



Miljø- og Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Optimering af slaggesortering med henblik på større udvinding af metaller

Miljøprojekt nr. 1844, 2016

Titel:

Optimering af slaggesortering med henblik på større udvinding af metaller (revideret udgave)

Redaktion:

Jakob Top, Meldgaard Holding A/S
Lasse Meldgaard, Meldgaard Recycling A/S
Britt Rerup, Meldgaard Recycling A/S
Lars Jensen, Meldgaard Recycling A/S

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

Foto:

Anders Hedegaard, Meldgaard Recycling A/S
& diverse kilder

Illustrationer:

Carsten Petersen, SB Engineering ApS
& diverse kilder

År:

2016

ISBN nr.

978-87-93435-58-2

Ansvarsfraskrivelse:

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

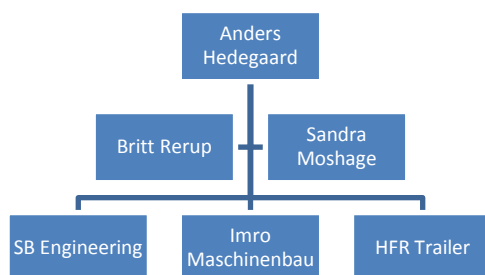
Forord	4
Sammenfatning	5
Summary	6
1. Indledning	7
1.1 Baggrund	7
1.2 Formål	9
2. Baggrund, analyse og design	10
2.1 Slagge som råvare	10
2.1.1 Sammensætning og struktur	11
2.1.2 Måleresultater og metalindhold	14
2.2 Fastlæggelse af kravspecifikationer til nye sigtemetoder, magneter og øvrige maskinkomponenter	16
2.3 Design og tegningsudarbejdelse af nyt sorteringsanlæg	18
2.3.1 Designprocessen	18
2.3.2 Valg af magneter til separering	19
2.3.3 Valg af egnede sigtetyper	21
2.3.4 Valg af øvrige maskinkomponenter	22
2.3.5 Designresultat	24
2.3.6 Underleverandører af delkomponenter	25
3. Indkøb og konstruktion	26
3.1 Indkøb, samling af delkomponenter og produktion af anlæg	26
3.2 Tilpasning af design	27
4. Testkørsel	30
4.1 Opstilling af anlæg	30
4.2 Gennemførsel og resultat af prøvekørsler	32
4.2.1 Behov for redesign af anlæg	33
4.2.2 Godkendelse af anlæg på basis af testforsøg	35
5. Projektets resultater	38
5.1 Formidling af testresultater – herunder optimering af produktionsprocessen	39
6. Konklusion	40
7. Referencer	41

Forord

Formålet med projektet har været at udvikle et slaggesorteringsanlæg, der kan oparbejde finfraktionen på 0-8 mm og øge udvindingen af ikke-magnetiske metaller (deles typisk op i ”Heavyies” (Au, Ag, Cu & Zn) og aluminium) fra slagge fra affaldsforbrænding. Projektet har ikke fokus på udvinding af jern fra slaggen, da dette fungerer tilfredsstillende. Projektet har strakt sig over 13 måneder, hvor vi har udviklet, tegnet, konstrueret og til sidst afprøvet et helt nyt anlæg. Projektet er delvist finansieret af midler fra Miljøstyrelsens ”Program for grøn teknologi 2013”. Hele processen er gennemført i samarbejde med vore underleverandører:

- SB Engineering ApS, Adelvej 4. 6823 Ansager. Søren Brorsbøl
- Imro Maschinenbau GmbH, Arbeiterheimstrasse 46, A-4663 Laakirchen. Hr. Bellmann.
- HFR Trailer ApS, Jens Terp-Nielsens Vej 11, 6230 Rødekro. Ulrik Frederiksen.

Projektet er styret af en projektgruppe med 3 Meldgaard-repræsentanter (se herunder) samt specialkonsulent Jørgen G. Hansen fra Miljøstyrelsen (indtil udgangen af 2014) og civilingeniør Thilde Fruergaard Astrup fra Miljøstyrelsen (fra 2015).



Projektet har været delt op i 5 arbejdsplaner, hvoraf den ene var projektstyring og de øvrige 4 var en faseopdeling af den praktiske gennemførelse af projektet.

Sammenfatning

Denne rapport omhandler et projekt i Meldgaard Recycling A/S vedrørende udvikling af et nyt sorteringsanlæg, der kan frasortere den fine fraktion af affaldsforbrændingsslagger og derefter udtage ikke magnetiske metaller fra denne (især Al, Cu, Ag, Au og Zn). Målet med projektet har dermed været at øge udsorteringsprocenten fra slaggen, så mere af slaggens metalindhold kan genanvendes.

Projektet har bygget på den knowhow, som allerede fandtes i virksomheden efter mange års udviklingsarbejde, men der er opnået ny viden om sortering af helt fine partikler på under 8 mm samt om sammensætning af nyeste teknologier og komponenter.

Projektperioden har strakt sig over 13 måneder, hvor vi har udviklet, tegnet, konstrueret og til sidst afprøvet et helt nyt anlæg.

Projektet har været delt op i 5 arbejdspakker, hvoraf den ene var projektstyring og de øvrige 4 var en faseopdeling af den praktiske gennemførelse af projektet. De praktiske elementer af projektet gennemgås i rapporten, hvor de opståede udfordringer undervejs også behandles.

Projektet har været en succes for Meldgaard, forstået på den måde, at det er lykkedes at konstruere et anlæg, der kan øge andelen af frasorteret ikke magnetisk metal (især Al, Cu, Ag, Au og Zn) ved sortering af slaggefraktionen under 8 mm. Dermed bliver der udtaget mere metal, og også metaller som Al og Cu, som ikke er blevet udtaget før - til fordel for miljøet ved genanvendelse via omsmeltning i stedet for minedrift og driftsøkonomien ved sortering af slagge.

Projektet har dog også haft en række udfordringer dels under designfasen og under testfasen som beskrives i rapporten. Et andet problem har været, at den ene nye metalfraktion (under 3 mm) har været af en kvalitet som hidtil ikke har kunnet afsættes. Nyeste viden viser dog heldigvis potentielle muligheder for brug af denne fraktion også.

Summary

This report describes a project in Meldgaard Recycling A/S about the development of a new mobile machine for screening of WtE ash (from waste incinerators) that can sort out the fine fraction of WtE ash and then remove non-magnetic metals (eg. Al, Cu, Ag, Au and Zn) of this. The goal of the project was to increase the screening so we extract more metals from the <8 mm-fraction.

The project has built on the know-how already present in the company after years of development, but new knowledge has been gained about the sort of very fine particles of less than 8 mm and the composition of the latest technologies and components.

The project has spanned over more than 13 months in which we have developed, designed, built and eventually tested a new machine.

The project has been divided into five work packages, one of which was the project management and the other four were a phase separation of the practical implementation of the project. The practical elements of the project are described in the report, where the encountered challenges along the way are also treated.

The project has been a success for Meldgaard, in the sense that it was possible to construct a screening machine that can increase the percentage of non-magnetic metal (e.g. Al, Cu, Ag, Au and Ni) screened out from the bottom ash by sorting bottom ash <8 mm. Thus, more metal has been sorted out, also metals which have not been sorted out before (e.g. Al, Cu, Ag, Au and Zn) - for the benefit of the environment because of recycling of metals instead of mining and for the benefit of the operating economy.

The project has also had a number of challenges during the design phase and during the test phase as described in the report. Another problem has been that smallest of the new metal fractions (<3 mm) was of a quality which until now remains unsold/useless. But latest information fortunately shows potential opportunities for the use of this fraction, also.

1. Indledning

1.1 Baggrund

Baggrunden for projektet har været et ønske om at udvikle et sorteringsanlæg, der kan sortere mere metal ud af slagge, et restprodukt fra affaldsforbrænding. Ved affaldsforbrænding opstår der primært 3 restprodukter: flyveaske (udtages ved røggasrensning), et gipslignende restprodukt med et højt indhold af kalk (opstår under røggasrensningen) og slagge, som er den del af affaldet, der ikke er omsat ved forbrændingen.

Slagge er fyldt med værdifulde ressourcer i form af forskellige metaller som jern og aluminium, som kan udvindes og genanvendes, og Meldgaard Recycling A/S har i en årrække udviklet og anvendt maskiner til dette formål med stor succes.

I de første mange år, hvor man i Danmark forbrændte husholdningsaffald for at udnytte affaldet energiindhold til energiproduktion, havde man ingen egnet anvendelse af slagge-restprodukter, som typisk udgør cirka 20 % af den indfyrede affaldsmængde (kilde: www.affald.dk). Siden startfirserne har man i Danmark dog søgt at udnytte slaggen ved at fraktionere den op i en jernfraktion og en restfraktion – et felt hvor Meldgaard Recycling har været førende siden 2004. Jernfraktionen er typisk blevet solgt til genanvendelse i form af omsmeltning til nyt jern, mens en stor del af restfraktionen er anvendt ved byggeprojekter, f.eks. vejbyggeri og kun en meget lille del er blevet deponeret.

Fraktionering af slagge sker typisk ved en separationsproces igennem grove sigteanlæg, hvor jern og metal og andre elementer over 8 mm fraktioneres fra, så restslaggen kan anvendes til f.eks. vejbyggeri.

Da Danmark igennem årene har været førende i verden på affaldsforbrændingsanlæg, har det også været naturligt, at der i Danmark er opstået behov for viden om efterhåndtering af restprodukterne.

Meldgaard Recycling A/S har i en årrække designet og udviklet sorteringsanlæg til slagge, og har opnået en stor knowhow på området. Vi sorterer årligt 550.000 tons slagge i Danmark. Typisk bliver jern fra slaggen solgt videre til metalmellemhandlere (f.eks. Stena) eller solgt direkte til støberier. Jernfraktionen anvendes typisk i støberier som tilsætning til produktion af nye jernemner, hvor "slagge-jernet" erstatter nyt jern, og dermed indgår i en værdifuld genanvendelsescyklus.

Metalfraktionen er hidtil blevet afsat til genanvendelsesvirksomheder, der har specialiseret sig i at rense og fraktionere blandede metalfraktioner i første omgang i aluminium og øvrige "ikke-jernholdige"-metaller, som "slagge-metallerne" udgør. Efter rensning og fraktionering af metallerne indgår i de genanvendelsescyklusser på samme måde som jernet.

Hele udgangspunktet for udviklingen af anlægget omfattet af dette projekt har været, at anlægget skulle kunne anvendes i forbindelse med og samtidig med Meldgaards klassiske sorteringsanlæg, se figur 1 i afsnit 2.1.1.. Dette anlæg sorterer slaggen i følgende fraktioner:

- Overfraktion slagge >50 mm
- Slagge (0-50 mm)
- Groft jern >50 mm

- Groft ikke-magnetisk metal >50 mm
- 3 metalfraktioner (8-16, 16-24 og 24-50 mm).
- Fin jern 5-50 mm
- Groft rustfrit stål >50 mm
- Deponiegnet restfraktion
- Brændbar restfraktion

Hidtil har Meldgaards sorteringsanlæg udsorteret 2 jernfraktioner (5-50 mm og >50 mm) samt 3 metalfraktioner (8-16 mm, 16-24 og 24-50 mm.).

Det har indtil nu ikke været praksis hos Meldgaard Recycling eller i resten af branchen at forsøge at trække metalfraktionen ud af slaggen under 8 mm, da det har været anset for ikke-rentabelt, men analyser (se afsnit 2.1.2) viser, at metalniveauet i slaggen 0-8 mm er på et attraktivt niveau, hvor det kan være økonomisk rentabelt at anvende mere komplekse separeringsprocesser. Analyser viser, at man kunne have en forventning om, at der findes en stor andel af metaller i denne fraktion, og særligt at der kan findes metaller som f.eks. guld, sølv og kobber. Ved at udsortere disse metaller, kan man øge den samlede udvindingsprocent.

1.2 Formål

Formålet med projektet er at udvikle et anlæg, der kan fraseparere og oparbejde finfraktionen på 0-8 mm fra forbrændingsslagge og øge udvindingen af ikke magnetiske metaller, herunder værdifulde metaller som Cu, Ag, Au, Al og Zn. Vores mål er at få 0,5 %-point flere ikke magnetiske metaller ud af slagterne i forhold til i dag. Såfremt metallerne kan afsættes til metalomsmeltning, vil det resultere i et lavere behov for at udvinde metaller fra f.eks. miner og restslagterne bliver samtidigt renere.

Frasortering af finfraktionen skal ske ved at sammensætte nyeste teknologier på området og fremstille et anlæg, der kan frasortere så stor en andel af metaller som overhovedet muligt.

Idet Meldgaard Recycling A/Ss anlæg i dag sorterer ca. 550.000 tons slagter, svarende til ca. 85 % af alle slagter i Danmark, kan der ligge et stort potentiale, hvis det kan lykkes at oparbejde en større del af slagterne. Selv om "Restprodukt-bekendtgørelsen" lige nu sætter en naturlig begrænsning for brugen, kunne der på sigt muligvis åbnes op for flere anvendelsesmuligheder. Men alene den øgede "renhed" kan potentielt øge interessen for brugen af produktet f.eks. som bundsikring under bygninger, veje osv..

Optimering af selve sorteringen af finfraktionen skal ske ved at bygge et anlæg med en forbedret sigte, som indledningsvist opdeler slagterne i to fraktioner. Dernæst anvendes nyeste teknologi inden for hvirvelstrømsmagneter til at frasortere så stor en andel af metaller som overhovedet muligt. Det særlige ved vores anlæg er, at det er mobilt, dvs. at det forholdsvis let kan flyttes rundt mellem de forskellige forbrændingsanlæg, hvormed flere små aktører kan få gavn af det, og maskinen bringes til slagterne og ikke omvendt.

Projektets mål	Succeskriterier
0,5 %-point flere ikke magnetiske metaller ud af slagterne	0,3 %-point flere ikke magnetiske metaller ud af slagterne
Den øgede udvinding af ikke magnetiske metaller udgøres primært af følgende metaller: Al, Au, Ag, Cu & Zn	Au, Ag, Cu & Zn udgør mindst 40 % af de ekstra udvundne ikke magnetiske metaller

2. Baggrund, analyse og design

2.1 Slagge som råvare

Slagge fra affaldsforbrændingsanlæg har siden startfirserne været anvendt som "råvare" og efterhånden nyttiggjort i stadig større grad som erstatning for grus/andre råmaterialer i bygge- og anlægsbranchen. I takt med at man har kunnet sortere slaggen bedre, har udnyttelsesgraden været stigende op til 95-99 %.

Siden 1983 har anvendelse af slagge været reguleret af lovgivning (oprindeligt "Bekendtgørelse nr. 568 af 6. december 1983 om anvendelse af slagge og flyveaske"), aktuelt primært ved "Bekendtgørelse nr. 1662 af 21/12/2010 om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret uforurenet bygge- og anlægsaffald" inkl. senere ændringer.

I BEK nr. 1662 er slagge opdelt i 3 kategorier:

Kategori 1

Kategori 2

Kategori 3

Kategorierne bestemmes, når den færdigsorterede slagge analyseres, for at kunne fastlægge hvilket slutformål slaggen kan have.

På grund af de store mængder slagge, der anvendes i Danmark, har der igennem årene primært været fokus på at oparbejde slagge til et slutprodukt, der var egnet til nyttiggørelse i f.eks. vejbyggeri og i mindre grad fokus på at betragte slaggen som en råvare til metaludvinding.

Den fortsatte teknologiske udvikling indenfor separationsprocesser, det øgede kendskab til metalindholdet i slagge samt ikke mindst den øgede fokus på at spare på jordens ressourcer har nu ændret billedet.

2.1.1 Sammensætning og struktur

I Danmark generes der slagge fra forbrænding af husholdningsaffald på 27 kommunale/fælleskommunale affaldsforbrændingsanlæg. Cirka 20 % af affaldet, der sendes til forbrænding ender som slagge. Mængden af slagge varierer naturligvis efter affaldssammensætningen og dermed den foregående affaldssortering.

Slaggesammensætning:

Den rå slagge er meget grov og forskelligartet, idet der findes store tunge elementer (sten, jern osv.), men også en meget stor mængde af mindre partikler, der kan være helt ned til en kornstørrelse på under 1 mm. Op til 60 % af slaggemassen har en kornstørrelse på <8 mm, og netop derfor er denne fraktion interessant at sortere yderligere.

Slagger er typisk sammensat af disse fraktioner:

- Aske, primært på mineralsk form (sand/jord lignende)
- porcelænsrester
- glas- og flaskerester
- jern- og metalemner.
- større organiske rester – som f.eks. rester af større træstubbe/træemner.

Meldgaard Recycling har ingen data på fordelingen af de forskellige fraktioner, men oplever ofte, at f.eks. indholdet af store organiske rester varierer alt efter, hvilket anlæg slaggen er produceret på. De større organiske rester frasorteres og sendes enten på deponi eller retur til forbrændingsanlæg.

I Danmark brænder vi omkring 3 millioner ton affald om året, og det bliver dermed til mere end 0,5 million ton slagge.

Cirka 5-10 % af slaggen er jernskrot, hvor en stor del i dag allerede frasorteres og genanvendes.

Slaggestruktur:

De forskellige elementer af slagger har naturligvis forskellig struktur, alt efter oprindelig form og graden af forbrændingseffekt på emnet.

Slagge modnes under opbevaringen på sorteringspladserne i perioder på uger til måneder inden man påbegynder en sortering. Derfor er slaggens struktur ofte påvirket af vejrlig, da vandindholdet, kan variere en del alt efter nedbørsmængder og slaggens henlæggelsestid.

Fugtigheden er desuden en egenskab med modsætningsfyldte effekter, idet en fugtig slagge er sværere at sortere, mens en tør slagge kan give store støvgener. Derfor søger man aktivt at opnå en passende fugtighedsgrad i slaggen.

Aske:

Aske optræder på partikel-/pulverform i varierende partikelstørrelse. Ofte er asken sammenklumpet til større klumper pga. fugtigheden i slaggen.

Asken vil typisk gå igennem slaggesorteringen og ende i slutproduktet (den sorterede slagge).

Porcelænsrester:

Porcelæn vil blive delvist nedbrudt under affaldsforbrændingen, men en del vil stadig være tilbage som større eller mindre skår, som kan være mere eller mindre sammenbrændte. De mindre emner vil gå igennem hele slaggesorteringen og ende i slutproduktet, mens større skår vil blive frasorteret sammen med andre ikke-metalholdige slaggede og sendes på deponi.

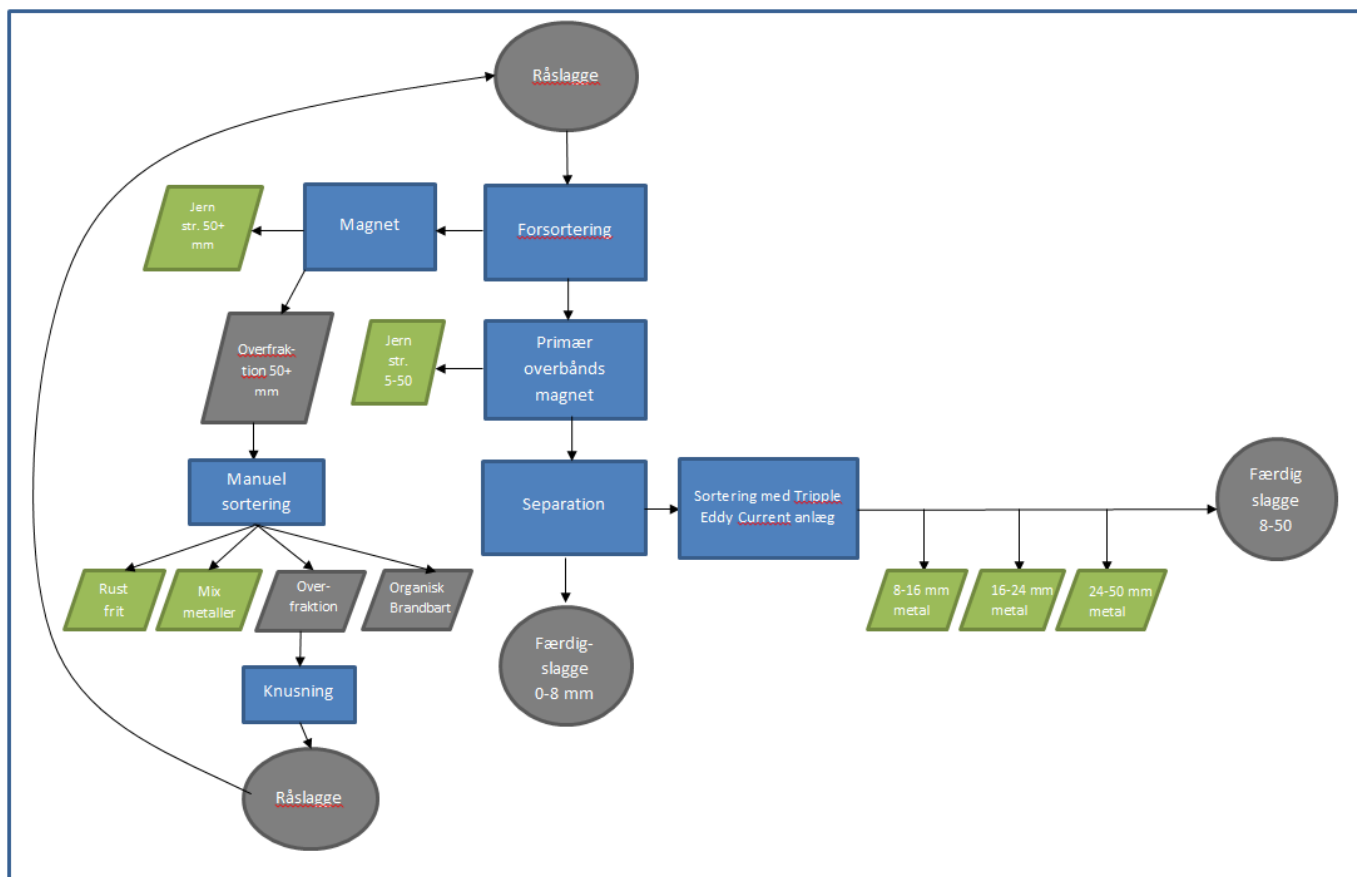
Glas- og flaskerester:
Som porcelæn.

Jern- og metalemner:

Jern- og metalemner vil altid forekomme i et vidt spænd af størrelser i slaggen, lige fra store emner på over 10-15 kilo og ned til små partikler under 2 mm.

De største emner frasorteres i startfasen af sorteringen og deres struktur er irrelevant, men de mindre dele kan ofte have former lige fra originalform (f.eks. mønter) til større eller mindre kugleformede emner. Dekonstruktionen af metallens oprindelige form afhænger naturligvis meget af smeltepunktet og den temperatur, metallet har været udsat for under forbrændingen. De mindste fraktioner af metal/jern, som dette projekt har fokus på, kan ofte være klumpet sammen med andre elementer pga. fugtindholdet, og netop derfor er den indledende sigtesortering i anlægget af stor betydning. Helt afgørende for fraktionen er dog effekten af de magneter, der indsættes i anlægget, da magnetanlægget ikke bare skal kunne "fange" metallet, men også medvirke til, at jern/metal adskilles fra andre dele via den fysiske påvirkning inde i magneten.

Figur 1: Sortering af slagge før udnyttelsen af 0-8 mm-fraktionen



Herunder ses nogle af de forskellige fraktioner af slaggen efter sortering:

Overfraktion >50 mm (uden metal og jern):



Frasorteret >50 mm jern-fraktion:



Frasorteret rustfrit metal, Al og andre ikke-magnetiske metaller:



Færdigsorteret ikke-magnetiske metaller 8-16 mm:



Fotokilde: Meldgaard Recycling A/S

2.1.2 Måleresultater – metalindhold

Meldgaard har ingen detaljerede analyser eller målinger, der viser samtlige indholdsstoffer i en typisk slagge fra affaldsforbrænding, af den simple grund, at sådanne analyser ikke har været relevante at foretage for os. I branchen har der dog i flere tilfælde været fremlagt analyse- og måleresultater der viser, at den fine fraktion af slaggen kan indeholde interessante mængder ikke-magnetiske metaller som f.eks. guld, sølv og kobber, jf. figur 2 og 3.

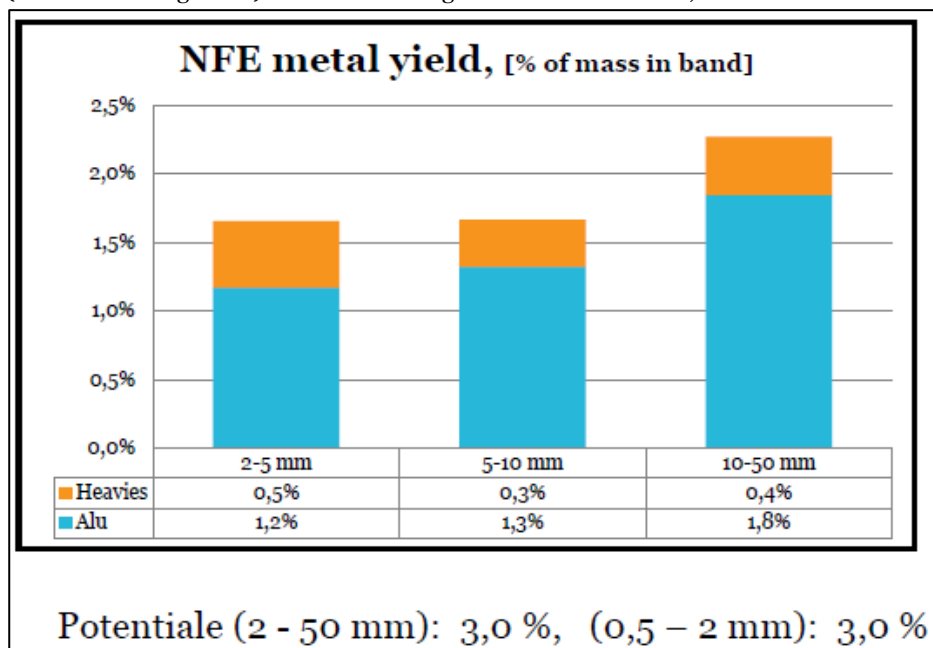
Figur 2: Ædelmetalindhold i tørslagge

Metal	Size fraction: < 2 mm Content %	Size fraction: 2-6 mm Content %	Value of metal (LME, 2007) EUR/kg
Zn	-	-	2,3
Cu	-	73-74	4
Ag	0,15	0,36 - 0,39	292
Au	0,008	0,010 - 0,011	15860
Pt	-	0,0014	-

*Bottom ashes from Amsterdam and Ludwigshafen
Muchova, Bakker & Rem, 2008*

Kilde: Oplæg på DAKOFA Seminar 28. august 2013 v/Kim Crillesen, I/S Vestforbrænding

Figur 3: 2013-resultater af metalsortering af slagge på Afataks nye sorteringsanlæg i København (NFE = ikke-magnetisk). "Heavies" = tungmetaller som f.eks. Cu, "Alu" = Aluminium.



Kilde: Oplæg på DAKOFA Seminar 28. august 2013 v/Jens Kallesøe, Afatek A/S

Da teknologien ikke har været til optimal udvinding hidtil, har Meldgaard hidtil haft primær fokus på at frasortere jern og metal (f.eks. al) i slaggefraktioner >8 mm via simple magnetseparationer, og derfor har data på metalindhold i den fine fraktion (0-8 mm) ikke været relevant for Meldgaard.

Derfor har Afateks resultater også været meget interessante for Meldgaard, og deres data var en del af grundlaget for Meldgaards interesse for sortering af den fine fraktion (0-8 mm). Slagger er naturligvis altid blevet håndteret efter gældende regler, og lovgivningen har primært fokus på tungmetallindhold i færdigbehandlet slagge, altså den slagge, der har været igennem en sorteringsproces.

Analyse af traditionel færdigsorteret slagge:

I figur 4 ses resultat af laboratorieanalyser af færdigsorteret slagge håndteret af Meldgaard Recycling. Analysen viser et typisk tungmetallindhold i slagge.

Figur 4: Analyse af traditionel færdigsorteret kategori 3-slagge:

Analyserapport					
Prøvetype:	Slagger				
Prøvested:	[REDACTED]				
Prøvetager:	Rekvirenten				
Prøveudtagning:					
Analyseperiode:	15.10.2014 - 05.11.2014				
Prøvemærke:	Faststof 050614				
Lab prøvenr:	23976001	Enhed	DL	Metode	Um (%)
Prøvemængde modtaget	4.1	kg		*	0
Frasorteret mængde	1.6	%		*	0
Tørstof i slagge/aske	83	%	1	DS 204	20
Metaller					
Arsen (As)	13	mg/kg ts.	2	SM 3120 ICP/OES	30
Bly (Pb)	410	mg/kg ts.	3	SM 3120 ICP/OES	30
Cadmium (Cd)	4.2	mg/kg ts.	0.05	SM 3120 ICP/OES	30
Chrom (Cr)	100	mg/kg ts.	1	SM 3120 ICP/OES	30
Kobber (Cu)	1800	mg/kg ts.	2	SM 3120 ICP/OES	30
Kviksølv (Hg)	0.03	mg/kg ts.	0.01	SM 3112 AAS cold vapour	30
Nikkel (Ni)	78	mg/kg ts.	1	SM 3120 ICP/OES	30
Zink (Zn)	4300	mg/kg ts.	1	SM 3120 ICP/OES	30
Organiske samleparametre					
TOC, totalt organisk kulstof	0.55	% ts.	0.05	DS/EN 13137	20

Kilde: Meldgaard Recycling A/S

Analysen viser, at den færdigsorterede slagge kan have et indhold af tungmetaller ("heavyies"), som f.eks. Cu og Zn, der kan gøre en yderligere sortering af slagge relevant, idet en yderligere sortering formodes at kunne trække en mængde af disse metaller ud. Det er muligt, at de ikke trækkes ud i ren form, men de oparbejdningsevner vi samarbejder med ift. håndtering af metalfraktionerne har god erfaring med at oprense og fraktionere metallerne, så de kan genanvendes enkeltvis. Dermed opnås et renere restprodukt, og de udsorterede metalfraktioner vil i stedet kunne genanvendes, når den frasorterede fine fraktion fra slaggesorteringen videreformidles til oparbejdningsevner.

De analyser der udføres af råslaggen viser et typisk jern- og metallindhold som vist herunder i tabel 1:

Tabel 1: Jern- og metallindhold i råslagge (8-50 mm):

Materiale	Indhold i procent
Jern (Fe)	4-8
Ikke magnetiske metaller (nonferro metaller som Al, Au, Ag, Cu og Zn)	1-3

Kilde: Meldgaard Recycling A/S

I afsnit 4.2.2 vises analyseresultater af den nye frasorterede fine fraktion af slaggen (0-8 mm).

2.2 Fastlæggelse af kravspecifikationer til nye sigtemetoder, magneter og øvrige maskinkomponenter

Vi startede allerede inden projektets officielle start med at undersøge markedet. Vi havde ikke erfaringer fra Danmark, så vi så til udlandet for at undersøge, hvordan man sorterer fine fraktioner der. Vi har i andre af vores egne projekter også testet forskellige sigtemetoder, og havde derfor en idé om, hvordan det nye anlæg skulle se ud. I dette projekt var det derfor et spørgsmål om at besøge eventuelle leverandører for at høre, om de ville kunne levere dele til det anlæg, vi påtænkte at bygge. Potentielle leverandører blev derfor besøgt, og vi lagde os fast på hvilke konkrete teknologier, der skulle bygges sammen i anlægget.

Det var vigtigt, at vi fik udviklet et anlæg, der kunne frasortere den fine fraktion, men også forbedre sorteringen for derved at øge den samlede udvinding af metaller. Efter en lang række leverandørbesøg viste det sig, at vi ikke kunne finde en færdig sigte, der matchede vores krav til dimensioner, så det passende ind i vores planer om et mobilt anlæg, og vi endte derfor med at få specialbygget vores egen sigte.

Sideløbende med markedsundersøgelsen blev der designet og tegnet et anlæg i samarbejde med vores faste ingeniørfirma, som gennem mange års samarbejde har stor erfaring med tegning af netop sorteringsanlæg. Efterhånden som dele og komponenter blev valgt, blev disse indarbejdet i tegningen og vi fik afstemt tegninger, så alle komponenterne fungerede og passede sammen.

Generelt har det været en udfordring netop at få komponenter og dele fra en meget lang række af leverandører til at fungere sammen, hvilket også fremgår af rapporten. I sidste ende er det vores risiko, og vi var derfor meget opmærksomme på dette i designfasen.

Bemærk at ikke alle kravspecifikationer er nævnt her, idet fokus er på de for projektet relevante dele.

De væsentligste designudfordringer i dette projekt har været:

- Sigtemetoden
- Separering via magneter
- Kompakt anlægsstørrelse
- Samspillet mellem de mange delelementer af maskinen.

Hele udgangspunktet for udviklingen af dette anlæg har været, at anlægget skulle kunne anvendes i forbindelse med og samtidig med Meldgaards klassiske sorteringsanlæg til slagge. Det sorterer slaggen i flere fraktioner herunder en grov og en fin slaggefraktion.

Det er finslagge-fraktionen, som skal sorteres i det nye anlæg. Dette har betydet, at anlægget har skullet dimensioneres, så det størrelsesmæssigt passer til det almindelige sorteringsanlæg – f.eks. i forhold til højde og placering af slaggebånd og lignende.

Slaggesortering foregår typisk på lokationer tæt på slaggens oprindelsessted, dels for at holde transportomkostningerne nede, men også for at mindske en unødigt miljøbelastning ved unødigt transport. Dette skyldes naturligvis den danske affalds-infrastruktur med forholdsvis mange små/store affaldsforbrændingsanlæg, der betyder at slagge opstår på mange lokationer. Samtidigt er sorteringsanlæg en forholdsvis tung maskininvestering, og derfor anvendes typisk mobile anlæg, der flyttes alt efter, hvor der er slagge klar til sortering.

Det nye anlæg skulle derfor designes i en kompakt form, som var flytbar og som nemt kunne opstilles og nedtages igen.

For at opnå et anlæg med størst mulig fleksibilitet i mobiliteten var udgangspunktet, at flytning af anlægget ikke måtte medføre, at transporten vil være omfattet af de danske færdselsregler for specialtransporter med følgebiler, men maksimalt være omfattet af krav om ansøgning om tilladelse

til særtransport (kilde: Transportministeriets bekendtgørelse nr. 1328 af 10/12/2014 om særtransporter). Derfor var der behov for et meget kompakt anlæg. Et kompakt anlæg vil også lettere kunne manøvrere rundt på de meget forskellige sorteringspladser rundt i landet, hvor færdselsvejene ofte er begrænsede og snævre.

Sorteringsanlægget består af en del elementer der normalt fylder en del, såsom transportbånd, sigtebånd og motorer, og derfor var der også et krav til at disse elementer blev designet, så de var sammenklappelige og meget kompakte.

Når anlægget stilles op, er det afgørende at det er nemt og hurtigt at opstille og klargøre til produktion, da klargøring og opstilling ellers hurtigt kan blive en for omkostningstung proces. Derfor var det også et krav at alle elementer ved opstilling (eller nedtagning) var hurtige og nemme at klargøre.

Samspillet mellem de enkelte delelementer er af afgørende betydning for om anlægget vil kunne fungere effektivt, og derfor var det afgørende at alle dele kunne reguleres ind og finindstilles i forhold til hinanden, både med hensyn til placering, hældning og hastighed.

Hvirvelstrømsmagneternes effektivitet afhænger af den vinkel, de er placeret i, og derfor skal de være nemme at regulere ind. Vinklen har betydning for, hvor meget der kan sorteres fra.

Separering ved hvirvelstrømsmagneter er afhængig af at materialet ikke har for store forskelle i kornstørrelse, jo mindre forskel, jo bedre separering i sigten. Derfor var det afgørende for anlægget at de anvendte sigtemetoder og sigtesolde var de mest velegnede hertil. Der var overvejelser om sigtemetoden skulle være "trampolin-" eller "ristemetoden".

Nogle af de væsentligste kravspecifikationer var derfor:

- Max bredde i kompakt form på 3,0 meter
- Max højde i kompakt form på 3,70 meter
- Max længde i kompakt form på 13,6 meter
- Sigten skulle kunne sortere slagge under 8/11 mm til 2 kornstørrelser 0-3 mm og >3 mm
- Alle relevante dele skulle reguleres og indstilles via hydrauliske cylindre – hurtigst og mest fleksibel regulering.
- Alle dele skulle styres via frekvensomformer – alt skal kunne reguleres nemt og hurtigt.
- Kapacitet 50 tons/time

2.3 Design og tegningsudarbejdelse af nyt sorteringsanlæg

2.3.1 Designprocessen

Anlæggets design er blevet udviklet efterhånden som de forskellige elementers format og størrelse er blevet fastlagt. Udgangspunktet har været at anvende kendte elementer men i en ny sammenhæng, og derfor har det været nødvendigt designe og vælge elementer efterhånden som man fandt de egnede dele.

Efterhånden som de forskellige elementers kapacitet og leverandør var fastlagt handlede designfasen om at få elementerne til at passe sammen, så kravet om den kompakte form kunne efterleves.

På den måde har også f.eks. tegninger været udarbejdet successivt, således at der flere gange opstod behov for redesign, når en komponent (f.eks. sigten) ændrede format og form.

Designprocessen skulle tage hensyn til:

1. Anvendelse af 2 stk. hvirvelstrømsmagneter med specifik kapacitet (a 20-30 tons/time) egnet til kornstørrelsen under 8 mm.
Anlægget havde brug for 2 magneter for at kunne sortere metal fra dels 0-3 mm-fraktionen og dels >3 mm fraktionen.
2. Sigteanlæggets kapacitet og størrelse.
Ud fra vores fastlæggelse af kapacitet (se herover) skulle udvalgt sigteleverandør beregne størrelse og format af sigtebåndet, der skulle til for at kunne levere den nødvendige mængde sorteret slagge til de 2 magneter. I dette indgår både fastlæggelse af længde, bredde, hvilken vinkel sigtebåndet skulle placeres i (monteret i anlægget) samt antal sigtesolde i sigten. En begrænsende faktor herfor var dog anlæggets maksimale størrelse.
3. Sammenkobling af sigte og hvirvelstrømsmagneter.
Magneter og sigten skulle sammenkobles således, at sigten doserede materiale til magneterne i en passende hastighed. Dernæst var det naturligvis afgørende, at de havde samme kapacitet.
4. Valg af hydrauliske cylindere til styring af sigter, magneter osv.
Det skulle afgøres, hvor der skulle anvendes cylindre for at kunne skabe størst mulig fleksibilitet i anlægget. Dernæst skulle der vælges cylindre, der var egnede i forhold til vandring og løftekapacitet. Det var f.eks. væsentligt, at cylindre ikke skulle have større vandring end nødvendigt, men omvendt skulle de også kunne vandre så meget, at det enkelte anlægselement kan vinkles og tilpasses, så det er placeret mest optimalt.
5. Plads til motorer og elinstallationer
Motorer, elinstallationer f.eks. styretavler skulle ind tænkes i designet, da deres størrelse og placering kan have betydning for designet. Senere i afsnit 3.2 bliver netop problem med motorplacering beskrevet.
6. Plads til de forskellige transportbånd
Anlægget skal bygges op med 3 transportbånd, der hver især skal kunne være fleksible, så de kan passe til det kompakte designkrav. Der skal anvendes følgende bånd:
 - Sigtebånd, som modtager 0-8 mm slagge og fører det op til sigtesolden, som slaggen sigtes ned igennem
 - Transport-/produktbånd, som transporterer de færdigsorterede slagge (hvor metal er sorteret fra) væk fra anlægget til depot for restslagge (til senere udnyttelse).
 - 2 bånd, som transporterer frasorteret metal i 2 fraktioner (0-3 mm & 3-8 mm) væk fra anlægget til depot (hvor det ligger indtil det kan afhændes).

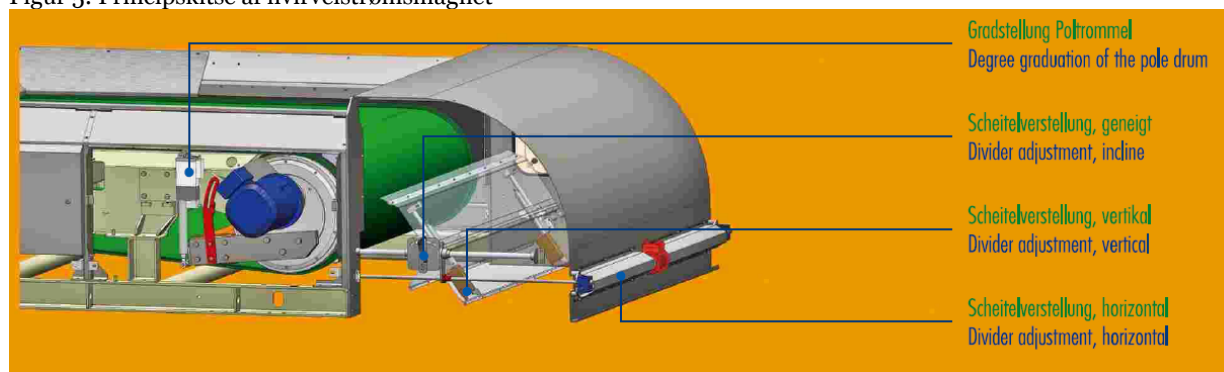
2.3.2 Valg af magneter til separering

Helt fra projektets start var det muligheden for at anvende hvirvelstrømsmagneter til separering af fine fraktioner, der gjorde tanken om et sorteringsanlæg til de små kornstørrelser realistisk. Hvirvelstrømsmagneter har normalt været anvendt i f.eks. mineindustri og skrotbranchen, men typisk på stationære anlæg. Andre magnettyper eller andre separeringsmetoder kan gøre nogenlunde det samme, men vil typisk have et volumen og omfang, der kun er egnet til stationære anlæg. For eksempel kan man lave separering af slagge via udvaskning i vandbassiner, men dette er en metode, som koster store mængder vand, stort anlægsvolumen og hvor man desuden ender med en ikke uvæsentlig spildevandsudfordring.

Hvirvelstrømsmagneter er kendetegnede ved, at de i en kompakt form og med forholdsvis stort produktflow kan separere partikler af ikke-magnetiske metaller via deres ledningsevne.

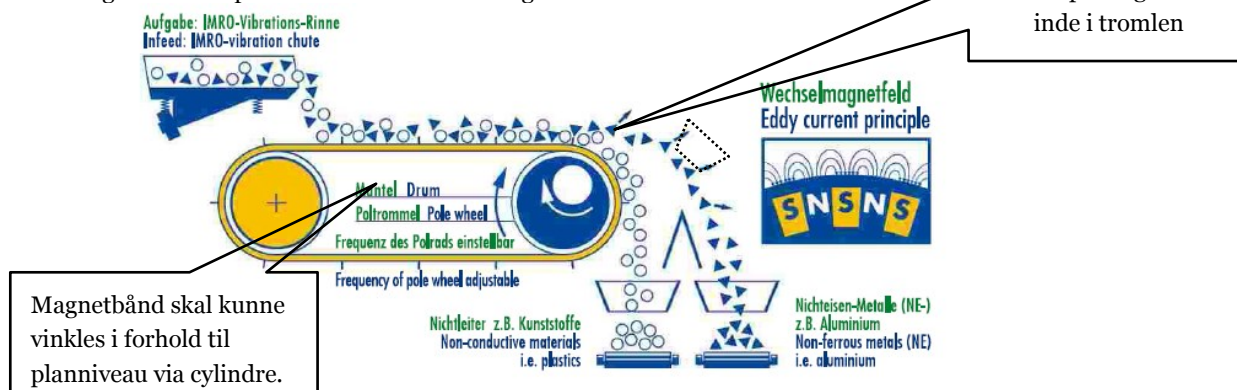
Magnetanlægget er opbygget med 2 valser, der trækker et PVC-bælte/-dug. I den forreste valse roterer en uafhængig magnet, og den er kerne i magnet-anlæggets separering af ikke-magnetiske metaller fra slaggen. Magneten er opbygget af meget kraftige NEODYM permanent-magneter, som er opstillet med modsatrettede poler. NEODYM-magneter er de stærkeste magneter, der findes på markedet. Dermed skabes et meget kraftigt elektromagnetisk felt, hvor materialer, der er ledende (ikke-magnetiske metaller) slynges rundt i en form for hvirvelstrøm, og dermed kan de separeres, når de passerer en separationsplade, se skitse herunder i figur 5 og 6.

Figur 5: Principskitse af hvirvelstrømsmagnet



Kilde: Imro Maschinenbau GmbH

Figur 6: Principskitse af funktionen af magneten



Kilde: Imro Maschinenbau GmbH

Markedet for egnede hvirvelstrømmagnet-anlæg blev undersøgt, og der viste sig hurtigt 2 mulige leverandører:

- Imro Maschinenbau GmbH, Tyskland (som vi igennem mange år har samarbejdet med)
- Steinert Elektromagnetbau GmbH, Tyskland.

Afgørende for valget var særligt disse kriterier:

- Mulighed for højest mulige omdrejningshastigheder for magneter (lig med større elektromagnetisk felt og dermed mere effektiv frasoortering)
- Mulighed for fleksibilitet i dimensionerne, så den kan passe ind i det kompakte design
- Vedligeholdelsesomkostninger
- Indkøbspris.

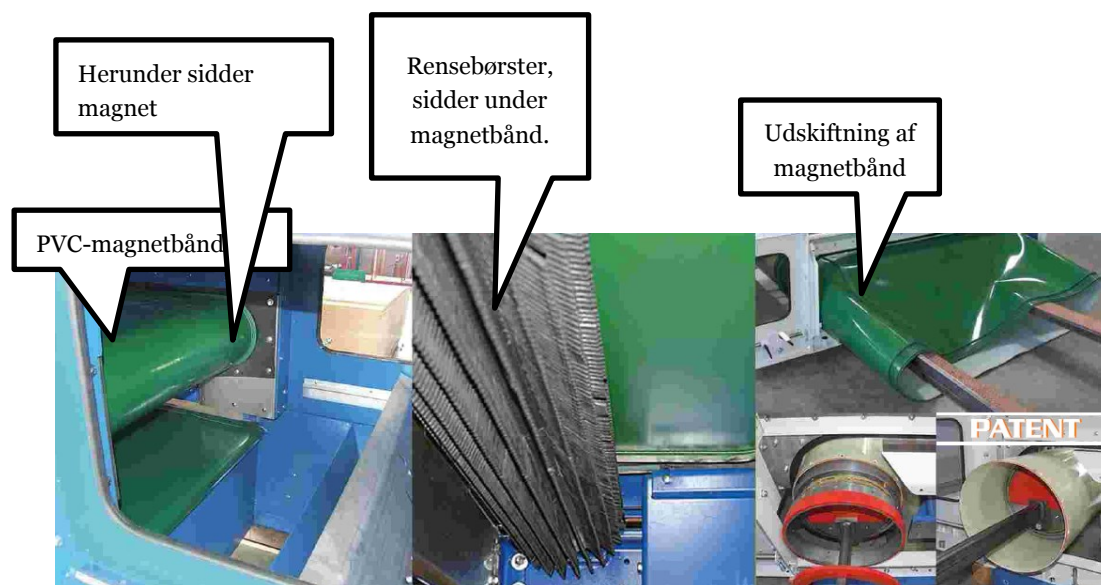
Her viste Imro, at være den eneste der på dette tidspunkt kunne levere magneter med omdrejningshastigheder på op til 3700 omdrejninger/minut, og da øvrige parametre ikke afveg væsentligt fra hinanden faldt valget på Imro som leverandør. Nedenstående figur 7 viser et eksempel på en hvirvelstrømmagnet-anlæg fra IMRO. Figur 8 viser et udpluk fra IMRO-magneten.

Figur 7: Foto af et IMRO-hvirvelstrømmagnet-anlæg



Kilde: Imro Maschinenbau GmbH

Figur 8: Detaljeudpluk af IMRO-magneten



Kilde: Imro Maschinenbau GmbH

Da anlægget skal kunne separere 2 fraktioner (0-3 mm og >3 mm) blev anlægget opbygget med 2 Imro-magneter med følgende specifikationer:

- IMRO Nr. 119.13, NE-Abscheider RCSX E-150/Feinkornscheider Sond
0-3 mm, 3700 U/min
- IMRO Nr. 120.20, NE-Abscheider RCSX D-150/Feinkornscheider Sond
>3 mm, 3000 U/min

Begge magneter har en kapacitet på 20-30 tons/time.

2.3.3 Valg af egnede sigtetyper

For at magneterne kunne få et passende flow af råmateriale, skulle anlægget indeholde en effektiv sigte, der kunne sortere slaggen i passende kornstørrelser, således at vi opnåede at have 2 fraktioner, der kunne sendes igennem hver sin magnetseparator:

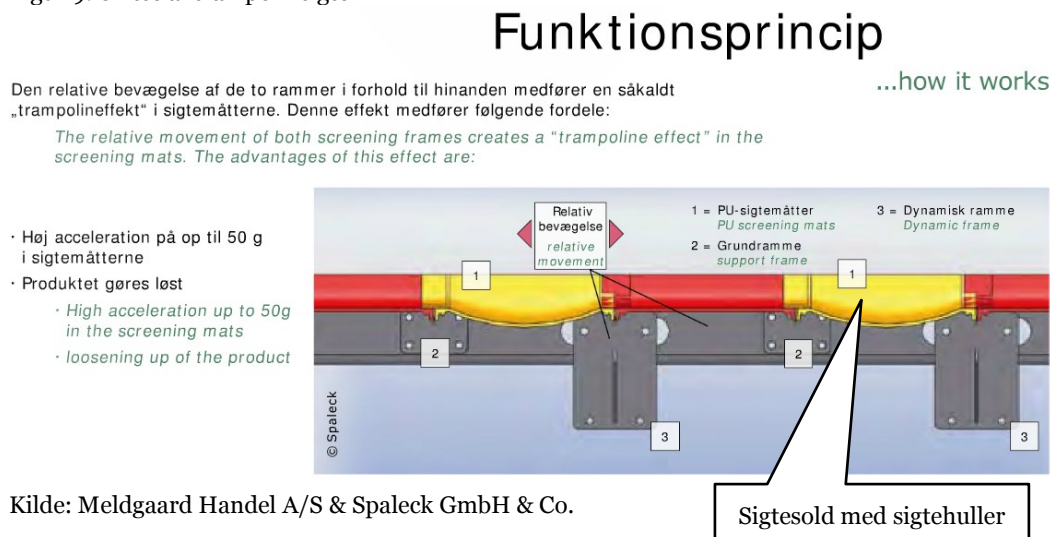
- 0-3 mm
- >3 mm

Når der skal sorteres de fine fraktioner er en "trampolin-sigte" den mest velegnede sigtetype i forhold til f.eks. en stjernesigte, der er mere velegnet til grovsortering (f.eks. sortering af have-/parkaffald).

Trampolinsigter er også den mest "aggressive" sigtetype/-metode, der udsætter materialet for endog meget store kræfter, hvilket er en fordel, når man har fine fraktioner, der ydermere er fugtige og dermed vil have tendens til at klumpe sammen.

En yderligere massiv fordel ved trampolinsigten er, at den så at sige er selvrensende, da de kraftige bevægelser hele tiden vil forhindre at sigtehullerne i sigtesolden lukkes til af materiale. Dette er dog under forudsætning af, at materialet er tilstrækkeligt tørt. I figur 9 ses en principskitse af en trampolinsigte.

Figur 9: Skitse af trampolinsigte



Kilde: Meldgaard Handel A/S & Spalck GmbH & Co.

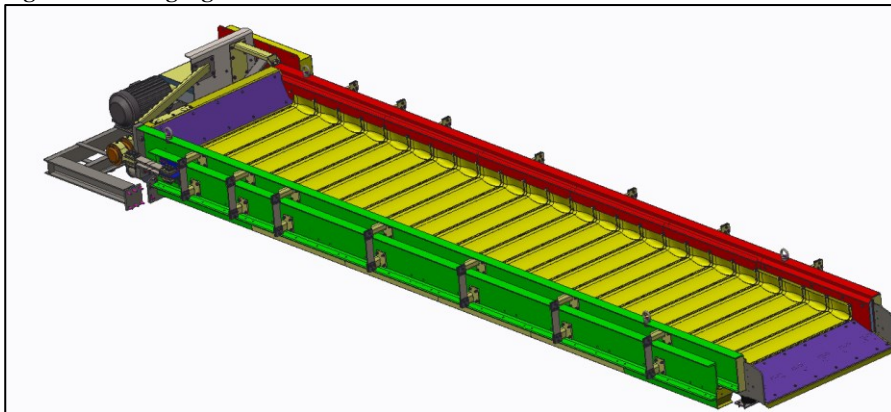
En trampolin-sigte er opbygget af såkaldte "sold" (måtter), som er perforerede PUR-gummimåtter, og størrelse af perforeringerne og antallet af sold afgør sigtens effektivitet/ydeevne. Sigten skulle have en høj effekt, når den skulle kunne håndtere op til 50 tons/time. Effekten var derfor en afgørende faktor.

Antallet af sold og perforeringer beregnes af leverandøren ud fra de ønskede dimensionsmål og kapacitetskrav.

Desuden var det af hensyn til anlæggets kompakte form afgørende, at sigten fik så lav højde som muligt.

Der var 2 mulige leverandører til denne opgave, og af disse blev valgt firmaet Hein Lehmann GmbH. De kunne levere en sigte med laveste byggemål, og derfor faldt valget på dem. Figur 10 viser en skitse af en sigtesold fra Hein Lehmann.

Figur 10: Færdig sigtesold fra Hein Lehmann



Kilde: Meldgaard Recycling A/S & Hein Lehmann GmbH

2.3.4 Valg af øvrige maskinkomponenter

Naturligvis har det været væsentligt, at alle komponenter var egnede og passede sammen, men ikke alle har medført den samme mængde af overvejelser om specifikationer som de beskrevet i foregående afsnit.

En lang række elementer har i princippet blot været hyldevarer, som der skulle fastlægges form, størrelse og andre specifikationer på, og som derefter kunne bestilles. Denne proces blev varetaget af SB Engineering, der forestod bestilling og dimensionering efter vores anvisninger og designkrav.

Dette har f.eks. været gældende for elementer som:

- Larvebånd
- Bundramme og larvefodder:
- Længdevanger
- Chassis
- Sigteramme og sigterammestativ
- Metaltransportbånd

Tekniske installationer:

Det har været væsentligt, at de tekniske installationer blev sammenkoblet og designet så styreskabe kunne indrettes bedst muligt. Dette arbejde er foretaget i tæt samarbejde mellem Meldgaard og SB Engineering, baseret på erfaringer fra opbygning af tidligere sorteringsanlæg.

Hydrauliske cylindre:

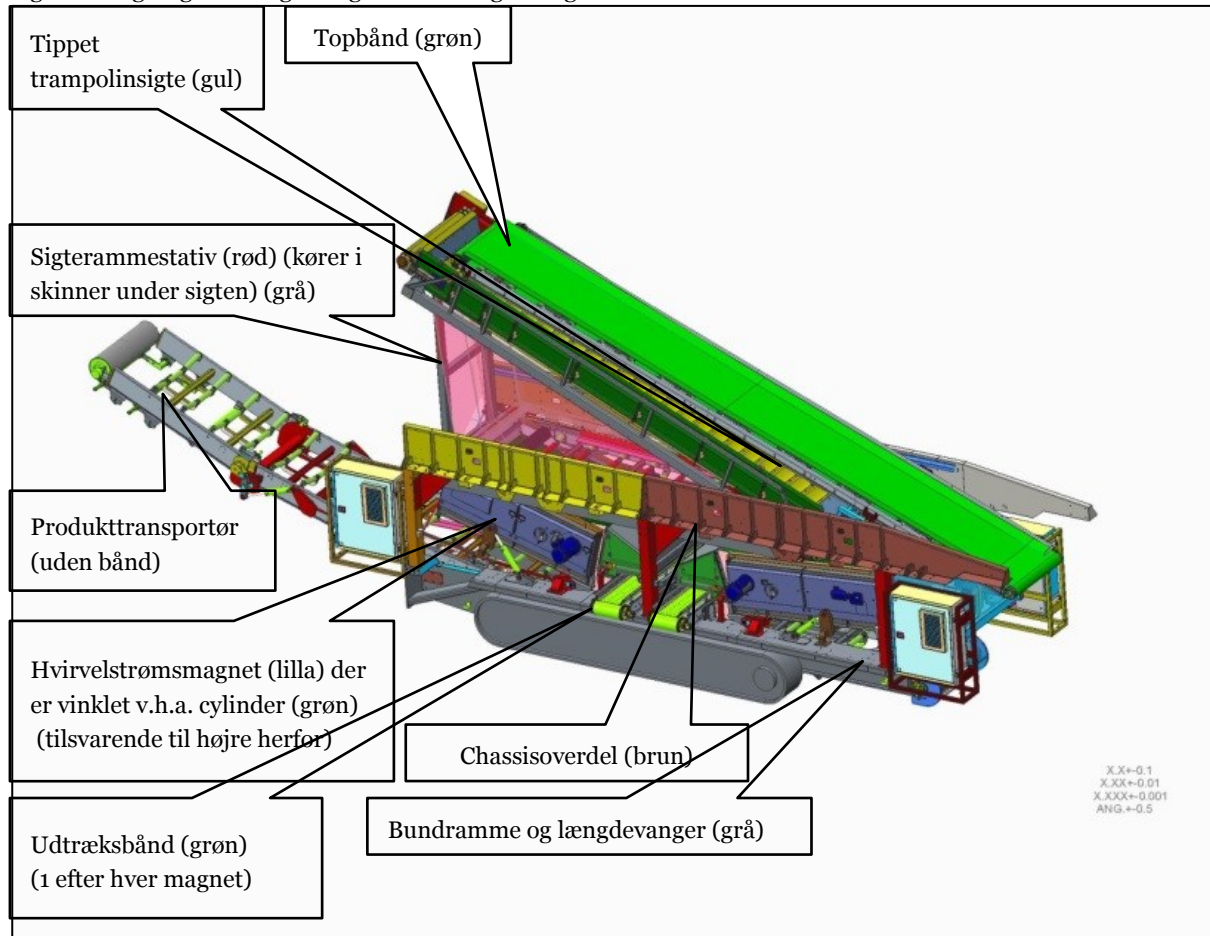
Som tidligere nævnt var valg af cylindre en væsentlig parameter. Baseret på beregninger af den belastning, de skal klare, og den enkelte cylinders placering og brug afgør, hvor stor vandring cylinderen skal have.

For eksempel har valget af cylindre under hvirvelstrømsmagneterne været væsentlig. Under hver magnet er der placeret et sæt cylindre, der gør det muligt at indstille magneten til at stå vinklet i forhold til planniveau. Dette giver en fordel, når metaller separeret i magneten skydes ud, da den rette hældning (via tyngdekraften) hjælper metallet den rette vej væk fra slaggen (se figur 6).

2.3.5 Designresultat

I figur 11 ses en tegning af anlæg i driftsopstilling, som det så ud efter afslutningen af designfasen, hvor de væsentligste maskinkomponenter er markerede:

Figur 11: Tegning af færdigt design af sorteringsanlæg:



Kilde: Meldgaard Recycling A/S & SB Engineering ApS

Med dette design mente vi, at alle kravspecifikationer var opfyldt, og nu måtte opbygning og testkørsel vise, om designet ville fungere efter hensigten.

Under processen med udviklingen af anlægget blev anlæggets navn fastlagt til "Double Fine". Navnet henviser naturligvis til at anlægget sorterer den *fine* slagge i 2 metal fraktioner (*Double*).

2.3.6 Underleverandører af delkomponenter

I projektet kan underleverandører anskues og opdeles i 2 grupper:

- Faste og kendte leverandører til opbygning og konstruktion af sigteanlæg
- Leverandører til de enkelte anlægskomponenter.

Underleverandører af anlægskomponenter er fundet under intense screeninger af markederne, og valget af konkrete leverandører skete som en del af designfasen, som beskrevet tidligere i afsnit 2.2. De faste og kendte leverandører ift. maskinopbygning har derimod været givet på forhånd:

- SB Engineering ApS:
SB Engineering har i mange år været fast leverandør af de mere specifikke designelementer såsom konstruktionsberegninger, konstruktionstegninger, brugermanualer, CE-mærkning.
- HFR Trailer A/S
HFR Trailer har i mange år stået for den praktiske opbygning af sigteanlæg, fra modtagelse af delkomponenter, modtagekontrol, el-arbejde og slutmontage og færdigbygning af anlæggene.

De væsentligste leverandører af anlægskomponenter har i høj grad været leverandørerne af sigtesolde og hvirvelstrømsmagneter (også beskrevet i afsnit 2.2.):

- Hein Lehmann GmbH:
- Leverandør af sigte med sigtesold
- Imro Maschinenbau GmbH:
- Leverandør af hvirvelstrømsmagneter.

3. Indkøb og konstruktion

3.1 Indkøb, samling af delkomponenter og produktion af anlæg

Indkøb af anlægskomponenter til et anlæg som dette indeholdt også en række udfordringer. Da essensen i anlægget er, at det skal være meget kompakt, var det meget afgørende, at der ikke blev købt anlægskomponenter hjem for tidligt. Komponenterne skulle derimod købes i et flow, der gjorde, at man kunne tilpasse dele til hinanden og ikke mindst tilpasse anlæggets chassis og rammer til enkeltenhederne.

Vurdering og tilpasning af de enkelte elementer foregik i et flow som dette:

1. Valgt leverandør designer element efter vores krav til kapacitet, max-størrelse osv.
2. Leverandør fremsender CAD-maskintegninger til os
3. Når vi har kontrolleret tegning videresendes tegning til SB Engineering
4. Ved hjælp af CAD-tegneprogram vurderer SB Engineering, hvordan elementet passer ind i original CAD-tegning af anlægget (original tegning Meldgaard og SB Engineering har lavet), og hvor og hvor meget elementets dimensioner skal tilpasses, for at kunne passe i anlægget.
5. SB Engineering tilpasser leverandørens CAD-tegning, og fremsender denne til leverandøren.
6. Leverandør producerer element ud fra nye CAD-tegninger og leverer element til HFR Trailer, der står for opbygning af anlægget.
7. HFR Trailer opbygger anlæg efterhånden som elementer leveres.

Indkøb af dele er primært foretaget af Meldgaard, men en række af de mere ukomplicerede komponenter er indkøbt af vores underleverandører HFR Trailer, som også stod for selve konstruktionsfasen.

Problemer i opbygningsfasen:

Undervejs i opbygningsfasen opstår 2 væsentlige udfordringer, som dels påvirkede designet og som også forsinkede hele opbygningsprocessen og dermed hele projektets tidsplan:

- Problemer med placering af motor på sigteramme
- Svaghed i konstruktionen af sigterammestativ, der holder topbånd/sigtesold.

I næste afsnit er udfordringer med disse 2 problemer beskrevet.

3.2 Tilpasning af design

Selv om Meldgaard med dette projekt gik ind i nyt område med arbejde med den fine fraktion, og der derfor var forventet diverse udfordringer i både design- og afprøvningsfasen, viste udfordringerne i designfasen sig dog at komme fra noget uventede kanter.

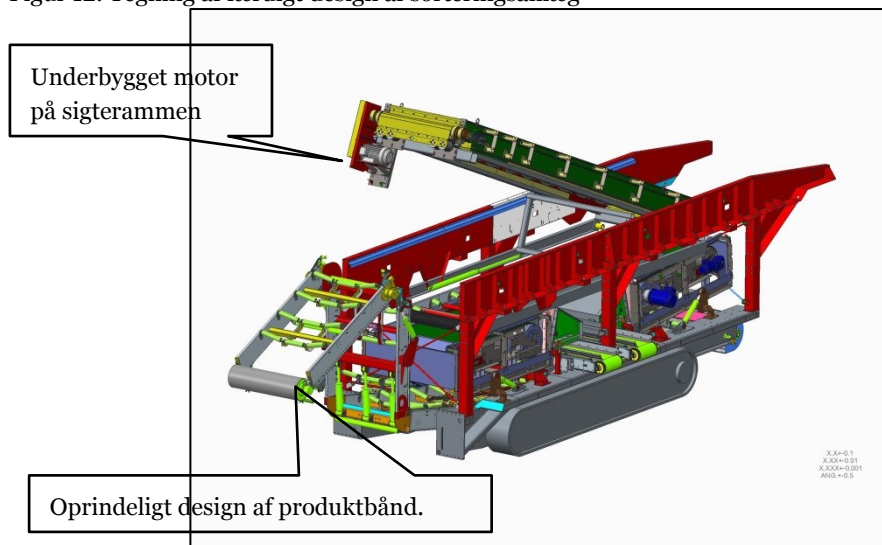
Som beskrevet i det foregående afsnit viste der sig 2 problemer:

- Problemer med placering af motor på sigteramme
- Svaghed i konstruktionen af sigterammestativ, der holder topbånd/sigtesold.

Problemer med placering af motor på sigteramme:

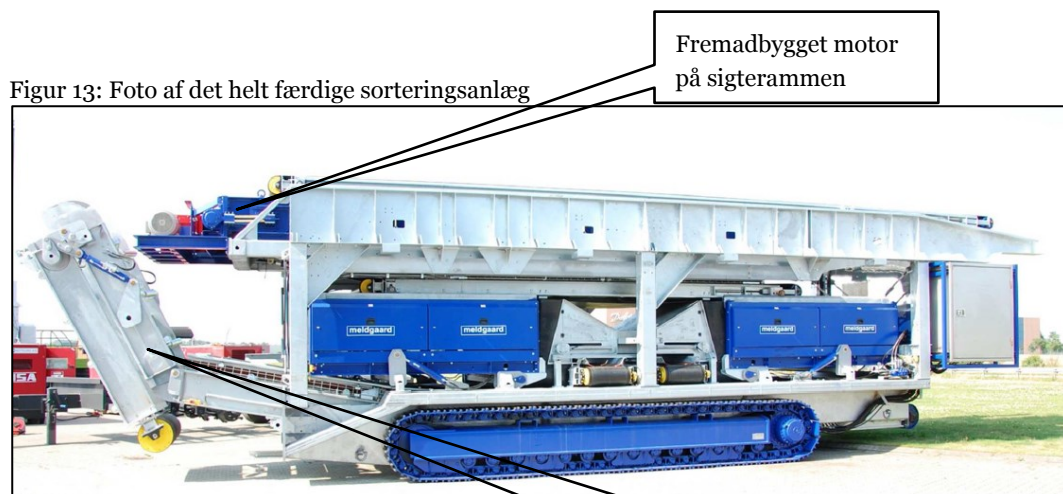
Der var bestilt og designet med en sigteramme, hvor motoren skulle være "underbygget" på rammen, dvs. være placeret under rammen. Dette fremgår af markering på nedenstående tegning i figur 12.

Figur 12: Tegning af færdigt design af sorteringsanlæg



Kilde: Meldgaard Recycling A/S & SB Engineering ApS

Desværre viste det sig, at leverandøren ikke kunne levere med denne motorplacering, men i stedet var nødt til at placere motoren "fremadbygget" (se tegning herunder i figur 13), og dette medførte store problemer for det oprindelige komprimerede design.



Kilde: Meldgaard Recycling A/S

Denne ændring medførte derfor behov for designændring af produktbåndet (se figur 14). Som det ses af figur 13 og 14, så er designet af produktbåndet (også kaldet udtræksbåndet) ændret på 2 fronter:

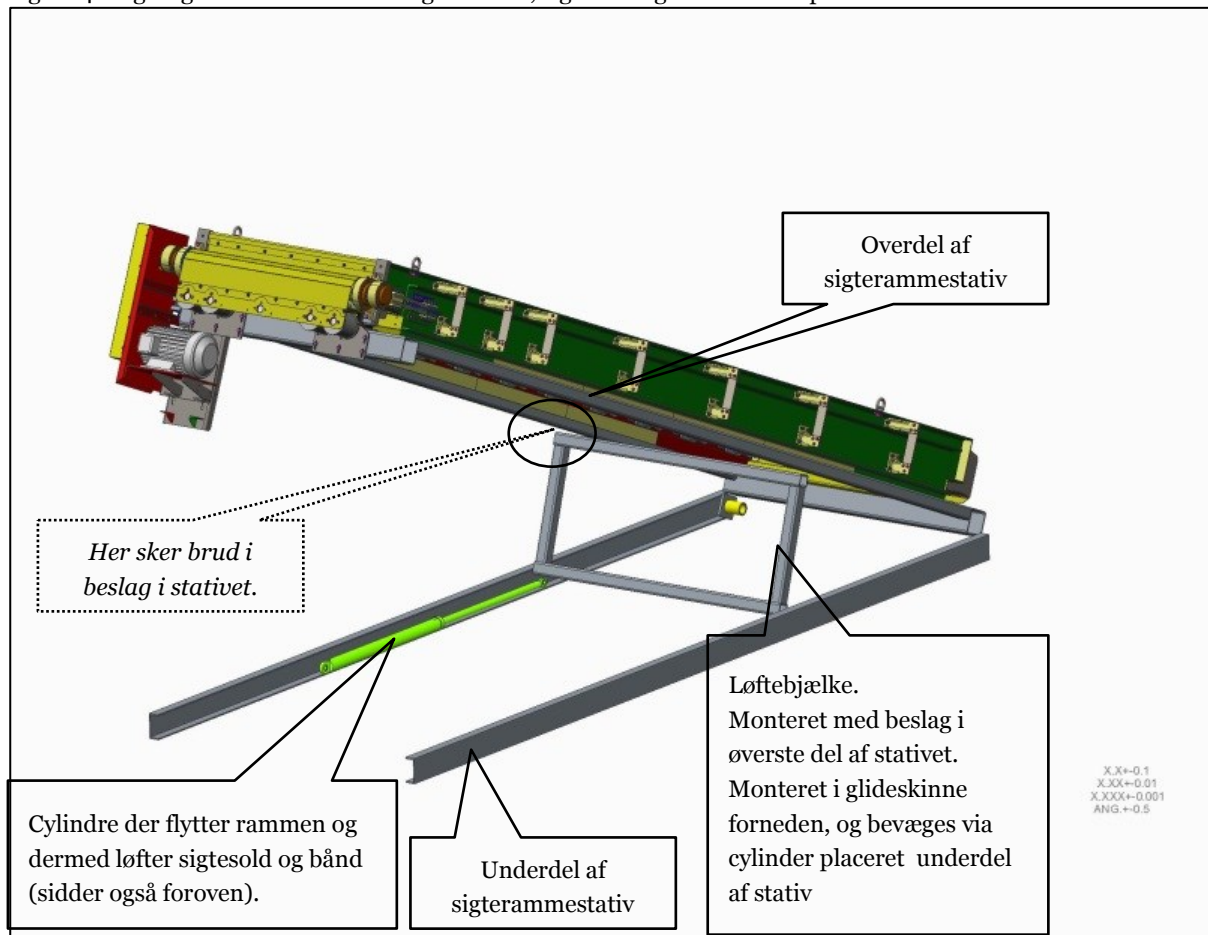
Den inderste sektion af båndet var nødsaget til at blive forlænget, så den dermed kom ud forbi sigtemotoren ovenover. Den midterste sektion blev forkortet i forhold til det oprindelige design, for at få det sammenklappede bånd til at passe med de krævede dimensioner af anlægslængden. Disse ændringer var dog uden de store tekniske udfordringer, men betød forsinkelser og øgede omkostninger til projektet.

Udfordringer med sigterammestativ (der holder sigtebåndet):

Da anlægget egentligt var færdigbygget, skulle vi for første gang lave en prøveopstilling af anlægget, hvor vi så at sige for første gang "udfoldede" maskinen fra den komprimerede transportposition til driftspositionen.

Her viste det sig desværre hurtigt, at der var en svaghed i konstruktionen i opbygningen af det stativ og den skinne stativet vandrer i, som løfter rammen med sigtesold og transportbånd op i driftsposition.

Figur 14: Tegning af stativ der holder sigteramme, sigtesold og øverste transportbånd



Kilde: SB Engineering ApS.

Det beslag, som forbinder cylinder og ramme, knækkede ved første forsøg på at opstille anlægget, da det var konstrueret for svagt til at kunne klare den belastning, som vægten af topbånd og trampolinsigte udgør.

Man havde forsøgt at tage hensyn til vægt af bånd og sigte, da dimensionerne af sigteramme, sigterammestativ og tilhørende beslag blev beregnet, men en granskning af beregningerne afslørede desværre en banal regnefejl, som burde have været opdaget.

Denne fejl bevirkede at konstruktion skulle genovervejes, og en kraftigere og mere stabil sigterammestativ blev konstrueret herefter.

Dette medførte naturligvis at denne del af anlægget måtte ændres, hvorefter den nye ramme blev monteret. De efterfølgende test viste heldigvis, at rammen nu var tilstrækkelig stærk til at løfte både sigt og topbånd – også med belastning af slagger på båndet.

Færdiggørelse af anlægget:

Efter disse 2 designændringer lykkedes det at få færdigbygget anlægget, så det levede op til alle forventninger.

Det var en stor milepæl der blev nået, da det færdige anlæg (jf. figur 15) stod på Meldgaards gårdsplads, klar til transport ud på en slaggeplads, hvor det kunne afprøves og testes.

Figur 15: Foto af det helt færdige sorteringsanlæg:



Kilde: Meldgaard Recycling A/S

4. Testkørsel

Da anlægget var færdigt blev det med blokvogn transporteret til en slaggeplads, hvor der var tilstrækkeligt med slagge til at gennemføre testkørsler. Det var afgørende, at testkørslen kunne foretages med forskellige typer slagge (og hermed forskellige slagge-leverandører), så vi dermed havde en bredere funderet test.

4.1 Opstilling af anlæg

Et væsentligt element i testene af anlægget var også at teste, hvor nemt opstilling og nedtagning var. Ikke fordi vi forventede behov for designændringer, men mere for at ”lære” anlægget at kende og teste, hvor nemt og hvor hurtig/langsom opstilling og nedtagning af anlægget ville være.

Opstilling af anlæg foregik uden de store udfordringer og foregik også lige så hurtigt som vores andre mobile anlæg.

Efterfølgende blev anlægget startet op for at tjekke alle funktioner, inden vi begyndte tilførslen af slagge til den egentlige testkørsel. Her viste der sig desværre endnu en udfordring, nemlig manglende stabilitet af anlægget, når alle bånd var i gang. Når alle bånd og magneter er i gang på samme tid viste anlægget sig at stå lidt ustabilt. Anlægget stod på en plads med en fast grusbelægning og på dens egne larvefodder, men dette var ikke stabilt nok.

Det blev vurderet, at de konstaterede rystelser i anlægget ikke kunne mindskes, og anlægget skulle derfor redesignes til at kunne håndtere dette.

Løsningen på problemet viste sig heldigvis at være ret enkelt, da der blot blev monteret 2 sæt kraftige ”trailer”-støtteben i hver side anlægget, se figur 16.

Figur 16: SAF støtteben, der blev eftermonteret for at stabilisere anlægget



Kilde: SAF Danmark ApS (SAF Titan-støtteben).

4.2 Gennemførelse og resultat af prøvekørsler

Da konstruktionen endeligt stod stabilt, var vi klar til at køre de egentlige testkørsler med slagge. Der var afsat en testperiode på cirka 3 måneder med testkørsler af slagge fra affaldsforbrændingsanlæg i hhv. Kolding, Odense og Svendborg.

Testkørslerne skulle i særlig grad afklare følgende:

1. Sigtesoldenes effektivitet, både ift. sortering og i forhold til at være selvrensende.
2. Hvirvelmagneternes evne til at separere metal fra de 2 fraktioner
3. Kapacitetsmængder.
4. Anlæggets stabilitet og øvrige driftsforhold
5. Opstilling og nedtagning af anlæg

Test foregik over en 6-ugers periode på vores plads i Skærbæk, som er slaggeplads for slagge fra Odense, Svendborg og Kolding. Der blev kørt ca. 10 timer pr dag med 50 tons/time i overensstemmelse med gældende miljøgodkendelse for pladsen.

Den første tid med testkørsel skulle afklare, om maskinen fungerede som forventet. Det viste sig hurtigt, at kapaciteten på maskinen var dimensioneret korrekt. Det forventede antal tons på ca. 50 tons/time forløb uden udfordringer. Selve sigtningen efter montering af de korrekte sold forløb også uden problemer. Der viste sig ikke de store forskelle i forhold til slaggens oprindelse.

De dage, hvor slaggen var særlig våd efter regnvejrperioder, viste det sig dog hurtigt, at maskinen var udfordret. Soldene i Hein Lehmann sigten lukkede til, og sigtningen var besværlig og dermed i visse dage umuligt.

Maskinen fungerede optimalt med tør slagge, men det viste sig hurtigt, at kravene til rengøring blev øget betydeligt. Der blev indkøbt en mobil 5,5 m³ kompressor for at holde anlægget fri for støv og slagge – samtidigt var det nødvendigt med en mand på jorden til den løbende rengøring.

Double Fine anlægget gav os dermed udfordringer med hensyn til støv, og det var nødvendigt med yderligere indkøb af forstøverslanger til jorden og på selve færdigvarebåndet. Yderligere beskrivelse herunder

Testkørslerne viste følgende resultater:

1. Sigtesoldenes effektivitet, både ift. sortering og i forhold til at være selvrensende.
I forhold til sigtesoldene viste der sig 2 problemstillinger:
 - 1.1. Forkerte dimensioner på sigtesold i trampolinsigte:
Det viste sig, at de monterede sigtesold havde for store perforeringer, så slaggen ikke blev sorteret korrekt. Dette problem medførte behov for ændringer og ombygning af anlæg, se næste afsnit.
 - 1.2. Våd slagge tilstoppede sigtesolde:
Efter der var monteret nye sigtesold med de korrekte perforeringsdimensioner, viste det sig hurtigt, at for slagge med for højt vandindhold tilstoppede sigtesoldene på en måde som sigtens selvrensende effekt ikke kunne håndtere.

Forsøg viste hurtigt, at slaggen maksimalt må have et vandindhold på ca. 10 %, hvis sigten skal fungere effektivt. Normalt ligger slaggens vandindhold på 10-20 %.
2. Hvirvelstrømsmagneternes evne til at separere metal fra de 2 fraktioner

Der skulle en række forsøg til at finde den rette indstilling af vinklingen af hvirvelstrømsmagneterne, men hurtigt viste det sig også, at slaggens vandindhold har stor betydning for magneternes evne til at separere metallet fra. Hvis slaggen og metallet er for vådt, "klistrer" metal og slaggekorn så meget sammen, at magnetens magnetfelt ikke er stærkt nok til at separere metallet, og dermed separeres for lille mængde metal fra. Dette problem viste sig særligt i magneten, der modtog slagge <3 mm.

Kapacitetsmængder:

Produktbånd fik for meget slagge i starten, idet der simpelthen blev læsset for meget op på transportbåndet. Dette problem erkendte vi hurtigt ville kunne opstå ind imellem, og derfor blev det besluttet at montere kanter på øverste transportbånd, der bedre kunne holde materialet tilbage. Derefter var det uden problemer at køre med ca. 50 tons/time, hvis slaggen ikke var for våd.

3. Anlæggets stabilitet og øvrige driftsforhold

Anlægget stod stabilt, efter montering af støtteben, og motorer og elinstallationer fungerer også fint fra starten.

Der opstod dog et mindre støvproblem, da støv dryssede ned fra øverste bånd og ned over anlægget. Problem blev løst ved at montere et gummitæppe på sigterammen, som dækkede området under den løftede sigteramme med transportbånd og sigtesold. Se næste afsnit.

4. Opstilling og nedtagning af anlæg

Opstilling og nedtagning af anlægget er en proces der kan tage op til 1 dag at gennemføre, men de 2-3 Meldgaard medarbejdere der i forvejen har stor erfaring i opstilling og drift af sorteringsanlæg, fik hurtigt opbygget en god rutine for denne proces, og processen er nu beskrevet i brugsanvisningen for maskinen.

Ovenævnte beskriver test i forhold til selve driften med anlægget og anlæggets funktion. I afsnit 4.2.2 gøres rede for resultaterne af frasorteringen af metaller.

4.2.1 Behov for redesign af anlæg

Testkørslerne viste behov for følgende designændringer:

Forkerte dimensioner på sigtesold i trampolinsigte:

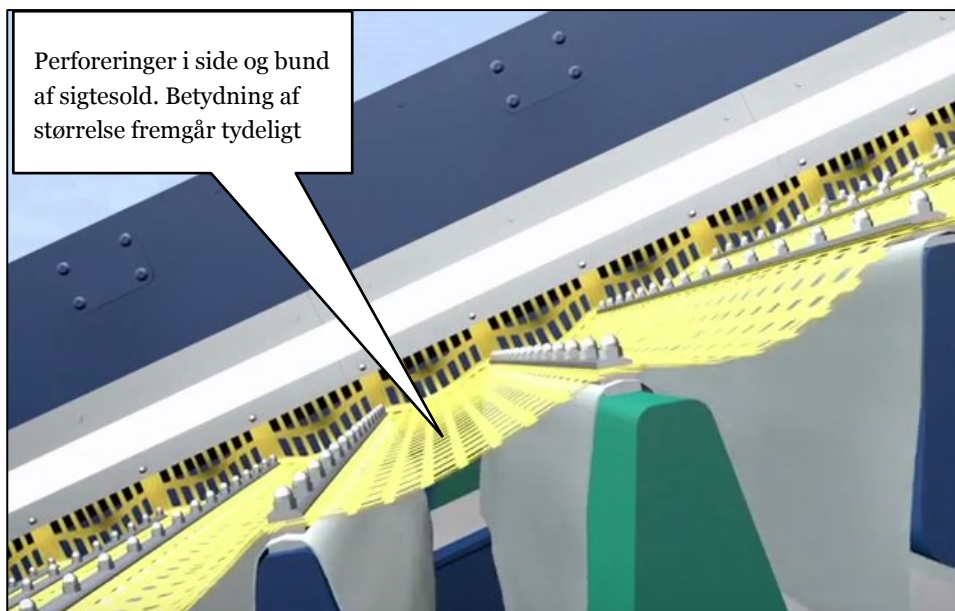
Da trampolinsigten med sigtesolde blev bestilt var det i dialogen med Hein Lehmann fastlagt, at soldene skulle have perforeringer med 3x3 mm. Denne parameter var så indlysende, at det i konstruktionsfasen ikke blev kontrolleret, om de monterede solde havde denne dimension, men i stedet blev sigten blot monteret.

Fejlen opdages ved, at sigten sorterer alt for meget slagge fra, og vi opdager så, at perforeringer ikke er 3x3 mm men i stedet 6x30 mm. Dermed er det indlysende at sorteringen ikke ville fungere. Figur 18 og 19 viser fotos af den sigtesold, der i første omgang blev leveret.

Fejlen blev analyseret sammen med leverandøren og sigten fik hos Hein Lehmann monteret de korrekte solde med perforeringer i 3x3 mm, og dernæst kunne testforsøg fortsætte efter montering af denne.

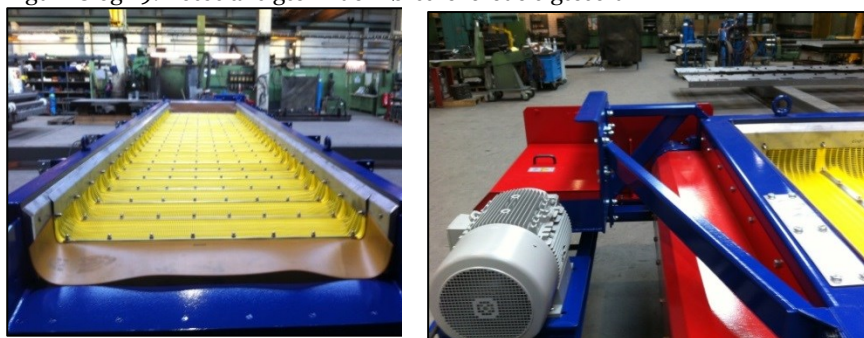
Figur 17 viser et udsnit af en sigtesold.

Figur 17: Udsnit af sigtesold, der viser perforeringer (ikke den anvendte)



Kilde: Meldgaard Recycling A/S & Hein Lehmann GmbH/Liwell

Figur 18 og 19: Fotos af sigten i den først leverede sigtesold



Kilde: Meldgaard Recycling A/S

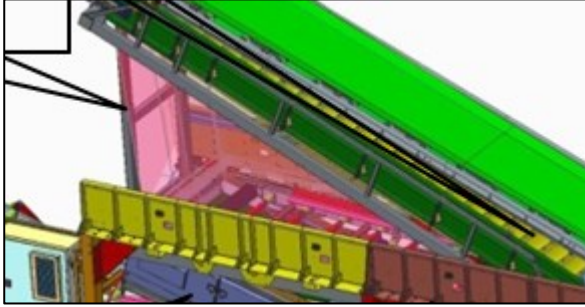
Støvpåvirkning af omgivelserne:

Pga. støv er der kommet ekstra afskærmninger på. Der har dog været tale om småjusteringer, som ikke har betydet noget i forhold til anlæggets evne til at lukke sig til den kompakte del.

Gardinet er dog en sliddel, der jævnligt må repareres eller udskiftes.

For at supplere gardinet (jf. figur 20), er der på produktbåndet i bunden monteret vanddyser, der mindsker støvudvikling fra de slagge, der er kommet igennem anlægget, og derfor er meget fint.

Figur 20: Udklip af figur 12, der viser gardin (mørkerøde område)



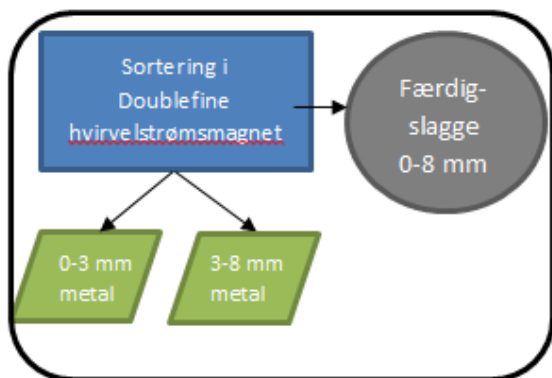
Kilde: Meldgaard Recycling A/S & SB Engineering ApS

4.2.2 Godkendelse af anlæg på basis af testforsøg

Efter anlægget var færdigdesignet viste testperioden, at anlægget sagtens kunne generere pæne mængder af de 2 fraktioner <3 mm og >3 mm. Det afhænger dog i stor grad af, om slaggen var tilstrækkeligt tør til at det ikke klumpede i anlægget.

Nedenstående figur 21 viser principskitse for sorteringen af 0-8 mm slagge-fraktionen samt fotos af den færdigsorterede slaggefraktion og metalfraction.

Figur 21: Principskitse for sortering i Double Fine anlægget samt fotos af de færdigsorterede fraktioner.



Færdigsorteret slaggefraktion 0-8 mm:



Færdigsorteret ikke magnetisk metalfraction 3-8 mm:



Herunder i tabel 2 ses en opsamlingen af testkørslernes resultater.

Ved testkørslerne er slaggen først kørt igennem det normale sorteringsanlæg, hvor ikke magnetiske metaller i 8-50 mm er frasorteret. Dernæst er slaggen kørt igennem det nye Doublefine-anlæg, hvor ikke magnetisk metal i fraktionen 0-8 mm er frasorteret. I tabel 2's højre kolonne er metalmængderne summeret op.

I tabellen er beskrevet mængden af udsorteret metal på det "normale" anlæg i de første kolonner og i de næste kolonner vises data fra Doublefine-anlægget.

Oversigten viser et nogenlunde stabilt udtræk af ikke magnetiske metaller fra Doublefine, hvor der udtrækkes metalmængder på 0,3-0,5 %-point yderligere set i forhold til den totale mængde slagge.

Tabel 2: Resultater af testsorteringerne

		Første sortering med "Normalt" anlæg		Efterfølgende sortering med Doublefine-anlæg				
UGE	Rå-slagge (ton)	8-50 mm metalfraktion (ton)	8-50 mm metal-fraktion (%-andel af slaggen)	<3 mm metal-fraktion (ton)	3-8 mm metalfraktion (ton)	0-8 mm metalfraktion (%-andel af slaggen)	Total ikke magnetisk metal i slaggen (%)	Note
45	4814	83,6	1,74	2,85	15,15	0,37	2,11	"Tør" slagge
46	0	0	0	0	0	0	0	Våd slagge, derfor ingen resultater
47	2953	70,6	2,39	1,35	11,95	0,45	2,84	"Tør" slagge
48								Tilpasninger Double Fine støtteben mv
49	5165	114	2,21	3,3	13,85	0,33	2,54	"Tør" slagge
50	5083	112	2,20	0	14,45	0,28	2,49	"Tør" slagge
Gen nem snit			2,13			0,35	2,47	

Kilde: Meldgaard Recycling A/S.

Dermed opnås i gennemsnit en forøgelse af udsorteringsgraden af metaller fra råslaggen på i gennemsnit 0,35 %-point, og dermed leves der op til det første opstillede succeskriterie på udsortering af 0,3 %-point mere metal.

Det andet succeskriterie i projektet om at andelen af Au, Ag, Cu & Zn udgør mindst 40 % af de ekstra udvundne ikke magnetiske metaller, har analyser vist ikke helt at være opnået, men niveauet vurderes at være på et tilfredsstillende højt niveau.

Analyser har vist at andelen af Au, Ag, Cu og Zn udgør cirka 37 % af metalfraktionen i den udsorterede 0-8 mm fraktion, og dermed opnås næsten de ønskede 40 %.

Anlægget blev på den basis godkendt af projektledelsen.

Anvendelse af metalfraktionerne:

Dernæst måtte analyser vise, hvor rene de fraserterede metalfraktioner var og hvilke metaller de indeholdt (forventeligt bl.a. Cu, Ag, Au og Zn), da det har en betydning for afsætningsprisen. De fraserterede metalfraktioner blev sendt til vores faste samarbejdspartner, der har stor erfaring med yderligere fraktionering af blandet metal.

Vurdering af metalfraktion <3 mm.:

Analyser viste desværre, at 0-3 mm fraktionen indeholdt så store mængder slaggestøv (80-90 %), at den ikke var rentabel at afsætte. Uanset om denne fraktion måtte have et højt indhold af værdifulde metaller, så er aftagerne typisk ikke interesseret i fraktionen, da den høje mængde af små slaggekorn belaster deres fraktionering af metaller fra slaggen.

NB: Nyeste undersøgelse viser dog, at der er mulighed for at finde afsætningsmuligheder også for denne fraktion, så metalfraktionen heri kan udnyttes optimalt til genanvendelse. De potentielle samarbejdspartnere arbejder med sorteringsmetoder, der anvender kombinationer af luftstrømme og sigter som separationsmetoder, og er begyndt at vise interessante resultater. Der kommer stadig flere på banen og Meldgaard Recycling A/S er i dialog med flere om et muligt samarbejde.

Vurdering af metalfraktion >3 mm.:

Analyser hos vores samarbejdspartner viste mere opløftende resultater for metalfraktionen > 3 mm, idet fraktionen har et noget lavere indhold af slaggestøv (40-60 %), mens metallet består af op til cirka 62,5 % aluminium og ca. 37,5 % metaller (blandt andet metallerne Cu, Zn, Ag og Au). Dette gør denne fraktion attraktiv at afsætte til genanvendelse.

5. Projektets resultater

Designprocessen for anlægget har været meget lang, og selv om der har været tænkt og overvejet mange løsningsmodeller, er det ved først ved dette projekt, at der har været tilstrækkelige ressourcer til at finde en god løsning.

Resultatet af projektet er et anlæg, der kan frasortere og finfraktionere på 0-8 mm slaggefraktionen og øge metaludvindingsprocenten, og overordnet set er projektet en rimelig succes.

Vi har dog stadig problemer på grund af fugtighed i slaggen, da det kan medføre, at slaggen klumper sammen. Det kan afhjælpes ved at tilpasse sorteringstidspunktet til de rette vejrforhold, og desuden kan milernes opbygning også mindske fugtigheden i slaggen.

Målsætninger for projektet var:

1. At få 0,5%-point flere metaller ud af slaggerne i forhold til i dag
2. Den øgede udvinding af metaller udgøres særligt af følgende metaller: Cu, Ag, Au, Al og Zn)

Ad 1: Test af det færdige anlæg viste, at vi i gennemsnit opnåede en forøgelse af udsortering af metalfraktionen på 0,35 %-point og dermed leveres der op til det opstillede succeskriterie på 0,3 %-point mere metal, uden at målsætningen dog helt blev nået.

Ad 2: Analyse viser, at der kan udvindes både aluminium og Cu, Ag, Au og Zn fra denne nye fraktion dog i en variabel mængde.

Succeskriteriet for mål nr. 1 var at få 0,3 %-point flere metaller ud af slaggerne i forhold til i dag. Resultatet er cirka 0,35 %-point, således at udtagningsprocenten for metaller er steget fra ca. 2,13 % til ca. 2,47 % (svarer til 3,4 tons mere ikke-magnetisk metal ud af 1000 tons slagge). Procenten er afhængig af fugtindhold, da det har vist sig, at anlægget er udfordret, hvis materialet er for vådt. Vi vil derfor arbejde videre med at få maskinen til at virke optimalt under disse forhold eller sørge for, at vores materiale fremover er tilstrækkeligt tørt. Allerede nu har anlægget dog et stort forretningspotentiale, idet vi nu kan udvinde mere af de ikke-magnetiske metalfraktioner fra slagge og dermed et større indhold af tungmetaller (f.eks. Cu, Ag, Au, Al og Zn). Metallerne er alle på en form så vores aftagere kan fraktionere og genanvende dem.

Succeskriteriet for mål nr. 2 var, at andelen af tungmetaller udgjorde mindst 40% af metalfraktionen. Vi har sendt 2 læs metaller (i alt 50 tons) til analyse, og det har for disse læs vist sig, at når urenheder er sorteret fra (40-60 % slaggestøv), er der ca. 62,5% aluminium og ca. 37,5% tungmetaller i fraktionen. Vi har således ikke helt nået målsætningen, men løsningen har dog stadig et stort forretningspotentiale.

5.1 Formidling af testresultater – herunder optimering af produktionsprocessen

Formidling har dels foregået via forskellige foredrag, og ellers i dialog med kommende/potentielle kunder, som generelt er meget interesseret i de økonomiske og miljømæssige perspektiver, der er i mulighederne for frasortering af >3 mm-metalfractionen.

Selv om projektet er afsluttet, arbejder Meldgaard stadig på at kunne finde afsætning for den helt fine metalfraction (0-3 mm), og indtil den er fundet afventer vi med yderligere formidling i brancheblade osv.

6. Konklusion

Det er lykkedes at designe og opbygge et sorteringsanlæg, som er i stand til at øge udsorteringen af ikke-jernholdigt metal fra slagge.

Dette har været hovedformålet med projektet, og når man ser på mængderne af fraserteret metal, er succeskriterierne for projektet også delvist opfyldt.

Projektforløbet kan dog desværre ikke betegnes som en fuldstændig succes, da projektet løb ind i flere forskellige problemstillinger, som var ikke var mulige at forudsige inden projektstart.

Selve designfasen i projektet er dog generelt gået som forventet. Dette var en opgave, vi mente at have kompetencerne til, idet Meldgaard har medvirket til udvikling og design af efterhånden en lang række sorteringsanlæg. Det var næsten givet, at der ville opstå udfordringer, som designfasen ikke kunne afdække, men netop derfor var testfasen væsentlig.

De problemer, der opstod umiddelbart efter designfasen, burde dog have været undgået, men skyldes fejl i kommunikationen mellem underleverandørerne og Meldgaard.

Da anlægget var færdigt, opstod der flere problemstillinger, som forsinkede projektet, og som affødte designændringer, dog heldigvis uden effekt på muligheden for at få anlægget bygget.

Testene viste f.eks. en banal fejl med forkerte sigtesolde, hvor materialet så at sige løb lige igennem på grund for store perforeringer. Denne fejl burde være opdaget ved modtagekontrol af delkomponenter, hvilket Meldgaard i den grad har taget ved lære af.

De øvrige problemstillinger under testkørsel handlede dels om behov for mindre konstruktionsændringer men primært om udfordringer med slaggens vandindhold og renheden og anvendelse af den helt fine metalfraktion.

Det er ikke ukendt at vandindhold i slagge har en betydning for sortering af slagge, men dette projekt viste meget tydeligt, at for den helt fine metalfraktion (<3 mm) havde et stort vandindhold en meget stor betydning for anlæggets evne til at frasortere denne fraktion.

De efterfølgende analyser af de fraserterede metalfraktioner viste desværre, at fraktioner mindre end 3 mm ikke er anvendelige til oparbejdning på grund af for stort indhold af slaggestøv, og derfor har Meldgaard endnu ikke fundet afsætningsmuligheder for denne fraktion, men der researches fortsat efter mulige løsninger.

Det er dog glædeligt, at metalfractionen >3 mm har et tilpas stort indhold af både aluminium, tung- og ædelmetaller, så der er gode afsætningsmuligheder for denne fraktion.

Analyser viser, at vi i store træk har nået vores succeskriterier med frasortering af en øget mængde metal fra slaggen, en både økonomisk og miljømæssig gevinst.

7. Referencer

Kilder:

1. Oplæg på DAKOFA Seminar 28. august 2013 v/Kim Crillesen, I/S Vestforbrænding
2. Oplæg på DAKOFA Seminar 28. august 2013 v/Jens Kallesøe, Afatek A/
3. Transportministeriets Bekendtgørelse nr. 1328 af 10/12/2014 om særtransporter
4. Imro Maschinenbau GmbH, Landwehrstraße 2, 97215 Uffenheim, Tyskland
5. Meldgaard Handel A/S & Spaleck GmbH & Co.
6. Hein Lehmann GmbH (Liwell), Alte Untergath 40, 47805 Krefeld, Tyskland
7. SB Engineering ApS, Adelvej 4, 6823 Ansager
8. Meldgaard Recycling A/S
9. SAF Danmark ApS, Fabriksvej 18, 6000 Kolding
10. Sims M+R GmbH, Rathenau Strasse 10, 59192 Bergkamen, Tyskland

Optimering af slaggesortering med henblik på større udvinding af metaller

Formålet med projektet har været at udvikle et slaggesorteringsanlæg, der kan frasortere finfraktionen på 0-8 mm og øge udvindingen af ikke-magnetiske metaller (deles typisk op i "Heavyies" (Au, Ag, Cu & Zn) og aluminium) fra slagge fra affaldsforbrænding.

Det er lykkedes at designe og opbygge et sorteringsanlæg, som er i stand til at øge udsorteringen af ikke-jernholdigt metal fra slagge.

Metalfraktionen >3 mm har et tilpas stort indhold af både aluminium, tung- og ædelmetaller, så der er gode afsætningsmuligheder for denne fraktion.

Det er ikke ukendt at vandindhold i slagge har en betydning for sortering af slagge, men dette projekt viste meget tydeligt, at for den helt fine metalfraktion (<3 mm) havde et stort vandindhold en meget stor betydning for anlæggets evne til at frasortere denne fraktion.

Analyser viste, at den fine metalfraktion (< 3 mm) indeholdt så store mængder slaggestøv (80-90 %), at den ikke er rentabel at afsætte. Uanset om denne fraktion måtte have et højt indhold af værdifulde metaller, så er aftagerne typisk ikke interesseret i fraktionen, da den høje mængde af små slaggekorn belaster deres fraktionering af metaller fra slaggen. Viderebearbejdning af fraktionen med kombinationer af luftstrømme og sigter kan dog være vejen frem til at skabe en renere fraktion.

