

Användning av flygaskor från svenska värmeverk som fillermaterial i betong II

Hillevi Sundblom

**Användning av svenska flygaskor som
fillermaterial i betong**

**Utilization Swedish fly ash from bio fuel fired
power plants as a filler material in concrete**

Hillevi Sundblom

Q4-273

Förord

Flygaskor från kolförbränning är en erkänd hög kvalitetsprodukt (standard EN 450) som tillsatsmaterial i den europeiska cement- och betongindustrin. Det finns dock skillnader mellan flygaskorna från kolförbränning och de från svenska förbrännings- och pappersmasseindustrin. Detta projekt har varit en del i en process att kartlägga fördelar och nackdelar med svenska flygaskor som fillermaterial i svensk betongindustri.

År 2002 började processen med att först kartlägga standarder och regelverk i Europa/Sverige, därefter en kartläggning av lämpliga flygaskor i Sverige samt en utvärdering av deras egenskaper som fillermaterial i krossballast betong. Föreliggande projekt var nästa steg i processen, vilket innebar en djupare kemisk och fysikalisk karaktärisering av svenska flygaskor och deras effekt på cementbaserade konstruktionsmaterial.

Ett stort tack till alla som har varit med i processen hitintills. Ett extra stort tack till dem som bidrog med naturinsatser; betongfabrikanterna Sydsten, NCC ROADS AB samt Hallstaviks pappersbruk.

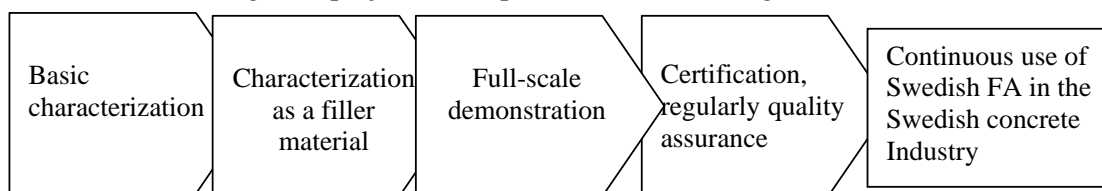
Älvkarleby 2006

Sundblom Hillevi
Vattenfall Utveckling AB

Abstract

The tested Swedish fly ashes (FA) (FA from bio combustion) in this project proved to have good filler qualities such as improving the stability and the rheological behavior of the concrete.

One of tested FA could directly replace the compared limestone filler in the concrete recipes in booth laboratory investigation and in full-scale demonstration. The other FA demanded more water. The recipes were modified in the laboratory investigation to get a functional recipe for full-scale demonstration. The process to investigate the Swedish FA has been following (this project is one part of several investigation).



Three representatives Swedish FA have been investigated in step 1-3 according to the process above. There were two FA in a full-scale demonstration a FA from bio fuel/paper sludge fired circulated fluidized bed boiler (at a paper mill) and a FA from a peat fired pulverized boiler. The test made was basic chemical and physical characterization, investigation as a filler material and strength development of a crushed aggregate self-compacting concrete in laboratory and in a full-scale demonstration.

The conclusion were following:

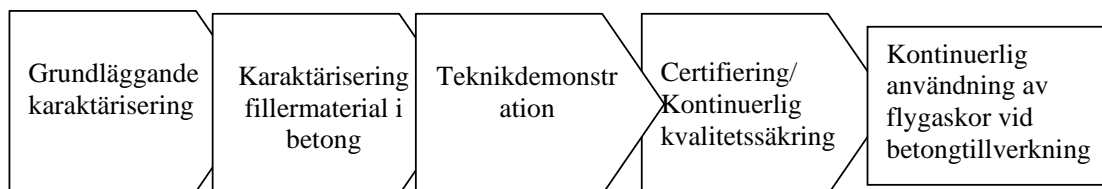
- FA from the paper mill CFB boiler changes in strength development depending on the combustion temperature. It seems the reason is in the way CaO is distribute into different chemical compounds. Higher compressive strength with higher free CaO (analyzed in XRD)
- Higher content of reactive SiO₂ and free lime in the CFB FA comparing with the PF FA. The soundness of the FA have been tested in early research projects.
- The sieves curves demonstrated that the FA from the CFB boiler coarser than the other FA tested and the limestone filler compared. The coarser grain fraction could explain why the FA demanded more water in the laboratory and full-scale demonstration
- The physical characteristic had an effect on the filler behavior of the FA in the laboratory investigation. The FA from the PF boilers had similar filler behavior as the limestone filler investigated.
- The tested FA increased the compressive strength of the concrete in laboratory and full-scale testing
- In the full-scale demonstration the FA tested showed good filler behavior (stability to the concrete) in the crushed aggregate self-compacting concrete. The concrete surfaces were all even and without pores.

The next step of using FA in concrete is to create a group for running the certification process based on EN 450 in Sweden.

Sammanfattning

Det finns svenska flygaskor (FA) som uppvisar goda filleregenskaper som stabilitet och förbättrade reologi till betongen och är därmed lämpade som fillermaterial.

De testade svenska FA kunde i teknikdemonstrationen ersätta det idag använda kalkfillret i använt betongrecept med avseende på de reologiska egenskaperna. För andra FA är receptutveckling en nödvändighet, men det man generellt kan säga är att tillsatsen av FA bidrar till en högre sluthållfasthet. I detta projekt utvärderas de svenska flygaskor för användning som fillermaterial i betong med hjälp av följande processschema:



I det här projektet undersöktes tre representativa svenska FA i stegen 1-3 enligt ovan. Två FA genomgick hela vägen dvs. Fullskaleförsök; en FA från BFB Hallstaviks pappersbruk och en från PF Vattenfall Uppsala. FA från PF Mälarenergi Västerås undersöktes bara i steg 1 och delvis i steg 2. Utförda tester i projekt är grundläggande karaktärisering, karaktärisering av fillermaterialegenskaper i laboratorie- och teknikdemonstration av självkompakterande krossballastbetong. Undersökning av hur testade FA påverkar betongens hållfasthetsutveckling.

Utifrån genomföra laboratorie- och fullskaleförsök kan följande slutsatser dras:

- CFB FA från pappersbruk ger olika hållfasthetsegenskaper i cement/FA bruk beroende på förbränningstemperatur. Egenskapen verkar vara kopplad till vilken förening kalcium är uppbunden. Högre hållfasthet vid högre halter CaO.
- CFB FA från pappersbruk hade högre reaktiv kisel och kalciumhalt än undersökta PF FA. Testade FA i projektet har från tidigare undersökningar visats volymbeständiga.
- CFB FA från pappersbruk hade en markant grövre siktkurva detta kan förklara den ökade vattenadsorptionen i laboratieförsöken och därmed 3 ggr mindre mängd fillermaterial andel i teknikdemonstrationen
- Fysikaliska parametrar såsom kornform och siktkurva påverkar FA filler beteende. FA från PF-pannor uppvisar ett likartat reologiskt fillerbeteende som undersökta kalkfiller.
- Undersökta FA ökade sluthållfasthet i teknikdemonstration och laboratieförsök.
- Teknikdemonstration med CFB FA från pappersbruk och PF Vattenfall Uppsala visade att FA hade bra fillerbeteende vid gjutning. Framst med avseende på betongens stabilitet. Betongytorna i teknikdemonstrationsobjektet var jämna och porfria

Nästa steg i samarbetet mellan svenska FA-producenter och betongtillverkare är att sätta upp en kvalitetssäkringsrutin (certifiering) anpassat till svenska villkor baserat på europeiska standarder.

Innehållsförteckning

(Uppdateras automatiskt genom att markera och trycka F9 på tangentbordet!)

1	BAKGRUND	1
1.1	MÅLSÄTTNING	1
2	MATERIAL	2
2.1	TEKNISKINFORMATION OM FLYGASKORNA I PROJEKTET	2
2.2	TIDIGARE UNDERSÖKNING AV HALLSTAVIK FLYGASKA TILLVERKAD VID OLIKA TEMPERATURER.....	2
2.3	KEMIKALIER ANVÄNDA FÖR ATT UNDERSÖKA FLYGASKANS (FA) PÅVERKAN PÅ BETONGENS FÄRSKA EGENSKAPER	4
3	METODER	5
3.1	INTRODUKTION	5
3.2	FÖRDJUPAD UNDERSÖKNING	6
3.3	TEKNIKDEMONSTRATION.....	8
4	RESULTATREDOVISNING OCH RESULTATANALYS	9
4.1	GRUNDLÄGGANDEKARAKTÄRISERING	9
4.2	FÖRDJUPAD UNDERSÖKNING	12
4.3	TEKNIKDEMONSTRATION TRANÅS	21
5	DISKUSSION	23
6	SLUTSATSER	25
6.1	FORTSATT ARBETE	25
7	PROCESSEN ATT BÖRJA ANVÄNDA FLYGASKA SOM FILLERMATERIAL I BETONG/REKOMMENDATIONER	26
8	LITTERATURREFERENSER	27

Bilagor

(Uppdateras automatiskt genom att markera och trycka F9 på tangentbordet!)

A MÄNGDFÖRHÅLLANDE UTAV FLYGASKA/KEMISKA SUBSTANSER VID LABORATORIEFÖRSÖKEN I ÄLVKARLEBY

B UTRÄKNING AV GRÄNSVÄRDEN I DOE- MODELLEN JÄMFÖRT MED MÖJLIGA TEORETISK GRÄNSVÄRDEN UTIFRÅN MÄNGDFÖRHÅLLANDE I FÖRSÖKEN OCH HALTER I FLYGASKORNA

C RECEPT LABORATORIEFÖRSÖK NCC ROADS

D RECEPT TEKNIKDEMONSTRATION

E GRUNDÄMNESANALYS MG2 ANALYTICIA

F LAKTESTER, ANALYTICA

1 Bakgrund

Upprinnelsen till det föregående projektet "Användning av energiaskor som fillermaterial vid betongtillverkning del I" (Q4-219) är att det blir allt svårare att erhålla förnyade täkttillstånd för uttag av naturballast till betongtillverkning. Problemet är främst accentuerat i storstadsregionerna där valet då står mellan att välja långa transporter av naturgrus eller att använda krossat material och komplettera med ökad halt finmaterial. Problem med nya täkttillstånd finns dock även i regionstäder längs norrlandskusten. SFF (Svenska fabriksbetongs branschorganisation) branschöverenskommelse innebär också att man skall arbeta för att successivt byta naturgrus mot bergkross.

I projekt Q4-219 har det påvisats att det finns möjligheter att nyttiggöra flygaskor som fillermaterial i betong där allt ballastmaterial utgörs av krossat material istället för naturgrus. Goda erfarenheter uppvisats och viss vägledning har också kunnat ges vid val av flygaskor, men flera frågetecken kvarstår. T.ex. har man kunnat uppmäta tidiga konsistensförluster med vissa askor. Det är av avgörande betydelse att utreda vilka komponenter i askan som orsakar detta för att kunna göra rätt val av askor som fillermaterial.

Inom betongområdet har också nya gjuttekniker utvecklats de senaste åren. Framförallt utvecklingen inom tillsatsmedelsområdet har möjliggjort tillverkning av betong med mycket goda gjutegenskaper. Den nya tekniken innebär att man använder effektivare flyttillsatsmedel i kombination med extra tillsats av fillermaterial (kornstorlek <0,250 mm). Hittills har framförallt kalkfiller varit det dominerande fillermaterialet. Goda filleregenskaper är fillermaterialet ger betongen stabilitet och bättre reologi i kombination med flyttillsats.

I en tidigare förstudie vid Vattenfall Utveckling AB har askor från förbränning av returpappersslam provats som alternativ till kalkfiller i självkompakterande (SCC) betong. Resultaten var lovande. Ett av resultaten från projektet "Energiaskor i betongrelaterade tillämpningar – normer, praxis och erfarenheter" (Q4-133) är att energiaskor torde ha relativt god potential som fillermaterial vid betongtillverkning

1.1 Målsättning

Målet är att ge betongtillverkare och askproducenter en metodik för att kunna utvärdera flygaskor som ett alternativt fillermaterial till betongtillverkning.

2 Material

2.1 Tekniskinformation om flygaskorna i projektet

Flygaskor i projektet anses av referensgruppen som representativa svenska flygaskor med avseende på bränsle och panntyp. Flygaskorna producerades i en BFB¹ panna hos Hallstaviks pappersbruk, i en PF² panna Mälarenergi Västerås och i en PF panna Vattenfall Uppsala. Mer information om hur flygaskorna uppkommer och lagras finns i tabell 1, grundläggande karaktärisering finns i resultat delen i denna rapport.

Tabell 1. Tekniskinformation om flygaskorna i projekt

	Hallstaviks pappersbruk	Mälarenergi Västerås	Vattenfall Uppsala
Panntyp	BFB/A-Pannan	Pulver	Pulver HVC
Bränsle	Slam/fiber/bark	Kol/Torv	Torv
Förbränningstemperatur	920	1200°C	1200°C
Rökgasrening (utrustning)	rökgasskrubber	SNCR, SCR	-
Rökgasrening (ämnen % bränsle)	Inga additiv används	Kalk 1.3%, Ammoniak 0.18%	dolomit, urea, ammoniak
Askinsamling	El-filter	Textila Slangfilter	El-filter, slangfilter
Lagring	Silo	Silos, oljecistern	Silo
Lagringstid	-	1-2 dagar när den används löpande	Max 1 vecka
Utmatningsmöjlighet	Befuktas vid utmatning till TS 80%	Torr- och våtutmatning	våtutmatning
Askproduktion	15 000 ton/år	30-40 000 ton/år	35 000 ton/år

Ytterligare information om provtagning av flygaskorna: FA Mälarenergi Västerås askan: Enligt Jens Néren (Neren, 2005) analyseras askan kontinuerligt. FA från Hallstaviks pappersbruk: Enligt Tage Sundblom (Sundblom, 2005) samlas askan in en gång i månad och månadsproverna skickas till analys 2ggr/år.

2.2 Tidigare undersökning av Hallstavik flygaska tillverkad vid olika temperaturer

Hallstaviks pappersbruk har gjort experiment för att se hur förbränningstemperaturen påverkar flygaskans (FA) sammansättning i sin BFB panna. FA genereras från samma bränslemix men vid olika temperaturer 850, 900 och 950°C. FA undersöktes hos Analytica och Vattenfall Utveckling enligt följande, grundämnesanalys samt den kristallina sammansättningen av FA (tabell 2-3), hållfasthetsutveckling samt bindetid av en cement/vatten/FA blandning (vct 0.55).

Grundämnesanalysen (tabell 1) visar på att sammansättningen hos de olika FA är likartad förutom att kloridhalten och LOI halten är högre för den FA850. XRD analysen

¹ B/CFB bubblande/cirkulerande fluidiserande bädd. Pannor med en sandbädd till botten. Luft introduceras från bland annat botten vilket leder till att sanden bubblar/cirkulerar.

² PF pulver panna. Bränslet introduceras in i pannan från sidoväggarna av pannan i form av ett pulver.

visar dock att kalciumet ligger i olika föreningar beroende på genereringstemperaturen. Figur 1 visar att FA 850 har en hållfasthetsutveckling som är konstant 5 MPA högre än de andra två FA under 1-28dygn. Orsaken till detta är troligen mängden fri CaO (tabell 2) som är markant högre för FA850 än FA900 och FA950. Generellt påstås att fri CaO påverkar volymbeständigheten hos betong därför bör respektive FA undersöka ur denna synvinkel innan resultaten lovordas. Slutsatsen kan dock dras att ur 1-28 dygns hållfasthetssynpunkt är FA850 klart bäst. Det visar på att förbränningstemperaturen för denna panna för viktig för FA kvalitet.

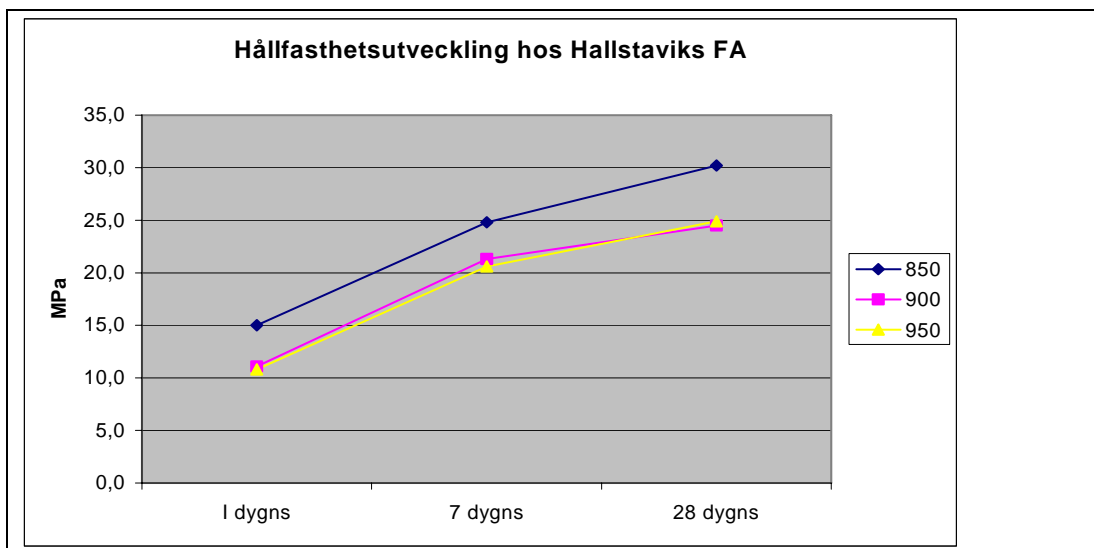
Tabell 2. Grundämnesanalys av huvudkomponenter i %TS

Element	Hallstavik 850	Hallstavik 900	Hallstavik 950
SiO ₂	33,2	34,8	34,1
Al ₂ O ₃	18,7	19,7	19,4
CaO	30,4	30,3	33,0
Fe ₂ O ₃	1,78	1,9	1,9
K ₂ O	1,09	1,17	1,13
Na ₂ O	0,60	0,66	0,64
MgO	4,03	3,9	4,05
MnO	0,18	0,19	0,19
P ₂ O ₅	0,49	0,54	0,53
TiO ₂	0,24	0,24	0,25
Cl	0,07	0,04	0,04
LOI (MG2) Analytica	7,8	4,4	3,4

Tabell 3. XRD i flygaskorna från Hallstavik (undersökta hos Analytica)

Mineral	Kemiskformel	850°C	900°C	950°C
Amorf andel*		ja	Ja	Ja
Okända faser		X	X	X
Lime	CaO	28,2	24,9	21,9
Gehlenit	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	4,5	25,0	45,2
Kalcit	CaCO ₃	30,2	14,1	8,2
Illite*	KAl ₄ [AlSi ₇ O ₂₀](OH) ₄	15,4	10,4	5,9
Talk*	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	7,6	5,0	2,2
Anhydrit	CaSO ₄	6,5	7,4	7,1
Dolomit	CaMg(CO ₃) ₂	1,7	3,1	2,3
Kvarts	SiO ₂	5,9	10,1	7,2

* 20-30% är amfort



Figur 1. Hållfasthetsutveckling cement/FA blandningar, vct 0.55

Figure 1. Strength development in cement and fly ash mixtures, vct 0.55

2.3 Kemikalier använda för att undersöka flygaskans (FA) påverkan på betongens färska egenskaper

Ett mål med projektet var att kunna avgöra om FA kan utvärderas som fillermaterial enbart på deras kemiska sammansättning. Ett sätt att utvärdera hur den kemiska sammansättningen påverkar är att modifiera gränsvärden på olika kemiska föreningar i FA/cement/vatten blandningar med hjälp av kemikalier. Alla kemikalier i projektet beställdes från VWR International. Tekniskinformation om kemikalierna laboratorieförsöken i Älvkarleby är listade i tabell 4, där även grundämnet som ska undersökas är kopplat till respektive kemikalie.

Tabell 4. Tekniskdata om kemikalier använda i projektet

Ämne i flygaskan	Kemikalie använd (kemiskbeteckning)	Molarvikt* G/mol	Densitet* g/cm ³ (20°C)
Kisel	SiO ₂ (granulat)	60,08	2,32
Magnesium	MgO	40,3	3,58
Kalciumoxid	CaO (pulver)	56,08	3,37
Kalciumhydroxid	Ca(OH) ₂	74,1	2,24
Sulfat, Kalcium	CaSO ₄	136,14	2,96
Klorid, Natrium	NaCl	58,44	2,17
Sulfat, Kalium	K ₂ SO ₄	174,27	2,66
Klorid, Kalium	KCl	74,55	1,98
Fosfat, Kalium	K ₃ PO ₄ * 3 H ₂ O	266,32	3,12

* Egenskaper hos kemikalier

3 Metoder

3.1 Introduktion

Alla analysmetoder som har använts för att undersöka flygaskor och respektive cementpasta, betong med flygaska i detta projekt finns listade i tabell 5. I samma tabell finns även de företag som har gjort analyserna.

Tabell 5. Analys/analysmetod/utförande analysföretag använda i projektet

	Analys	Metod	Företag
Flygaskans kemiska egenskaper	Grundämnes-Analys	MG2	Analytica
	Laktest	L/S 2	Analytica
	Kristallin-Sammansättning	XRD	Analytica
	Uträkning av reaktiv CaO, SiO ₂	EN-197	Cementa Research
	LOI	Gl.f950°C Gl.f 100°C	Cementa Research, Analytica
	Klorid	XRF	Cementa Research
Flygaskans fysiska egenskaper	Specifik yta	BET	Cementa Research
	Densitet	ER 9228	Cementa Research
	Siktkurva	ER 9322	Cementa Research
Betongens färska egenskaper	Viskositet	Reometer, DIN 53019	Vattenfall Utveckling
	Flytgräns	Reometer , DIN 53019	Vattenfall Utveckling
	Arbetbarhet	Flytsättningsmått T50 Okulärbedömning	NCC ROADS AB
	Teknikdem.	SCCkross gjutning	NCC ROADS AB
Betongens hållfasthetsutveckling	Bindetid	EN 196-3	Vattenfall Utveckling
	Tryckhållfasthet 1, 7, 28, 91 dygn		Vattenfall Utveckling Betongindustri
Emissioner från betong	TVOC	SP metoden 601	SP
	Formaldehyd	SP metod 2302 (ISO 16000-3)	SP
	Ammoniak	Vätskekromatograf och konduktivitetsdetektor	SP (Yrkes- och miljömedicin i Göteborg)

Flygaskorna från Hallstaviks pappersbruk och Mälarenergi Västerås analyserades enligt följande:

- Hos Analytica gjorde följande analyser: Grundämnesanalys, enklare laktest med grundämnesanalys och för bestämning av kristallinsammansättning med XRD.
- Hos Cementa Research gjordes följande analyser: Specifik yta (BET-metoden), partikeldensitet, siktkurva och kemiska beståndsdelar såsom LOI, klorider, SO₃, Fri CaO, Reaktiv CaO, reaktiv SiO₂ och MgO
- Bindetid och hållfasthetsutveckling hos Älvkarleby laboratoriet
- Enbart Flygaskan från Hallstaviks pappersbruk analyserades i laboratorieförsök i Älvkarleby och teknikdemonstration hos betongindustri

Flygaskan från Vattenfall Uppsala analyserades enligt följande:

- Hos Analytica i Luleå: Grundämnesanalys
- Laboratorieförsök och teknikdemonstration hos betongindustri

3.2 Fördjupad undersökning

Försöken valdes att delas upp enligt följande:

1. Referensförsök –analys av respektive flygaska variation i fysiska egenskaper
2. DOE-försök variation av kemisk sammansättning i cement/flygaska blandningarna

Receptet var till en början bruksdelen i en självkompakterande krossballast betong med vct 0.55 se tabell 6. I DOE-försöken var receptet dock tvunget att modifieras till vct 0.7 eftersom kemikalierna som användes (framförallt SiO₂) var väldigt finkornig.

Tabell 6. Recept använt i båda försöken, mängder i kg/m³

	Vct: 0,55	0,7	1
Filler: FA Hallstavik/Västerås	0,15	0,30	0,30
Cement: Slite Bygg	2,10	2,10	2,10
Vatten	1,16	1,47	2,10

3.2.1 Referensförsök –analys av respektive flygaska variation i fysikaliska egenskaper

Här gjordes två försöksserier, en med flygaskan från Hallstaviks pappersbruk och den andra med flygaskan från Mälarenergi Västerås. Försöksserierna innefattade följande:

- Mätning av viskositet och flytgräns: Försöken gjordes i en reometer mätsekvenser (antal mätpunkter och tidsintervall) valdes enligt standarden DIN 53019. Mätningar gjordes vid tidpunkterna 0, 30,60 och 90 min efter blandning.

- Bindetid: Standardiserad provning enligt EN 196-3:1994: En nål sticks med konstantkraft ner enligt ett visst tidsintervall i cement/FA/vatten blandningen. tills följande tider har mätts: Initial bindetid, när nålen är 4 mm från botten i provet, Slutlig bindetid, när nålen är 0,5 mm från toppen i provet.
- Hållfasthet: Tryckhållfastheten efter 1, 7 och 28 dygn enligt standard EN 12390-3.

3.2.2 DOE försök -variation av kemisk sammansättning

Försöken valdes att utföras med hjälp av statsiktisk försöks planering DOE (Design Of Experiments). DOE valdes för att få organiserat angreppssätt, få en sammankoppling mellan försöken i ett logiskt och teoretiskt sätt och att få ut parametrarnas påverkan på varandra.

DOE-försöken är indelade i fyra försöksserier– fördelat på två olika flygaskor, Hallstavik och Västerås. För varje flygaska utfördes en serie av försök där bulkämnen varierades och en där spårämnen varierades enligt Bilaga A. Försöksserien genererades fram ur DOE så att resultaten från försöken ska kunna anpassas till en linjär modell över hur invariablerna (x_i) påverkar utvariablerna (y_i). För att kunna jämföra de olika koefficienterna (a_i) normaliseras variablerna.

$$y_i = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots = \sum a_{ij}x_i \quad \text{Formel 1.1}$$

Invariablarna i modellen i denna modell är mängden substanser listade med respektive gränsvärden i bilaga B. Utvariabler är viskositet, flytgräns och hållfasthet vid olika tidpunkter enligt följande:

- Mätning av viskositet och flytgräns för både spårämnen och bulkämnen: Försöken gjordes i en standard reometer mätsekvenser (antal mätpunkter och tidsintervall) valdes enligt standarden DIN 53019. Mätningar gjordes vid tidpunkterna 0, 30,60 och 90 min efter blandning.
- Försöksserie med bulkämnena innefattade även: Hållfasthetsprovning: Tryckhållfastheten efter 1, 7 och 28 dygn enligt standard EN 12390-3

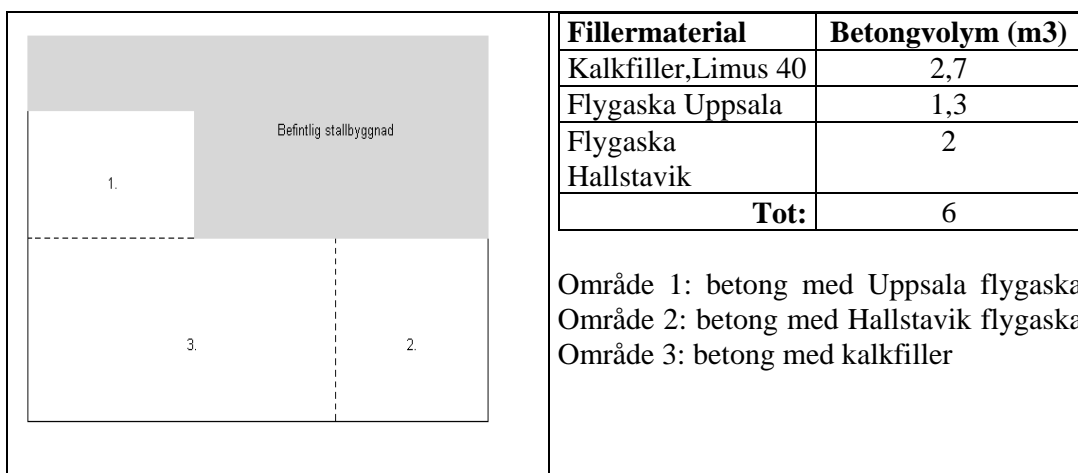
3.2.3 Scanningförsök självkompakterande krossballast betong

Försöken gjordes på NCC ROADS betonglaboratorium i Linköping. Två flygaskor, Hallstaviks pappersbruks och Vattenfall Uppsala samt kalkfiller undersöktes som fillermaterial i en självkompakterande krossballastbetong (recept finns i bilaga C).

Följande undersökningar gjordes på betongen (se tabell 5 för mer detaljer): Visuella undersökning av betongens konsistens och sammanhållning, Flytsättningsmått T50, Emissionsmätningar hos SP.

3.3 Teknikdemonstration

Teknikdemonstration genomfördes 26 september, 2005. En bottenplatta göts strax utanför Tranås. Gjutplatsen var förbered genom att ett utjämningslager av singel var utlagt, armering utlagd. Betongen blandades på NCC ROADS betongfabrik i Tranås i en tvåvågsblandare med blandarvolym 5,5 m³. Mängdförhållandet och placering av de olika betongblandningarna i bottenplatta finns utritade och listade i figur 3. Recept finns i bilaga D.

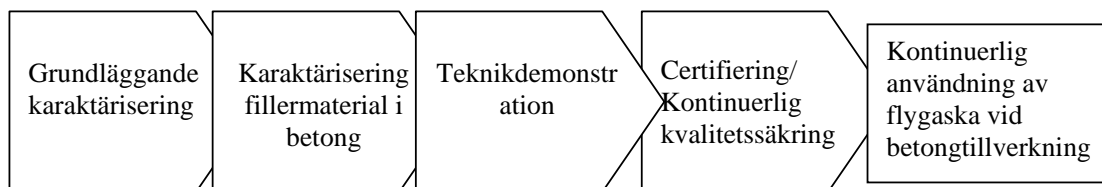


Figur 2. Principskiss över den gjutna bottenplattan. De angivna gjutområdena är ungefärliga,

Figure 2. Sketch over the cast concrete ground floor

4 Resultatredovisning och Resultatanalys

För att använda svenska flygaskor (FA) som fillermaterial i betong bör dessa undersökas enligt följande process:



I det här projektet har steg 1-3 gjorts och följande resultat kunde observeras

4.1 Grundläggandekaraktärisering

4.1.1 Grundämnesanalys

I tabell 7 finns en sammanställning av flygaskornas (FA) kemiska sammansättning (för total analys se Bilaga E). Vad som kan noteras gällande totalhalt är att alla tre FA är både kalcium- och kiselrika. I XRD analysen (tabell 8) kan noteras att FA från Hallstavik pappersbruk och från Mälarenergi Västerås har olika sammansättning på de kristallina faserna gällande kalcium och kisel. Detta kan vara en orsak till olikheten mellan de reaktiva faserna, där FA Hallstavik har markant högre halter än FA Mälarenergi Västerås. I tabell finns även en uppställning över vilka krav som finns på FA från kolförbränning från cement- och betongtillverkare enligt EN 450. Följande iakttagelser kan göras för respektive FA och även en analys av vilken betydelse kraven har för betongens egenskaper.

FA Hallstaviks pappersbruk: Uppfyller alla krav från EN 450 förutom halten klorid, och reaktiv CaO. CaO påverkar betongens hållfasthetsutveckling, analyser gjorda på Hallstaviks FA visar att 1, 7 och 28 dygns hållfasthet ökade vid ökade mängd CaO se s. 3-4. CaO kan även påverka volymbeständigheten. Både hållfasthetsutvecklingen och volymbeständigheten kan testas i separata provningsmetoder. En hög halt av reaktiv kiseloxid är känt för att påverka betongens sluthållfasthet eftersom den reagerar med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (biprodukt från cementreaktionerna) och bildar ”cementgel” dvs. det som ökar betongens hållfasthet.

Flygaska från Mälarenergi Västerås: Uppfyller ej EN 450 kemiska kravet på svavel och LOI. Sulfater påverkar betongens beständighet (ettringit bildning) och styr även de tidiga cementreaktionerna. LOI i mått av restkol stämmer dåligt överens för svenska FA. För att vara säker att LOI är lika med restkol bör TOC analyseras.

Flygaska från Vattenfall Uppsala: Har inte analyserats lika grundligt som de andra två flygaskorna. I grundämnesanalysen ses att Uppsala flygaskan uppfyller kraven förutom halten MgO. MgO kan påverka volymbeständighet beroende på föreningen.

Tabell 7. Kemisk karaktäristika av flygaskorna undersökta i försöken

Element	Västerås %TS	Hallstavik %TS	Uppsala %TS	Krav EN 450 ³ %TS
SiO ₂ totalhalt	26,3	34,9	22	-
SiO ₂ reaktiv*	25	30	-	> 22
Al ₂ O ₃	11,2	19,2	4,3	-
CaO totalhalt	26,5	31,1	39,1	
CaO reaktiv*	2	27		<11
Fri CaO				
Fe ₂ O ₃	11	1,9	12,7	-
K ₂ O	1,28	1,2	0,84	-
Na ₂ O	0,64	0,68	0,31	-
(Na ₂ O)ekvivalent**	1,48	1,47	0,87	<5
MgO	2,54	3,63	8,5	< 4,5
MnO	0,13	0,12	0,15	none
P ₂ O ₅	1,22	0,63	1,44	<3 ⁴
TiO ₂	0,52	0,29	0,22	none
Cl	0,03	0,6	<0,1	< 0,1
SO ₃	12,2	2,3	-	<3, 5
S mg/kg TS	39700	8380	22700	
LOI (MG2) Analytica	7,3	3,9	4,7	
Glödförlust (LOI) 950 °C	7,2	2,8	-	< 5 -11

* Beräknat enligt EN 197

** Beräknas enligt följande (Na₂O)eq = 0,66 K₂O + Na₂O (% TS)

Tabell 8. Kristallina faser upptäckta i XRD analysen

Fas	Formula	Västerås (Vikts-%)	Hallstavik (Vikts-%)
Amorft material		73 ± 5%	72 ± 5%
Kvarts	SiO ₂	4,5 ± 0,3	2,7 ± 0,3
Anhydrit	CaSO ₄	1,5 ± 0,2	1,9 ± 0,2
Kalcit	CaCO ₃	1,3 ± 0,4	2,7 ± 0,2
Hematit	Fe ₂ O ₃	3,8 ± 0,3	-
Mullit	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	5,8 ± 0,5	-
Srebrodolskite	Ca ₂ Fe ₂ O ₅	4,9 ± 0,3	-
Hannebachite	CaSO ₃ ! H ₂ O (?)	2,4 ± 0,3	-
Portlandit	Ca(OH) ₂	2,8 ± 0,2	-
Lime	CaO	-	7,6 ± 0,4
Gehlenit	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	-	5,9 ± 0,3
Anorthit	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	-	5,8 ± 0,3
Muskovit	KAl ₂ [AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₂	-	1,2 ± 0,3

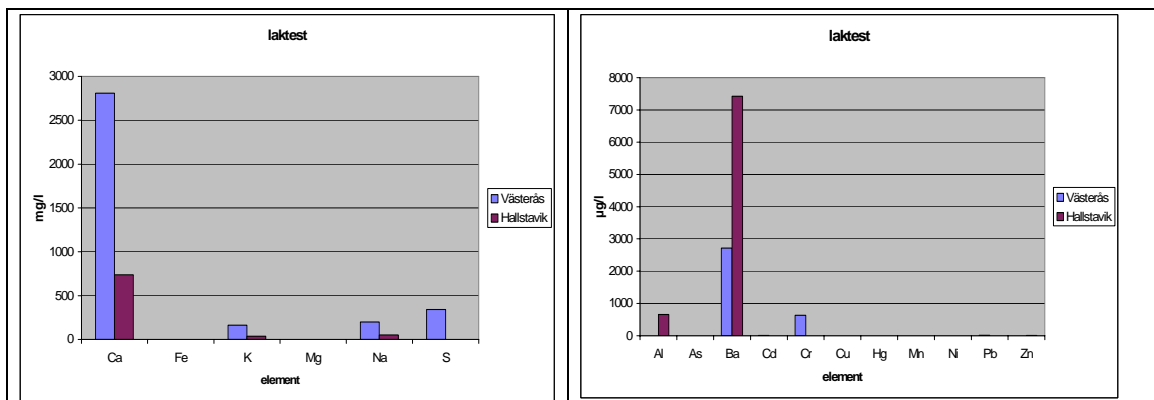
³ Krav från europeisk standard för flygaska i betong. Är utformad för användning av kolflygaska från pulverpannor förkommande i stora volymer i Europa. Bioflygaska från olika panntyper förekommer inte stora volymer i Europa och är därför inte utvärderad och inkluderad i Europa standarden.

⁴ ej hämtat från EN 450 utan Kemas rapport (Sarabér et al, 2003)

Montmorillonit	lermineral	-	0,2
----------------	------------	---	-----

4.1.2 Lakteter

Lakvatten från FA från Mälarenergi Västerås och Hallstaviks pappersbruk uppvisade båda en pH över 10 vilket tyder på att båda FA är basiska och har därmed en hög halt hydroxid joner i lösning. I figur 3 kan man tydligt se att båda FA har vattenlösliga kalciumföreningar. Fullständiga resultat från försöken finns i bilaga F.



Figur 3. Urlakade ämne mätt i mg/l för vänster bild och µg/l från FA från Mälarenergi Västerås och Hallstaviks pappersbruk

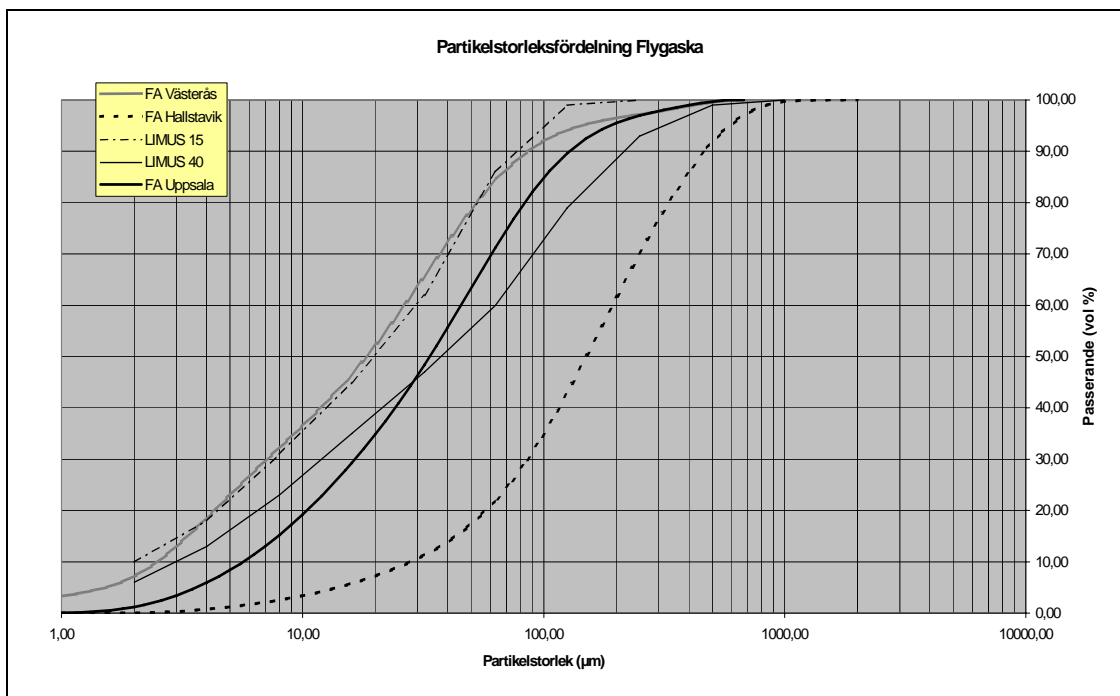
Figure 3. Leached substances from FA from Mälarenergi Västerås and Hallstaviks pappersbruk

4.1.3 Fysiska karaktäristika

I figur 4 ses att alla FA ligger inom fillerfraktionen. FA från Vattenfall Uppsala och Mälarenergi Västerås har en siktkurva som stämmer väl överens med kalkfiller har dvs. de liknar det material som de ska ersätta. FA från Hallstavik har en grövre partikelstorleksfördelning jämfört med kalkfiller. I tabell 9 visar att de tre FA har jämförbara densiteter. FA Hallstaviks pappersbruk uppvisar en större BET-yta detta kan bero på att kornen är större. FA har en högre BET-yta än kalkfiller vilket troligen kan bero på att FA har porösare korn.

Tabell 9. Densitet och specifik yta hos flygaskorna och kalkfiller

	Västerås	Hallstavik	Uppsala	Kalkfiller (Limus 15)	Kalkfiller (Limus 40)
Densitet (g/cm ³)	2,58	2,47	2,5	2,7	2,76
BET (m ² /kg)	5180	2830	X		1200
BLAINE (m ² /kg)				470	330

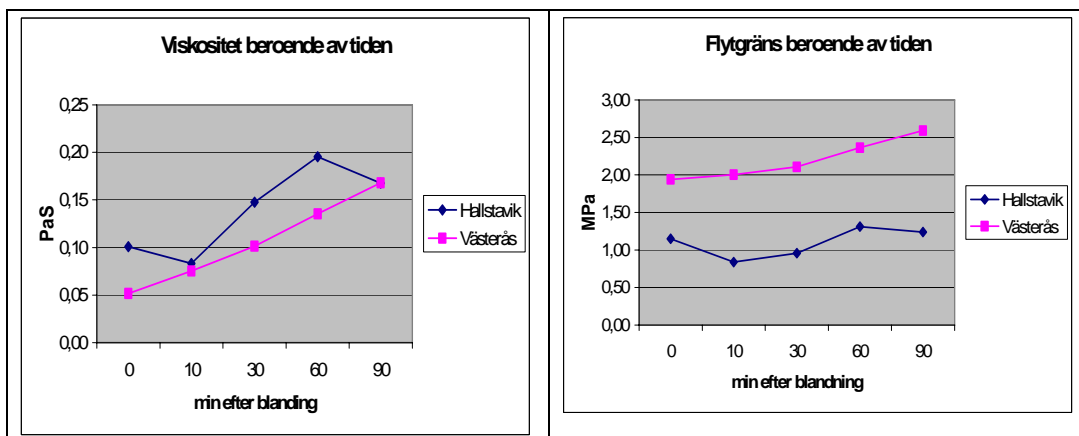


Figur 4. Siktcurvor hos material involverade i försöken

Figure 4. Sieve curves fly ashes and limestone fillers

4.2 Fördjupad undersökning

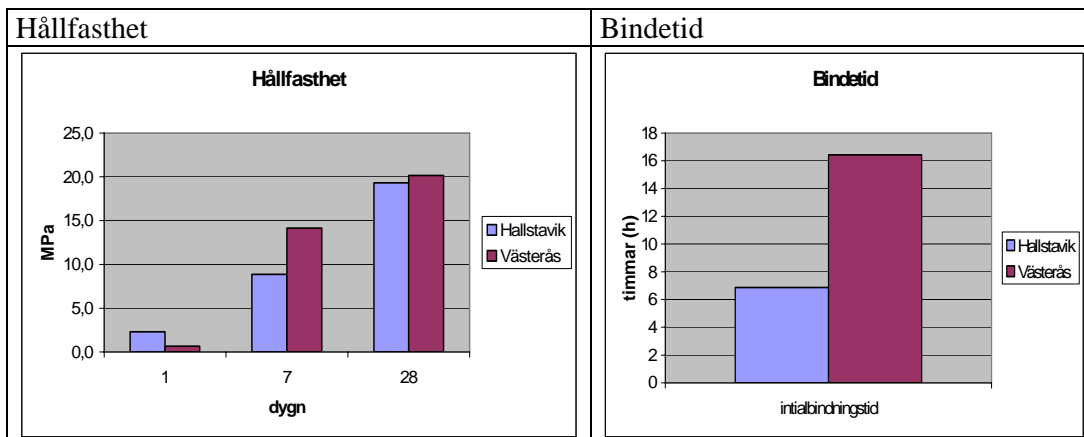
Utvärdering referensförsöken: resultat från reologiska undersökningarna visas i figur 6 och 7 variationen i viskositet och flytgräns hos FA/cement/vatten bruket vid olika tidpunkter efter blandning. Båda FA uppvisar en ökad viskositet hos cementpastablandningen med tiden. FA från Mälarenergi Västerås uppvisar lägre värden 0, 30, och 60 minuter efter blandning vilket tyder på att denna FA ger bruksdelen en bättre flödesegenskaper vid dessa tidpunkter. Värden på flytgränsen visar att FA denna kräver initialt mer energi för att komma i rörelse.



Figur 5. Viskositet/flygräns förändring korrelerat tid efter blandning

Figure 5. The change of viscosity and yield strength versus time after mixture

Hållfasthetsutveckling (Bindetid, Tryckhållfasthet): Initial bindningstiden för FA Hallstaviks pappersbruk är något snabbare än Västerås vilket även ses i 1 dygns hållfasthet. En orsak till detta kan vara mängden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i lösning. Vid 7 dygn har däremot FA Västerås ökat men Hallstavik tar i kapp vid 28 dygns hållfasthet. Det visar att det olika FA påverkar hållfastheten men i olika förlopp.



Figur 6. Hållfasthet- och bindetidresultat från referensförsöken

Figure 6. Strength development

4.2.1 DOE-försöken variation av kemisk sammansättning

Resultaten från de olika försöksserierna tolkas med hjälp av modeller utvecklade i DOE. Bulkämnes och spårämnesförsöken analyseras oberoende av varandra. Analysen börjar med att verifiera modellen, därefter analyseras de godkända modellerna från försöken med avseende hur de olika kemiska substanserna påverkar viskositet, flytgräns samt hållfasthet.

Modellen utvärderas med hjälp av två parametrar R^2 och Q^2 :

- R^2 (R^2) indikerar hur väl modellen kan passa rå data. R^2 värdet varierar mellan 0-1. 1 är en perfekt modell och noll ingen modell över huvudtaget. R^2 kan inte validera en modell utan måste komplimenteras med Q^2 .
- Q^2 (Q^2) visar hur bra prognosen av modellen var. En modell med $Q^2 > 0,5$ är bra och $Q^2 > 0,9$ är en utmärkt modell. Även Q^2 värdet varierar mellan 0-1.

För en bra modell ska både R^2 och Q^2 vara höga och skiljevärden inte större än 0,2- 0,3. En stor mellanskillnad mellan R^2 och Q^2 visar på en olämplig modell. I figurerna kommer **R^2 att vara grön och Q^2 , blå.**

Felkällor:

- Olikheten i de kemiska substanserna kopplat till deras ”verkliga form i askan”. Variationen av de fysiska egenskaperna hos de kemiska substanserna såsom partikelstorleksfördelning, specifik yta påverkar resultatet
- Linjära beteende

4.2.1.1 Bulkämnen

Eftersom ett antal kemiska parametrar skulle undersökas användes DOE, för att kunna analysera resultaten strukturerat. I DOE antas en linjärmodell (se metod) för att analysera hur respektive parametrar påverkar var för sig och i jämförelse med de andra parametrarna. Här analyseras i figurerna 8-10 hur SiO_2 , MgO , CaO och Ca(OH)_2 påverkan på viskositet, flytgräns och hållfasthet vid olika tidpunkter efter blandning. Huruvida relevant resultatdiagrammen är, kan bedömas med hjälp av en modellutvärdering (se figur 7) bedömning av resultaten i bulkämnesmodellen är följande: Det är en bra modellanpassning för både viskositet och flytgräns. Dock är det en större känslighet för flytgräns 60 minuter den har fler uteliggare. Modellanpassningen för hållfasthet var varierande. 7 dygns hållfasthet för alla försök vart underkänd.

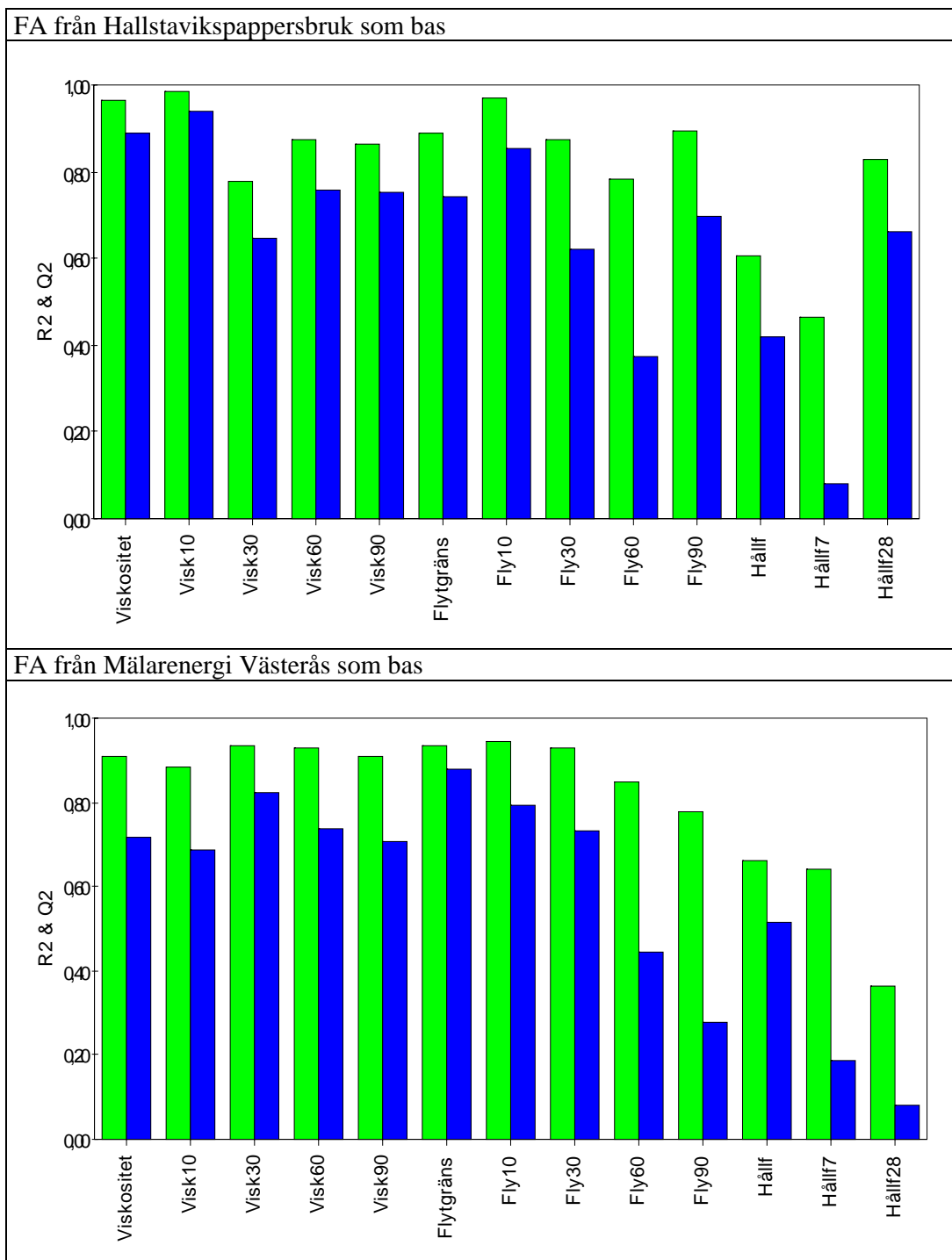
Utifrån resultatet från modellanpassningen valdes följande försöksserier (mest trovärdiga och representativa för försöksomgången) att analyseras, viskositet vid alla tidpunkter, flytgräns vid tidpunkt 0 och 10 minuter, 90 minuter enbart för försöken med FA från Hallstaviks pappersbruk som bas och samma FA som bas för försöksserie hållfasthet, 1 dygn alla försök, 28 dygn.

Följande observationer gjordes av resultaten från viskositet och flytgräns:

- Figur 8 visar att SiO_2 och MgO konstant ökar viskositet under hela tiden för båda FA basen. Påverkan från CaO och Ca(OH)_2 ger inte samma tydliga utslag men verkar även de öka viskositet.
- Flytgränsen verifierar resultaten i viskositet dvs. SiO_2 har den största inverkan på reologin (se figur 9). Alla parametrar förutom CaO verkar påverka den tidiga konsistensen (0-10 min) genom ökad viskositet och flytgräns

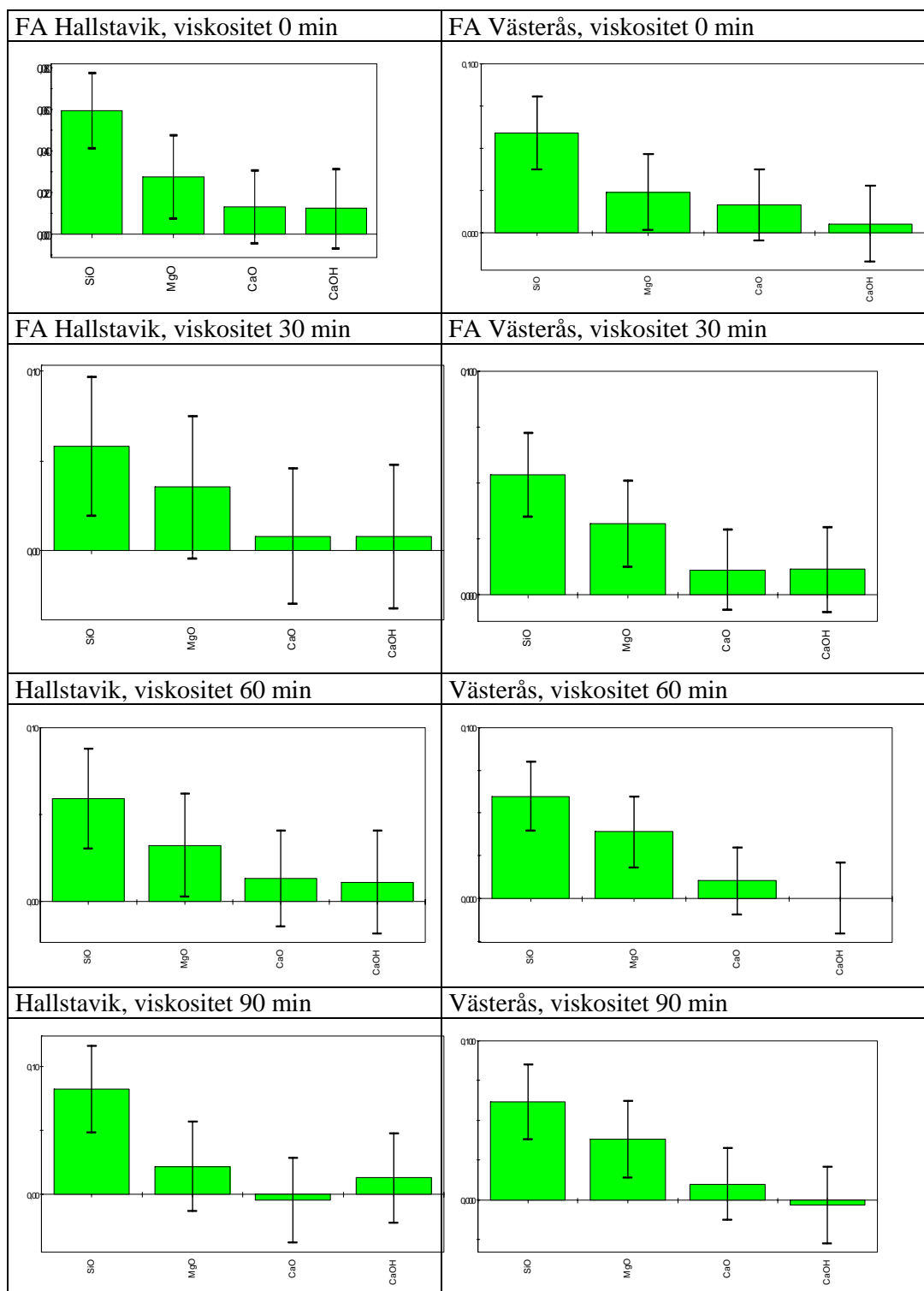
Hållfasthetsresultaten gav som sagt var en sämre modellanpassning (figur 7). De olika FA basen gav väldigt olika resultat. Följande observationer kan göras från figur 10:

- SiO_2 och CaO ger en ökad 1 dygns hållfasthet.
- Ca(OH)_2 verkar i ena fallet sänka och i andra fallet höja. Tidigare erfarenheter har visat på att 1 dygns hållfasthet sänks med ökad halt koncentration av Ca(OH)_2 . Detta kan bero på att denna påverkan inte är linjär dvs. modellen kan inte analysera resultaten korrekt.
- För 28 dygns hållfasthet FA Hallstavik som bas: modellen vart bättre när referensförsöken togs bort. Orsaken till detta kan vara att de kemiska substanserna som användes i försöken var finkorniga vilket kan förändra hållfasthetsbeteendet.



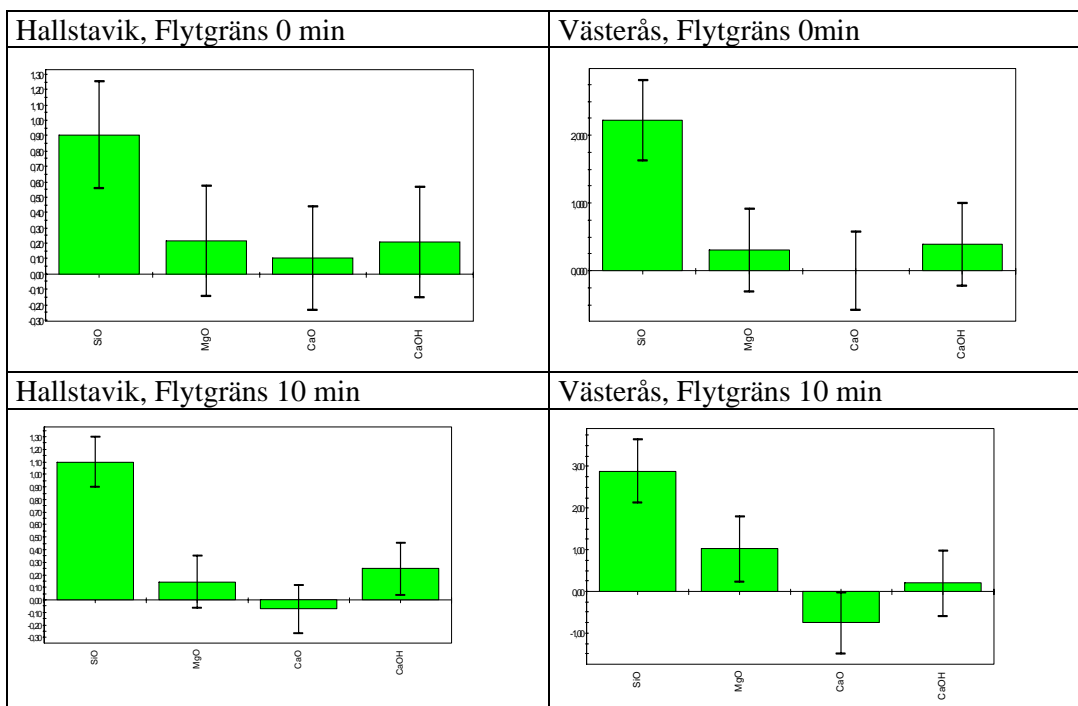
Figur 7. Modellanpassning för bulkämnen viskositet och flytgräns vid 0, 10, 30, 60 och 90 minuter hållfasthet vid 1, 7 och 28 dygn.

Figure 7. Model fit for main constituents for the viscosity and yield strength at time 0, 10, 30, 60 and 90 minutes and compressive strength at 1, 7, 28 days



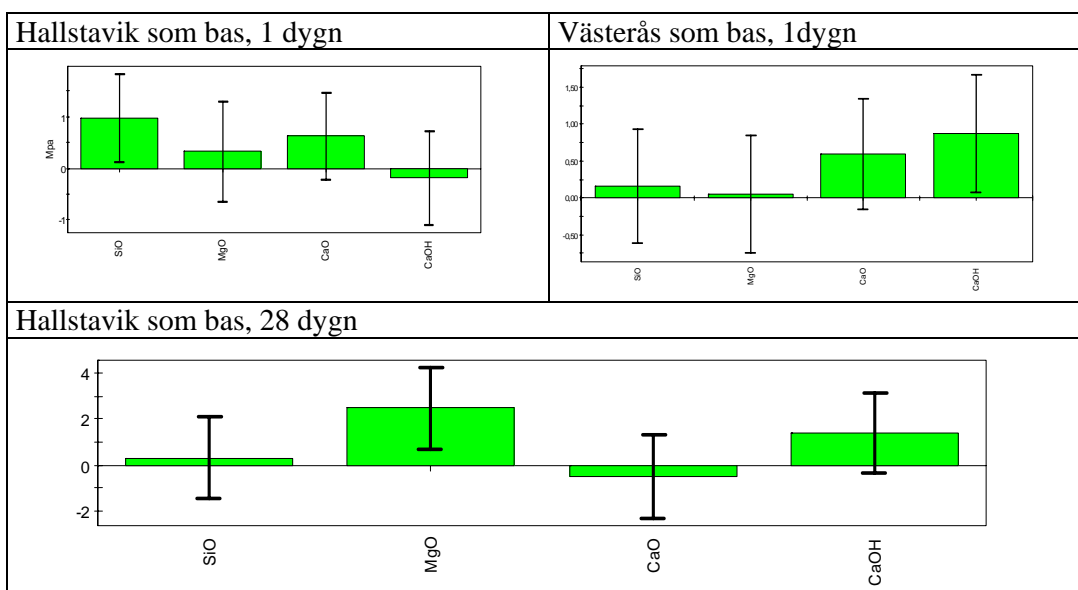
Figur 8. Olika parametrars påverkan på viskositet 0, 30, 60, 90 minuter direkt efter blandning.

Figure 8. Chemical effect on the viscosity 0, 30, 60, 90 minutes after mixing



Figur 9. Olika parametrars påverkan på 10 minuter efter blandning

Figure 9. Chemical effect on after mixing



Figur 10. Olika parametrars påverkan på 1 dygn och 28 dygns hållfasthet

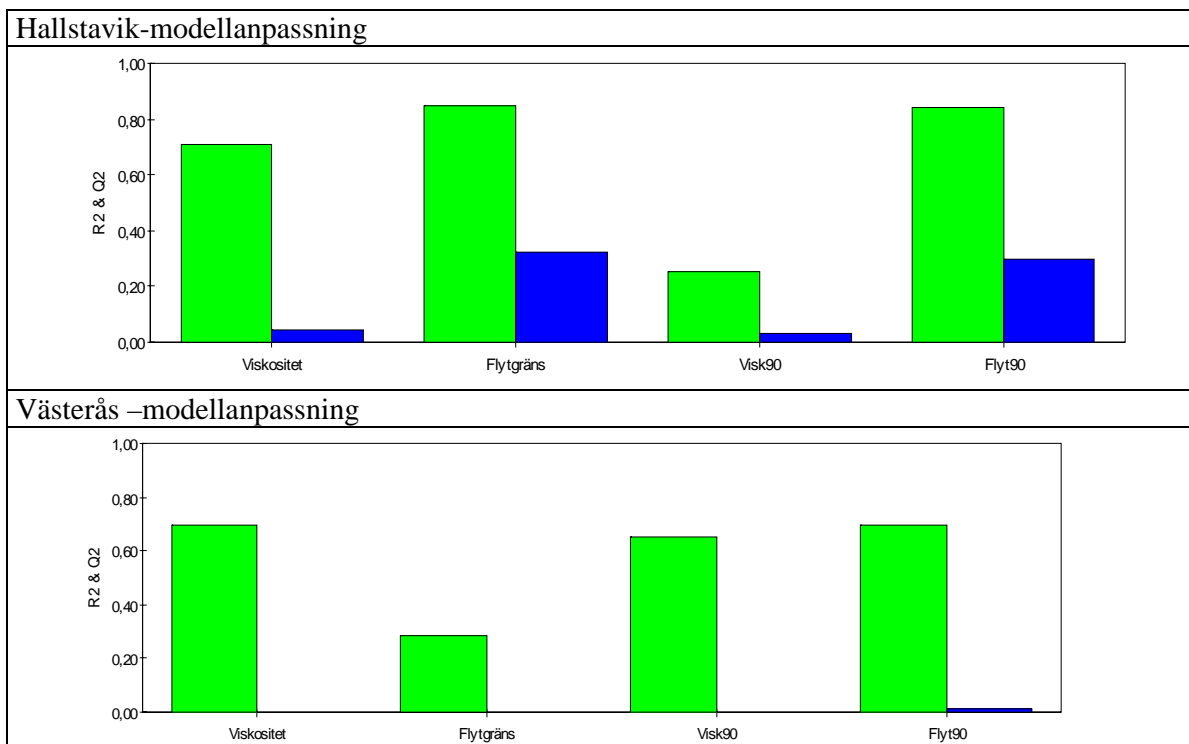
Figure 10. Different chemical substances effect on 1 and 28 days compressive strength

4.2.1.2 Spårämnen

Eftersom ett antal kemiska parametrar skulle undersökas användes DOE, för att kunna analysera resultaten strukturerat. I DOE antas en linjärmodell (se metod) för att analysera hur respektive parametrar påverkar var för sig och i jämförelse med de andra parametrarna. Här analyseras i figurerna 12 och 13 hur CaSO_4 , NaCl , KSO_4 , KCl och KPO påverkan på viskositet, flytgräns vid olika tidpunkter efter blandning. Huruvida relevant resultatdiagrammen är, kan bedömas med hjälp av en modellutvärdering (se figur 11) bedömning av resultaten för spårämnena är följande, Modellanpassningen för spårämnena var ej godkänd därför är resultaten väldigt lukrativa.

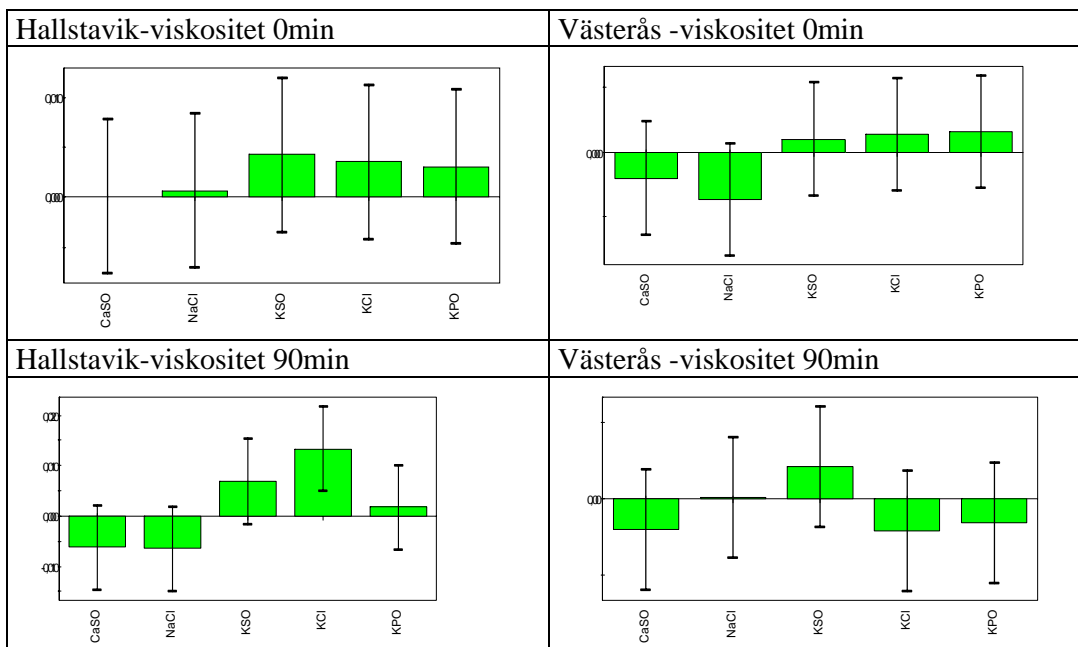
Trots dålig modellanpassning valdes följande resultatdiagram att analyseras, trots att det finns en statistisk osäkerhet i resultaten. Viskositet 0 och 90 min, Flytgräns 0 och 90 min. Följande tendenser kan skådas hos båda försöksserien:

- Sulfater: KSO_4 ökar viskositeten och flytgräns i alla försöksserierna vid 0-90 minuter efter blandning. CaSO_4 minska viskositet och flytgräns under hela förloppet.
- Klorider: KCl varierande beroende på FA bas ingen tendens. Samma sak för NaCl .
- Alla kaliumföreningarna ökade viskositet och flytgräns.
- Fosfater: ingen tendens.



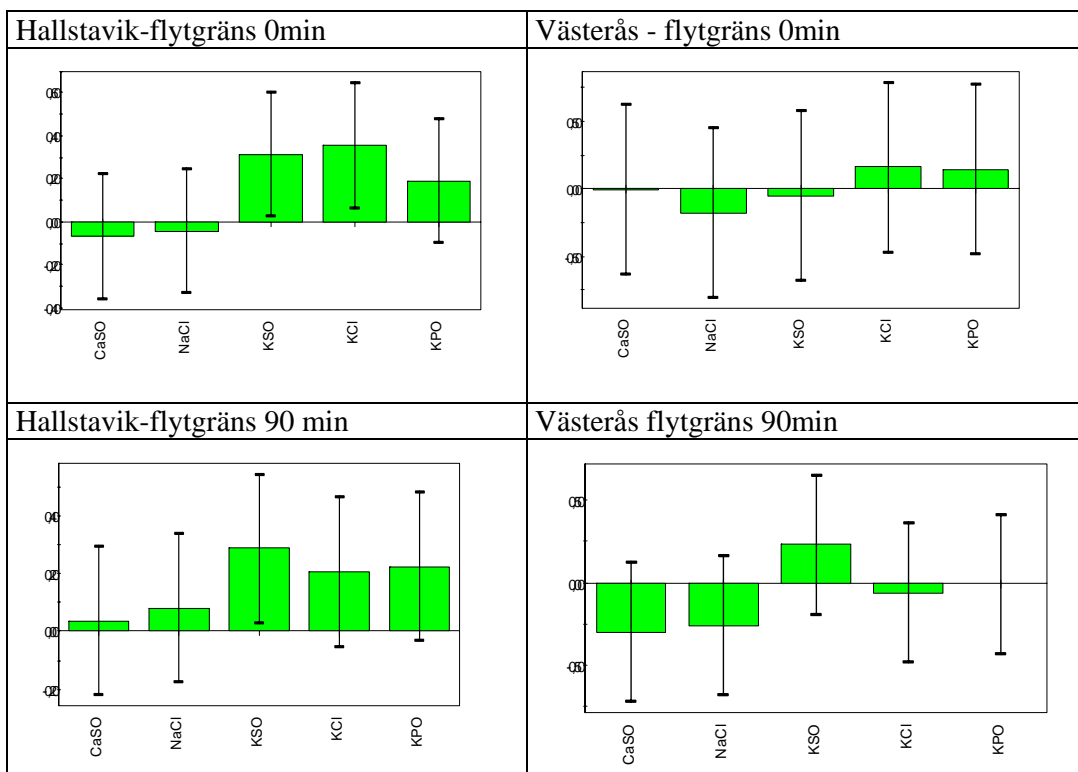
Figur 11. Modellanpassning spårämnen

Figure 11. Model fit on tracer element



Figur 12. Spårämnens påverkan på viskositet 0 och 90 minuter efter blandning

Figure 12. Tracer elements effect on viscosity after 0 and 90 minutes of mixture



Figur 13. Spårämnens påverkan på flytgräns 0 och 90 minuter efter blandning

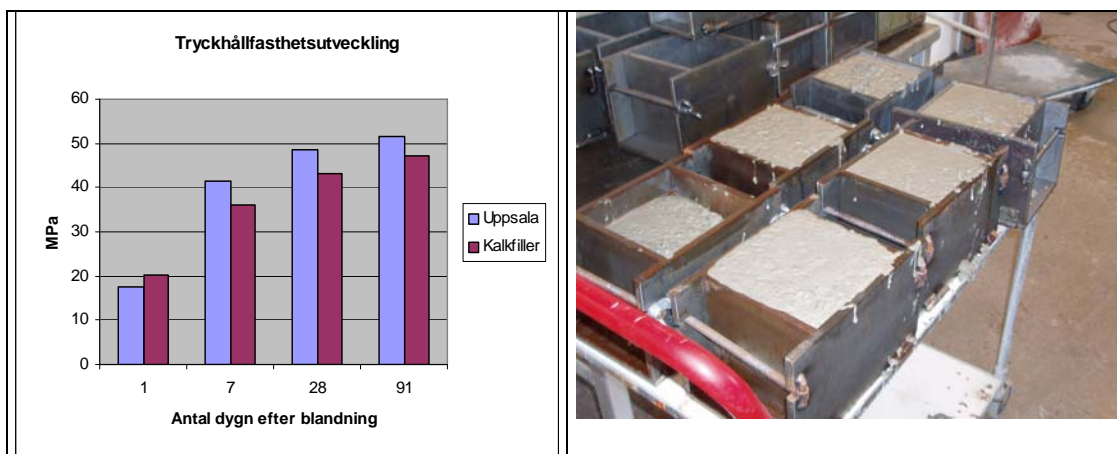
Figure 13. Tracer elements effect on yield strength after 0 and 90 minutes of mixture

4.2.2 Scanningförsök självkompakterande krossballast betong

Receptet för kalkfiller (referensbetong) och FA från Vattenfall Uppsala var likvärdiga. Receptet med FA från Hallstaviks pappersbruk var tvunget att modifieras med extra vatten eftersom betongen bara var jordfuktig vid original recept. Betongen med FA från Vattenfall Uppsala tillsattes extra flyttillsatsmedel efter 30 minuter.

Arbetbarhet: Bedömdes visuellt och med hjälp av flytsättnått vid tidpunkterna 0 och 30 minuter efterblandning. Följande resultat kunde noteras vid analys av tabell 10. Referensbetongen och Vattenfall Uppsala FA: hade liknade beteende. FA något bättre sammanhållande direkt efter blandning. Extra flytt tillsattes efter 30 minuter. FA Hallstaviks pappersbruk doserades i för hög dos vilket resulterade i en för trög betong (jordfuktig) vid recept. Ökad mängd vatten fungerande och betongen hade en homogenkonsistens efter 30 minuter trots mängden vatten, dock inte självkompakterande. Efter 30 minuter uppvisades en trögare konsistens troligen absorberar FA mycket vatten beroende på kornstorleken. Den FA passar inte i detta betongrecept däremot gav det FA från Hallstavik trots mängden vatten en stabil betong.

Hållfasthet: Resultat (figur 14) från hållfasthetsutveckling är enbart från FA från Uppsala och kalkfiller eftersom betongen med FA från Hallstavik hade en annan vct och därför inte jämförbara. Betongen med FA från Uppsala hade högre sluthållfasthet med ca 5MPa vid 7, 28 och 91 dygn men en lägre hållfasthet efter 1 dygn än kalkfiller. FA från Uppsala bidrog till en ökad sluthållfasthet.



Figur 14. Tryckhållfasthet efter 1, 7, 28, 91 dygn

Figure 14. Compressive strength after 1, 7, 28, 91 days

Emissionstester: visas i tabell 11 kan ni se att den TVOC, den totalhalten flyktiga organiska ämnen är markant högre för Uppsala flygaska än för referensen och Hallstavik. Enligt Boverkets föreskrift kriterier för sunda byggnader och material bör gränsen för TVOC sättas för enskilda VOC. Vad som inte accepteras är obehaglig lukt en oväntad effekt kan vara allergi. Alla andra emissioner verkar vara likvärdiga för betongen med de olika fillermaterialen.

Tabell 10. Emissionsfaktor från en betongkub från respektive blandning.

Prov	TVOC 28dygn, $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$	Formaldehyd 28dygn, $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$	Ammoniak 28dygn, $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$	2-etyl-1-hexanol* 28dygn, $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$
Hallstavik	<10	<10	61	6
Uppsala	40	<10	58	5
Referens	10	<10	47	5
**	-	<25, $\mu\text{g}/\text{m}^3$		

* dominerande flyktiga organiska ämnet

** Gränsvärden enligt Boverket 1997

4.3 Teknikdemonstration Tranås



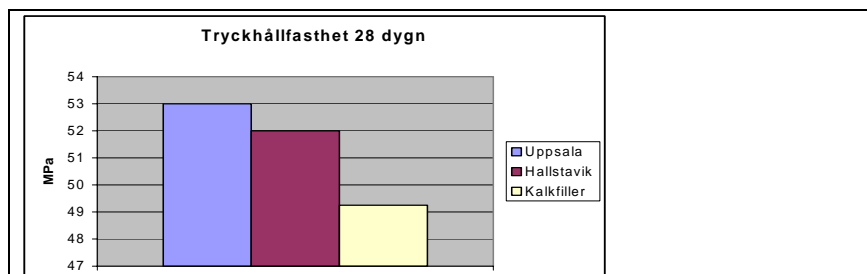
Figur 15. Teknikdemonstration med självkompakterande betong i bottenplatta gjutning i Tranås

Figure 15. Full-scale demonstration self-compacting concrete in Tranås

Gjutningen gjordes i olika sektioner med olika fillermaterial. Följande åsikter kom från NCC ROADS från gjutningen:

- **Arbetbarhet/konsistens vid gjutning**, för varje fillermaterial (två FA och kalkfiller) erhöles rätt konsistens utan att behöva tillsätta extra tillsatsmedel. Blandarmaskinistens konsistenstabell för att styra produktionen gick att använda för att uppnå rätt flytsättnmätt. Konsistenserna las på en nivå som används då man levererar till platta på mark/ bjälklag. Betong med FA Vattenfall Uppsala hade en konsistensförlust på 30 mm denna förlust anses normal och kan förklaras av att bilen var ren på morgonen. FA Hallstaviks pappersbruk upplevdes lite stabbig på arbetsplats, trots den låga doseringen av flygaska.
- **Visuell bedömning**, Alla blandningar såg ut att vara homogena. Kalkfiller innehöll något mera vatten, men detta är normal produktionsvariation. Vid besök på arbetsplatsen konstaterades att alla betongytor var jämna och porfria.
- **Generell bedömning av gjutningen**, FA som provades fungerade som fillermaterial med avseende på betongens reologi och stabilitet.

Resultaten från tryckhållfasthet (figur 16) visar att båda FA bidrar till en ökad sluthållfasthet.



Figur 16. Tryckhållfasthet hos betongen med varierande fillermaterial från teknikdemonstrationen i Tranås

Figure 16. Compressive strength values for the concretes used in the full scale demonstration in Tranås

5 Diskussion

Att utvärdera svenska flygaskor (FA) för användning som fillermaterial i betong kan göras i form av ett processschema enligt följande:



I det här projektet undersöktes tre representativa svenska FA i stegen 1-3 enligt ovan. Två FA genomgick fullskaleförsök; från Hallstaviks pappersbruk, och Vattenfall Uppsala. FA från Mälarenergi Västerås undersöktes bara i steg 1 och delvis i steg 2.

Steg 1 - grundläggande karaktärisering: Alla FA i projektet var både kalcium- och kiselrika vilket tyder på att FA är reaktiva antingen genom hydrauliska eller puzzolana egenskaper. FA från Hallstaviks pappersbruk uppvisade markant högre reaktiva faser än FA från Mälarenergi Västerås. FA från Hallstaviks pappersbruk hade höga halter reaktiv CaO, vilket kan påverka volymbeständigheten negativt. Tidigare utförda tester (le chatlier) i Värmeforsk projektet Q4-219 (Sunbdlom, 2003) visar dock att alla FA i detta projekt är volymbeständiga. Gällande andra kritiska kemiska gränsvärden såsom svavel, klorid, alkali uppvisade FA Mälarenergi Västerås höga halter svavel. Svavel kan orsaka ettringitbildning, vilket medför volymbeständighetsproblem. Därför valdes det inte att gå vidare med denna FA förrän denna problematik är utred. Alla FA uppfyller kraven för alkali. FA från Hallstavik har en lite högre kloridhalt, men uppfyller kraven för betong med låg hållfasthet. Resultaten från siktkurva och densitetsanalys visar att FA ligger inom fillerfraktionen. FA från Hallstaviks pappersbruk var markant grövre FA Vattenfall Uppsala och Mälarenergi Västerås har siktkurvor som liknar det kommersiella fillermaterialet, kalkfiller. FA densitet är något lägre än för kalkfiller.

Steg 2-fördjupad undersökning: Steg 2 är uppdelat i två moment; försök hos betongfabrikant inför fullskaleförsök och fördjupad undersökning med hjälp av DOE. Båda FA uppvisade goda filleregenskaper gällande stabilitet till betongen. FA från Vattenfall Uppsala kan direkt ersätta fillermaterialet i receptet och uppnå samma reologiska beteende med hjälp av lite extra flyttillsats. FA från Hallstaviks pappersbruk absorberade mycket vatten och original receptet gav en jordfuktig betong istället för självkompakterade. Detta kan ha göra med att denna FA har en grövre siktkurva. Vid ökad mängd vatten kunde FA från Hallstavik ge en fungerande betong. Det beslutades att båda FA skulle testas i teknikdemonstrationen. Receptet för FA från Hallstavik skulle fillermaterialet doseras i 3ggr mindre mängd. Genom tillsats av en större mängd DOE-försöken visade att SiO₂, MgO och CaO ökade viskositeten hos en cement/FA pasta. Trots osäkra resultat fanns det en tendens kaliumföreningar ökade viskositeten för Svavel, klorider fosfater vart det varierande resultat. Hållfasthet en tendens att SiO₂ och CaO ökar 1 dygns hållfasthet.

Teknikdemonstration: Försöken visar att FA från Vattenfall Uppsala fungerar som fillermaterial i nuvarande betongrecept med avseende på de reologiska och stabilitets

egenskaper. FA från Hallstaviks pappersbruk fungerade men 3ggr mindre mängd specificerad fillermaterial andel. Båda FA gav en högre sluthållfasthet till betongen jämfört med betong med kalkfiller. FA från Vattenfall Uppsala uppvisade konsistensförlust på 30mm denna förlust anses normal och kan förklaras av att bilen var ren på morgonen. FA från Hallstaviks pappersbruk upplevdes lite stabbig på arbetsplats. Uppföljningen efteråt visade att alla betongytor konstaterades att alla betongytor var jämna och porfria.

6 Slutsatser

Det finns svenska flygaskor (FA) som uppvisar filleregenskaper och är lämpade som fillermaterial. Testade FA kunde i teknikdemonstrationen ersätta det idag använda kalkfillret i använt betongrecept med avseende på de reologiska egenskaperna då främst stabilitet.

Utifrån genomföra laboratorie- och fullskaleförsök kan följande slutsatser dras:

- FA från Hallstavik pappersbruk ger olika hållfasthetsegenskaper i cement/FA bruk beroende på förbränningstemperatur. Egenskapen verkar vara kopplad till vilken förening kalcium är uppbunden. Högre hållfasthet vid högre halter CaO.
- FA från Hallstavik pappersbruk har högre reaktiv kisel och kalciumhalt än FA från Mälarenergi Västerås. Testade FA i projektet har från tidigare undersökningar visats volymbeständiga.
- FA från Hallstavik pappersbruk hade en markant grövre siktkurva detta kan förklara den ökade vattenadsorptionen i laboratorieförsöken och därmed 3 ggr mindre mängd fillermaterial andel i teknikdemonstrationen
- Fördjupad undersökning visar att fysikaliska parametrar såsom kornform och siktkurva påverkar reologin. FA från PF-pannor uppvisar ett likartat reologiskt fillerbeteende som kalkfiller.
- Testade FA ökar sluthållfasthet i Teknikdemonstration och laboratorieförsök.
- Teknikdemonstration med FA från Hallstavik pappersbruk och Vattenfall Uppsala visade att flygaskorna fungerade som fillermaterial vid gjutning. Främst med avseende på betongens stabilitet.
- Betongytorna i teknikdemonstrationsobjektet var jämna och porfria

6.1 Fortsatt arbete

Det viktigaste är att bygga upp en manual för kvalitetssäkring för att använda flygaska i betong liknade EN 450 för kolflygaskor. Detta bör göras under en utvecklingsfas mellan flygaskesproducenter och betongtillverkare.

Det rekommenderas att intresserade askproducenter bildar en grupp som kan driva vidare arbetet för certifiering eftersom det bevisligen fungerar att använda ”svenska flygaskor” från olika pann- och bränsletyper som fillermaterial i betong.

7 Processen att börja använda flygaska som fillermaterial i betong/rekommendationer



- **Grundläggande karaktärisering:** Göra en grundläggande kemisk- och fysisk karaktärisering av flygaskan som innebär grundämnesanalys, kloridinhåll samt siktkurva och densitet. Volymbeständighetstest (le chatlier) för betong med flygaska är också nödvändigt. Resultatet av karaktäriseringen kan verifieras lämpligast med hjälp av kravprofilerna uppställda i Värmeforsk rapporten Q4-219 ”Användning av energiaskor som fillermaterial vid betongtillverkningen” (Sundblom, 2003).
- **Karaktärisering fillermaterial i betong:** Här testas flygaskans funktion i betongen. Parametrar som bör testas är arbetbarhet (sättnmätt, flytsättnmätt reometerundersökningar), temperaturutveckling i betongen första dygnet, hållfasthetsutveckling och emissionstester. Betongreceptutveckling är också en viktig del i detta steg.
- **Fullskaleförsök:** I samarbete med betongfabrikanter.
- **Certifiering/kontinuerlig kvalitetssäkring:** Kan göras för svenska flygaskor baserat på EN 450 hos certifieringsorgan i Sverige. Erfarenheter från liknande tillsatsmaterial finns hos ackrediterade betonglabb t.ex. Vattenfall utveckling. Viktigt är att referensgruppen består av representanter från både betongindustrin och förbränningsindustrin.

8 Litteraturreferenser

Boverket, Byggavdelningen (1997); "Kriterier för sunda byggnader och material" B6087-1686/96 december 1997

Moosberg-Bustnes H(2003); "Fine Particulate By-products from Mineral and Metallurgical Industries as Filler in Cement-based Materials", Department of Chemical and Metallurgical Engineering, Division of Mineral Processing, Luleå University of Technology, 2003

Naik R. Tarum, Kraus N. Rudolph; (2003) "A new source of pozzolanic material, Wood ash proves useful in flowable fill applications", Concrete International vol.25 No 12 December 2003

Nerén Jens (2005), Mälarenergi Västerås KVV, [jens.neren@malarenergi.se]

Sarabér A:J et al (2003) Effects of co-combustion in the technical and environmental quality of pulverised coal fly ash as pozzolanic filler in concrete. Arnhem: KEMA Power Generation & Sustainable. Rapport 50231102-KPS/MEC 03-6190

Steenari B; "Chemical properties of FBC Ashes", Chalmers University of technology, Department of Environmental Inorganic Chemistry, Göteborg 1998

Sundblom Hillevi (2003). Användning av energiaskor som fillermaterial vid betongtillverkningen. Stockholm: Värmeforsk. Rapport 848 i miljöriktig användning av askor.

Sundblom Tage (2005), Hallstavik Pappersbruk, tage.sundblom@holmenpaper.com

A Mängdförhållande utav flygaska/kemiska substanser vid laborieförsöken i Älvkarleby

A.1 Försök Hallstavik flygaska

FÖRSÖK BULK MATERIAL							
Försöksnr	I blandnings nivåer (g)				Vid filler mängd		300g
	SiO ₂	MgO	CaO	CaOH ₂	Aska		SUMMA
b1	6	6	6	6	276		300
b2	30	6	6	30	228		300
b3	6	30	6	30	228		300
b4	30	30	6	6	228		300
b5	6	6	30	30	228		300
b6	30	6	30	6	228		300
b7	6	30	30	6	228		300
b8	30	30	30	30	180		300
b9	18	18	18	18	228		300
b10	18	18	18	18	228		300

FÖRSÖK SPÄRÄM NEN							
Försöksnr	I blandnings nivåer (g)				Vid filler mängd		300g
	CaSO ₄	NaCl	KSO ₄	KCl	K ₄ PO ₇	aska	
s1	2	2	0	15	8	274	300
s2	9	2	0	0	2	287	300
s3	2	15	0	0	8	275	300
s4	9	15	0	15	2	259	300
s5	2	2	18	15	2	263	300
s6	9	2	18	0	8	264	300
s7	2	15	18	0	2	264	300
s8	9	15	18	15	8	236	300
s9	5	8	9	8	5	265	300
s10	5	8	9	8	5	265	300

A.2 Försök Västerås flygaska

FÖRSÖK BULK MATERIAL							
Försöksnr	I blandnings nivåer (g)				Vid filler mängd		300g
	SiO ₂	MgO	CaO	CaOH ₂	Aska		SUMMA
b1	6	6	6	6	276		300
b2	30	6	6	30	228		300
b3	6	30	6	30	228		300
b4	30	30	6	6	228		300
b5	6	6	30	30	228		300
b6	30	6	30	6	228		300
b7	6	30	30	6	228		300
b8	30	30	30	30	180		300
b9	18	18	18	18	228		300
b10	18	18	18	18	228		300

FÖRSÖK SPÄRÄM NEN							
Försöksnr	I blandnings nivåer (g)				Vid filler mängd		300g
	CaSO ₄	NaCl	KSO ₄	KCl	K ₄ PO ₇	aska	
s1	2	2	0	15	8	274	300
s2	9	2	0	0	2	287	300
s3	2	15	0	0	8	275	300
s4	9	15	0	15	2	259	300
s5	2	2	18	15	2	263	300
s6	9	2	18	0	8	264	300
s7	2	15	18	0	2	264	300
s8	9	15	18	15	8	236	300
s9	5	8	9	8	5	265	300
s10	5	8	9	8	5	265	300

B Uträkning av Gränsvärden i DOE- modellen jämfört med möjliga teoretisk gränsvärden utifrån mängdförhållande i försöken och halter i flygaskorna

Följande antagande har gjorts för uträkning av teoretiska gränsvärden

Bulkämnen:

- För kisel- och kalciumoxid i askan räknas den reaktiva mängden fram enligt EN-197 (här utfört av Cementa Research). För CaO och CA(OH)₂ har även mängden i XRD- analysen räknats in.

Spårämnen:

- Minsta mängden av grundämne bestämmer gränsvärden för spårämnen dvs. för KCl är kloridhalten styrande osv.

Gränsvärden (max, min) räknas ut genom att ta max/min halten av respektive förening i den modifierade aska styrs utav halten i askan samt mängd kemisks substans tillsatt enligt formel 1.1. Resultatet från uträkningarna är listat i tabellen 12.

Teoretisk gränsvärde = DOE-gränsvärde + X* % TS av ämnet i flygaskan Formel 1.1

X = mängd flygaska i blandningen

Tabell 11. Uträkning av teoretiskt gränsvärde de DOE-försöken

	DOE-gränsvärden				Halter i askan*		Teoretiska Gränsvärden			
	Teoretisk		Verkliga		Hallstavik	Västerås	Hallstavik		Västerås	
	min	max	Min	max	%TS i aska	% TS i askan	min	max	min	max
Bulkämnen										
SiO₂	2	10	0,02	0,1	30	25	20,0	38,7	17,0	34,0
MgO	2	10	0,02	0,1	3,46	2,35	4,1	13,3	3,4	12,3
CaO **	2	10	0,02	0,1	2,052	0	3,2	12,0	2,0	10,0
Ca(OH)₂**	2	10	0,02	0,1	0	0,77	2,0	10,0	2,5	10,7
Spårämnen***										
CaSO₄	0,5	3	0,005	0,03	2,28	12,18	1,9	5,2	7,8	14,7
NaCl	0,5	5	0,005	0,05	0,606	0,037	0,9	5,6	0,5	5,0
KSO₄	0,1	6	0,001	0,06	1,14	1,25	0,8	7,1	0,9	7,2
KCl	0,1	0,6	0,001	0,05	0,606	0,037	0,5	5,6	0,1	5,0
K₄PO₇****	0,5	2,5	0,005	0,025	0,633	1,22	0,9	3,1	1,2	3,7

* Baserade på Cementa Research beräkningar enligt standard EN-197.
 ** Även kopplat till XRD-analyser gjorda på askan i tabellerna halter i askan
 *** Den förening som det finns minst av i askan styr i tabellerna halter i askan
 **** resultat från Analytica i tabellerna halter i askan

C Recept Laborieförsök NCC ROADS

C.1 Recept kalkfiller

					Sats 30			
Material	Densitet	Vikt	Volym	Vikt liten sats				
Cement Slite Bygg	3,1	330	106	9,9				
Kalkfiller	2,9	100	34	3,0	FUKTREDUKTION		Vattenabsorption	
0 - 4 mm Kleva	2,650	1000	377	30,0	0,30	30,30	0,007	0,21
4 - 8 mm Kleva	2,650	0	0	0,0	0,00	0,00	0,007	0,00
8 - 16 mm Kleva	2,650	770	291	23,1	0,00	23,10	0,007	0,16
Vatten	1	180	180	5,4	5,4		Summa vattenabsorption 0,37	
Cemflux Bro	1	3,5	3	0,104	0,07			
Luft			10	0,0				
		2383	1002	71,5	VATTEN	5,4		

C.2 Recept Uppsala flygaska

					Sats 30			
Material	Densitet	Vikt	Volym	Vikt liten sats				
Cement Slite Bygg	3,1	330	106	9,9				
Uppsala	2,5	100	40	3,0	FUKTREDUKTION		Vattenabsorption	
0 - 4 mm Kleva	2,650	1000	377	30,0	0,30	30,30	0,007	0,21
4 - 8 mm Kleva	2,650	0	0	0,0	0,00	0,00	0,007	0,00
8 - 16 mm Kleva	2,650	750	283	22,5	0,00	22,50	0,007	0,16
Vatten	1	180	180	5,4	5,4		Summa vattenabsorption 0,37	
Cemflux Bro	1	3,5	3	0,104	0,07			
Luft			10	0,0				
		2363	1000	70,9	VATTEN	5,4		

C.3 Recept Hallstavik flygaska

					Sats 30			
Material	Densitet	Vikt	Volym	Vikt liten sats				
Cement Slite Bygg	3,1	330	106	9,9				
Hallstavik	2,5	100	40	3,0	FUKTREDUKTION		Vattenabsorption	
0 - 4 mm Kleva	2,650	1000	377	30,0	0,30	30,30	0,007	0,21
4 - 8 mm Kleva	2,650	0	0	0,0	0,00	0,00	0,007	0,00
8 - 16 mm Kleva	2,650	750	283	22,5	0,00	22,50	0,007	0,16
Vatten	1	180	180	5,4	5,4		Summa vattenabsorption 0,37	
Cemflux Bro	1	3,5	3	0,104	0,07			
Luft			10	0,0				
		2363	1000	70,9	VATTEN	5,4		

D Recept teknikdemonstration

RECEPT	UPPSALA	HALLSTAVIK	KALKFILLER
Antal m³	1,3	2	2,7
Byggcement kg/m³	330	330	330
Flygaska kg/m³	120	30	-
Kalkfiller Limus 40 kg/m³			100
0-16 mm Stenmjöl/kross kg/m³	1710	1765	1710
Cemflux hus % av	1,3	1,3	1,3

cementvikten			
Vatten kg/m³	184	185	187
VCT	0,56	0,56	0,57

E Grundämnesanalys MG2 Analytica

ELEMENT	SAMPLE	Västerås	Hallsta	Uppsala
TS	%	99,4	99,9	100
SiO ₂	% TS	26,3	34,9	22
Al ₂ O ₃	% TS	11,2	19,2	4,32
CaO	% TS	26,5	31,1	39,1
Fe ₂ O ₃	% TS	11	1,91	12,7
K ₂ O	% TS	1,28	1,2	0,844
MgO	% TS	2,54	3,63	8,52
MnO	% TS	0,127	0,123	0,153
Na ₂ O	% TS	0,636	0,682	0,314
P ₂ O ₅	% TS	1,22	0,633	1,44
TiO ₂	% TS	0,52	0,285	0,224
LOI	% TS	7,3	3,9	4,7
Summa	% TS	81,3	93,7	89,6
(Na ₂ O) _{eq}	% TS	1,48	1,47	0,87
S	mg/kg TS	39700	8380	22700
As	mg/kg TS	28,5	8,83	55
Ba	mg/kg TS	1290	412	706
Be	mg/kg TS	5,56	2,89	1,14
Cd	mg/kg TS	1,13	1,5	1,18
Co	mg/kg TS	34,4	6,2	33,3
Cr	mg/kg TS	104	85,3	58,9
Cu	mg/kg TS	116	374	50,1
Hg	mg/kg TS	0,757	0,0639	0,384
La	mg/kg TS	25,9	14,7	12,1
Mo	mg/kg TS	27,4	<6	7,75
Nb	mg/kg TS	8,06	6,28	<6
Ni	mg/kg TS	101	70	47,4
Pb	mg/kg TS	95,4	38,8	65
Sc	mg/kg TS	14,7	3,12	3,81
Sn	mg/kg TS	<20	<20	<20
Sr	mg/kg TS	814	511	379
V	mg/kg TS	161	13,8	43,1
W	mg/kg TS	<60	<60	<60
Y	mg/kg TS	38,8	19,3	14,5
Zn	mg/kg TS	101	326	83,3
Zr	mg/kg TS	149	316	125
Cl	% av TS			<0.1

F Lakteter, Analytica

I tabellen nedan så är första raden i excelltabellen värden på flygaskan från Mälarenergi Västerås och andra raden värden på flygaskan från Hallstaviks pappersbruk.

Beteckning 1	Beteckning 2	Paket	Ankom	Ca mg/l	Fe mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	S mg/l
FA Västerås	L/S 2	LV3A	20041008	2810	0,0664	162	<0,09	201	343
FA Hallstavik	L/S 2	LV3A	20041008	739	0,0907	36,6	<0,09	52	0,816

Kond. mS/m	pH	Al µg/l	As µg/l	Ba µg/l	Cd µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Hg µg/l	Mn µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Zn µg/l
2070	>10.0	3,31	<65	2720	6,91	631	2,18	<0,02	<0,2	<0,5	17,5	2,47
809	>10.0	657	<11	7420	0,0652	0,807	3,49	<0,02	0,231	<0,5	2,54	7,12

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB

101 53 Stockholm

Tel 08-677 25 80

Fax 08-677 25 35

www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker

Fax 08-677 25 35