

Optimerad bränsleberedning genom siktning

Sven Hermansson, Inge Johansson, Frida Jones,
Daniel Carlberg, Mattias Viberg, Paul Cho, Anders Victorén

Optimerad bränsleberedning genom siktning

Optimized fuel pre-treatment by screening

Sven Hermansson, Inge Johansson, Frida Jones,
Daniel Carlberg, Mattias Viberg, Paul Cho, Anders Victorén

Projektnummer WR-63
År: 2013

WASTE REFINERY
SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Box 857, 501 15 Borås
www.wasterefinery.se
wasterefinery@sp.se
ISSN 1654-4706

Sammanfattning

Fluidbäddtekniken (FB) kräver en väldefinierad bränslefraktion, framförallt med avseende på storleksfördelning. Detta innebär att det krävs en mer omfattande bränsleberedning för avfallseldade FB-pannor än för rostereldade sådana. Bränsleberedningen utgör en betydande del av den totala driftskostnaden för en FB-anläggning. Kvarnar och krossar förbrukar betydande mängder el och måste servas och repareras med jämna mellanrum. Därför pågår en ständig strävan efter att förbättra och effektivisera bränsleberedningen.

Vid sidan av direkta kostnadsminskningar, föreligger även möjligheter att i förbehandlingen öka bränslets kvalitet. Om bränslet renas från inerta fraktioner, vilka inte är önskvärda i det färdiga bränslet, skulle bränslekvaliteten samtidigt kunna höjas. Om detta görs samtidigt med att färdigbehandlat avfall skiljs ut i ett tidigt skede i bränsleförbehandlingsprocessen, torde även maskininvesteringar och driftkostnader nedströms uttagspunkten kunna reduceras. Den övergripande uppgiften för detta projekt har därför varit att med olika tillämpningar av siktningsteknik optimera bränsleberedningen med avseende på förbehandlingskostnad och bränslekvalitet. Mål med projektet har varit att kvantifiera energibesparingar som kan göras i sekundärkrossen om färdigt bränsle separeras ut redan efter primärkross. Vidare har målet varit att undersöka hur väl det går att avskilja inertfraktioner från den uttagna fraktionen, samt att jämföra kostnader för sållningsstegen med potentiella vinster i form av minskad energiåtgång och slitage. Slutligen har målet även varit att jämföra sammansättningen av finfraktioner efter primärkrossning och efter sekundärkrossning för att se var det är mest fördelaktigt att separera ut oorganiskt innehåll. Målgrupp för projektresultaten är främst tillverkare och användare av FB-anläggningar, samt tillverkare och användare av bränsleförbehandlingsutrustning.

Projektet har genomförts i form av praktiska försök med grovsiktning och vindsiktning av avfall vid två positioner i bränsleförbehandlingen i E.ON:s anläggning på Händelö, Norrköping. De framsiktade fraktionerna har analyserats, och en ekonomisk analys av olika tänkbara krossnings- och siktningssuppställningar har gjorts. Resultaten visar att 50 % av bränsleströmmen efter primärkrossning kan by-passas direkt som färdigt bränsle till FB-förbränning, vilket även skulle kunna minska den totala andelen finfraktion i det färdiga bränslet. Investeringskostnader för behövlig grovsiktning bedöms vägas upp av minskade kostnader i drift och underhåll. Vindsiktad, tung finfraktion har tillräckligt låg TOC-halt för att kunna deponeras, vilket skulle kunna bidra till cirka 8 % lägre askflöde till en kostnad av cirka 5 SEK/ton avfall. Emellertid måste utredas om siktresten klassas som farligt eller icke-farligt av fall för att avgöra hur deponeringen kan ske. Vindsiktning av grovfraktionen kan genomföras till ungefär samma kostnad. Dock hade den tunga grovfraktionen i försöken för hög TOC-halt för att kunna deponeras. Sammanfattningsvis visar resultaten visar att målen för projektet är väl uppfyllda.

De mest användbara resultaten från projektet är att det visats att ett system för grovsortering av bränslefraktioner för vidare förädling av fraktionerna, inte torde vara dyrare än ett traditionellt system. Därmed ges av närmare möjlighet att, uppå ett ekonomiskt självbärande grundsystem, bygga vidare med ytterligare system, exempelvis vindsiktning, för att förbättra bränslekvaliteten utifrån de önskemål som finns vid respektive anläggning.

Nyckelord: Förbehandling, siktning, vindsiktning, valskrossning, bränslekvalitet, FB.

Summary

Fluid-bed combustion (FB) requires a well-defined fuel, especially regarding fuel-particle size-distribution. Therefore, a more extensive fuel pre-treatment is required for waste fired FB plants, compared to grate-fired ones. The fuel pre-treatment represents a substantial part of the total operational cost of an FB plant. Mills and shredders consume considerable amounts of electricity, and need to be maintained and repaired. Therefore, there is a continuous strive for improving and to streamline the waste-fuel pre-treatment process.

Beside direct cost reductions, there are within the fuel pre-treatment possibilities to improve the fuel quality. If the fuel could be cleaned from inert fractions, which are not desired components of the fuel, the fuel would be upgraded. If performed within the same process as the ready-made fuel fraction is separated from the fuel flow, savings in equipment investments and operational costs could be made downstream from the extraction position. The task of this project has, therefore, been to optimize the fuel-pre-treatment by different kinds of screening methods, in order to reduce costs and increase fuel quality. The aim of the project has been to quantify energy savings in the secondary shredder, if a part of the fuel could be extracted already after the primary shredder. Furthermore, the aim has been to investigate if inert fractions could be separated from the extracted fuel fractions, and to compare the connected costs with potential savings in energy consumption and wear-and-tear. Finally, the aim has also been to compare the composition of fine shredder fraction before and after secondary shredding, to find the most suitable position for separation of inorganic (inert) fractions. Stakeholders for the project results are foremost manufacturers and users of FB plants, as well as manufacturers and users of fuel pre-treatment equipment.

The project has been carried out by practical waste-fuel pre-treatment trials with shredders, screens and wind screens in the fuel pre-treatment chain in E.ON:s plant in Norrköping, Sweden. The screened fractions have been measured and analyzed, and an economical assessment of plausible set-ups of shredders and screens has been made. The results show that 50 % of the fuel after primary shredding could be by-passed as ready-made fuel. Intrinsically, this is expected to decrease the total amount of fine shredder fraction. Investments for primary screening will be balanced by lower costs for operation and maintenance. Wind screened, dense fine shredder fraction has sufficiently low TOC-content for landfill, which could reduce the ash flow with 8 % at an additional cost of approximately 5 SEK/ton (0,6 €). However, the toxicity of the shredder fraction has to be determined before decision on landfill can be taken. Wind screening of the coarse shredder fraction can be performed at approximately the same cost. However, the dense part of the coarse shredder fraction was in the trials of too high TOC-content for landfilling.

In summary, the results show that the project aims are fulfilled. The most useful results from the project are that a system for primary separation of fuel fractions for further processing of fractions not is more expensive than a traditional system. The stakeholders are, by this, given the opportunity to achieve an economically self-sustaining system. The system could be used as baseline for further processing with, for example wind screening, to improve the fuel quality further with respect to individual aims.

Keywords: Fuel pre-treatment, screening, wind screening, shredding, fuel quality, FB

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	PROBLEMBESKRIVNING	1
1.2	SYFTE OCH MÅL	2
1.3	AVGRÄNSNINGAR	2
2	BAKGRUND	3
3	MATERIAL OCH METODER	7
3.1	MAGNETAVSKILJNING OCH KROSSNING	7
3.2	UTTAG AV AVFALLSBRÄNSLE FÖR SIKTNING	7
3.3	SIKTNING	8
3.4	PROVTAGNING OCH ANALYSER	9
3.5	BERÄKNING AV KOSTNADER FÖR KROSSNING OCH SIKTNING	10
4	UTFÖRANDE	16
5	RESULTATREDOVISNING	18
5.1	SIKTNING	18
5.2	SIKTFRAKTIONERNAS INNEHÅLL	21
5.3	KOSTNADER FÖR KROSSNING OCH SIKTNING	27
6	RESULTATANALYS	29
6.1	ÜTSIKTNING AV FÄRDIGT BRÄNSLE EFTER PRIMÄRKROSSNING	29
6.2	ÜTSIKTNING TUNGA FRAKTIONER OCH FINFRAKTIONER	30
7	SLUTSATSER	34
8	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	35
9	LITTERATURREFERENSER	36

1 Inledning

1.1 Problembeskrivning

Fluidbäddpannor (FB) är beroende av en relativt homogen bränslesammansättning sett till ingående styckestorlek på bränslet [1][2]. Detta gör att det krävs någon form av förbehandling/bränsleberedning av avfallet innan det eldas i denna typ av pannor.

Bränsleberedningen varierar mellan olika anläggningar. Vissa anläggningar sköter sin bränsleberedning i egen regi, medan andra köper in färdigbehandlat avfall. I egen regi varierar den tekniska utformningen beroende på bland annat utrymme, kostnader och driftfilosofier (krossning, sällning, metallavskiljning mm). Beroende på utformningen av hanteringen och hur inkommande avfall ser ut, varierar även energiåtgång, slitage och underhållsbehov. Exempelvis sliter övergrov material på in- och utmatningsutrustning och metallavskiljning fungerar sämre ju mer heterogent materialet är. Vidare har även finfraktionen visat sig innehålla hög andel oönskade ämnen [3] som hamnar i askan. Till exempel är alkalimetallerna Na och K vanligt förekommande i avfallsbränslen, speciellt i finfraktionen [3], och kända för att orsaka korrosion i pannor [4][5]. Även klorider och svavel kan påverka korrosionen [6][7]. För anläggningarna är det därför angeläget att i den mån det är ekonomiskt och miljömässigt försvarbart, vidareutveckla bränsleberedningen för att minska förekomsten av anläggningsslitande material och grundämnen i bränslet och dess olika fraktioner. Därmed skulle även totalkostnaden för anläggningen kunna minskas.

En befogad frågeställning är hur stor den vinst är som kan åstadkommas om man avskiljer finfraktionen i bränslet, i form av exempelvis förbättrad förbränning, minskade beläggningar och minskad bäddagglomerering. Detta har studerats i WR06 [3]. Erfarenheterna av avskiljningen var positiv när det kom till driften av pannan, men samtidigt innehöll den avskilda finfraktionen för mycket organiskt material. Den höga andelen organiskt material gör att man inte kan deponera siktresten utan måste hitta en alternativ avsättning. Olika avsättningsmöjligheter utvärderades i både WR06 och WR42 [8]. Där föreslogs att gå vidare och testa vindsiktning för att avskilja det organiska materialet och återföra detta till processen. Denna problemställning behandlas i detta projekt. Vidare är det intressant att utreda hur driftkostnaderna kan påverkas, genom att med lämpligt val och placering av siktutrustning kunna minska mängden bränsle som går genom en sekundärkross. Genom att bara krossa det avfall som efter primärkrossning är utanför bränslespecifikationen kan både energianvändning och slitage i sekundärkross minskas. Frågan är om det uppväger den ökade energi- och underhållskostnad som en extra enhetsoperation medför? Även här skulle en separering av inert och brännbart avfall kunna vara av intresse för att skona sekundärkrossen ytterligare.

Den övergripande problemställningen är således att med hjälp av olika tillämpningar av sällningsteknik optimera bränsleberedningen för att därmed kunna öka tillgängligheten och minska de totala driftkostnaderna för anläggningen.

1.2 Syfte och mål

Projektets syfte har varit att undersöka om tillgängligheten kan ökas och anläggningens driftkostnader minskas genom förändringar i bränsleberedningen. Förändringen som i detta projekt studerats har varit att introducera siktningsskrider för att minska underhållsbehov, energiförbrukning och andra problem relaterade till bränslet.

De konkreta målen med projektet har varit att:

- I praktiken undersöka hur väl det går att avskilja inertfraktioner från brännbar fraktion.
- Kvantifiera de energibesparingar som kan göras i sekundärkrossen genom att bara material som inte redan uppfyller bränslespecifikationen bearbetas i denna.
- Jämföra kostnader för siktningsskrider med potentiella vinster i form av minskad energiåtgång.

Utöver de ursprungligen definierade målen har ytterligare ett mål adderats:

- Jämföra sammansättningen av finfraktioner efter primärkrossning och efter sekundärkrossning.

De ursprungliga målen förväntas ge grund för hur väl en separation av organiskt och oorganiskt material kan utföras. Emellertid tillför det adderade målet beslutsunderlag för var det är mest fördelaktigt att separera ut finfraktion för utskiljning av oorganiskt innehåll – var i processen som siktresten innehåller mest oorganiskt material och minst organiskt material.

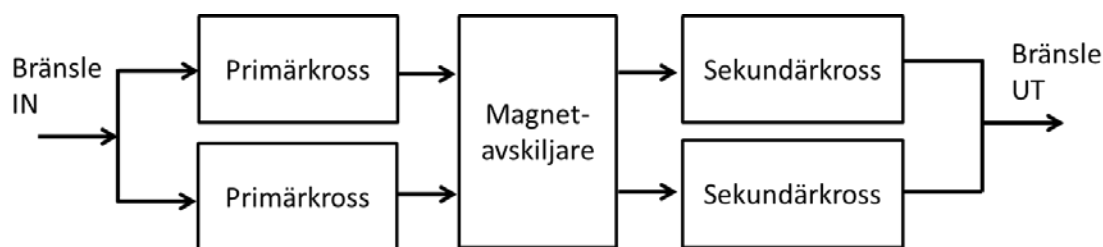
1.3 Avgränsningar

Genomförandet har gjorts som kortare försök, för att utreda potentialen med siktning. Inga förbränningsförsök har genomförts.

2 Bakgrund

Fluidbäddtekniken (FB) kräver en relativt väldefinierad bränslefraktion, framförallt med avseende på storleksfördelning. Detta innebär att det krävs en mer omfattande bränsleberedning för avfallseldade FB-pannor än för rostereldade sådana. Bränsleberedningen kan ske i egen regi, antingen i direkt anslutning till förbränningsanläggningen (exempelvis E.ON, Händelö/Norrköping) eller vid avfallsstation med efterföljande transport till förbränning (exempelvis Borås Energi och Miljö, Borås). Alternativt kan färdigberett bränsle köpas in till anläggningen (exempelvis Fortum P6, Högdalen).

Bränsleberedningens utformning beror på vad avfallet består av, samt vilka krav som ställs från respektive FB-anläggning. Generellt sett eftersträvas en jämn ström av specificerad storleksfördelning, samt att denna innehåller minimal mängd inerta och askbildande element (exempelvis sten, metall och korrosionsbildande element). Bränsleberedningen för en FB-anläggning är i regel uppbyggd av flera krossnings- eller malningssteg med avskiljning av magnetiskt material. Här skapas den efterfrågade partikelstorleken och en del av metallerna skiljs ut. I vissa fall förekommer även avskiljning av icke-magnetiskt material genom siktning. Siktningens syfte är då vanligtvis att hindra överstort material från att komma vidare i beredningen och till pannan, varvid rejektet ofta återförs till något av krosstegen. Som exempel visas i Figur 1 en schematisk bild över bränsleförbehandlingen på Händelöverket i Norrköping (E.ON). Utförligare exempel på hur beredningsanläggningar kan vara utformade finns bland annat publicerade av Caputo et al [9].



Figur 1. Bränsleförbehandling vid Händelöverket, Norrköping.

Figure 1. Fuel pre-treatment at Händelöverket, Norrköping, Sweden.

Bränsleberedningen utgör en betydande del av den totala driftkostnaden för en FB-anläggning. Kvarnar och krossar förbrukar betydande mängder el och måste servas och repareras med jämna mellanrum. Därför pågår en ständig strävan efter att förbättra och effektivisera bränsleberedningen. Besparingspotentialen öppnar även upp för införande av alternativa eller kompletterande enhetsoperationer i förbehandlingssteget. Exempelvis undersöktes i WR52 [10] med positivt resultat huruvida valskrossning kombinerat med siktning kan producera likvärdigt bränsle som den mer energikrävande hammarkvarnstekniken. Vid sidan av liknande direkta kostnadsminskningar, föreligger även en annan viktig potential i förbehandlingen – att minska de indirekta kostnader som ett ofördelaktigt bränsle kan orsaka nedströms behandlingen (d.v.s. i bränsletransportsystem, i förbränningen och i askflöden):

- Korrekt bränslestorleksfördelning
 - Effektivare bränsletransport till FB-pannan (mindre slitage i transportörer)
 - Effektivare förbränning
- Utsortering av inert material
 - Minskat slitage på transportörer samt orsakar igensättningar
 - Ökad utskiljning av metaller
 - Ökat bränslevärmevärde
 - Minskat askflöde
- Utsortering av fraktion med hög halt av korrosionsdrivande element
 - Minskning av beläggningar och korrosion i FB-pannan
 - Minskad kemikalieförbrukning
 - Minskade utsläpp
 - Minskade UH-kostnader

I undersökningen av valskrossar i WR52 sågs inte bara en potentiell direkt besparing i drift, underhåll och säkerhet i förbehandlingskedjan. Förbränningstestet visade även att kombinationen krossning och siktning säkerställde korrekt bränslestorleksfördelning med god förbränning som resultat. Därmed sågs en potential till indirekta besparingsmöjligheter i förbränningen. Ett ytterligare exempel på förbehandling med avsikt att bidra till indirekta besparingar är avskiljning av finfraktion från bränslet. Detta studerades i WR06. Finfraktionen innehöll höga halter av askämnen, inklusive korrosionsdrivande element. Dessa är inte önskvärda att få in i pannan. De driftmässiga erfarenheterna från förbränning av bränslefraktionen, när finfraktionen tagits bort, var mycket goda – intervallen mellan sotning kunde förlängas samtidigt som kalkförbrukningen och askflödena minskade. Dock innehöll den bortsiktade fraktionen en hög andel organiskt material (>30 % TOC). Detta ställer till problem för avsättning av siktresten som deponi. I dagsläget gäller:

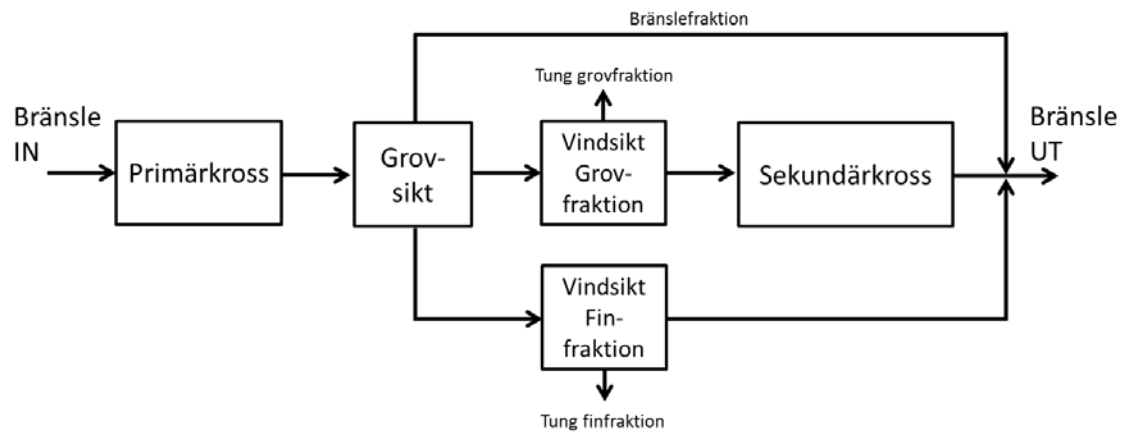
- Oavsett typ av deponi får avfall som deponeras innehålla max 10 % (volym) brännbart [13].
 - a) För en deponi för icke-farligt avfall gäller dessutom att
 - Stabilt icke-reaktivt farligt avfall deponeras om TOC-halten är mindre 5 % (vikt) [14]
 - Icke-farligt avfall som deponeras i samma deponicell som gipsbaserade avfall endast får deponeras om TOC-halten är mindre än 5 % (vikt) [14]
 - Icke-farligt avfall får i övrigt deponeras utan att TOC-halten kontrolleras [14]
 - b) För en deponi för farligt avfall gäller dessutom att avfall får deponeras endast om TOC-halten är mindre än 6 % (vikt) [14].

Farligt avfall måste dessutom uppfylla givna kriterier för lakbarhet av vissa nyckelkomponenter uppfyllas [14]. I det efterföljande projektet WR42 undersöktes därför möjliga avsättningar för fraktionen, utöver deponi. En av slutsatserna var att praktiska försök med vind-sikt (separation efter partikelmassa) borde genomföras för att rena den inerta strömmen i finfraktionen från organiskt material. Några kemiska analyser för att avgöra om siktresterna

kan betraktas som icke-farligt eller farligt avfall, eller hur lakbar siktresten är, gjordes emellertid inte, eftersom inga praktiska försök genomfördes inom projektet.

En direkt besparingspotential i bränsleförbehandling och i indirekta anläggningskostnader finns även i att kunna sortera ut färdig bränslefraktion redan efter den första krossen. Endast den övergrova fraktionen skulle då behöva bearbetas vidare i ett andra krossteg. I praktiken skulle det innebära att sekundärkrossen skulle avlastas och därmed kunna dimensioneras ned. Hur stor andel av den totala bränsleströmmen som redan är färdigbehandlad efter primärkrossen är emellertid inte känt. Denna frågeställning har därför behandlats i detta projekt genom att genomföra siktning av bränslet redan efter primärkrossen. I kombination med siktningen ses även möjligheten att förbättra kvaliteten hos den övergrova bränsleströmmen genom att separera ut inert, övergrov material. Problematiken kring att få in övergrov inert material (stenar, betongbitar m.m.) med bränslet i transportsystemet in till pannan och slutligen in i FB-förbränningen är väsentlig; slitage på krossar ökar och risken för stopp i bränsle- och askutmatningssystem ökar. Kan man i ett tidigt stadium utseparera dessa tunga bitar skulle det dessutom kunna bidra till en minskning av de direkta kostnaderna för krossningen. Även här identifierades möjligheten att kunna bearbeta bränslet – i det här fallet den övergrova fraktionen – med vindsiktning.

För bearbetning av både finfraktion och grovfraktion har alltså vindsiktning identifierats som en tänkbar metodik. Emellertid har vindsiktning av avfallsströmmar hittills inte undersökts metodiskt för bränslebehandlingskedjan. Därmed saknas kunskap kring var siktningen ska placeras i bränslebehandlingskedjan, hur driften skall optimeras samt vilka ekonomiska merkostnader det innebär. För att vindsiktningen skall bli effektiv bör den dessutom kombineras med en grundsikt som grovseparerar bränslet i finfraktion, bränslefraktion och grovfraktion innan någon av dessa vindsiktas. Ska vindsiktning separera ut överstort inert material för att hindra det från att gå vidare in i krossar och slutligen i pannan, bör denna även eventuellt placeras och optimeras annorlunda än om vindsiktningen ska bearbeta finfraktionen. I detta projekt har därför några placerings- och optimeringsmöjligheter av siktning och vindsiktning undersökts i en existerande bränslekedja. Grunduppställningen för analysen presenteras i Figur 2. Färdigt bränsle siktas ut efter primärkross, och finfraktion respektive grovfraktion vindsiktas. Fokus i de praktiska försöken har legat på att se om de inerta fraktionerna kan utskiljas ur bränsleströmmen, samt vilka direkta och indirekta kostnadsbesparingar en sådan utseparation skulle kunna medföra. En ekonomisk bedömning av de aktuella siktningssystemen har gjorts. Dessutom har de olika framsiktade bränslefraktionsflödena kvantifierats och en bedömning har gjorts av hur by-passning av färdigt bränsle kan minska belastningen av sekundärkrossen, samt vilken inverkan finfraktionen förväntas ha på askflöden och korrosion i FB-pannan.



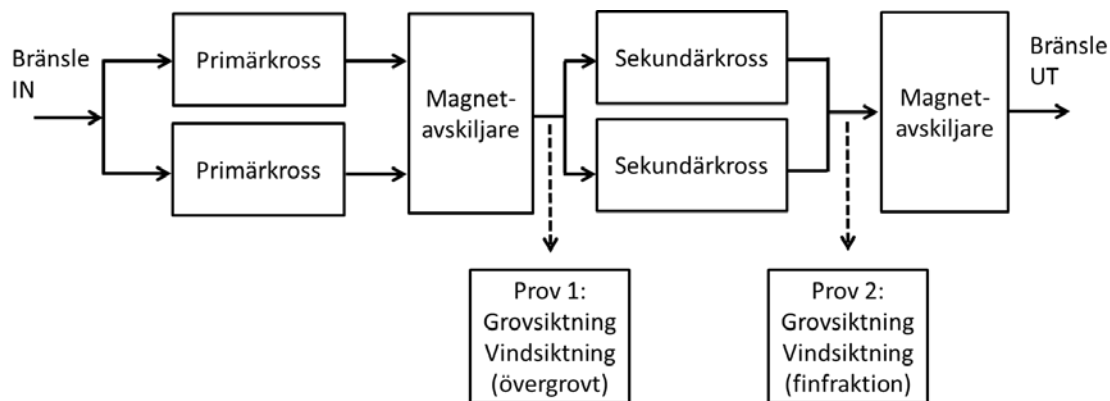
Figur 2. Grunduppställning för utsiktning av färdigt bränsle efter primärkross, samt vindsiktning av övergrov fraktion och finfraktion

Figure 2. Fundamental set-up for screening of prepared fuel after primary shredding, with wind screening of coarse shredder fraction and fine shredder fraction.

3 Material och metoder

3.1 Magnetavskiljning och krossning

E.ON:s avfallsförbränningsanläggning på Händelö, Norrköping har använts som pilotanläggning för bränsleförbehandling och siktning. Till avfallsförbehandlingen hör två FB-pannor, P14 och P15, för produktion av el och värme från inhemskt och importerat avfall. Figur 3 beskriver schematiskt förbehandlingslinjen. Inkommande bränsle tippas med lastbil i en bränsleficka, varefter det blandas och matas med kran och transportör till två parallella primärkrossar. Därefter sker magnetavskiljning innan bränslet går vidare till två parallella sekundärkrossar. Avslutningsvis går bränslet genom ytterligare magnetavskiljning i två steg. Totalt avskiljs ca 3 % av den totala bränslevolymen (400 000 ton/år) som magnetiskt material. Kvarnarna är lågvarviga rivare levererade av M&J. Bränsleberedning har sedan 2002 varit i drift för att bereda verksamhets- och hushållsavfall för P14 och de senaste åren även P15.



Figur 3. Förbehandlingssteg med uttag av bränsle för siktningförsöken.

Figure 3. Fuel pre-treatment including extraction of samples for sieving.

3.2 Uttag av avfallsbränsle för siktning

Under försöken användes en för anläggningen normal bränsleblandning, bestående av uppskattningsvis 50 % hushållsavfall och 50 % verksamhetsavfall. Uttag av bränsle gjordes efter primärkrossning och magnetavskiljning, samt efter sekundärkrossen – se Figur 3. Efter sekundärkrossen togs bränsle ut i den ordinarie bränsleströmmen med hjullastare och ett mindre bränslelager lades upp inför varje siktningförsök. Efter primärkrossen och magnetavskiljare togs bränsle ut i förväg (två dagar innan försöken) och lagrades i containrar. Detta eftersom krossningen inte kunde köras kontinuerligt samtidigt som bränsle togs ut; ett hål var tvunget att tas upp i inkapslingen mellan krossarna, genom vilket bränsle togs ut i omgångar.

3.3 Siktning

För det uttagna avfallsbränslet användes två olika seriella siktningsskeden:

- 1) Grovsiktning m.a.p. partikelstorlek (Terex Finlay 883)
- 2) Vindsiktning (Norditek VS1200)

Grovsiktning med avseende på partikelstorlek gjordes i tre fraktioner av den grovsortande maskinen, se Figur 4. Sikten matades med en hjullastare. En mindre mängd avfall portionerades på siktens matarbord och skakades över ett lutande plan bestående av horisontella stålfingrar (se Figur 5). Avståndet mellan fingrarna gör att partiklar mindre än ca 100 mm trillar till nästa siktplan. Ur denna fraktion skiljs finfraktionen (< ca 30 mm) med ytterligare ett siktplan. Resultat blir tre strömmar på separata transportband: finfraktion (< ca 30 mm), bränslefraktion (ca 30 – ca 100 mm) och grovfraktion (> ca 100 mm).

Vindsikten, se Figur 6, matades direkt och kontinuerligt med grovsiktens transportband. I en vindsikt separeras bränslet i princip med avseende på partiklarnas massa. Bränslet transporteras över en spalt, genom vilken en luftbarriär blåses. De partiklar som inte kan bäras av luftströmmen faller således nedåt, emedan de lättare partiklarna rycks med av luftströmmen. Separationen beror även till viss del på partiklarnas form (eg. formmotstånd). Därför justerades luftströmmens hastighet för siktning av finfraktion och grovfraktion, för att en god separation skulle kunna uppnås vid båda driftfallen.



Figur 4. Grovsikt, Terex Finlay 883 (Foto. Norditek AB).

Figure 4. Primary screen, Terex Finlay 883 (Norditek AB)



Figur 5. Siktplan med fingrar

Figure 5. Screening section, with sieving fingers.



Figur 6. Vindsikt, Norditek VS1200 (Foto: Norditek AB)

Figure 6. Wind screen, Norditek VS1200 (Norditek AB)

3.4 Provtagning och analyser

Finfraktionen och bränslefraktionen efter grovsortering provtogs med skyffel ur fallande ström direkt från transportbandet femton gånger vardera per provomgång, enligt standard för provtagning av fasta biobränslen (SS-EN 14778:2011). Finfraktionen analyserades med avseende på kemisk sammansättning och partikelstorlek. Bränslefraktionen analyserades m.a.p. partikelstorleksfördelning.

Den tunga finfraktionen (efter vindsiktning) provtogs direkt i container, enligt metod [11]. Neddelning av totalmängden behövde inte genomföras på grund av den begränsade totalmängden per provomgång (ca 50-200 kg/omgång). Hela mängden blandades och spreds ut jämnt i containern (ca 3 x 2 m), till ett lager om cirka 5 cm. Bränslelagret delades därefter in i 20 rutor, ur vilka ett lika stort prov togs till ett samlingsprov (Figur 7). Den tunga grovfraktionen provtogs genom neddelning av respektive totalmängd (70-120 kg/omgång) till en hanterlig delmängd (1-2 delningar). Dessutom sorterades i förväg uppenbart inerta bitar, såsom större stenar, betongklumpar och metallbitar ut från den totala provmängden. Denna mängd räknades in i resultatet efter att labbanalysen genomförts. Alla tunga fraktioner analyserades m.a.p. innehåll av organiskt material (TOC - total organic content). Tung finfraktion analyserades dessutom m.a.p. kemisk sammansättning och partikelstorleksfördelning.

I de fall den lätta finfraktionen (efter vindsiktning) provtogs för analys gjordes detta genom att ta stickprov från en framsiktad hel container åt gången, enligt metod [11]. Respektive container tippades ut på en jämn och städad asfaltsplan och blandades. Därefter spreds högen ut med hjullastare på en yta om cirka 8 x 9 meter, vilket resulterade i en cirka 10 cm hög kaka (Figur 8). Ytan delades in i 25 rutor. Från mitten av varje ruta togs en lika stor delmängd (från toppen till botten) ut till ett samlingsprov.



Figur 7. Provtagning av tung finfraktion
Figure 7. Sampling of dense part of fine shredder fraction



Figur 8. Provtagning av lätt finfraktion
Figure 8. Sampling of light part of fine shredder fraction.

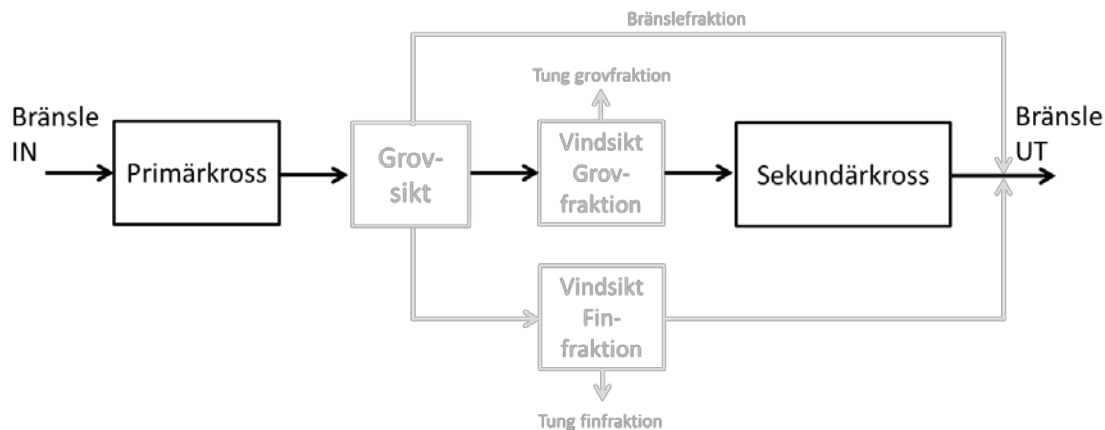
3.5 Beräkning av kostnader för krossning och siktning

Tre typfall av förbehandlingsmetoder, nedan benämnda Krossfall 1 till 3 och illustrerade i Figur 9 - Figur 11, har jämförts ekonomiskt med avseende på investerings-, drift- och underhållskostnader. Figurerna 8 - 10 illustrerar hur respektive krossfall förhåller sig till den kompletta ”måluppställningen”, vilken illustrerats i Figur 2. För samtliga fall har maskinkostnaderna beräknats för en av två parallella linjer med motsvarande bränsleflöde som behandlas i Norrköping (200 000 ton per år och linje, samt 2 900 drifttimmar per år i tvåskift). I Krossfall 2 och 3 ingår kostnaden för grovsiktning i två fraktioner (grovfraction och övrig fraktion).

Krossfall 1) ”Traditionellt valskrosssystem” för FB-pannor; referensfall. Primärkross följt av sekundärkross. Båda krossarna har samma kapacitet. De ekonomiska parametrarna för krossning och siktning sammanfattas i Kapitel 3.5.1 och 3.5.2.

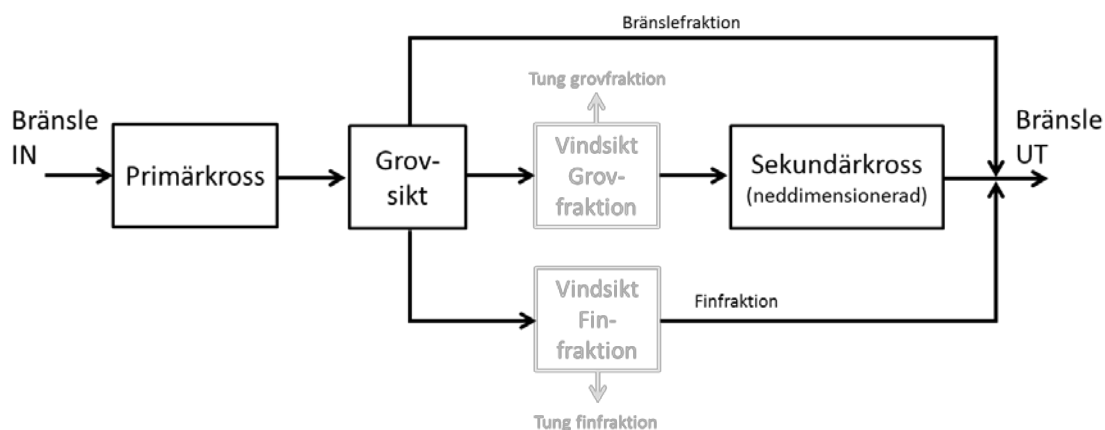
Krossfall 2) ”Nedskalning av sekundärkross”. Endast den övergrova fraktionen efter primärkrossning körs genom sekundärkrossen. Sekundärkrossen kan därmed dimensioneras ner. För utsiktning av den övergrova strömmen används en grovsorterare. Samma primärkross används som i *Krossfall 1*.

Krossfall 3) ”Driftreducering av sekundärkross”. Endast den övergrova fraktionen efter primärkrossning körs genom sekundärkrossen. Sekundärkrossen körs på dellast. För utsiktning av den övergrova strömmen används en grovsorterare. Samma primärkross används som i *Krossfall 1*.



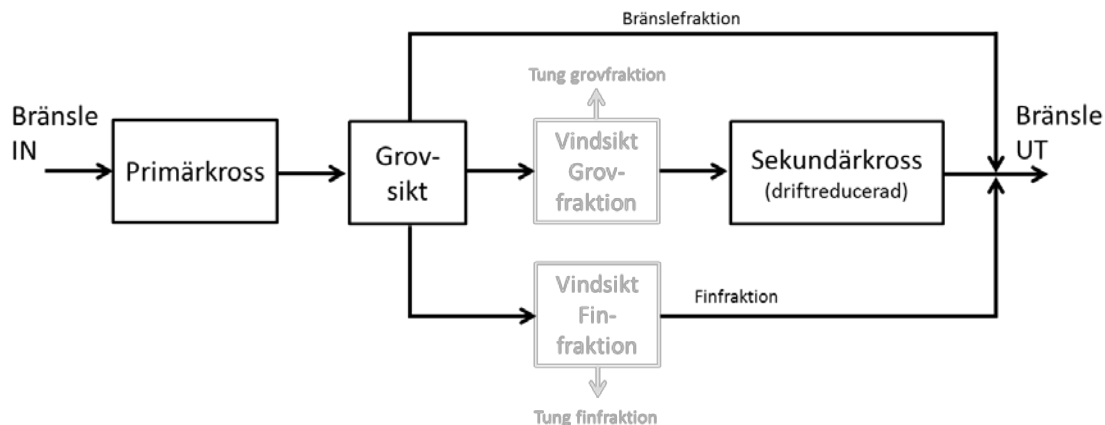
Figur 9. Krossfall 1. Traditionellt valskrosssystem (referensfall). Endast svartmarkerade delar ingår i fallet.

Figure 9. Shredding case 1. Traditional shredder system (reference case). Only black colored parts are included.



Figur 10. Krossfall 2. Nedskalning av sekundärkross. Övergrovt bränsle siktas ut efter primärkrossen och leds genom sekundärkross. Färdigt bränsle bypassas förbi sekundärkrossen. Endast svartmarkerade delar ingår i fallet.

Figure 10. Shredding case 2. Downsizing of secondary shredder. Coarse material is separated after primary shredder and led to secondary shredder. Ready-made fuel is by passed the secondary shredder. Only black colored parts are included.



Figur 11. Krossfall 3. Driftreducering av sekundärkross. Övergrovt bränsle siktas ut efter primärkrossen och leds genom sekundärkross. Färdigt bränsle bypassas förbi sekundärkrossen. Endast svartmarkerade delar ingår i fallet.

Figure 11. Shredding case 3. Down-sizing of secondary shredder. Coarse material is separated after primary shredder and led to secondary shredder. Ready-made fuel is bypassed the secondary shredder. Only black colored parts are included.

Two typical cases of wind-sieving, below named Vindsikt 1 and 2 and illustrated in Figure 10 and Figure 11, have been analyzed economically with regard to investment-, drift- and maintenance costs:

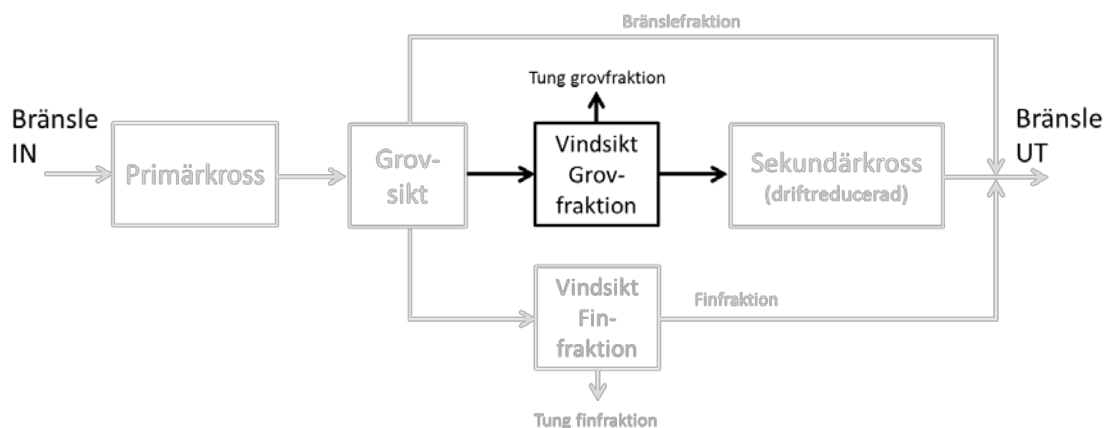
Vindsikt 1) Vindsiktning av grovfraktion. Grovsorterare siktas ut två strömmar: grovfraktion och övrig, färdig bränslefraktion. Efter vindsiktning förs lätt grovfraktion till sekundärkrossning.

Vindsikt 2) Vindsiktning av finfraktion. Grovsorterare siktas ut tre strömmar: finfraktion, bränslefraktion och grovfraktion. Efter vindsiktning blandas lätt finfraktion med bränslefraktion som färdigt bränsle. Grovfraktionen förs till sekundärkrossning. För *Vindsikt 2* tillkommer maskinkostnad i grovsortering, jämfört med *Vindsikt 1*, i och med att tre fraktioner måste siktas fram.

Maskinkostnaderna för vindsiktning har beräknats för avfallsflödena vid en av de två parallella linjerna i Norrköping (200 000 ton avfall totalt per år och linje, samt 2 900 drifttimmar per år), efter primärkrossning.

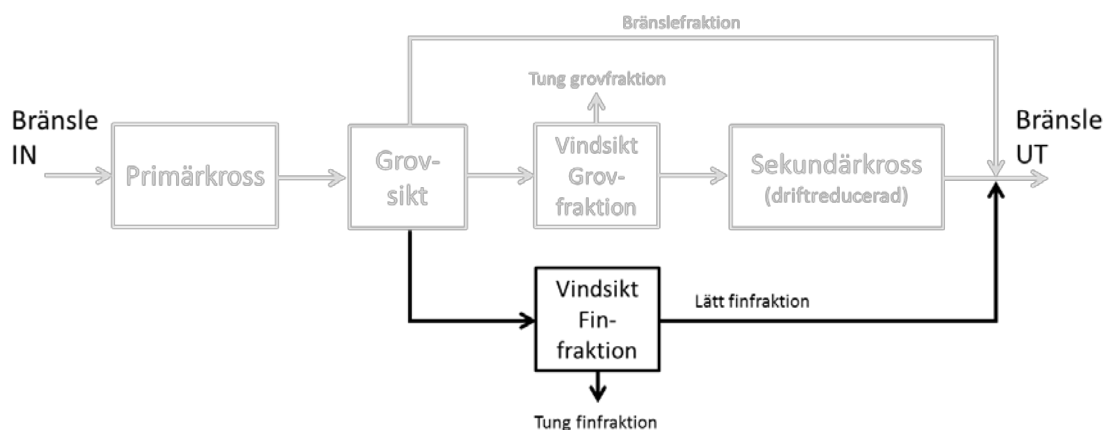
I alla kross- och vindsiktningfallen har kapitalkostnaden per behandlad mängd avfall beräknats genom en bedömd annuitetskostnad, utifrån en avskrivningstid à 10 år samt en kalkylränta à 5,5 %. Elpriset antas vara 1 SEK/kWh. Elpriset har satts något högre än aktuellt dagspris, för att ta höjd för eventuella prishöjningar under den 10-åriga avskrivningstiden. Personalkostnad har uppskattats utifrån de data som användes för liknande beräkningar i WR52 [10].

För att undersöka kalkylens känslighet för eventuella osäkerheter i bedömningen av underhållskostnader och personalkostnader har en känslighetsanalys gjorts för vart och ett av fallen, i vilken dessa poster har varierats med $\pm 10\%$



Figur 12. Vindsikt 1. Vindsiktning av grovfraktion efter grovsortering i två fraktioner. Endast svartmarkerade delar ingår i fallet.

Figure 12. Wind screen case 2. Wind screening of coarse fraction after screening into two fractions. Only black colored parts are included.



Figur 13. Vindsikt 2. Vindsiktning av finfraktion efter grovsortering i tre fraktioner. Lätt finfraktion återförs till bränslefraktionen. Endast svartmarkerade delar ingår i fallet.

Figure 13. Wind screen case 2. Wind screening of fine fraction after screening of waste fuel into three fraction. Light fraction from wind screening is mixed into the ready fuel fraction. Only black colored parts are included.

3.5.1 Ekonomiska data Krossfall

I Tabell 1 anges underlag för kostnadsuppskattningen för investering och drift av de undersökta krossningsfallen *Krossfall 1 – 3*. I underlaget ingår kostnader direkt förknippade med krossning och grovsiktning i två fraktioner efter primärkross. Övriga kostnadstillägg som beräknas tillkomma de undersökta fallen innefattar bränsletransportsystem och personaltimmar. Underlaget är sammansatt utifrån samma data som användes för liknande beräkningar i WR52 för en förbehandlingslinje för 200 000 ton avfall per år (69 ton/h; 2 900 h/år; tvåskift).

Tabell 1. Underlag för kostnadsuppskattningsberäkning för krossning.

Table 1. Economic data for cost assessment of shredding.

Kostnadspost	Primärkross	Sekundärkross			Grovsortering
		Normal	Nedskalad	Reducerad drift	
Kapitalkostnader (MSEK)					
- maskinkostnader	6,3	6,7	5,4	6,7	3,9
- övriga kostnader*	0	9	11	11	0
Eleffekt (kW)	440	680	400	400	40
Underhållskostnader (SEK/ton)**	14	14	14	14	2,5
Personalkostnader*** (SEK/ton)		45	45	45	1
Kapacitet (ton/h)	69	69	35	35	69

* Kostnader för bränsletransportörer mellan krossar samt mellan krossar och sikt. Hela kostnaden är inkluderad i kostnadsposten för sekundärkrossning.

** Underhållskostnaderna är baserade på faktiskt flöde genom respektive kross och sikt

*** Personalkostnad för krossning innefattar både primär- och sekundärkross.

3.5.2 Ekonomisk data Vindsikt

I Tabell 2 anges underlag för kostnadsuppskattningsberäkning för investering och drift av fallen *Vindsikt 1* och *Vindsikt 2*. Underlaget beskriver de kostnader för grovsiktning och vindsiktning som tillkommer utöver grundkostnaderna för krossning och grovsiktning inkluderade i *Krossfall 1-3*. Uppgifterna är tillhandahållna av Norditek AB och baserade på erfarenhet från utveckling och drift av likvärdig utrustning, samt anpassade till en förbehandlingslinje för 200 000 ton avfall per år (69 ton/h, tvåskift). Kostnader för deponi av aska och siktrest är bedömda utifrån E.ON:s driftkostnader i Norrköping.

Tabell 2. Underlag för kostnadsuppskattningsberäkning för stationär siktning.

Table 2. Economic data for cost assessment of stationary screening.

Kostnadspost	Vindsiktning Grovfraction	Vindsiktning Finfraktion
Kapitalkostnader (MSEK)		
- grovsiktning (finfraktion)	-	0,45
- vindsiktning	0,95	0,95
- övrigt*	0,5	0,5
Eleffekt (kW)	20	20
Underhållskostnader (SEK/ton)	1,2	2,2**
Personalkostnader (SEK/ton)	0,15	0,15
Deponibesparing, aska (SEK/ton aska)	600	600
Deponikostnad, siktrest (SEK/ton siktrest)	900	900
Kapacitet (ton/h)	35***	20***
Driftstimmar (h/år)	2 900	2 900

* Kostnader för extra transportörer

** Inkluderar 1 SEK/ton för ökat underhåll av grovsorterare då även finfraktion sikts ut.

*** Grovfractionen är cirka 50 % av totalflödet och finfraktionen cirka 25 % av totalflödet, vilket är bedömt efter resultaten i detta projekt.

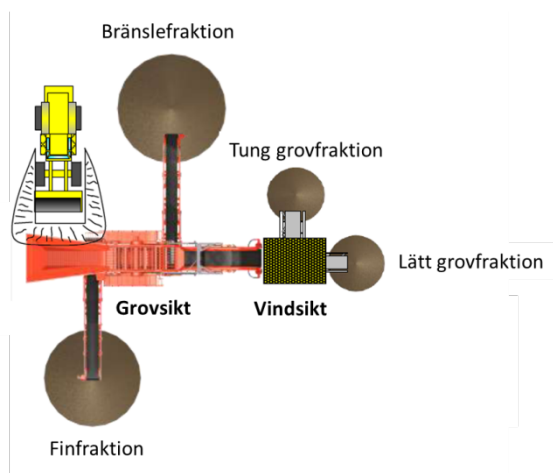
4 Utförande

Siktningen utfördes i två omgångar, med bränsle uttaget enligt beskrivet i Figur 3:

- 1) Avfall som körts genom primärkrossen
- 2) Avfall som körts genom både primärkrossen och sekundärkrossen.

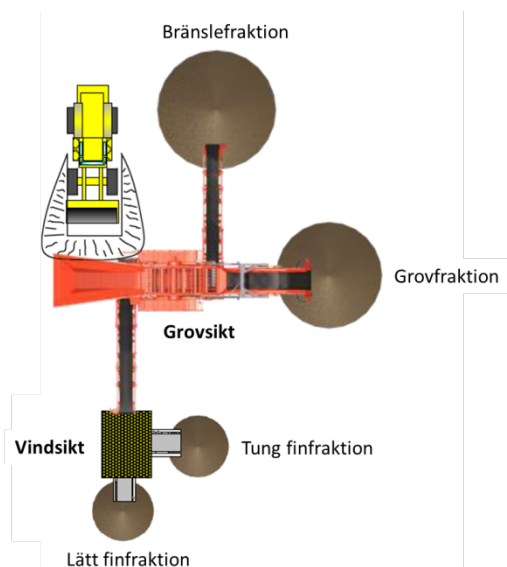
Vid siktningen av avfall som endast gått genom primärkrossen vindsiktades den övergrova fraktionen så att en lätt och en tung övergrov fraktion erhöles. Vid siktningen av avfall som gått genom både primärkross och sekundärkross vindsiktades finfraktionen. Uppställningarna av siktarna för de två olika fallen ses schematiskt i Figur 14 och Figur 15. I Figur 16 ses även ett foto över siktningen vid uppställning 2.

Totalt siktades 35 ton avfall som enbart gått genom primärkrossen i tre lika stora omgångar, samt 39 ton avfall som gått genom både primärkross och sekundärkross. I det senare fallet siktades avfallet i tre lika stora omgångar och i en fjärde mindre omgång. Det inkommande avfallet till siktningen vägdes inför varje siktning som omgång av praktiska skäl med hjullastarskopa (efter sekundärkross) eller med lastbil och container på lastbilsväg. De utgående fraktionerna vägdes ut i container på lastbilsväg. Samtliga använda vågar testas en gång per år, med samma krav för hjullastarvåg som för stationära vågar. Användandet av olika vågar anses därför inte ge upphov till några betydande mätfel.



Figur 14. Siktning av bränsle uttaget efter primärkrossning.

Figure 14. Screening of fuel extracted after primary shredder.



Figur 15. Siktning av bränsle uttaget efter sekundärkrossning.

Figure 15. Screening of fuel extracted after secondary shredder.



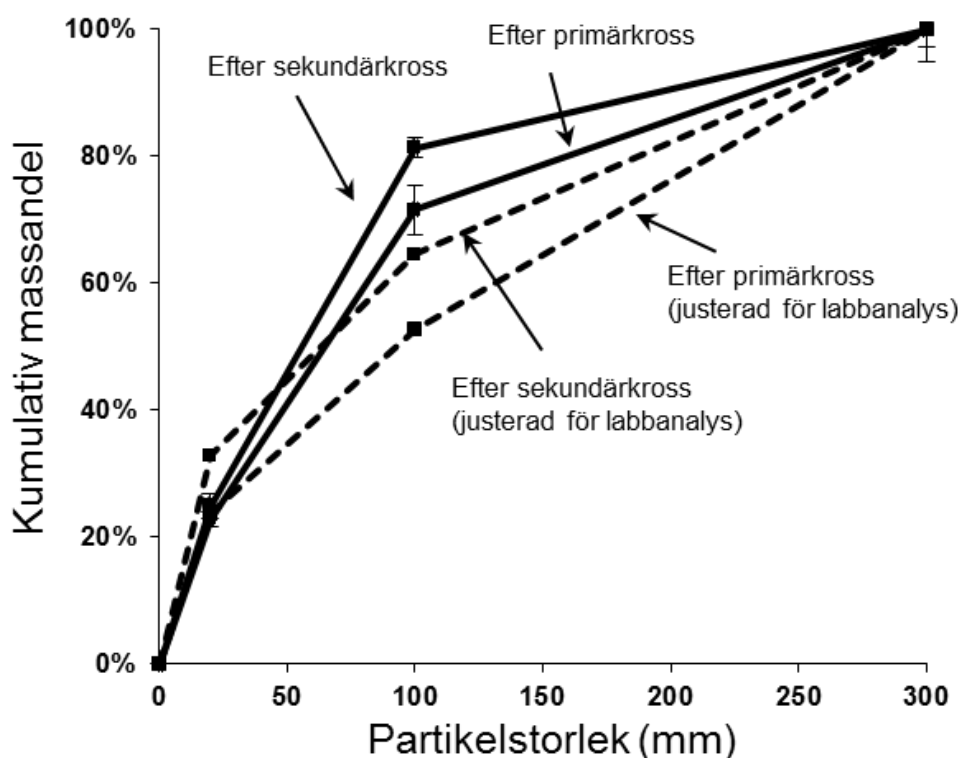
Figur 16. Grovsiktning och vindsiktning av avfall som körts genom både primär- och sekundärkrossning

Figure 16. Primary screening and wind screening of waste fuel processed in primary shredder and secondary shredder.

5 Resultatredovisning

5.1 Siktning

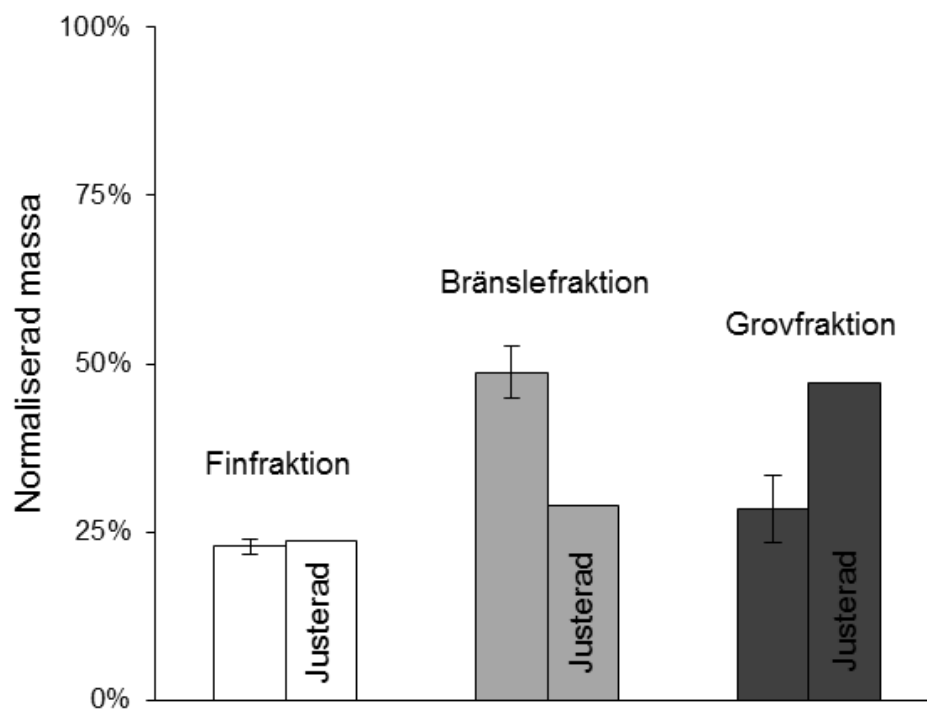
Figur 17 - 19 visar normaliserade siktkurvor och stapeldiagram för avfallsbränslet efter primärkrossning och efter sekundärkrossning, som finfraktion (< 20 mm), bränslefraktion (20-100 mm) och grovfraktion (100-300 mm). Grovfraktionen i primärkrossat bränsle är de sammanlagda lätta och tunga grovfraktionerna. Samma summering har gjorts för finfraktionen efter sekundärkrossningen. Felstaplarna visar standardavvikelsen för försökserien. Massbalansen för framsiktade fraktioner och inmatad massa avfall visar att felet för alla omgångar understiger 10 % av den inmatade massan.



Figur 17. Siktkurvor för avfallsbränslet uttaget efter primärkross och efter sekundärkross (-). Justerade siktkurvor utifrån labbanalys av partikelstorleksfördelning för respektive fraktion (- -).

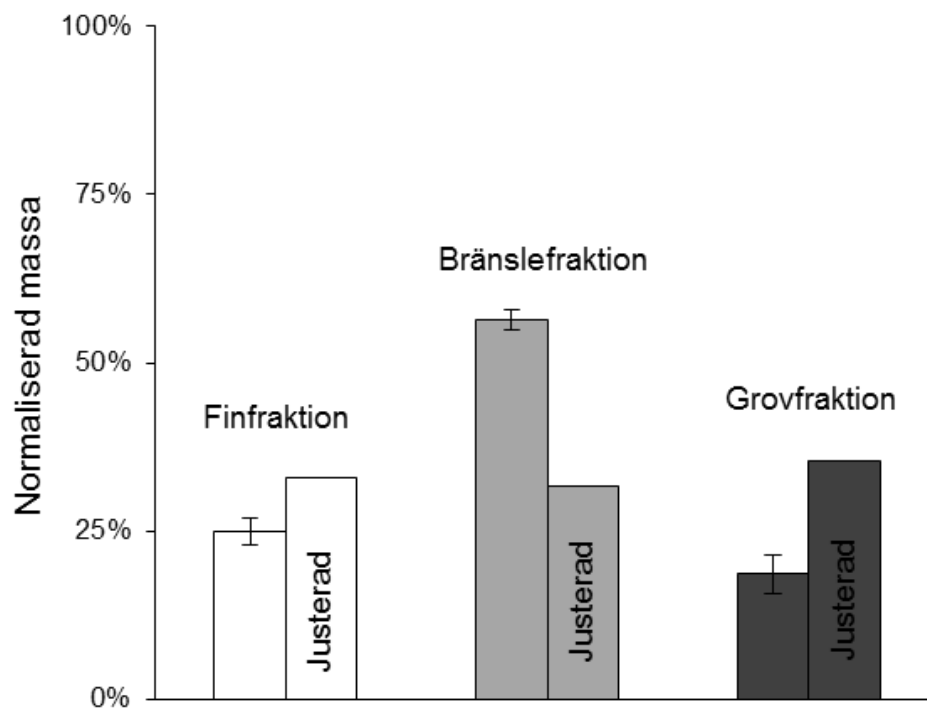
Figure 17. Screening plots for waste fuel extracted after primary shredder and secondary shredder (-). Adjusted screening plots from lab analysis of particle size distribution for each screened fraction (- -).

Resultaten i Figurerna 17 - 19 visar att grovsorteringen av avfallsbränsle gav lika stor andel finfraktion när den utfördes före som efter sekundärkrossningen. Efter sekundärkrossningen siktades dock en större andel bränslefraktion ut än före sekundärkrossning. Således var andelen utsiktad grovfraktion efter sekundärkrossen något lägre än före densamma. I figurerna visas även justerade siktkurvor och staplar, utifrån de siktningsanalyser som gjorts på labb för respektive fraktion. Den del av mellanfraktionen som i labbanalysen fanns vara finfraktion (< 20 mm) och grovfraktion (> 100 mm) har i justeringen överförs till finfraktionen respektive grovfraktionen. På samma vis har gjorts vid justering av finfraktionen och grovfraktionen. De justerade kurvorna och staplarna tyder på att den verkliga andelen finfraktion i sekundärkrossat bränsle är större än i enbart primärkrossat. Verkligen andelen bränslefraktion för primär- och sekundärkrossat bränsle är emellertid likvärdig. Den verkliga andelen grovfraktion fanns vara större i det primärkrossade bränslet än i det sekundärkrossade bränslet.



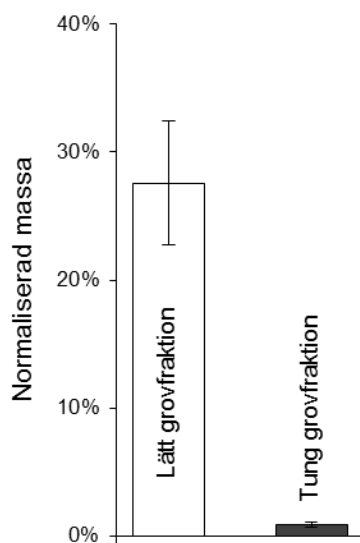
Figur 18. Avfallsbränsle efter primärkross. Fördelning mellan siktade fraktioner. De högra staplarna är justerade utifrån labbanalys för partikelstorleksfördelning.

Figure 18. Waste fuel after primary shredding. Distribution between screened fraction. Right hand side bars are adjusted for lab analyses of particle size distribution.



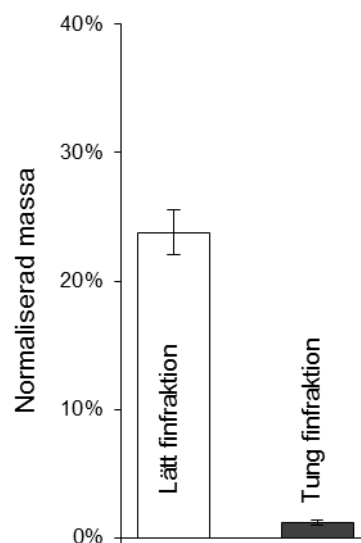
Figur 19. Avfallsbränsle efter sekundärkross. Fördelning mellan siktade fraktioner. De högra staplarna är justerade utifrån labbanalys för partikelstorleksfördelning.

Figure 19. Waste fuel after secondary shredding. Distribution between screened fraction. Right hand side bars are adjusted for lab analyses of particle size distribution.



Figur 20. Andel lätt och tung grovfraktion i avfallsbränslet efter primärkrossning.

Figure 20. Fractions of light and dense particles in the coarse fraction after primary shredding.



Figur 21. Andel lätt och tung finfraktion i avfallsbränslet efter primär- och sekundärkrossning.

Figure 21. Fractions of light and dense particles in the fine particle fraction after primary and secondary shredding.

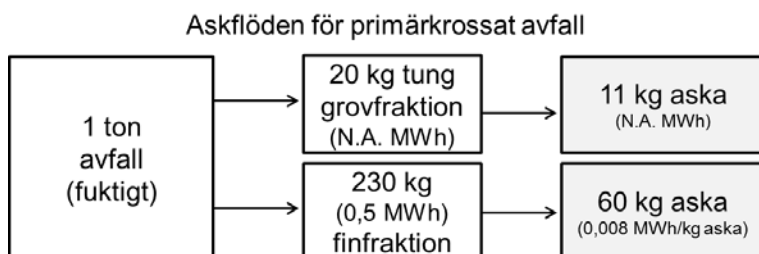
Figur 20 och 21 visar fördelningen mellan lätt och tung fraktion efter vindsiktning av grovfraktionen av avfallsbränslet som körts genom primärkrossen, samt lätt och tung fraktion efter vindsiktning av finfraktionen av avfallsbränsle som körts genom både primär- och sekundärkross. Resultaten är normaliserade mot den totala bränslemassan, d.v.s. är direkt jämförbara med Figur 18 och 19. Felstaplarna representerar standardavvikelsen för mätserien.

5.2 Siktfraktionernas innehåll

5.2.1 Aska

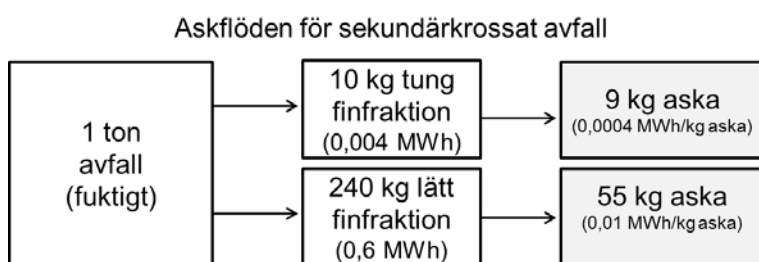
Utifrån massfördelningen mellan de framsiktade bränslefraktionerna och respektive askbränsleanalyser kan fördelningen av aska mellan de olika fraktionerna beräknas. Figur 22 visar hur stor askmängd som hamnar i finfraktionen respektive den tunga grovfraktionen efter primärkrossning av 1 ton avfallsbränsle. På samma vis illustrerar Figur 23 hur stor mängd aska som efter sekundärkrossning hamnar i finfraktionen, samt hur denna fördelar sig mellan lätt och tung fraktion. Skulle någon av dessa fraktioner kunna sorteras ut och avsättas till annat än förbränning, skulle alltså motsvarande mängd aska kunna undvikas i FB-pannan. Inom projektet provtogs inte det ingående bränslet, på grund av komplexiteten i genomförandet av detta. I ett tidigare projekt där fokus låg på karaktärisering av avfall [12], fastställdes att den totala askmängden normalt är cirka 110 kg per ton fuktigt avfall. Proportionerna mellan hushållsavfall och verksamhetsavfall var inte desamma vid de två olika tillfällena. I detta projekt var blandningen 50/50 och i det tidigare projektet var hus-

hållsfraktionen 30 %. Granskning av askhalterna i de bränslen som provtogs i det tidigare projektet visar emellertid inte på några tydliga skillnader i askhalt mellan hushållsavfall och industriavfall, vilket indikerar att jämförelsen som görs i detta projekt är rimlig.



Figur 22. Askflöde för ett ton primärkrossat avfall, med avseende på finfraktion och tung grovfraktion. Energimängden för askan från finfraktionen beskriver hur stor energiförlust som varje minskat kg aska skulle medföra (per ton avfall totalt) om hela finfraktionen sorterades bort. För den tunga grovfraktionen finns ingen värmevärdesanalys, varför ingen energidata kan presenteras.

Figure 22. Resulting ash flow from one metric ton of waste processed in primary shredder, divided into fine shredder fraction and dense part of coarse shredder fraction. The energy value of the ash in the fine particle fraction denotes the energetic loss that every extracted ton of ash would lead to, if the entire fine particle shredder fraction would be extracted. For the dense, coarse shredder fraction there is no energetic analysis available, hence no similar data can be presented.

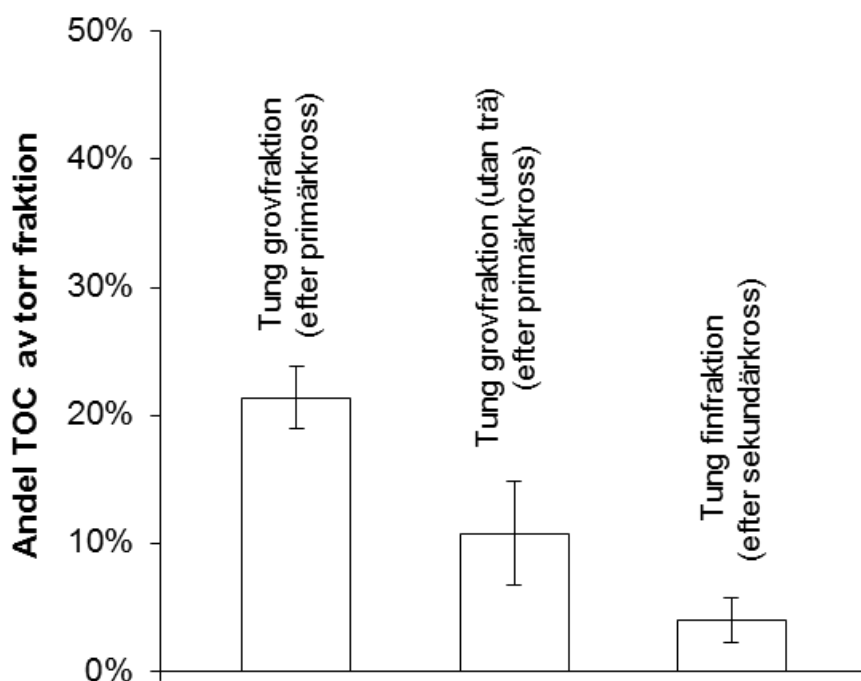


Figur 23. Askflöde för ett ton sekundärkrossat avfall, med avseende på lätt och finfraktion. Energimängden för askan från den tunga respektive den lätta finfraktionen beskriver hur stor energiförlust som varje minskat kg aska skulle medföra (per ton avfall totalt) om hela fraktionerna skulle sorteras bort.

Figure 23. Resulting ash flow from one metric ton of waste processed in secondary shredder, divided into light and dense fractions of the fine shredder fraction. The energy value of the ash in the fine shredder fraction denotes the energetic loss that every extracted ton of ash would lead to, if the entire fine shredder fraction would be extracted.

5.2.2 Organsikt i innehåll i tunga siktfraktioner

TOC-innehållet (total andel organiskt kol) i de tunga grov- och finfraktionerna, före respektive efter sekundärkrossning, visas i Figur 24. Andelen TOC i den tunga finfraktionen efter sekundärkrossning uppmättes till $4,0 \pm 1,7$ % och andelen TOC i den grova fraktionen uppgår till 21 ± 2 %. Den tunga grovfraktionen innehöll emellertid en stor andel träklossar, vilket ses tydligt i Figur 25; 58 ± 3 % beräknat på kvarvarande massa efter en kortare tids torkning av provfraktionen. Om denna andel av bränslet tas bort, blir TOC-värdet för fraktionen 10 ± 2 %. I beräkningen har den antagna fukthalten hos träklossarna vid analysen då varierats mellan 15 och 50 %, samt kolhalten i träet antagits vara 50 %.



Figur 24. TOC-andel i vindsiktade tunga fraktioner efter primär- och sekundärkross. Den mellersta stapeln visar beräknad TOC-andel om allt trä skiljs från fraktionen.

Figure 24. TOC-concentration in wind screened dense fractions after primary and secondary shredding. The middle bar denotes the calculated TOC-concentration, if the wood could be separated from the fraction.



Figur 25. Tung grovfraktion från avfall som primärkrossats.

Figure 25. Dense part of coarse shredder fraction after primary shredding.

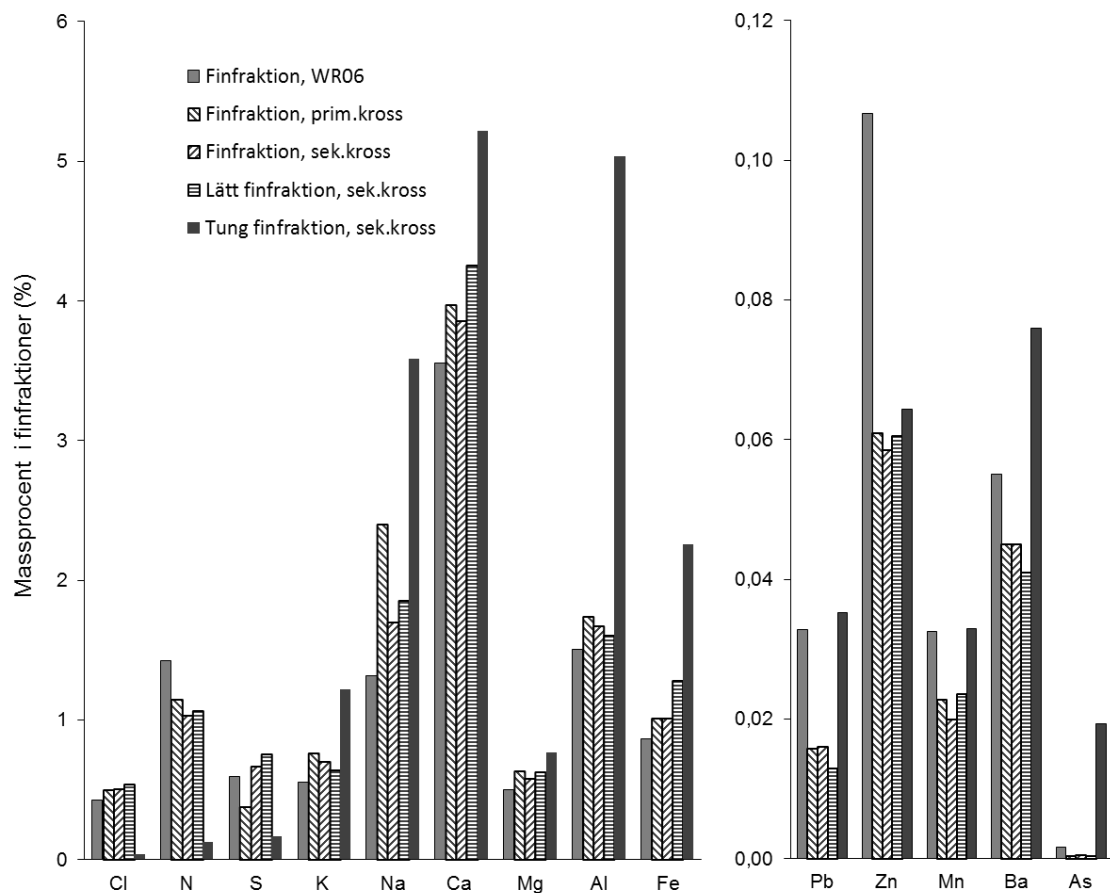
5.2.3 Sammansättning hos finfraktioner

I Tabell 3 presenteras halter av huvudkomponenterna, fukthalt och värmevärde för de analyserade finfraktionerna, samt i Figur 26 nyckelkomponenter ur ask- och korrosionssynvinkel. Analysresultaten presenteras för finfraktion efter primärkrossning och för finfraktion efter sekundärkrossning. Någon utsiktning av tunga fraktioner har inte gjorts ur dessa strömmar, och de är därför direkt jämförbara. Analyserna från nedströms vindsiktning av finfraktionen presenteras som uppdelad på och tung och lätt fraktion. Som jämförelse med halterna i finfraktionerna visas motsvarande data för finfraktionen från avfallsbränsle i Borås i WR06 [3]. I WR06 siktades bränsle primärkrossat i valskvarn och malt i hammarkvarn. Eftersom olika siktningsmetoder användes i de två projekten samt att avfallet som användes i det tidigare projektet bestod av enbart verksamhetsavfall, kan dock inte uteslutas att partikelstorleksfördelningen och koncentration skiljer sig något åt.

Tabell 3. Fukthalt, värmevärde och huvudkomponenter för finfraktionerna.

Table 3. Moisture content, heating value and key components of the fine-particle fractions.

	Fukthalt	Aska	Effektivt värmevärde	C	O	H	N	S	Cl	Si
	(%)	(% ts)	(MJ/kg fuktigt bränsle)	(% ts)	(% ts)	(% ts)	(% ts)	(% ts)	(% ts)	(% ts)
Primärkrossat	41	44	6,7	32	18	4,3	1,1	0,4	0,5	13
Sekundärkrossat	38	36	8,3	38	19	5,0	0,6	0,7	0,5	9,8
- Lätt fraktion	37	37	8,6	37	19	4,9	0,7	0,8	0,5	10
- Tung fraktion	6,9	93	1,2	3,4	3	0,5	0,1	0,2	0,04	29
Tidigare projekt (WR 06, hammarkvarn, 100% verksamhetsavfall)	45	32	6,7	38	24	4,7	1,4	0,6	0,4	7,8

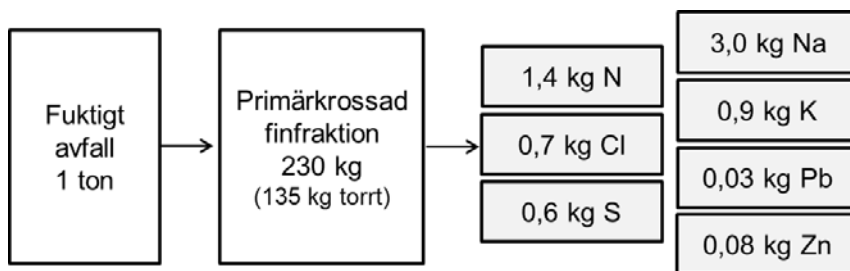


Figur 26. Oorganiska nyckelkomponenter i respektive finfraktion (massprocent av torr fraktion).

Figure 26. Inorganic key components in fine shredder fractions (mass percentage of dry matter).

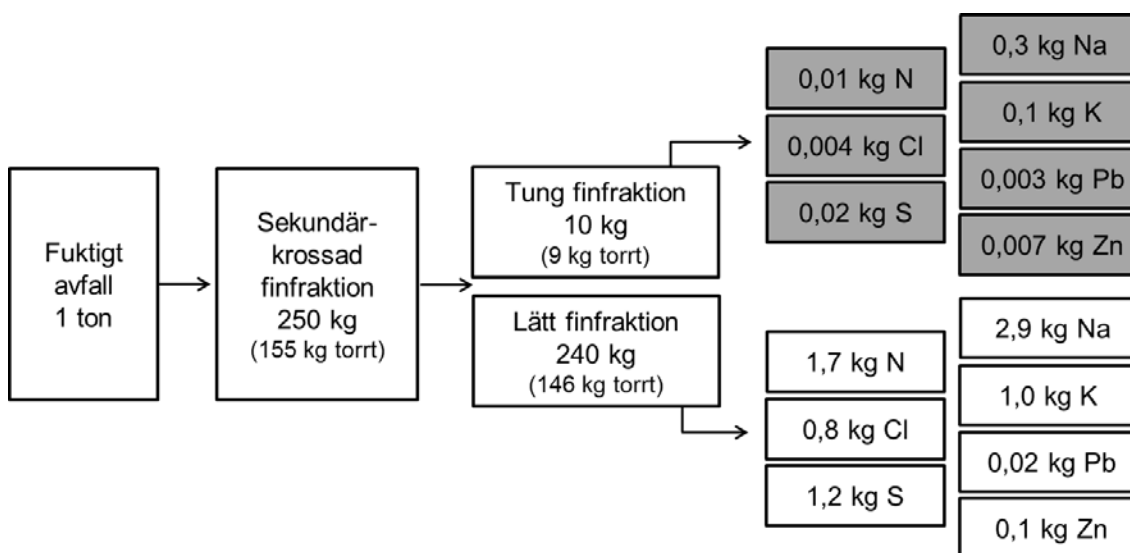
Finfraktionerna före och efter sekundärkrossning är innehållsmässigt till stora delar lika, enligt Tabell 3 och Figur 26. Jämförelse med siktresten i det tidigare projektet (WR06) [3] visar dessutom likvärdiga ämnesnivåer för de flesta komponenter. Finfraktionen före sekundärkrossning innehåller dock något mer aska och fukt än fraktionen efter sekundärkrossning, vilket även avspeglas i en lägre kolhalt och lägre värmevärde. Oorganiskt består siktfraktionerna till största delen av kisel (9-13 %; ej medtaget i figuren av skalningsskäl), kalcium (4 %), aluminium (2%) och natrium (2 %). Även de viktigaste korrosionsdrivande komponenterna (K, Na, Cl, Pb och Zn) är likvärdiga före och efter sekundärkrossning.

I Figur 27 och 28 kvantifieras några av de oorganiska nyckelkomponenterna i respektive finfraktion, utifrån att ett ton fuktigt avfallsbränsle behandlats med primärkrossning och sekundärkrossning. Flödesschemat visar hur stor mängd av respektive komponent som hamnar i finfraktionerna och som därmed genom att avskilja hela fraktionen skulle kunna separeras ut.



Figur 27. Innehåll av ett urval av oorganiska nyckelkomponenter i finfraktionen efter att 1 ton fuktigt avfall primärkrossats.

Figure 27. Content of selected inorganic key components in fine particle fraction of 1 metric ton primary shredded waste fuel.



Figur 28. Innehåll av ett urval av oorganiska nyckelkomponenter i finfraktionen efter att 1 ton fuktigt avfall sekundärkrossats.

Figure 28. Content of selected inorganic key components in fine particle fraction of 1 metric ton secondary shredded waste fuel.

5.3 Kostnader för krossning och siktning

Huvudresultaten från den ekonomiska jämförelsen av de tre alternativen för kostnader vid nyinvestering i krossning och grovsortering för utskiljning av färdigt avfallsbränsle efter primärkrossning är att:

Krossfall 1) som representerar ett traditionellt kvarnsystem med primärkross och sekundärkross har en uppskattad kostnad för förbehandling av avfallsbränsle om cirka 90-104 SEK/ton (känslighetsanalys: 97 ± 7).

Krossfall 2) som representerar ett system med neddimensionerad sekundärkross, i och med utsiktning av färdigt bränsle efter primärkross, har en uppskattad motsvarande kostnad om cirka 89-103 SEK/ton (känslighetsanalys: 96 ± 7).

Krossfall 3) som representerar ett alternativt system med utsiktning av färdigt bränsle efter primärkross följt av normalstor sekundärkross vid lägre driftbelastning, bedöms få en kostnad om 90 - 104SEK/ton (känslighetsanalys: 97 ± 7).

Kostnaderna uppdelat i de ekonomiska delposterna kapitalkostnad, elförbrukning, underhållskostnad och övriga kostnader presenteras i Tabell 4.

Tabell 4. Kapitalkostnad, elförbrukning, underhållskostnader samt övriga kostnader för de olika undersökta krossnings- och grovsorteringsalternativen.

Table 4. Capital costs, electricity costs, maintenance costs and other costs for the investigated cases of shredding and sieving.

Kostnader (SEK/ton)	Krossfall 1	Krossfall 2	Krossfall 3
Kapitalkostnad	14,6	17,7	18,5
Elförbrukning	9,1	8,7	8,7
UH	28	24	24
Personal	45	46	46
Totalt	97	96	97

Krossfall 3, men med enbart nedgång i drift i existerande sekundärkross, samt nyinvestering av enbart grovsorterare med kringutrustning, bedöms inte orsaka någon marginalkostnad. De ekonomiska beräkningarna visar att investeringen i behövlig grovsikt och kringutrustning medför en kapitalkostnad à cirka 4 kr/ton, samt ökad personalkostnad à cirka 1 kr/ton. Emellertid sparas 4,50 kr/ton i minskat krossunderhåll och 0,50 kr/ton i minskad elförbrukning i sekundärkross.

Merkostnader för vindsiktning av grovfraktion respektive finfraktion beräknas uppgå till cirka 5,3 respektive 5,1 SEK/ton (baserat på det totala bränsleflödet). Kostnaderna uppdelat i kapitalkostnad, elförbrukning, underhållskostnad, merkostnad för deponi samt övriga kostnader presenteras i Tabell 5. I kostnaderna för vindsiktning av finfraktion ingår merkostnad för utsiktning av en tredje fraktion – finfraktionen – i grovsorteringen. Deponikostnad utgörs av skillnad mellan deponikostnad för siktrest och motsvarande mängd aska.

Tabell 5. Kapitalkostnad, elförbrukning, underhållskostnader samt övriga kostnader för vindsiktning av grovfraktion och finfraktion, baserat på det totala bränsleflödet.

Table 5. Capital costs, electricity costs, maintenance costs and other costs for wind screening of coarse fuel fraction and fine fuel fraction, based on total waste fuel flow.

Kostnader (SEK/ton)	Vindsiktning av grovfraktion	Vindsiktning av finfraktion
Kapitalkostnad	1,0	1,3
Elförbrukning	0,3	0,3
UH	0,6	0,7
Merkostnad deponi	3,3	2,7
Personal	0,1	0,1
Totalt	5,3	5,1

6 Resultatanalys

6.1 Utsiktning av färdigt bränsle efter primärkrossning

Grovsiktningen av primärkrossat avfallsbränsle, Figur 18, indikerar att cirka 50 % av bränslet (25 % bränslefraktion och 25 % finfraktion) skulle kunna separeras ut som färdig bränslefraktion redan efter primärkrossning. Detta efter att rådatan justerats med resultaten från labbsiktning av respektive fraktion. Figur 19 visar dessutom att sekundärkrossningen inte har någon betydande effektivitet beträffande andelen producerad bränslefraktion. I utvägningen av fraktionerna sågs visserligen en ökning från 49 till 56 % bränslefraktion över sekundärsikten. Men efter justering för innehåll av fin- och grovfraktion, utifrån labbsiktning, fastställdes bränslefraktionen till 29 % och 32 % före respektive efter sekundärkrossen. Anledningen till att bränslefraktionen inte ökar mer över sekundärkrossen är troligtvis att lika stor mängd bränslefraktion som i sekundärkrossen mals ner från övergrov fraktion också övergår från bränslefraktion till finfraktion. Detta indikeras av att grovfraktionen ses minska över sekundärkrossen samtidigt som de labbjusterade mätningarna visar motsvarande ökning av finfraktionen.

Resultaten indikerar att en utseparation av bränslefraktionen och finfraktionen redan efter primärkrossning, totalt sett, skulle kunna bidra till en större andel bränslefraktion och en mindre andel finfraktion. Kostnadsberäkningarna för Krossfall 1 – 3 visar att denna förbättring i bränsle kvalitet kan åstadkommas till i princip samma bränsleförbehandlingskostnad som i referensfallet, genom att vid nyinvestering antingen dimensionera ner sekundärkrossen eller låta befintlig sekundärkross gå ner på lägre effekt. Neddimensionering av sekundärkross bedöms främst vara lämpligt vid projektering av ny anläggning eller vid utbyte av existerande kross. Vid anpassning av existerande anläggning är emellertid nedskalning av existerande sekundärkross mest lämpligt. Då görs betydande energi- och underhållsbesparingar, vilka beräknas resultera i att någon merkostnad totalt sett inte tillkommer. Dessutom skapas extra redundans i sekundärkrossningen, i och med att maxkapaciteten för krossen kvarstår. En viss osäkerhet föreligger dock i hur mycket underhållskostnader som verkligen kan sparas, då inga försök med krossning av enbart grovfraktionen genomförts. Skulle de visa sig att UH-kostnaderna inte minskar alls, tillkommer en kostnad om cirka 4,50 SEK/ton. Utöver de undersökta fallen i denna studie, är ett tänkbart tredje kross- och siktarrangemang att återföra den utsiktade grovfraktionen till primärkrossen och därmed helt kunna eliminera sekundärkrossen. Detta kräver emellertid att motsvarande kapacitet finns tillgänglig i primärkrossen, vilket inte är fallet i den studerade bränsleförbehandlingskedjan i Norrköping.

Ingen industriell siktmetod kan uppvisa perfekt separation mellan fraktionerna. Siktningen på labb visar att de olika bränslefraktionerna efter grovsiktningen innehöll en icke oansenlig mängd bränsle som inte hör hemma i respektive fraktion. Framför allt visade sig bränslefraktionen innehålla finfraktion och grovfraktion. I det primärkrossade bränslet var det främst grovfraktion som följde med bränslefraktionen, medan det i det sekundärkrossade bränslet även fanns en del finfraktion. En starkt bidragande orsak till den lägre siktningseffektiviteten är troligtvis att sikten matades satsvis med hjullastare. Ett jämnt flöde var svårt att uppnå, vilket ledde till att sikten omväxlande blev över- och underbelastad. Den stora andelen grovfraktion i bränslefraktionen kan även ha orsakats av att avståndet mellan det

övre siktplanetets fingrar var något för stort. Detta är dock något som kan justeras i förarbetet med projektering av en eventuell stationär sikt. I och med att alla fraktioner, förutom den tunga grovfraktionen, kontrollsiktades på labb kunde den viktmässiga fördelningen mellan de olika fraktionerna ändå justeras i efterhand. Därmed erhöles korrekta flöden för de olika fraktionerna. Detaljerade kemiska analyser har i projektet dessutom uteslutande gjorts på finfraktionerna. Eftersom labbsiktningen visade att kontamineringen av finfraktionen från övriga fraktioner var begränsad, görs bedömningen att avvikelserna i siktning inte signifikant påverkat kvaliteten hos analysen av nyckelkomponenter i finfraktionerna. Siktningensresultaten understryker emellertid vikten av jämn matning samt noggrann injustering av en stationär siktningensanordning med siktanalyser som understöd.

6.2 Utsiktning tunga fraktioner och finfraktioner

6.2.1 Tunga fraktioner

Tunga fraktioner som med vindsiktning kunde skiljas ut ur grovfraktion efter primärkrossning och tung finfraktion efter sekundärkrossning är jämförbara till storlek. Tillsammans skulle de i anläggningen i Norrköping kunna minska askflödet med cirka 20 kg per inmatat ton fuktigt avfall – cirka 11 kg via den tunga grovfraktionen och cirka 9 kg via den tunga finfraktionen. Detta bedöms motsvara cirka 2 % av det totala bränsleflödet eller 18 % av det totala askflödet (tung grovfraktion 10 %, tung finfraktion 8 %), vid ett totalt askflöde om 110 kg/ton avfall (se antaganden i Kap 5.2.1).

De tunga, askrika bränslefraktionerna måste innehålla mindre än 10 % (volym) brännbart för att överhuvud taget kunna deponeras [13]. Om avfallet dessutom klassas som icke-farligt, kan deponering ske på deponi för icke-farligt avfall utan att vidare analyser görs [14]. Om siktresterna istället skulle klassas som farligt avfall och TOC-halten understiger 6 % [14], kan det läggas på deponi för farligt avfall. Vidare finns möjligheten att deponera siktrest som klassificeras som farligt avfall på deponi för icke-farligt avfall. Då ska siktresten vara stabil, icke-reaktiv och ha lägre TOC-halt än 5 % [14]. Den tunga finfraktionen efter sekundärkrossning visade sig hålla en TOC-halt av $4,0 \pm 1,7$ %. Detta, tillsammans med okulär besiktning, resulterar i att siktresten torde hålla lägre TOC-halt än 10 % (volym). Därmed är det troligt att den kan läggas på deponi för icke-farligt avfall, såvida klassning som icke-farligt avfall kan göras. Om siktresten skulle klassas som farligt avfall, bör dock siktresten ändå kunna läggas på deponi för farligt avfall. För avsättning som stabilt, icke-reaktivt farligt avfall på deponi för vanligt avfall ligger TOC-halten emellertid på gränsvärdet. Sammanfattningsvis kan konstateras att med avseende på TOC-innehåll så finns goda förutsättningar för att finfraktionens tunga del av skulle kunna deponeras. Emellertid måste utredas huruvida denna siktrest är att betrakta som farligt avfall eller ej, för att närmare avgöra hur deponeringen kan ske.

Den tunga grovfraktionen efter primärkrossning har för hög TOC-halt ($21 \pm 2,0$ %) för deponi, och därmed troligtvis även för hög andel brännbart. Exkluderas träinnehållet hamnar emellertid TOC-halten betydligt närmare gränsen för deponering (10 ± 2 %). Under försöksperioden optimerades dock siktningen enbart med avseende på luftflödet. Därför görs bedömningen att det finns goda möjligheter att optimera vindsiktningen av övergrov material ytterligare. Vid fortsatta försök bör även spaltbredden varieras, så att en bättre separation av stora bitar av hög densitet (exempelvis sten och betong) och stora bränslebi-

tar med något lägre densitet (exempelvis trä, plast och gummi) kan åstadkommas. Det kan eventuellt även bli nödvändigt att ta till ytterligare densitetsseparerande metoder för att kunna komma ner under gränsvärdet för deponi. Om en TOC-halt under 10 % (volym) kan uppnås med dessa medel, måste även för denna siktrest utredas för om den klassas som vanligt eller farligt avfall, för att slutligen avgöra hur den kan avsättas.

Om de tunga fraktionerna klassas som farligt avfall måste sätta kriterier för lakbarhet uppfyllas för att siktresten ska få läggas på deponi [14]. Några analyser för att göra en sådan bedömning har inte rymts inom detta projekt och har ej heller gjorts i de tidigare WR-projekten [3][8]. Detta bör därför adresseras i kommande studier, för att en slutlig bedömning ska kunna göras av vilka krav som ställs på de tunga siktresterna och hur de kan avsättas.

Deponi av tunga siktrest, även om de håller tillräckligt låg TOC-halt, medför kostnader. Den ekonomiska kalkylen för vindsiktningen, Tabell 5, visar att deponikostnaden bedöms bli den dominerande posten i totalkostnaden. Därmed görs bedömningen att utsiktning av tung finfraktion, enbart i syfte att minska kostnader för askdeponi, inte är fördelaktigt. I och med detta, ligger den eventuella potentialen i utskiljning av inert material helt i minskat slitage och korrosion i transportörer respektive anläggning. Ett försök till att kvalitativt bedöma dessa besparingspotentialer har gjorts inom projektgruppen. Besparingspotentialen bedöms av medverkande anläggningsägare och maskintillverkare främst ligga i sekundärkrossen. Om tung grovfraktion kan sorteras ut, undviks att stora inerta bitar processas i sekundärkrossen, varvid underhållskostnaderna bedöms kunna minskas. Kvantifiering av potentialen är emellertid svårgjord. Även minskat slitage i bränsletransportsystem samt minskad överhettarkorrosion vid utsortering av tung finfraktion, bedöms kunna föreligga. Men en generell kvantifiering anses vanskelig, samt till stor del vara beroende av dimensionering, fabrikat och FB-anläggningens utformning. Därmed blir denna uppskattning för anläggningsspecifik för att uttala sig om. Avnämna kan emellertid med fördel använda sig av de uppskattade vindsiktningens kostnaderna i Tabell 5 för att självständigt bedöma värdet av en investering i sin anläggning.

6.2.2 Sammansättning av finfraktioner

Den oorganiska sammansättningen hos finfraktionerna efter primärkrossning respektive sekundärkrossning är likvärdiga, se Figur 26. Detta indikerar att det inte spelar någon betydande roll om finfraktionen sikts ut före eller efter sekundärkross, med avseende på dess sammansättning. I Tabell 6 visas för utvalda nyckelkomponenter hur stor utskiljningsgrad som skulle kunna uppnås vid separation av finfraktioner – det vill säga hur stor andel av flödet med det ingående bränslet som skulle kunna skiljas ut för respektive komponent. I bedömningen har sammansättningen för det ingående bränslet uppskattats utifrån tidigare ingående analyser vid Händelöverket av avfallsbränsle [12].

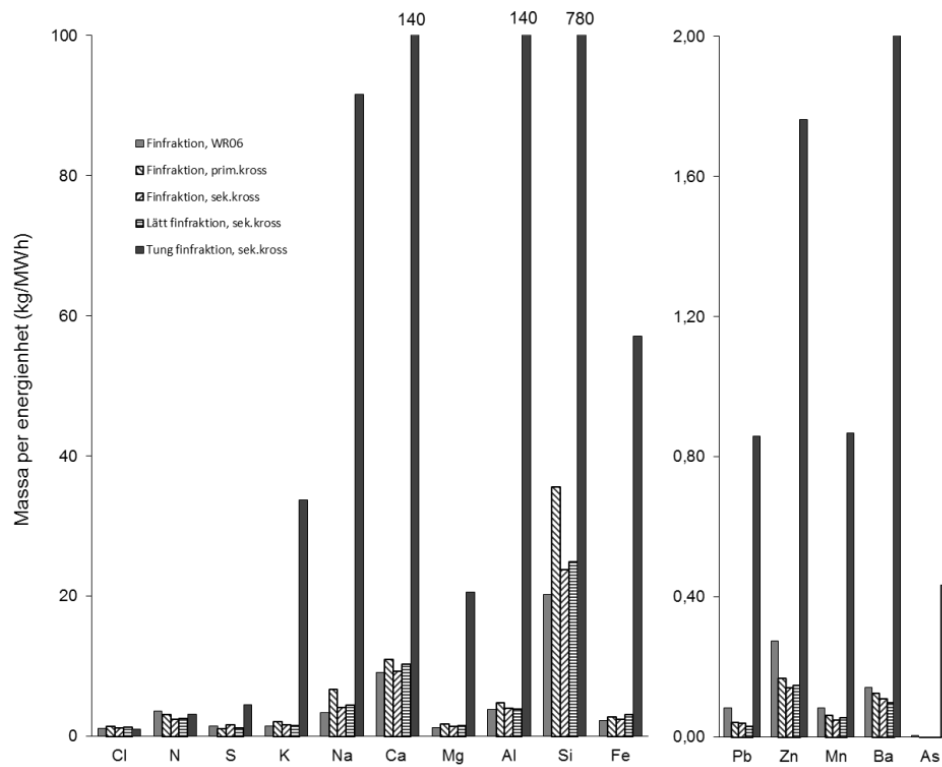
Tabell 6. Utskiljningsgrad med finfraktion (av andel i totala bränslet) för oorganiska komponenter.

Table 6. Separation efficiency by separation of fine shredder fraction (of total amount in fuel) for inorganic elements.

	Utskiljningsgrad med finfraktion (av andel i totala bränslet)								
	Na	Ka	Pb	Zn	Si	Al	Fe	Mg	Cl
Primärsiktning	60 %	35 %	90 %	30 %	75 %	40 %	50 %	55 %	20 %
Sekundärsiktning	50 %	45 %	80 %	30 %	65 %	40 %	50 %	55 %	20 %
- Tung fraktion	6 %	4 %	10 %	2 %	10 %	7 %	7 %	5 %	< 1 %

Utskiljningsgraderna bekräftar att effektiviteten i separationen av nyckelkomponenter i princip är oberoende av om det görs med finfraktionen före eller efter sekundärkrossning. Emellertid har i tidigare projekt [3] setts att den totala finfraktionen innehåller för mycket TOC för att kunna avsättas, vilket även bekräftas i detta projekt. Vindsiktad, tung finfraktion material, däremot, håller gränsvärdet för deponering, med avseende på TOC, men gör att endast en liten del av det totala flödet för respektive komponent till slut kan utskiljas. Störst är effektiviteten för metaller. För klor och svavel är utskiljningsgraden mycket låg.

Energimässigt kan konstateras, att finfraktionen bör sorteras ut efter primärkrossen, snarare än efter sekundärkrossen. Mindre energi i form av brännbart material följer då med finfraktionen, vilket även torde bidra till att den tunga finfraktionen kan skiljas ut med högre renhet. Fördelen med att skilja ut finfraktionen redan efter primärkrossen tydliggörs genom att betrakta innehållet av nyckelkomponenterna på energibasis (per MWh), vilket kan göras i Figur 29. Ett högt värde indikerar att ett specifikt ämne till låg bränsleförbrukning skulle kunna separeras ur flödet, och vice versa. I Figur 29 ses att energieffektiviteten konsekvent är högre för finfraktionen efter primärkrossning än efter sekundärkrossning. Vidare ses även tydligt att energieffektiviteten för utskiljning av tung finfraktion är mycket hög. Den tunga finfraktionen innehåller i princip enbart inerta ämnen (93 %) och mycket lite kol (3 %), vilket gör att i princip inget organiskt, brännbart följer med.



Figur 29. Organiska nyckelkomponenter i respektive finfraktion på energibasis ($\text{kg/MWh}_{\text{torrt}}$).

Figure 29. Inorganic key components in fine particle fractions, presented on energy basis ($\text{kg/MWh}_{\text{torrt}}$).

7 Slutsatser

Resultaten från projektet visar att:

- 50 % av bränsleströmmen efter primärkrossning – hälften bränslefraktion och hälften finfraktion – kan direkt by-passas som färdigt bränsle till FB-förbränning. Dessutom tyder resultaten på att den totala mängden finfraktion skulle minska i och med att den färdiga bränslefraktionen inte utsätts för ytterligare krossning. Minskningen av bränsleströmmen medför möjlighet till investering i mindre sekundärkross, alternativt drift att normalstor kross på lägre varvtal. Specifik kostnad för bränsleförbehandlingen, vid nyinvestering av båda alternativen, bedöms bli jämförbar med referensfallet bestående av förbehandling i primär- och sekundärkross utan siktning (ca 90-105 SEK/ton avfall). Vid anpassning av redan existerande sekundärkross till lägre varvtal och flöde, bedöms ingen marginalkostnad tillkomma. Kostnader för investeringar och drift av siktning vägs upp av besparingar i form av minskad elförbrukning och slitage.
- Vindsiktad, tung finfraktion bedöms ha tillräckligt låg TOC-halt och andel brännbart för att kunna deponeras. Dessutom finns ytterligare optimeringsutrymme för vindsiktningen, vilket möjligen kan sänka halterna ytterligare. Emellertid måste det fastställas om fraktionen klassas som farligt avfall eller inte, för att val av deponi ska kunna göras. Om siktresten klassas som farligt avfall måste även lakbarheten utredas för att det ska kunna avgöras huruvida lakresten kan deponeras eller ej. Separationen av finfraktion för utsiktning av tung finfraktion bör ske efter primärkrossning, där finfraktionen har högre koncentration av inert material och lägre koncentration av organiskt material än efter sekundärkrossning. Utseparationen förväntas bidra till cirka 8 % lägre askflöde, till största delen bestående av inerta bitar, vilket torde bidra till mindre slitage i bränslematningssystem. Potentiella besparingar i askdeponi bedöms vägas upp av kostnader för deponi av siktresten. Merkostnaden för vindsiktning av finfraktion bedöms uppgå till cirka 2,50 SEK per ton totalt förbehandlat avfall.
- Vindsiktad, tung grovfraktion hade i försöken för hög TOC-halt, och därmed troligtvis även för hög andel brännbart, för att kunna deponeras. Emellertid ses möjligheter att kunna få ner halterna neremot gränsvärdena om övergrova träbitar effektivare kan undvikas att följa med inertfraktionen. Det kan emellertid inte uteslutas att ytterligare densitetsseparerande metoder måste till för att få ner TOC-andelen och halten brännbart under tillåtna gränsvärden. Om halten brännbart kan fås ner under det allmänna gränsvärdet (10 %-vol) är det tänkbart att cirka 9 % av det totala askflödet kunna elimineras. För att komma fram till lämpligt deponival, behövs även för denna fraktion utredas om den är att betrakta som icke-farligt eller farligt avfall. Om siktresten kan separeras ut torde minskat slitage, främst på sekundärkross, kunna åstadkommas. Emellertid vägs även här potentiella besparingar i kostnader för askdeponi upp av tillkommande kostnader för deponi av siktresten. Merkostnaden för vindsiktning av grovfraktion uppskattas till cirka 2,10 SEK per ton totalt förbehandlat avfall.

8 Rekommendationer och användning

Grovsiktning bör vid nyprojektering av bränsleförbehandling introduceras efter primärkrossning. Bränslefraktionen (25 %) och finfraktionen (25 %) kan då ledas direkt till pannan. Detta maximerar andelen bränslefraktion och minskar andelen finfraktion, i och med att dessa fraktioner inte krossas ytterligare. Den specifika kostnaden (SEK/kg bränsle) bedöms inte öka jämfört med normalfallet två seriella krossar, i och med att sekundärkrossen antingen kan dimensioneras ner eller köras på dellast. Vid introduktion av grovsiktning i existerande bränsleförbehandlingsanläggning kombinerat med sekundärkross på dellast, bedöms heller ingen merkostnad tillkomma. Här finns emellertid en viss osäkerhet i hur stor minskningen i UH-kostnader förväntas bli – maximal merkostnad beräknas bli 4,50 SEK/ton. Denna kostnad bör sättas i relation till vilket värde den resulterande förbättringen av bränslekvalitet bedöms ha för respektive anläggning.

Det eventuella värdet i utsortering av tung finfraktion genom vindsiktning ligger till största delen i potentiella minskningar i slitage i bränslehanteringssystem och korrosion i FB-anläggningen. Någon kvantifiering av detta har inte kunnat genomföras i projektet, till stor del på grund av dess svårhet att bedöma samt att det till viss del kan vara beroende av systemens utformning och fabrikat. För att kunna bedöma eventuella vinster i vindsiktningen rekommenderas att långtidsförsök utförs, där även eventuella positiva effekter för panndrift undersöks mer noggrant. Här kan tänkas att utseparation av siktrestens innehåll av metaller medför en positiv inverkan på drift och underhåll. Detta arbete bedöms vara relativt krävande, i och med att både bränslet och driften måste dokumenteras under en längre tid. Därmed anses uppgiften vara lämplig som ett doktorandprojekt. I detta projekt bör då även fastställas om siktresten är ett farligt avfall. I och med detta kan val av deponi fastställas. Om siktresten är ett farligt avfall bör även lakbarheten studeras, för att undersöka om den kan deponeras. Om siktresten inte är ett farligt avfall, behövs lakbarheten emellertid inte undersökas för att avgöra om siktresten kan läggas på deponi.

Utsortering av tung övergrov fraktion efter primärsiktning bedöms främst kunna minska slitage på sekundärkross. Övergrova inerta bitar kan även orsaka problem i bränslehanteringssystem, men detta bedöms till stor del vara anläggningsberoende och därför svårt att kvantifiera. Här bör respektive förbränningsanläggning själv bedöma värdet av minskningen av tung övergrov fraktion. Den tunga fraktionen kan, såsom vindsiktningen utfördes i detta projekt, emellertid inte avsättas för deponi. Detta eftersom TOC-halten var cirka 20 %, vilket troligtvis innebär att halten av brännbart material överstiger gränsvärdet 10 volymsprocent. Vindsiktningen kan dock troligen optimeras ytterligare, bland annat genom att få bort stora träbitar, så att TOC-halten kan understiga gränsvärdet. Detta rekommenderas undersökas närmare i vidare studier, förslagsvis i ovan föreslagna doktorandprojekt.

9 Litteraturreferenser

- [1] Koornneef J., Jungunger M., Faaij A. Development of fluidized bed combustion – An overview of trends, performance and cost. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007:33(1):19-55.
- [2] Sudhakat R, Kolar AK. Experimental investigation of the effect of initial fuel particle shape, size and bed temperature on devolatilization of single wood particle in a hot fluidized bed. *Journal of analytical and applied pyrolysis* 2011:92:239-249
- [3] Johansson A., Johnsson A., Yoshiguchi H, Steenari B-M., Boström S., Fredäng J., Bisaiillon M., Andersson H., Siktning av avfall, Slutrapport, Waste refinery projektnummer WR-06, Borås
- [4] Karlsson, A., Möller, P.J., Johansen, V.; “Iron steel corrosion in a system of O₂, SO₂ and alkali chloride. The formation of low melting point salt mixtures.” *Corrosion Science* 30 (1990) pp. 153-158.
- [5] Makkonen, P.; Artificially intelligent and adaptive methods for prediction and analysis of superheater fireside corrosion in fluidised bed boilers, PhD thesis, Lappeenranta University of Technology (1999) ISBN 951-764-375-6
- [6] Grabke, H.J., Reese, E., Spiegel, M., “The effects of chlorides, hydrogen chloride and sulfur dioxide in the oxidation of steels below deposits” *Corrosion Science* 37 (1995) pp. 1023–1043
- [7] Aho, M., Ferrer, E.; “Importance of coal ash composition in protecting the boiler against chlorine deposition during combustion of chlorine-rich biomass” *Fuel* 84 (2004) pp. 201-212.
- [8] Niklasson F., Avsättning av siktrest från förbehandling av brännbart avfall, Slutrapport, Waste refinery projektnummer WR-42, 2011, Borås
- [9] Caputo, A.C., Pelagagge, P.M. RDF production plants: I Design and costs, *Applied Thermal Engineering* 22 (4), 2002, 423-437
- [10] Hermansson, S., Victorén, A., Niklasson, F., Jones, F. Förbehandling av avfallsbränsle för fluidbäddpannor med långsamtgående kross och siktning, Slutrapport, Waste refinery projektnummer WR-06, Borås, 2013

- [11] Wikström-Blomqvist, E., Franke, J., Johansson, I. Karaktärisering av fasta inhomogen avfallsbränslen – inverkan av metoder för provtagning och provberedning, Värmeforskrapport 1036, VÄRMEFORSK Service AB, Stockholm, 2007.
- [12] Blomqvist, E., Jones, F. Bestämning av andel fossilt kol i avfall som förbränns i Sverige, RAPPORT U2012:02, Avfall Sverige, 2012, ISSN 1103-4092
- [13] Naturvårdsverkets föreskrifter och allmänna råd om hantering av brännbart avfall och organiskt avfall, NFS2004:4
- [14] Naturvårdsverkets föreskrifter om deponering, kriterier och förfarande för mottagning av avfall vid anläggningar för deponering av avfall, NFS2004:10



WASTE REFINERY

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Box 857, 501 15 Borås
wasterefinery@sp.se
www.wasterefinery.se