

En förenklad testmetodik för kvalitetssäkring – Etapp 1

Henrik Bjurström, Magnus Berg, Maria Arm, Pascal Suèr och Karsten Håkansson

**En förenklad testmetodik för kvalitetssäkring –
Etapp 1**

**A simplified test methodology for quality assurance
– Phase 1**

Henrik Bjurström och Magnus Berg
ÅF-Energi & Miljö AB

Maria Arm, Pascal Suèr och Karsten Håkansson
Statens geotekniska institut

Q4-148

Abstract

Projektets syfte var att undersöka om kvaliteten hos aska kan följas med en enkel testmetodik på färsk aska som komplement till den fullständiga karakteriseringen av den åldrade askan. Ur resultaten i denna första etapp framgår att den förenklade testmetodiken (glödgningsförlust, kornstorleksfördelning samt kemisk sammansättning med XRF) kan användas för att förutsäga de mekaniska egenskaperna hos färsk aska. För lakegenskaperna behöver den kemiska undersökningen fördjupas. För att den förenklade testmetodiken ska kunna användas i praktiken krävs att sambandet mellan den förenklade metodiken och egenskaperna för åldrat aska styrks i den andra etappen av projektet.

Sammanfattning

För geoteknisk användning av askor blir ett testprogram omfattande därför att många egenskaper skall bestämmas. Dessa tester skall genomföras på askor som har mognat eller åldrats i några månader. En mycket stor del av orsaken till att askans egenskaper varierar, och eventuellt avviker från dem som förväntas, finns emellertid i produktionen, d v s i förbränningen: varierande bränslen, varierande förbränningsförhållanden från timma till timma, från dag till dag. I vilken utsträckning påverkar dessa variationer den åldrade askans egenskaper? Hur dokumentera på vilket sätt de variationer som producenten vet om, påverkar variationerna i askan som kommer att användas efter kanske ett halvårs lagring?

I projektet har studerats en förenklad testmetodik att följa kvaliteten hos färsk bottenaska från returträ. Testerna i denna metodik, som är tänkt att vara ett komplement till den omfattande kvalitetssäkringen av åldrad aska, bestod av glödningsförlusten som mått på oförbränt, kornstorleksfördelningen samt den kemiska sammansättningen med Röntgenfluorescens.

Under en månads tid har egenskaperna hos färsk aska följts med den förenklade metodiken, samtidigt som driftsförhållanden i pannan har följts. Några av dessa färska prov har även undersökts med ett urval av de tester som ingår i den omfattande karakteriseringen av åldrad aska. Avsikten var dels att göra en preliminär kontroll av att resultaten från dessa tester kan gå att förutsägas utifrån den förenklade metodiken, dels att få ett underlag som tillåter att åldringens inverkan på egenskaperna påvisas och bedöms. Dessa tester var nedkrossningsbenägenhet, deformation vid belastning, halten organiska föroreningar och lakning av oorganiska ämnen.

Utvärderingen av resultaten visar att glödningsförlusten kan användas för att följa de mekaniska egenskaperna (bl a deformationsegenskaper) hos den färska askan. Sambandet mellan de kemiska uppgifterna och lakegenskaperna är sämre. Den kemiska undersökningen behöver därför fördjupas om samband ska kunna styrkas.

För att använda den förenklade metodiken i praktiken behöver också sambandet mellan de förenklade testerna på färsk aska och egenskaperna för lagrad aska styrkas. Detta skall göras i den andra etappen där egenskaperna testas på samma aska som i denna första etapp efter åldring.

Summary

The battery of tests to be run on ashes before these are utilized in geotechnical engineering is large because many properties need to be determined. These tests should be performed on ash that has matured or aged several months. The cause for the variations in the properties, and for their possible deviation from specifications, is to a large extent found in the production, i.e. the combustion: varying fuels, varying conditions for the combustion from hour to hour, from day to day. To which extent do these variations influence the quality of the aged ash? How should one document the chain from the variations that the producer knows about to the variations in the aged ash that will be used after possibly half a year?

In this project, we have studied a simplified testing method for fresh bottom ash from waste wood. The tests in this method, which is intended as a complement to the comprehensive testing program on the aged ash, consists of loss on ignition (a measure of the content of unburned carbon), particle size distribution and chemical composition using X-ray fluorescence.

The properties of fresh ash have been monitored for a month using this simplified method, and the operating conditions of the moving grate furnace have been recorded in parallel. Some of the samples have also been subjected to a selection of the tests that otherwise should be performed on the aged ash. These tests were performed in order to first make a preliminary assessment of the usefulness of the simplified testing and second obtain evidence of the influence of aging on the properties and assess this influence. These tests are durability, deformation, concentration of organic pollutants and leaching of inorganic substances.

An analysis of the results shows that the loss on ignition, i.e. the unburned carbon, may be used to monitor the variations in mechanical properties (a.o. the deformation properties) of the fresh ash. The correlation between composition and leaching properties is not as good. The chemical investigation must be expanded if a correlation is to be confirmed.

In order to apply the simplified method in full scale, the results from tests in the simplified method should be correlated with results from tests on aged ash. This will be done in the second phase of this project, in which tests will be performed on the same ash samples as in this study, after ageing.

Innehållsförteckning

1	BAKGRUND	1
2	UPPDRAGET	2
2.1	SYFTE OCH MÅLSÄTTNING	2
2.2	UPPDRAGETS OMFATTNING	3
2.3	UTFÖRANDET	3
3	FÖRSÖKENS GENOMFÖRANDE	4
3.1	BESKRIVNING AV ANLÄGGNINGEN	4
3.2	BESKRIVNING AV TESTERNA	5
3.3	PROVTAGNINGEN	7
4	RESULTAT	11
4.1	ERFARENHETER UNDER PROVTAGNINGSPERIODEN	11
4.2	DRIFTSFÖRHÅLLANDEN UNDER PERIODEN	11
4.3	GLÖDGNINGSFÖRLUST (VARDAGSPROV OCH VECKOPROV)	15
4.4	MEKANISKA EGENSKAPER	16
4.5	KEMISKA EGENSKAPER	22
5	METODER ATT TA FRAM SAMBAND	27
5.1	OKULÄR GRANSKNING AV RESULTATEN	27
5.2	MER AVANCERADE METODER	28
6	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	32
6.1	GLÖDGNINGSFÖRLUST	33
6.2	MEKANISKA EGENSKAPER	33
6.3	KEMISKA EGENSKAPER	35
6.4	ÄR DEN FÖRENKLADE TESTMETODIKEN LÄMPLIG?	36
7	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSARBETE	37
8	LITTERATURREFERENSER	38

Bilagor

- A SAMMANSTÄLLNING ÖVER DRIFTSFÖRHÅLLANDEN OCH PROV**
- B PRIMÄRDATA FÖR SAMMANSÄTTNINGEN OCH LAKTESTER**
- C KORNSTORLEKSFÖRDELNINGSKURVOR FÖR ENSKILDA PROV**
- D PACKNINGSKURVOR OCH STYVVHETSDATA FÖR VECKOPROV**

1 Bakgrund

Genom kvalitetssäkringen dokumenterar producenten att produktens egenskaper är de förväntade och att värden ligger inom ett känt intervall. Det innebär:

- o ett sätt att producera som är dokumenterat, inklusive hanteringen av avvikelser från normala förhållanden
- o kontroll av produktens egenskaper, d v s de egenskaper som kunden vill ha, genom provtagning och test
- o protokoll

För en geoteknisk användning av askor är de egenskaper som är relevanta ganska många varför testprogrammet blir omfattande, se t ex Hartléns sammanställning åt RVF [1] och Fällman och Hartléns sammanställning [2] för hur ett kvalitetssäkringssystem sätts upp för askor som skall användas i vägbyggen eller anläggningsbyggen. Dessa tester skall genomföras på askor som har mognat eller åldrats i några månader.

En mycket stor del av orsaken till att askans egenskaper varierar, och eventuellt avviker från dem som förväntas, finns i produktionen, d v s i förbränningen: varierande bränslen, varierande förbränningsförhållanden från timma till timma, från dag till dag. I vilken utsträckning påverkar dessa variationer askans egenskaper? Hur dokumentera på vilket sätt de variationer som producenten vet om påverkar variationerna i askan som kommer att användas efter kanske ett halvårs lagring?

Kärnfrågorna i upprättandet av ett kvalitetssäkringssystem är testmetodik, variabilitet i flera egenskaper, provens representativitet, åldring, dokumentering, med betoning på det senaste ordet. Programmet av tester (geotekniska, miljömässiga egenskaper) kan inte undvaras för den färdiga produkten. Det kan dock inte användas för en optimal styrning av produktionen av aska då t ex lastförändringar har en tidsskala på timmar eller dygn, dessutom ca sex månader innan egenskapen bestäms. Det är dessutom inte relevant att genomföra programmet på färsk aska.

Det finns ett behov av dels information om de variationer som kan förväntas i en askas egenskaper, dels en testmetodik att undersöka variabiliteten och dokumentera den. Denna testmetodik bör kunna användas som underlag för kvalitetssäkringen hos askor, vilket är ett väsentligt steg mot ett ökat och bättre utnyttjande av askor som konstruktionsmaterial.

Den tekniska lösningen bör alltså vara att bestämma egenskaper hos den färska askan som är relevanta för förbränningsfasen och deras variationer. Ett program med få och enkla tester på t ex dagliga prover, om den rätta tidsskalan för variationer i förbränningen är ett dygn, behöver inte exakt mäta de egenskaper som kunden vill ha, bara det går att härleda egenskaperna hos den åldrade askan och deras variationer tillbaka till resultaten för den färska askan.

2 Uppdraget

2.1 Syfte och målsättning

Syftet var att öka kunskapen om askors egenskaper som grund för en kvalitetssäkring inför en användning.

I sammanställningen av ett kvalitetssäkringssystem bör man bearbeta en uppsättning av frågor som är komplex:

- o Vad är variabiliteten i askornas egenskaper ur användarens synpunkt?
- o Hur följa och styra askors egenskaper i den takt som askor produceras?
- o Hur bygga upp en enkel testmetodik som tillfredsställer både användare och producent?
- o Är den variabilitet som registreras med denna metodik relevant för den variabilitet som användaren är intresserad av?
- o Hur dokumentera ändringen i egenskaper som följer av askornas mognadsperiod?

Att utförligt behandla alla frågorna är ett omfattande program. Målsättningen för insatserna i detta uppdrag var därför att:

- o ge en uppfattning om variabiliteten hos askor under en jämförelsevis lång period med varierande driftsförhållanden
- o undersöka om askkvaliteten kan följas med jämförelsevis enkla tester som komplement till de mer omfattande testerna av geotekniska och miljömässiga egenskaper
- o korrelera resultaten från dessa enkla tester med resultaten från de mer omfattande testerna av geotekniska och miljömässiga egenskaper och med förhållandena i pannan (last, bränsle, m fl)
- o undersöka om det går att härleda den åldrade askans egenskaper och dess variationer tillbaka till resultaten för den färska askan.

En daglig uppföljning av kvaliteten hos aska med en fullständig karakterisering, se t ex Hartléns sammanställning [1], är mycket omfattande, om det överhuvudtaget är möjligt att genomföra den. En studie av en förenklad testmetodik som kompletterar denna omfattande metodik blir också omfattande och kostsam.

För att studien av en förenklad testmetodik skall vara genomförbar måste även studien skalas av till en förstudie, d v s en förenklad test av den förenklade testmetodiken. Den allra viktigaste delen av informationen bör komma fram, men det är inte nödvändigt att ta fram all information som det går eller är önskvärt att ta fram.

2.2 Uppdragets omfattning

För att kunna genomföra projektet till en rimlig kostnad har vi valt att påvisa variationer genom enkla tester på prov som tagits med täta tidsintervall medan egenskaper bestäms med mer omfattande tester på prov som tas ut mer sällan.

Förutom uppföljningen och dokumentering av driften av förbränningsanläggningen omfattar det praktiska arbetet i princip följande moment:

- o De enkla testerna utförs på prov som tas ut med jämförelsevis korta tidsintervall
- o Den fullständiga karakteriseringen utförs på prov som tas ut med längre tidsintervall och därefter lagras.
- o Kompletterande tester vilkas syfte är att underlätta korrelationen av resultaten från dessa två serier av tester

Askans egenskaper beror i stor utsträckning på förbränningen, men de beror även på förhållanden under åldringen. För att i detta projekt kunna redovisa bidragen från båda förlopp till variationerna i egenskaper har vi valt att genomföra en bantad karakterisering av flera färska prov, inte lika ofta som för de enkla testerna, inte lika sällan som för de omfattande testerna.

Som ett resultat av diskussionerna om projektet har Värmeforsks delprogram ”Miljöriktig användning av askor” valt att dela upp det i två etapper:

- o I den första etappen som redovisas med föreliggande rapport tas alla prov ut och såväl serien av enkla tester som den bantade karakteriseringen genomförs på färska prov.
- o I en planerad andra etapp genomförs undersökningen av åldrade prov.

2.3 Utförandet

Arbetet har utförts i ett samarbete mellan ÅF-Energi & Miljö AB (ÅF), Statens geotekniska institut (SGI) och Sydkraft Östvärme. Projektansvarig vid ÅF var Henrik Bjurström. Från SGI har deltagit Maria Arm (kontaktperson), Pascal Suèr och Karsten Håkansson. Projektansvarig vid Sydkraft Östvärme var Henrik Johansson.

Uppdraget har följts för Värmeforsk Services räkning av en referensgrupp bestående av:

- o Bo von Bahr, SP, Sveriges Provnings- och forskningsinstitut
- o Karl-Johan Loorents, VTI, Statens väg- och transportforskningsinstitut
- o Hans Söderström, Gatu- och Fastighetskontoret, Stockholms Stad

3 Försökens genomförande

Panna P11 vid Sydkraft Östvärms anläggning i Händelö valdes ut för projektet av flera skäl. Ett av dem är att flera forskningsprojekt utförts för Värmeforsk med denna panna, vilket innebär att förhållanden vid P11 är jämförelsevis välkända. Ett annat är möjligheten att ha god kontroll över ingående bränsle genom den normala uppföljningen av driften. Bränslet är huvudsakligen returträ (s k RT-flis), vilket inte studerats lika mycket som kol eller hushållsavfall.

Händelöverket har dock idag ingen rutin för provtagning och uppföljning av askans kvalitet. Prov tas vid behov och man bestämmer lakegenskaperna som skakförsök vid $L/S^1=2$, vilket räcker för dagens användning av bottenaskan. Provtagning i detta projekt är därför en uppgift utanför driftsrutinen.

3.1 Beskrivning av anläggningen

Vid Händelö finns fyra pannor:

- o P11, roster, där en blandning av RT-flis, gummi och skogsflis eldas
- o P12, roster, där en blandning av kol och gummi eldas
- o P13, fluidbädd, där en blandning av skogsbränsle och gummi eldas
- o P14, fluidbädd där hushållsavfall, verksamhetsavfall och rötslam eldas

Pannorna tas ur drift i tur och ordning främst under revisionsperioden maj till oktober. Hierarkin är följande:

- o P14 ligger först och används som baslast,
- o P11 ligger oftast som nummer två, men det förekommer att P13 ligger som nummer två.

Lastförhållanden för P11 är därför tämligen jämna, även om det förekommer perioder med lastvariationer. Några större variationer under en dag, från dag till dag eller från vecka till vecka bör inte förväntas. Något som kan påverka lasten är eventuella behov vid månadssluten att bränna kol i P12 för att fylla kolkvoten för månaden. P11 stängs av ca en gång per månad för rengöring.

Bränslet till P11 är huvudsakligen RT-flis med en inblandning av gummi (upp till 10%) och skogsflis. Gummi blandas in med målsättningen att hålla en tillräckligt hög halt svavel i askan för att undvika kloridsmältor på panntuberna och medföljande korrosion. Varför skogsflis blandas med RT-flis är en försörjningsfråga: den på senare åren hårdnande konkurrensen om biobränslen och returbränslen på marknaden skapar tillfälliga logistikproblem.

Bränslets sammansättning kan variera. Det finns en planering för hela säsongen eller året, men den exakta sammansättningen beror på leveranserna och läget på marknaden för de olika bränslena. Idag har Händelöverket fyra till sex inhemska leverantörer av

¹ L/S är kvoten mellan volymen lakvätska och mängden lakad fast material, med enheten l/kg eller motsvarande. L står för "Liquid" och S för "Solid".

RT-flis och tre till fyra utländska leverantörer. För närvarande använder man en hel del skogsbränsle i P11. Framförhållningen är ungefär en vecka.

Den momentana bränslesammansättningen är omöjlig att bestämma. Bränslet tas från olika högar och matas med frontlastare till bränsleintaget. Sönderklippt gummi fylls på i en silo och transporteras vidare med skruvtransportör. Matningsproblem förekommer varför även den momentana andelen gummi i bränslet kan variera.

Panna P11 vid Händelö är en panna med vibrationsrost. Produktionen av ånga motsvarar en termisk effekt på ca 70 MW. Rökgasreningen består av en cyklon som avskiljer en grov fraktion, den så kallade skimmeraskan, och ett textilt spärfilter (slangfilter). För NO_x-reduceringen finns ett SNCR-system² med insprutning av ammoniak.

Bottenaskan i P11 släcks i ett vattenbad, matas sedan ut ur badet och pannan med en skrapa och transporteras vidare på ett band till container (fyra stycken på 30 m³ i en separat byggnad). Till dessa containrar förs även den så kallade skimmeraskan (askan från cyklon) med hög halt oförbränt. Det är Händelöverkets avsikt att recirkulera skimmeraskan till pannan, men periodvis sker detta inte. Containrarna transporteras till upplag och töms där av en entreprenör. I normal drift fylls sex till åtta container per dygn.

3.2 Beskrivning av testerna

Vid planeringen av studien var det tänkt att tre serier av tester skulle utföras på de prov som tas inom projektet:

- o en serie enkla tester på färsk aska för den dagliga uppföljningen (nivå 1),
- o en fullständig karakterisering av åldrad aska (nivå 3)
- o en intermediär nivå med en bantad karakterisering av färsk aska (nivå 2).

I denna etapp utfördes testerna på nivå 1 och nivå 2 på fräska prov. I den planerade andra etappen utförs testerna på nivå 3 eller upprepas de på nivå 2 på åldrade prov.

3.2.1 Nivå 1 i bestämningen av askans egenskaper: den förenklade metodiken

På nivå 1 utfördes följande tester på prov som togs dagligen:

- o bestämning av kornstorleksfördelningen
- o bestämning av oförbränt material, dels vid 550°C (oförbränt organiskt material), dels vid ca 1000°C (så kallad LOI³, vilken även ger koldioxid från karbonater⁴, delvis oorganiskt kol)
- o bestämning av askans huvudkomponenter med Röntgenfluorescens⁵ (XRF)

² SNCR, Selective Non-Catalytic Reduction

³ LOI, Loss-on-Ignition, motsvarar glödningsförlust.

⁴ Det oorganiska kolet i karbonater är egentligen inte något oförbränt material.

⁵ Analys med hjälp av ett Röntgenfluorescensinstrument har förutsättningar att bli en metod för driftsuppföljning online, vilket uppslutning av ett prov följd av totalhaltanalys inte har.

Dessa tester är förhållandevis enkla att genomföra och kan ingå i en daglig analysrutin.

3.2.2 Nivå 3 i bestämningen av askans egenskaper

Ett program för den fullständiga karakteriseringen av ett prov aska omfattar minst följande tester på prov som fått åldras i ca sex månader:

- o kornstorleksfördelningen
- o deformationsegenskaperna genom dynamiska treaxialförsök och deras beroende av vattenhalten
- o nedkrossningsbenägenheten vid packningsförsök
- o den termiska isoleringsförmågan och dess beroende av vattenhalten
- o halten oförbränt material
- o bestämning av totalhalter av intressanta grundämnen genom uppslutning av provet
- o lakegenskaperna genom sk skaktester, såväl tvåstegslakning (L/S=2 och L/S=2-10 enligt SS-EN 12457-3) som tillgänglighetstest (enligt NT-ENVIR 003)
- o kolonnförsök för lakegenskaperna (prEN 14405)
- o analys av organiska ämnen i askan

De fyra första egenskaperna (kornstorleksfördelningen, deformationsegenskaper, nedkrossningsbenägenheten och termiska isoleringsförmågan) har störst betydelse för geotekniska användningar av askan, t ex i vägar. Övriga egenskaper (lakning och organiska ämnen) är miljöegenskaper. Beträffande miljöegenskaper motsvarar nivå 3 det testprogram som Hartlén rekommenderar [1].

Denna nivå har inte genomförts i föreliggande rapport. Det är dock önskvärd att genomföra dessa tester på lagrad aska för att etablera samband mellan den förenklade metodiken och egenskaperna på lagrad aska.

3.2.3 Nivå 2 i bestämningen av askans egenskaper

På den intermediära nivån utförs ett urval bland de tester som ingår i den fullständiga karakteriseringen (nivå 3) för att koppla dessa till den förenklade testmetodiken:

- o kornstorleksfördelningen
- o deformationsegenskaperna genom dynamiska treaxialförsök vid en vattenkvot
- o nedkrossningsbenägenheten vid packningsförsök
- o halten oförbränt material
- o bestämning av totalhalter genom uppslutning av provet och fotometrisk analys av lösningen (ICP mätning)⁶
- o skakförsök för lakbarheten (tvåstegsförsöket enligt EN 12457-3)
- o analys av polyaromatiska kolväten (PAH)

⁶ Det som skiljer olika fotometrisk metod att bestämma halten av ett grundämne i en lösning är metoden att tillföra energi till provet så att det avger ljus. I en flamfotometer är det en låga medan den sk atomabsorptionen (AA) är flamlös. I den moderna tekniken, ICP (Inductively Coupled Plasma), används ett plasma. Instrumentutvecklingen tillåter att flera grundämnen bestäms samtidigt. Uppslutning och analys av lösningen har dock inte lika goda förutsättningar för att göras online.

Den svåra frågan är om dessa tester på den intermediära nivån skall utföras på färskt eller åldrat material i projektet. För att resultaten skall vara relevanta för användningen skall de utföras på åldrat material. Emellertid är åldringen ett förlopp som inte är fullständigt känt eller väl dokumenterat. Det kan t ex förväntas att de geotekniska egenskaperna förbättras genom åldringen, men det bör undersökas hur mycket och om det gäller alla egenskaperna, för att det fjärde delsyftet i avsnitt 2.1 ska uppnås. Det finns alltså ett värde i att dokumentera egenskaperna för färska prov och bestämma dem ånyo på samma men åldrade prov.

Observera att halten oförbränt material är en betydelsefull egenskap och förekommer på flera punkter ovan. Det är möjligt att de prov som tas ut är tillräckligt homogena för att en bestämning av oförbränt vid varje tillfälle skall vara tillräcklig, men möjligheten att göra bestämningar även för delproven till testerna skall finnas.

3.3 Provtagningen

3.3.1 Hur ta prov?

Prov skall helst tas från en fallande ström eller från ett band då provtagning från hög är mycket svårare.

De prov som tas på alla tre nivåerna skall representera samma parti aska. Provtagning från transportband är praktiskt genomförbart för proven på nivå 1 och 2 (de färska proven). Däremot är det i praktiken ogenomförbart att ta prov från transportband eller fallande ström för prov som åldrats i en stor hög på ett upplag utomhus. Det går helt enkelt inte att med säkerhet hänföra en del av högen till en viss dag eller tidsintervall.

Den minsta volym som det är praktiskt genomförbart att lagra separat på upplaget är ungefär en container med aska. Det är inte heller gångbart att plocka upp en sådan hög och lasta den på ett transportband för provtagningens skull. Däremot är korrekt provtagning på en limpa med aska från en enda container lättare att genomföra än på en hög motsvarande ett års produktion.

För den planerade andra etappen lades därför ett containerlass per vecka på en separat yta inom askupplagets område och märktes med datum⁷. Mognaden av askan kräver en tillräcklig god tillgång till luft och lämplig fuktighet i askhögen. Limpan slätades därför ut så att dess höjd inte översteg en meter.

För att proven för nivå 2 (färsk aska) och nivå 3 (åldrad aska) skall vara jämförbara bör de ha tagits på samma sätt. Det är därför lämpligt att ta även proven för nivå 2 från en hög, även om de kunde utan principiella invändningar ha tagits från transportbandet som transporterar askan från pannan till den container som sedan utgör en limpa på askupplaget.

⁷ Det innebär att samtliga askpartier på nivå 2 kan komma ifråga för tester på nivå 3. I en etapp 2 kommer det att finnas möjlighet att testa på nivå 3 alla askpartier eller ett urval bland dem.

Det bör noteras att skimmeraskan under vissa driftsförhållanden kan matas ut till samma container som bottenaskan. Därför stängdes denna (automatiska) åtgärd av under provtagningsperioden.

Proven för nivå 1 är däremot så små att det är enklast att ta dem från transportbandet vid utgången av pannan. Proven kan i princip tas ut på två ställen: antingen vid fallet från bottenaskrapan i den våta utmatningen av aska till transportbandet eller vid fallet från detta transportband till container i containerhuset. Det är dock inte praktiskt genomförbart att ta prov på det senare stället då utrymmena är för trånga och provtagarens säkerhet inte kan garanteras. Samtliga prov på nivå 1 togs därför vid fallet från bottenaskrapan.

3.3.2 Momentant prov eller samlingsprov?

Eftersom projektet syftar till att kartlägga variabiliteten hos askans egenskaper bör askproven inte vara något samlingsprov för en längre period, t ex på några månader eller ett år. Utgångspunkten bör därför vara att proven som tas ut skall vara momentana prov.

Begreppet ”momentan” är dock relativt. I en geoteknisk användning som t ex vägbyggen används stora mängder material, som kanske motsvarar några veckors eller något års drift. I driften av en panna förekommer emellertid variationer på flera tidsplan: t ex snabba variationer på skalan sekunder eller minuter, lastvariationer under ett dygn och lastvariationer under en eldningssäsong.

Det minsta meningsfulla tidsintervallet för provtagningen och driftsuppföljningen måste väljas med hänsyn till periodiciteten för mätdatainsamlingen, periodiciteten för loggningen i dataminnet, hur bränslet hanteras samt tidskaraktistiken för lastvariationer.

Det bedömdes inte vara meningsfullt att ta stickprov under en kort period då de snabba variationerna på skalan sekunder⁸ eller minuter får för stor betydelse. Proven bör vara representativa för den aska som produceras. Skall testernas resultat vara jämförbara bör proven för nivå 1 och proven för nivå 2 och 3 ha tagits under jämförbara tidsintervall.

Med tanke på att proven för nivå 3, den fullständiga karakteriseringen av åldrad aska, kommer att tas från högar av lagrat material som motsvarar en container är tiden som det tar att fylla en container det mest lämpliga tidsmåttet, i storleksordningen 3 till 4 timmar. Denna tidsskala bedömdes även gälla för lastvariationerna i pannan.

Proven från band togs alltså ut som delprov en gång per timma som läggs ihop till ett samlingsprov för en period på 3-4 timmar. Loggning av data under denna period tillåter en bedömning av om lasten i pannan var konstant eller om den ändrades.

⁸ Askutmatningens periodicitet är ca 10 s och uppåt, motsvarande ett paket med aska som varje skrapblad skjuter framför sig.

Det beslutades att prov på nivå 1 tas vardagar en gång per dygn, ca 10 l. Eftersom P11 släcks för rengöring ca en gång per månad skulle 25 prov ta 1½ till 2 månader i anspråk. Det beslutades också att en container för prov på nivå 2 och aldrig inför nivå 3 skulle tas undan en gång per vecka, från vilka prover på ca 40 l togs i denna etapp, sammanlagt fem stycken.

3.3.3 Uppföljning av driften

Syftet med uppföljningen av driften parallellt med provtagning och tester på proven är att ge möjligheten att korrelera variationer i egenskaper med variationer i driftsförhållanden. De data som bör samlas in utgörs dels av information om bränslet (bränsleanalyser, kvantiteter), dels av information om driften med hjälp av loggade driftsdata, driftsjournal, m m.

Den första åtgärden är att dokumentera alla större förändringar av driften, t ex stopp för rengöring av pannan och olika typer av driftstörningar.

Idag tar Händelöverket prov på varje bränsleleverans och bestämmer fukthalt. Proven från olika leveranser läggs ihop till ett samlingsprov en gång per månad för varje leverantör. På detta samlingsprov bestäms askhalt och fukthalt ur vilka uppgifter för energivärdet räknas ut, emellanåt utförs även elementaranalys (C, H, O, N, S och Cl). För gummi tas normalt inga bränsleanalyser.

Med beaktande av bränslehanteringen vid Händelöverket är de bränsledata som kan utnyttjas i projektet, bränsleanalyser för varje leverantör.

Uppgifter om ton bränsle t ex per dygn erhålls genom en uträkning ur ångdata. Däremot vet man sammansättningen av bränslet varje dygn (andel RT, andel gummi, etc.) vilken registreras.

I Händelöverkets dator kan samtliga värden från driftsövervaknings- och driftstyrningssystem loggas, men det görs inte idag: ett antal värden lagras som medelvärden för en period, oftast en timma, och kan extraheras ur loggfiler. Exempel på data som loggas är produktionen av ånga i kg/s, som kan räknas om till MW.

För projektet har Sydkraft Östvärme extraherat följande data som medelvärden över 15 minuter:

- o lasten loggad som produktionen av ånga i kg/s men omräknad till effekt i MW.
- o resultaten från rökgasanalyserna, d v s CO, NO_x, SO₂, och O₂
- o fyra rökgastemperaturer, d v s en temperatur relativt nära rosten, en i övre delen av pannan, en nära avskiljningen av skimmeraska och en temperatur för slangfiltret

För en mer fullödlig uppföljning av driften och bedömning av driftförhållandena skulle även massbalanser kunna upprättas för askflödena genom loggning av sändningar av flygaska till silo samt bestämning av kvantiteterna bottenaska och skimmeraska som tas ut (antal containrar och vikten av varje container). Kompletterande undersökningar skulle kunna bestå av inaskning av bränsleprover och bestämning av denna askas

sammansättning, bestämning av sammansättningen hos prover av skimmeraska och filteraska, analyser av däckbränslet... Tanken har tänkts, men arbetet bedömdes som alltför omfattande i förhållande till det mervärde som dessa kompletterande undersökningar skulle tillföra.

4 Resultat

4.1 Erfarenheter under provtagningsperioden

Provtagningen har i stort sett gått som planerat med undantag för någon dags sjukdom. Verksamheten inleddes w310 (2003-03-03) av Sydkraft Östvärme. Ett uppehåll gjordes w311 under det planerade underhållsstoppet. Provtagningen avslutades med ett sista prov på nivå 2 w315 (2003-04-11). Fem limpor bottenaska lämnades att mogna på askupplaget.

Värt att notera är följande:

- o Alla proven på bottenaska har tagits på korrekt sätt.
- o Sinterklumpar motsvarande ca 2 m³ har bildats i pannan vilket innebär försämrade förhållanden (pannan fick köras med reducerad last) och borde kunna iakttas på halten oförbränt i proven.
- o P11 släcktes w316 och därefter har den varit i sporadisk drift: värmeunderlaget räckte inte.

För en sammanställning över de prov som tagits, se Bilaga A.

4.2 Driftsförhållanden under perioden

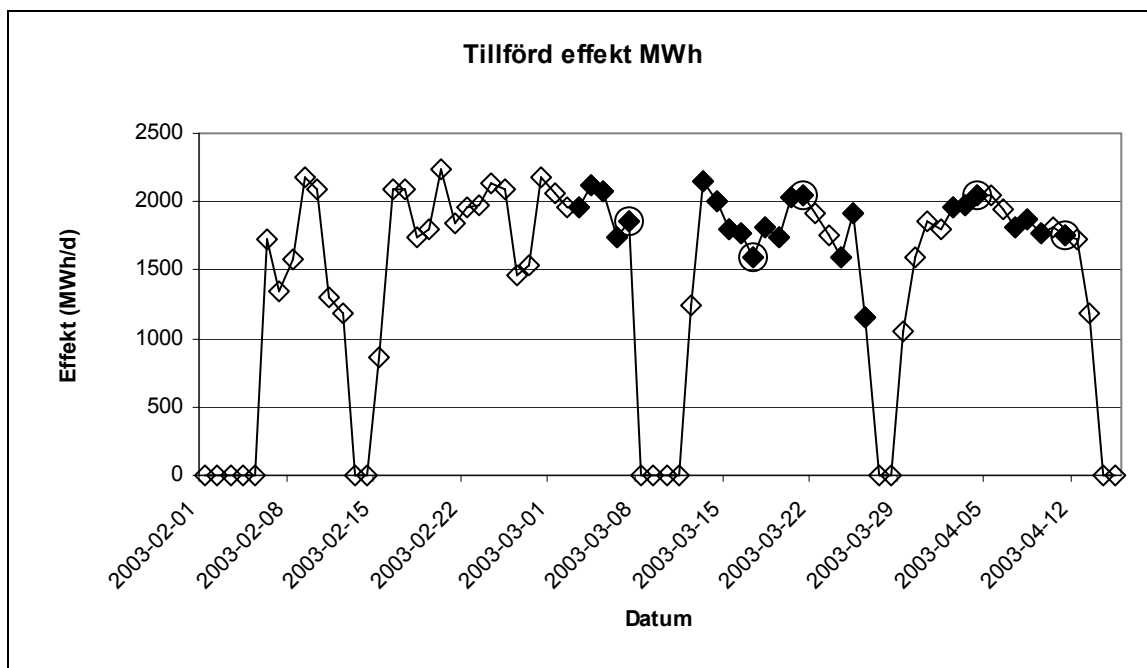
Under den period som är av intresse var pannan i drift:

- o 15 februari – 07 mars (prov på nivå 1 togs den 3/3, 4/3, 5/3, 6/3 samt 7/3 och prov på nivå 2 togs den 7/3)
- o 12 mars – 26 mars (prov på nivå 1 togs den 13/3, 14/3, 15/3, 16/3 17/3, 18/3, 19/3, 20/3, 21/3, 24/3, 25/3 och 26/3, proven på nivå 2 togs den 17/3 och den 21/3)
- o 29 mars – 13 april (prov på nivå 1 togs den 2/4, 3/4, 4/4, 7/4, 8/4, 9/4 och 11/4, prov på nivå 2 togs den 4/4 och den 11/4)

I stort sett full effekt har tagits ut från pannan under och i omedelbar anslutning till provtagningsdagarna, se Figur 1. Observera att pannan ofta tas i drift eller släcks mitt på dagen vilket förklarar värden på halvlast första och sista dagen under en period. Effekten har varierat mellan 50 och 80 MW (1 200 och 2000 MWh/d), se Figur 2 där 15-minuters medelvärden redovisas.

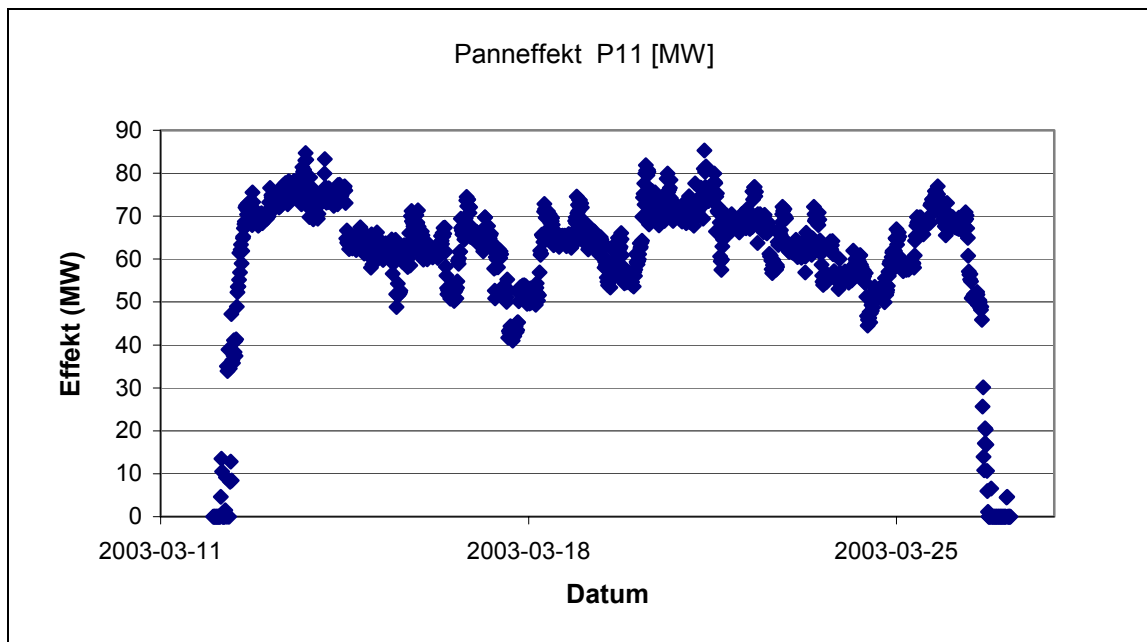
Under februari har driften varit mindre jämn med större lastvariationer än för de två senare perioderna. Under dagarna som närmast ansluter till dem under vilka som proven i detta projekt togs ut har förhållande varit relativt jämna. I tredje perioden, 29 mars till 15 april var lasten jämnare än under föregående perioder.

Den andel energi som erhållits ur däck under ett dygn redovisas i Figur 3.



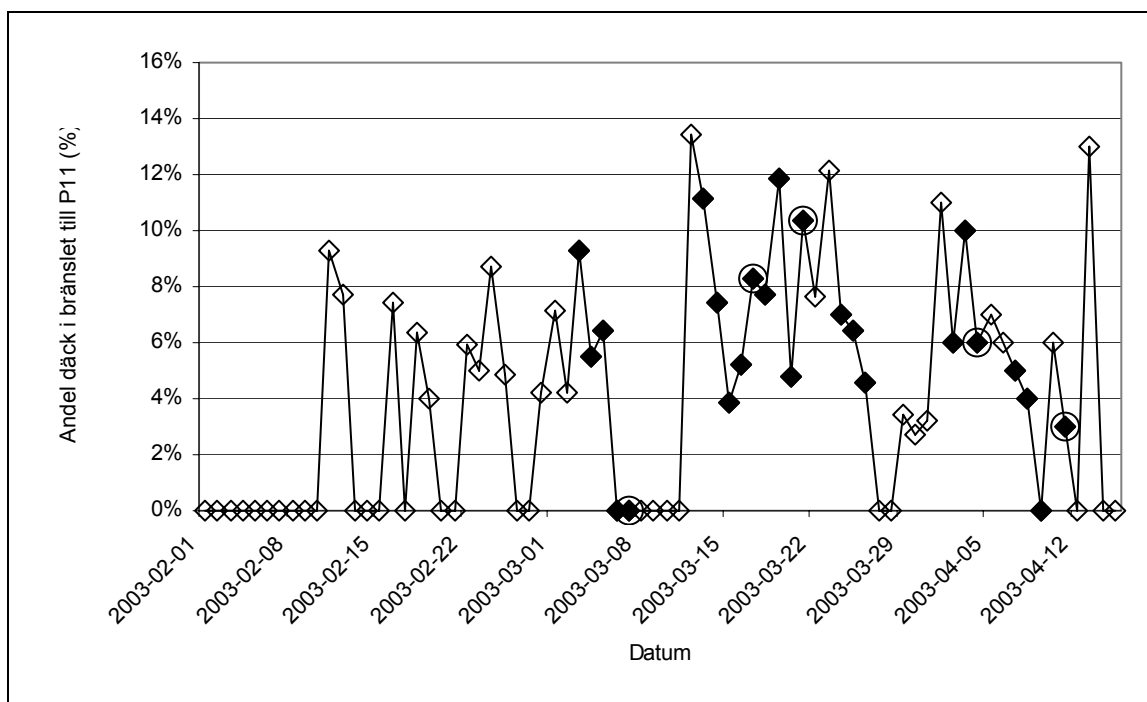
Figur 1. Effekt ur pannan P11 beräknad ur ångflödet, medelvärde för ett dygn. Enheten är MWh/d. Fyllda symboler: dagliga prov, cirklar: veckoprov.

Figure 1. Power produced in boiler P11 as calculated from steam flow, average for a day. The unit is MWh/d. Filled symbols: daily samples and circles: weekly samples.



Figur 2. Effekten som togs ut ur P11 under perioden 12 mars till 26 mars, medelvärden under 15 minuters perioder.

Figure 2. Power output from P11 during the period March 12th to March 26th, average over 15 minute-periods.



Figur 3. Andel gummidäck under ett dygn. Andelen är beräknad på energibasis. Fyllda symboler: dagliga prov, cirklar: veckoproov.

Figure 3. The ratio of energy from tires to total energy averaged over a day. Filled symbols: daily samples and circles: weekly samples.

Bränslet under försökstiden kommer från tre utländska leverantörer av RT-flis och fyra svenska leverantörer. I Tabell 1 sammanställs de askhalter som erhållits ur bränsleanalyserna. I dessa värden ingår främmande ämnen som sten, glas, spikar m m som dock bidrar med högst 1% till bränslepartiets askhalt.

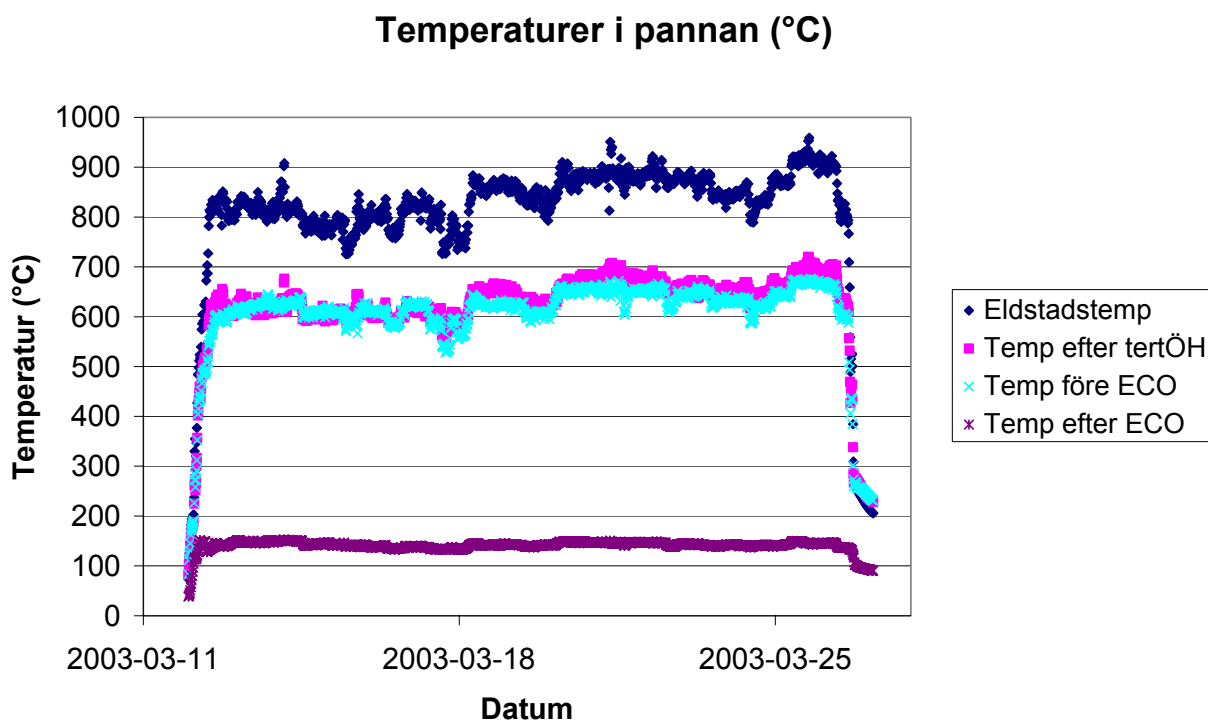
Tabell 1. Månadsmedelvärde för askhalten i RT-flisen för de olika leverantörerna

Table 1. Monthly average ash content in the waste wood fuel for the different suppliers

Leverantör	Januari 2003	Februari 2003	Mars 2003
Svensk leverantör 1	4,8	2,7	1,9
Svensk leverantör 2	4,1	1,3	
Svensk leverantör 3	4,2	7,2	3,3
Svensk leverantör 4	6,6	2,1	4,0
Svensk leverantör 5	3,0	8,5	
Utländsk leverantör 1	2,8	4,0	
Utländsk leverantör 2	4,4	2,7	
Utländsk leverantör 3		3,5	

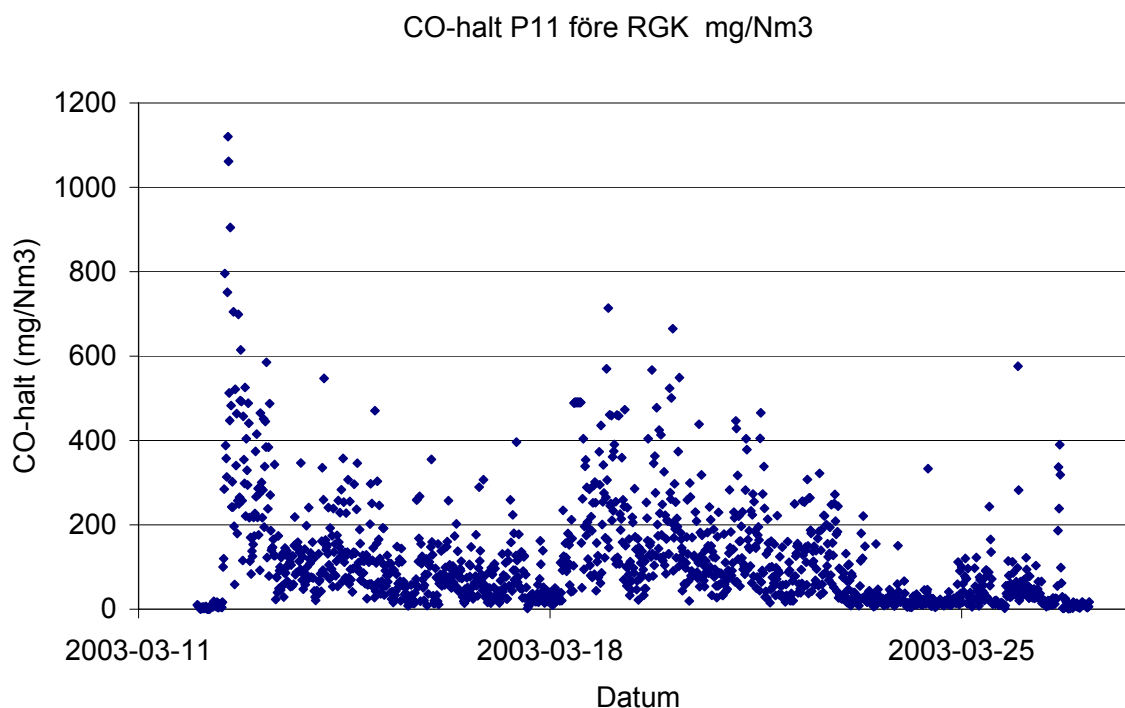
Temperaturen i pannan åskådliggörs i Figur 4 för samma delperiod som i Figur 2. Variationerna är relativt små, men en något ökande trend med tiden kan iakttas. Temperaturen före överhettaren ökar från ca 800°C till ca 950°C.

Data finns även för halterna NO, NO₂, NH₃, CO och O₂ före rökgaskondenseringen men de redovisas inte här. Syrehalten har varit ganska konstant ca 7%. Variationerna i CO-halten är större. För perioden 12 mars – 26 mars är CO-halten hög vid hög effekt, lägre vid lägre effekter med toppar vid större effektvariationer, se Figur 5. För perioden 29 mars – 13 april är CO-halten i rökgaserna lägre och jämnare.



Figur 4. Temperaturer över eldstaden, efter tertiära överhettaren samt före och efter economizern i pannan under perioden 12 mars-26 mars.

Figure 4. The temperatures in the furnace during the period March 12th to March 26th: above the furnace, after the tertiary superheater as well as before and after the economizer.



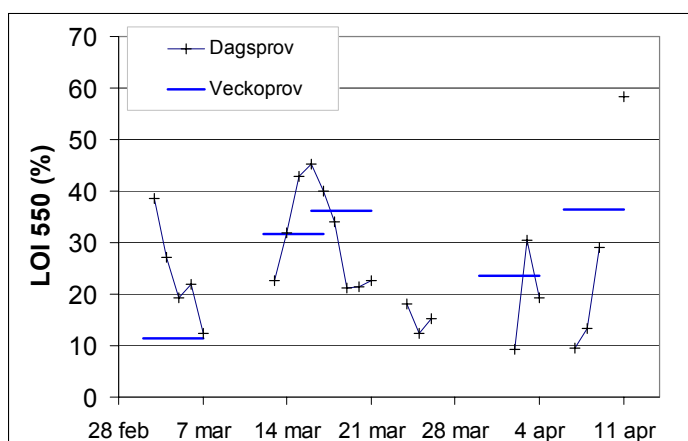
Figur 5. Halten kolmonoxid (CO) i rökgaserna under perioden 12 mars-26 mars.

Figure 5. The carbon monoxide (CO) concentration in the flue gases during the period March 12th to March 26th.

4.3 Glödgningsförlust (vardagsprov och veckoprov)

Glödgningsförlusten (ett mått på mängden oförbränt material) anges här som loss on ignition (LOI) vid 550°C i Figur 6. I vardagsproven varierade glödgningsförlusten mellan 9% och 59%. I veckoproven var glödgningsförlusten mellan 11 och 37%. I statistiska termer är LOI för vardagsproven $26 \pm 13\%$ och för veckoproven $28 \pm 11\%$.

Glödgningsförlusten vid 1000°C avvek endast mycket lite från glödgningsförlusten vid 550°C, se Tabell 2. Detta visar att halten av karbonater i askproven var mycket liten.



Figur 6. Sammanställning över glödgningsförlusten i askproven (LOI 550°C)

Figure 6. Summary of loss on ignition data in ashes for daily samples (vardagsprov) and weekly samples (veckoprov) (LOI at 550°C).

Tabell 2. Jämförelse mellan glödgningsförlust vid 550°C och vid 1000°C för veckoproven, medelvärde av två bestämmningar.

Table 2. A comparison between LOI at 550°C and at 1000°C for the weekly samples, average of two determinations.

Temperatur, utförare	Veckoprov 1	Veckoprov 2	Veckoprov 3	Veckoprov 4	Veckoprov 5
550°C, SGI	11,5	31,7	36,1	23,5	36,5
1000°C, SGI	14	32,4	36,9	23,3	37
Analytica ¹	15,5	36,8	40	27,1	40

Fotnot till Tabell 2:

¹ Resultat från glödgningen vid hög temperatur innan proven uppsluts inför bestämningen av totalhalter av grundämnen.

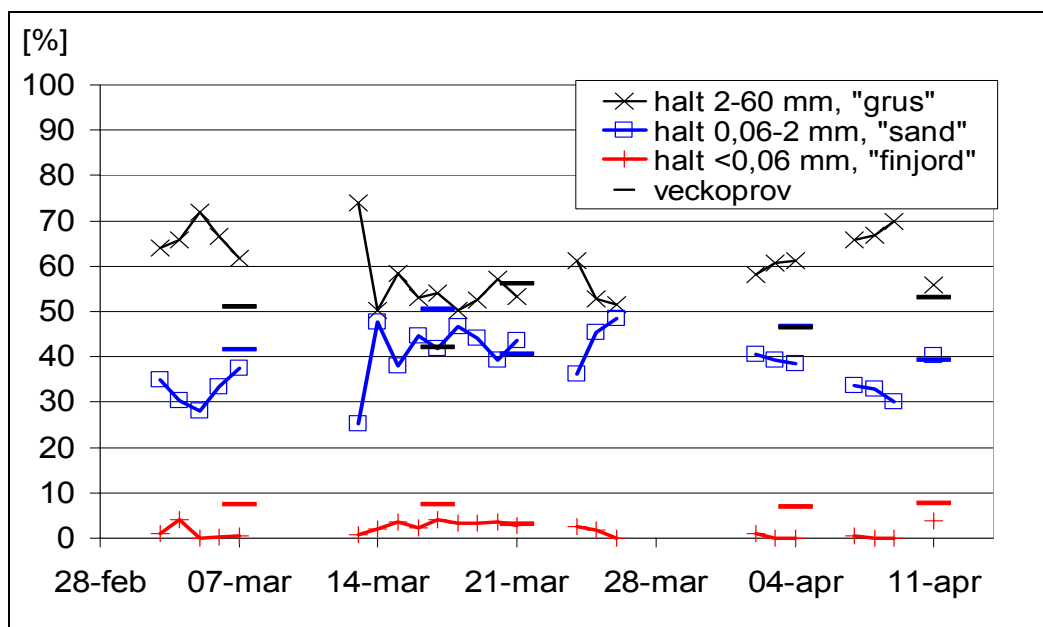
4.4 Mekaniska egenskaper

4.4.1 Kornstorleksfördelning (vardagsprov och veckoprov)

Kornstorleksfördelningen bestämdes genom torrsiktning enligt VVMB 619. På grund av askans sprödhet valdes kortare siktider än metodbeskrivningen föreskriver. Material med kornstorlek <5,6 mm siktades i 5 minuter och material i intervallet 5,6–16 mm i tre minuter. Material med kornstorlek >16 mm siktades manuellt.

Ur sikt kurvorna framgår att kornstorleksfördelningen inte varierar särskilt mycket mellan vardagsproven. För att lättare utvärdera variationen har kurvorna för vardagsproven och veckoproven sammanfattats i Figur 7.

Ett naturmaterial med denna sammansättning skulle ha kallats sandigt grus. Den största mängden av partiklarna är mellan 2 och 20 mm stora. Den s k finjordshalten, d v s andelen partiklar som är mindre än 0,06 mm, varierar mellan 0 och 4 %. (Traditionella kornstorleksfördelningskurvor för enskilda prov finns i bilaga C).



Figur 7. Sammanställning över kornstorleksfördelning (viktprocent) för de olika proven.

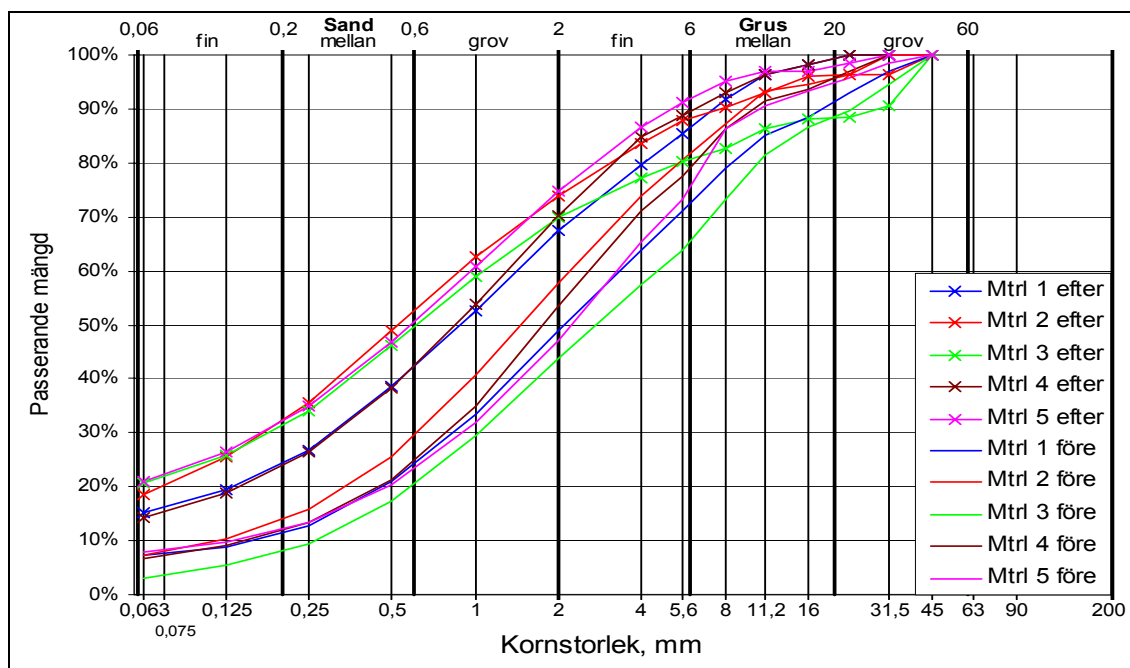
Figure 7. Summary of the particle size distribution (weight percent) for the different samples.

Veckoprovens kornstorleksfördelningar varierar inte heller så mycket, se Figur 7. Däremot finns ett par tydliga skillnader mellan vardagsprov och veckoproov. Finjordshalten är mycket större i veckoproven och mängden partiklar i "grusintervallet" är mindre i veckoproven.

4.4.2 Nedkrossningsbenägenhet (veckoproov)

Nedkrossningsbenägenheten bestämdes för de fem veckoproven genom att jämföra kornstorleksfördelningen före och efter packning med hjälp av s k tung laboratoriestampning (SS 02 71 09).

Samtliga veckoproov krossades ned markant vid packningsförsöken, se Figur 8. Nedkrossningen kan även illustreras med hjälp av värdena i Tabell 3.



Figur 8. Kornstorleksfördelning före och efter packningsförsök (tung laboriestedampning) på veckoproven.

Figure 8. Particle size distribution before and after compaction (mod. proctor) of weekly samples.

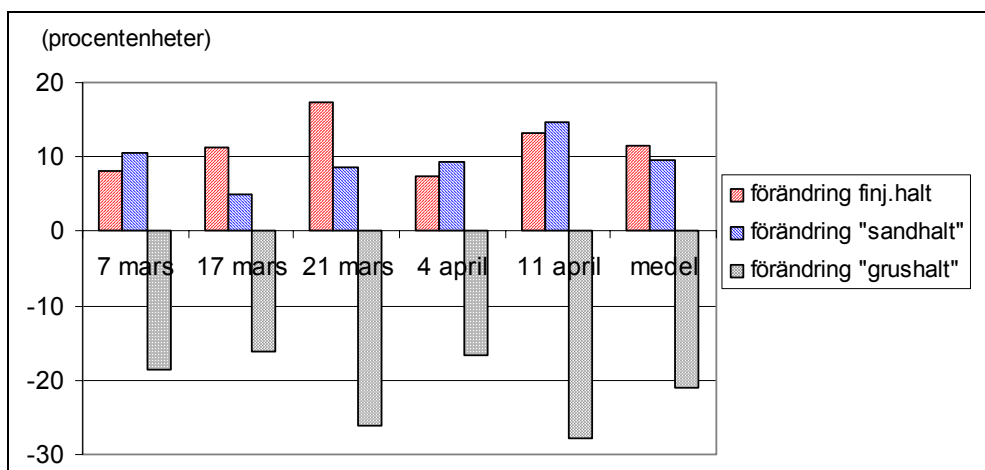
Tabell 3. Förändring av kornstorleksfördelning vid packningsförsök (tung laboriestedampning) på veckoproven. Medel $\pm$ standardavvikelse.

Table 3. Change of particle size distribution caused by compaction (mod proctor) of weekly samples. Average $\pm$ standard deviation.

	Andel (%)		
	<0,06 mm	0,06–2 mm	2–60 mm
Före packning	6,5 $\pm$ 1,9	43,7 $\pm$ 4,4	49,8 $\pm$ 5,5
Efter packning	17,9 $\pm$ 3,0	53,3 $\pm$ 2,7	28,7 $\pm$ 3,1

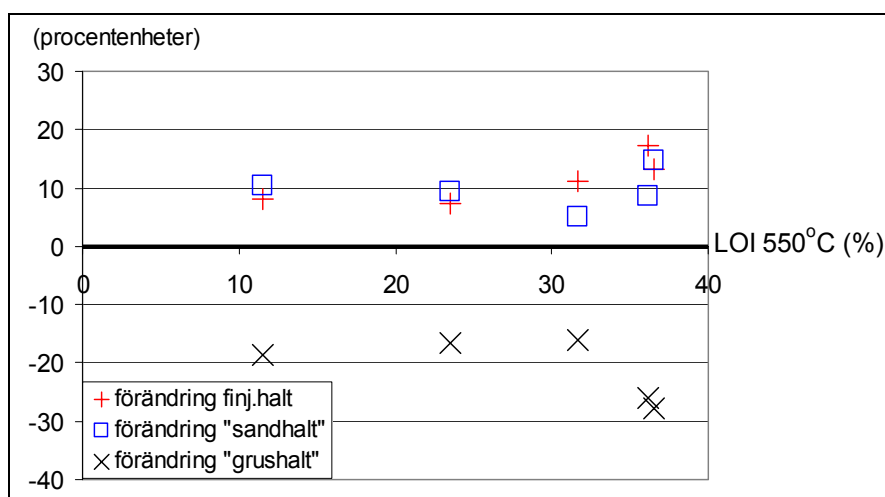
I Figur 9 visas hur förändringen av kornstorleksfördelningen varierar mellan de fem veckoproven. Det är ett känt faktum att askor och slaggar är nedkrossningsbenägna, vilket beror på den rikliga förekomsten av porösa partiklar. Eftersom nedkrossningen varierade mellan veckoproven för denna aska är det också intressant att här se om det finns ett samband mellan nedkrossning och glödningsförlust, Figur 10. Av denna figur framgår att grushalten, d v s andelen stora partiklar minskar mest för de veckoproven som har störst glödningsförlust.

Bottenaskans skörhet kan vara en förklaring till att kornstorleksfördelningen i avsnitt 4.4.1 skiljer sig mellan vardagsproven och veckoproven. De förra togs från fallet från bottenkrapan i släckningsbadet. De senare togs från upplag och då hade askan transporterats på band, fallit i en container och tippats från containern.



Figur 9. Nedkrossningsbenägenhet hos de fem veckoproven, mätt såsom förändringar i kornstorleksfördelning vid tung laboratorieinstampning.

Figure 9. Degradation tendency of the five weekly samples, determined as changes in particle size distribution in a modified proctor test.



Figur 10. Samband mellan glödningsförlust och förändring i kornstorleksfördelning, veckoprov.

Figure 10. Relation between loss on ignition and change in particle size distribution, weekly samples.

Packningsförsöken som användes för bedömning av nedkrossningsbenägenheten ger också besked om hur olika vatteninnehåll påverkar den densitet som uppnås vid en viss packningsinsats. Den vattenkvot som ger den tätaste packningen (högsta densiteten⁹) och därigenom bästa stabiliteten, brukar kallas optimal vattenkvot. De undersökta veckoprovens packningsegenskaper var relativt okänsliga för vatteninnehållet. Proven hade också mycket låg densitet, se Tabell 4, vilket var förväntat. Se även Bilaga D.

Tabell 4. Resultat från packningsförsök enligt tung instampning

Table 4. Results from compaction according to modified proctor

	7 mar	17 mar	21 mar	4 apr	11 apr
Max. torr skrymdensitet (t/m^3)	1,0	0,8	0,8	1,0	0,8
Optimal vattenkvot, w_{opt} (%)	30,2	29,5	28,6	31,5	32,8

4.4.3 Deformationsegenskaper (veckoprov)

För testerna av deformationsegenskaper innebar den stora nedkrossningsbenägenheten att provvolymen på ca 40 l för nivå 2 inte räckte, utan mer material fick hämtas från de utlagda limporna i maj 2003.

Deformationsegenskaperna bestämdes med hjälp av dynamisk belastning i treaxialcell. I ett sådant belastningsförsök utsätts en inpackad provkropp av materialet för trafikliknande belastningar av olika storlek och de resulterande deformationerna mäts. Från den uppmätta deformationen kan bland annat materialprovets styvhet beräknas. Om den tillåtna deformationen begränsas kan även en "maximalt tillåten last" eller lastbärande förmåga beräknas och jämföras med motsvarande för andra material [9], [10].

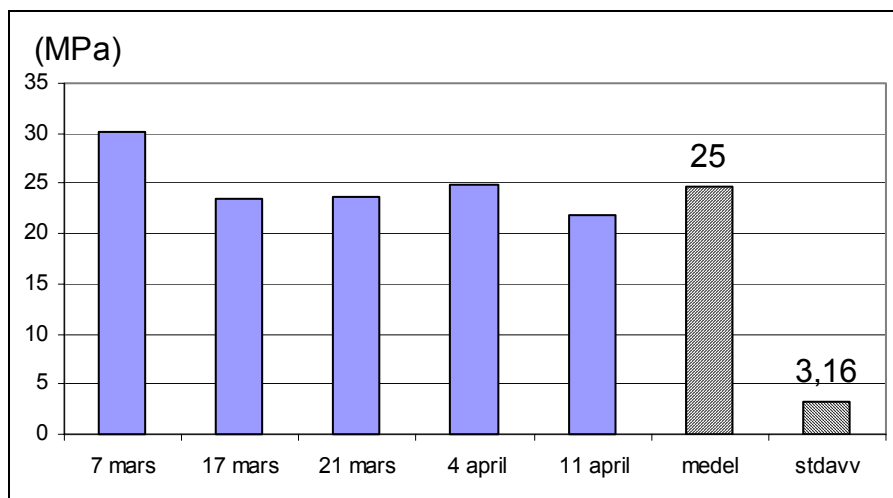
Vid försöken valdes belastningarna så att normala spänningar i en vägunderbyggnad eller ett skyddslager skulle täckas in, men även för förstärkningslagret i en högtrafikerad väg kan dessa låga spänningar vara aktuella eftersom det asfaltbundna lagret sprider last effektivt. För varje veckoprov packades två provkroppar in vid optimal vattenkvot och ca 60% av maximal torr skrymdensitet. De resultat som redovisas utgör medelvärden för dessa två provkroppar.

Styvheten för de fem veckoproven varierade mellan 16 och 30 MPa beroende på belastningsnivå och prov.

Om styvheten vid en vald belastningsnivå studeras framgår variationen mellan proven som Figur 11. Värdet för det första veckoprovet avviker tydligt från de övriga värdena. Det är också detta prov som har en betydligt lägre glödningsförlust än de andra. Eftersom det är känt att en hög halt organiskt material försämrar styvheten hos både naturmaterial och askor visas sambandet mellan de olika veckoprovens styvhet och

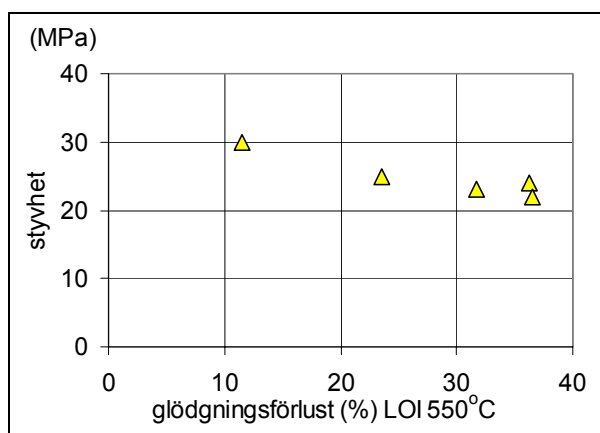
⁹ Maximal densitet bestäms i laboratoriet med hjälp av tung instampning eller vibrobord för att ha ett referensvärde för packning i fält.

deras glödgningsförlust i Figur 12. Även om skillnaden i styvhetsvärden inte är så stor följer värdena det förväntade sambandet.



Figur 11. Styvheten hos de fem veckoproven, angiven som resilientmodul från dynamiska treaxialförsök med medelnormalspänning 50 kPa.

Figure 11. Stiffness of the five weekly samples, measured as resilient modulus in a cyclic load triaxial test with mean normal stress 50 kPa.



Figur 12. Samband mellan glödgningsförlust och styvhet utvärderad från dynamiska treaxialförsök med medelnormalspänning 50 kPa, veckoprov.

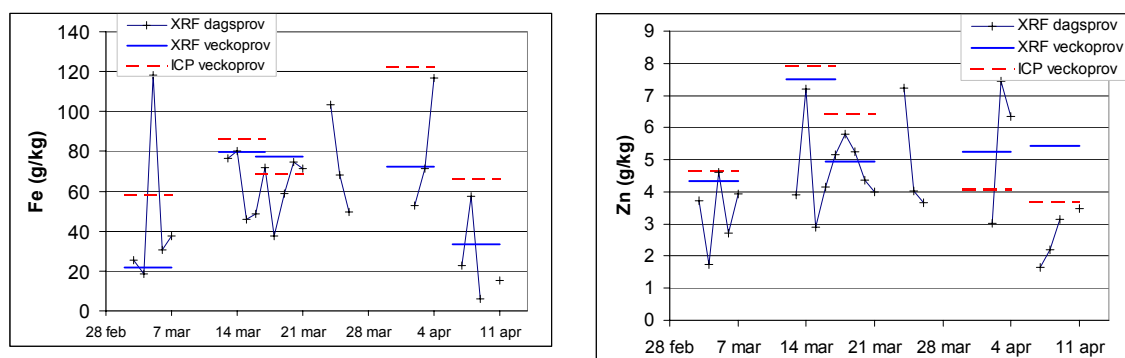
Figure 12. Relation between Loss on ignition value and stiffness evaluated from cyclic load triaxial tests with mean normal stress 50 kPa, weekly samples.

4.5 Kemiska egenskaper

4.5.1 Totalhalt av grundämnen (vardagsprov och veckoprov)

Det totala innehållet av ett antal grundämnen har bestämts med XRF i vardagsproven. Halterna av krom, kvicksilver och selen var genomgående under detektionsgränsen för XRF. För kobolt, nickel och molybden var endast enstaka prov över detektionsgränsen, medan järn, mangan, bly, zink, koppar och arsenik uppvisade mätbara halter.

Variationen mellan olika vardagsprov var stor, till exempel varierade halten järn mellan 6 och 120 g/kg TS, se Figur 13 eller Tabell 5. Standardavvikelsen för haltvärden ligger mellan 29% (för koppar) och 93 % (för bly) av medelvärdet för respektive halt.



Figur 13. Totalhalten av järn (bilden till vänster) och zink (bilden till höger) i vardagsprov (XRF) och i veckoprov (XRF och ICP).

Figure 13. Total concentration of iron (left-hand diagram) and zinc (right-hand diagram) in daily samples (XRF) and weekly samples (XRF and ICP).

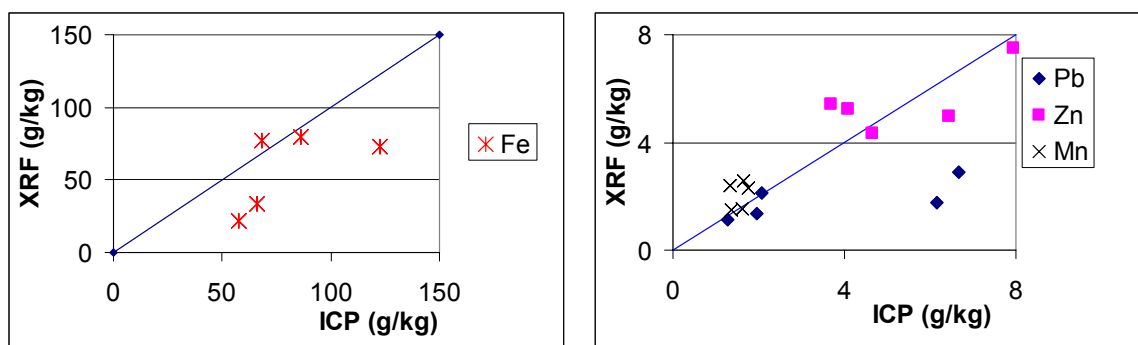
Resultaten från bestämningarna med XRF på veckoproven överensstämmer i huvudsak med de från bestämningarna med XRF på vardagsproven från samma period. Också medelvärden för hela perioden stämmer väl överens, Tabell 5. Slutsatsen är att provtagningen från hög på nivå 2 är likvärdig med provtagningen från band på nivå 1.

Däremot stämmer resultaten från bestämningarna med XRF dåligt överens med de från bestämningarna med ICP på uppslutna prov, se Tabell 5 och Figur 14. ICP-analyserna har gjorts efter uppslutning av proverna på laboratoriet och är den vanliga analysen för att bestämma metaller i fast material. Med ICP-analysen kan lägre halter detekteras än med XRF och det gör att fler metaller kan mätas i askan. Den linjära regressionskoefficienten för relationen mellan XRF och ICP (r^2) var ca 0,5 trots att linjen inte tvingades gå genom origo. Avvikelser från 1:1-linjen var ännu större. Bestämning av blyhalten med XRF och med ICP gav liknande värden vid låga blyhalter, men XRF-värdena var mycket lägre än ICP-värdena vid höga blyhalter. Samstämmigheten var sämre för mangan och arsenik. Utvärderingen försvårades dock av att proven hade ungefär samma manganinnehåll.

Tabell 5. Medelvärde $\pm$ standardavvikelse av totalhalt av grundämnena för vardagsprov och veckoprover i g/kg.

Table 5. Average $\pm$ standard deviation of total content of elements for daily samples and weekly samples in g/kg.

	Fe	Mn	Zn	Pb	Cu	As
Vardagsprov-XRF	57 ± 30	$1,8 \pm 0,6$	$4,2 \pm 1,6$	$1,4 \pm 1,3$	$0,55 \pm 0,16$	$0,26 \pm 0,15$
Veckoprover- XRF	57 ± 27	$2,1 \pm 0,5$	$5,5 \pm 1,2$	$1,9 \pm 0,7$	$0,52 \pm 0,05$	$0,26 \pm 0,05$
Veckoprover-ICP	80 ± 26	$1,5 \pm 0,2$	$5,4 \pm 0,2$	$3,6 \pm 2,6$	$1,6 \pm 2,4$	$0,08 \pm 0,02$



Figur 14. Förhållande mellan totalhalt analyserade med XRF och med ICP i veckoprover. Järn (bilden till vänster) och bly, zink och mangan (bilden till höger).

Figure 14. Relation between total contents measured by XRF and by ICP in weekly ash-samples. Iron (left-hand diagram) and lead, zinc and manganese (right-hand diagram).

Vid en jämförelse av halterna i Tabell 5 med typiska värden för aska från RT-flis, d v s spannet av värden i t ex Värmeforsk rapport nr 829 [11], framstår värdena som normala. Möjligen ligger järn i överkant av intervallet och koppar något i underkant.

En granskning av halter som bestämts genom uppslutning av veckoproven och ICP-analys visar att variabiliteten är moderat, utom för bly som också uppmärksammas i diskussionen av XRF-värdena. Högsta värdet för en halt är som mest dubbelt så stort som minsta värdet. Det finns några värden som utgör spikar, d v s avviker markant från motsvarande värden för de andra veckoproverna:

- o Veckoprover nr 1 (03-03-07) visar en spik i vanadinhalten, 5,6 g/kg i stället för 31 till 47 mg/kg i de övriga fyra proven.
- o Veckoprover nr 1 har också en spik i kadmiumhalten, 30 mg/kg i stället för 0,5 till 1 mg/kg för de övriga proven.
- o Veckoprover nr 4 (03-04-04) har på samma sätt en spik i kopparhalten, 5,9 g/kg i stället för 0,4 till 0,7 g/kg i de fyra övriga proven.
- o Veckoprover nr 5 (03-04-11) har en spik i zirkoniumhalten, 1,2 g/kg i stället för 0,13 till 0,25 g/kg i de övriga proven.

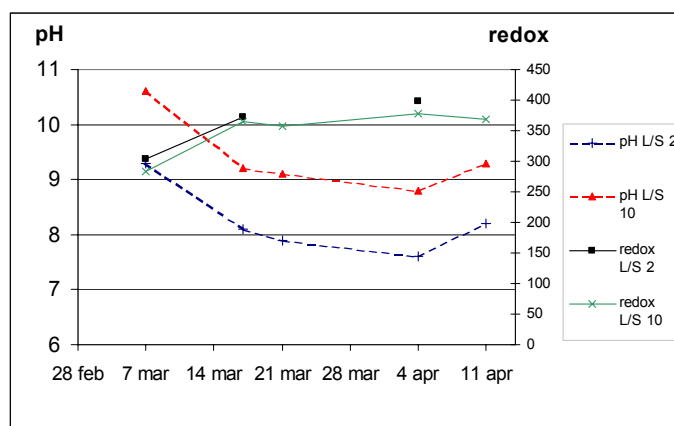
Motsvarande spikar finns inte i XRF-värdena för de grundämnen som kan analyseras med denna teknik, bl a koppar. Det är denna spik i i ICP-värdena för kopparhalten i veckoprov 4 som orsakar dels det höga medelvärdet, dels den stora standardavvikelsen för koppar i Tabell 5.

4.5.2 Totalhalt av organiska ämnen (veckoprov)

Innehållet av 16 PAH bestämdes i veckoproven. Ingen PAH detekterades i något av proven.

4.5.3 Lakning av grundämnen (veckoprov)

Veckoproven har lakats i två steg enligt EN 12457-3, först till L/S=2 l/kg och sedan till L/S=10 l/kg. I Figur 15 visas laktlösningarnas pH-värde och redoxpotential. pH-värdet var högst i det första veckoprovet medan de övriga veckoproven hade liknande värden: pH 8 för lakvattnet vid L/S=2 och pH 9 för lakvattnet vid L/S=10.



Figur 15. pH och redoxpotential i lakvatten från veckoproven.

Figure 15. pH and redox potential in leaching water from weekly samples.

Utlakningen har jämförts med EU:s gränsvärden för material som får mottas vid deponi för inert avfall, Tabell 6 och Tabell 7.

Mängderna sulfat och antimon som lakades ut var höga för alla fem prov, jämfört med EU:s gränsvärde. Molybden och fluorid överskred också gränsvärdet i några prov, medan klorid var i närheten av gränsvärdet för några prov.

Vid jämförelse med EU:s gränsvärden måste dock också hänsyn tas till t ex TOC-halt. EU:s gränsvärde för TOC i inert avfall är 3%. Detta motsvarar en mängd oförbränt material på ca 6%. Halten oförbränt material i de aktuella proven var betydligt högre; upp till 60%.

Tabell 6. Utlakning från veckoprov vid L/S 2 jämfört med EU:s gränsvärden för inert deponi. Värden i mg/kg. (Violett markerar värden större än gränsvärdet medan gult markerar 75 - 100 % av gränsvärdet)

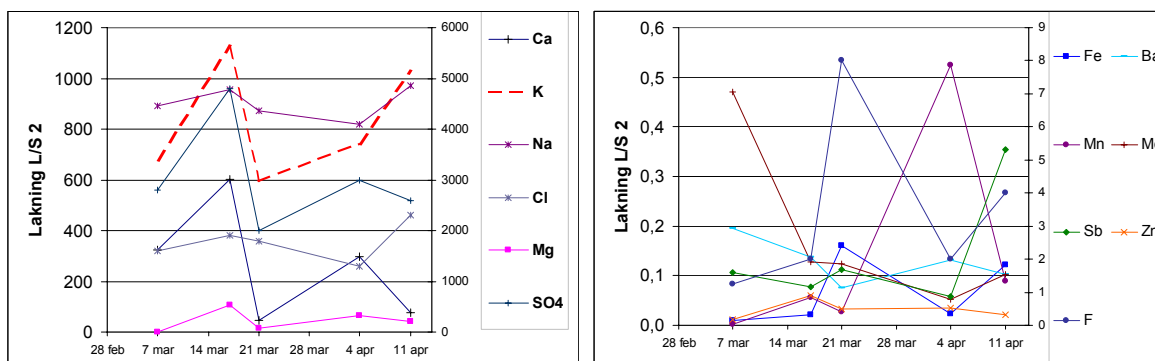
Table 6. Leaching of weekly ash-samples at L/S 2 compared with EU:s limit values for inert waste. Values in mg/kg. (Violet indicates values above limiting values, while yellow indicates 75 - 100 % of the limiting value)

	03-03-07	03-03-17	03-03-21	03-04-04	03-04-11	EU:s gränsvärde
Klorid	320	380	360	260	460	550
Fluorid	1,3	2,0	8,0	2,0	4,0	4
Sulfat	2800	4800	2000	3000	2600	560
As	0,025	0,0208	0,055	0,0046	0,0446	0,1
Ba	0,196	0,137	0,0764	0,132	0,102	7
Cd	<0,0026	<0,0004	<0,0004	<0,0002	<0,0003	0,03
Cr	0,0135	0,0436	0,0248	0,0012	0,00272	0,2
Cu	<0,002	0,00244	0,0244	0,0244	0,0224	0,9
Hg	<0,00004	0,00005	<0,00004	0,0003	0,00009	0,003
Mo	0,47	0,127	0,124	0,0526	0,103	0,3
Ni	0,00156	0,0079	0,0048	0,0058	0,00562	0,2
Pb	0,0216	0,00646	0,041	0,0039	0,0246	0,2
Sb	0,106	0,0778	0,112	0,0584	0,354	0,02
Se	0,00193	0,00256	0,00119	0,0009	0,0014	0,06
Zn	0,0125	0,0608	0,032	0,035	0,0222	2

Tabell 7. Utlakning från veckoprov vid L/S 10 jämfört med EU:s gränsvärden för inert deponi. Värden i mg/kg. (Violett markerar värden större än gränsvärdet medan gult markerar 75 - 100 % av gränsvärdet)

Table 7. Leaching of weekly ash-samples at L/S 10 compared with EU:s limit values for inert waste. Values in mg/kg. (Violet indicates values above limiting values, while yellow indicates 75 - 100 % of the limiting value)

	03-03-07	03-03-17	03-03-21	03-04-04	03-04-11	EU:s gränsvärde
Klorid	378	564	731	305	688	800
Fluorid	4,79	4,23	5,25	3,8	4,37	10
Sulfat	3550	5930	4550	3550	3530	1000
As	0,0966	0,167	0,285	0,05	0,358	0,5
Ba	1,79	0,871	0,692	0,743	0,856	20
Cd	<0,0026	<0,0009	<0,0009	<0,0005	<0,0005	0,04
Cr	0,038	0,0448	0,0083	<0,0051	<0,0052	0,5
Cu	<0,01	<0,01	<0,012	<0,017	<0,013	2
Hg	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0003	<0,0002	0,01
Mo	0,793	0,297	0,35	0,164	0,21	0,5
Ni	0,0196	0,0078	<0,0052	0,0067	0,0061	0,4
Pb	0,115	<0,0032	0,0151	<0,0031	0,0096	0,5
Sb	0,429	0,375	0,528	0,205	1,31	0,06
Se	0,0052	0,0109	0,0054	0,0025	0,0058	0,1
Zn	0,136	0,048	0,0467	0,0309	0,0395	4



Figur 16. Variation i lakning mellan proven för valda ämnen vid $L/S=2$. Bild till vänster: ämnen med hög lakning. Bild till höger: ämnen med lägre lakning. Sulfat (SO_4) och fluorid (F) på högra y-axeln i diagrammen.

Figure 16. Variation in leaching behaviour between samples for selected substance at $L/S=2$. Left-hand diagram for higher leaching, right-hand diagram for lower leaching. Sulfate (SO_4) and fluoride (F) on right-hand side y-axis in the diagrams.

Det fanns oväntat få samband mellan pH i lakvattnet och lakning av ämnen från askan. Veckoprov 2 hade hög utlakning för många ämnen men var inte anmärkningsvärd från ett pH-perspektiv och veckoprov 1 hade hög pH men skiljde inte ut sig i lakningen.

Lakningen av sulfat från aska är ofta begränsad av lösligheten av kalciumsulfat eller baryumsulfat. Lakningen av sulfat följer samma mönster som lakningen av kalcium och magnesium, se Figur 16. För de analyserade laklösningarna ligger löslighetsprodukten nära mättnad för kalciumsulfat och baryumsulfat enligt en geokemisk modellering, vilket gör det troligt att dessa ämnen begränsar utlakningen. Zink och mangan följer samma mönster, även om utlakningen av mangan ur veckoprov 4 är avvikande stor. Lakningen av antimon, arsenik och molybden visar en trend som snarare är den motsatta till trenden för sulfat. Andra samvariationer som kan identifieras är de mellan natrium, kalium och klor samt mellan järn och fluor.

Det är svårt att identifiera några samband mellan halterna som bestämts med ICP (eller XRF) och utlakade mängder. Utlakningen av sulfat och svavelhalten i askan har dock samma sågtandsmönster mellan veckoproven. Det synes dock inte finnas något samband mellan svavel eller sulfat och andelen däck i bränslemixen.

Konduktivitet och pH i första lakvattnet visar inte heller samma variationsmönster som de flesta halterna i laktesten.

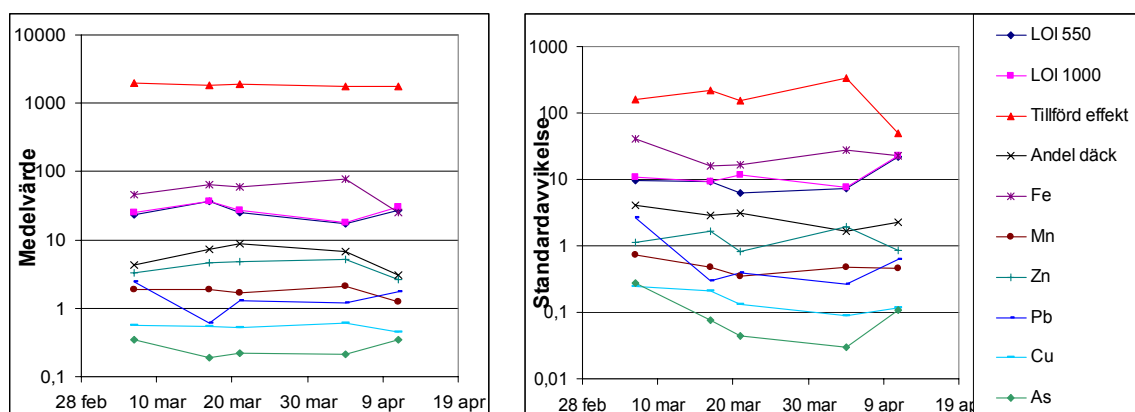
5 Metoder att ta fram samband

5.1 Okulär granskning av resultaten

En av målsättningarna med denna undersökning är att identifiera variationerna i askans egenskaper. En annan är att identifiera samband mellan de egenskaper som bestäms i den förenklade testmetodiken och de egenskaper som behövs i ett användarperspektiv och som bestäms i den fullständiga karakteriseringen av åldrad aska.

5.1.1 Variabilitet

Beträffande variationer kan det inte sägas att resultaten visar på några större sådana i de flesta egenskaper: de har ett tämligen konstant värde under hela försökstiden, med några enstaka spikar emellanåt. Några storheter varierar inom ett större intervall av värden än de andra, t ex blyhalten. För att underlätta jämförelsen mellan de olika storheterna har medelvärde och standardavvikelse räknats ut för mätningarna under femdagarsperioder. Resultat från detta presenteras i Figur 17. Samma bild kan erhållas för de geotekniska egenskaperna, se Figur 7 för kornstorleksfördelningen, Figur 9 för nedkrossningsbenägenheten och Figur 11 för deformationsegenskaper.



Figur 17. Medelvärde (bild till vänster) och standardavvikelse (bild till höger) för vardagsprov. Värdena uträknade över fem dagar. Glödningsförlust (LOI) och andel däck i %, tillförd effekt i MWh/d, metallhalter i g/kg.

Figure 17. Average (left-hand diagram) and standard deviation (right hand diagram) for daily ash samples. Values calculated for 5-day periods. LOI and fraction tires in %, power output for the boiler in MWh/d, metal concentrations in g/kg.

5.1.2 Samband mellan storheter

Några enkla samband kunde identifieras bara genom att granska resultatdiagrammen, t ex mellan deformationsegenskaper och nedkrossningsbenägenheten å ena sidan och glödningsförlusten vid 550°C å andra sidan.

Samband mellan variabler i en test kunde också identifieras, framför allt för den kemiska sammansättningen och miljöegenskaperna. I t ex laktesten iaktogs samband mellan den utlakade mängden sulfationer och den utlakade mängden kalcium och magnesium. Omvända samband, t ex mellan sulfat och antimon i laktestet, kunde också påvisas.

Däremot röjer inte en granskning av halter bestämda med XRF eller ICP något uppenbart samband med värden som erhålls i en laktest, utom möjligen mellan svavel och sulfatutlakning.

5.2 Mer avancerade metoder

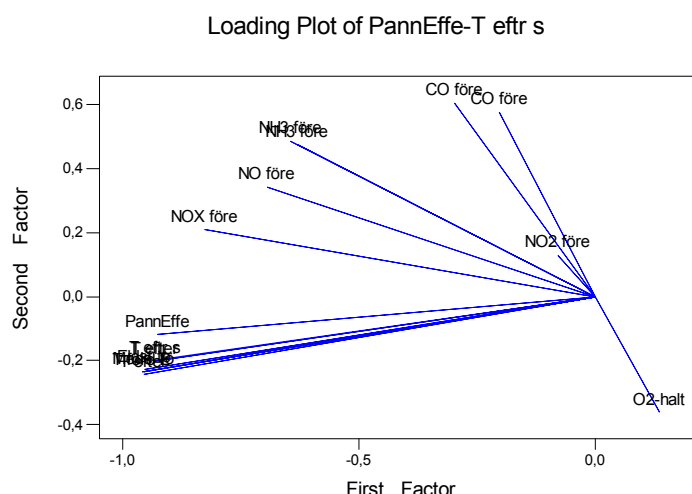
Det finns mer verkningsfulla statistiska tekniker än linjär regression eller okulär granskning att extrahera samband från en stor mängd data (både många variabler och många värden för varje variabel). En teknik som kommit fram på senare år är multivariat analys. Dessa metoder är ofta datorbaserade eftersom de är beräkningstunga. Det gäller dock även här att söka reducera problemet dels så att det är hanterbart, dels så att resultaten kan tolkas.

Här har först fem storheter valts ut bland dem som utgör uppföljningen av driften i pannan för att representera driftvariablerna i analysen av alla storheter. Dessa fem har därefter kombinerats med resultaten från analyserna på vardagsproven, d v s halten av de grundämnen som bestämts med XRF och glödningsförlusten, samt andelen däck i ingående bränsle. I ett avslutande steg har samband sökts inom resultaten från laktesterna i avsnitt 4.5.3.

5.2.1 Reducering av antalet förbränningsvariabler

Driftsdata finns registrerade för varje kvart. Dessa data består dessutom av värden för ett antal variabler som är starkt korrelerad till varandra. För att underlätta jämförelsen med resultaten från tester på askprover har dessa driftsvariabler reducerats till fem stycken: temperatur före economizer, panneffekt, halten NO, halten O₂ och halten CO i rökgaserna före rökgaskondenseringen.

Reduceringen av driftsvariabler har gjorts genom att granska data från driften mellan 1 februari och 13 april. Modellen förklarade 56 % av variationen med faktor 1, 12 % med faktor 2, och 10 % med faktor 3. Faktor 1 och 2 åskådliggörs i Figur 18.



Figur 18. "Loading plot" för driftsdata. Höga värden (långt från centrum i diagrammet) har stort inflytande på resultatet. Samvarierande variabler ligger nära varandra.

Figure 18. Loading plot for production data. Large values imply a large influence on result. Similar variables are grouped together in the diagram.

5.2.2 Samband mellan driftdata och kemiska data

Sambanden mellan driftdata och kemiska data för vardagsproverna undersöktes genom en faktoranalys av de data för driften som extraherats i föregående avsnitt (panneffekt, temperatur före economizer, halterna CO, NO, och O₂ före rök-gaskondenseringen), andel däck i bränslet, totalhalter metall i bottenaska analyserad med XRF och glödgningsförlusten.

Vardagsproven på askan togs under 3-4 timmar på förmiddagen varje provdag. För att få driftsdata som överensstämmer i tidsperiod med de fysiska proven har vi använt för de fem valda driftsvariablerna medelvärdet av data från klockan 8 till klockan 11.

En faktoranalys med tre faktorer beskrev sammanlagt 68% av variationen i datamaterialet. De huvudsakliga variablerna finns i Tabell 8.

Tabell 8. Resultat av faktoranalys (PCA med Varimax rotation) för vardagsproven och de utvalda driftsdata

Table 8. Results from factorial analysis (PCA with Varimax rotation) for daily samples and selected oven data

Faktor	Förklarings-grad (%)	Huvudvariabler
1	26	Fe, Zn, andel däck, Mn, temperatur före economizer
2	21	Panneffekt och halt O ₂ , NO och CO före rök-gaskondensering
3	20	Cu, Pb, glödgningsförlust

Det samband som förväntades mellan andelen däck i bränslemixen och halten zink i askan återfanns alltså. Järnhalten hör också ihop med andelen däck (corden). Det hade i och för sig gått att se det om diagram för zink och andel däck hade lagts över varandra, men samvariationen kan inte ses över hela uppsättningen av data. Att kombinera dessa två diagram med ett diagram för temperaturen i pannan (vilken också kan förväntas ha betydelse – ju högre temperatur desto mer zink drivs av från bottenaskan och återfinns i flygaskan) hade varit svårare.

Glödgningsförlusten (LOI) hängde alltså främst ihop med totalhalten koppar och bly (XRF-mätning). Ju lägre glödgningsförlusten är, desto högre är kopparhalten. Det är däremot inte klart att se sambandet mellan bly och glödgningsförlust när diagrammen läggs ovanpå varandra. Möjligen kan man säga att halten bly följer glödgningsförlusten, vilket borde förväntas då bly är lättflyktigt.

Ett samband hade förväntas mellan glödgningsförlust och pannans effekt utifrån tidigare erfarenheter vid Sydkraft ÖstVärme. Det är även allmänt känt att pannors verkningsgrad är sämre vid dellast. Det syns alltså inte i den statistiska analysen, vilket kan bero på att effektvariationen i denna uppsättning data inte är tillräckligt stor för att sambandet skall säkerställas.

Ett annat samband som förväntas utifrån tidigare erfarenheter var samband mellan pannans effekt, glödgningsförlust och antalet dygn pannan hade varit i drift. När antalet driftsdygn lades till som variabel i faktoranalysen grupperade den sig tillsammans med temperaturen, och inte som väntat med pannans effekt eller glödgningsförlusten. Det torde bero på tillväxten av beläggningar på panntuberna, vilket innebär en försämrad värmeöverföring.

5.2.3 Samband i lakningsresultaten

Från ett miljöperspektiv är framförallt data från lakningarna intressanta. För en daglig uppföljning av askans egenskaper är de inte idealiska: tidskrävande, dyra och helst skall de utföras på åldrat material. Det vore därför önskvärt att resultaten från en lakning gick att korrelera till några andra storheter. Enklast vore om det gick att identifiera en dominerande storhet som de andra kunde korreleras med.

Lakningsdata finns endast för veckoproven. För dessa prov finns också totalhalt (bestämd med både XRF och ICP) och glödgningsförlust.

Principalkomponentanalys av totalhalter, lakdata (L/S 2 och 10 i en tvåstegslakning), samt glödgningsförlusten vid 550°C för veckoproven visade att inga variabler dominerade. Variablerna grupperade sig inte heller tydligt. Det är möjligt att variationerna mellan veckoproven som orsakas av det kemiska innehållet är för små i jämförelse med variationen som orsakas av analysen, så att de förstnämnda inte framträder vid den statistiska analysen.

Spridningen mellan proven är svår att utvärdera eftersom vi har endast fem veckoprover. Dock avvek veckoprov 1 något från de övriga veckoproven. Veckoprov 1

var också det som hade en avvikande hög pH och låg redoxpotential i lakvattnen. Anledningen till dessa avvikelser har inte kunnat säkerställas i den statistiska analysen.

Försök gjordes att förutsäga lakningen av sulfat, antimon, molybden, fluorid eller klorid utifrån data från XRF-analyser och glödningsförlusten. Samtliga XRF-bestämningar och glödningsförlusten användes som prediktorer och en regressionsmodell (PLS, partial least squares) gjordes för lakningen av varje ämne. PLS-modellerna var inte signifikanta och hade mycket låg förmåga att förutsäga lakresultaten. Det gick alltså inte att använda XRF-data och glödningsförlusten för att förutsäga lakningen av ämnena i försöken i denna studie.

6 Diskussion och slutsatser

Målsättningen för projektet är en bedömning av den förenklade testmetodikens lämplighet. Det är naturligtvis frestande att bedöma askans lämplighet för olika användningar, men det är inte målet för denna diskussion av resultaten.

I denna rapport redovisas resultaten från den första etappen, tester på färsk aska. För att bedöma den förenklade testmetodikens lämplighet behöver vi resultaten av tester på åldrad aska från nästa etapp. Vi kan alltså inte för närvarande uppfylla målet för projektet i strikt mening. Det vi kan göra i denna diskussion är att reda ut några delfrågor:

- o Hur stor är variabiliteten hos askans egenskaper när denna matats ut ur pannan?
- o Finns det någon koppling mellan resultaten från den förenklade testmetodiken och resultaten från en bantad karakterisering (nivå 2 i denna undersökning)?

Förekomsten av en korrelation mellan resultaten på nivå 1 och nivå 2 i denna etapp är inte någon garanti för att i nästa etapp resultaten på nivå 1 skall kunna korreleras med dem från en fullständig karakterisering av åldrad aska. Om det inte skulle funnits några samband alls mellan resultaten på nivå 1 och nivå 2 i denna etapp hade dock förutsättningarna att finna några i det fullständiga underlaget känts som ganska dåliga. Om vi, trots god korrelation här, i nästa etapp inte kan finna någon mellan resultaten från tester på färsk aska och resultaten från tester på åldrad aska betyder det att förbränningen har liten betydelse för askans egenskaper i jämförelse med åldringen. I detta hypotetiska fall är det viktigare för styrningen av kvaliteten hos askan att styra åldringen i upplag än att styra förloppen vid produktionen.

Den förenklade metodiken att följa askans kvalitet består av tre tester som bör kunna utföras dagligen på färsk aska:

- o oförbränt, mätt såsom glödningsförlust vid 550°C
- o kornstorleksfördelning
- o kemisk sammansättning (grundämnen)

Dessa tre tester mäter inte alla relevanta egenskaper för användning av aska. Uppsättningen av tester som bör ingå i bestämningen av den åldrade askans kvalitet inför en leverans till användare är mycket mer omfattande. Den förenklade metodiken har i denna studie kopplats till egenskaper i den färska askan. De gav även möjligheten att följa de variationer i askan som är ett resultat av kända variationer i driftsförhållanden, bränslemix m m.

Generellt visar testresultaten för vardagsproven och veckoproven god överensstämmelse, vilket visar att provtagning från band och provtagning från upplag (såsom görs för åldrade prov) i stort sett är likvärdiga. Ett undantag är kornstorleksfördelningen, vilket troligen beror på att bottenaskan lätt krossas under de olika transportmomenten. Kornstorleksfördelning måste alltså bestämmas på material i upplag för att få bästa möjliga bild av materialet, men för bestämning av andra egenskaper kan provtagning göras från band eller upplag.

6.1 Glödgningsförlust

Organiskt material bryts ned med tiden och ger upphov till sättningar och andra deformationer i en vägkropp. Därför begränsas halten organiskt material i vägmateriäl, både i utländska och svenska vägmateriälkrav. Det nuvarande svenska kravet i ATB VÄG föreskriver högst 2% organiskt material bestämt med kolorimetermetoden SS 02 71 07. Glödgnings brukar ge högre halt än kolorimetri, med små skillnader för kalkfattigt materiäl. Askan har betydligt högre glödgningsförlust än vad som är vanligt för de askmateriäl som testats tidigare vid SGI och VTI [9], [10].

Medelvärdena för halten oförbränt materiäl var nära varandra för vardagsprov och veckoprov. Halten oförbränt i vardagsproven förefaller i Figur 6 variera betydligt mer än halten i veckoproven, men så är inte fallet: standardavvikelsen är lika stor. Båda provtagningsmetoderna, samlingsprov från fallande band och standardmetoden för provtagning ur högen efter en container, är likvärdiga vad angår glödgningsförlusten och därmed troligen även vad gäller andra metoder att bestämma oförbränt materiäl.

Medelvärden för oförbränt, Figur 17, visar att driftsförhållanden under försöksperioden har varit relativt jämna. Detta motsägs inte av driftsdata (temperatur, effekt). Halten oförbränt i ett större parti aska bör ligga på denna nivå, vilken dock är hög.

Den statistiska analysen visade inget samband för halten oförbränt materiäl (mätt som glödgningsförlusten) med pannans effekt eller antalet dygn pannan hade varit i drift. Detta är samband som hade förväntas med anledning av tidigare erfarenheter vid Sydkraft ÖstVärme. Avsaknaden av samband här kan bero på att data är för få eller på att effektvariationen var för liten under försöksperioden för att det skulle kunna säkerställas statistiskt. En mer omfattande utredning behövs.

6.2 Mekaniska egenskaper

Mekaniska egenskaper såsom styvhet, stabilitet och beständighet har betydelse för möjligheten att använda ett materiäl. Det kommer alltid att vara åldrad aska som används i väg- eller anläggningsbyggande. Denna slutsats drogs bland annat av Höbeda m fl på VTI som gjorde försök på rester från avfallsförbränning [5], [6]. De kemiska reaktioner som sker under åldringen förbättrar bl.a. styvheten hos askan. Därför är det på åldrat materiäl som de mekaniska egenskaperna bör bestämmas.

Bland testerna i den förenklade metodiken har glödgningsförlusten och kornstorleksfördelningen störst relevans för askans mekaniska egenskaper. Nedkrossningsbenägenhet och deformation vid belastning har använts för att relatera den förenklade metodiken till egenskaperna som ska mätas i den åldrade askan.

Kornstorleksfördelningen har betydelse för de mekaniska egenskaperna såsom styvhet och stabilitet och bör ingå i en uppföljning. För naturmateriäl gäller att ju större de största partiklarna är desto högre styvhet får materialet. Vidare har det visats att stabiliteten är störst i ett materiäl som har partiklar av många olika storlekar, d. v. s som har en flack eller välgraderad kornstorleksfördelningskurva. För ett mycket skört materiäl som krossas lätt säger däremot inte kornstorleksfördelningen för opackad aska

något om det slutliga materialets egenskaper. Tillsammans med kornstorleksfördelningen efter laboratoriepackning ger den dock en vink om hur beständigt och stabilt materialet är och vilka lagertjocklekar och packningsredskap som bör väljas.

Den undersökta askan har relativt välgraderade kornstorleksfördelningskurvor. I de prov som testats ingår dock inte de stora klumpar (bl a en på 2 m³) som fick spettas sönder för att kunna tas ut ur pannen. Skillnaden mellan vardagsprov och veckoprov som noterades i avsnitt 4.4.1 beror antagligen på att större korn smulats sönder vid hanteringen av veckoproven.

Beständighet mot mekanisk påverkan är en viktig egenskap som kan mätas på många sätt. De traditionella provningsmetoderna bygger på att en utsiktad fraktion av materialet utsätts för nötning eller slag i en roterande behållare av något slag och den resulterande nedbrytningen (Los Angeles-tal, micro-Devalvärde eller kulkvarnsvärde) jämförs med föreskrivna gränsvärden. I de svenska vägreglerna, ATB VÄG [7], anges maximikrav på micro-Devalvärde för material som ska användas i bär- och förstärkningslager. För övrig användning finns bara det generella beständighetskravet. Eftersom de traditionella metoderna ursprungligen var avsedda för asfaltbeläggningsssten har det riktats en del kritik mot dem när det gäller lämpligheten för icke asfaltbundna material och speciellt för alternativa material av olika slag. Den metod som använts i denna undersökning tar hänsyn till hela det obundna materialet och efterliknar packningen i fält. Eftersom den har använts vid VTI:s tidigare provning av askor och naturmaterial av olika slag finns det också jämförelsevärden.

Testresultaten visade att denna aska är mycket spröd och krossas lätt ned. Många partiklar gick dessutom att trycka sönder med fingrarna. En trolig förklaring är att den höga halten av förkolnat material innebär en hög porositet och svaga partiklar. När kornstorleksfördelningarna före och efter laboriestampningen jämförs visar det sig att andelen partiklar i ”grusintervallet” har minskat efter packningen medan de som är mindre än 0,5 mm har ökat och att det är partiklarna som är mindre än 0,06 mm som har ökat mest. För jämförelse kan nämnas att nedkrossningen var mer omfattande än för de slaggrusmaterial som har undersökts tidigare vid SGI och VTI. Den var också större än för den kolbottenaska från Norrköping som undersöktes 1997 [8].

Hög porositet indikeras också av den låga skydensiteten som kunde utvärderas ur packningsförsöken. Densiteten var lägre än uppmätta värden för kol- och avfallsförbränningsaskor som undersökts tidigare [8], [9], [10].

De beräknade styvhetsvärdena från belastningsförsöken var mycket låga. De varierade mellan 16 och 30 MPa. Motsvarande värden för slaggrus är 75–150 MPa [9], [10], för kolbottenaska 50–100 MPa [8] och för sand 80–180 MPa [9], [10]. Såsom nämnts tidigare kan en högre styvhet förväntas efter lagring av materialet. Likaså kan en markant sänkning av halten oförbränt material förväntas ge högre styvhet, eftersom glödningsförlust har stor inverkan på styvheten hos både slaggrus och naturmaterial.

För de mekaniska egenskaperna (deformationsegenskaperna och nedkrossningsbenägenheten) är alltså oförbränt material, t ex som glödningsförlust vid 550°C, en lämplig storhet att följa.

6.3 Kemiska egenskaper

De kemiska egenskaperna (d v s grundämnen och halten oförbränt) har störst betydelse för miljöpåverkan. Den vanligaste metoden att bestämma metaller är uppslutning av proven följt av en analys av vätskan, idag oftast med ICP. I den förenklade testmetodiken på nivå 1 har röntgenfluorescens (XRF) använts direkt på fasta prov.

Det är känt att XRF inte har lika stor tillförlitlighet som uppslutning och ICP: t ex kan halten av vissa metaller underskattas. Metoden har dock förbättrats under senare år och felen har blivit mindre. Resultaten för metoderna på veckproven i denna studie stämmer någorlunda överens för järn, zink och koppar, men är sämre för mangan och arsenik. Nivån på svaret från XRF-instrumentet är tillfredsställande även om det ger något låga halter i jämförelse med ICP.

Resultaten i denna studie visar att XRF-mätningar ger en indikation om innehållet av järn, zink, bly, och koppar. XRF kan också användas för att visa korttidsvariationer i askan.

XRF är en metod som egentligen lämpar sig bäst för höga koncentrationer. Huvudelementen skulle kunna följas om inte de flesta huvudelement var för lätta för att kunna analyseras: till exempel kalcium, aluminium och kisel. Halten för ett antal tungmetaller med låga halter i bottenaskan har varit under detektionsgränsen för instrumentet. Nickelhalterna ligger t ex i intervallet 45 till 80 mg/kg.

Lakning från askan har analyserats för färskas veckoprov. I dessa var lakningen av sulfat och antimon något höga (jämfört med EU:s kriterier för inert deponi). Också fluorid, molybden och klorid var något höga i vissa prov. Antimon har undersökts sparsamt i askor och kan behöva extra uppmärksamhet. Lakningen brukar vara starkt beroende av pH för många ämnen och pH brukar påverkas av lagring. Allteftersom aska kommer i kontakt med luft och karbonatiseras sänks pH och lakningen ändras. Tyvärr finns sedan tidigare indikationer på att lakning av sulfat och antimon ökar vid lagring av aska (se t ex [2]).

Inom uppsättningen av data från lakningen kunde vissa samvariationer identifieras, t ex mellan sulfat, kalcium och magnesium. Emellertid kunde inget samband med den kemiska sammansättningen av askan eller med data från driften påvisas. Att inget samband kunde identifieras bland de fem tillgängliga uppsättningarna av data betyder dock inte att sambanden inte existerar. Underlaget för den statistiska analysen är litet. Det finns heller inget belägg för att de samband som identifierades här finns i alla typer av askor.

I de analyser med uppslutning av provet som utfördes på veckoproven förekommer spikar i halterna av ena eller andra grundämnet. Utan tvivel beror detta på att askan är ett heterogent material och att koncentrationen råkat bli större i just det lilla delprovet

som analyserades. Detta är svårt att undvika då trenden går mot allt mindre provmängder i kemiska analyser och det ger svårigheter när resultaten skall tolkas.

6.4 Är den förenklade testmetodiken lämplig?

Med risk för att upprepas till leda bör det påpekas att resultaten i denna etapp inte kan användas för att bedöma lämpligheten hos testmetodiken. För det behövs resultaten från nästa etapp, tester på åldrad aska. Om vi utgår från resultaten i denna etapp förefaller det dock som denna metodik med tester som är jämförelsevis enkla att genomföra kan användas för att följa driftsförhållandenas inverkan på den åldrade askan. Samband har kunnat påvisas mellan egenskaper som testas på den enkla nivån och egenskaper som testas i ett mer omfattande program.

Glödningsförlust är en central egenskap, som kan användas för att indikera den materialtekniska kvalitén på askan. Utvärderingen skulle dock behöva kompletteras med materialtekniska data för lagrad aska, eftersom det är den askan som är aktuell för användning. Tyvärr har inget samband mellan glödningsförlust och driftdata kunna beläggas, som skulle kunna förenkla testmetodiken ännu mer.

Det totala innehållet av metaller (Fe, Mn, Zn) hänger till viss del samman med andelen däck och temperaturen i förbränningen. De senare två skulle kunna användas för att indikera ändringar i metallhalt. Inget direkt samband har kunnat visas mellan lakning av ämnen och resultatet från de enklare testerna. Detta kan bero på att lakningsdata endast finns för fem prov, så dataunderlaget är litet. Att något samband inte kunde upptäckas innebär inte att det inte skulle finnas. Det vore dock underligt om inte lakbarheten skulle påverkas av den kemiska sammansättningen. Rent generellt innebär resultaten att den kemiska undersökningen bör fördjupas (bättre representativitet vid ICP-analys, kolonnförsök) för att de styrande storheterna skall identifieras.

7 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Den förenklade testmetodiken med lätt utförda tester på färsk aska är en lämplig metod att följa variationer i askans egenskaper, så vitt vi kan bedöma ur det underlag som tagits fram i denna första etapp av studien.

Frågetecknet är sambandet mellan den kemiska sammansättningen som bestäms med Röntgenfluorescens och lakegenskaperna. Möjligen skall även andra analyser eller tester än bara XRF-bestämningar utföras för att få fram de väsentliga kemiska parametrarna. Ett förslag till enkel test är konduktiviteten i det första lakvattnet.

Denna metodik borde därmed vara ett lämpligt komplement till den dokumentering som görs av askans egenskaper ur användarens synvinkel. Genom denna metodik kan variationerna som orsakas av ändringar i bränslen, driftsförhållanden m.m. följas och dokumenteras.

Metoden att följa en begränsad uppsättning egenskaper, som inte nödvändigtvis är de egenskaper som efterfrågas men som korreleras med dessa, är användbar inte bara i geotekniska sammanhang. Det finns andra sammanhang där askan måste behandlas och framför allt åldras för att den skall få de önskade egenskaperna.

Denna första etapp är emellertid endast ena hälften av studien. Egenskaper och deras variabilitet har kartlagts för färsk aska. För att den förenklade metodiken, enkla tester på färsk aska som komplement till omfattande tester på åldrad aska som utförs sällan, skall kunna värderas fullt ut behöver testerna utföras på åldrad aska och egenskaperna korreleras med dem för färsk aska.

I en förlängning kan det vara lämpligt att verifiera i fält de laboratorietester som ingår i en karakterisering. På provtytor görs t ex fallviktsmätningar vid ett par tillfällen och bestämning av värmekonduktiviteten. Detta ingår inte i etapp 2 för denna studie, men skulle kunna utgöra en kontroll i verkligheten av de egenskaper som laboratorietesterna skall mäta.

Det ideala vore att följa förhållandena i några pannor med olika utformningar, olika typer av bränslen och olika driftssätt, i syfte att ge en tämligen komplett karta över egenskapernas variationer. Det är ett ganska omfattande arbete som lämpligen utförs när testmetodiken visats vara lämplig i detta projekt.

8 Litteraturreferenser

- [1] Hartlén J; "Kvalitetssäkring av slaggrus från förbränning av avfall", Renhållningsverksföreningen, Malmö 2002, rapport RVF 02:10
- [2] Fällman A-M och Hartlén J; "Kvalitetssäkring av sorterad bottenaska från avfallsförbränning", Reforsk, Malmö 1994, rapport nr FoU 108
- [3] Pettersson R med flera; "Pannsand som kringfyllning i rörgravar för fjärrvärmerör" Värmeforsk, manuscript 2003
- [4] SS-EN 12457-3; "Karakterisering av avfall – laktest", 2003
- [5] Höbeda P & Bünsov L; "Slagg från förbränning av hushållsavfall som vägmateriel", Statens väg- och trafikinstitut, Linköping 1979, VTI meddelande nr 180
- [6] Höbeda P, Jacobson T & Viman L; "Undersökning av förbränningsrest från SYSAV, Malmö, genom laboratorie- och provvägsförsök", Statens väg- och trafikinstitut, Linköping 1985, VTI meddelande nr 413
- [7] Vägverket; "ATB VÄG. Allmän teknisk beskrivning för vägkonstruktioner", Vägverket, Borlänge 2003
- [8] Vägverket; "Provningsmetoder för alternativa material till vägunderbyggnad", Vägverket, Borlänge 2001, Publikation 2001:34
- [9] Arm M; "Egenskaper hos alternativa ballastmaterial – speciellt slaggrus, krossad betong och hyttsten", licenciatavhandling, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm 2000, TRITA-AMI LIC 2063
- [10] Arm M; "Mechanical properties of residues as unbound road materials – experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag" Doktorsavhandling, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm 2003
- [11] Bjurström H och Steenari B-M; "Våt rening av askor, metodöversikt", Värmeforsk, Stockholm oktober 2003, rapport nr 829

Bilagor

- A SAMMANSTÄLLNING ÖVER DRIFTSFÖRHÅLLANDEN OCH PROV**
- B PRIMÄRDATA FÖR SAMMANSÄTTNINGEN OCH LAKTESTER**
- C KORNSTORLEKSFÖRDELNINGSKURVOR FÖR ENSKILDA PROV**
- D PACKNINGSKURVOR OCH STYVHETSDATA FÖR VECKOPROV**

A Sammanställning över driftsförhållanden och prov

Tabell 9. Förteckning över de prov bottenaska som tagits ut från P11 i studien

Table 9. Summary of the bottom ash samples taken from P11 during the study

Prov-nummer	Datum	Starttid	Sluttid	Mängd inkl hink (kg)	Not
Dagliga prov					
1	03-03-03	09:00		7,5	
2	03-03-04	10:15		4,3	
3	03-03-05	09:15		9,0	
4	03-03-06	09:30	13:30	7,5	
5	03-03-07	08:00	12:00	8,0	Limpa nr 1
6	03-03-13	12:00	15:00	7,0	
7	03-03-14	09:20	13:00	6,2	
8	03-03-15	08:00	12:00	6,5	
9	03-03-16	08:00	12:00	7,4	
10	03-03-17	08:20	12:50	6,7	Limpa nr 2
11	03-03-18	08:10	12:20	6,5	
12	03-03-19	08:10	12:30	6,5	
13	03-03-20	08:20	12:20	6,6	
14	03-03-21	07:50	11:00	6,9	Limpa nr 3
15	03-03-24	08:10	12:40	6,0	
16	03-03-25	07:50	12:50	7,6	
17	03-03-26	08:00	12:00	7,8	
18	03-04-02	07:45	12:15	7,5	
19	03-04-03	08:25	12:15	6,9	
20	03-04-04	08:00	11:30	7,1	Limpa nr 4
21	03-04-07	07:50		4,7	
22	03-04-08	08:30	13:00	6,6	
23	03-03-09	07:45	12:30	5,1	
24	03-04-11	11:30		4,7	Limpa nr 5
Veckoprov					
1	03-03-07	07:20	14:30		Limpa nr 1
2	03-03-17	11:00	14:00		Limpa nr 2
3	03-03-21	07:30	11:10		Limpa nr 3
4	03-04-04	08:00	12:00		Limpa nr 4
5	03-04-11	09:00	12:00		Limpa nr 5

Tabell 10. Sammanställning över bränslen och producerad effekt (ångflöde) i P11 under perioden 14 februari till 14 april.

Table 10. Summary of fuel provided to P11 and produced power (as calculated from steam flow) during the period February 14 to April 14.

Dag	Datum	Ton däck	Andel däck (%)	Ång- effekt i MWh/d	Energi från däck i MWh/d	Baltflis i MWh/d	RT-flis i MWh/d
Fredag	03-02-14	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lördag	03-02-15	7,5	0	868,9	60,0	256,4	552,5
Söndag	03-02-16	19,5	7	2090,8	156,0	256,4	1678,4
Måndag	03-02-17	0,0	0	2096,5	0,0	256,4	1840,1
Tisdag	03-02-18	13,9	6	1746,7	111,1	256,4	1379,2
Onsdag	03-02-19	9,1	4	1804,4	72,7	256,4	1475,3
Torsdag	03-02-20	0,0	0	2235,5	0,0	256,4	1979,1
Fredag	03-02-21	0,0	0	1836,0	0,0	256,4	1579,6
Lördag	03-02-22	14,5	6	1956,5	116,0	256,4	1584,1
Söndag	03-02-23	12,4	5	1975,6	99,2	256,4	1620,0
Måndag	03-02-24	23,3	9	2137,1	186,6	256,4	1694,0
Tisdag	03-02-25	12,8	5	2090,0	102,2	256,4	1731,3
Onsdag	03-02-26	0,0	0	1464,9	0,0	256,4	12087,5
Torsdag	03-02-27	0,0	0	1539,9	0,0	256,4	1283,5
Fredag	03-02-28	11,4	4	2179,5	91,2	256,4	1831,9
Lördag	03-03-01	18,4	7	2066,5	147,2	0,0	1919,3
Söndag	03-03-02	10,4	4	1960,7	82,8	0,0	1877,9
Måndag	03-03-03	22,7	9	1952,2	181,6	0,0	1770,6
Tisdag	03-03-04	14,6	5	2125,2	116,8	0,0	2008,4
Onsdag	03-03-05	16,7	6	2078,3	133,6	0,0	1944,7
Torsdag	03-03-06	0,0	0	1733,6	0,0	0,0	1733,6
Fredag	03-03-07	0,0	0	1851,3	0,0	0,0	1851,3
Lördag	03-03-08	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Söndag	03-03-09	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Måndag	03-03-10	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tisdag	03-03-11	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Onsdag	03-03-12	20,8	13	1240,1	166,4	0,0	1073,7
Torsdag	03-03-13	30,1	11	2155,5	240,4	0,0	1915,1
Fredag	03-03-14	18,5	7	2000,4	148,3	0,0	1852,1
Lördag	03-03-15	8,6	4	1792,5	68,6	0,0	1723,8
Söndag	03-03-16	11,6	5	1774,2	92,6	0,0	1681,5

Tabell 10. Sammanställning över bränslen och producerad effekt (ångflöde) i P11 under perioden 14 februari till 14 april, fortsättning

Table 10. Summary of fuel provided to P11 and produced power (as calculated from steam flow) during the period February 14 to April 14, continued.

Dag	Datum	Ton däck	Andel däck (%)	Ång- effekt i MWh/d	Energi från däck i MWh/d	Baltflis i MWh/d	RT-flis i MWh/d
Måndag	03-03-17	16,5	8	1595,3	131,7	0,0	1463,6
Tisdag	03-03-18	17,5	8	1819,1	139,8	0,0	1679,2
Onsdag	03-03-19	25,8	12	1741,9	206,7	0,0	1535,2
Torsdag	03-03-20	12,2	5	2039,2	97,9	0,0	1941,2
Fredag	03-03-21	26,4	10	2048,2	211,4	0,0	1836,8
Lördag	03-03-22	18,3	8	1916,9	146,6	0,0	1770,4
Söndag	03-03-23	26,5	12	1747,8	212,1	0,0	1535,7
Måndag	03-03-24	13,9	7	1588,6	111,0	0,0	1477,6
Tisdag	03-03-25	15,4	6	1914,2	122,9	0,0	1791,3
Onsdag	03-03-26	6,6	5	1157,3	52,8	0,0	1104,5
Torsdag	03-03-27	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fredag	03-03-28	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lördag	03-03-29	4,5	3	1052,3	36,1	0,0	1016,2
Söndag	03-03-30	5,4	3	1596,5	43,4	0,0	1553,1
Måndag	03-03-31	7,5	3	1859,0	60,2	0,0	1798,7
Tisdag	03-04-01	25,7	11	1804,3	205,3	0,0	1599,0
Onsdag	03-04-02	2,56	6	1955,0	124,5	0,0	1830,5
Torsdag	03-04-03	23,6	10	1967,8	188,6	0,0	1779,2
Fredag	03-04-04	13,1	6	2041,7	129,0	0,0	1912,7
Lördag	03-04-05	18,8	7	2043,2	150,4	0,0	1892,8
Söndag	03-04-06	15,1	6	1938,7	121,1	0,0	1817,6
Måndag	03-04-07	12,1	5	1815,8	97,1	0,0	1718,7
Tisdag	03-04-08	8,7	4	1967,0	69,4	506,0	1291,6
Onsdag	03-04-09	0,0	0	1775,6	0,0	542,3	1233,3
Torsdag	03-04-10	13,6	6	1819,9	109,0	380,0	1330,9
Fredag	03-04-11	7,3	3	1755,8	58,5	0,0	1697,3
Lördag	03-04-12	0,0	0	1721,3	0,0	0,0	1721,3
Söndag	03-04-13	19,4	13	1178,8	155,0	0,0	1023,8
Måndag	03-04-14	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0

B Primärdata för sammansättningen och laktester

Tabell 11. Resultat för vardagsproven: glödningsförlust, halter av några grundämnen som bestämts med XRF

Table 11. Results for the daily samples: loss on ignition, concentrations of certain elements determined using XRF

Prov	LOI 550°C (%)	Fe (g/kg)	Mn (g/kg)	Zn (g/kg)	Pb (g/kg)	Cu (g/kg)	As (g/kg)	Andra (g/kg)
03 mars	38,5	25,4	1,5	3,7	1,2	0,4	0,2	Co: 0,3
04 mars	27,1	18,6	1,2	1,7	0,7	0,4	0,2	Co: 0,4
05 mars	19,2	118,0	3,1	4,6	0,7	0,5	0,1	
06 mars	22,0	30,7	1,6	2,7	2,7	0,6	0,4	
07 mars	12,3	37,5	1,9	3,9	6,9	1,0	0,8	
13 mars	22,6	76,7	2,6	3,9	0,4	0,7	0,2	
14 mars	31,8	80,0	2,0	7,2	0,5	0,8	0,3	
15 mars	42,9	45,8	1,6	2,9	0,56	0,5	0,2	
16 mars	45,2	48,7	1,4	4,1	0,6	0,3	0,1	
17 mars	39,9	72,0	1,7	5,2	1,1	0,4	0,2	
18 mars	34,1	37,7	1,5	5,8	0,8	0,4	0,2	Ni: 0,5
19 mars	21,1	59,1	1,3	5,2	1,6	0,7	0,3	
20 mars	21,5	74,5	1,8	4,4	1,1	0,4	0,2	
21 mars	22,7	71,3	2,1	4,0	1,6	0,6	0,2	
24 mars	18,1	103,5	2,6	7,2	1,5	0,6	0,2	
25 mars	12,3	68,3	1,8	4,0	0,8	0,7	0,2	
26 mars	15,2	49,5	1,7	3,7	1,1	0,5	0,2	
02 april	9,3	53,0	1,6	3,0	1,1	0,5	0,2	
03 april	30,4	71,4	2,2	7,4	1,1	0,6	0,2	Co: 0,9
04 april	19,2	116,7	2,7	6,4	1,5	0,7	0,3	Co: 0,8
07 april	9,5	22,9	1,3	1,6	2,5	0,6	0,5	
08 april	13,3	57,5	1,9	2,2	1,8	0,5	0,4	
09 april	20,1	6,0	0,8	3,2	1,8	0,4	0,4	
11 april	58,3	15,4	1,0	3,5	0,9	0,3	0,2	

Utom för de prov för vilka uppgifter finns låg kobolt och nickel under instrumentets detektionsgräns. Molybden, krom, selen och kvicksilver låg alltid under gränsen.

Tabell 12. Resultaten för veckoproven: glödningsförlust och sammansättning (XRF och uppslutning följt av ICP). Medelvärden av två bestämningar.

Table 12. Results for the weekly samples: loss on ignition and composition (XRF as well as digestion followed by ICP). Average for two determinations.

Storhet	Enhet	07 mars	17 mars	21 mars	04 april	11 april
LOI 550°	%	11,5	31,7	36,1	23,5	36,8
LOI 1000°	%	14,0	32,4	36,9	23,3	37,0
LOI ca 1000°	%	15,5	36,8	40,0	27,1	40,2
XRF						
Fe	g/kg	21,6	79,8	77,4	72,5	33,2
Mn	g/kg	1,5	2,6	2,4	2,3	1,5
Zn	g/kg	4,3	7,5	5,0	5,2	5,4
Pb	g/kg	2,9	1,1	1,8	2,1	1,4
Cu	g/kg	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5
As	g/kg	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3

Fotnot:

Glödningsförlusten vid ca 1000°C bestämdes av såväl SGI som Analytica. Den första raden avser data från SGI och den andra raden data från Analytica.

Tabell 13. Resultaten för veckoproven: sammansättning genom uppslutning följt av ICP

Table 13. Results for the weekly samples: composition as determined by digestion followed by ICP.

Storhet	Enhet	07 mars	17 mars	21 mars	04 april	11 april
Huvudämnen						
Si	g/kg	206	12	124	128	131
Al	g/kg	43	27	25	29	27
Ca	g/kg	69	48	45	47	43
Fe	g/kg	58	86	68	122	66
K	g/kg	18	13	13	15	16
Mg	g/kg	12	8	7	8	9
Mn	g/kg	2	2	1	2	1
Na	g/kg	24	13	18	13	14
P	g/kg	1	1	1	1	1
Ti	g/kg	19	10	9	10	8
Spårämnen						
As	mg/kg	58,2	78,0	71,7	86,4	101
Ba	mg/kg	4540	3050	3030	3520	2740
Be	mg/kg	1,23	1,01	0,94	1,03	0,90
Cd	mg/kg	30,3	1,07	0,94	1,03	0,9
Co	mg/kg	35,6	69,5	51,4	96,5	48,5
Cr	mg/kg	524	315	301	330	287
Cu	mg/kg	676	723	515	5900	400
La	mg/kg	14,2	7,15	12,1	10,3	19,1
Ni	mg/kg	80,4	70,3	52,8	68,9	44,7
Pb	mg/kg	6670	1290	6170	2060	1950
S	mg/kg	3270	4620	3880	4370	3610
Sc	mg/kg	4,58	2,03	1,79	2,43	-
Sn	mg/kg	37,8	-	26,1	-	-
Sr	mg/kg	370	287	237	263	278
V	mg/kg	5638	40,0	31,4	46,3	47,2
Y	mg/kg	17,7	14,1	13,6	18,3	17,4
Zn	mg/kg	4650	7940	6450	4080	3690
Zr	mg/kg	249	175	130	183	1230

Kvikksilver och wolfram är alltid under detektionsgränsen. Molybden och niobium är också under gränsen, fast inte för veckoprovet 17 mars: 7,12 mg/kg resp 13,4 mg/kg.

Tabell 14. Resultat från tvåstegslaktesten EN 12457-3 för veckoproven, första steget (L/S=2)

Table 14. Results from the two-step EN 12457-3 leaching test for the weekly samples, first stage (L/S=2).

Storhet	Enhet	07 mars	17 mars	21 mars	04 april	11 april
pH	-	9,3	8,1	7,9	7,6	8,2
Konduktivitet	mS/m	344,3	490,0	298,9	355,9	406,0
Redox E _h	mV	304	373	-	399	-
Utlakat						
Ca	mg/kg TS	324	602	45	296	77
Fe	mg/kg TS	0,0106	0,0206	0,16	0,0236	0,121
K	mg/kg TS	280	1122	594	744	1026
Mg	mg/kg TS	1,19	108	15,2	66,6	43,2
Na	mg/kg TS	890	958	872	818	972
S	mg/kg TS	1298	1552	708	1122	914
Al	mg/kg TS	38,6	0,0978	0,416	0,206	0,113
As	mg/kg TS	0,025	0,0208	0,055	0,0046	0,0446
Ba	mg/kg TS	0,196	0,137	0,0764	0,132	0,102
Cd	mg/kg TS	-	-	-	-	-
Co	mg/kg TS	-	0,00402	0,00117	0,0047	0,0024
Cr	mg/kg TS	0,0135	0,0436	0,0248	0,0012	0,00272
Cu	mg/kg TS	-	0,00244	0,0244	0,0244	0,0224
Hg	mg/kg TS	-	0,0000518	-	0,0003	0,00009
Mn	mg/kg TS	0,00115	0,0556	0,027	0,524	0,0888
Mo	mg/kg TS	0,47	0,127	0,124	0,0526	0,103
Ni	mg/kg TS	0,00156	0,0079	0,0048	0,058	0,00562
Pb	mg/kg TS	0,0216	0,00646	0,041	0,0039	0,0246
Sb	mg/kg TS	0,106	0,0778	0,112	0,0584	0,354
Se	mg/kg TS	0,00193	0,00256	0,00119	0,0009	0,0014
V	mg/kg TS	0,00268	0,00106	0,00212	0,0005	0,00157
Zn	mg/kg TS	0,0125	0,0608	0,032	0,035	0,0222
Cl	mg/kg TS	320	380	360	260	460
F	mg/kg TS	1,26	2	8	2	4
SO ₄	mg/kg TS	2800	4800	2000	3000	2600

Tabell 15. Resultat från tvåstegslaktesten EN 12457-3 för veckoproven, andra steget (L/S=10)

Table 15. Results from the two-step EN 12457-3 leaching test for the weekly samples, second stage (L/S=10).

Storhet	Enhet	07 mars	17 mars	21 mars	04 april	11 april
pH	-	10,6	9,2	9,1	8,8	9,3
Konduktiviteten	mS/m	73,8	119,4	140,3	82	115,8
Redox E _h	mV	284	364	357	378	369
Utlakat						
Ca	mg/kg TS	759	882	212	436	227
Fe	mg/kg TS	0,0848	-	-	-	-
K	mg/kg TS	798	1255	1297	912	1418
Mg	mg/kg TS	1,56	120	44,8	68,1	75,6
Na	mg/kg TS	969	1034	1865	931	1265
S	mg/kg TS	1645	1799	1589	1431	1376
Al	mg/kg TS	147	0,757	5,15	4,17	1,0
As	mg/kg TS	0,0966	0,167	0,285	0,05	0,358
Ba	mg/kg TS	1,79	0,871	0,692	0,743	0,856
Cd	mg/kg TS	-	-	-	-	-
Co	mg/kg TS	-	0,0022	0,0014	0,0024	0,0017
Cr	mg/kg TS	0,038	0,0448	0,0083	-	-
Cu	mg/kg TS	-	-	-	-	-
Hg	mg/kg TS	-	-	-	-	-
Mn	mg/kg TS	0,0087	0,0225	0,0205	0,192	0,0266
Mo	mg/kg TS	0,793	0,297	0,35	0,164	0,21
Ni	mg/kg TS	0,0196	0,0078	-	0,0067	0,0061
Pb	mg/kg TS	0,115	-	0,0151	-	0,0096
Sb	mg/kg TS	0,429	0,375	0,528	0,205	1,31
Se	mg/kg TS	0,0052	0,0109	0,0054	0,0025	0,0058
V	mg/kg TS	0,0179	0,0092	0,0109	0,0037	0,0155
Zn	mg/kg TS	0,136	0,0480	0,0467	0,0309	0,0395
Cl	mg/kg TS	378	564	731	305	688
F	mg/kg TS	4,79	4,23	5,25	3,8	4,37
SO ₄	mg/kg TS	3549	5925	4554	3545	3525

C Kornstorleksfördelningskurvor för enskilda prov

Tabell 16. Kornstorleksfördelningen för vardagsproven, % passerat.

Table 16. Particle size distribution for the daily samples, % passed.

Maskvidd (mm)	03 mars	04 mars	05 mars	06 mars	07 mars	13 mars	14 mars	15 mars	16 mars
63	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	94,9	100,0	87,6	89,7	94,2	86,4	99,6	99,2	94,5
20	83,8	96,1	86,5	82,1	84,6	76,1	98,5	93,8	92,8
16	82,0	92,5	80,6	80,5	83,5	74,3	97,5	92,3	91,3
8	67,8	74,8	62,7	69,1	71,2	58,9	86,1	80,7	78,6
4	51,0	53,2	43,8	53,1	55,1	40,4	68,0	60,4	61,6
2	36,1	34,3	28,1	33,4	38,2	26,1	49,8	41,6	46,9
1	22,7	18,5	14,9	16,4	23,6	14,2	30,6	24,2	32,7
0,5	13,0	11,1	7,0	7,2	13,2	7,8	15,5	13,1	19,1
0,25	7,2	8,0	1,7	2,6	6,1	4,7	8,2	7,9	9,4
0,125	3,7	5,9	0,4	0,7	2,2	2,6	4,9	5,2	5,3
0,063	1,0	4,0	0,1	0,2	0,6	0,8	2,1	3,5	2,3

Maskvidd (mm)	17 mars	18 mars	19 mars	20 mars	21 mars	24 mars	25 mars	26 mars	02 april
63	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	95,0	100,0	97,6	100,0	100,0	99,4	100,0	100,0	97,6
20	89,9	97,2	95,9	92,6	94,7	92,6	98,7	98,0	95,4
16	89,0	95,8	93,1	90,3	94,5	91,9	98,2	96,9	94,0
8	76,9	81,7	81,8	75,5	82,7	80,5	87,7	86,9	81,2
4	61,5	65,8	65,5	59,4	64,7	59,2	68,7	69,2	61,0
2	45,9	49,8	47,5	42,8	46,6	38,9	47,2	48,5	41,7
1	30,8	33,6	29,8	25,4	28,9	23,1	27,1	27,1	23,5
0,5	18,3	20,2	16,5	13,6	16,4	13,2	13,7	11,2	11,1
0,25	10,2	11,8	9,1	8,0	9,2	7,1	6,2	1,5	5,0
0,125	6,5	7,5	5,6	5,2	5,5	4,2	3,1	0,3	2,4
0,063	4,2	3,3	3,3	3,5	2,9	2,6	1,7	0,1	1,1

Tabell 15. Kornstorleksfördelning för vardagsproven, % passerat, fortsättning

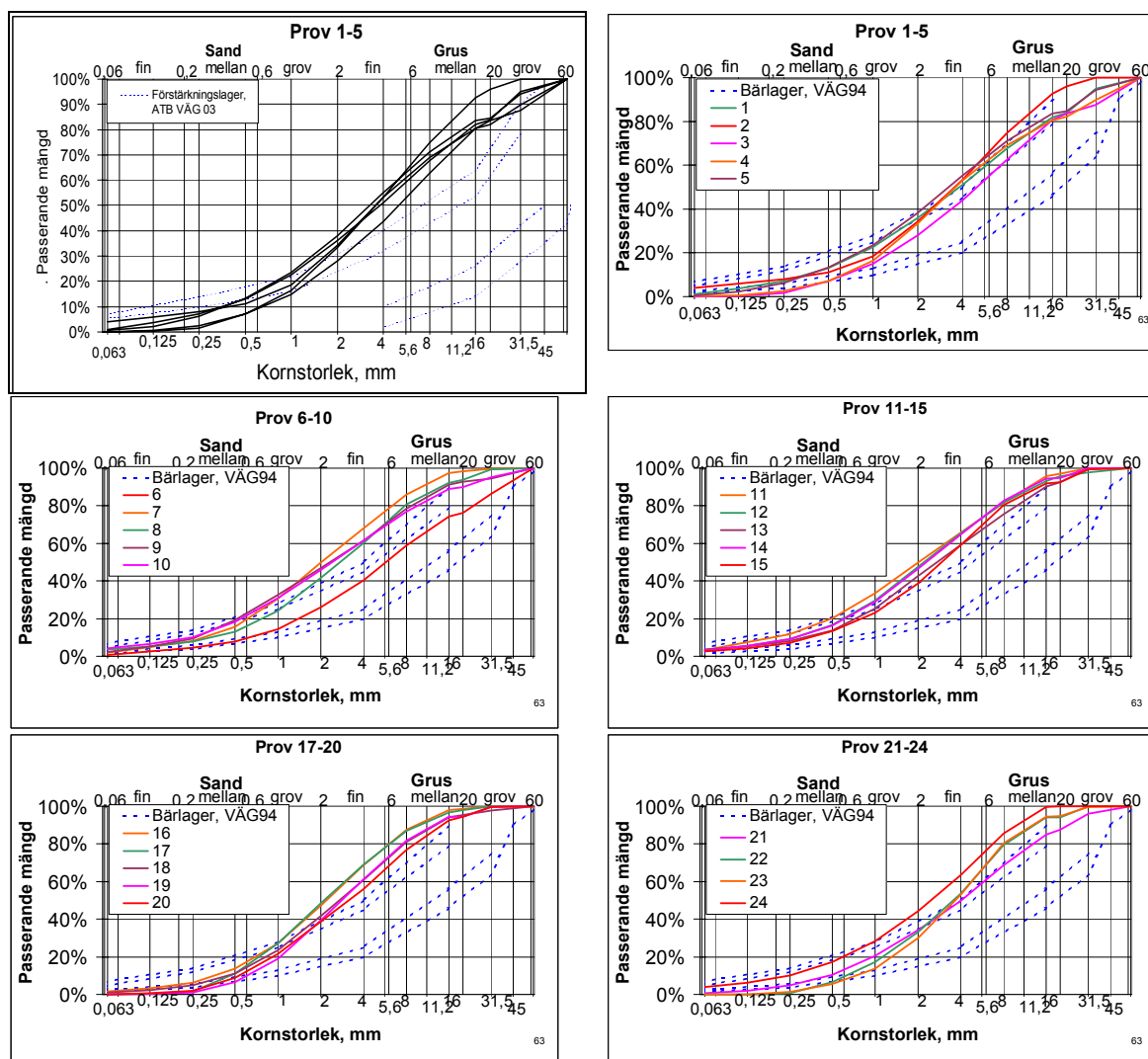
Table 15. Particle size distribution, % passed, continued

Maskvidd (mm)	03 april	04 april	07 april	08 april	09 april	11 april
63	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	99,8	99,8	96,1	100,0	99,6	100,0
20	94,4	94,4	87,6	94,2	94,8	99,9
16	94,3	92,4	85,0	94,2	94,5	99,6
8	81,6	76,8	68,6	79,6	80,4	85,8
4	61,2	56,1	49,8	53,8	53,2	63,6
2	39,4	38,7	34,3	33,1	30,1	44,2
1	19,0	21,4	20,5	17,2	13,8	28,2
0,5	6,6	8,7	10,5	6,5	5,4	17,4
0,25	1,0	1,8	4,8	0,6	1,2	10,1
0,125	0,3	0,5	1,9	0,1	0,1	6,2
0,063	0,0	0,1	0,6	0,0	0,0	3,9

Tabell 17. Kornstorleksfördelningen för veckoproven

Table 17. Particle size distribution for the weekly samples

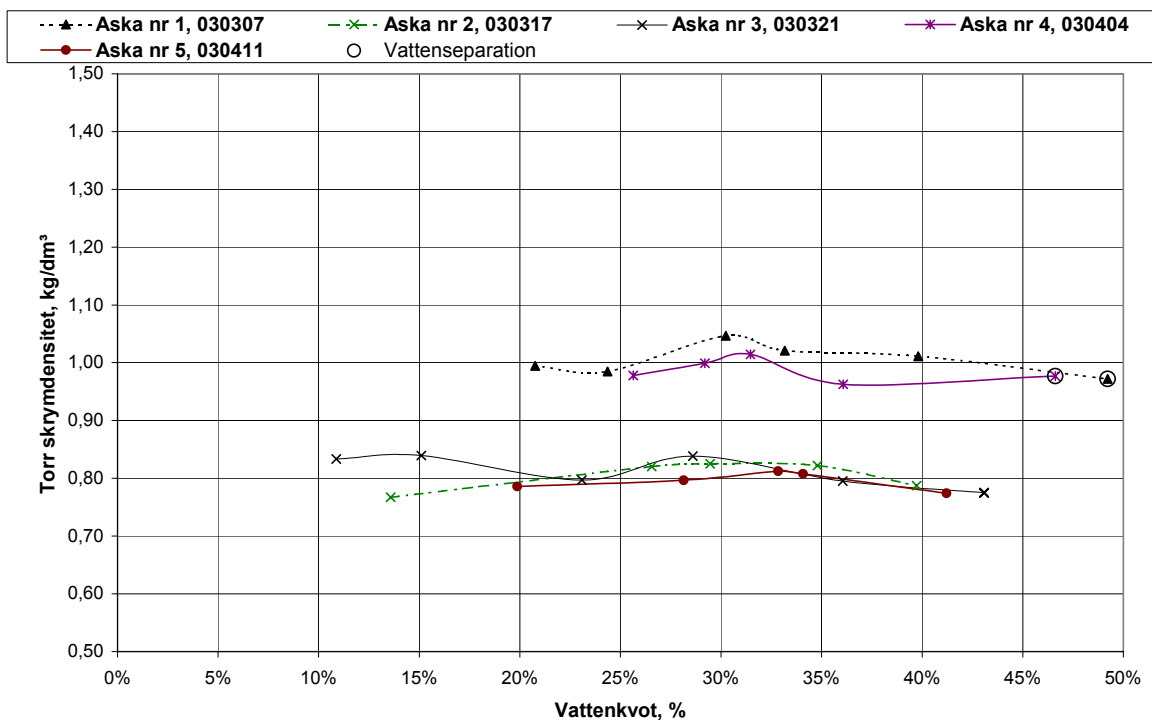
Maskvidd (mm)	07 mars	17 mars	21 mars	04 april	11 april
45	100	100	100	100	100
31,5	96,8	100	94,6	100	98,6
16	88,4	94,6	86,8	93,6	93,4
11,2	85,1	93,2	81,5	91,5	90,7
8	79	87,4	73,1	86,4	86,3
5,6	71,1	80,5	63,9	77,6	73,2
4	63,8	73,9	57,4	71	65,4
2	48,9	57,8	43,8	53,5	47
1	33,5	40,6	29,3	35,1	31,8
0,5	21,1	25,5	17,2	21,3	20,5
0,25	12,8	15,8	9,3	13,5	13,4
0,125	8,9	10,4	5,4	9,2	9,7
0,063	7,3	7,4	3,1	6,8	7,8



Figur 19. Kornstorleksfördelningskurvor för vardagsproven. I diagrammet längst upp till vänster har kraven på material i förstärkningslager enligt ATB VÄG 03 angetts som referens, i de övriga diagrammen har kraven på material i bärlager enligt VÄG94 angetts.

Figure 19. Particle size distribution curves for the daily samples. The requirements on sub-base material according to 2003 specifications have been drawn as reference in the diagram in the upper left corner and the requirements on base course material according to 1994 specifications in the other diagrams.

D Packningskurvor och styvhetsdata för veckoprov



Figur 20. Packningskurvor enligt tung instampning, för samtliga veckoprov

Figure 20. Compaction results from mod. proctor, for all weekly samples

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk 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