO<sub>2</sub> och Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-innehållet i det intervall som presenterats i litteraturen, dvs mellan 60 och 85% av summan SiO<sub>2</sub> och Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, medan de grövre flygaskorna från wanderrosteldning endast har en oxidsumma på 40-50%.

Innehållet av fri kalk i flygaska spelar en nyckelroll i den puzzolanska reaktionen. Det är en nödvändig komponent tillsammans med SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> för att erhålla en cementerings-effekt. Flera undersökningar, t ex Sherwood och Ryley (1966) och Sutherland et al (1968) har visat att mängden fri kalk har en avgörande effekt på askans hållfasthet efter härdning. Det menas också att förekomsten av fri kalk i askan är mera



finfördelad och i större kontakt med kornen än om kalk tillsätts och därför effektivare ur hållfasthetstillväxtskympunkt (Lin 1971). Sherwood och Ryley visar att om flygaskan innehåller mer än 0,1% fri kalk uttryckt i CaO erhålls en stor cementeringseffekt.

En annan faktor som synes påverka hållfasthetsnivån för flygaska är korndensitet. Thorne och Watt (1965) har visat att ju högre hållfasthet som erhålls desto större andel partiklar i flygaskan som har en korndensitet mellan 2100-2700 kg/m<sup>2</sup>. I föreliggande undersökning, se tabell 10.2:1, har samtliga flygaskor en medelkorndensitet som ligger i nämnda intervall. Högst är flygaskan från Norrköping och lägst den från Pers-torp.

Avsvavlingsprodukten från den våt-torra processen är så pass ny att få undersökningar beträffande dess kemiska och tekniska egenskaper hittills är utförda och publicerade. Produkten innehåller dock ca 40% flygaska och kan därför till vissa stycken jämföras med dem ur hållfasthetstillväxtskympunkt. Figur 10.4:1 visar att under en 90 dygnsperiod ökar hållfastheten med en faktor 2 och att en viss hållfasthetsnivå uppnås redan efter 1 dygns härdningstid och att hållfastheten därefter ökar linjärt med härdningstiden. Appliceras ovanstående kriterier gällande flygaska tycks dessa stämma. Dvs stor specifik yta och stor mängd kalk ger en snabb tillväxt av hållfastheten redan under första dygnet medan den däremot har en hög halt oförbränt och låg halt SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> som ger en långsam hållfasthetstillväxt med tiden. Blandas den däremot med en "bra" flygaska så sjunker halten oförbränt och mängden SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ökar, vilket skall enligt ovan ge en hög sluthållfasthet. Att så är fallet framgår av figur 10.4:1 och detta är tydligen oberoende av vilket av blandningsförhållandena 1:1, 2:1 eller 3:1 (aska: avsvavlingsprodukt) som väljs.

I kapitel 6.4.1 och 8.4.1 utfördes linjär multipelregressionsanalys för att utröna hur packningsgrad, härdningstid

och vattenkvot påverkade hållfastheten. Konstanterna  $a$ ,  $b$ ,  $c$  och  $d$  i ekvation (1) och (2) kan efter ovanstående resonemang antagas vara beroende av halten oförbränt, specifik yta, halten  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  och halten fri kalk. Således skulle ett generellt samband som beskriver hållfastheten för kolrestprodukter bli komplext och kräva tillgång till ett stort antal restprodukter.

Triaxialförsök på flygaska från Asnaes är redovisade i kapitel 6.4.2. Där visas att vid en konventionell utvärdering enligt Mohr-Coloumb erhålls resultat med goda korrelationer. I figur 10.4:3 visas hållfasthetsparametrarna  $c$  och  $\phi$  som funktion av härdningstiden för flygaska från Asnaes och referensaskor.

Av figuren framgår att den undersökta askan från Asnaes och referensaskorna har en ökande hållfasthet med tiden. Friktionsvinkeln  $\phi$  når ett maximalt värde efter ca 7 dygn för att därefter vara nära nog konstant. Undantaget är Asnaesaskan vid packningsgraden 0,80 som först efter 28 dygn synes nå ett slutvärde. Kohesionen tillväxer ungefär som hållfastheten erhållen vid enaxliga tryckförsök. Askan från Asnaes visar också en avtagande tendens efter 28 dygn men trenden kan inte anses vara säkerlagd.

Föreliggande undersökning visar också att ungefär samma resultat erhålls oberoende om triaxialförsöken utförs odränerade eller dränerade.

I litteraturen finns inga jämförbara resultat redovisade för den våt-torra rökgasreningsprodukten så jämförelser är ej möjliga. Triaxialförsök på denna produkt som är redovisade i kapitel 8.5.2 visar att svårigheter finns i att utvärdera försöken enligt Mohr-Coloumb. Detta beror förmodligen på att brottypen för denna produkt är sprödare än för flygaska och att undersökningen borde omfatta konsoliderings-spänningar i ett bredare intervall.

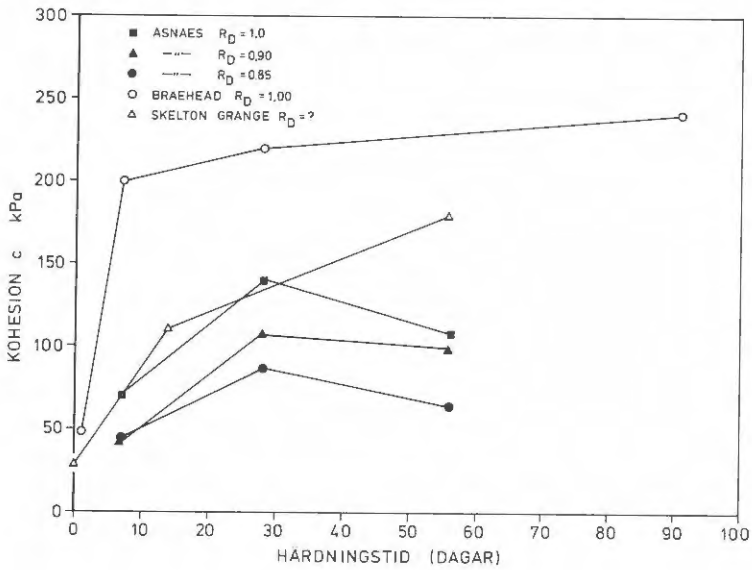
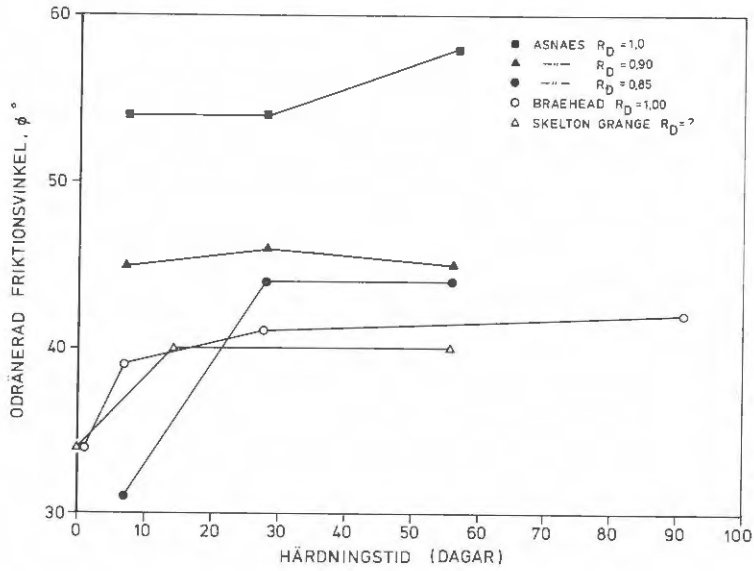


Fig 10.4:3. Resultat från triaxialförsök på flygaska.

Sammanfattningsvis kan sägas att friktionsvinklarna för en flygaska från kolpulvereldning når ett slutvärde som i normalfallet ligger mellan  $40$  och  $45^\circ$ . Både lägre och högre värden förekommer dock. Detta slutvärde synes vara oberoende av askans puzzolanska aktivitet. Däremot visar det sig att kohesionen synes vara en funktion av hur stora cementerings-effekter askan har i sig själv.

### 10.5 Permeabilitet

Permeabilitetsbestämningar för olika restprodukter i denna undersökning är redovisade var för sig i kapitel 6.6, 8.6 och 9.5. De restprodukter som undersökningen omfattar är flygaska från Asnaes, Wilhelmshafen, Norrköping och Perstorp, våt-torr avsvavlingsprodukt från Asnaes och blandningar mellan flygaska från Asnaes och våt-torr avsvavlingsprodukt. Resultatet från dessa undersökningar och ovan nämnda referensaskor är redovisade i Figur 10.5:1.

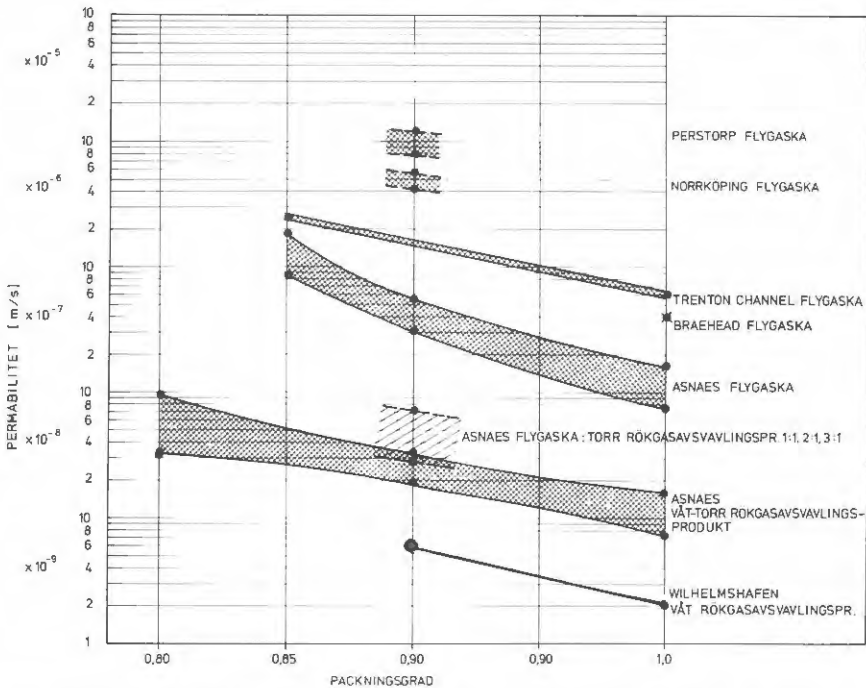


Fig 10.5:1. Permeabiliteten som funktion av packningsgrad för olika kolrestprodukter.

En jämförelse av permeabilitetsvärdena för de olika restprodukterna vid packningsgraden  $R_D = 0,90$  ger att permeabiliteten för den våta avsvavlingsprodukten är av storleksordningen  $10^{-9}$  m/s, för våt-torra avsvavlingsprodukten  $10^{-8}$ , för flygaska från kolpulvereldning  $10^{-7}$  m/s och för flygaska från wanderrostedling ca  $10^{-6}$  m/s. Blandning av flygaska och våt-torr avsvavlingsprodukt ger också värden i storleksordningen  $10^{-8}$  m/s.

Av Figur 10.5:1 framgår också att permeabiliteten minskar med ökande packningsgrad. Något beroende av härdningstiden har däremot inte kunnat konstateras för undersökt tidsintervall (1-90 dygn). Undantaget från detta sistnämnda är den våt-torra avsvavlingsprodukten som visar en svag tendens till att permeabiliteten minskar med ökande härdningstid.

Permeabiliteten är också beroende av en del tekniska parametrar som redovisas i Tabell 10.2:1. Man kan konstatera att ju grovkornigare restprodukten är desto mer permeabel blir den. Det framgår också att specifika ytan, som bl a är beroende av finkornigheten, är en parameter som påverkar permeabiliteten. Således minskar permeabiliteten med ökande specifik yta.

Ett försök gjordes att beräkna permeabiliteten för restprodukterna enligt Hazen-Williams formel. Det visade sig att för flygaska från Asnaes kunde permeabiliteten uppskattas med detta samband men beroendet av packningsgraden underskattades. För den våt-torra avsvavlingsprodukten blev den beräknade permeabiliteten flera hundra gånger större.

Lin (1971) har däremot rapporterat att beräkning av permeabiliteten enligt Carman-Kozeny är användbar för flygaska. I skrivande stund har emellertid inte detta samband kunnat uppbringas och appliceras på vår undersökning.

## 11. REFERENSER

- Gray, D H & Lin Y-K, Engineering properties of compacted fly ash. I of Soil Mech and Foundations Div, Proc ASCE, Vol 98, Nr SM 4, 1972.
- Hartlén, J, Möller, B, Gustavsson, E, Berg, I, Frilund, E, Kolaska - behandling, användning, deponering. Etapp 1 Litteraturstudie. Tekniska Högskolan i Lund, 1978.
- Lin Y, Compressibility, strenght and frost susceptbility of compacted fly ash. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, 1971.
- Sherwood, P T, The use of waste and low-grade materials in road construction: 3. Pulverized fuel ash. TRRL Laboratory Report 686, Crowthorne 1975.
- Sherwood, P T & Ryley, M D, The use of stabilized pulverised fuel ash in road construction. A laboratory investigation. Road Research Laboratory Report No 49, Crowthorne 1966.
- Sutherland, H B & Finlay, T W, A laboratory investigation of the age hardening charactersitics of pulverised fuel ash (vol 1). University of Glasgow, Dept of Civ Eng Report No 01038/1, Oct 1964.
- Sutherland, H B & Gaskin P N, A laboratory investigation of the frost-susceptibility characteristics of pulverised fuel ash. University of Glasgow, Dept of Civ Eng Report No 01038/4, Dec 1967.
- Watt, J D & Thorne, D J, Composition and Pozzolanic properties of pulverised fuel ashes. I. Composition of fly ashes from some British power stations and properties of their component particles. J Appl Chem, Vol 15, Dec 1955.
- Watt, J D & Thorne D J, The composition and pozzolanic properties of pulverised fuel ashes. III. Pozzolanic properties of fly ashes as determined by chemical methods. J Appl Chem, Vol 16, Febr 1966.

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT  
Swedish Geotechnical Institute  
S-581 01 Linköping  
Tel: 013/11 51 00

Serien "Rapport" ersätter våra tidigare serier: "Proceedings" (27 nr), "Särtryck och Preliminära rapporter" (60 nr) samt "Meddelanden" (10 nr).

The series "Report" supersedes the previous series: "Proceedings" (27 Nos), "Reprints and Preliminary Reports" (60 Nos) and "Meddelanden" (10 Nos).

RAPPORT/REPORT

No.	År	Pris kr (Sw.crs)
1. Grundvattensänkning till följd av tunnelsprängning. <i>P. Ahlberg, T. Lundgren</i>	1977	50:-
2. Pålhängskrafter på långa betongpålar. <i>L. Bjerin</i>	1977	50:-
3. Methods for reducing undrained shear strength of soft clay. <i>K.V. HeleneLund</i>	1977	30:-
4. Basic behaviour of Scandinavian soft clays. <i>R. Larsson</i>	1977	40:-
5. Snabba ödometerförsök. <i>R. Karlsson, L. Viberg</i>	1978	25:-
6. Skredriskbedömningar med hjälp av elektromagnetisk fältstyrkemätning - provning av ny metod. <i>J. Inganäs</i>	1978	40:-
7. Förebyggande av sättningar i ledningsgravar - en förstudie. <i>U. Bergdahl, R. Fogelström K.-G. Larsson, P. Liljekvist</i>	1979	40:-
8. Grundläggningskostnadernas fördelning. <i>B. Carlsson</i>	1979	25:-
9. Horisontalarmerade fyllningar på lös jord. <i>J. Belfrage</i>	1981	50:-



## RAPPORT/REPORT

No.		År	Pris kr (Sw.crs)
10.	Tuveskredet 1977-11-30 Inlägg om skredets orsaker.	1981	50:-
11a.	Tuveskredet geoteknik		
11b.	Tuveskredet geologi	1981	50:-
11c.	Tuveskredet hydrogeologi	1981	40:-
12.	Drained behaviour of Swedish clays. <i>R. Larsson</i>	1981	50:-
13.	Long term consolidation beneath the test fills at Väsby, Sweden <i>Y.C.E. Chang</i>	1981	100:-
14.	Bentonittätning mot lakvatten <i>T. Lundgren, L. Karlqvist, U. Quarfort</i>	1982	60:-
15.	Kartering och klassificering av lerområdets stabilitetsförut- sättningar. <i>L. Viberg</i>	1982	80:-
16.	Geotekniska fältundersökningar. Metoder - Erfarenheter - FoU-behov. <i>E. Ottosson (red.)</i>	1982	60:-
17.	Symposium on Slopes on Soft Clays.	1983	140:-
18.	The Landslide at Tuve November 30 1977. <i>R. Larsson, M. Jansson</i>	1982	75:-
19.	Släntstabilitetsberäkningar i lera Skall man använda totalspänningsanalys, effektivspänningsanalys eller kombinerad analys? <i>R. Larsson</i>	1983	60:-
20.	Portrycksvariationer i leror inom Göteborgstrakten. <i>J. Berntson</i>		
21.	Tekniska egenskaper hos restpro- dukter från kolförbränning - en laboratoriestudie. <i>B. Möller, G. Nilson</i>	1983	65:-





**STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT**

**Besöksadr.: Olaus Magnus väg 35, LINKÖPING**

**Postadr.: 581 01 LINKÖPING, tel 013-11 51 00**