

Urban-X-projektet: Karakterisering af slagge og flyveaske fra affaldsforbrændingsanlægget Amager Bakke Overvejelser om råstofpotentialer 2. udgave

Rune J. Clausen, Per Kalvig og Jonas Nedenskov

MiMa rapport 2019/1



Urban-X-projektet:
Karakterisering af slagge og flyveaske fra
affaldsforbrændingsanlægget Amager Bakke
Overvejelser om råstofpotentialer
2. udgave

Rune J. Clausen, Per Kalvig og Jonas Nedenskov

MiMa rapport 2019/1

2. udgave

September 2019

Rettelser ift. 1. udgave

Figur 1:	Placering af el-filter og kedler er korrigeret.
Tabel 23 og 24:	Data for Pb og Cu er korrigeret.
Figur 25:	Betegnelser ændret til ferromagnetisk og diamagnetisk.
Figur 61 og 62:	Figurer flyttet til afsnit 6.6 og tekster korrigeret.
Figur 63 og 64:	Akse-legender, samt data for Pb og Cu er korrigeret.
Figur 65 og 67:	Al/Cu plot er korrigeret.
Figur 72:	Sproglige korrektioner.
Tabel 37:	Data for Pb er korrigeret.
Tabel 40:	Data for Pb og Cu er korrigeret.
Tabel 41:	Data for Pb og Cu er korrigeret.
Tabel 42:	Data for Pb er tilføjet. Data for Cd korrigeret

Der er desuden udført sproglige og grammatiske korrektioner i et mindre omfang.

Indhold

Forord	6
Summary	7
1. Formål	8
2. Introduktion	9
2.1 Affaldsforbrænding	10
2.2 Biprodukter: slagge og flyveaske	10
3. Prøvetagning	14
3.1 Overvejelser og prøvetagningssted	14
3.1.1 Prøvetagningssted for slagge.....	15
3.1.2 Prøvetagningssted for flyveaske	15
3.2 Prøvetagningsmetoder	17
3.2.1 Prøvetagning af slagge	17
3.2.2 Prøvetagning af flyveaske	22
3.2.3 Fremstilling af kompositprøve (splitning til kompositprøve)	22
3.3 Nummerering af prøvemateriale	23
4. Prøvebehandling	26
4.1 Slagge	26
4.1.1 Størrelsessortering af slagge	26
4.1.2 Indledende forsøg med rensning af slaggefragmenter (>2 mm)	29
4.2 Flyveaske	33
5. Karakteriseringsmetoder	34
5.1 Overblik over karakteriseringen af slaggefragmenter	34
5.2 Karakteriseringsmetoder til slaggefragmenter >2 mm	34
5.2.1 Permanent magnet.....	34
5.2.2 Metaldetektor	36
5.2.3 Eddy-current/Lenz-effekt	37
5.2.4 Håndholdt X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF).....	38
5.2.5 Scanning Electron Microscope (SEM)	40
5.3 Behandling af prøver til kemiske analyser	40
5.3.1 Prøvebehandling i analyselaboratoriet.....	41
5.3.2 Analysemetoder.....	42
5.3.3 Delprøve og detektionsgrænser	42
6. Karakterisering af slaggen	44

6.1	Kornstørrelsesfordeling	44
6.2	Fragmentsammensætning (2-63 mm)	44
6.2.1	Magnetisk metal (ferromagnetisk metal)	49
6.2.2	Glas	51
6.2.3	Bygge- og keramiske materialer	53
6.2.4	Ikke-magnetisk metal (diamagnetisk metal).....	54
6.2.5	Slaggemelte.....	56
6.3	Fragmentdeformitet i relation til smeltepunktstemperaturer (4-63 mm)	58
6.4	Slaggemeltens kemiske og mineralogiske sammensætning	59
6.4.1	Mineraltypen 'matrix'	61
6.5	Grundstofsammensætning.....	63
6.5.1	Kemiske korrelationer.....	66
6.6	Mineralogi (0-2 mm)	71
7.	Karakteriseringen af flyveasken	74
7.1	Totalkemi og varians	74
7.2	Kemiske korrelationer	76
8.	Numerisk model for affaldssammensætningen	83
8.1	Metodeovervejelser	83
8.2	Om den numeriske model.....	86
8.3	Referencedata – affaldstypernes kemiske sammensætning efter forbrænding....	90
8.4	Måledata – slaggen og flyveaskens kemiske sammensætning	90
8.5	Databehandling	91
8.6	Resultater	92
8.7	Sammenligning	92
8.8	Beregningsmæssig usikkerhed.....	94
8.9	Konklusion og anbefalinger.....	94
9.	Diskussion af råstofpotentialet	96
9.1	Slaggens materialekomponenter (2-63 mm)	97
9.1.1	Bygge- og keramiske materialer	98
9.1.2	Glas	98
9.1.3	Ferromagnetisk metal.....	99
9.1.4	Ikke-magnetisk metal	99
9.1.5	Slaggemelte.....	100
9.1.6	<2 mm-fraktion	101
9.2	Grundstofferne i slagge og flyveaske	101
9.2.1	Hovedelementer – en begrænset indgangsvinkel til ressourcevurdering	102
9.2.2	Grundstoffer forhøjet i forhold til Jordens skorpe – flere ressourcepotentialer	103
9.2.3	Vurderinger af indholdet af kritiske råstoffer i slagge og flyveaske	104
9.3	Grundstofindhold i udvalgte fraktioner af slagge	106
9.3.1	Slaggemeltefragmenter i 2-63 mm slagge	106
9.3.2	Identificerede fragmenter i 2-63 mm slagge	106
9.3.3	Slagge – 0-2 mm-fraktion	106
9.4	Flyveaske	107

9.4.1	Den kemiske sammensætning af kedelasken og elfilterasken	108
9.4.2	Forholdet mellem kedelaske og elfilteraske	111
9.4.3	Råstofpotentialet.....	111
9.5	Metallurgiske udfordringer.....	114
9.5.1	Flyveasken.....	117
9.5.2	Slaggen.....	117
10.	Konklusion	118
10.1	Prøvegrundlag og testmetoder	118
10.2	Slaggeresultater	118
1.900 ton pr. år	119
10.3	Flyveaskeresultater	119
10.4	Modellering af affaldssammensætningen	120

Forord

Blandt alle råstoffer er de mineralske råstoffer særligt udfordret med hensyn til bæredygtighed, dels fordi de ikke gendannes, og dels fordi der er stigende efterspørgsel på de fleste af dem. For at kunne øge genanvendelsen af disse råstoffer, og derved også øge forsynings-sikkerheden, er det fundamentalt vigtigt, at der opbygges viden om alle strømme af mineralske råstoffer i samfundet – også dem som ofte omtales som affald. Der er en bred politisk erkendelse af, at det er nødvendigt at øge bæredygtigheden i råstofsektoren i form af øget genanvendelse og reduktion af materialetab ved produktionsprocesser. Dette er bl.a. udtrykt i FN's verdensmål for bæredygtig udvikling og nationalt gennem en række regeringsinitiativer og -strategier.

Med dette udgangspunkt igangsatte Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa) og Amager Ressourcecenter (ARC) i januar 2017 projektet Urban-X, hvis resultater afrapporteres i denne rapport. Formålet med Urban-X-projektet var at undersøge, om der i slagge og flyveaske fra ARC's Waste-to-Energy-anlæg (WtE-anlæg), Amager Bakke, er oversete råstofstrømme, som, på kommercielt grundlag, kan bidrage til en øget bæredygtighed af de mineralske råstoffer. Resultaterne fra Urban-X-projektet tyder på, at dette er tilfældet, og en række muligheder for at optimere genvindingen af slagge og flyveaske, som vil kunne bidrage til at mindske tabene i de cirkulære materialekredsløb, udpeges.

I arbejdet med Urban-X-projektet har vi fået uvurderlig hjælp fra mange af vores kolleger på ARC og GEUS, som har bidraget med både faglig sparring og aktiv deltagelse. Vi vil gerne rette en særlig tak til Marija Blažanović for hendes indsats med at klassificere og dokumentere slaggefragmenter, samt til Tonny B. Thomsen, Nynke Keulen og Sebastian Næsby Malkki, alle fra GEUS, for råd og teknisk hjælp til CC-SEM og ICP-karakteriseringerne, ligesom Frederik Tevil fra ARC har bistået med råd og hjælp til prøvetagningen.

København den 7. maj 2019

Rune J. Clausen, Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer
Per Kalvig, Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer
Jonas Nedenskov, Amager Ressourcecenter

Summary

The Center for Minerals & Materials (MiMa), in collaboration with Amager Resource Center (ARC), investigated the composition of bottom ash and fly ash from ARC's Waste-to-Energy plant, Amager Bakke. The plant generates energy based on residual waste from citizens and businesses from five municipalities in the greater Copenhagen area. The purpose of the study was to: (i) assess whether the remnants contain undiscovered raw material streams that are not currently utilized, and (ii) develop a method to determine the initial composition of the waste based on the composition of the bottom ash and fly ash. In 2017, 30 samples of slag and fly ash were collected; representing a time series of 31 days. The bottom ash samples are collected directly from the conveyor belt that transports the waste out of the oven; the fly ash is collected from a delivery-tube system at the point where it enters a storage silo. Collecting representative samples from a very heterogeneous bottom ash is a challenge that may affect the certainty of the obtained results. Collecting representative samples from such a heterogeneous medium such as slag will affect the accuracy of results obtained and this uncertainty should be factored into any resource estimation made using these results.

The bottom ash is evaluated by two criteria: (i) visual sorting of components and (ii) chemical analysis. Visual sorting identified six main groups of raw material: building and chemical materials, glass, non-magnetic metals, magnetic metals, smelting slag and a fine-grained fraction (<2 mm). The chemical analyses of the fine-grained fraction show elevated content of antimony and gold as well as a number of heavy metals. MiMa propose changes to the process routines in order to utilize the metals in this fraction and to reduce the amount of environmentally harmful elements in the residual slag before it is utilized in, for example, construction projects. It is also expected that the process routines suggested by MiMa, will optimize the separation of the metal fractions and increase the potential for sorting of the glass fraction.

Chemical analyses of the fly ash have shown that it consists of two partial streams: (i) ash from the electro static filter and (ii) ash from the boiler (boiler ash), each of which has different chemical signatures. The study showed that particularly zinc is present in high concentrations (ranging from 1.7-7.2 %; average 3.5 %). The ash from the electricity filter contains the highest concentration of zinc and environmentally harmful heavy metals. By separating the two streams of fly ash, extraction of commercially useful elements might be possible, while at the same time, reducing the volume of fly ash that will end up in landfill.

MiMa has developed a numerical model that utilizes data from analysis of the chemical composition of the bottom ash and fly ash to estimate the composition of the waste that is incinerated. This tool allows monitoring of the dynamics of household waste, and once completed, allows for targeted sorting campaigns.

1. Formål

Materialer i de cirkulære systemer skyldes i vid udstrækning utilstrækkeligt kendskab til potentielle råstofstrømme. Med henblik på at sikre det optimale grundlag til vurdering af mulighederne for ressourceoptimering af slagge og flyveaske fra Amager Ressourcecenters (ARC) nye Waste-to-Energy-anlæg (WtE), Amager Bakke, har Center for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa) i samarbejde med ARC gennemført en række karakteriseringer af slagge og flyveaske. Disse undersøgelser er gennemført i regi af Urban-X-projektet, som afrapporteres i denne rapport.

Allerede i dag udnyttes dele af slaggerne fra Amager Bakke og andre forbrændingsanlæg. Efter en modningsperiode magnetiseres slaggerne, så både magnetiske og diamagnetiske metaller sorteres ud. Den resterende del bestående af finkornet materiale og ikke-magnetiske metaller genanvendes som 'stabilgrus' ved anlægsopgaver. For at forbedre bæredygtigheden og mindske tabene i materialekredsløbene er det nødvendigt at få et bedre kendskab til slaggernes bestanddele, fordi en grundig karakterisering af slagge og flyveaske er forudsætningen for, at der kan foretages en vurdering af, om der er andre fraktioner, som kan separeres ud og dermed øge både bæredygtighed og økonomi, bedre end det sker i dag.

Ud over at tilvejebringe mere viden om ressourcepotentialerne i slagge og flyveaske havde Urban-X-projektet også til formål at udvikle en numerisk model til vurdering af affaldets op-rindelse; dette skulle ske på basis af slagge og flyveaskens kemiske sammensætning.

2. Introduktion

Verden oplever en stærk stigende efterspørgsel på mineralske råstoffer, og der er derfor et stort behov for at udnytte ressourcerne mere effektivt end man gør i dag. Genanvendelse af mineralske råstoffer – ofte benævnt 'urban mining' – er et vigtigt bidrag til at dække samfundets behov for råstoffer og til at sikre en effektiv og bæredygtig ressourceanvendelse. Dette forudsætter imidlertid, at der etableres viden om disse mulige ressourcer, deres sammensætning, mængde og beliggenhed. Denne fase af undersøgelserne betegner vi som 'urban exploration', og den skal, i lighed med den mineralefterforskning som udføres inden der igangsættes minedrift, være med til at afgøre, om det teknisk og økonomisk er muligt at udnytte ressourcen.

Center for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa) og Amager Ressourcecenter (ARC) har gennemført urban exploration for affaldsstrømmene fra Amager Bakke-anlægget, hvor hovedfokus var en detaljeret kortlægning af slagge og flyveaske. Resultaterne af denne undersøgelse fremlægges i nærværende rapport. Desuden fremlægges, på basis af slaggernes og flyveaskens kemiske sammensætning, en numerisk model til bestemmelse af affaldssammensætningen.

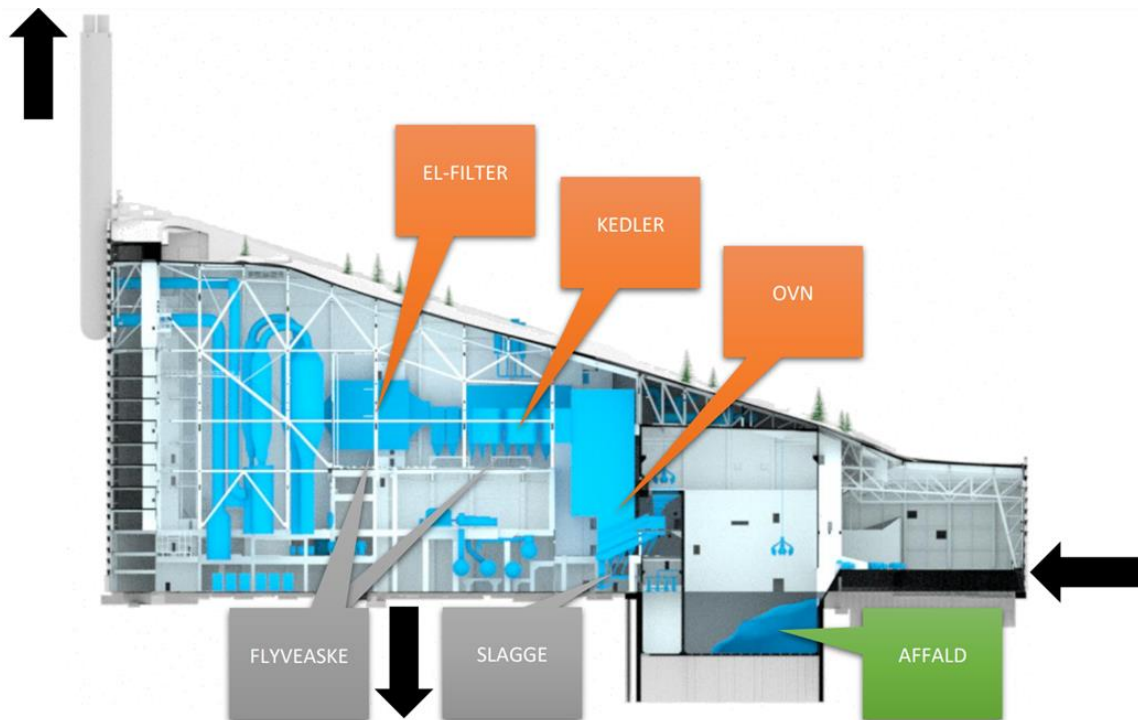
Amager Bakke-anlægget forbrænder husholdningsaffald indsamlet via kommunale ordninger i de fem kommuner (København, Frederiksberg, Hvidovre, Tårnby og Dragør), som ejer Amager Bakke, samt brændbare fraktioner fra kommunale genbrugsstationer og affald fra virksomheder. Formålet med forbrænding af affald er at producere energi. De ikke-brændbare dele af affaldet omdannes under forbrændingsprocessen til slagge og flyveaske, som begge er potentielle råstofstrømme. Det er disse råstofstrømme af slagge og flyveaske som er undersøgt i Urban-X-projektet. I lighed med andre danske forbrændingsanlæg genvindes allerede en del metaller fra slaggerne, og de finkornede dele af slaggerne anvendes som stabilgrus ved særlige anlægsopgaver; flyveasken nyttiggøres/deponeres almindeligvis. Både slagge og flyveaske har gennem de senere år været genstand for mange undersøgelser for at optimere ressourceudnyttelsen og dermed forbedre råstofbæredygtigheden.

Sammensætningen af både husholdningsaffald og industriaffald er dynamiske og reflekterer årstidsvariationer, geografiske forskelle og set over lang tid også ændringer i forbrugermønstre. Råstofpotentialet i slagge og flyveaske er underlagt disse dynamikker.

Affaldets sammensætning er bestemmende for både brændværdien og den kemiske sammensætning af slagge og flyveaske – og dermed også bestemmende for materialets resourcepotentiale. For at sikre en optimal drift af forbrændingsanlægget og optimal udnyttelse af affaldsslaggernes sammensætning er vurderinger af affaldssammensætningen vigtig. Derfor gennemfører ARC med års mellemrum affaldsanalyser på det indsamlede affald. Disse undersøgelser udføres som stikprøveundersøgelser og manuel sortering af skraldebiler. Sådanne analyser er udfordret på repræsentativitet og pris. Som led i Urban-X-projektet er der udviklet en numerisk model som på basis af slaggernes og flyveaskens kemiske sammensætning kan estimere de mest sandsynlige affaldsfraktioner. Efter yderligere udvikling er der potentiale til, at gøre dette mere præcist og billigere end den manuelle sorteringsmetode, som benyttes nu.

2.1 Affaldsforbrænding

I Figur 1 ses en principskitse for forbrændingen i Amager Bakkes WtE-anlæg med angivelse af de tekniske hovedkomponenter og materialestrømme. 'Brændstoffet' i anlægget er husholdnings- og industriaffald, der omtales som affald, fordi forbrugerne ser det som sådan – det er kasseret. Men i anlægget er det et energiråstof, og efter forbrænding er både slagge og flyveaske potentielle råstofkilder.



Figur 1. Principskitse af Amager Bakkes WtE-anlæg med markering af prøvetagningssteder (kilde: ARC).

Affaldets sammensætning er som tidligere nævnt dynamisk over både korte og lange tidsperioder; i Tabel 1 ses nogle årsvariationer for affaldets hovedbestanddele. De daglige variationer søges udlignet ved kontinuerlig opblanding i affaldssiloen. Denne problematik behandles yderligere i kapitel 3 om prøvetagning og i kapitel 8, hvor den numeriske model til kilde-sortering beskrives.

2.2 Biprodukter: slagge og flyveaske

De største biprodukter fra affaldsforbrænding er slagge og flyveaske. Begge biprodukter er meget heterogene i deres sammensætninger; såvel kemisk som materialefysisk. De heterogene slagge ses i Figur 2 og flyveasken i Figur 3.

Tabel 1. Affaldets sammensætning ved manuelle undersøgelser af materialet i ARC fra 2012, 2014 og 2016, samt for Danmark.

	ARC 2012	ARC 2014	ARC 2016	DK Riber <i>et al.</i> 2009
Papir og pap	23,4	21,0	19,9	24,4
Træ	14,1	16,3	19,0	0,3
Plast + gummi + tekstiler + læder	15,3	14,1	13,2	1,7
Husholdnings- og haveaffald	32,2	32,9	32,1	55,1
WEEE* + batterier	0,3	0,3	0,3	0,4 + 0,7
Glas + byggematerialer	11,4	11,6	11,7	11,2
Jern	3,2	3,0	2,8	1,7
Aluminium	1,1	1,1	1,1	0,8

*Elektronikaffald



Figur 2. Heterogent slaggemateriale fra affaldsforbrændingen på Amager Bakke (foto: MiMa).

Slaggerne – ofte blot benævnt slagge – er det uforbrændte stof i bunden af ovnen. Slagge består hovedsageligt af fragmenter med en kornstørrelsesfordeling svarende nogenlunde til grus (<64 mm), men også betydeligt større fragmenter, typisk metal, udgør en del af slaggen. Slagge består af:

- Ikke-omdannede til svagt omdannede fragmenter, som kan genkendes (glasskår, murbrokker og metalprodukter som fx gryder, køkkenvaske, fælge, profiljern, rør).
- Fragmenter som i varierende grad er påvirket af forbrændingsprocessen og nu er forvitrede, oxiderede, deformerede, sintrede og smeltede.
- Helt uigenkendelige fragmenter i form af smeltede klumper.

Fra slaggen foretages der i dag en udsortering af jern og metal til genanvendelse, mens restproduktet nyttiggøres som vejfyld (Figur 4). Som følge af mere effektive separationsmetoder stiger den mængde af metaller fra affaldsslaggen, der genanvendes.



Figur 3. Flyveaske (kilde: EMINERAL A/S).

Flyveasken udfældes fra røggassen idet der sker en naturlig udfældning af aske ved kedlen, der opvarmer vandet, ligesom der sker en aktiv udfældning med elfiltre. Flyveasken er partikulær, typisk mindre end 1 mm. I dag udnyttes kun flyveaskens alkaliske egenskaber. Flyveasken fra Amager Bakke sendes til virksomheden NOAH på øen Langøya i Norge, hvor de alkaliske egenskaber anvendes til at neutralisere syre fra industrien (Figur 5). Neutraliseringsprocessen på Langøya klassificeres af Miljøstyrelsen i Danmark som nyttiggørelse, da flyveasken erstatter kalksten og læsket kalk¹. Slutproduktet fra neutraliseringsprocessen deponeres på Langøya. NOAH, der driver anlægget, har som ambition at genanvende 25 % af det materiale de modtager i 2025². I Danmark pågår der forsøg med at udvinde flyveaskens metaller ved brug af den såkaldte HALOSEP-proces, hvor målet er at den behandlede flyveaske på sigt kan deponeres på danske deponeringsanlæg³, samtidig med at alle produkterne fra processen vil kunne genanvendes. Produkterne vil være (i) et zink-koncentrat til genanvendelse, (ii) salte og (iii) restfraktion, som kan anvendes som tilsætning til cement. Andre behandlingsmetoder, som også er i forsøgsstadiet, er beskrevet i rapporten 'Behandlingsløsninger for flyveaske' (Norsk Energi 2018). Forsøgene går under navne som FLUW A/FLU-REC, OiW/ Norsep, Carbon8/ATC, Ash2salt og ArcFume.

¹ <https://mst.dk/media/93693/klassificering-af-neutraliseringsprocessen-paa-langoeya.pdf>

² <https://langvik.noah.no/behandlingssted-langoya/>

³ www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2015/02/978-87-93283-72-5.pdf



Figur 4. Efter modning og magnetisk separering af slaggerne anvendes dele af materialet som stabilgrus ved vejbygning, www.meldgaard.com.



Figur 5. Et tidligere kalkbrud på øen Langøya i Norge bruges nu som behandlingssted af bl.a. farligt affald fra Danmark, Norge og Sverige, <https://imgur.com/gallery/bIMsM>.

3. Prøvetagning

I forbindelse med udtagning af prøver af slagge og flyveaske til materialekarakterisering er der en række udfordringer, der har betydning for prøvernes repræsentativitet:

- Den kemiske sammensætning af både slagge og flyveaske er dynamisk som følge af affaldets varierende sammensætning og vil afspejle både kort- og langvarige ændringer. Homogeniseringer i affaldssiloen vil kun udjævne de kortvarige variationer i affaldet.
- Slaggefragmenterne varierer i størrelse fra mindre end 1 mm til mere end 1 m, hvilket giver en praktisk udfordring for prøvetagningen.
- Det er kun praktisk/økonomisk muligt, at udtage og analysere på en meget lille mængde i forhold til den samlede produktionsstrøm.

I dette projekt er udfordringer imødekommet ved at gennemføre undersøgelserne på basis af en kompositprøve, som består af et antal delprøver, som efterfølgende er neddelte. En prøve anses for at være repræsentativ, når den er udtaget og behandlet repræsentativt, under forudsætning af:

- At alle delprøver fra det samlede materiale bliver udtaget på en ikke-fejlbehæftet måde og med tilstrækkelig præcision;
- At alle delprøver har samme sandsynlighed for at blive udtaget;
- At delprøverne efterfølgende bliver håndteret, så det ikke ændrer det analytiske resultat, samt
- At metoden er reproducérbar og dokumenteret.

Udtagning af prøver til nærværende analyse er tilstræbt gennemført, så disse betingelser er opfyldt. Alle prøver er behandlet i henhold til Dansk Standard for Repræsentativ prøvetagning DS 3077.

Da slaggen, såvel som flyveasken, udgøres af fragmenter med høj heterogenitet, både mht. stor variation i forhold til størrelse, grundstofsammensætning, materialefysisk karakter og forekomst, følger det, at repræsentativiteten af hver type fragment i en given prøve er meget forskellig. Et samlet meningsfuldt udtryk for repræsentativiteten af de konkrete prøvetagningsmetoder, som er beskrevet i dette kapitel, kan derfor ikke angives.

3.1 Overvejelser og prøvetagningssted

For at sikre en optimal metode til udtagningen af prøver af slagge og flyveaske er der forinden foretaget en række overvejelser:

- Hvor er det praktisk muligt at indsamle prøverne?
 - Mange steder er i udgangspunktet utilgængelige fordi materialestrømmen af forskellige årsager er indkapslet, typisk af helbredsmæssige og sikkerhedsmæssige årsager (varmestråling, støv, mekaniske processer, spild etc.).
- Skal prøverne udtages fra en mile eller fra den lineære materialestrøm?













- Udtagning fra en mile kræver, at der graves et transekt, hvorfra der kan udtages delprøver af hele bunkens dimension. Fordelen ved denne metode er, at der kan prøvetages på én gang. Der er dog tale om en omfattende prøvesamling.
 - Prøvetagning fra en lineær materialestrøm kræver, at der prøvetages over tid for at opnå samme repræsentativitet som ved udtagning fra mile. Det giver en stor fordel i og med, at der indsamles en tidsserie, der bl.a. kan bruges til at vurdere variansen og en eventuel korrelation mellem slagge og flyveaske. Ulempen kan være, at materialet ikke er tilgængeligt på prøvetidspunktet pga. fx driftstop eller almindelig nedregulering af energiproduktionen.
- Er tidsmæssige variationer vigtigst eller er en kompositprøve vigtigst?
 - Hvor lang tidsperiode ønskes vurderet?

3.1.1 Prøvetagningssted for slagge









I WtE-anlægget på Amager Bakke indgår slagge i følgende arbejdsstrin (Figur 6): Slaggen føres efter forbrændingskammeret (1) til afkøling i et vandkar (2). I intervaller på cirka et minut skubbes den akkumulerede mængde slagge ud på et vibratortransportbånd (3), der sender slaggen frem til slagge-siloen (4). I siloen opblander en automatisk grabbe slaggen, der flere gange dagligt læsses på lastbiler (5) (Figur 8), som transporterer slaggen til modningspladsen (6), hvor den aflæsses i miler. I løbet af modningstiden skubbes og kompakteres slaggen flere gange for at minimere pladsbehovet. Efter modningsprocessen læsses (7) slaggen op i et mobilt sorteringsanlæg (8), hvor slaggens dimension igen bliver lineær, inden den ender i sorterede bunker (9), hvoraf noget transporteres (10) til videreforarbejdning, mens andet bruges som stabilgrus til anlægsopgaver. En kompositprøve kan udtages i alle faser, lineære som stationære, se Figur 6, men hver metode har en række fordele og ulemper. For samtidig at kunne prøvetage flyveasken, der tidsmæssigt repræsenterer samme affald og af praktiske hensyn, er det valgt at prøvetage fra transportbåndet (3).

3.1.2 Prøvetagningssted for flyveaske

Flyveaske støver og transporteres derfor i lukkede kredsløb med undertryk. På Amager Bakke er der installeret en prøvetagningsanordning, hvor en metalcylinder føres ind under et 'fald', som er et sted, hvor flyveasken fra et bånd falder ud over kanten før den ender i en knuser og derefter havner i en opsamlingssilo, se Figur 7 og Figur 9. Metalcylinderen er lige så lang som båndet er bredt; derved tilstræbes det at hele materialestrømmens dimension prøvetages samtidigt.

			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Proces-trin												
	Affalds-transport	Silo	Ovn	Vandkøling	Slagge-transportbånd	Silo	Intern transport	Modningsbunke	Opgravning	Sortering	Udsortet materiale	Produkt-transport
	Lineær	Mixing	Omdannelse	Stationær	Lineær	Mixing	Lineær	Stationær	Lineær	Lineær	Stationær	Lineær
		Mixing		Mixing		Mixing	Mixing	Mixing		Mixing	Mixing	
Mængde	20 ton		1 grab	Kontinuerlig		20 ton	20 ton		20 ton		Kontinuerlig	20 ton
Tid		1 uge	10 sek.		1 skub/min.	1 dag		2-3 mdr.	2 dage	1 dag		

Figur 6. Slaggens vej fra forbrændingsprocessen til nye råstoffer. I farver: Angivelse af om slaggen er på en lineær eller stationær form og om den opblandes undervejs. Nederst i figuren: Grove estimater af størrelser og tidsregimer for de enkelte procestrin. Cirklen angiver hvor prøverne er indsamlet.

			1	2	3	4	5	6
Proces-trin								
	Affalds-transport	Silo	Ovn	Kedel	Elfiltre	Transportbånd	Silo	Produkt-transport
	Lineær	Mixing	Omdannelse	Lineær	Lineær	Lineær	Stationær	Stationær
		Mixing				Mixing	Mixing	Mixing
Mængde	20 ton		1 grab	Kontinuerlig				
Tid		1 uge	10 sek.					

Figur 7. Flyveaskens vej fra forbrændingsprocessen til nye råstoffer. I farver: Angivelse af om flyveasken er på en lineær eller stationær form og om den opblandes undervejs. Nederst i figuren: Grove estimater af størrelser og tidsregimer for de enkelte procestrin. Cirklerne angiver hvor prøverne er indsamlet.



Figur 8. Slaggen fra båndet ender i siloen, hentes af grabben og læsses på lastbiler. Dette svarer til (4) og (5) i Figur 6.

3.2 Prøvetagningsmetoder

3.2.1 Prøvetagning af slagge

Til denne undersøgelse er der i 30 ud af 31 sammenhængende dage udtaget daglige slaggeprøver. Prøverne blev indsamlet i november-december 2017. Den aktuelle indsamlingsperiode, med angivelse af weekender, er angivet i Figur 10. Der var ikke indikationer på døgn-relaterede variationer i affaldets sammensætning; derfor blev der ikke foretaget tidsforskudt prøvetagning eller prøvetagning på bestemte tidspunkter af døgnet.

Prøvetagningen blev foretaget direkte fra transportbåndet (Figur 11) som en systematisk prøvetagning af et antal delprøver, som dækker hele slaggens dimension over en given periode. For at have tilstrækkeligt med materiale til at foretage flere forskellige analyser og til eventuelle opfølgende undersøgelser, blev der i den sammenhængende periode på 31 dage udtaget én prøve pr. dag i 30 dage; hver prøve består af fire enkeltprøver. Én af disse prøveserier er efterfølgende samlet til én komposit-dagsprøve, der efterfølgende er splittet ned til den ønskede prøvemængde til brug for materialekarakteriseringen. Hver af de fire dagsprøver udgør omtrent 15 kg prøvemateriale; der er dermed indsamlet omkring 1.800 kg i løbet af prøveperioden.

Den metodiske prøvetagning for slaggerne fra transportbåndet er som følger:

- For at undgå bias blev overfladen af transportbåndet, inden prøvetagning, skrabet fri for eventuelt størknet finkornet materiale.
(fortsættes side 20)



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figur 9. Prøvetagning af flyveaske fra Ovn 1. (a) Pilene viser flyveaskens bevægelse, (b) prøvetager, (c) udtaget flyveaske i det cylinderformede rør, (d) længde og størrelse af en typisk flyveaskeprøve, og (e) indikation af kornstørrelsesfordelingen af den flyveaske der er udtaget.

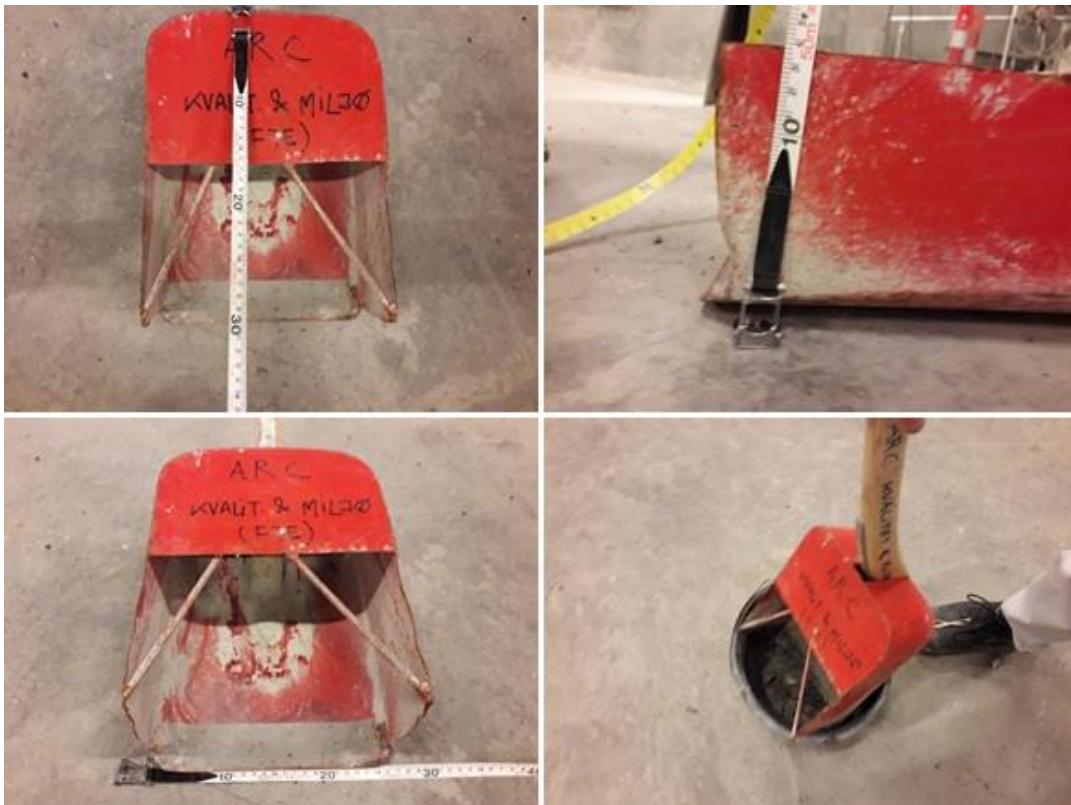
Prøve udtaget	X																															
Ugedag	Torsdag	Freitag	Lørdag	Søndag	Mandag	Tirsdag	Onsdag	Torsdag	Freitag	Lørdag	Søndag	Mandag	Tirsdag	Onsdag	Torsdag	Freitag	Lørdag	Søndag	Mandag	Tirsdag	Onsdag	Torsdag	Freitag	Lørdag	Søndag	Mandag	Tirsdag	Onsdag	Torsdag	Freitag	Lørdag	
Dato	2-11-2017	3-11-2017	4-11-2017	5-11-2017	6-11-2017	7-11-2017	8-11-2017	9-11-2017	10-11-2017	11-11-2017	12-11-2017	13-11-2017	14-11-2017	15-11-2017	16-11-2017	17-11-2017	18-11-2017	19-11-2017	20-11-2017	21-11-2017	22-11-2017	23-11-2017	24-11-2017	25-11-2017	26-11-2017	27-11-2017	28-11-2017	29-11-2017	30-11-2017	1-12-2017	2-12-2017	
	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Figur 10. Strategi for prøvetagning fra vibrorbåndet. I en sammenhængende periode på 31 dage blev der i 30 dage dagligt udtaget en prøve.



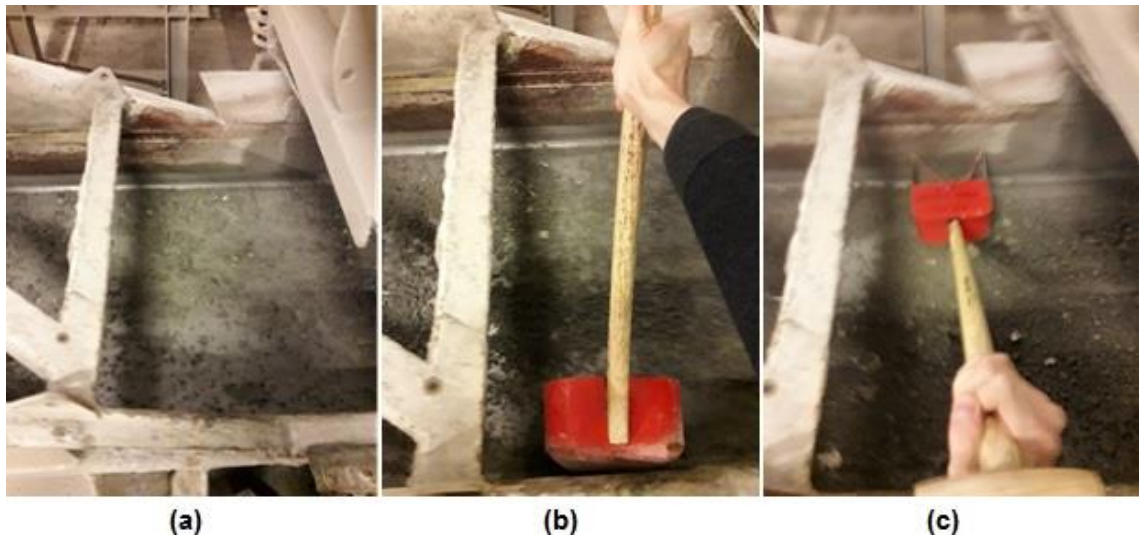
Figur 11. Typisk prøvetagningsområde fra Amager Bakkens WtE-anlæg (punkt 3 i Figur 6). Slaggen falder fra et lukket transportbånd til et åbent transportbånd kort før det ender i slaggesiloen. Bemærk markering af prøvetagningsstedet på det åbne transportbånd. Røde pile markerer slaggens bevægelsesretning.

- Prøvetagning blev foretaget med en håndholdt, specielt fremstillet skovl (Figur 12). Skovlen har høje sider og har dimensionerne 30 x 15 x 25 cm, hvilket betyder, at skovlen har en begrænsning i forhold til, hvor store fragmenter den kan udtage repræsentativt. Som hovedregel skal prøvetagerens dimension skal være minimum 2,5 gange større end fragmentet. Det betyder teoretisk, at det største fragment der kan prøvetages repræsentativt er $15/2,5 = 6$ cm; dog har skovlen en åbning forrest, således at højden ikke er begrænset til 15 cm ved den forreste halvdel af skovlen, ligesom lange fragmenter kan ligge uden for selve skovlens blad. Vi vurderer derfor, at fragmenter op til 6,3 cm er repræsentative, mens større fragmenter må betragtes som ikke-repræsentative 'overstørrelser'.
- Selve prøvetagningen blev foretaget ved at skubbe skovlen fra kanten tættest på prøvetageren og frem til modsatte sides kant, hvor skovlen føres op langs kanten, se Figur 13. Derved tilstræbes det, at prøvetagningen når igennem hele slaggestrømmens dimension på transportbåndet.
- Delprøverne fyldes i en spand med et rumfang på 15 liter, hvilket svarer til ca. 15 kg slagge. Spanden fyldes til kanten, svarende til ca. to hele skovlfulde.
- En fyldt spand udgør prøven, som efterfølgende blev overført til en plastikpose, som blev lagt ind i en lærredssæk.
- Skovl og spand blev efterfølgende rengjort.
- Det tog 10-20 minutter at udtage fire slaggeprøver fra den første til den sidste prøve.



Figur 12. Skovl til udtagning af slaggen. Skovlens dimensioner er opmålt for at kunne vurdere den størst mulige repræsentative fragmentstørrelse, som skovlen kan tage. Skovlen måler 30 x 15 x 20 cm. Spanden rummer 15 l.

Slaggen består af både grove og meget finkornede fragmenter. Da de indsamlede prøver indeholder mange skarpe fragmenter, er der anvendt en kombination af kraftige lærreds-sække og plastposer til transport og opbevaring. Prøverne, som ved prøvetagningen er varme og fugtige, er lufttørret inden endelig lukning for at forhindre mugdannelse. Slaggematerialet er desuden alkalisk, og der sker en langsom exoterm oxidering. Prøverne har derfor stået åbne i to måneder inden endelig forsegling af posen. Slaggeprøverne i de hvide sække kan ses på Figur 14.



Figur 13. Procedure for prøvetagning af slaggen. Når rystebåndet er skrabet rent, er det klar til prøvetagning (a), dernæst prøvetages der fra den ene kant (b) til den anden (c) og skovlen løftes opad (den trækkes ikke tilbage, da der så er risiko for at materiale tabes). Slaggen bevæger sig fra højre mod venstre.



Figur 14. Midlertidig opmagasinerings af slaggeprøverne. I de hvide sække ses prøveserierne 3-4 og 4-4. Bagerst på reolen ses den sigtede serie 1-4. Serie 2-4 blev sendt til kemisk analyse og overstørrelserne ses i klare poser til venstre for 3-4 serien.

3.2.2 Prøvetagning af flyveaske

Principperne for udtagning af repræsentative prøver af flyveaske følger i hovedtræk proceduren for prøvetagning af slaggen (afsnit 3.2.1). Der gives derfor i det følgende alene en beskrivelse af den metode, der er anvendt til prøvetagning af flyveaske.

Flyveaske støver og er derfor rørført i et lukket kredsløb med undertryk. På Amager Bakke er der installeret en prøvetagningsanordning, hvor et metalcylinder føres ind under et 'fald', hvor flyveasken falder ud over kanten fra et transportbånd og ned forbi prøvetageren, dernæst igennem en knuser og ned i en opsamlings silo; denne anordning sikrer at der prøvetages i hele materialestrømmens dimensionalitet (se Figur 9A).

Prøvetagningen er udført under antagelse af, at flyveaskens kemiske og fysiske sammensætning er relativt homogen. Det antages derfor, at repræsentativiteten ikke påvirkes af, om det er nøjagtig samme mængde prøvemateriale der udtages. Proceduren for indsamling af flyveaskeprøver var som følger:

- Prøvetagningen af flyveaske blev udført ca. en time efter prøvetagningen af slaggen, idet det vurderes, at slagge- og flyveaskeprøverne i så fald stammer fra samme afbrænding. Hovedparten af prøverne er taget fra Ovn 1.
- Prøvetagningen blev foretaget fra den installerede prøvetager (Figur 9), som er et gennemskåret rør med dimensionerne 4,5 x 58 cm.
- Der blev udtaget fire prøver pr. gang i løbet af prøveperioden (i alt 4 x 30 prøver).
- Hver prøve vejede ca. 300 g; det tog 1-3 minutter at indsamle de 300 g. Samlet er der indsamlet ca. $4 \times 30 \times 0,3 \text{ kg} = 36 \text{ kg}$
- Der gik 1-2 minutter mellem hver prøvetagning; tiden blev brugt til at registrere prøven.

3.2.3 Fremstilling af kompositprøve (splitning til kompositprøve)

Som tidligere nævnt er de 30 indsamlede slaggeprøver anvendt som delprøver til en kompositprøve. Da hver delprøve vejer ca. 15 kg, udgør kompositprøven ca. 450 kg. For at begrænse tidsforbruget i undersøgelsen er kompositprøvens størrelse reduceret. Ved brug af en prøvesplitter kan dette, i det her tilfælde, overordnet gøres på to måder: (i) alle 30 prøver blandes, hvorefter kompositprøven splittes; eller (ii) prøvesplitteren bruges til at udtage en delprøve fra hver af de 30 prøver, som efterfølgende blandes til en kompositprøve. Sidstnævnte metode blev valgt for at undgå at håndtere 450 kg slagge på én gang. Der blev derfor lavet fire kompositprøver ved at hver prøve blev splittet fire gange, således at $4/16$ af prøven er udtaget og fordelt med $1/16$ til hver kompositprøve. Dette giver kompositprøver med en vægt på omkring 30 kg ($30 \text{ dage} \times 1/16 \times 15 \text{ kg/prøve}$).

Splitterens slot-størrelse er afgørende for repræsentativiteten. Da de indsamlede prøver er repræsentative for fragmenter op til omkring 63 mm, skal splitteren sikre, at denne størrelse fortsat er repræsentativ. Dette kræver, at størrelsen på de enkelte slot i splitteren er tilstrækkeligt store. Ideelt set skal der anvendes slots, hvor mellemrummene i splitteren er minimum 2,5 gange større end det største fragments diameter. Splitteren kan ses i Figur 15.

3.3 Nummerering af prøvemateriale

Slagge-, flyveaske- og kompositprøver, som opbevares på GEUS er nummereret med GEUS-numre. De daglige slaggeprøver har numrene 567602 til 567631, mens flyveaskeprøverne har numrene 567632 til 567661. Som nævnt blev der ved hver prøvetagning udtaget fire prøver; der er med andre ord fire prøvetagningsserier, som repræsenterer materialet. Disse prøver er tildelt samme nummer, men har suffiks A, B, C og D – efter den rækkefølge de blev indsamlet. Dette princip er anvendt for både slagge- og flyveaskeprøverne. Af serie C blev der dannet fire kompositprøver af slagge og en enkelt kompositprøve af flyveaske. Slaggekompositprøverne har numrene 567662 til 567665, mens flyveaskekompositprøven har nummer 567666.



Figur 15. Splitter, anvendt til kompositprøve, set fra oven. Splitteren er ca. 100 cm lang og 65 cm bred og har en kapacitet på ca. 100 l.

De fire forskellige serier (A, B, C og D) er efterfølgende blevet anvendt til forskellige formål, hvorved der er dannet mange flere prøver end det antal, der oprindeligt blev udtaget. Disse benævnes med yderligere et suffiks; fx A>60, der betyder serie A, overstørrelser (>60 mm). I Tabel 2, kolonne 3, ses suffiks-benævnelserne. For alle serier gælder, at de er behandlet ens. I Tabel 2 og Tabel 3 ses prøvenummereringen for de forskellige prøver, samt antallet af prøver.

Tabel 2. Suffiks-nomenklatur for slaggeprøver; eksemplet viser prøve 567602. Kompositprøverne vist nederst i tabellen har egne prøvenumre.

Prøvenummer	Antal prøver	Forklaring på suffiks
Serie A: Sigteanalyse		
567602 A>60	30	Serie A, overstørrelser (>60 mm)
567602 A32-60	30	Serie A, størrelse 32-60 mm
567602 A16-32	30	Serie A, størrelse 16-32 mm
567602 A8-16	30	Serie A, størrelse 8-16 mm
567602 A4-8	30	Serie A, størrelse 4-8 mm
567602 A2-4	30	Serie A, størrelse 2-4 mm
567602 A0-2	0 (omsat)	Serie A, størrelse 0-2 mm
567602 A1-2	30	Serie A, størrelse 1-2 mm
567602 A0,5-1	30	Serie A, størrelse 0,5-1 mm
567602 A0,25-0,5	30	Serie A, størrelse 0,25-0,5 mm
567602 A0,125-0,25	30	Serie A, størrelse 0,125-0,25 mm
567602 A0,063-0,125	30	Serie A, størrelse 0,063-0,125 mm
567602 A0-0,063	30	Serie A, størrelse 0-0,063 mm
Serie B: Prøve udtaget til kemisk analyse		
567602 B>60	30	Serie B, overstørrelser (>60 mm)
567602 B32-60	30	Serie B, størrelse 32-60 mm
Serie C: Kompositprøve		
567602 C >60Ma	30	Serie C, overstørrelser (>60 mm), magnetiske (Ma)
567602 C>60By	30	Serie C, overstørrelser (>60 mm), byggematerialer (By)
567602 C>60IM	30	Serie C, overstørrelser (>60 mm), ikke-magnetiske metaller (IM)
567602 C0-60R	30	Serie C, størrelse 0-60 mm, rest efter udtagning af komposit
567602 C0-60K	0 (omsat, se Tabel 3)	Serie C, størrelse 0-60 mm, udtaget mængde til kompositprøve
Serie D: Originalprøve som gemmes		
567602 D		
Kompositprøver		
567662 C0-601	0 (omsat, se Tabel 3)	Kompositprøve af serie C, størrelse 0-60 mm, serie 1
567663 C0-602	1	Kompositprøve af serie C, størrelse 0-60 mm, serie 1
567664 C0-603	1	Kompositprøve af serie C, størrelse 0-60 mm, serie 1
567665 C0-604	1	Kompositprøve af serie C, størrelse 0-60 mm, serie 1

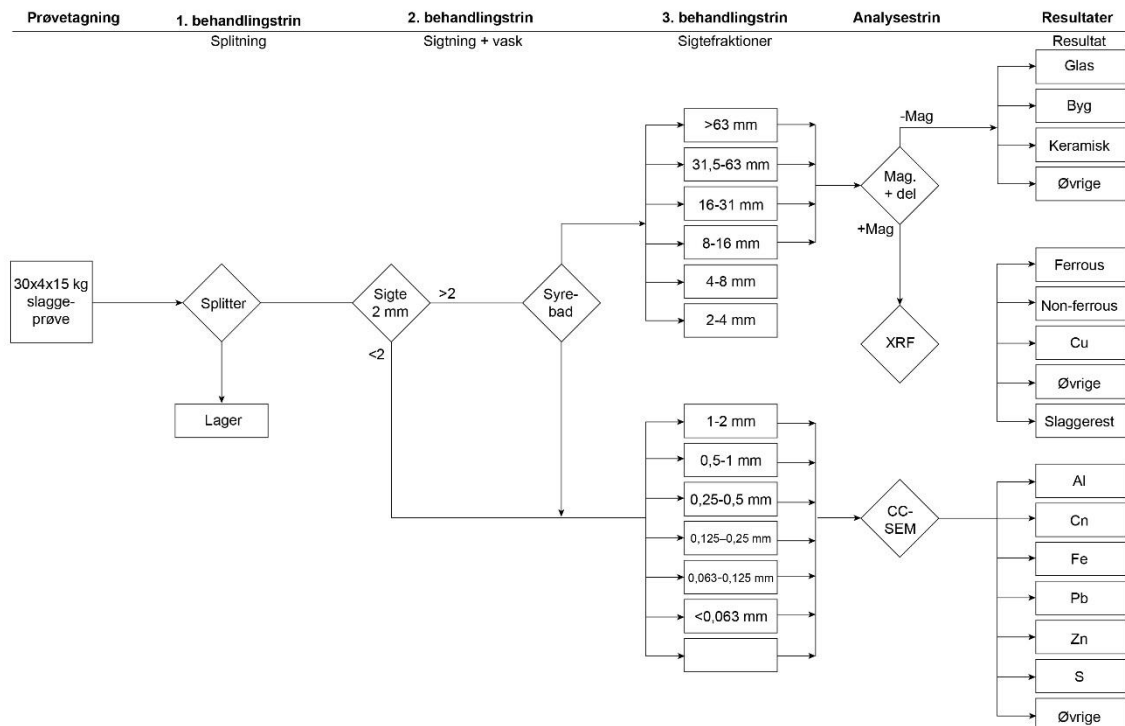
Tabel 3. Suffiks-nomenklatur for slagge-kompositprøve 567662. Prøver markeret med stjerne er sorteret yderligere.

Prøvenummer	Antal prøver	Forklaring på suffiks
Magnetisk (Ma)		
567662 C32-60MaUJ	1	*Størrelse 32-60 mm, magnetisk udeformeret jern
567662 C32-60MaD	1	Størrelse 32-60 mm, magnetisk deformeret/slagge
567662 C32-60MaO	0	Størrelse 32-60 mm, magnetisk oxideret
567662 C16-32MaUJ	1	*Størrelse 16-32 mm, magnetisk udeformeret jern
567662 C16-32MaD	1	Størrelse 16-32 mm, magnetisk deformeret/slagge
567662 C16-32MaO	1	Størrelse 16-32 mm, magnetisk oxideret
567662 C8-16MaUJ	1	*Størrelse 8-16 mm, magnetisk udeformeret jern
567662 C8-16MaD	1	Størrelse 8-16 mm, magnetisk deformeret/slagge
567662 C8-16MaO	1	Størrelse 8-16 mm, magnetisk oxideret
567662 C4-8MaUJ	1	*Størrelse 4-8 mm, magnetisk udeformeret jern
567662 C4-8MaD	1	Størrelse 4-8 mm, magnetisk deformeret/slagge
567662 C4-8MaO	1	Størrelse 4-8 mm, magnetisk oxideret
567662 C2-4MaUJ	1	*Størrelse 2-4 mm, magnetisk udeformeret jern
567662 C2-4MaD	1	Størrelse 2-4 mm, magnetisk deformeret/slagge
567662 C2-4MaO	1	Størrelse 2-4 mm, magnetisk oxideret
Ikke-magnetisk metal (IMa)		
567662 C32-60IMaAl	0	*Størrelse 32-60 mm, ikke-magnetisk metal, aluminium og legeringer deraf
567662 C32-60IMaCu	0	*Størrelse 32-60 mm, ikke-magnetisk metal, kobber og legeringer deraf
567662 C32-60IMaA	0	*Størrelse 32-60 mm, ikke-magnetisk metal, andre metaller og legeringer
567662 C16-32IMaAl	1	*Størrelse 16-32 mm, ikke-magnetisk metal, aluminium og legeringer deraf
567662 C16-32IMaCu	1	*Størrelse 16-32 mm, ikke-magnetisk metal, kobber og legeringer deraf
567662 C16-32IMaA	1	*Størrelse 16-32 mm, ikke-magnetisk metal, andre metaller og legeringer
567662 C8-16IMaAl	1	*Størrelse 8-16 mm, ikke-magnetisk metal
567662 C8-16IMaCu	1	*Størrelse 8-16 mm, ikke-magnetisk metal
567662 C8-16IMaA	1	*Størrelse 8-16 mm, ikke-magnetisk metal
567662 C4-8IMa	1	*Størrelse 4-8 mm, ikke-magnetisk metal
567662 C2-4IMa	1	*Størrelse 2-4 mm, ikke-magnetisk metal
Byggematerialer (By)		
567662 C32-60By	1	Størrelse 32-60 mm,
567662 C16-32By	1	Størrelse 16-32 mm,
567662 C8-16By	1	Størrelse 8-16 mm,
567662 C4-8By	1	Størrelse 4-8 mm,
567662 C2-4By	1	Størrelse 2-4 mm,
Glas (GI)		
567662 C32-60GI	0	Serie C, størrelse 32-60 mm, glas
567662 C16-32GI	1	Serie C, størrelse 16-32 mm, glas
567662 C8-16GI	1	Serie C, størrelse 8-16 mm, glas
567662 C4-8GI	1	Serie C, størrelse 4-8 mm, glas
567662 C2-4GI	1	Serie C, størrelse 2-4 mm, glas
Restslagge (Re)		
567662 C32-60Re	0	Serie C, størrelse 32-60 mm, restslagge
567662 C16-32Re	1	Serie C, størrelse 16-32 mm, restslagge
567662 C8-16Re	1	Serie C, størrelse 8-16 mm, restslagge
567662 C4-8Re	1	Serie C, størrelse 4-8 mm, restslagge
567662 C2-4Re	1	Serie C, størrelse 2-4 mm, restslagge
Til SEM		
567662 C0-2	1	Serie C, størrelse 32-60 mm

4. Prøvebehandling

4.1 Slagge

Prøvebehandling og karakteriseringsmetoderne af slagge omfatter splitting (som beskrevet i afsnit 3.2.3), sortering (af materialet >2 mm), syrebehandling, sigtning og magnetseparering efterfulgt af visuelle og kemiske analyser. Forløbet kan ses i Figur 16.



Figur 16. Flowdiagram for behandling og analyser af slaggekompositprøve.

4.1.1 Størrelsessortering af slagge

Slaggen er størrelsessorteret i 11 fraktioner efter DS/EN 933-1:2013 *Metoder til prøvning af tilslags geometriske egenskaber – Del 1: Bestemmelse af kornstørrelsesfordeling – Sigteanalyse*. Denne kornkurvestandard er anvendt, fordi den bruges af byggeindustrien til at vurdere slaggens egenskaber som tilslagsmateriale.

I forbindelse med sigtningen er der sørget for at sigterne ikke belastes med for meget materiale, jf. forskrift DIN 66165, og at sigtetiden er tilstrækkelig til, at alle korn har passeret, eller har haft mulighed for at passere selve sigten. Til fraktioner >2 mm er der anvendt en rektangulær sigte svarende til en rund Ø 450 sigte, og til fraktionen <2 mm er der anvendt en mindre, rund Ø 21 sigte. I Tabel 4 og Tabel 5 ses bl.a. sigtefraktionerne efter DS/EN 933-1 (kolonne 1) og maksimal overstørrelsesmængde for de to anvendte sigter (kolonne 2).

Slaggens kornstørrelsesfordeling (4. kolonne), samt beregnet gennemfald (3. kolonne) for en prøve på 30 kg svarende til kompositprøven viser (Tabel 4, kolonne 3), at der ved anvendelse af et Ø 450 sigtesystem ikke bør tilføres en hel kompositprøve á 30 kg slagge, da mængden af overstørrelser på de fleste sigter vil blive for stor (røde tal), mens 300 g med Ø 21 er en passende mængde, hvilket er anvendt i eksemplet i Tabel 5, kolonne 3. For at komme under normens foreskrevne overstørrelsesmængde skal en slaggeprøve på 30 kg opdeles i fire portioner, så der sigtes op til 7,5 kg ad gangen, ligesom slaggeprøver på 15 kg skal halveres og hver halvdel sigtes for sig, for at mængden holder sig under normens foreskrevne mængde. I praksis må det dog forventes, at slaggens heterogenitet kan give varierende kornstørrelsesfordelinger og de faktiske overstørrelsesmængder derfor varierer fra prøve til prøve. Dette bør være et opmærksomhedspunkt ved sigtning, så overstørrelsesmængderne ikke overskrides.

Tabel 4. Sigtefraktioner efter DS/EN 933-1 og maksimal overstørrelsesmængde efter DIN 66165 sammenlignet med overstørrelsesmængder for en slaggeprøve fra ARC. Blå og rød farve: hhv. over og under maksimalt tilladte overstørrelse. Sigteanalysen blev udført af AFA-TEK.

Sigte	Maksimal overstørrelses mængde på Ø 450 sigte med materiale med en densitet på 2,05 kg/dm ³ efter DIN 66165 (beregnet)	Gennemfald for 30 kg slagge med sammen sætning som i eksemplet til højre (beregnet)	Gennemfald for prøvemateriale af slagge fra ARC.
63 mm	12.057 g	0 g	100 %
31,5 mm	7.495 g	600 g	98 %
16 mm	4.725 g	2.100 g	91 %
8 mm	2.933 g	4.200 g	77 %
4 mm	1.792 g	6.300 g	56 %
2 mm	1.141 g	4.200 g	42 %

Tabel 5. Sigtefraktioner efter DS/EN 933-1 og maksimal overstørrelsesmængde efter DIN 66165 sammenlignet med overstørrelsesmængder for en slaggeprøve fra ARC. Blå og rød farve: hhv. over og under maksimalt tilladte overstørrelse. Sigteanalysen blev udført af AFA-TEK.

Sigte	Maksimal overstørrelses mængde på Ø 21 sigte med materiale med en densitet på 2,05 kg/dm ³ efter DIN 66165 (beregnet)	Gennemfald for 300 g 0 2 mm slagge med gennemfald som i eksemplet til højre	Gennemfald for prøvemateriale af slagge fra ARC.
1 mm	129 g	86 g	30 %
0,5 mm	90 g	65 g	21 %
0,25 mm	58 g	39 g	15 %
0,125 mm	39 g	29 g	11 %
0,063 mm	26 g	15 g	9,1 %

Grovsigtning blev udført i stakkede træramme-sigter placeret på en vibrator. Sigtetiderne for grovsigtning i de åbne sigter blev vurderet visuelt, men var typisk fem minutter for de grove fraktioner. Sigterne blev efterfølgende taget af en efter en, efterhånden som materialet i den på ethvert tidspunkt øverste sigte var sigtet færdigt; for de mest finkornede fraktioner var sigtetiden omkring 15 minutter. Sigting af de fine fraktioner blev udført i en lukket Ø 21 sigte placeret på en vibrator. Sigtetiden blev bestemt på basis af Skanlabs anbefalinger (først sigtes i tre til fem minutter og fraktionerne vejes; derefter sigtes i yderligere et minut, og der

vejes igen, hvorved den optimale sigtetid kan bestemmes). Typisk sigtetid var 10 minutter. Se billedgennemgang af processen i Figur 17.



Figur 17. Sigtning af 2 mm-fraktionerne. Prøvematerialet splittes med splitter (a), hvorefter de sigtes i søjle (b) og (c). Det færdigt sigtede materiale ses i (d), fordeles i poser (e) og vejes (f).

Da sigterammerne til grovsigtningen er fremstillet i træ, findes der træsplinter fra rammerne i prøvematerialet, hvilket gør, at prøver som er sigtet med træsigte, ikke kan anvendes til kvantificering af træfiber- og kulstofindhold.

4.1.2 Indledende forsøg med rensning af slaggefragmenter (>2 mm)

Når slaggen forlader ovnen sendes den igennem et vandbad for at blive nedkølet, hvorefter den skubbes op på transportbåndet (Figur 6); prøven er derfor fugtig, når den indsamles. Når slaggen efterfølgende tørrer sker der en 'karbonatisering' af prøven, som medfører, at enkeltfragmenter danner hårde 'mørtelklumper' (slaggeklumper, se Figur 18). Denne aggregering påvirker sigteanalyserne, og det er derfor nødvendigt at behandle prøven mekanisk for at frigøre de enkelte fragmenter inden sigtningen. Aggregeringen forhindrer også den visuelle karakterisering af fragmenterne. Derfor skal slaggeprøven renses inden den visuelle karakterisering.



Figur 18. To udvalgte slaggeklumper set fra to vinkle. Til venstre ses en middelhård slaggeklump på 260 g fra prøve 567613-3/4. Til højre en hårdere slaggeklump på 700 g fra prøve 567618-3/4. På nederste billede ses prøverne fra den side, der vendte mod sækkens bund under størkningen; den hårdeste klump til højre er mere glat, næsten ligesom hærdet beton. 9V batteri for skala.

I projektet er der udført en række forsøg for at fjerne karbonatiseringen, så der kan foretages en visuel bedømmelse af fragmenttyperne. Forsøgene viste, at kombinationer af skylning, skrubning med børste, iblødsætning i vand og tørring ved 60 °C kun har ringe effekt. Derimod giver syrerbehandling tilstrækkeligt rene overflader til, at der kan foretages en visuel karakterisering af fragmenterne. Erfaringerne er opsummeret i Figur 19 og Figur 20.



Figur 19. Eksempel på effekten af vask og tørring (midten), og syrebehandling og tørring (nederst) på kompositprøve 567662 B, fraktion 4-8 mm. Øverst ses den ubehandlede kompositprøve.

Der er gennemført en række forsøg med forskellige syrer. I alle tilfælde havde syrebehandling med orthofosforsyre, eddikesyre og HCl en tilfredsstillende effekt. Til den endelige syrebehandling blev HCl anvendt; nedenfor gennemgås behandlingsmetoden på slagge-kompositprøve 567662 A.



Figur 20. Eksempel på effekten af tørring (øverst) og en kombination af tørring, vask, tørring og syrebehandling på kompositprøve 567662 B, fraktion 4-8 mm. Den ubehandlede kompositprøve ses øverst i Figur 19.

Forsøgene viste derudover, at en betydelig del af materialet løsnes ved at sigte materialet igen efter tørring og ligeledes efter syrebehandling, og at der derfor må være en vis usikkerhed i forhold til at vurdere slaggens kornstørrelsesfordeling uanset hvilken behandling slaggen udsættes for. Det ideelle materiale at anvende til en bedømmelse af kornstørrelsesfordelingen er givetvis råslaggen, som den forefindes umiddelbart efter prøvetagning, hvortil der i så fald skal foretages en vådsigtning. Endvidere blev der gennemført forsøg for at fjerne rust fra metaller. Kemikalierne brugt i disse forsøg havde dog ingen rustfjernende virkning.

Syrebehandling af slaggefragmenter (>2 mm)

Slagge-kompositprøve 567662 A blev behandlet med saltsyre, som forberedelse til fragmentkarakteriseringen. Hver af kompositprøvens sigtede fraktioner blev placeret i en spand, og der blev tilsat fire liter vand og 300 ml 37 % saltsyre til hver spand. Efter en times syrebehandling blev prøverne skyllet på en sigte (4 mm sigte til 4-8 mm fraktionen, 8 mm sigte til 8-16 fraktionen osv., i alt fire fraktioner, se Figur 21).



Figur 21. Stinkskab med spande med slaggefraktionerne 4-8 mm, 8-16 mm, 16-32 mm og 32-63 mm i syre.

Efterfølgende blev det vurderet, at syrebehandlingen ikke havde det ønskede resultat for fraktionerne 2-4 mm, 4-8 mm og 8-16 mm, som derfor blev genbehandlet. Denne gang blev der tilsat fire liter vand og 500 ml 37 % saltsyre til hver spand. Prøverne henstod atter i en time, hvorefter skylning og sigtning blev gentaget. Resultatet efter denne behandling var tilfredsstillende for alle fraktioner. I Figur 22 ses eksempler på syreopløsningens klarhed efter første og anden gang syrebad.

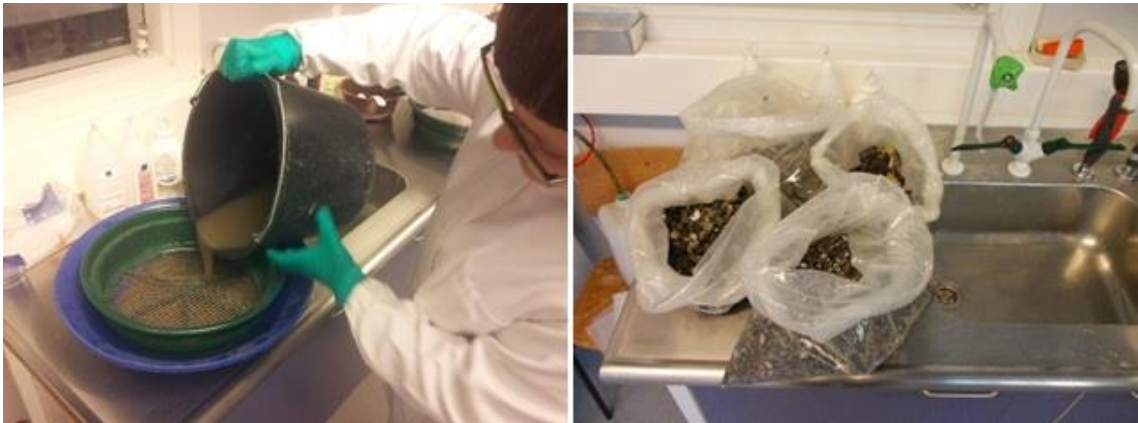


Figur 22. Til venstre ses spanden med første gang syre; til højre ses spanden med anden gang syre for fraktionen 8-16 mm. Der ses en tydelig forskel i syreopløsningens klarhed.

Forsøg lavet i denne undersøgelse har tidligere vist, at skylning kan være utilstrækkelig til at sikre, at prøverne er helt fri for saltsyre, hvorfor korrosionen fortsatte i flere måneder. Derfor blev alle seks fraktioner sat i blød i vand natten over for at 'trække' det sidste saltsyre ud af prøverne. Restfraktionerne fra gensigtningerne af fraktionerne (materialet der gik igennem sigterne) blev hældt i en spand og henstod ligeledes natten over for at bundfælde. Væsken blev efterfølgende sigtet (se Figur 23).

Efter syrebehandling, skylning på 2 mm-sigte og afdrypning blev prøverne igen sigtet (4 mm sigte til 4-8 mm fraktionen, 8 mm sigte til 8-16 fraktionen osv.). Resultatet for 2-4 mm fraktionen ses i Figur 24. De genererede restfraktioner fra gensigtningen blev ikke returneret til

fraktionerne, men blev frasorteret, da der var et tilstrækkeligt antal fragmenter i de øvrige fraktioner til en repræsentativ materialekarakterisering.



Figur 23. Venstre: sigtning af syrevæske. Højre: de syrebehandlede prøver efter endelig skylning.



Figur 24. Den endelige sigtning af færdigbehandlet slagge for 2-4 mm fraktionen. Der blev brugt en 2 mm-sigte. Det frasigtede materiale ses til højre.

4.2 Flyveaske

Kompositprøven for flyveaske blev sigtet med søjlesigte udi tre størrelsesfraktioner: >1 mm, 0,063-1 mm og $<0,063$ mm. Ved CC-SEM-analysen blev alle fragmentstørrelser for fraktionen 0,063-1 mm automatisk bestemt.

5. Karakteriseringsmetoder

5.1 Overblik over karakteriseringen af slaggefragmenter

Der er eksperimenteret med forskellige principper og metoder til brug for sortering af slaggefragmenterne og karakterisering af disse. Nedenfor redegøres for den metode, som gav de mest anvendelige materialeklasser, ligesom der redegøres for nogle af de udfordringer sorteringen giver.

Hovedtrinene i sorteringen af slaggematerialet (>2 mm) er som følger (se også Figur 25):

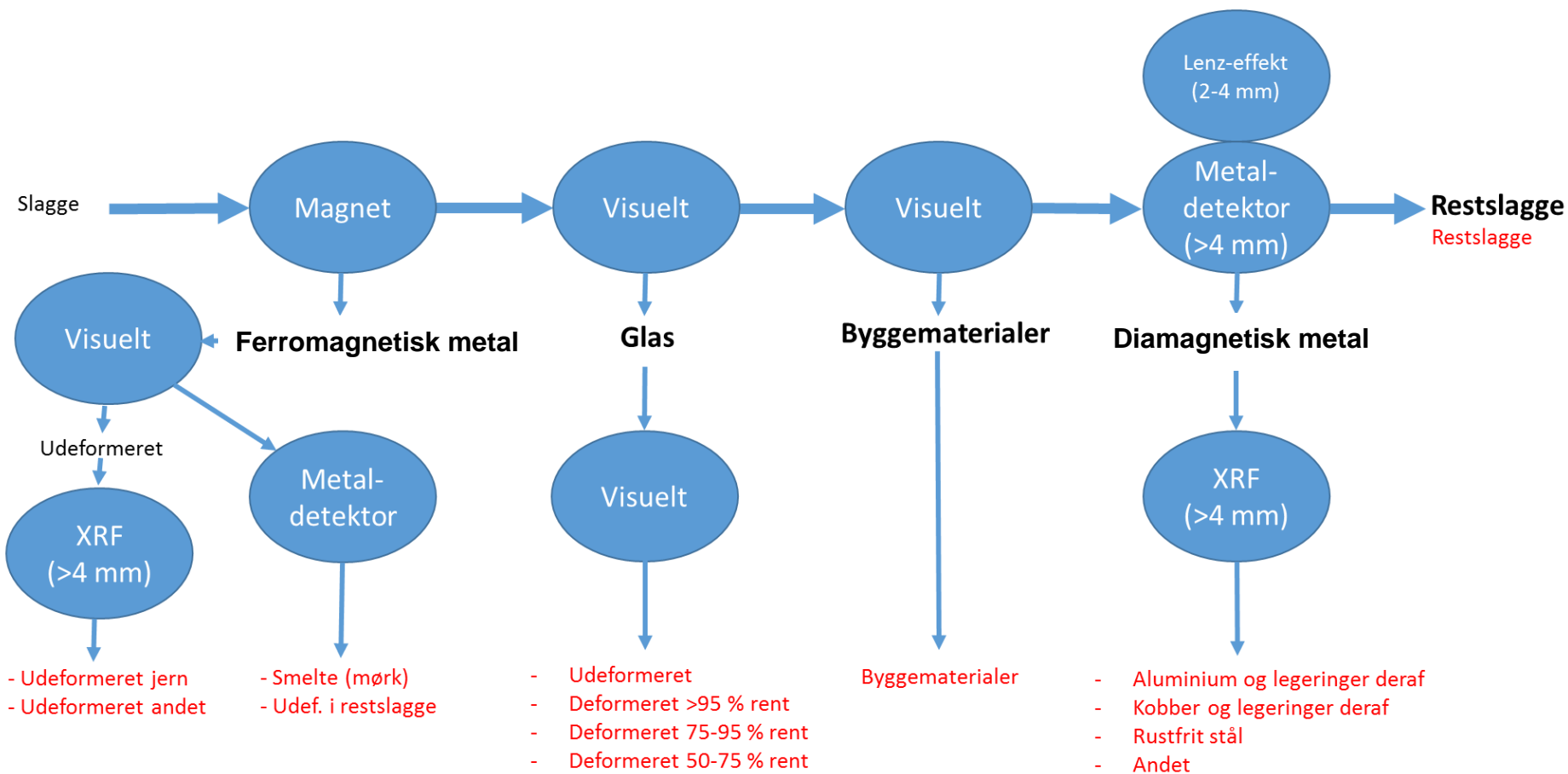
- *Frasortering af ferromagnetisk (ren) metal:* Prøven breddes ud, så den kun består af ét lag fragmenter, hvorefter en permanent magnet føres hen over fragmenterne.
- *Glas og byggematerialer frasorteres:* Fragmenter bestående af glas og byggematerialer håndpilles og sorteres fra.
 - Glasfragmenter udsorteres i klasser i forhold til deformitet og renhed.
- *Sortering af ferromagnetiske, diamagnetiske og ikke-magnetiske fragmenter med metaldetektor:* Alle fragmenternes magnetiske egenskaber undersøges enkeltvis ved brug af metaldetektor; prøven sorteres i to fraktioner: magnetisk og ikke-magnetisk metal.
- *Visuel klassificering af den ikke-magnetiske fraktion:* Fragmenterne inddeles visuelt i to grupper; aluminiums- og kobberlegeringer.
- *Endelig bestemmelse af legeringstyper:* De to legeringsgrupper bestemmes endeligt med håndholdt XRF. Målingerne er overvejende udført som semikvantitative analyser baseret på korte ukalibrerede målinger.

5.2 Karakteriseringsmetoder til slaggefragmenter >2 mm

I dette afsnit gennemgås de teknikker, som er anvendt til karakterisering af slaggefragmenter >2 mm. Udvælgelsen af de forskellige teknikker er foretaget på baggrund af forudgående forsøg med bl.a. forskellige magneter, metaldetektorer og XRF-indstillinger. Her omtales kun de anvendte metoder.

5.2.1 Permanent magnet

Når man bruger magneter er det vigtigt, at de udsætter materialet for den samme magnetstyrke hver gang. Eksempelvis sidder der, i den anvendte magnetiske separator, seks mindre magneter indvendigt, hvilket skaber et magnetfelt af varierende styrke. For at sikre at fragmenterne udsættes for samme styrke er magneten ført hen over materialet i så tæt afstand fra fragmenterne som muligt. Bevægelsen er foregået i systematiske lige bevægelser. I Figur 26 ses magnetseparatoren og en prøve.



Figur 25. Flowdiagram for karakterisering og separation af slaggefragmenter (>2 mm). Fraktioner med rødt er de endelige fraktioner. Legeringstyper er bestemt med XRF for udeformerede ferromagnetiske metaller og diamagnetiske metaller.



Figur 26. Permanent magnet til frasortering af magnetisk metal fra slaggen. Den har en styrke på 8 kg.

5.2.2 Metaldetektor

En metaldetektor fungerer ved at udsende et hurtigt vekslende elektromagnetisk felt, der får elektrisk ledende metaller (i princippet alle metaller) til at danne 'eddy currents' – et fænomen, hvor metallernes elektroner bevæger sig i cirkulære baner og derved danner nye magnetfelter, også kaldet inducerede magnetfelter. Denne vekselvirkning af magnetfelter (mellem det elektromagnetiske felt og det inducerede magnetfelt) bliver registreret som en forstyrrelse af det udsendte elektromagnetiske felt, hvorefter apparatet giver signal med lyd. De anvendte metaldetektorer er af typen 'pinpointer', fordi de er små og præcise sammenlignet med almindelige metaldetektorer, se eksempel på metaldetektorer i Figur 27. Den bedste pinpointer fungerede optimalt på metaller ned til 4 mm.



MD-005/MD6002

MD 300

MCD-3003B1

Figur 27. Forskellige modeller af håndholdte metaldetektorer (pinpointere) brugt til karakteriseringen. Modellen til venstre var den mest følsomme af de tre og dermed bedst.

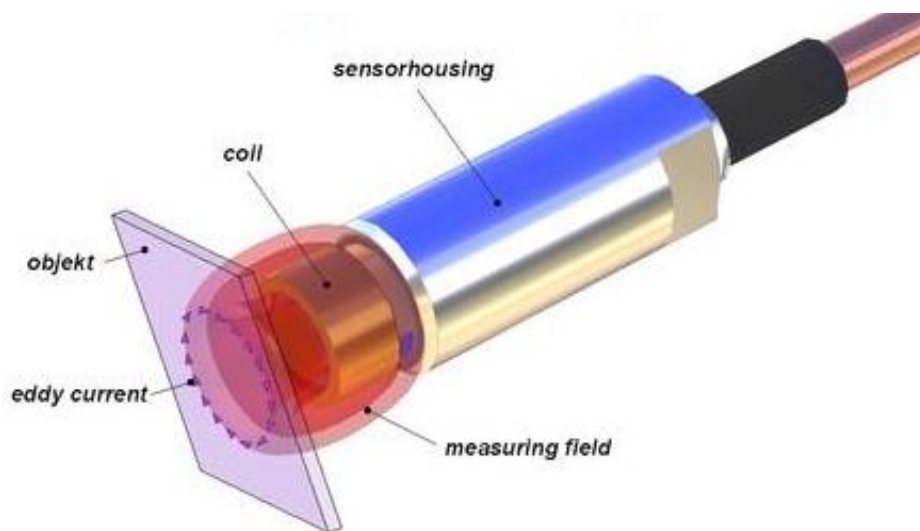
Pinpointeren fikseres og hvert fragment føres manuelt hen til detektoren, hvor det testes for udslag; større fragmenter afsøges på hele fragmentets overflade. Forskellige metaller giver forskellige magnetfelter, hvilket kan udnyttes til at bestemme, hvilket metal der måles på. Metoden er dog meget usikker, fordi metallens geometriske form påvirker magnetfeltet, og fordi forskellige metaller kan danne ensartede magnetfelter; desuden kan metallegeringer komplicere tolkningen af signalet. Derfor blev XRF anvendt til en konkret bestemmelse af metallerne (se afsnit 5.2.4).

Det er observeret, at nogle af fragmenterne er magnetiske, uden at pinpointeren giver udslag. Da detektoren kun giver udslag, når der kan skabes induktion, forudsætter det at materialerne har høj ledningsevne. Manglende udslag kan også skyldes at nogle metaller er magnetiske på oxidform. Undersøgelse af fragmenterne med pinpointeren, i kombination med magnet, kan derfor afgøre, om jern er metallisk eller findes på anden form, eventuelt som følge af omdannelse i forbrændingsprocessen.

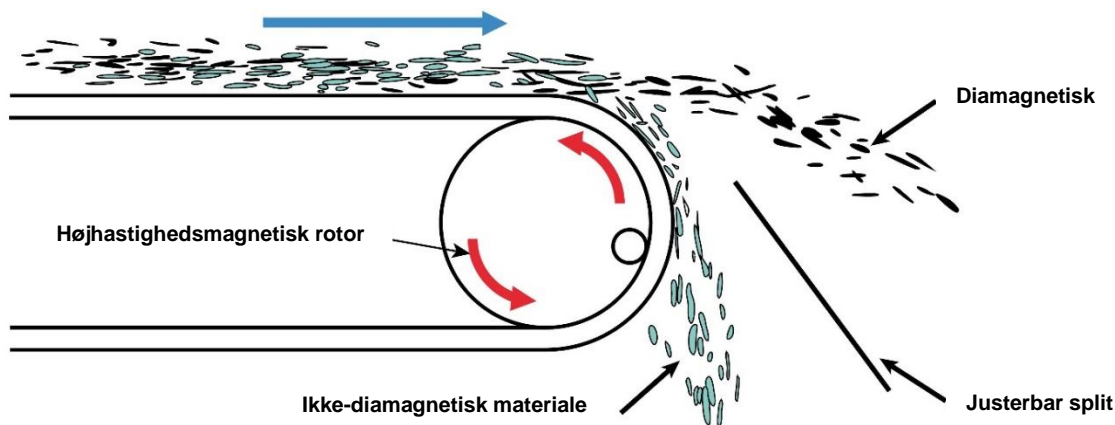
5.2.3 Eddy-current/Lenz-effekt

Da pinpointeren kun fungerer optimalt på metaller ned til 4 mm, er en 'eddy-current-separator' testet til udsortering af diamagnetiske metaller for fraktionen 2-4 mm.

Eddy-current-separatorer anvendes industrielt i genvindingsindustrien til at sortere diamagnetiske fragmenter fra ikke-magnetiske fragmenter. Eddy-current-separatorer udnytter det princip, at den induktion, der skabes i et ledende materiale, skaber et modsatrettet magnetfelt, når magnetfeltet der skabte induktionen ændres; denne effekt omtales også som Lenz-effekten. Lenz-effekten betyder, at metaller skaber en magnetisk modstand, når de udsættes for skiftende magnetfelter i form af fx et magnetfelt, der passerer forbi materialet eller en elektromagnet, hvor kraften på magnetismen ændres. I Figur 28 ses en principskitse af en pinponter og i Figur 29 ses princippet for en eddy-current separator.



Figur 28. Eddy-current-princippet i en pinpointer.



Figur 29. Princip for eddy-current-separator. En magnetisk rotor skaber induktion, hvilket får metallerne til at følge efter magnetfeltet. Da rotoren drejer modsat retningen af materialet på båndet, påvirkes materialerne ved at blive løftet; dette løft giver de metalliske fragmenter en længere bane, som muliggør separation af materialet i henholdsvis diamagnetisk og ikke-diamagnetisk. Modificeret efter www.911metalurgist.com.

Det har ikke været muligt at finde en egnet eddy-current-separator til separation af slaggefraktionerne til denne undersøgelse. Vi har derfor bygget en eddy-current-separator til slagge-karakteriseringen bestående af en lille blæsemotor monteret med en CD-ROM, hvorpå der er monteret stærke magneter; en plastplade er monteret tæt over magneterne og motoren drives af et 12V batteri. Det byggede eddy-current-instrument anvendes ved at placere små mængder prøvemateriale på plastpladen, hvorefter motoren startes. På instrumentet trækker Lenz-effekten fragmenterne i skivens rotationsretning (følger magnetfeltets bevægelse), og de ikke-magnetiske fragmenter bliver tilbage (Figur 30). Lenz-effekt-påvirkede fragmenter frasorteres manuelt. Instrumentet har vist sin egnethed som separator, om end dette testapparat kun tillader separation af meget små mængder og ikke af materiale <2 mm.

5.2.4 Håndholdt X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)

X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) er en semikvantitativ målemetode til kemiske analyser; bedømmelsen af materialets komposition beror på det bedste skøn ud fra de målte værdier. Håndholdt XRF bruges her til bestemmelse af slaggefragmenternes kemiske sammensætning (ofte legeringer). I Figur 31 ses en håndholdt XRF.

Fordelen ved at bruge håndholdt XRF er, at resultatet for den kemiske sammensætning af fragmentet fås umiddelbart efter målingen er foretaget. Det giver mulighed for at sortere fragmenter til den rigtige kategori. Ulempen er, at en konkret måling ikke efterfølgende kan føres tilbage til det specifikke fragment, medmindre hvert fragment kategoriseres. En anden udfordring ved metoden er, at fragmenterne typisk er dækket af et tyndt oxidlag med en anderledes kemisk sammensætning end selve fragmenterne, men som dog kan være relateret til fragmenternes kemiske sammensætning. Det vil påvirke målingen, da strålingen fra XRF ikke når mange mikrometer ned i materialet. I tolkningen af resultaterne er anvendt det princip, at såfremt den målte overfladekoncentration er større end 5 % (af overfladekoncentrationen) antages det, at metallet findes i selve fragmentet, og ikke kun er en del af 'overfladeurenheder'.



Figur 30. Instrument til frembringelse af Lenz-effekt på 2-4 mm slaggefraktionen og frasortering af ikke-magnetisk metal. Til venstre: slaggefragmenter lagt klar på instrumentet. Til højre: efter 30 sekunders rotation af disken med magneter under plastdækket ses en spredning af fragmenterne; de påvirkede metalfragmenter (i grøn polygon) har bevæget sig i rotationsretningen (rød pil). Den roterende disk er 12 cm i diameter.

Brugen af håndholdt XRF til bestemmelse af legeringers kemiske sammensætning kan baseres på to forskellige strategier: (i) der foretages kortvarige målinger, som ikke kalibreres, hvorved hovedelementerne i legeringen hurtigt kan bestemmes semikvantitativ; eller (ii) måletiden forlænges og resultaterne kalibreres, hvorved legeringernes kemiske sammensætning kan bestemmes kvalitativt og kvantitativt. Ved sidstnævnte metode kan overfladeurenheder dog påvirke målingerne i en sådan grad, at det kan være svært at vurdere, hvorvidt en måling skyldes et oxideret lag på overfladen, eller om det er et legeringselement i fragmentet. Da metode (ii) er væsentligt mere tidskrævende og dyrere end (i), er metode (i) primært brugt i denne undersøgelse, dvs. at der foretages en semikvantitativ vurdering af legeringsmetallerne baseret på korte ukalibrerede målinger.



Figur 31. Håndholdt XRF.

5.2.5 Scanning Electron Microscope (SEM)

Et Scanning Electron Microscop (SEM) giver mulighed for at foretage kemiske- og strukturelle analyser af meget små mængder materialer og mineraler. Vigtigst for karakteriseringen af materialer og mineraler er den integrerede detektor, som kan udføre Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS). EDS-detektoren måler grundstofkoncentrationer i prøven ved at skyde en elektronstråle på materialet og detektere energiladningerne på de returnerede røntgenstråler. Elektronstrålen rammer et område på få mikrometer, men den reflekterede energi, som opfanges af detektoren, repræsenterer et 'interaction volume' i prøven, som er større afhængigt af, hvor høj materialets densitet er. EDS kan benyttes manuelt, hvor der måles punktvis, eller automatisk, hvor der enten måles på mange små fragmenter samtidigt (CC-SEM) eller på tværsnitsflader i op til håndstørrelse (også kaldet mineralkortlægning).

Analyse med CC-SEM kan udføres på en prøve, som ikke på forhånd er sigtet og derved består af mange forskellige kornstørrelser. En fordel ved denne analysemetode er, at der måles på de reelle fragmenter og ikke på overfladen, hvor urenheder kan påvirke resultatet (som ved XRF). CC-SEM-softwaren kan inddele fragmenterne efter klart glas, farvet glas, jern, rustfrit stål og andre stållegeringstyper, samt alle mulige fragmenter af tungmetaller. Derudover kan kemien beregnes for hver gruppe af fragmentstørrelser.

Til analyse med CC-SEM udtages ca. 1 g materiale, som indstøbes i epoxy og nedslibes. For denne metode er det vigtigt, at fragmenterne er adskilte, således at softwaren kan skelne kornene fra hinanden. Alt efter den valgte metode vil det være alle korn eller kun en brøkdel af kornene, som bliver eksponeret for analyse efter slibning. Det er derfor relevant at vurdere, om der er et tilstrækkeligt antal korn til at give et repræsentativt resultat. For finkornet materiale kan der være flere tusinde eksponerede korn, og en enkelt prøve vil i givet fald være repræsentativ. Det nødvendige antal korn i en prøve afhænger af kornstørrelsen; ved en kornstørrelse på 1-2 mm forventes det, at 10-200 korn kan analyseres og ved en kornstørrelse på 0,25-0,5 mm forventes det, at op mod 1.000 korn kan analyseres. En umiddelbar vurdering er, at omkring 200 korn vil give en analyse, og dermed et resultat, som er repræsentativ for de mest dominerende partikeltyper, men det anbefales, at der udføres analyser på alle korn, der findes i prøven, hvilket kan være op til 5.000. For at nå op på minimum 200 eksponerede korn, udtages der for kornstørrelsen 1-2 mm to prøver, som påføres hver sin indstøbt epoxy og analyseres.

Detektionsgrænsen for EDS er som udgangspunkt omkring 1 % og afhænger konkret af om toppene i spektrummet er genkendelige eller ej, hvilket igen afhænger af, om de interagerer med hinanden eller ej. Materialer, som består af mange grundstoffer i lave koncentrationer, er vanskelige at identificere. I sådanne tilfælde kan der være behov for at øge måletiden, så der opnås et bedre spektrum. Metoden bør ikke anvendes på koncentrationer under 0,1 %; ved koncentrationer på op til 1 % er metoden usikker.

5.3 Behandling af prøver til kemiske analyser

En serie af de 30 dagligt indsamlede prøver af slagge og flyveaske er analyseret for deres kemiske sammensætning hos Actlabs i Canada med bl.a. ICP-MS og FUS-ICP-MS. I afsnit

5.3.2 findes en kort forklaring på metoderne. For at sikre at alle relevante grundstoffer er målt, og dette inden for detektionsgrænserne, er der anvendt flere forskellige analysemetoder. Analysemetoderne fremgår af Tabel 6. Tabellen specificerer analyttens størrelse for hver metode, og hvilke prøver (slagge/flyveaske) de er anvendt på. Hver slaggeprøve var på omkring 10 kg, mens flyveaskeprøverne var på minimum 200 g.

For at undgå problemer ved knusning og formaling blev der før afsendelse af prøverne til Actlabs fjernet metalliske fragmenter fra slaggen med magnet. Prøveforberedelsen hos Actlabs omfattede knusning, sigtning og pulverisering, og sigtning igen; dette i en stålmølle.

Tabel 6. Anvendte analysemetoder, prøvestørrelse og målte grundstoffer for både slagge og flyveaske, analyseret hos Actlabs, Canada.

Analysemetode	Analyt	Målte grundstoffer
FUS-ICP	0,5 g	Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti og P
FUS-ICP	3 g	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Li, Sc, Be, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, In, Sn, Cs, Ta, W, Ti, Bi, Th, U
ICP-OES	30 g	Au, Pt, Pd
PGNAA	1 g	B
INAA	1 g	Br
Acid digestion – ICP-MS	0,25 g	Li
Cold Vapour TIMS	0,5 g	Hg
INAA	30 g	Sb, Sn, Zn (OBS: kun for flyveaske)

5.3.1 Prøvebehandling i analyselaboratoriet

Slagge. Den oprindelige aftale med Actlabs var, at analyserne skulle foretages på kompositprøven uden anden forbehandling. Ved modtagelse af slaggeprøven fandt Actlabs det imidlertid nødvendigt at magnetseparere prøven inden formaling; dette for at undgå skader på formalingsmøllen. Den frasorterede metal mængde hos Actlabs udgjorde ca. 10 % af prøverne. Denne forbehandling giver to fejlkilder til analysens repræsentativitet: (i) det er uklart, hvordan analyseresultaterne skal korrigeres for de fraseparerede magnetiske/jernrige slagge, og (ii) magnetens feltstyrke er ukendt.

For at minimere en biased frasortering af hårde fragmenttyper i behandlingsprocessen blev der, i forhold til standardproceduren, valgt følgende dyrere løsninger: (i) 90 % gennemfald mod 80 % som er standard, og (ii) at få udtaget 1.000 g materiale til formaling i stålmølle mod 250 g som er standard.

Den ikke-magnetiske fraktion blev knust, så 90 % af materialet var <2 mm, hvorefter den blev sigtet og splittet (med splitter); af dette blev der udtaget 1.000 g materiale til formaling i en stålmølle⁴ bestående af mild stål uden legeringsmetaller som fx krom og nikkel. Actlabs garanterer at mindst 95 % af materialet efterfølgende passerer en 105 µm-sigte; prøven blev atter splittet og passende delprøver udtaget til de relevante analyser.

⁴ www.actlabs.com/page.aspx?menu=74&app=243&cat1=617&tp=2&lk

Flyveaske. Flyveasken blev, uden forbehandling, direkte formalet. Hver prøve (på minimum 200 g) blev formalet og derefter behandlet efter samme metode som slaggen.

Totalt udgør massen af de målte grundstoffer i flyveasken omkring 70 % af det samlede grundstofindhold. At 30 % ikke er målt, kan forklares ved, at S, Cl og C ikke er målt. Til sammenligning udgør de målte grundstoffer i slaggen omkring 99 %.

5.3.2 Analysemetoder

Til hovedparten af de kemiske analyser er der anvendt forskellige teknikker af Inductively Coupled Plasma (ICP)-metoden, som er baseret på at materialet ioniseres; efterfølgende måles ioniseringen med forskellige sensorer, som dermed er et udtryk for grundstofkoncentrationerne. I nærværende analyse er der bl.a. anvendt Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) og Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). Desuden er Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA) anvendt til bestemmelse af B, Neutron Activation Analysis (INAA) til bestemmelse af Br og Thermal Ionization Mass Spectrometry (TIMS) anvendt til bestemmelse af Hg. Opløsning af materialet forud for ICP-analysen sker typisk ved fusion (FUS) med litium metaborat/tetraborat. Se også Tabel 6.

5.3.3 Delprøve og detektionsgrænser

Detektionsgrænsen for de enkelte grundstoffer ved de anvendte analysemetoder er vist i Tabel 7.

Analyttens størrelse påvirker repræsentativiteten. Størrelsen er bestemt af analysemetoden, men i alle analyser i denne undersøgelse vurderes denne begrænsning af repræsentativiteten at være ubetydelig, da materialet er formalet til <105 µm, og der derfor vil være mange tusinde fragmenter i bare 1 g prøve.

Tabel 7. Analysemetoder og detektionsgrænser.

Grund stof	Metode	Detektionsgrænse (nedre)	Detektionsgrænse (øvre)	Enhed
SiO ₂	FUS-ICP	0,01		%
Al ₂ O ₃	FUS-ICP	0,01		%
Fe ₂ O ₃	FUS-ICP	0,01		%
MgO	FUS-ICP	0,01		%
MnO	FUS-ICP	0,001		%
CaO	FUS-ICP	0,01		%
TiO ₂	FUS-ICP	0,001		%
Na ₂ O	FUS-ICP	0,01		%
K ₂ O	FUS-ICP	0,01		%
P ₂ O ₅	FUS-ICP	0,01		%
Ag	FUS-ICP	0,5	100	ppm
As	FUS-ICP	5	2.000	ppm
Ba	FUS-ICP	3	300.000	ppm
Bi	FUS-ICP	0,1	2.000	ppm
Ce	FUS-ICP	0,05	3.000	ppm
Co	FUS-ICP	1	1.000	ppm
Cr	FUS-ICP	20	10.000	ppm
Cs	FUS-ICP	0,1	1.000	ppm
Cu	FUS-ICP	10	10.000	ppm
Dy	FUS-ICP	0,01	1.000	ppm
Er	FUS-ICP	0,01	1.000	ppm
Eu	FUS-ICP	0,005	1.000	ppm
Ga	FUS-ICP	1	500	ppm
Gd	FUS-ICP	0,01	1.000	ppm
Ge	FUS-ICP	0,5	500	ppm
Hf	FUS-ICP	0,1	1	ppm
Ho	FUS-ICP	0,01	1	ppm
In	FUS-ICP	0,1	200	ppm
La	FUS-ICP	0,05	2	ppm
Lu	FUS-ICP	0,002	1	ppm
Mo	FUS-ICP	2	100	ppm
Nb	FUS-ICP	0,2	1.000	ppm
Nd	FUS-ICP	0,05	2.000	ppm
Ni	FUS-ICP	20	10.000	ppm
Pb	FUS-ICP	5	10.000	ppm
Pr	FUS-ICP	0,01	1.000	ppm
Rb	FUS-ICP	1	1.000	ppm
Sb	FUS-ICP	0,2	200	ppm
Sm	FUS-ICP	0,01	1.000	ppm
Sn	FUS-ICP	1	1.000	ppm
Sr	FUS-ICP	2	10.000	ppm
Ta	FUS-ICP	0,01	500	ppm
Tb	FUS-ICP	0,01	1.000	ppm
Th	FUS-ICP	0,05	2.000	ppm
Ti	FUS-ICP	0,05	1.000	ppm
Tm	FUS-ICP	0,005	1.000	ppm
U	FUS-ICP	0,01	1.000	ppm
V	FUS-ICP	5	5.000	ppm
W	FUS-ICP	0,5	5.000	ppm
Y	FUS-ICP	0,5	1.000	ppm
Yb	FUS-ICP	0,01	1.000	ppm
Zn	FUS-ICP	30	10.000	ppm
Zr	FUS-ICP	1	10.000	ppm
Au	ICP-OES	2	30.000	ppb
Pt	ICP-OES	5	30.000	ppb
Pd	ICP-OES	5	30.000	ppb
B	PGNAA	0,5	10.000	ppm
Br	INAA	0,5	1.000	ppm
Li	Acid digestion – ICP-MS	1	10.000	ppm
Cd	Acid digestion – ICP-MS	0,3	2.000	ppm
Hg	Cold Vapour TIMS	5	10.000	ppb

6. Karakterisering af slaggen

Et af formålene med dette projekt var at vurdere genanvendelsespotentialen i slaggen på baggrund af en karakterisering af slaggens materialefysiske og kemiske bestanddele. Resultaterne af disse karakteriseringer præsenteres i dette kapitel og diskuteres i kapitel 9.

Slaggens materialefysiske fragmentsammensætning er undersøgt vha. forskellige sorteringsteknikker og målemetoder; disse omtales i afsnit 6.1, 6.2 og 6.3. Derudover er der foretaget undersøgelser med SEM på fragmenter af typen 'slaggesmelte' for at beskrive teksturen og de mineralogiske sammensætninger (afsnit 6.4). Endeligt er der udført kemiske analyser på de 30 dagligt indsamlede prøver (afsnit 6.5).

6.1 Kornstørrelsesfordeling

På Figur 32 ses, at kornstørrelsesfordelingen er sammenhængende i og med, at kornkurven har bløde former. For fragmenter >1 mm er der et procentvis ensartet gennemfald. Disse fragmenter udgør omkring 92 % af slaggen.

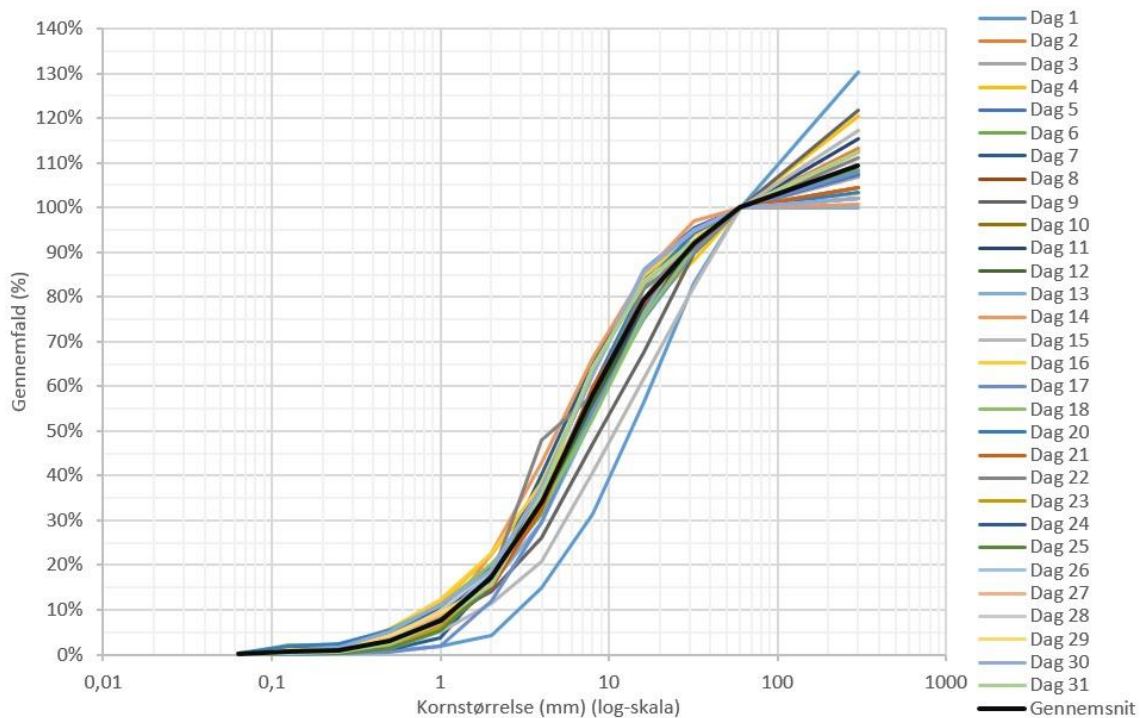
Relativt set udviser gennemfaldet på 1 mm den største variation; det varierer mellem 2,5 % og 13,5 % svarende til en relativ variation i forhold til gennemsnittet på ± 70 %. Til sammenligning ligger gennemfaldet på 2 mm mere stabilt mellem ca. 10 % og 20 % svarende til en relativ variation på ± 33 % i forhold til gennemsnittet. Hvis den kemiske sammensætning i finfraktionen (<1 mm) er væsentlig forskellig fra den øvrige slagge, kan disse variationer have signifikant betydning for total-kemien fra prøve til prøve. Der kan være mange årsager til den store variation på finfraktionen. Umiddelbart kan der identificeres tre sandsynlige årsager:

- Naturlige variationer i slaggen som følge af affaldssammensætningen;
- Unaturlige variationer i slaggen (opstået som følge af mekaniske processer og variationer i driften) i kombination med at prøvetagningsteknikken er mindre repræsentativ for den finkornede fraktion;
- Metodefejl ved den manuelle sigtning af slaggen.

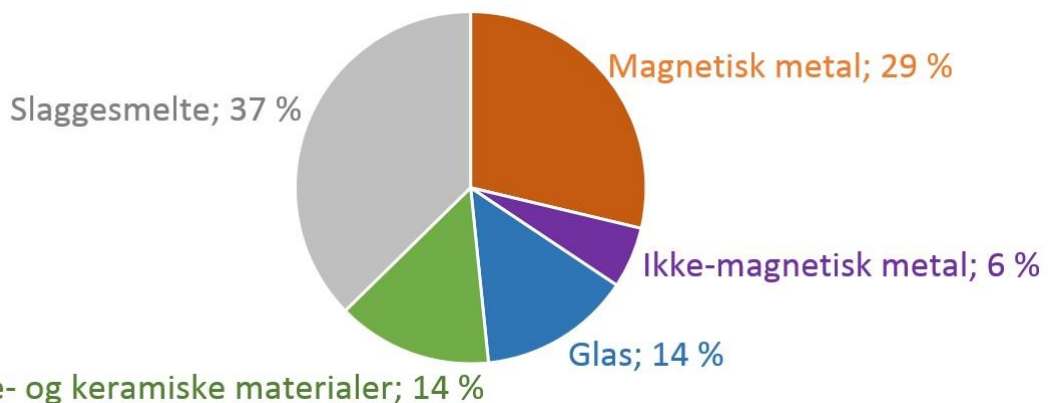
Da sigtningen kun er repræsentativ for kornstørrelser op til 63 mm, er kornkurverne i Figur 32 normaliseret efter denne størrelse. Overstørrelserne er noteret ved 300 mm og repræsenterer de fragmenter, som skovlen til en vis grad kunne prøvetage, men som ikke var repræsentative, fordi de var større end $\frac{1}{3}$ af skovlens bredde.

6.2 Fragmentsammensætning (2-63 mm)

Slaggens fragmenter i størrelsen 2-63 mm blev sigtet, syrebehandlet og sorteret efter metoderne beskrevet i kapitel 5. Det samlede resultat for karakteriseringen fremgår af Figur 33. Slaggesmelten udgør med 37 % den største materialekategori, mens de magnetiske metaller udgør den næststørste kategori med 29 %. Bygge- og keramiske materialer samt glas udgør hver 14 %; de ikke-magnetiske metaller udgør 6 %.



Figur 32. Kornkurver for slaggen for alle 30 prøver. Sigtekurven er normaliseret efter 63 mm, da overstørrelser ikke er repræsentative for den anvendte prøvetagningsteknik.

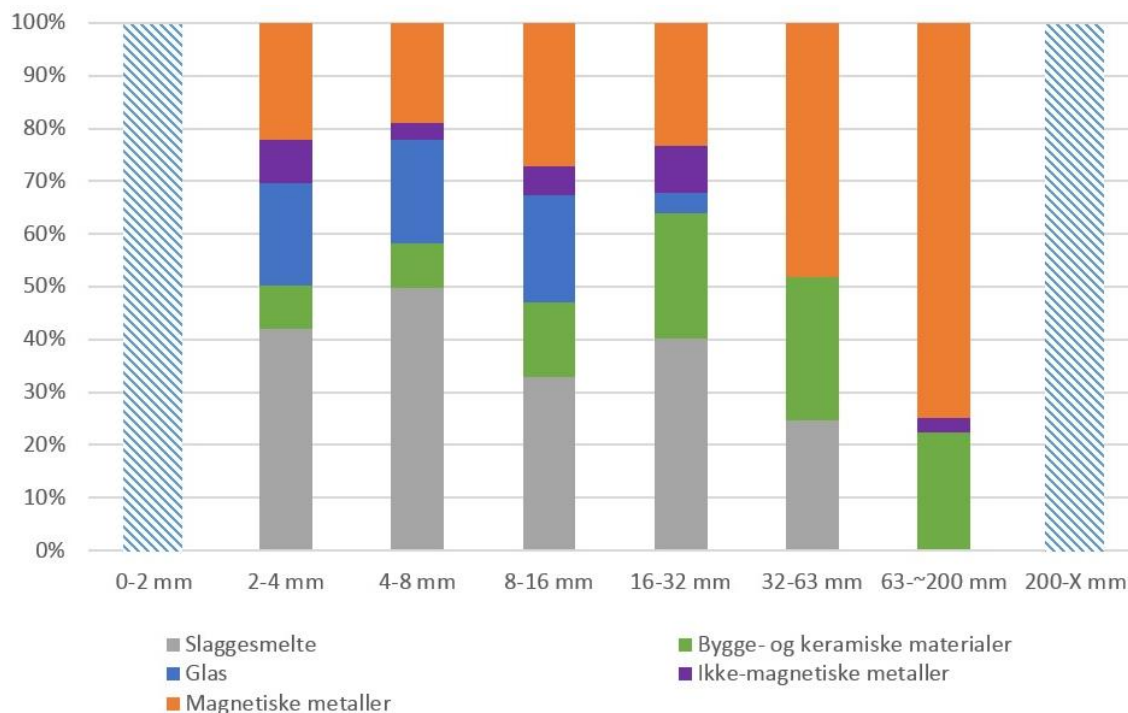


Figur 33. Slaggens overordnede fragmentsammensætning (2-63 mm).

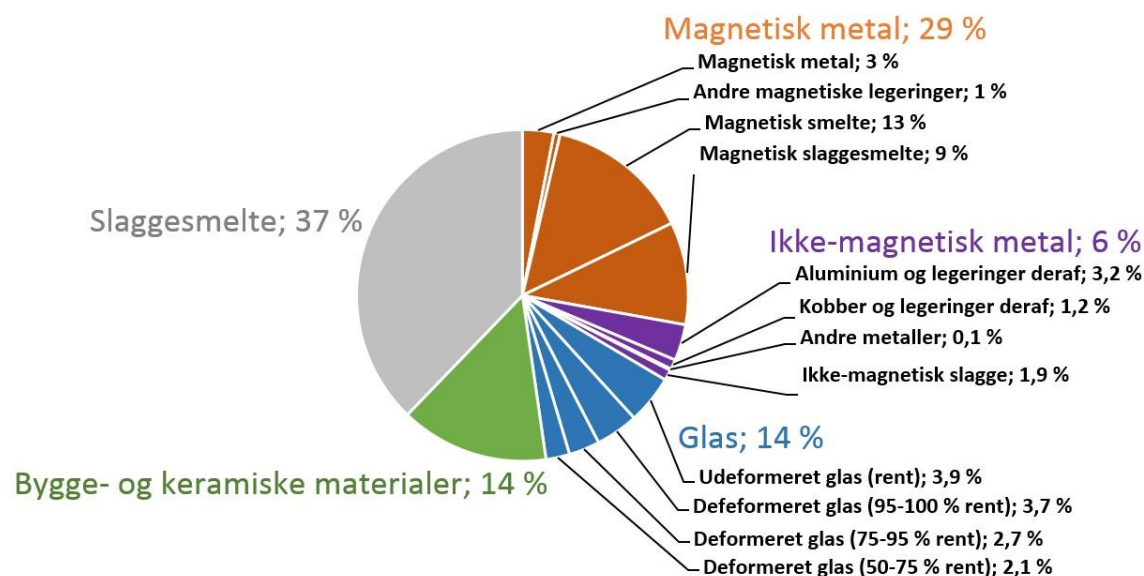
Kornstørrelsen har en tydelig indflydelse på fragmentsammensætningen (Figur 34). Andelen af bygge- og keramiske materialer og magnetiske metaller udgør en større andel af fragmentsammensætningen ved kornstørrelser >32 mm end for kornstørrelser <32 mm. Glas og ikke-magnetiske metaller udgør derimod en forholdsvis større andel ved kornstørrelser under hhv. 16 og 32 mm.

Materialekategoriene magnetiske metaller, ikke-magnetiske metaller og glas blev yderligere sorteret, da der var en forventning om forskelle i omdannelse/reinheit og typer. Detaljerne ses i Figur 35. For magnetiske metaller og glas er de fleste underinddelinger karakteriseret af, hvor omdannede eller rene fragmenterne er. For de ikke-magnetiske metaller fokuserer

inddelingen på om fragmenterne primært indeholder kobber, aluminium, et andet metal eller om der er et metalkorn fanget i slaggesmelte.



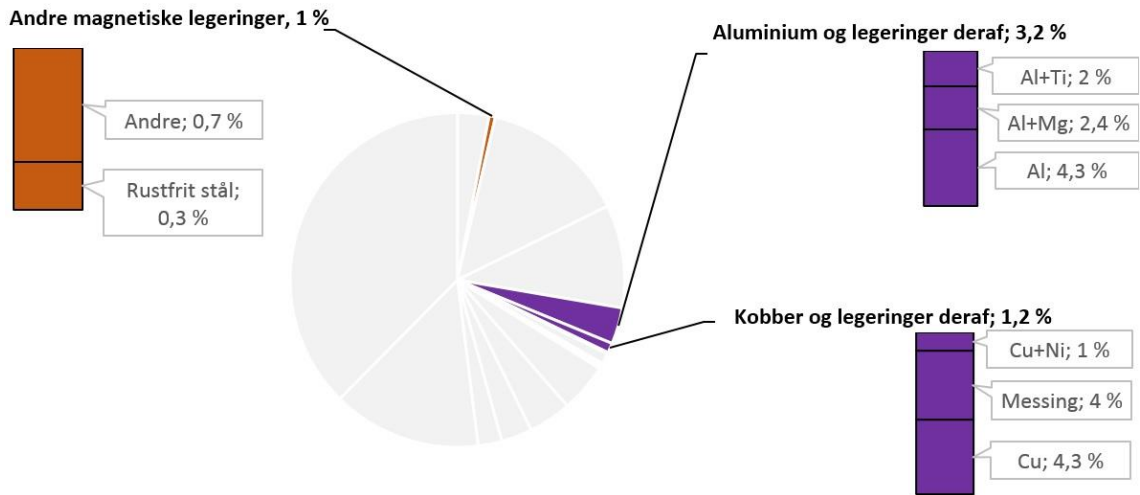
Figur 34. Slaggens overordnede fragmentsammensætning fordelt efter fragmentstørrelse.



Figur 35. Slaggens detaljerede fragmentsammensætning (2-63 mm).

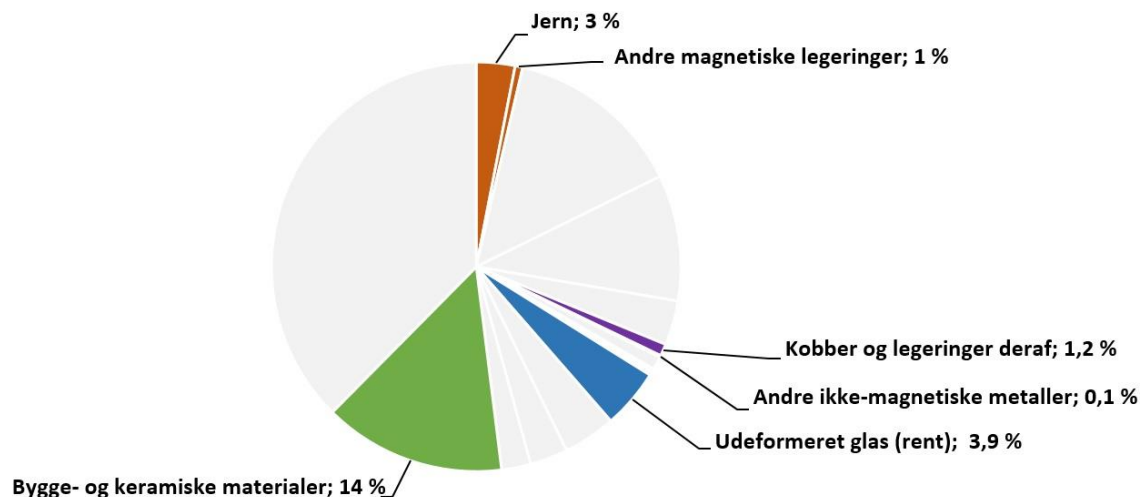
Da hvert af de metalliske fragmenter er analyseret med henblik på identifikation af metaller og legeringer, er der opnået yderligere information om disse (Figur 36). For aluminium blev der, foruden rent aluminium, identificeret to typiske legeringsmetaller: magnesium og titanium. I alle tilfælde blev aluminium fundet som smeltede fragmenter. Kobber optrådte almindeligvis som messing og typisk med legeringsmetaller som nikkel og tin. For jern blev der

kun fundet ganske få fragmenter med legeringsmetaller. Dette kan hænge sammen med, at der ikke blev forsøgt at identificere legeringsmetaller i fragmenter af magnetisk smelte og magnetisk slaggesmelte pga. måleresultatets påvirkning fra urenhederne og sammensmeltede stoffer. Forholdet mellem jernfragmenter og jern med legeringsmetaller er 3:1.



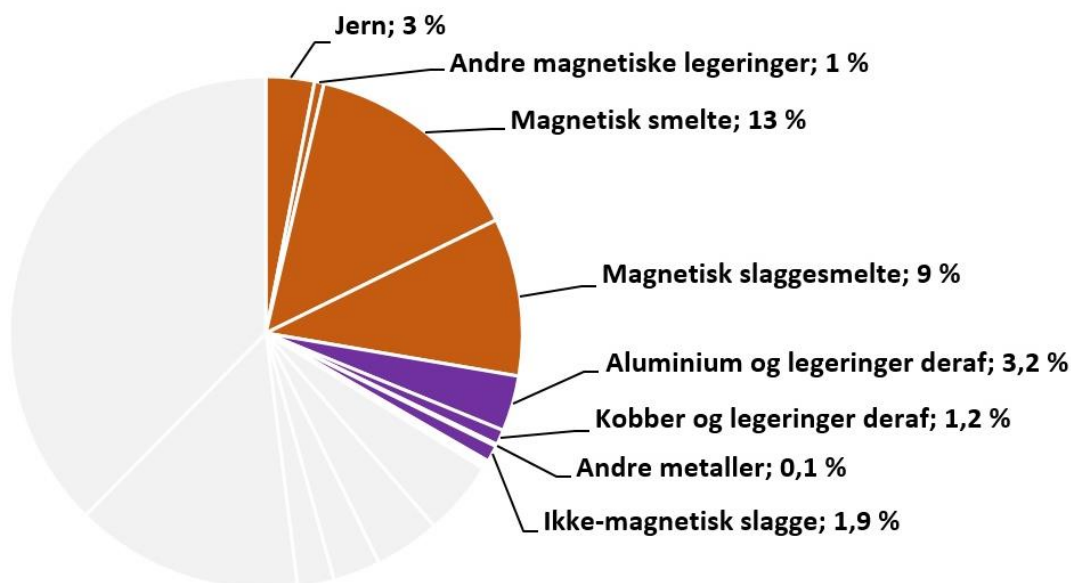
Figur 36. Slaggens detaljerede fragmentsammensætning (2-63 mm). Fragmenter karakteriseret mere detaljeret er fremhævet.

Størstedelen af slaggens fragmenter påvirkes af ovnforholdene, mens en mindre del af fragmenterne kommer ud på den anden side stort set upåvirkede af forbrændingsprocessen. I Figur 37 ses andelen af udeformerede fragmenter. De upåvirkede fragmenter har dermed undgået eller modstået temperaturpåvirkningerne og det kemisk aggressive miljø, ligesom de heller ikke er blevet fanget i slaggesmelten. De upåvirkede fragmenter udgør en meget lille andel af de magnetiske metaller og lidt under $\frac{1}{3}$ af glasfraktionen, mens de for bygge- og keramisk materiale udgør stort set alle fragmenter.



Figur 37. Slaggens detaljerede fragmentsammensætning (2-63 mm). Udeformerede fragmenter er fremhævet.

For en lang række af fragmenttyperne tilstræbes det, at der opnås funktionel genanvendelse. Som det fremgår af Figur 38 drejer det sig især om jern- og metalfragmenterne, der tilsammen udgør lidt over 1/3 af slaggen i 2-63 mm-fraktion.



Figur 38. Slaggen detaljerede fragmentsammensætning (2-63 mm). Fragmenter, som pt. forsøges funktionelt genanvendt, er fremhævet.

De fem hovedgrupper af materialer (magnetiske metaller, glas, bygge- og keramiske materialer, ikke-magnetiske metaller og slaggesmelte) beskrives nærmere i de følgende afsnit og hovedgruppernes vægtmæssige fordeling er indledningsvist vist i Tabel 8. Det skal bemærkes, at samtlige fragmenter i prøven ned til 8 mm blev udsorteret manuelt, mens fragmenter i størrelsen 2-4 mm og 4-8 mm først undergik repræsentativ prøvetagning således, at sorteringen af hver af disse kategorier omfattede omkring 5.000 fragmenter. Fra 4-8 mm-fraktionen blev der med splitter udtaget en delmængde på 4.070 g svarende til 6.789 fragmenter eller ca. 1/3 af 4-8 mm-fraktionen. Fra 2-4 mm-fraktionen blev der ligeledes med splitter udtaget en delmængde på 109 g svarende til 4.958 fragmenter eller ca. 1/18 af 2-4 mm-fraktionen.

Tabel 8. Størrelsesfraktioner i kompositprøven som blev karakteriseret. Overordnede kategorier vist.

Fraktioner efter DS/EN 933-1 (mm)	Vægt (g)					
	I alt	Magnetisk metal	Ikke-magnetisk metal	Glas	Bygge- og keramiske materialer	Slaggerest
31,5-63	993	479	0	0	270	244
16-31,5	2.308	540	205	88	546	929
8-16	3.981	1.086	216	807	560	1.312
4-8*	4.007	761	127	789	340	1.990
2-4**	1.955	432	162	380	162	820
I alt	13.244	3.298	548	1.684	1.716	4.475

*Tal er baseret på optælling af 1/3 af mængden

**Tal baseret på optælling af 1/18 af mængden

6.2.1 Magnetisk metal (ferromagnetisk metal)

Fragmenter af magnetisk metal blev kategoriseret vha. håndholdt XRF og metaldetektor (kapitel 5). De fragmenter, som ikke var helt omdannet til smelte eller indfanget i slagge, blev målt med håndholdt XRF for at skelne mellem legeringstyper. Skelnen mellem smelte og slagge blev gjort med metaldetektor, da denne kun reagerede på metallisk jern i slaggen og ikke på mineraliseret jern. Resultatet af karakteriseringen af magnetisk metal ses i Tabel 9 og Tabel 10.

Tabel 9. Antal fragmenter af magnetisk metal. Kategoriseret vha. håndholdt XRF og metaldetektor.

Fraktioner efter DS/EN 933-1 (mm)	Vægt (g)					
	I alt	'Jern'	Rustfrit stål (Fe+Cr+Ni)	Andre magnetiske legeringer	Smelte	Slagge
31,5-63	479	25	0	3	0	451
16-31,5	540	174	6	0	0	360
8-16	1.086	91	12	42	669	272
4-8	761	73	3	5	631	49
2-4	432	0*	0*	0*	378**	54**
I alt	3.298	363	21	50	1.677	1.186

*Sat til nul med antagelse om, at al jern er på smelteform.

**Magnet-separation udført på 115 g materiale, antal fragmenter baseret på antal i 20 g prøve. Vurdering af smelte og slagge er visuelt vurderet.

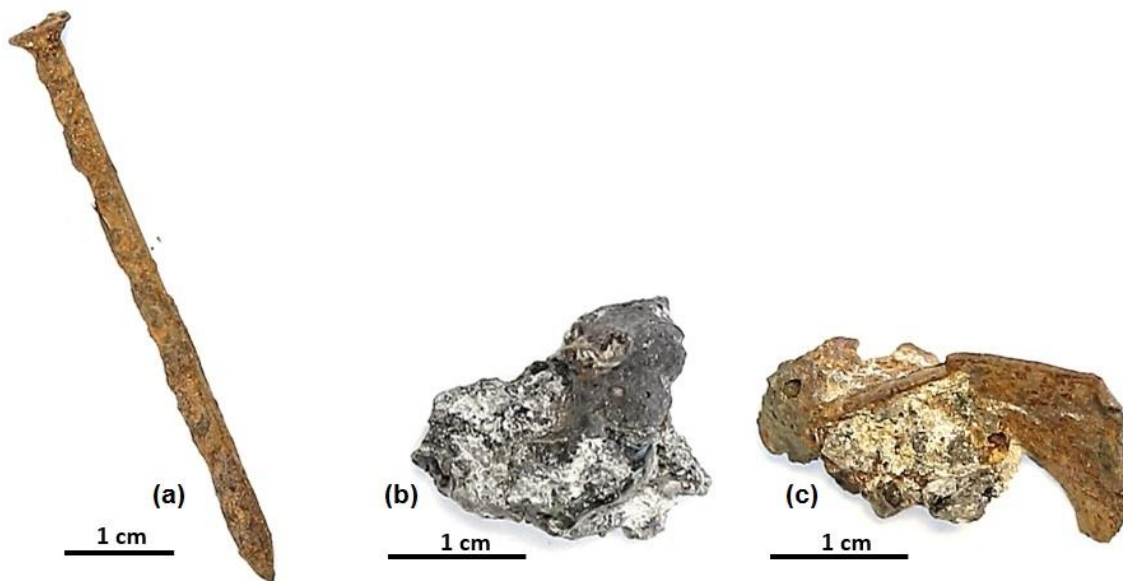
Tabel 10. Antal fragmenter af magnetisk metal. Kategoriseret vha. håndholdt XRF og metaldetektor.

Fraktioner efter DS/EN 933-1 (mm)	Antal fragmenter					
	I alt	'Jern'	Rustfrit stål (Fe+Cr+Ni)	Andre magnetiske legeringer	Smelte	Slagge
31,5-63	18	4	0	1	0	13
16-31,5	45	13	2	0	0	30
8-16	582	40	1	10	406	125
4-8	2.949	117	0	12	2.700	111
2-4	16.367	0*	0*	0*	15.087**	1.280**
I alt	19.961	174	12	23	18.193	1.559

*Sat til nul med antagelse om at al jern er på smelteform.

**Magnet-separation udført på 115 g materiale, antal fragmenter baseret på antal i 20 g prøve. Vurdering af smelte og slagge er visuelt vurderet.

Slaggefragmenter med højt jernindhold findes både som relativt udeformerede og genkendelige fragmenter og som jern smeltet ind i slaggen; farven er ofte rustrød. Magnetiske metalfragmenter er ved denne metode sorteret ud i tre kategorier: (a) udeformet magnetisk metal med genkendelig form (altid rustrød farve), (b) magnetisk slagge (altid mørk/sort farve) og (c) magnetiske metalfragmenter smeltet ind i slagge (ofte er rustrød farve synlig). Den magnetiske slagge skiller sig ud fra de to andre fragmenttyper; dels fordi de er mørke/sorte i farven og dels fordi metaldetektoren ikke giver udslag ved dem. Eksempler på de tre kategorier kan ses i Figur 39.



Figur 39. Eksempler på de tre grupper af magnetisk metal i denne undersøgelse. (a) Udeformeret magnetisk metal, (b) magnetisk mineraliseret smelte og (c) magnetisk slagge. Prøve 567662 C.

Udeformeret magnetisk metal (ofte genkendelige) er yderligere inddelt efter kategorierne 'jern', 'rustfrit stål' og 'andre magnetiske legeringer'; eksempler på disse kan ses i Figur 40. Cirka $\frac{1}{5}$ af det udeformerede magnetiske metal vurderes at indeholde legeringsmetaller.



Figur 40. Magnetisk udeformeret metal fra prøve 567662 C.

Magnetisk mineraliseret metal ('smelte') er samlet set den største gruppe til trods for, at fragmenterne kun forekommer i størrelser <16 mm; eksempler på disse kan ses i Figur 41. Indholdet af eventuelle legeringsmetaller i denne fraktion er ikke bestemt pga. tekniske udfordringer med 'data-støj' fra andre stoffer. XRF-resultaterne indikerer, at omdannede jernfragmenter skal indeholde mindst 15 % jern for at være magnetiske.



Figur 41. Magnetisk mineraliseret metal fra prøve 567662 C.

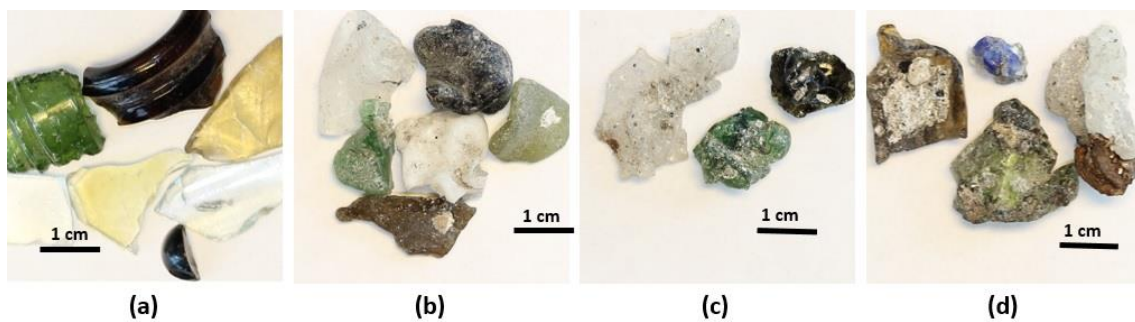
Magnetiske fragmenter smeltet ind i slagge ('magnetisk slagge') består typisk af 10-50 % udeformeret magnetisk metal; eksempler på disse kan ses i Figur 42. I lighed med problemerne for gruppen 'magnetisk mineraliseret jern' er det vanskeligt at vurdere tilstedeværelsen af andre legeringsmetaller med XRF, da det magnetiske metal typisk er dækket af slaggen og/eller har et kraftigt oxidlag iblandet en række stoffer fra den øvrige slagge.



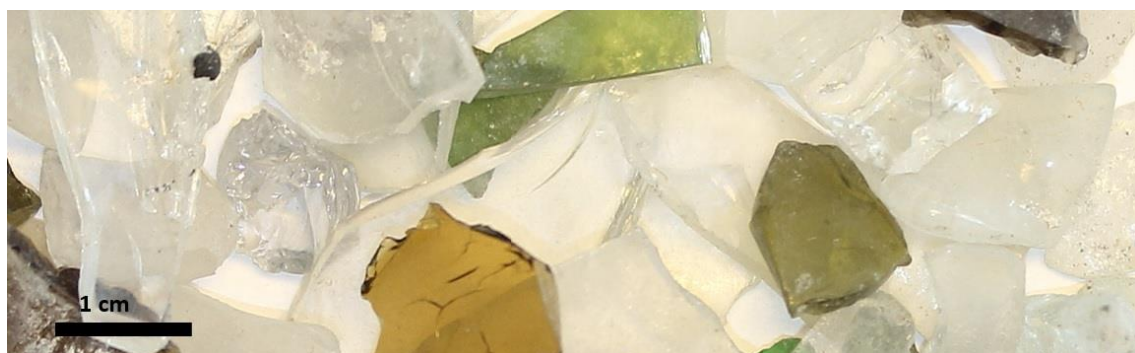
Figur 42. Magnetisk metal 'fanget' i slagge fra prøve 567662 C.

6.2.2 Glas

Fragmenter af glas blev kategoriseret visuelt efter deformitet og renhed. Fragmenttyperne er vist i Figur 43, Figur 44, Figur 45, Figur 46 og Figur 47. Deformeringsgraden fortæller noget om, hvilken temperatur glasset har været udsat for i ovnen, mens renheden er et udtryk for, i hvor høj grad glasset er smeltet sammen med det omkringliggende materiale. Samlet set bidrager denne inddeling af glas til en forståelse af temperatur/kemi-forholdet i ovnen, mens glasfraktionen af det samlede materiale giver information i forhold til et ressourceperspektiv.



Figur 43. Eksempler på glas. (a) udeformeret glas (rent), (b) deformeret glas (95-100 % rent), (c) deformeret glas (75-90 % rent) og (d) deformeret glas (50-75 % rent). Prøve 567662 C.



Figur 44. Udeformeret glas (rent). Fraktion 1-2 mm. Prøve 567662 C.



Figur 45. Deformeret glas (95-100 % rent). Fraktion 1-2 mm. Prøve 567662 C.



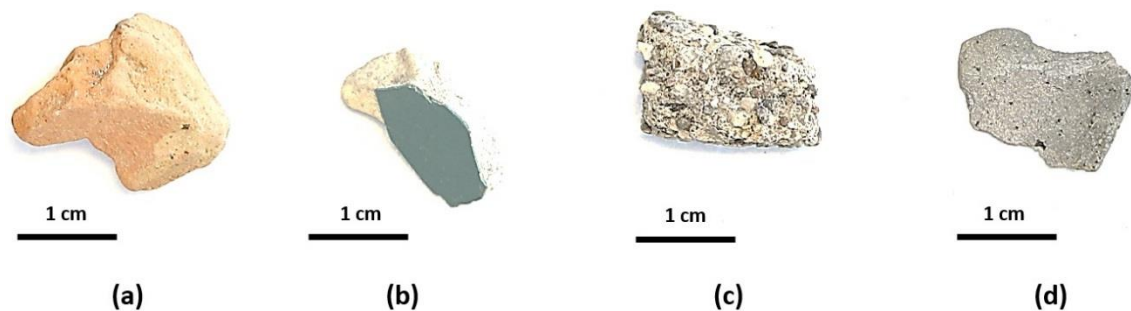
Figur 46. Deformeret glas (75-95 % rent). Fraktion 1-2 mm. Prøve 567662 C.



Figur 47. Deformeret glas (50-75 % rent). Fraktion 1-2 mm. Prøve 567662 C.

6.2.3 Bygge- og keramiske materialer

Fragmenterne af bygge- og keramiske materialer kan ofte genkendes på, at de har flere lige flader og består af et homogent materiale, eventuelt med en glaseret flade. En samling fragmenter er vist i Figur 48 og udvalgte typer ses i Figur 49. Desværre har det været vanskeligt at skelne mellem forskellige typer af byggematerialer, og der er ikke fundet en effektiv metode til en sortering af denne gruppe. Såfremt der måtte opstå behov for en specifik identifikation af byggematerialetyper, eksempelvis for at kunne relatere det til affaldssammensætningen, kan håndholdt XRF og optisk identifikation formodentlig anvendes, dog på basis af en database med kendte referencematerialer.



Figur 48. Eksempler på bygge- og keramiske materialer. (a) tegl, (b) glaseret flise, (c) beton og (d) sten eller andet. Fraktion 1-2 cm. Prøve 567662 C.

Tabel 11 og Tabel 12 angiver den optalte og vejede mængde af bygge- og keramiske materialer i kompositprøven.



Figur 49. Bygge- og keramiske materialer. Fraktion 1-2 cm. Prøve 567662 C.

Tabel 11. Fragmenter af bygge- og keramiske materialer blev identificeret visuelt. Afvejning.

Vægt (g)	
Fraktioner efter DS/EN 933-1 (mm)	I alt (g)
31,5-63	0
16-31,5	88
8-16	807
4-8	789*
2-4	380*
I alt	2.064

*Indhold estimeret ved ekstrapolation af fordelingen i 8-16 mm fraktionen.

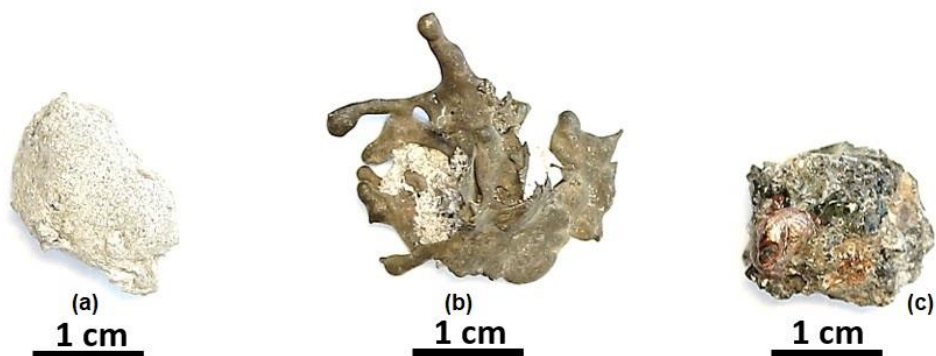
Tabel 12. Fragmenter af bygge- og keramiske materialer blev identificeret visuelt. Optælling.

Antal fragmenter	
Fraktioner efter DS/EN 933-1 (mm)	I alt (antal)
31,5-63	8
16-31,5	73
8-16	256
4-8	1.485
2-4	8.841
I alt	10.663

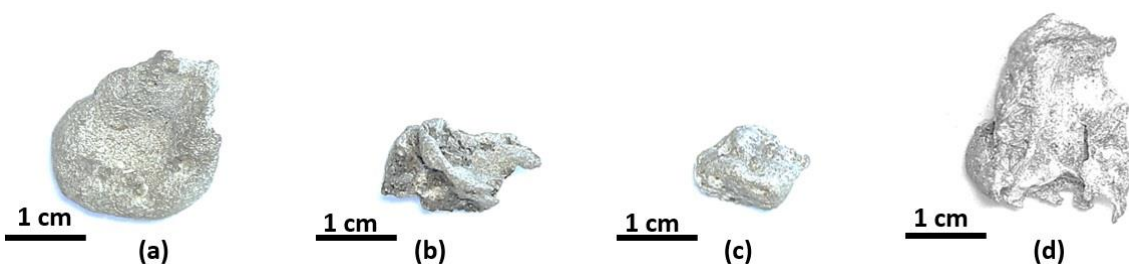
*Indhold estimeret ved ekstrapolation af fordelingen i 8-16 mm fraktionen.

6.2.4 Ikke-magnetisk metal (diamagnetisk metal)

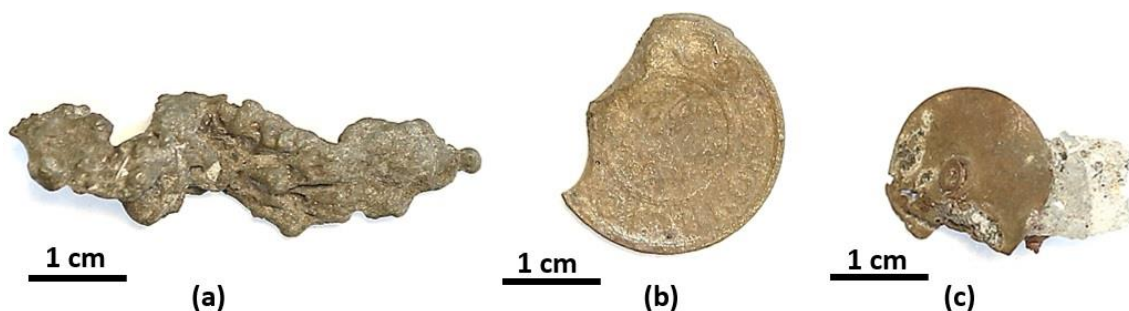
Fragmenter bestående af aluminiums- og kobberlegeringer kan i vid udstrækning identificeres visuelt. For korrekt vurdering i tvivlstilfælde og for at undgå forveksling med rustfrit stål, zink og nikkel er det nødvendigt at sortere på baggrund af XRF-målinger. De typiske ikke-magnetiske metalfragmenter er aluminium og messing, samt slagge med ikke-magnetisk metal; disse kan ses i Figur 50. I Figur 51, Figur 52 og Figur 53 ses eksempler på legeringsmæssige variationer af aluminium, messing og rustfrit stål (i Tabel 13 og Tabel 14 anført som 'andre metaller'). For aluminium kan man ikke visuelt skelne mellem legeringerne. Lidt anderledes er det for kobberlegeringer, hvor der er nuanceforskelle. Nuanceforskellene kan dog ikke alene anvendes til en vurdering af legeringstypen. De rustfrie ståltyper er umiddelbart kendetegnet ved, at de i modsætning til magnetisk metal, ikke er rustrede. For en nærmere bestemmelse af legeringstyper er XRF ligeledes nødvendigt.



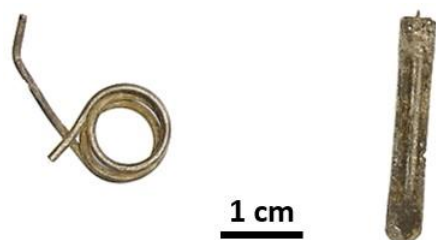
Figur 50. Typiske ikke-magnetiske metaller. (a) aluminium, (b) messing og (c) ikke-magnetisk metal i slagge fra prøve 567662 C.



Figur 51. Aluminiumslegeringer. (a) Al > 50 %, (b) Al < 50 %, (c) Al + Mg (urent) og (d) Al + Mg (urent) fra prøve 567662 C.



Figur 52. Kobberlegeringer. (a) messing og sølv, (b) dansk 10-krone og (c) bukseknappfæstning (urent) fra prøve 567662 C.



Figur 53. To eksempler på rustfrit stål fra prøve 567662 C.

Tabel 13 og Tabel 14 angiver den vejede mængde og optalte (antal) af ikke-magnetisk metal i kompositprøven.

Tabel 13. Vægt af ikke-magnetisk metal. Kategoriseret vha. håndholdt XRF og metaldetektor.

Vægt (g)										
Fraktioner efter DS/EN 933-1 (mm)	I alt	Aluminium	Al + Mg	Al + Ti	Al + andet	Kobber	Messing (Cu + Zn)	Cu + andet	Andre metaller	Slagge
31,5-63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16-31,5	205	68	0	0	30	0	15	0	0	92
8-16	216	103	15	2	1	7	39	13	1	35
4-8	109	71	9	1	5	11	3	3	6	0**
2-4*	162	106	13	1	7	17	5	4	10	0**
I alt	565	348	36	4	43	35	62	20	17	127

*Eddy-current-separation udført på 115 g materiale, antal fragmenter baseret på antal i 20 g prøve.

**Slagge sat til nul, da metaldetektor ikke kunne registrere metalfragmenter mindre end ca. 4 mm.

Tabel 14. Fragmenter af ikke-magnetisk metal. Kategorisering vha. håndholdt XRF og metaldetektor.

Vægt (g)										
Fraktioner efter DS/EN 933-1 (mm)	I alt	Aluminium	Al + Mg	Al + Ti	Al + andet	Kobber	Messing (Cu + Zn)	Cu + andet	Andre metaller	Slagge
31,5-63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16-31,5	22	9	0	0	3	0	1	0	0	9
8-16	117	74	12	2	1	1	5	3	1	18
4-8	486	357	51	6	12	15	6	21	18	0**
2-4*	8.598	6.316	902	106	212	265	106	372	318	0**
I alt	9.223	6.756	965	114	228	281	118	396	337	27

*Eddy-current-separation udført på 115 g materiale, antal fragmenter baseret på antal i 20 g prøve.

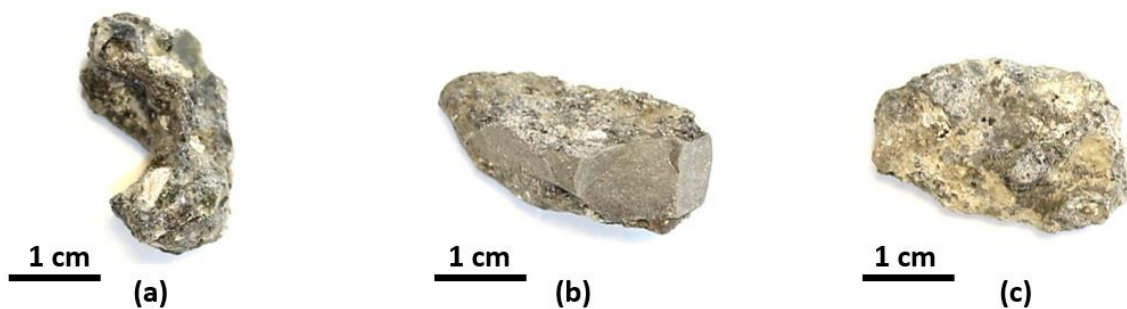
**Slagge sat til nul, da metaldetektor ikke kunne registrere metalfragmenter mindre end ca. 4 mm.

6.2.5 Slaggemelte

Efter frasorteringen af metaller, glas, bygge- og keramiske materialer, samt frasortering af magnetisk slagge og slagge med ikke-magnetiske metaller er der en rest tilbage, her kaldet slaggemelte. Slaggemelten er typisk meget heterogen i sin sammensætningen og farven varierer i grå nuancer; eksempler ses i Figur 54 og Figur 55.

Tabel 15 og Tabel 16 angiver den optalte og vejede mængde af slaggemelte.

I restfraktionen, som her kaldes slaggemelte, findes der i meget begrænset omfang også andre former for fragmenter end slaggemelte. I Figur 56, Figur 57 og Figur 58 ses eksempler på disse andre fragmenttyper; det drejer sig om fragmenter af træ, kul og plast. I denne analyse nøjes vi med at konstatere at disse fragmenttyper findes, om end i meget lille omfang.



Figur 54. Udvalgte fragmenter fra slaggesmelten; (a) mørk, (b) med grå indeslutning og (c) lys. Fra prøve 567662 C.



Figur 55. Fragmenter af slaggesmelte. Fraktion 16-32 mm. Prøve 567662 C.

Tabel 15. Fragmenter af slaggesmelte blev identificeret visuelt. Afvejning.

Vægt (g)	
Fraktioner efter DS/EN 933-1 (mm)	I alt
31,5-63	244
16-31,5	929
8-16	1.312
4-8*	1.990
2-4**	820
I alt	4.475

*Tal er baseret på optælling af 1/3 af mængden

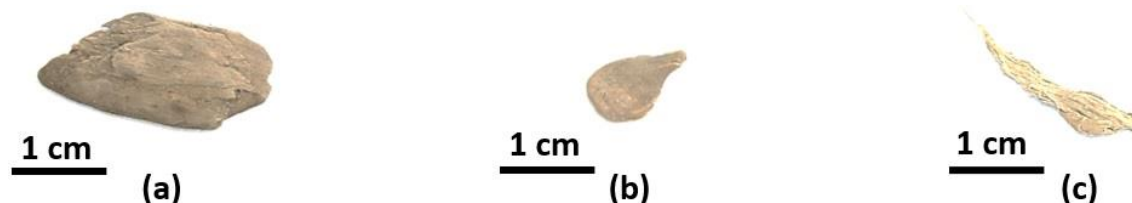
**Tal baseret på optælling af 1/18 af mængden

Tabel 16. Fragmenter af slaggesmelte blev identificeret visuelt. Optælling.

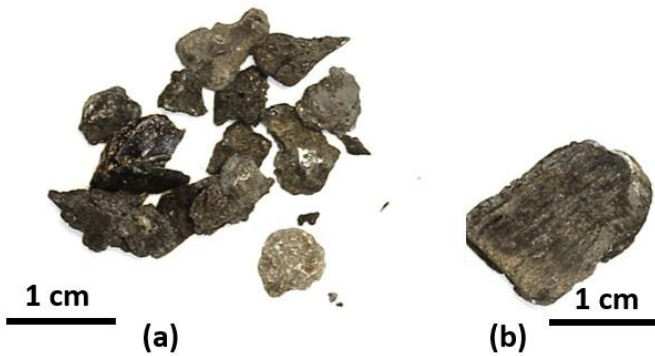
Antal fragmenter	
Fraktioner efter DS/EN 933-1 (mm)	I alt (antal)
31,5-63	10
16-31,5	116
8-16	1.149
4-8*	12.342
2-4**	41.287
I alt	54.904

*Tal er baseret på optælling af 1/3 af mængden

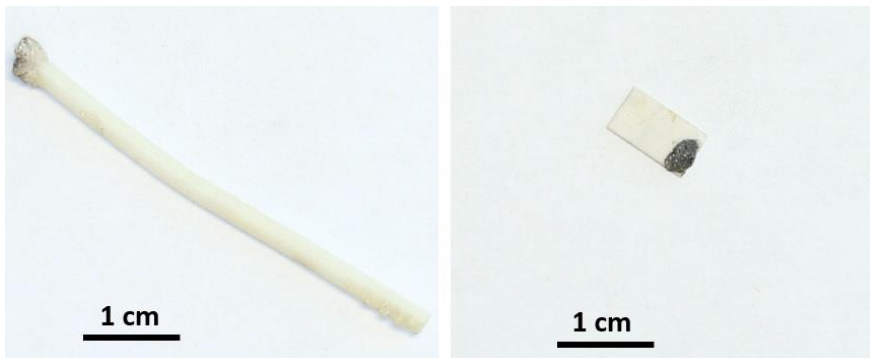
**Tal baseret på optælling af 1/18 af mængden



Figur 56. Genkendelige fragmenter af træ. Fraktion; antageligt urenheder fra sigtesold. Alle tre dele fra prøve 567662 C.



Figur 57. Fragmenter af kul fra prøve 567662 C.



Figur 58. Fragmenter af plast fra prøve 567662 C.

6.3 Fragmentdeformitet i relation til smeltepunktstemperaturer (4-63 mm)

For at få en større forståelse af, hvorfor de mange forskellige typer fragmenter omdannes som de gør, er deformiteten for forskellige fragmenttyper i slaggen karakteriseret. Resultaterne kan ses i Tabel 17, der rangerer fragmenttyperne efter smeltepunkt.

Overordnet ses en klar trend: jo lavere smeltepunkt materialerne har, jo mere deformeret eller omsmeltet er fragmenterne. Aluminium og legeringer deraf findes eksempelvis altid på smeltet form. Det er dog kun en trend, for de fleste af fragmenttyperne optræder på forskellige former – med forskellig grad af deformitet og smeltning. Dette peger på, at ovnforholdene er meget varierende. Her følger et udvalg af mere specifikke observationer:

Aluminium og aluminiumslegeringer har smeltepunkter mellem 500 °C og 900 °C og samtlige fragmenter af disse typer var som minimum omsmeltet. De fandtes typisk på en forholdsvis ren smelteform, hvilket kan hænge sammen med, at det lave smeltepunkt får metallerne til at løbe ned gennem affaldet før temperaturen er høj nok til, at reaktioner er tilbøjelige til at forekomme med andre metaller og materialer.

Den danske 10'er mønt bestående af aluminiumsbronze (se mønten i Figur 52) har et smeltepunkt på 1.027 °C. Mønten var deformeret, og var et af de deformede fragmenter, som havde det højeste smeltepunkt. Dette indikerer dermed, at ovnens minimumstemperatur er

1.027 °C. Lægges dertil at guld har et smeltepunkt på 1.064 °C tyder det på, at værdifulde ressourcer i slaggen ligger på vippen til at blive deformeret.

Jern og stål har et smeltepunkt på mellem 1.150 og 1.500 °C. Til trods for det høje smeltepunktsniveau er de fleste jernfragmenter i slaggen omsmeltet. Der ses dog en klar tendens, nemlig at andelen af omsmeltede fragmenter aftager med størrelsen.

Glas, der har et smeltepunkt ved omkring 1.400-1.600 °C er i stort omfang deformeret og smeltet til slaggesmelte. Fragmenter af **keramik og murbrokker**, der har smeltepunkter omkring 1.600 °C, blev stort set kun fundet som velbevarede, men de ses også som agglomerater i slaggesmelte.

Disse fund af keramik, murbrokker og glas i smelteslaggen kan umiddelbart tyde på, at affaldet påvirkes ved temperaturer på op mod 1.400 °C, hvilket er betragteligt højere temperaturer end målt i ovnen. Ydermere spænder smeltepunkterne for de forskellige udeformede fragmenter vidt, fra 1.084 °C til 1.400 °C, hvilket ligeledes afviger i forhold til den temperaturvariation, der måles i ovnen. Det er derfor mere sandsynligt, at andre forhold end den generelle ovntemperatur spiller ind på omdannelsen af fragmenterne, fx:

- Det kemiske miljø i ovnen fungerer som flusmiddel og sænker smeltepunktet for materialerne lokalt.
- Visse materialer antænder og øger temperaturen lokalt.
- Store emner der rager op bliver udsat for højere varme.
- Tunge fragmenter vil have en tendens til at synke mod bunden af affaldet i ovnen.
- Varierende temperaturgradienter i ovnen.

6.4 Slaggesmeltens kemiske og mineralogiske sammensætning

For at øge forståelsen for hvad der er årsag til at materialerne sammensmeltes og dermed forringer ressourcen, er slaggeklumpenes kemiske sammensætning og deres mineralogiske forhold analyseret. I den oprindelig plan skulle slaggeklumper i størrelsen 2-3 cm i diameter fra Amager Bakkes WtE-anlæg analyseres, men da ibrugtagningen af anlægget blev forsinket er disse analyser lavet på fem tværsnit af repræsentativt udtagne slaggeklumper fra 'det gamle forbrændingsanlæg' kaldet Amager Forbrænding (indsamlet i 2015). Analyserne blev lavet i SEM.

Disse indledende analyser giver ikke umiddelbart svarene på, hvad der forårsager sammensmeltingerne, men de giver et helt elementært overblik over, hvordan mineralerne ser ud, og hvad de består af, herunder typiske teksturer, mineraltyper og kemi. Betydeligt flere studier er nødvendige for at give fyldestgørende svar på spørgsmålet.

Tabel 17. Karakterisering af slaggefragmenternes (4-63 mm) deformitet sorteret efter smeltepunkt. X markerer på hvilken form fragmenttypen er observeret i slaggen. Med X (fed X) fremhæves det på hvilken form fragmenttypen typisk forekommer.

Resultat af karakterisering af fragmenter 4 63 mm							
Fragmenttype	Smeltepunkt	Velbevaret	Deformeret	Ren smelte	Uren smelte (50-90 % legering)	I slagge-smelte	Kommentar
Zink	419,5 °C				X		
Silicium-Magnesium-Aluminium	500 °C			ja	ja		
Magnesium	650 °C						
Aluminium	660 °C			X	X	X	Meget aluminium smelter og størkner rent.
Aluminium-Titanium (få procent Ti)	660-1668 °C			X		40 % (21)	
NaCl	801 °C					7 % (14)	
Aluminium-messing	900 °C					X	
Messing	900-1.000 °C			X		X	
Sølv	962 °C			X		X	
10- og 20-kroner(aluminiumsbronze)	1.027° C		X				Mindre område af 10--kronen er bortsmeltet.
Ukendt møntfod	ukendt		X				Møntfoden kunne ikke identificeres/forvitret
Guld	1.064 °C						Ikke fundet
Kobber	1.084 °C	X	X	X		lidt	
Cupronickel	1.200 °C	X		X	X	X	
Jern (2-4 mm)	1.150-1.500 °C			X	X	X	
Jern (4-8 mm)	1.150-1.500 °C						
Jern (8-16 mm)	1.150-1.500 °C	X		X	X	X	Forskellige ståltyper – forskellige smeltepunkter.
Jern (16-32 mm)	1.150-1.500 °C	X		X	X	X	
Inconel (selve ovnrusten)	1.390-1.425 °C						Blot en reference – ikke fundet i slaggen
Nikkel	1.455 °C	X					
Rustfrit stål	1.510 °C	X					
Titanium	1.670 °C						Ikke fundet
Sand		X	X				
Glas	1.400-1.600 °C, men deformerer fra 900-1.000 °C	X	X		X	X	
Keramik	1.600 °C	X				X	
Murbrokker	1.600 °C	X				X	

Tabel 18 opsummerer helt overordnet, hvilke mineralsammensætninger der er fundet i slaggeklumperne. Hovedbestanddelen kan karakteriseres som 'matrix', dvs. som glasser med indeslutninger af fragmenter og/eller udkrystalliserede mineraler. Matrix vurderes til i overvejende grad at bestå af smeltede produkter dannet i forbindelse med forbrændingsprocessen på anlægget. Matrix kan inddeles efter hvilke hovedelementer – ud over silicium – der er forhøjet. Specifikt er der foretaget grupperinger efter indholdet af natrium, calcium, jern, aluminium og silicium (fravær af øvrige hovedelementer).

Tabel 18. Overordnet inddeling af teksturer og mineraler i restslaggen. Tabellen er baseret på Tabel 19.

Matrix med natrium (>6 %) og calcium (>4 %)	31 %
Matrix rig på jern (>10 %)	24 %
Matrix rig på aluminium (>7 %)	24 %
Matrix med højt siliciumindhold (>73 %)	15 %
Kvarts	3 %
Jern	2 %
Kobber	0,05 %

6.4.1 Mineraltypen 'matrix'

Selve SEM-analyserne blev udført på tværsnit af fem forskellige slaggeklumper. I hvert tværsnit blev der udvalgt tre tilfældige lokationer, dvs. 15 områder i alt, hvor tekstur og kemi blev karakteriseret. Hvert analyseområde udgjorde ca. 4 x 4 mm. Teksturer blev vurderet visuelt ud fra BSE-billeder, mens grundstofkemi blev analyseret med Emersive-Dispersion-Spectroscopy (EDS) (punktvist og områdevist).

Slaggeprøverne blev nummereret 001, 002, 003a, 003b og 004, og hvert af de tre tilfældigt udvalgte lokationer blev kaldt A, B og C. Dernæst blev alle sammenhængende teksturer vurderet i forhold til deres kemiske sammensætning. Disse vurderinger er siden blevet grupperet, og den procentvise fordeling af de forskellige typer mineralogier er beregnet. Se Tabel 18 for overblik over grupperingerne og EDS-resultaterne. Mineraltypen 'matrix' udgør ca. 94 % af slaggeklumpernes undersøgte tværsnit. I Tabel 19 er matrix overordnet inddelt efter om den er jernrig eller ej.

31 % af matrix-typerne har et lavt indhold af aluminium og jern, men til gengæld et højt indhold af natrium og calcium. Disse matrix er typisk kendetegnet ved, at de på afstand ser forholdsvis homogene ud, som fx kvarts, men ved forstørrelse ses tydeligt en dendritisk tekstur (Figur 59a).

24 % af matrix-typerne indeholder mindst 10 % jern og kan genkendes i SEM med BSE og i mikroskopet ved, at de har dendritiske mineraler med et forhøjet jernindhold. Disse er benævnt matrixtype 1a, 1b og 1c i Tabel 19.

Tabel 19. 'Matrix'-mineraltypen grupperet efter kemisk sammensætning. Den arealmæssige fordeling er vist i % i 2. kolonne.

Matrix type	%	Gruppe	Sub gruppe	Reference til billeder	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Cu	Ti
Jernrige silikatmineraller															
1a	16	Fe	Fe>10 %, Si>30 %	001 A, 002 A, 002 B, 003a A, 004 A, 004 C	5-9	0-2	2-14	37-61	0-1	0	1-4	1-27	11-33		
1b	3	Fe	Si<30 %, Fe 50 %	001 A, 002 A	5-8	1	4-8	23-26	0-1	0-3	1	8-9	49-55		
1c	5	Fe	Fe<30 %, Na >10 %	001 B, 001 C, 004 B	10-21	1	3-5	28-49	0-1	0	0-2	16-18	19-29		
1d	0,1	Fe	S>10 %, Ca>10 %	003a B	4-9	1	2-4	16-40	14-28	0-2	1-2	12-33	12-22		
Øvrige silikatmineraller															
2a	9	Si	Na-Ca	001 B, 001 C, 004 B	13-30	2-3	0-5	55-72	0-1	0	0-2	7-11	0-2		
2b	15	Si	Ca	003a A, 003a B, 003a, C, 004 A	0-3	0	0-2	73-91	0-1	0-1	0	7-20	0-1		
2c	22	Si	Na-Al-Ca	002 A, 002 C, 003b A, 003b B, 003b C, 004 A, 004B	6-18	0-3	0-17	51-72	0-1	0-1	2-5	4-27	1-3		
2d	1	Si	Na-Al	004 B, 003a B	8-18	0	19-51	31-60	0	0-1	2-6	0-2	0-3		
2e	17	Si	Na-Al-K-Fe	002 B, 002 C, 004 C	3-9	0-2	8-15	60-71	0	0	4	1-3	5-9		
2f	6	Si	Ca-Al	003a A, 003a B, 003a C, 003b A	0-10	0-3	7-25	9-48	0-10	0-6	0-2	21-50	1-7		
Andre mineraler og metaller >200 µm															
Kvarts	3			001 A, 001 B, 001 C, 002 C, 003a B, 003a C, 003b B, 004 A, 004 B	0-2	0	0	91-100	0-1	0-6	0	0-2	0-1		
Jern	2			002 A, 003b A, 003b B	0	0	0-1	1-2	0	0-1	0	0-1	96-99	0-1	
Kobber	0,05			003b A	0	0	0	15	2	1	0	1	0	82	0
Andre	1,56			001 A, 002 B, 002 C, 003a B, 003a C, 003b A, 003b C	3-28	0-11	0-23	32-65	0-1	0	0-10	0-42	0-15		0-3
Total	100														

*

24 % af matrixtyperne indeholder mindst 7 % aluminium og kan kendes fra matrix-typerne med højt jernindhold ved at de er mørkere. Som med den jernholdige matrix kan den aluminiumsrige matrix også danne dendritter, hvilket ses i Figur 59c.

Matrix med højt siliciumindhold har typisk fået sit høje siliciumindhold pga. de mange indslutninger af usmeltet kvarts. Dette ses fx tydeligt i Figur 59b. Disse udgør 15 %.

6.5 Grundstofsammensætning

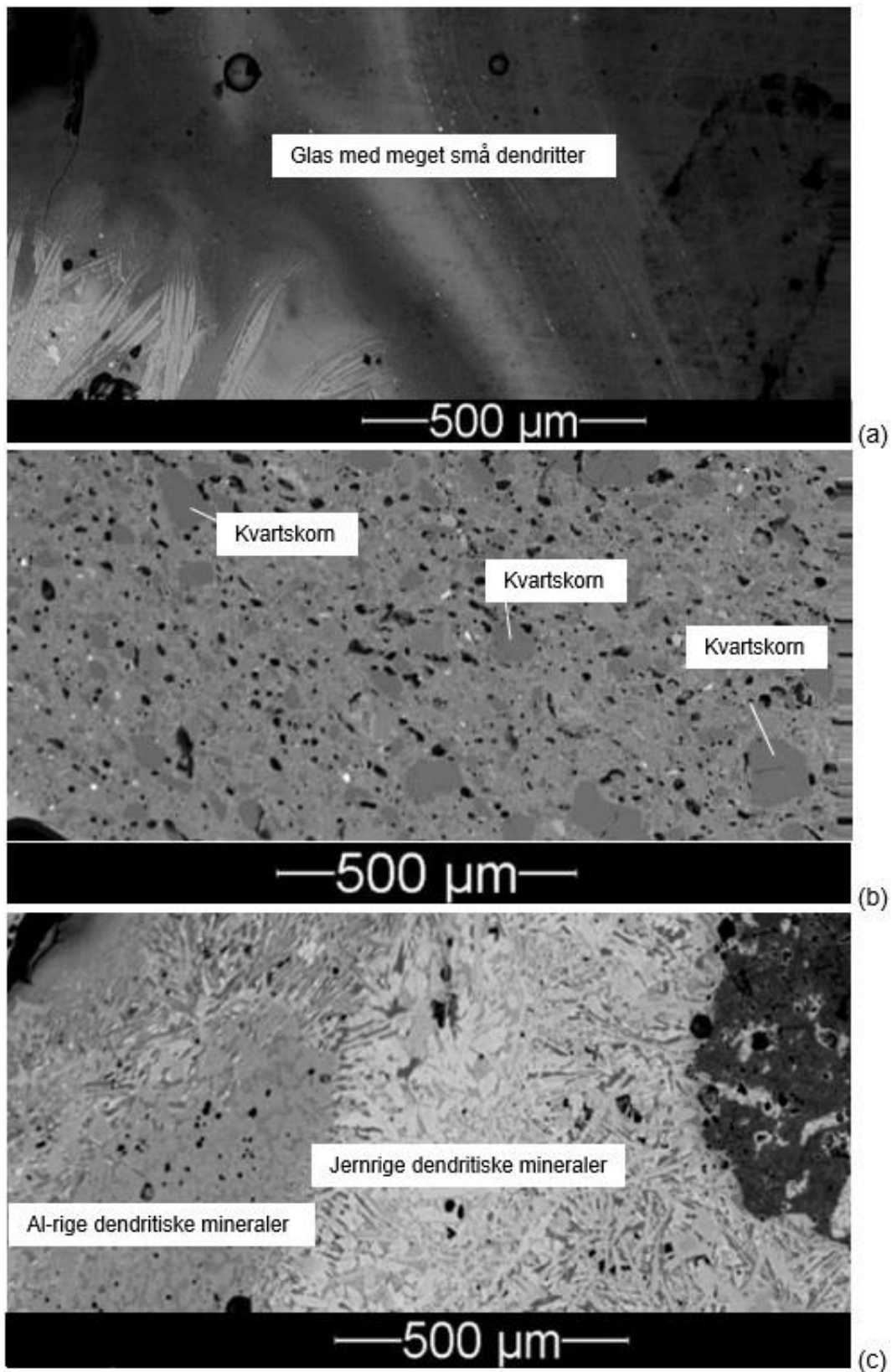
Resultatet af de kemiske analyser for de 30 dagsprøver af slaggen er vist i Tabel 20. I tabellen ses middelværdien for de målte grundstoffer, samt standardafvigelse, minimum- og maksimumværdier. Ved sammenligning skiller grundstofindholdet i slaggen fra ARC's WtE-anlæg sig ikke ud fra slaggen fra andre anlæg, ligesom sammensætningen af hovedelementerne er på forventede niveauer⁵. Standardafvigelsen indikerer, hvor heterogent grundstofferne forekommer. Det ses, at der er væsentlig forskel på grundstoffernes heterogenitet, hvilket kan skyldes en eller flere af følgende årsager:

- Variationer i affaldets sammensætning.
- 'Nugget-effekt', hvor enkelte fragmenter i slaggen skaber øgede grundstofkoncentrationer for nogle prøver, men ikke for andre, fordi forekomsten af fragmentet er så lavt, at det ikke altid vil forekomme i prøven. Guld er et eksempel på nugget-effekt, da guld i affaldet som oftest stammer fra smykker eller elektronik og derfor optræder i gulddpartikler og ikke i sammenblanding med grundstoffer i andre affaldstyper.
- Variationer i kornstørrelsesfordelingen i det analyserede materiale. Dette er specielt gældende for tunge metaller, jf. afsnit 6.1 om kornstørrelsesfordelingen i de 30 dagsprøver, hvor der blev konstateret størst variation for kornstørrelser <2 mm. Samtidig forventes en betydelig mængde af slaggens tunge metaller at befinde sig i det finkornede materiale; dette diskuteres nærmere i afsnit 9.3.3.
- Varierende temperaturforhold og fugacitetsforhold i ovnen kan forårsage at nogle metaller fordampes ud med røggassen eller følger slaggestrømmen.

De ti grundstoffer med størst standardafvigelse er vist i Tabel 21. Fælles for dem er, at de alle bruges i elektroniske produkter. Nogle af grundstofferne i tabellen, guld, cadmium, bly og palladium, findes forhøjet i finfraktionen af slaggen (jf. vurdering i kapitel 9). De store forskelle på bismuth-(Bi)-værdierne kan, ud over forekomsten i elektronik, tilskrives at bismuth også bruges i kosmetik, farvepigment og medicin; sidstnævnte kan eventuelt stamme fra klinisk risikoaffald, som ARC også forbrænder. Ligeledes kan kviksølvvariationen skyldes tilstedeværelsen af fluorescerende pærer, termometre og batterier. Fælles for disse anvendelser er, at de allerede er udfaset eller er under udfasning. Platin og palladium anvendes hovedsageligt i bilkatalysatorer, mens en mindre del findes i smykker, elektronik, kemikalier og i materialer fra medicinalindustrien.

Grundstofferne med den største standardafvigelse kan desuden potentielt anvendes som indikatorer for specifikke affaldstyper under forudsætning af, at affaldskilderne kan bestemmes.

⁵www.iswa.org/index.php?eID=tx_iswaknowledgebase_download&documentUid=4592



Figur 59. (a) Glas-matrix med meget små dendritter (udsnit af billede 004 B, matrix 2c), (b) matrix med højt siliciumindhold som følge af talrige kvartskorn (udsnit af billede 003a A, matrix 2f), (c) dendritiske teksturer; til venstre aluminiumsrige dendritter; til højre jernrige dendritter (udsnit af 002C, matrix 2e).

Tabel 20. Gennemsnitlig totalkemi for analyse af slaggen for prøverne 567602 til 567631. Resultater for hovedelementer (række 1-10), sporelementer (række 11-44) og sjældne jordartsmetaller (række 45-61) ses. LOD: Lower limit of detection.

2	CaO	%	20	2,1	10	18	25
4	K ₂ O	%	1,1	0,11	10	0,8	1,3
6	MnO	%	0,13	0,04	28	0,1	0,2
8	P ₂ O ₅	%	0,81	0,17	20	0,32	1,1
10	TiO ₂	%	1,3	0,20	15	1,0	2,0
11	Ag	ppm	3,2	1,2	37	1,8	7,1
12	As	ppm	19	5,5	29	9,0	33
13	Au	ppb	476	435	91	60	1.640
14	Ba	ppm	1.500	346	23	1.112	2.908
15	Be	ppm	<1	LOD	LOD	LOD	LOD
16	Bi	ppm	1,8	1,0	53	0,80	5,7
17	Br	ppm	7,3	2,4	33	2,5	14
18	Cd	ppm	4,7	4,8	101	0,80	26
19	Co	ppm	33	15	46	18	94
20	Cr	ppm	428	62	14	290	550
21	Cs	ppm	1,3	0,3	21	0,7	1,7
22	Cu	ppm	1.903	409	21	1.120	2.830
23	Ga	ppm	9,1	0,58	6	8,0	10,0
24	Ge	ppm	0,6	0,08	14	0,50	0,70
25	Hf	ppm	5,0	0,93	19	3,3	8,8
26	Hg	ppb	31	35	112	6,0	117
27	Li	ppm	24	4,3	18	17	41
28	Mo	ppm	8,5	1,7	20	6,00	12
29	Nb	ppm	9,5	1,6	17	8,20	17
30	Ni	ppm	100	27	27	60	200
31	Pb	ppm	978	1.289	132	470	7.720
32	Pd	ppb	74	135	184	9,00	617
33	Pt	ppb	44	32	74	5,00	137
34	Rb	ppm	29	3,7	13	23	37
35	Sb	ppm	42	10	25	26	65
36	Sn	ppm	146	37	25	74	263
37	Sr	ppm	460	38	8	402	586
38	Ta	ppm	2,1	3,1	149	0,89	18
39	Tb	ppm	0,33	0,03	9	0,3	0,4
40	Th	ppm	4,0	0,39	10	3,17	4,85
41	Ti	ppm	<0,05	LOD	LOD	LOD	LOD
42	U	ppm	1,5	0,11	7	1,28	1,77
43	V	ppm	60	8,7	15	46	82
44	W	ppm	6,3	8,7	138	1,80	46
45	Zn	ppm	3.055	654	21	2.120	4.520
46	Zr	ppm	225	35	15	150	338

Række nr.	Kemisk betegn.	Enhed	Middel værdi	Standard afvigelse (\pm)	Standard afvigelse (\pm %)	Minimum	Maksimum
47	Ce	ppm	38	6,1	16	29	58
48	Dy	ppm	1,8	0,19	10	1,5	2,2
49	Er	ppm	1,0	0,11	11	0,78	1,2
50	Eu	ppm	0,6	0,05	9	0,51	0,74
51	Gd	ppm	2,1	0,15	7	1,7	2,3
52	Ho	ppm	0,3	0,04	12	0,27	0,44
53	La	ppm	20	6,3	31	16	50
54	Lu	ppm	0,2	0,01	9	0,11	0,18
55	Nd	ppm	14	1,9	14	11	20
56	Pr	ppm	4,1	0,8	19	2,90	6,27
57	Sc	ppm	3,1	0,43	14	2,00	4,00
58	Sm	ppm	2,2	0,17	8	1,82	2,43
59	Tm	ppm	0,15	0,02	11	0,1	0,2
60	Y	ppm	14	2,9	21	11	24
61	Yb	ppm	0,97	0,09	10	0,70	1,11
Middelstandardafvigelse			32 %				

Tabel 21. Gennemsnitligt grundstofindhold i slaggen for prøverne 567602 til 567631. De ti grundstoffer med højest standardafvigelse i % ses. Uddrag fra Tabel 20.

Kemisk betegnelse	Enhed	Middel værdi	Standard afvigelse (\pm)	Standard afvigelse (\pm %)	Minimum	Maksimum
Pd	ppb	74	135	184	9,00	617
Ta	ppm	2,1	3,1	149	0,89	18
W	ppm	6,3	8,7	138	1,80	46
Pb	ppm	978	1.289	132	470	7.720
Hg	ppb	31	35	112	6,0	117
Cd	ppm	4,7	4,8	101	0,80	26
Au	ppb	476	435	91	60	1.640
Pt	ppb	44	32	74	5,00	137
In	ppm	0,2	0,12	62	0,10	0,40
Bi	ppm	1,8	1,0	53	0,80	5,7

6.5.1 Kemiske korrelationer

Viden om hvordan slaggens grundstoffer korrelerer indbyrdes hen over prøvetagningsperioden kan bidrage til en øget forståelse af, hvordan grundstofferne er bundet/associeret i slaggen, og kan dermed omsættes til optimering og målretning af genanvendelsesmetoderne. Principielt kan viden om grundstoffernes korrelationer også bidrage til en forståelse af, hvilke materialetyper og affaldskilder der er årsag til grundstofvariationerne i slaggen. Denne viden vil kunne muliggøre en målrettet forhindring af specifikke affaldstyper; enten for at øge genanvendelsen af den pågældende affaldstype via indsamlingsordninger eller for at forhindre en eventuel forringelse eller forurening af slagge-ressourcen og/eller de øvrige biprodukter fra affaldsforbrændingen.

Konkret er det undersøgt om de 30 dagsprøver af slaggen kan bruges til at bibringe denne viden. Dette er gjort ved at udføre korrelationsanalyse for alle parvise korrelationer af de

analyserede grundstoffer. Grundstoffernes korrelationskoefficient (r) for hver kombinationsmulighed er beregnet og ses i Figur 60. Grundstofferne i Figur 60 er rangeret efter kalciumoxid (CaO), da tendensen er, at de fleste grundstoffer i en eller anden udstrækning udviser positiv eller negativ korrelation med kalcium.

I afsnittene nedenfor vurderes korrelationerne, og om de kan bibringe til et nyt vidensniveau, men hovedkonklusionerne er:

- De fleste grundstoffer er påvirket af en 'Si-Ca-tendens' og en række observationer (se afsnittet om Si-Ca-tendensen nedenfor) peger på, at Si-Ca-tendensen skyldes en kombination af, at andelen af den fine fraktion varierer meget i prøverne (jf. sigteanalysen), og at grundstofsammensætningen i finfraktionen adskiller sig signifikant fra grovfraktionen. Si-Ca-tendensen er altså et udtryk for en fraktionering af slaggen på båndet, hvorfra der er prøvetaget.
- Konsekvensen af Si-Ca-tendensen er, at den slører de forventede korrelationer fra variationer i affaldskilder, smelteprodukter og slagge/flyveaske-ratio. Si-Ca-tendensen kan antageligt undgås ved en ny prøvetagning, hvor man udtager en større prøvemængde og derved reducerer fraktionsstørrelses-variationen eller ved at man kun analyserer finfraktionen. Derved vil en bedre tolkning være mulig.
- Mange af de positive korrelationer, som ikke skyldes Si-Ca-tendensen, kan henføres til grundstoffernes typiske anvendelsesformer i legeringer, elektroniske komponenter og kemiske stoffer (Tabel 22); dette var forhåbningen med analysen. Der er dog behov for at underbygge denne identifikation af affaldskilder med flere identifikationsmetoder for at sikre, at de identificerede affaldskilder er korrekte, og at korrelationerne skyldes de korrekte årsager; henholdsvis om de skyldes variationer i affaldskilder, slaggesmelteprodukter og slagge/flyveaske-ratio.
- Nogle af de positive korrelationer, som ikke umiddelbart kan forklares ved affaldstyper, kan forklares ved, at de er grundstoffer med lignende egenskaber, og som under metallurgiske forhold formentlig har tendens til at reagere på samme måde og dermed ende i samme smeltefragmenter.
- Mange af de negative korrelationer, som ligger uden for Si-Ca-tendensen, kan umiddelbart ikke forklares.

Si-Ca-tendensen – størrelsesfraktionering af slaggen

Den mest dominerende korrelation er den negative korrelation mellem silicium og kalcium, og det fremgår, at mange af grundstofferne i forskellig grad korrelerer med disse to grundstoffer.

På baggrund af nedenstående observationer konkluderer vi, at de negative korrelationer der i dette kapitel benævnes Si-Ca-tendensen må tilskrives de størrelsesmæssige variationer i prøverne:

1. Af resultaterne præsenteret i afsnit 6.2 ses det, at grundstofsammensætningen i slaggens 2-63 mm fragmenter varierer med kornstørrelsen (Figur 35) og det fremgår af denne figur, at der er en tendens til, at de tungere metaller (ikke-magnetiske metaller) er koncentreret mod mindre kornstørrelser. Sigteanalysen (Figur 32) viser endvidere, at der for 0-2 mm størrelsesfraktionens andel af slaggen er en signifikant større varians sammenlignet med slaggens øvrige gennemfaldsstørrelser.

2. De metaller som calcium korrelerer stærkest med må forventes at befinde sig i slaggens finkornede del af de årsager, som er uddybet i nedenstående punkter. Det drejer sig om zink, kobber, molybdæn, tin og titanium:
 - *Zink og kobber* har tendens til at findes i de finkornede fraktioner, som det fremgår af karakteriseringen af fragmentsammensætningen i 2-63 mm fraktionen (afsnit 6.2). Fragmentkarakteriseringen viste også, at zink og kobber ofte findes i samme fragmenter, og derfor bør have en positiv kemisk korrelation, hvilket også er tilfældet.
 - *Molybdæn* anvendes fortrinsvist i stål og en mindre del anvendes i kemiske forbindelser, hovedsageligt i elektroniske komponenter og applikationer. Molybdæn blev ikke registreret ved XRF-analyse af stål-fragmenter i slaggens grovkornede fraktion (2-63 mm), hvorfor molybdæn må antages at være tilstede i 0-2 mm slaggefraktioner. Molybdæn er et meget inert materiale, som ikke reagerer med vand eller oxygen ved stuetemperatur. Det har også en høj densitet ($10,28 \text{ g/cm}^3$) og et højt smeltepunkt ($2.623 \text{ }^\circ\text{C}$). Hvis molybdæn optræder på støvform, er det derfor sandsynligt, at det især vil være koncentreret i slaggens finkornede fraktioner og ikke i flyveasken.
 - *Tin* anvendes primært som loddetin og har en høj densitet, og må derfor forventes at optræde i slaggens finkornede fraktioner.
 - *Titanium* anvendes hyppigt på oxidform som pigment i plast. Som følge af forbrændingen af plast forventes titaniumoxid at optræde i flyveasken. Titaniumoxid har en relativ høj densitet ($4,23 \text{ g/cm}^3$) og har tendens til at udfælde tidligt i processen (omtales i kapitel 6 i forbindelse med flyveasken); derfor er det sandsynligt at titaniumoxid især er koncentreret i de finkornede slaggefraktioner.
3. Si/Ca-forholdet er højere i flyveasken end i slaggen, henholdsvis Si (13 %)/Ca (23 %) i flyveasken og Si (48 %)/Ca (20 %) i slaggen. Hvis slaggens finkornede materiale minder om flyveaskens sammensætning, så kan det være en forklaring på Si-Ca-tendensen.

Mulige affaldskilder og/eller smelteprodukter

Mange grundstofpar har korrelationer der ligger uden for Si-Ca-tendensen. Disse kan derfor ikke forklares med størrelsesfraktionering af slaggen forud for prøvetagning. To forklaringer på disse korrelationer kan i stedet være: (i) varierende tilstedeværelse af affaldskilder med unikke grundstofsammensætninger, og/eller (ii) varierende forhold i ovnen, som bevirker at grundstofindholdet i slaggens finfraktion varierer i forhold til flyveasken. En kombination af disse to forklaringer vurderes sandsynlig, og det er umiddelbart ikke muligt at identificere præcist hvilke korrelationer, der hænger sammen med hvilke af de to årsager.

Ved at matche korrelerende grundstofpar med deres typiske anvendelsesformål kan nogle mulige affaldskilder identificeres. Resultatet af dette litteraturstudie er vist i Tabel 22. Det samlede billede af affaldskilder virker plausibelt, men der er behov for kryds-verificering af resultatet. Dette kan eventuelt gøres ved beregning af affaldsmængder ud fra variansen og sammenligning med tidligere affaldsundersøgelser og med slaggekarakteriseringen.

Ca	Zn	Cu	Mo	Sb	TiO2	Bi	Br	Ta	Nb	Ge	Sn	Ag	Pt	Cd	Ni	Y	P2O5	V	Cr	Al	Ca	Pb	W	Au	Mg	Cu	Mn	Ca	Hg	La	Sr	Hf	Ga	Zr	Fe	Zn	U	Ce	Sm	Gd	Er	Ho	Pr	K2O	Tb	Dy	Nd	Tm	Yb	Lu	U	Na	Th	Rb	Cs	SiO2																																																																												
100	77	84	57	50	52	48	43	36	32	28	27	25	22	21	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20	-21	-22	-23	-24	-25	-26	-27	-28	-29	-30	-31	-32	-33	-34	-35	-36	-37	-38	-39	-40	-41	-42	-43	-44	-45	-46	-47	-48	-49	-50	-51	-52	-53	-54	-55	-56	-57	-58	-59	-60	-61	-62	-63	-64	-65	-66	-67	-68	-69	-70	-71	-72	-73	-74	-75	-76	-77	-78	-79	-80	-81	-82	-83	-84	-85	-86	-87	-88	-89	-90	-91	-92	-93	-94	-95	-96	-97	-98	-99	-100

Figur 60. Korrelationsmatrix som viser korrelationskoefficient (Pearson) for grundstofvariationernes parvise korrelation. Sorteret efter CaO. Be og Ti er undtaget. Grøn farve: positiv værdi (positiv korrelation), hvid farve: værdi ved 0 (ingen korrelation), rød farve: negativ værdi (negativ korrelation).

Tabel 22. Mulige affaldskilder som forklarer de parvise grundstofkorrelationer. Korrelationskoefficienter (r) større end 30 % er vurderet; et udvalg af disse er vist i tabellen.

Affaldskilde	Korrelation
Almindelige 'strukturelle' materiel	
Rustfrit stål (Cr-legeret stål):	Cr:Fe ($r=58$ %)
Nb-legeret rustfrit stål	Nb:Cr ($r=54$ %), Nb:Fe ($r=33$ %)
Ti-legeret aluminium	Ti:Al ($r=47$ %)
Messing	Zn:Cu ($r=36$ %)
Specielle 'strukturelle' materialer	
Aluminium legeret med Cr	Al:Cr ($r=60$ %)
Nb-Ti-Al legeringer	Nb:Al ($r=50$ %), Nb:Ti ($r=47$ %)
Krom legeret med yttrium	Y:Cr ($r=47$ %)
Elektroniske komponenter og kemiske stoffer	
Halvlederkontakflader (Au-Ge legering)	Au:Ge ($r=70$ %)
Halvledermaterialer (fx GaGe, GaAs)	Ga:Ge ($r=57$ %)
Flammehæmmer (antimon-triborid)	Sb:Br ($r=52$ %)
Guldbelagte smykker og elektriske kredsløb	Cd:Au ($r=47$ %), Cu:Au ($r=29$ %)
Pd og Pt har ofte samme anvendelser	Pd:Pt ($r=45$ %)
"Gamle" lysstofrør (fosforescens)	Sb:Mn ($r=44$ %)
LCD skærme (såkaldt ITO-coating-materiale)	In:Sn ($R=40$ %)
Laptops (Al-karosseri og loddetin)	Al:Sn ($r=40$ %)
Permanente magneter (alnico-typen)	Al:Ni ($r=36$ %), Co:Ni (19 %), Al:Co ($R=18$ %)
Alkali-batterier (Zn og Mn)	Zn:Mn ($r=35$ %)

Dannelsen af smelteprodukter kan muligvis forklare nogle af de korrelationer der umiddelbart ikke kan forklares ved grundstofsammensætninger i affaldskilder. Grundstoffer med lignende egenskaber vil formentlig, under metallurgiske forhold, have tendens til reagere på samme måde og ende i samme smeltefragmenter. Grundstoffer med lavt smeltepunkt, men højt kogepunkt, kunne være kandidater til disse smelteprodukter (smeltepunkt/kogepunkt), eksempelvis Al (660 °C/2.470 °C), Pb (328 °C/1.750 °C), Sn (232 °C/2.602 °C), Ge (938 °C/2.833 °C) og Ga (30 °C/2.400 °C). Mange af disse metaller korrelationer matcher i øvrigt metalhjulet som ses i Figur 74 og diskuteres i kapitel 9. Man skal dog være forsigtig med at anvende grundstoffernes smelte- og kogepunkter som forklaring, da mange grundstoffer optræder som legeringer i materialer, der har helt andre smelte- og kogepunkter.

Øvrige observationer

Korrelationerne for guld og de sjældne jordartsmetaller (REE) afviger fra det forventede, men afvigelserne kan forklares på følgende måde:

- **Guld:** Der blev ikke fundet guld i de fragmenter som blev målt med XRF, dvs. >2 mm, hvorfor guld må formodes at forekomme i finere materiale. Guld korrelerer dog ikke med Si-Ca-tendensen, jf. Figur 60. Dette kan forklares ved nugget-effekt, som betyder, at guldvariationen er stor og derfor nedtoner Si-Ca-tendensen. Ifølge beregningen korrelerer guld dog med nogle grundstoffer, navnlig Cu, Ti, Ge, Cd, P, Sn, Ag, Pt og Pb. Guld i slaggen stammer formentlig fra elektroniske produkter, men kan også stamme fra smykker og guldbelagte prydenstande, som er endt i affaldet.

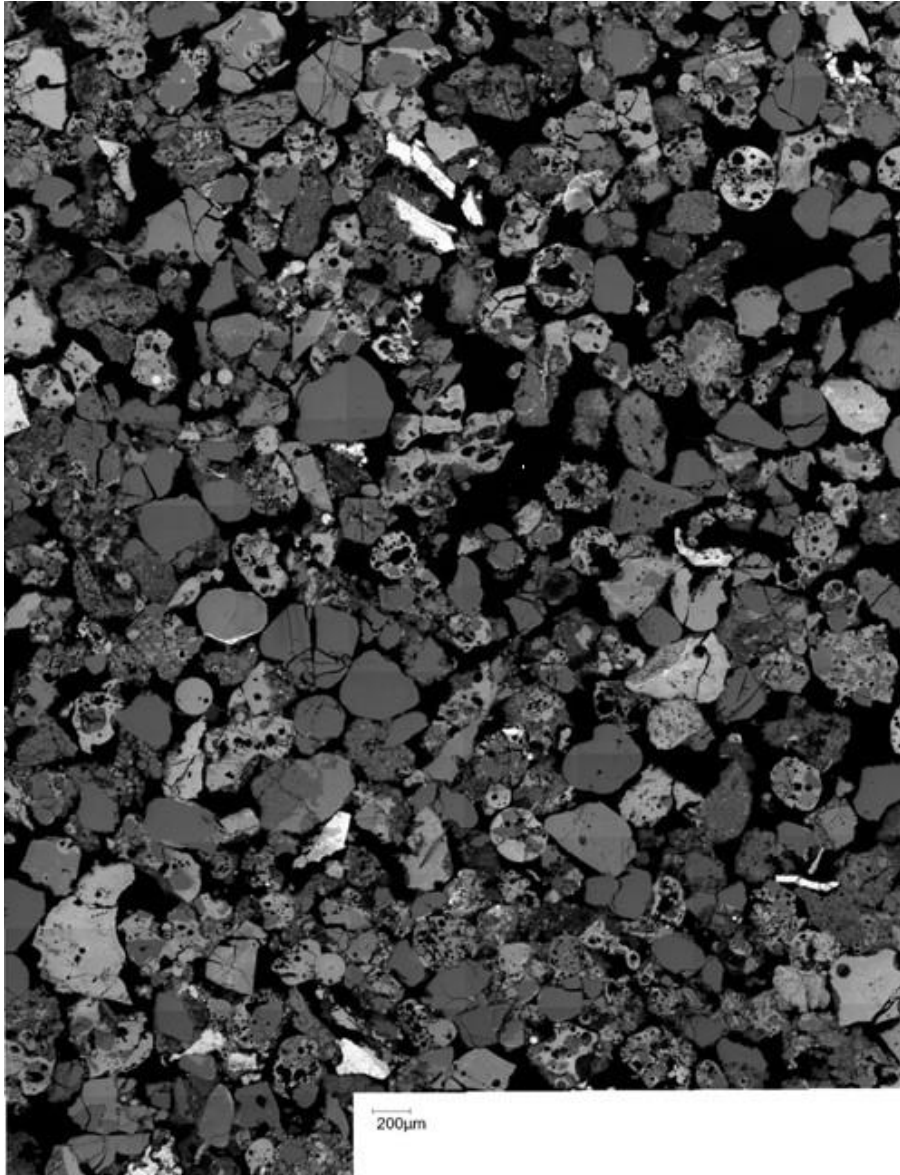
- **REE:** De fleste af de sjældne jordartsmetaller korrelerer positivt med silicium. Dette indikerer, at de overvejende optræder som et naturligt baggrunds niveau i de uforarbejdede mineralske affaldstyper i slaggens grovfraktion (fx sten, grus, byggematerialer og keramiske materialer). Kun et enkelt af de sjældne jordartsmetaller afviger fra dette billede, nemlig yttrium, der i stedet har en svag negativ korrelation med silicium og tilsvarende positiv korrelation med kalcium.

6.6 Mineralogi (0-2 mm)

For at kunne analysere slaggens 0-2 mm fragmenter i SEM'en blev slaggen sigtet. Ved sigtningen blev der observeret 'sammenklumpning' af partikler. Dette fænomen kan påvirke registreringen af enkeltkorn ved den automatiske CC-SEM-analyse; korn der optræder tæt sammen, vil blive registreret som ét korn. For at minimere risikoen for dette kan man mekanisk bearbejde kornene for at løsrive kornene fra sammenklumpningen. Trods den mekaniske bearbejdning var kornene i prøven for tætsiddende, fordi koncentrationen af korn i den støbte epoxy-prøve var for høj. Dermed var det ikke muligt at foretage en automatiseret korn-genkendelse og analyse (med CC-SEM).

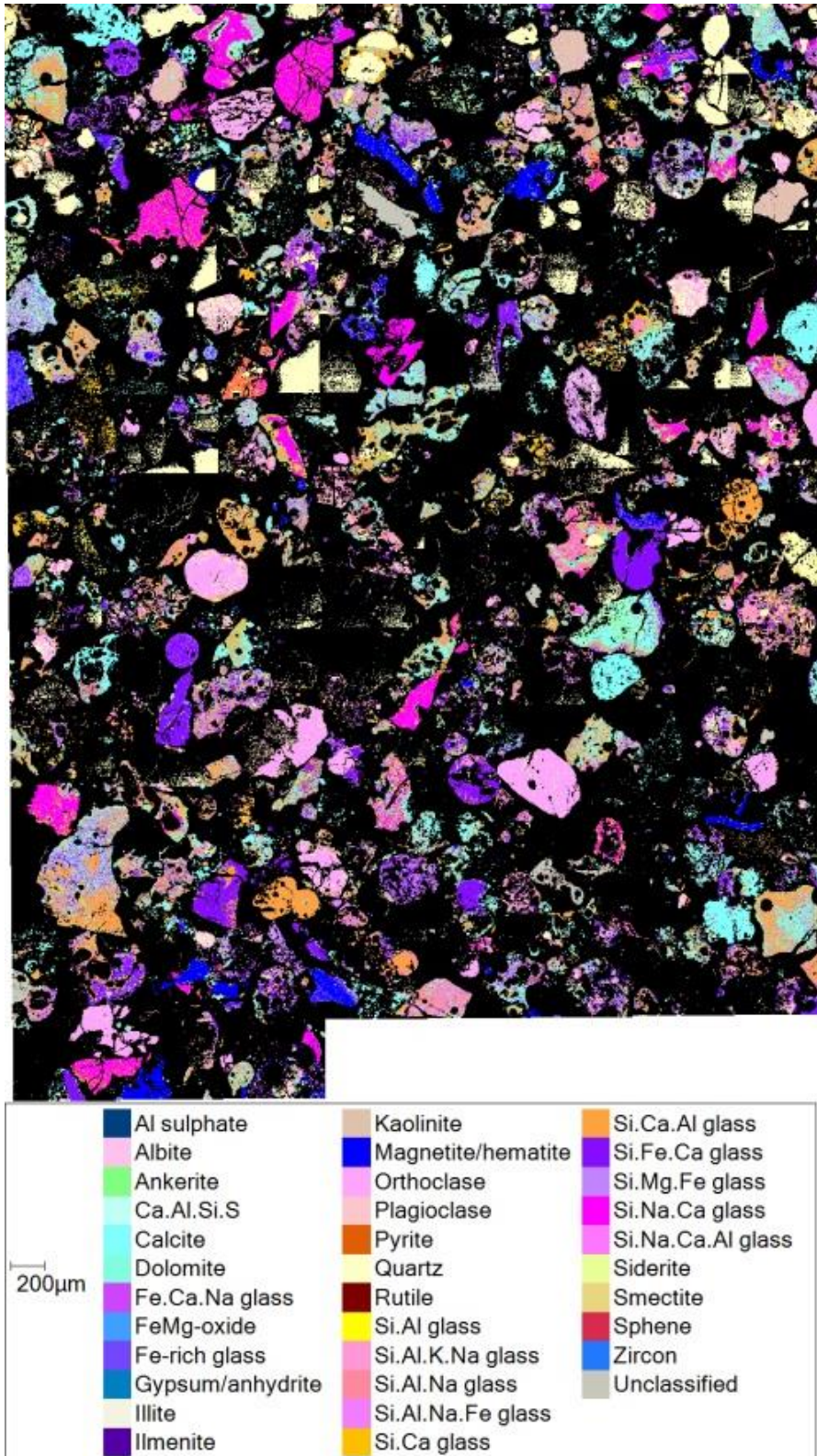
I stedet blev der forsøgsvis foretaget en automatiseret kortlægning af et område á ca. 4 x 6 mm; dels med BSE (Figur 61) og med EDS. Efterfølgende blev BSE-billedet farvelagt med EDS-målingerne ud fra en grundstofsammensætningsmæssig kategorisering af EDS-målepunkterne (Figur 62) udi mineraltyper. Kategoriseringen er forsøgsvis for at vise anvendeligheden af kortlægningsteknikken. Mineralogiprogrammet kan endvidere kvantificere det procentvise overfladeareal af hver kategori, således at det samlede indhold af bestemte mineraler kan bestemmes.

Ved både CC-SEM og den viste form for mineralkortlægning gælder det, at der skal opstilles en kategorisering af EDS-data, hvor intervaller af grundstofindhold skal defineres. Det er i denne forbindelse nødvendigt at udvikle forskellige grupperings-set-ups til forskellige formål: Eksempelvis kan det i én sammenhæng være interessant at kende alle de forbindelser guld indgår i, mens det i en anden sammenhæng kan være interessant at vide, hvilke forbindelser tungmetallerne danner. Denne målrettede udvikling af softwaren udestår, men det foreløbige resultat viser, at det i hvert fald kan lade sig gøre at udføre automatiseret kortlægning og kvantificering af mineraltyper og beskrive, hvordan grundstofferne er bundet i slaggens fragmenter.



Figur 61. BSE-billede af slaggekorn, størrelse ca. 4 x 6 mm. Prøvemateriale: Kompositprøve af 30 dages slaggeprøver, fraktion 250-500 µm.

Det ses af Figur 62, at fragmenterne mineralogisk set er meget forskelligartede; der er både magnetitter, forskellige typer af glas, kalcitter og gips, mens nogle af de uklassificerede mineraler muligvis er zinkoxider.



Figur 62. BSE-billede af slagge, størrelse ca. 4 x 6 mm, overlagt med mineralogisk kortlægning fra EDS-scanning. Prøvemateriale: Kompositprøve af 30 dages slaggeprøver, fraktion 250-500 μm .

7. Karakteriseringen af flyveasken

Som led i Urban-X-projektet indgik også en karakterisering af flyveaskens kemiske sammensætning og tidsmæssige variation.

Sammenfattende viser resultatet, at de observerede kemiske variationer ikke skyldes variationer i affaldet, som først antaget, og derfor ikke kan anvendes til fingerprinting, dvs. identifikation af affaldstyper og ej heller kan anvendes til at beskrive flyveaskens varierende resourcepotentiale. I stedet skyldes de observerede kemiske variationer, at måden hvormed flyveasken udfælder på anlægget resulterer i en periodevis kemisk opdeling af flyveasken. Signifikansen af denne konklusion diskuteres nærmere i kapitel 9, men helt grundlæggende består den i, at flyveasken har et markant øget resourcepotentiale, når flyveaskestrømmene betragtes individuelt.

7.1 Totalkemi og varians

Resultatet af de kemiske analyser for de 30 dagsprøver af flyveasken ses i Tabel 23. I tabellen ses middelværdien for de målte grundstoffer, samt standardafvigelse, minimum- og maksimumværdier. Flyveasken skiller sig umiddelbart ikke ud fra flyveasker fra andre kommunale affaldsforbrændinger, navnlig er sammensætningen af hovedelementerne på forventede niveauer.

Standardafvigelsen (SD) indikerer, hvor heterogent grundstofferne forekommer. Ved sammenligning af det gennemsnitlige SD-niveau for flyveasken (Tabel 23) med det gennemsnitlige SD-niveau for slaggen (Tabel 20) ses, at det gennemsnitlige SD-niveau er lige så højt for flyveasken som for slaggen, hvilket ikke var forventet, da flyveasken udsættes for en opblanding i røggassen, og i det hele taget består af meget fine partikler i modsætning til slaggen, som består af større fragmenter. Derudover er der indsamlet rigeligt af flyveasken ved den valgte prøvetagningsmetode (omkring 200 g pr. prøve), hvilket skulle øge homogeniteten sammenlignet med prøvetagningen af slagge. Umiddelbart kan følgende tre årsager være skyld i det høje varians-niveau for flyveaskens grundstofindhold:

1. Variationer i affaldets sammensætning.
2. Udfældning af flere typer flyveaske fra forskellige trin i forbindelse med flyveaskeudfældningen, der senere er heterogent blandet på båndet.
3. Varierende temperaturforhold i ovnen påvirker om nogle metaller bliver luftbåren og bevæger sig med røggassen eller følger slaggestrømmen.

Det vurderes dog, at den primære årsag til variationerne skyldes én årsag, nemlig punkt 2, dvs. at flere typer flyveaske udfælder fra flere forskellige trin i røggasanlægget (se afsnit 7.2).

De ti grundstoffer med størst standardafvigelse ses i Tabel 24. Det er de grundstoffer som varierer mest i slaggeprøverne, og de er i udgangspunktet interessante, fordi de potentielt stammer fra specielle affaldskilder eller fordi de er særligt følsomme over for ændringer i

forbrændingsforholdene. I dette tilfælde er standardafvigelserne dog et udtryk for den heterogene udfældning af flyveasken (jf. punkt 2 ovenfor) og er derfor som sådan ikke et interessant resultat.

Tabel 23. Gennemsnitlig total kemi for analyse af flyveasken for prøverne 567602 til 567631. Resultater for hovedelementer (række 1-11), sporelementer (række 12-46) og sjældne jordartsmetaller (række 47-62) ses. LOD: Lower limit of detection.

Nr.	Kemisk betegn.	Enhed	Middel værdi	Standard afvigelse (\pm)	Standard afvigelse (\pm %)	Minimum	Maksimum
1	Al ₂ O ₃	%	4,4	1,212	28	2,10	6,80
2	CaO	%	23	5,549	24	10	32
3	Fe ₂ O ₃ (T)	%	1,3	0,193	15	0,89	1,74
4	K ₂ O	%	7,4	2,160	29	4,08	13
5	MgO	%	1,9	0,402	21	1,07	2,57
6	MnO	%	0,1	0,012	15	0,05	0,10
7	Na ₂ O	%	9,0	2,284	25	5,11	14
8	P ₂ O ₅	%	1,1	0,210	18	0,58	1,52
9	SiO ₂	%	13	2,965	24	7,73	19
10	TiO ₂	%	1,2	0,304	25	0,52	1,70
11	Zn	%	3,5	1,2	34	1,7	7,2
12	Ag	ppm	11	5,1	45	4,00	24
13	As	ppm	299	141	47	126	751
14	Au	ppb	334	76	23	225	597
15	Ba	ppm	1045	173	17	686	1283
16	Be	ppm	<1	LOD	LOD	LOD	LOD
17	Bi	ppm	12	4,2	36	6,40	22
18	Br	ppm	842	109	13	542	961
19	Cd	ppm	297	151	51	111	672
20	Co	ppm	13	1,8	14	10	16
21	Cr	ppm	418	65	16	310	550
22	Cs	ppm	4,3	2,5	58	1,00	14
23	Cu	ppm	1186	278	23	830	1960
24	Ga	ppm	13	3,91	30	9,00	29
25	Ge	ppm	3,0	1,5	51	1,40	8,30
26	Hf	ppm	2,2	0,67	31	0,90	3,70
27	Hg	ppb	27	23	88	6,00	104
28	In	ppm	1,3	0,46	35	0,70	2,30
29	Li	ppm	35	8,41	24	22	58
30	Mo	ppm	13	1,3	10	9,00	15
31	Nb	ppm	6,9	1,8	26	2,90	10
32	Ni	ppm	49	5,8	12	40	60
33	Pb	ppm	4833*	1789	37	1860	>10000
34	Pd	ppb	40	51	127	14	209
35	Pt	ppb	94	52	55	36	250
36	Rb	ppm	135	63	47	52	359
37	Sn	%	0,1	0,0	30	0,06	0,21
38	Sb	%	0,17	0,07	42	0,07	0,36
39	Sr	ppm	410	91	22	195	553
40	Ta	ppm	1,0	0,5	55	0,13	2,63
41	Th	ppm	2,0	0,5	25	0,99	2,98
42	Tl	ppm	0,13	0,1	42	0,06	0,29

*Datapunktet '>10.000 ppm' er ved beregning af middelværdi inkluderet som 10.000 ppm

42	U	ppm	0,86	0,2	23	0,47	1,20
45	W	ppm	5,5	1,3	24	3,30	8,40
48	Dy	ppm	0,8	0,20	24	0,45	1,25
50	Eu	ppm	0,4	0,09	22	0,21	0,50
52	Ho	ppm	0,2	0,04	25	0,08	0,23
54	Lu	ppm	0,07	0,02	25	0,04	0,11
56	Pr	ppm	1,7	0,40	23	0,94	2,4
58	Sm	ppm	1,1	0,2	22	0,58	1,61
60	Tb	ppm	0,15	0,04	24	0,08	0,22
62	Yb	ppm	0,46	0,12	25	0,25	0,70
Middelstandardafvigelse			32 %				

Tabel 24. Gennemsnitlig total kemi for analyse af flyveasken for prøverne 567602 til 567631. De ti grundstoffer med største standardafvigelse i % er vist (uddrag fra Tabel 23).

Kemisk betegnelse	Enhed	Middel værdi	Standard afvigelse (\pm)	Standard afvigelse (\pm %)	Minimum	Maksimum
Pd	ppb	40	51	127	14	209
Hg	ppb	27	23	88	6,00	104
Cs	ppm	4,3	2,5	58	1,00	14
Pt	ppb	94	52	55	36	250
Ta	ppm	1,0	0,5	55	0,13	2,63
Cd	ppm	297	151	51	111	672
Ge	ppm	3,0	1,5	51	1,40	8,30
As	ppm	299	141	47	126	751
Rb	ppm	135	63	47	52	359
Ag	ppm	11	5,1	45	4,00	24

7.2 Kemiske korrelationer

Det var forventet, at prøvetagningen ville give flyveaskeprøver som repræsenterede den dannede flyveaske fra forbrændingen. Ved gennemgang af resultaterne for kemien i flyveaskeprøverne blev der dog fundet to kraftige indikationer på, at det ikke er tilfældet:

- Over halvdelen af de målte grundstoffer viser høj korrelation med hinanden hen over de 30 dage. Her vil man forvente, at kun nogle af grundstofferne vil udvise høj korrelation, især fordi grundstofniveauerne i flyveasken forventes at ligge nogenlunde stabilt, idet variationer i kemien jævnes ud ved opblanding i siloen og ved forbrændingsprocessen.

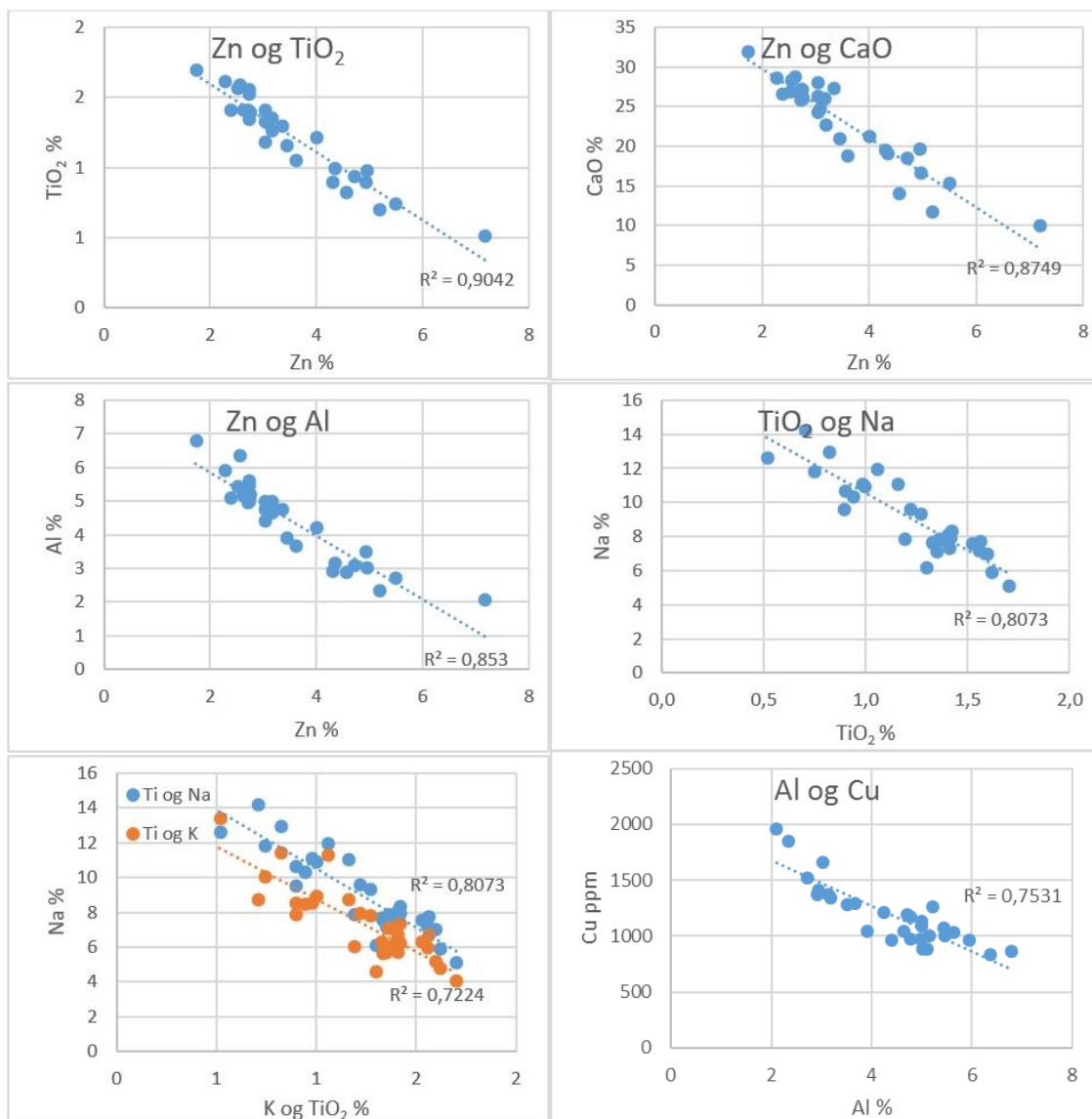
- Ved vurderingen af parvise korrelationer observeres der mange negative korrelationer mellem forskellige grundstoffer i flyveasken (svarende til en negativ korrelationskoefficient (r)). Disse er markeret med rødt i korrelationsdiagrammerne i Figur 63 og Figur 64. Det betyder, at nogle grundstoffer udelukker hinandens tilstedeværelse i flyveasken. Umiddelbart kan denne observation ikke forklares ved affaldssammensætningen, da affaldet opblandes med grab i siloen. Hvis forklaringen skulle ligge i varierende flyveaske/slagge-ratio ville man se de samme grundstoffer korrelere i flyveasken som i slaggen, hvilket ikke er tilfældet.

Konklusionen er derfor, at der sandsynligvis sker en separation af flyveasken efter forbrændingen, som bevirker, at der opstår en kemisk heterogenitet på flyveaskebåndet. Denne mulighed er undersøgt nærmere ved at se på anlæggets opbygning.

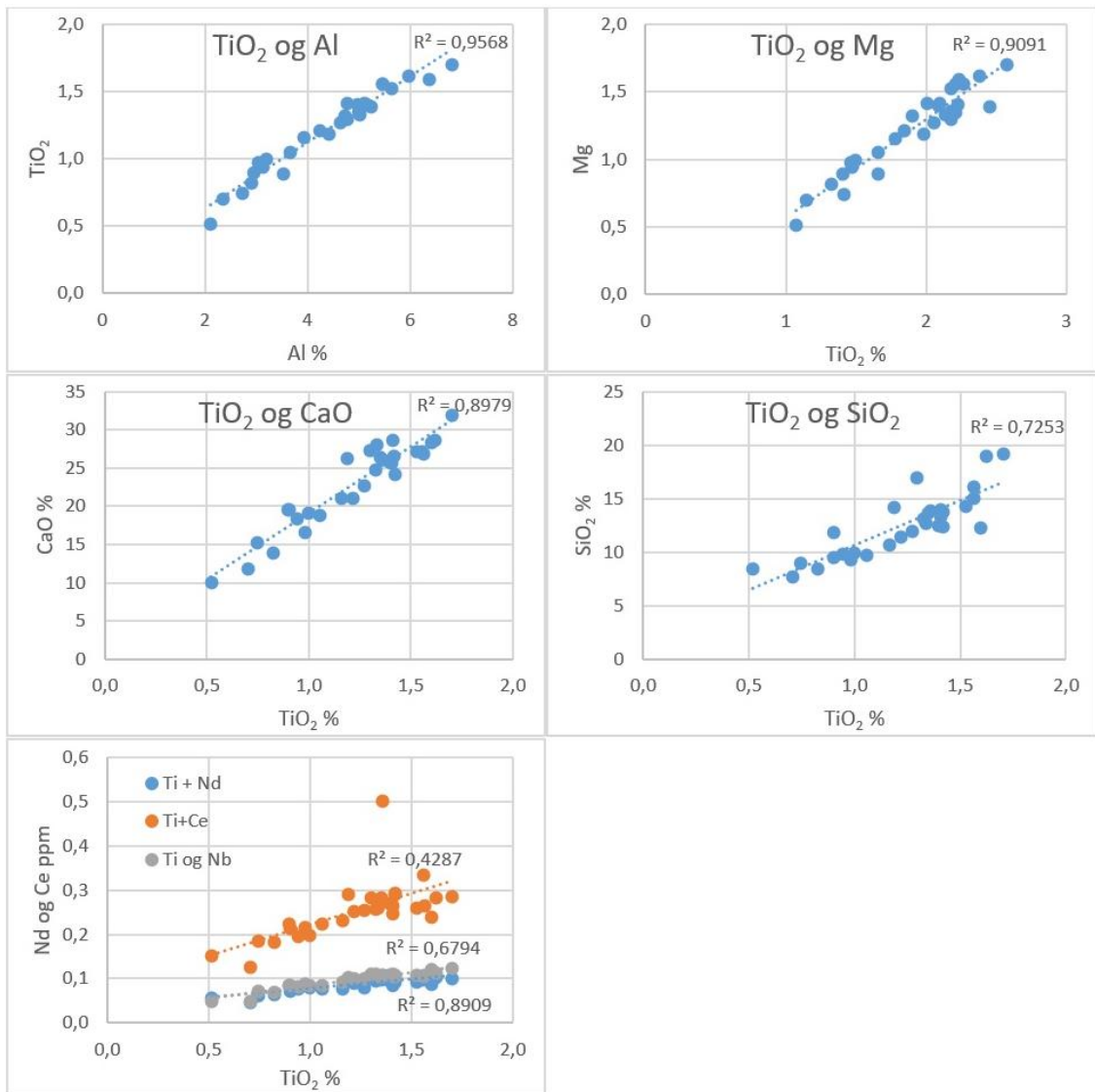
I anlægget er der i princippet fem steder, hvor flyveaske udfældes for til sidst at ende på det samme transportbånd. Prøverne til dette projekt er indsamlet fra transportbåndet. De fem steder er:

#1) Flyveaske udfældes fra rummet omkring kedlen; her er røggasttemperaturen fra omkring 800 °C til 500 °C. Her sker der en nogenlunde kontinuerlig udtagning af flyveasken til båndet. Vi kender ikke denne askemængde, men som diskuteres nærmere i kapitel 9, vurderes den at udgøre omkring 60 % af flyveasken.

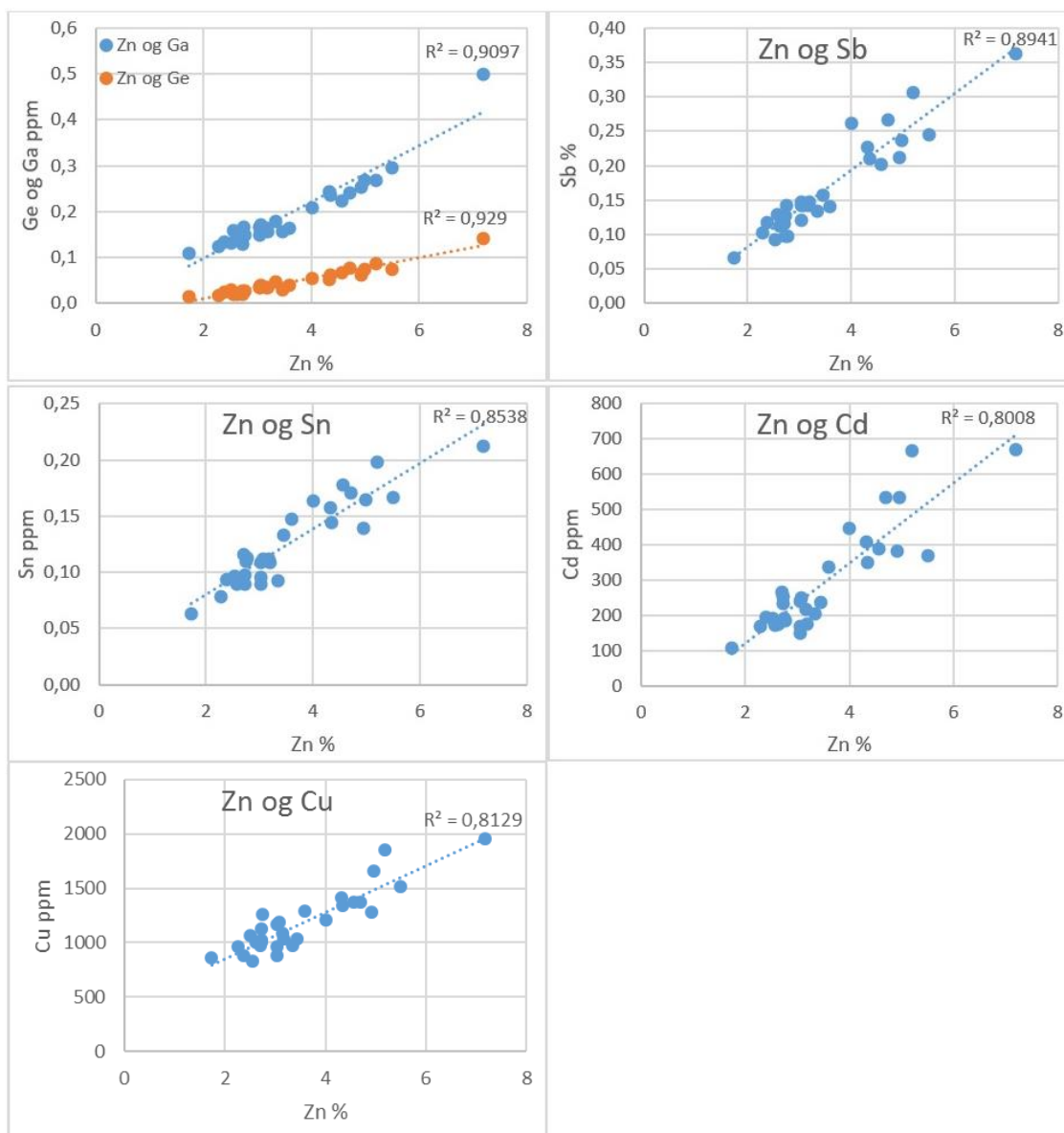
#2-5) Efterfølgende udtages asken med fire elfiltre ved en lavere temperatur. Elfiltrene tiltrækker alle partikler ved hjælp af statisk elektricitet og hvert 10. minut eller oftere, alt efter behovet, bankes flyveasken af, således at der sker en periodevis deponering til transportbåndet. Der kommer antageligt mest flyveaske fra det første elfilter, derefter mindre og ved det sidste meget lidt.



Figur 65. De seks grundstoffer med de største negative korrelationer.



Figur 66. De seks grundstoffer med de største positive korrelationer med titaniumoxid.



Figur 67. De seks grundstoffer med de største positive korrelationer med zink.

8. Numerisk model for affaldssammensætningen

Sammensætningen af både husholdnings- og industriaffald er dynamisk og reflekterer års-tidsvariationer, geografiske forskelle og set over lange tidsperioder også ændringer i forbrugermønstre og produktmaterialer. Affaldets sammensætning er bestemmende for både brændværdien og den kemiske sammensætning af slagge og flyveaske – og dermed for råstofpotentialet i disse to råstofstrømme fra forbrændingsanlæg.

Mere viden om affaldets sammensætning er vigtig for at:

- Sikre en optimal drift af forbrændingsanlægget.
- Kunne optimere udnyttelsen af slaggernes og flyveaskens indhold af råstoffer.
- Kunne målrette kildesortering og derigennem øge mulighederne for genanvendelse.

Det er på denne baggrund at ARC, som tidligere nævnt, med års mellemrum gennemfører affaldsanalyser på dele af det indsamlede affald. Affaldsanalysen udføres som en manuel sortering i henhold til en standardklassificering. Sådanne analyser er udfordret på repræsentativitet og pris, da affaldssammensætningen som nævnt varierer fra indsamlingsområde til indsamlingsområde og varierer over tid samtidig med, at metoden ikke inkluderer erhvervsaffald og træaffald, som ARC også forbrænder. Som led i Urban-X-projektet er der derfor udviklet en numerisk model, som på basis af slaggernes og flyveaskens kemiske sammensætning, kan estimere de mest sandsynlige affaldsfraktioner. Principperne i denne model beskrives nedenfor.

8.1 Metodeovervejelser

Der er behov for metoder til bestemmelse af, hvilke affaldstyper der ligger til grund for den kemiske sammensætning i den resulterede slagge og flyveaske. Metoden skal gøre det muligt at sige noget om de oprindelige affaldssammensætninger ud fra de målte sammensætninger i slagge og flyveaske.

Nedenfor gennemgås tre simple og tre komplekse metodiske scenarier, der vil kunne bruges til beregning af de oprindelige affaldssammensætninger. I Figur 68 ses en simpel skitse over princippet for beregning af affaldssammensætning.

Simple metodiske tilgange til manuel identifikation

Affaldstypisk kemisk sammensætning

Teoretisk er det muligt at identificere grundstoffer, som er unikke for forskellige affaldstyper og anvende denne sammensætning til at foretage en overordnet vurdering af affaldssammensætningen. Eksempelvis indeholder elektronikaffald relativt meget guld, sølv og palladium sammenlignet med de øvrige fraktioner, så et højt indhold af disse metaller i slagge og flyveaske vil kunne tilskrives en høj andel af elektronikaffald. På tilsvarende måde er aluminium i husholdningsaffaldet især relateret til emballage, mens krom er relateret til trykimprægneret træ og rustfrit stål. I praksis vil en del affaldstyper dog indeholde mange af de samme grundstoffer, hvilket vanskeliggør denne tilgang. Derudover er der affaldstyper, som

det vil være svært at adskille kemisk, fx pap og papir samt forskellige typer af byggematerialer.

Absolutte maksimalværdier for affaldstyper

Den maksimale kemiske koncentration af hver affaldstype kan beregnes ud fra den antagelse, at værdien ikke kan overskride de koncentrationer, der er målt i slaggen/flyveasken. Et eksempel på dette er, at aluminiumsaffald maksimalt kan udgøre 0-2 %, papir og pap 0-35 % af affaldets sammensætning, da det er de maksimale mængder, der afbrændes. Metoden indskrænker feltet og vil reducere beregningsmængden for en given beregningsmetode, men vil i sig selv ikke give et brugbart resultat.

Forventede affaldssammensætninger

Der kan anlægges en *top-down*-tilgang, hvor der tages udgangspunkt i nogle antagelser om affaldssammensætningen. På dette grundlag beregnes variationer over affaldssammensætningen, eksempelvis ± 20 % for hver affaldstype, hvorefter den sammensætning, der ved beregning giver en grundstofprofil, som er tættest på det målte, vurderes at udgøre det bedste match (bedste bud på affaldssammensætningen). Er der stor usikkerhed om 'baseline', altså om forventningen til affaldssammensætningen, kan minimum- og maksimumværdier baseret på baseline, fx ± 50 %, for hver affaldstype anvendes.

Komplekse metodiske scenarier til automatisk identifikation

Automatisk kombinatorik

Computerkraft udnyttes til automatisk beregning af tusindvis af forskellige kombinationer af affaldssammensætninger og deres resulterende samlede grundstofprofil. Efterfølgende identificeres den eller de grundstofprofiler, som er tættest på det målte resultat. Denne metode har to udfordringer: (i) det vil kræve stor computerkraft, da antallet af affaldstyper og grundstoffer som medtages kræver eksponentielt flere beregninger for at opnå samme repræsentative beregning; og (ii) det vil være tilfældigt, hvor godt et match der genereres, og der vil sandsynligvis ikke opnås et perfekt match. Metoden har dog den fordel, at såfremt der er flere mulige løsninger, vil disse identificeres, da metoden som udgangspunkt regner på alle kombinationer af affaldssammensætninger.

Automatisk bedst matchende iteration

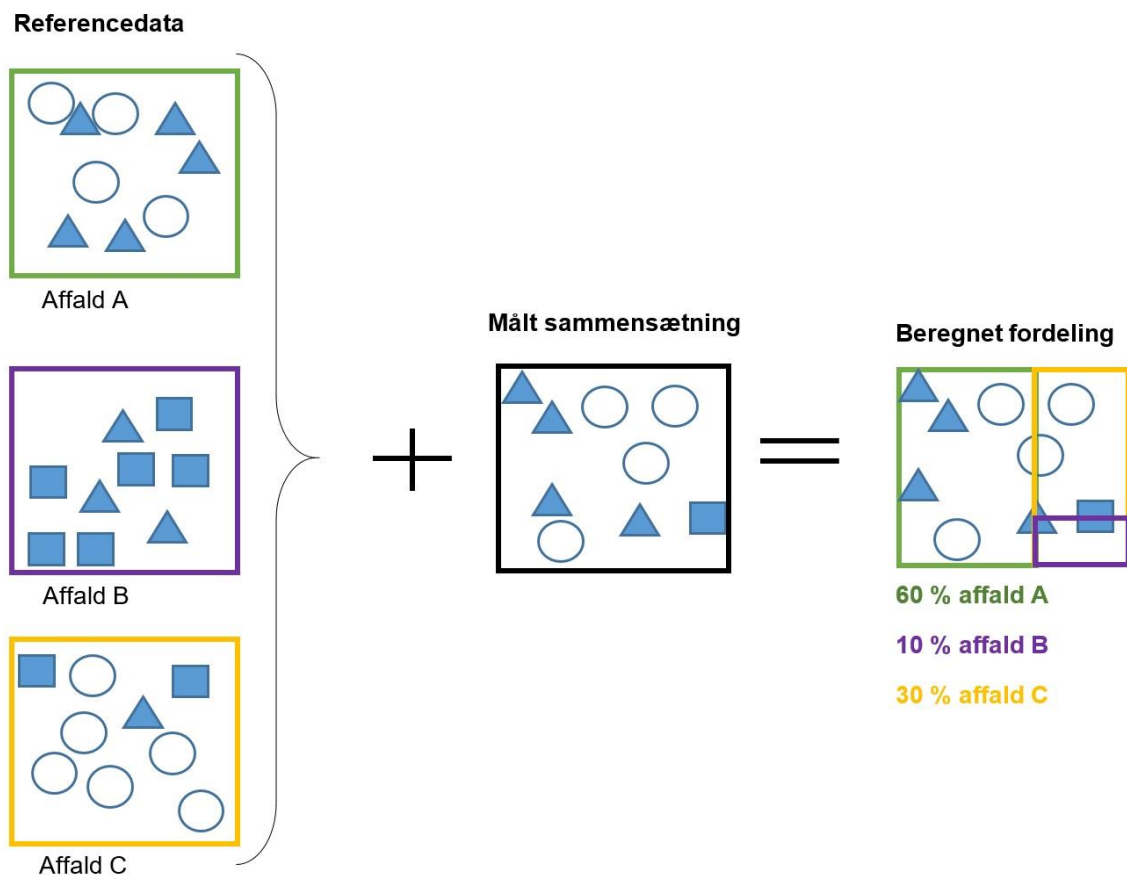
Som alternativ til *Automatisk kombinatorik*-metoden, hvor der startes med omfattende beregninger, kan der her eksempelvis beregnes på 20 forskellige kombinationer, hvorefter man udvælger den kombination, som passer bedst med grundstofprofilet; dernæst beregnes 20 nye kombinationer varierende med ± 20 % af den udvalgte affaldssammensætning. Anden gang vælges igen den bedst matchende løsning, hvorefter 20 nye kombinationer beregnes, denne gang med kombinationer tættere på den udvalgte affaldssammensætning, fx varierende ± 5 %. For hver gang der beregnes 20 kombinationer kommer man således tættere og tættere på et 'forventet korrekt' resultat. Metodens fordel er, at der potentielt kan beregnes en løsning. Det er dog ikke sikkert, at en eksakt løsning bliver fundet, da 'den bedst mulige kombination' i et 'kombinationsområde' ikke nødvendigvis er en eksakt løsning, der matcher med de målte grundstofværdier.

Ved at automatisere trinnene kan den numeriske model automatisk nå frem til den bedst mulige kombination. En ulempe ved at automatisere udvælgelsen af den bedst matchende kombination er, at programmet altid vil finde den samme løsning, uanset om der eksisterer

flere løsninger der kan findes ved at beregne videre på en anden kombination end den som ved første beregning umiddelbart matcher bedst. Man kan naturligvis omgå problemet ved at genberegne for eksempelvis de tre bedste kombinationer. Den største svaghed i denne metode er, at der kun vil blive fundet én løsning, selv i tilfælde hvor der reelt kan være flere.

Systemanalytisk iteration

Ved denne metode designes den numeriske model, så den er i stand til at analysere sig frem til en procentuel justering af en given 'start-sammensætning', som vil bringe det beregnede grundstofprofil tættere på det målte profil. Med *systemanalytisk iteration* vil hver startkombination potentielt lede til en ny løsning, hvis der er flere, og ellers vil den konsekvent nå frem til den samme løsning uanset startkombinationen. Metoden forudsætter dog, at der udvikles en systemanalytisk del til modellen, som vurderer de enkelte affaldstypers procentuelle indhold, og dermed hvilke der skal justeres op og ned for at forbedre resultatet. Det skal bemærkes, at netop udviklingen af denne del er en betydelig udfordring. Fordelen ved metoden er, at den kræver færre beregninger end den automatisk bedst matchende iterations-metode for at opnå et resultat.



Figur 68. Skitse over princippet for beregning af affaldssammensætning.

8.2 Om den numeriske model

På baggrund af overvejelserne i afsnit 8.1 benyttes den komplekse metodiske tilgang til automatisk identifikation i denne undersøgelse. Her blev den *systemanalytiske iterations-metode* valgt, eftersom udviklingsarbejdet i denne undersøgelse er foregået i Excel, hvilket giver en markant tidsbesparelse for de tre nævnte metoder i den automatiserede tilgang nævnt ovenfor. Programmet er udelukkende udviklet for at demonstrere, at det er muligt at regne sig frem til en sandsynlig affaldssammensætning baseret på grundstofindholdet i slagge og flyveaske. Programmet kan beregne på ti affaldstyper og ti grundstoffer, men vil kunne udvikles til at inkludere flere.

Til brug for programmets beregninger indgår følgende parametre:

- Referenceværdier for den kemiske sammensætning af forskellige affaldstyper efter forbrænding (meget stor usikkerhed omkring data) (Tabel 25).
- Målinger af grundstofindholdet i slagge og flyveaske fra ARC (Tabel 26).
- Inden beregningen igangsættes udvælges ti grundstoffer, som programmet skal regne på (programmets nuværende begrænsning). Udvælgelsen af grundstoffer vurderes ud fra, hvilke grundstoffer der er mest unikke for de forskellige affaldstyper. Den mest præcise identifikation af affaldssammensætningen opnås, når der kan bruges unikke grundstoffer.

Beregningstrin for den numeriske model:

1. *Indtast grundstofmåling.* Det vægtede gennemsnit for slagge og flyveaske indtastes.
2. *Anslå affaldssammensætning.* Hver beregning starter med at en startkombination på affaldssammensætningen indtastes i programmet (punkt 1 i Figur 69). Hver startkombination bør være forskellig for de andre (se de anvendte startkombinationer i
3. Tabel 27, fx 'kørsel 1').
4. *Udfør beregning.* Ved at trykke på en knap udføres en eller 50 på hinanden følgende beregninger (punkt 3 i Figur 69), hvor programmet søger at justere startkombinationen, så det beregnede grundstofindhold til stadighed matcher med den målte grundstofsammensætning (målt og beregnet koncentration ses i bunden af Figur 69). Når programmet ikke længere er i stand til at nedbringe den gennemsnitlige grundstofafvigelse (punkt 2 i Figur 69), er udregningen færdig og resultatet noteres.
5. *Udfør nye beregninger.* Herefter kan proceduren gentages med en ny kombination. Jo flere kombinationer der beregnes, jo større chance er der for at finde 'alle mulige' løsninger. Hvis der er mere end ét resultat, indikerer dette, at der er flere løsninger, og beregningerne skal derfor fortsætte. I tilfælde af flere løsninger er det ikke muligt at afgøre, hvilken af disse der er den rigtige. Som nævnt i afsnittet om 'Komplekse metodiske tilgange til automatisk identifikation' skal man være opmærksom på, at der ikke er garanti for, at alle løsninger er fundet; dermed er der heller ikke garanti for, at den rigtige løsning er fundet.
6. *Justér med 'Andet affald'.* I tilfælde af at det ikke er muligt at finde en perfekt affaldssammensætning, ud fra referenceværdierne sammenholdt med de målte værdier, kan der udføres et beregningstrin, hvor der genereres en kategori kaldet 'Andet affald' (punkt 5 i Figur 69). 'Andet affald' er et grundstofprofil for de grundstoffer,

der forhindrer programmet i at generere et perfekt match og er således sammensætningen af de grundstoffer, som ikke kan forklares med referenceværdierne. Værdierne i denne kategori kan kun være positive for de ti udvalgte grundstoffer; programmet vil således ikke beregne en profil med negative indholdsværdier.

Tabel 25. Indholdet af de ti udvalgte grundstoffer i slagge og flyveaske fra forbrænding af affaldstyper. Indholdsværdier for affaldstyper er, med undtagelse af affaldskategorien WEEE, baseret på Goetche, som er baseret på indholdsværdier i en computer. Tallene er behæftet med stor usikkerhed.

	Papir og pap (%)	Træ (%)	Plast (%)	Mad og haveaffald (%)	WEEE*	Glas + byggeaffald (%)	Metal: Jern (%)	Metal: Aluminium (%)
Si	1,5	21	19	8,6	6,8	34	1,0	4,4
Fe	1,0	15	3,9	0,63	16	0,16	90	3,2
Ca	56	6,4	12	37	1,5	7,7	0,35	2,4
Al	5,6	0,82	11	2,1	0,85	0,86	5,9	76
K	1,2	2,8	0,87	6,1	0,11	0,54	0,092	0,58
Ti	0,032	1,8	7,8	0,084	0,25	0,029	0,11	0,26
Cr	0,0063	0,21	0,064	0,0073	0,013	0,032	0,079	0,089
Co	0,0012	0,0046	0,0083	0,0024	0,048	0,00045	0,0034	0,0012
Pd	4,4x10 ⁻⁶	2,2x10 ⁻⁶	3,2x10 ⁻⁶	0,5x10 ⁻⁶	760x10 ⁻⁶	0,2x10 ⁻⁶	0,3x10 ⁻⁶	1,1x10 ⁻⁶
Ag	68x10 ⁻⁶	0,0028	0,00018	0,00064	0,091	11x10 ⁻⁶	1,5x10 ⁻⁶	8,4x10 ⁻⁶
Rest	34	46	33	42	74	41	1,0	4,4

*Elektronikaffald

Tabel 26. Gennemsnitlig grundstofsammensætning for de ti udvalgte grundstoffer i slaggen og flyveasken. Analyseresultatets oprindelige oxid-værdier er her omregnet til grundstofindhold. Vægtet gennemsnit ifølge de indledende erfaringer med fordelingen i WtE-anlægget (8:1) er anvendt; dette grundstofprofil er anvendt til beregningerne.

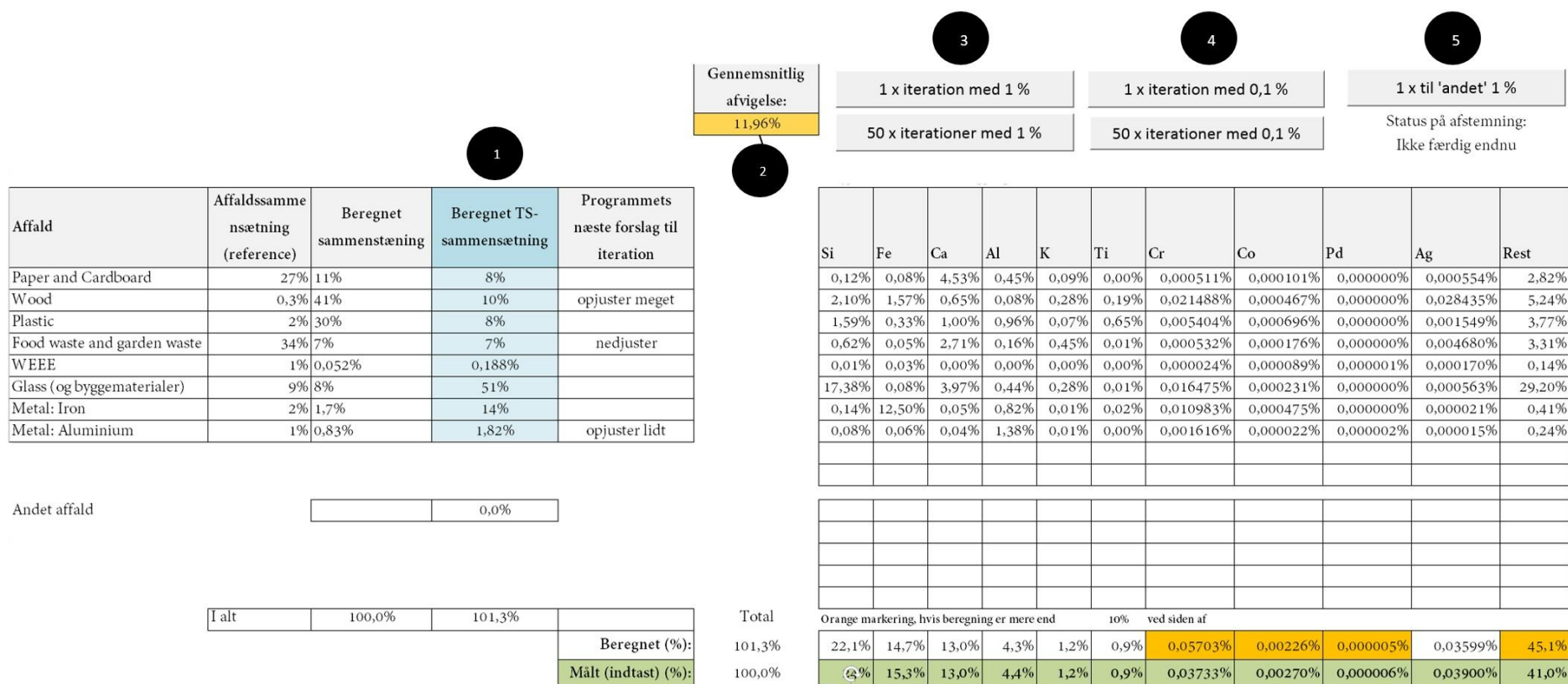
	Enhed	Slagge	Flyveaske	Vægtet gennemsnit (8:1)
Si	%	28,3	8,1	26
Fe	%	15,3	1,3	9,6
Ca	%	14,6	23,4	14
Al	%	5,0	4,5	4,8
K	%	0,7	5,2	1,2
Ti	%	0,9	1,2	0,9
Cr	ppm	497	421	399
Co	ppm	31	13	29
Pd	ppm	64	40	65
Ag	ppm	3	11	39
Rest	%			44

Tabel 27. Andele af affaldsfraktioner i % anvendt til beregning af tørstof (TS).

	Kørsel 1	Kørsel 2	Kørsel 3	Kørsel 4	Kørsel 5
Papir og pap	1	24	24	1	1
Træ	24	1	24	1	1
Plast	1	24	24	1	24
Mad- og haveaffald	24	1	24	1	24
WEEE*	1	24	1	24	1
Glas + byggematerialer	24	1	1	24	1

Metal: Jern	1	24	1	24	24
Metal: Aluminium	24	1	1	24	24

*Elektronikaffald



- 1) Her indtastes den sammensætning, som er udgangspunktet for de efterfølgende beregninger.
- 2) Den gennemsnitlige afvigelse for det beregnede indhold af grundstoffer for affaldssammensætningen skal gerne være under 1 %, før der er tale om en troværdig løsning. For et gæt kan den være nemt blive 100 % eller mere, mens 10 % er signifikant bedre end et gæt.
- 3) Med disse to knapper udfører programmet én eller 50 justeringer af sammensætningen for at reducere den gennemsnitlige afvigelse.
- 4) Kommer man under 10 % gennemsnitlig afvigelse vil det være relevant at finjustere med disse knapper, ligesom finjusteringsknapperne er gode til at få totalen på plads til 100 %.
- 5) Når afvigelsen ikke kan bringes længere ned, kan denne knap anvendes. Den normaliserer affaldssammensætningen, så den nedbringes til et niveau, hvor de beregnede grundstofkoncentrationer holdes under de målte værdier. Forskellen på disse værdier og det målte bliver til affaldskategorien 'Andet affald'.

Figur 69. Layout af den numeriske model med angivelse af arbejdsstrin.

8.3 Referencedata – affaldstypernes kemiske sammensætning efter forbrænding

Ideelt set bør beregningerne i modellen baseres på referencedata for grundstofindholdet i de slagge og flyveaske, som kommer fra forbrænding af de enkelte affaldstyper. Da sådanne data ikke var tilgængelige for denne undersøgelse, er der i stedet anvendt data fra et litteraturstudie (Goetze et al 2016)⁶, hvor den gennemsnitlige kemiske sammensætning er specificeret for 50 forskellige typer husholdningsaffald.

Metoden introducerer en række usikkerheder, som især er knyttet til følgende forhold:

- For at finde den kemiske sammensætning i den resulterede slagge og flyveaske efter affaldsforbrænding af affaldstyperne har det været nødvendigt at antage: (i) C, H, N, O, Cl, F og Br forsvinder med røggassen under forbrændingen, mens de resterende grundstoffer bliver tilbage som slagge og flyveaske; denne antagelse er nødvendig, men giver anledning til stor usikkerhed; og (ii) som mål for omregning fra tørstof (slagge+flyveaske) til affaldsmængder er forholdet mellem affaldets totalvægt og summen af ikke-volatile grundstoffer tillagt en molberegning for oxygen. Begge forhold bidrager til usikkerheden.
- Der er usikkerheder knyttet til tilblivelsen af referencedata.
- Der er usikkerheder knyttet til, om referencedata fra litteraturstudiet er aggregeret i forholdet 1:1 for at opnå datasæt for de overordnede typer affald, som skulle anvendes i beregningen. Da forholdet mellem disse affaldstyper varierer og ikke kan forventes at optræde i forholdet 1:1 i affaldet fra ARC, bidrager denne ensartede vægtning til yderligere usikkerhed omkring referenceværdierne.
- Anvendelse af referencedata for husholdningsaffald alene øger usikkerheden omkring affaldssammensætningen, da kun omkring halvdelen af det indfyrede affald hos ARC udgøres af husholdningsaffald; den resterende mængde, som endnu ikke er blevet karakteriseret, udgøres af erhvervsaffald, træaffald og en mindre mængde klinisk risikoaffald.

I Tabel 25 ses det beregnede grundstofprofil for de aggregerede affaldstyper og for de grundstoffer, som blev udvalgt til beregningen. I beregningsforløbet blev nogle af referenceværdierne nedjusteret, da niveauerne er for høje i forhold til det faktisk målte. Det drejer sig om Pd og Ag, hvor koncentrationerne blev reduceret til 1/100 for alle affaldstyper på nær WEEE.

8.4 Måledata – slaggen og flyveaskens kemiske sammensætning

For at få den totale kemiske sammensætning for tørstofindholdet efter forbrænding, blev den målte kemiske sammensætning for slaggen og flyveasken vægtet med det forhold de produceres i – forholdet 8:1 – ifølge de indledende erfaringer med WtE-anlægget. Dog er analyseværdien for det målte indhold af jern i slaggen opjusteret med den mængde jern, der svarede til, hvad der er frasorteret forud for den kemiske analyse, ligesom jernindholdet er opjusteret

⁶ [http://orbit.dtu.dk/en/publications/physicochemical-characterisation-of-material-fractions-in-household-waste\(9864f74e-f8e1-4e44-915e-2a9c392cfc2c\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/physicochemical-characterisation-of-material-fractions-in-household-waste(9864f74e-f8e1-4e44-915e-2a9c392cfc2c).html)

med den mængde jern som pga. af overstørrelse (>63 mm) ikke er prøvetaget repræsentativt.

8.5 Databehandling

I det konkrete tilfælde er der valgt fem kørsler med forskellige kombinationer af affaldssammensætningen (

Tabel 27); alle kørsler gav samme iterations-resultatet på den beregnede affaldssammensætning (Tabel 28). Affaldskombinationerne blev valgt, så de var så forskellige som mulige.

Tabel 28. Beregnet sammensætning i % for det affald der er ført ind i brændkammeret.

	Kørsel 1	Kørsel 2	Kørsel 3	Kørsel 4	Kørsel 5
Papir og pap	9	12	11	11	7
Træ	43	44	43	41	44
Plast	30	29	29	30	30
Mad- og haveaffald	7	5	6	7	7
WEEE	0,136	0,114	0,110	0,136	0,117
Glas + byggematerialer	8	8	8	8	9
Metal: Jern	1,8	1,7	1,7	1,8	1,8
Metal: Aluminium	0,87	0,72	0,80	0,83	0,83

I Tabel 29, 1. række, ses den kemiske afvigelse mellem start-fraktionernes sammensætning og slagge+flyveaskens målte sammensætning. I tabellens øvrige rækker ses den gennemsnitlige afvigelse fra den færdigt beregnede affaldssammensætning (gul række), og derefter er de kemiske afvigelser for alle grundstoffer vist for de beregnede affaldssammensætninger. Det ses, at den numeriske model generelt reducerer den gennemsnitlige afvigelse til omkring 10 %, typisk fra over 100 %. Det er især krom, kobolt og gruppen 'resten', som modellen har svært ved at få til at stemme med referenceværdierne.

Tabel 29. Afvigelser i % for beregnet kemisk sammensætning for tørstof. Slutafvigelse for de beregnede grundstoffer. Farverne indikerer, hvor afvigelserne er størst. Rød: stor afvigelse; orange: betydelig afvigelse, hvid: mindre afvigelse.

	Kørsel 1	Kørsel 2	Kørsel 3	Kørsel 4	Kørsel 5
Startafvigelsen (gennemsnit)	116,28	347,81	83,15	407,44	126,38
Slutafvigelse (gennemsnit)	10,97	10,86	10,36	10,42	10,48
Si	-7	-9	-10	-8	-6
Fe	-4	-5	-6	-3	-2
Ca	-7	-4	-4	-1	-15
Al	-9	-8	-7	-3	-7
K	-1	-7	-2	2	5
Ti	-3	-2	-3	2	-1
Cr	36	36	35	35	35
Co	-18	-17	-17	-12	-15
Pd	-6	-1	-1	12	0
Ag	-6	-6	-7	-8	-6
Rest	10	9	9	10	10

Før resultatet (Tabel 28) er der et beregningstrin, hvor den kemiske sammensætning på det vægtede indhold af grundstoffer i slagge og flyveaske (TS, tørstof) i den beregnede affaldssammensætning er beregnet. Denne sammensætning er vist i Tabel 30 for de pågældende beregninger.

Tabel 30. Beregnet sammensætning for tørstof i %.

	Kørsel 1	Kørsel 2	Kørsel 3	Kørsel 4	Kørsel 5
Papir og pap	6,29	8,89	8,13	7,78	5,26
Træ	10,38	10,86	10,54	10,14	10,34
Plast	8,31	8,08	7,88	8,44	8,17
Mad- og haveaffald	7,48	5,32	6,29	7,29	7,82
WEEE	0,48	0,42	0,39	0,49	0,41
Glas + byggematerialer	51,16	52,25	51,63	52,09	52,75
Metal: Jern	13,87	13,77	13,68	14,18	14,06
Metal: Aluminium	1,87	1,59	1,73	1,81	1,77

8.6 Resultater

Resultatet for de fem beregninger ses som minimum- og maksimumværdier i Tabel 31. Den meget lille forskel på minimum- og maksimumværdierne tyder på, at de fem iterations-beregninger ledte hen mod samme løsning. Resultaterne for de fem beregninger gav dermed et robust bud på affaldssammensætningen.

I Tabel 31 ses endvidere en mellemregning i form af dels det beregnede restindhold fra affaldstyperne efter forbrænding ('Beregnet TS') og dels de omregningsfaktorer, der er anvendt til omregning fra TS til affald ('vægtforholdet mellem TS og affald'). I kolonnen *Slagge-sortering (TS-reference)* ses slaggekaraktariseringen til en sammenligning med TS, velvidende at TS er fremkommet ved en vægtning af slagge og flyveaske.

8.7 Sammenligning

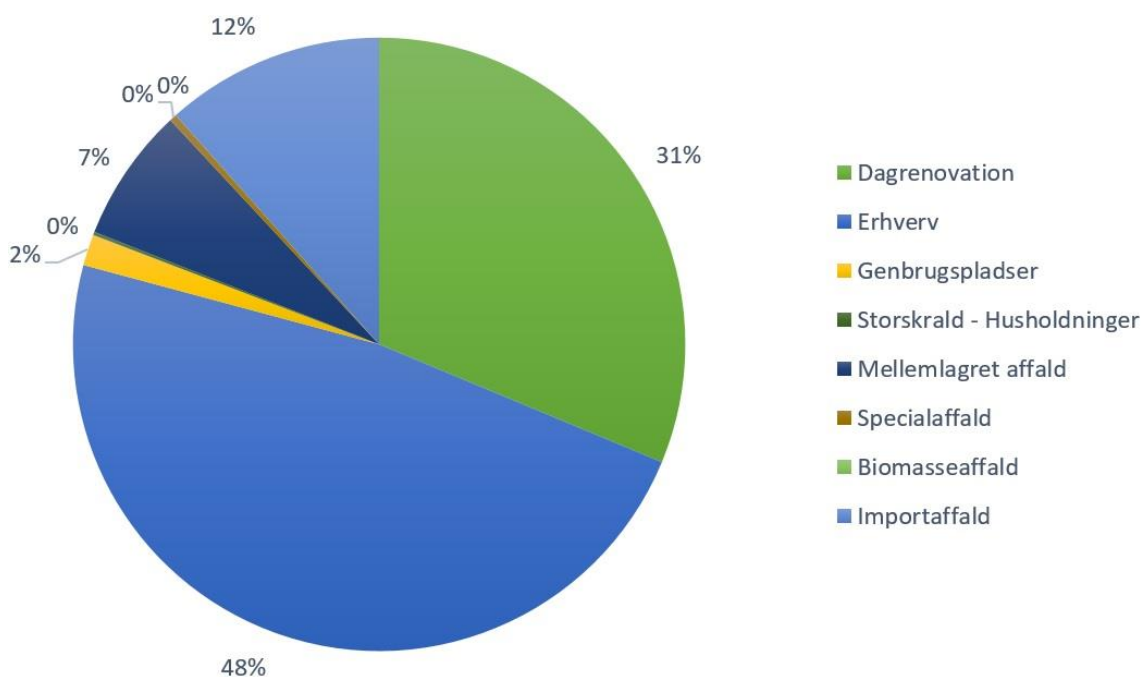
Som pointeret i afsnit 3.1 er referencedata for usikre til, at der kan laves en egentlig vurdering af det beregnede resultat i forhold til den forventede affaldssammensætning hos ARC.

Det er derfor ingen overraskelse, at det beregnede resultat ikke matcher med sammensætninger på husholdningsaffald (Tabel 31), hvilket også kan skyldes, at ARC også afbrænder erhvervsaffald, som måske kan forklare det høje beregnede niveau af træ. I Figur 70 ses affaldssammensætningen i prøvetagningsperioden for husholdningsaffald og erhvervsaffald.

Løbende prøvetagning af affaldssammensætningen fra ARC viser, at den ligger forholdsvist stabil (jf. Tabel 32), hvilket er et udtryk for, at de bør udgøre et godt sammenligningsgrundlag for resultatet fra den numeriske analyse. Når dette grundlag alligevel ikke kan anvendes tilfredsstillende skyldes det, at sammensætningen på erhvervsaffaldet, som udgør den største affaldsgruppe, er ukendt.

Tabel 31. Resultatet af den numeriske model for mulig affaldssammensætning for den resulterede slagge og flyveaske (kolonne med grønne celler). Til sammenligning er vist referenceværdi for affaldssammensætning af husholdningsaffald, samt resultatet af slaggesorteringen for så vidt angår glas+bygge materialer, metallerne jern og aluminium. Grøn farve: lille forskel på minimum og maksimum.

Affald	Affaldssammensætning for husholdningsaffald (%) (ARC 2016)	Beregnet affaldssammensætning (%)		TS % af affaldstypen	Beregnet TS %		Slaggesortering (TS %)
		Min.	Maks.		Min.	Maks.	
Papir og pap	19,9	7	12	8,2	5	9	-
Træ	19,0	41	44	2,7	10	11	-
Plast	13,2	29	30	3,1	8	8	-
Mad- og hveaffald	32,1	5	7	12,1	5	8	-
WEEE	0,3	0,1	0,1	40,0	0,4	0,5	-
Glas + byggemat.	11,7	8	9	70,0	51	53	26 % + slaggesmelte
Metal: Jern	2,8	1,7	1,8	88,9	14	14	~ 17 % + ~ 9 % + ~ 5 %
Metal: Aluminium	1,1	0,7	0,8	24,3	1,6	1,9	3 %



Figur 70. Gennemsnitlig affaldssammensætning hos Amager Bakke i perioden 25. oktober til 28. november 2017. Prøverne til dette projekt blev taget i perioden 2. november til 2. december 2017.

Tabel 32. Affaldssammensætning i % for ARCs restaffald fra borgere for 2012, 2014 og 2016, samt fra hele Danmark.

	ARC 2012	ARC 2014	ARC 2016	DK Riber <i>et al.</i> 2009
Papir og pap	23,4	21,0	19,9	24,4
Træ	14,1	16,3	19,0	0,3
Plast	15,3	14,1	13,2	1,7
Mad- og haveaffald	32,2	32,9	32,1	55,1
WEEE	0,3	0,3	0,3	0,4+0,7
Glas + byggematerialer	11,4	11,6	11,7	11,2
Metal: Jern	3,2	3,0	2,8	1,7
Metal: Aluminium	1,1	1,1	1,1	0,8

Usikkerhederne omkring referencedata og erhvervsaffaldets sammensætning begrænser mulighederne for at konkludere på den beregnede affaldssammensætning. Dog er det relevant at pege på, at der er et rimeligt godt match mellem indholdet af inerte (ikke-brændbare) materialer i den beregnede affaldssammensætning sammenlignet med resultatet for slaggekarakteriseringen:

- For glas og byggematerialer er det beregnede indhold 51-53%. Da der ved slaggekarakteriseringen blev identificeret sammenlagt 26 % glas og byggematerialer, samt 45 % smeltet slagge, hvori hovedbestanddelen er glas, betragtes det beregnede resultat som sandsynligt.
- Det beregnede indhold af aluminium er lidt lavere, end det som blev registreret i slaggen, hvilket dels kan skyldes tilføjelsen af flyveaskedata til datasættet, og dels kan skyldes, at programmet beregner aluminiumsindholdet lavere end det burde (negativ afvigelse i Tabel 30), som følge af at programmet ikke kan udregne en bedre affaldssammensætning med de pågældende referencedata.
- Indholdet af jern i de karakteriserede slagge er højere end i den beregnede affaldssammensætning. Dette er der umiddelbart ikke nogen forklaring på.

8.8 Beregningsmæssig usikkerhed

Afvigelsen mellem den beregnede kemiske sammensætning og den målte bør være under 1 % for at resultatet, matematisk set, kan karakteriseres som robust, og dermed relevant at evaluere. I de gennemførte beregninger er afvigelserne omkring 10 %, hvilket vurderes som en stor afvigelse (Tabel 29). Baseret på erfaringer med programmet kan det empirisk udelukkes, at den høje afvigelse skyldes en begrænsning for programmet. Årsagen tilskrives derfor, at det ikke har været matematisk muligt at matche de anvendte referencedata bedre til de målte værdier.

8.9 Konklusion og anbefalinger

Den numeriske model, der er baseret på forskellige affaldstypers kemiske 'fingeraftryk', kan på tilfredsstillende vis fremkomme med løsninger på mulige affaldssammensætninger baseret på ti grundstoffer og ti affaldstyper. Derudover gør den store usikkerhed på referencedata

og store variationer (ca. 10 %) på de beregnede resultater for den mulige affaldssammensætning det ikke muligt at anvende resultaterne til konkrete vurderinger.

Derfor konkluderes det, at metoden har potentiale til at give et retvisende og brugbart billede af hvilket affald, der er afbrændt. Hvis den numeriske model skal udvikles yderligere, bør følgende anbefalinger inddrages ved tilrettelæggelsen af udviklingsarbejdet:

- Der er behov for at foretage nye beregninger baseret på andre grundstoffer end de ti anvendte i analysen, for ad denne vej, at indkredse de grundstoffer, der giver den mindste variation af løsningsforslag på affaldssammensætningen.
- Det bør overvejes at justere programmet, så det kan håndtere beregninger af flere grundstoffer, dvs. mere end ti.
- Der er behov for at fremskaffe mere retvisende referencedata. Sådanne data kan etableres ved at forbrænde forskellige affaldstyper og analysere askeindholdet; alternativt kan der udarbejdes en forbrændingsmodel, som kan omregne grundstofindholdet i affaldstyper til grundstofindholdet i slagge og/eller flyveaske efter forbrænding.
- Der er behov for at 'fejlsøge', hvorfor det ikke var muligt, med de pågældende referenceværdier, at opnå den forventede affaldssammensætning. Konkret kan ARCs seneste affaldssammensætning lægges ind i programmet, og det beregnede tørstofindhold sammenlignes med det vægtede gennemsnit af de målte værdier i slagge og flyveaske. Dette forudsætter dog, at der er en nogenlunde stabil affaldssammensætning.
- Der er behov for at vurdere om omkostninger til prøvetagning, prøveforberedning og analyse kan reduceres. Dette kunne tage udgangspunkt i en vurdering af, om én fraktion alene kan anvendes til at udføre beregningerne, fx slagge 0-63 mm, slagge 0-2 mm eller flyveasken. Udtages 30 prøver kan de med fordel blandes til én kompositprøve, hvorefter en enkelt kemisk analyse udføres.
- Hvis man efter optimeringen af programmet og referencedata opnår et tilfredsstillende resultat, kan man eksperimentere med at designe programmet til at 'køre' flere typer affald, end de aggregerede typer, i den hertil anvendte version af programmet.

9. Diskussion af råstofpotentialet

Der har gennem mange år været tradition for at nyttiggøre slagge fra forbrændingsanlæg. Det sker også fra Amager Bakkes WtE-anlæg, hvor to hovedgrupper af metaller – ferromagnetiske og diamagnetiske – separeres fra slaggen, mens den resterende del, ofte benævnt restslaggen, nyttiggøres som bundmateriale til udvalgte anlægsopgaver, fx som stabilgrus. Flyveaskens grundstoffer genanvendes ikke, men askens alkaliske egenskaber nyttiggøres i et anlæg på Langøya i Norge til at neutralisere syrerester fra forskellige industrivirksomheder.

Dette afsnit diskuterer råstofpotentialet i slagge og flyveaske uden at begrebet ressource er tillagt teknisk-økonomiske kriterier, da formålet alene er at vurdere volumener af materialestrømmene med henblik på at identificere, hvilke der kan karakteriseres som betydelige. Opfølgende analyser kan afgøre i hvilket omfang, disse strømme kan have kommerciel interesse.

Udover ovenstående diskuteres muligheder for forbedring af råstofstrømmenes kvalitet og forslag til anvendelse af materialer og materialestrømme, der ikke udnyttes i dag, som fx glas i slaggen eller delstrømme af flyveasken.

Dataindsamlingen i Urban-X-projektet har været bredt tilrettelagt og har omfattet både makro- og mikroskopiske undersøgelser af slaggen, ligesom der er udført kemiske analyser på udvalgte fraktioner af slagge og flyveaske. Udbyttet af analyserne vurderes brugbare til en diskussion af råstofpotentialet, dog er der fire generelle forhold som begrænser mulighederne for at omsætte data til en entydig råstofvurdering; disse skal tages med i overvejelserne i diskussionerne i dette kapitel. De fire forhold er:

- *Repræsentativiteten.* De visuelle og kemiske analyser omfatter repræsentative slaggeprøver i fraktionen 0-63 mm. En betydelig del af slaggens fragmenter er dog større end 63 mm; disse indgår ikke i undersøgelsen. Fraktionering af slaggen på båndet har bevirket at slaggens kornkurve fra prøve til prøve varierer, hvilket prøvernes kemiske sammensætning derfor også gør. Herudover kan tidsvariationer have betydning for, hvad det udtagende materiale repræsenterer, afhængigt af hvor meget materiale og over hvor lang tid der prøvetages. Prøvestørrelse for slagge: 15-18 kg materiale; for flyveaske: 2-300 g. Prøvetagningstiden er i begge tilfælde ofte omkring et minut, men med variationer på op til 10 minutter.
- *Karakteriseringsmetoder.* Principielt er de mest succesrige undersøgelser fokuserede undersøgelser ud fra en erkendelse af, at man kun finder, hvad man søger efter. Derfor kan det ikke udelukkes, at denne bredt tilrettelagte undersøgelse overser potentielle genanvendelsesmuligheder.
- *Kvalitative undersøgelser.* Råstofpotentialet er en overordnet vurdering af hele ressourcen. Hvorvidt der eksisterer en reel mulighed for at enkeltkomponenter (fragmenttyper eller kemiske forbindelser) kan genanvendes afhænger i høj grad af kvaliteten af ressourcen og omkostninger til at ekstrahere ressourcen, samt hvordan flere former for behandling og ekstrahering kan sammensættes til en business

case, uden at én form for ressourceudnyttelse ødelægger en anden mulighed for ressourceudnyttelse.

I de følgende afsnit diskuteres de kemiske data og de visuelle observationer separat. Med andre ord diskuteres ressourcepotentialet fra flere vinkler.

9.1 Slaggens materialekomponenter (2-63 mm)

Den gennemførte sorteringsundersøgelse på slaggens 2-63 mm fraktion gav en overordnet materialesammensætning som vist i Tabel 33. Mængden af genkendelige materialekomponenter (magnetisk metal, glas, bygge- og keramiske materialer og ikke-magnetisk metal) udgør 63 vægt-pct. af slaggen og dermed hovedbestanddelene i slaggen. Slaggemelten udgør i denne undersøgelse de resterende 37 %, dog skal man huske på, at størstedelen af den magnetiske fraktion bestod af mineraliseret jern og af slagge med magnetiske fragmenter. Af de identificerbare fragmenttyper sker der i dag genanvendelse af magnetisk metal (jern) og ikke-magnetisk metal. Det årlige råstofpotentiale kan på baggrund af nærværende undersøgelsesresultater estimeres til hhv. 18.400 ton jern og 4.800 ton ikke-magnetisk metal fra Amager Bakke. Glas kan estimeres til et årligt volumen på 8.800 ton, mens bygge- og keramiske materialer ligeledes udgør omkring 8.800 ton pr. år. Til sammenligning fokuserer den nuværende genvindingsindustri på funktionel genanvendelse af magnetisk metal og ikke-magnetisk metal og down-cycling af de øvrige materialer som grus.

Tabel 33. Slaggens observerede materialekomponenter og årlige volumen-estimer for Amager Bakke og for hele Danmark.

		2-63 mm*	ARC	80.000 ton pr. år	Nationalt	900.000 ton pr. år
		Fordeling (%)	Fordeling (%)	ton pr. år (estimat)	ton pr. år (estimat)	
>63 mm fraktion**		-	5	4.000	45.000	
2-63 mm fraktion	Bygge- og keramiske materialer	14	11	8.800	99.000	
	Glas	14	11	8.800	99.000	
	Ikke-magnetisk metal	6	5	4.000	45.000	
	Magnetisk metal	29	23	18.400	207.000	
	Slaggemelte	37	29	23.200	261.000	
0-2 mm-fraktion		-	15	12.000	135.000	

*Groft estimat

**Resultat af karakteriseringen af 2-63 mm fraktion.

Sorteringsundersøgelsen af slaggen og karakteriseringen af dens fragmenter har identificeret forhold som tyder på, at der er uudnyttede ressourcer i slaggen. Indikationerne herfor diskuteres nedenstående og nogle forslag til optimering af ressourceudnyttelsen diskuteres og opsummeres i Tabel 34 og Tabel 35.

9.1.1 Bygge- og keramiske materialer

Gruppen af bygge- og keramiske materialer udgør en delmængde af det slaggemateriale, som rester efter at metallerne er udtaget ved nutidens separationsteknikker, og hele denne fraktion anvendes typisk som stabilgrus ved udvalgte anlægsopgaver. Fraktionen har potentiale til at indgå som tilslag i beton, forudsat at den ikke er kontamineret med tungmetaller.

Tablet 34. Muligheder for at øge råstofpotentialet for slaggens materialekomponenter ved optimering af ovnprocesser.

Ressource gruppe	Observeret nedgradering af ressourcen eller forhindringer for ressourceudnyttelsen	Forslag til procesoptimering
Jern	Høj omdannelse trods højt smeltepunkt ved 1.150-1.500 °C	<ul style="list-style-type: none"> - Bedre temperaturstyring i ovnen - Forhindre reaktive stoffer - Ændre opholdstider i ovnen - Udføre yderligere sortering før forbrænding
Glas	Høj omdannelse trods højt smeltepunkt ved 1.400-1.600 °C	
Slaggemelte	Sammensmeltet 'restslagge' har et højt siliciumindhold, hvilket er tegn på høje temperaturer/reaktive stoffer	
Små ikke-magnetiske metaller	Indesluttet i slaggemelte	
Mønter	Varmebeskadigelse trods smeltepunkt ved 1.027 °C	

Tablet 35. Muligheder for at øge råstofpotentialet for slaggens materialekomponenter ved sortering af slaggen.

Ressource gruppe	Observeret nedgradering af ressourcen eller forhindringer for ressourceudnyttelsen	Forslag til procesoptimering
Rustfrit stål og andre typer stål	Udviser forskellig grad af magnetisering. Nogle legeringsmetaller i stål må derfor forventes at blive downcyclet med magnetisk jern	Optisk sortering af magnetisk fraktion.
Aluminium	Der er forskellige aluminiumslegeringstyper, fx med magnesium og titanium.	
Glas, keramik, sten og brokker	Anvendes som vejfyld. Glas har dog potentiale til at blive genanvendt. De øvrige 'keramiske' produkter har potentiale som tilslag i beton.	<ul style="list-style-type: none"> - Frasortering af <2 mm fra råslaggen (våd- eller tørseparation) før karbonatisering/modningsproces. - Fjernelse og genanvendelse af tunge metaller.
<2 mm ikke-magnetiske metaller	<p>Effektiviteten af mekanisk separation med eddy-current falder med kornstørrelsen. Mobile tungmetaller kræver modning af slaggen og er en hindring for genanvendelsen af slagge.</p> <p>Under modningsprocessen belægges de små partikler med karbonater, som maskerer for partiklernes fysiske- og kemiske egenskaber. 17 % af slaggen udgøres af <2 mm-fraktionen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reference til afsnit 9.3.3.

9.1.2 Glas

Glas indgår i lighed med bygge- og keramiske materialer i restslaggen efter, at metallerne er frasortet og er derfor en del af det materiale, der bruges som stabilgrus til anlægsopgaver. Da glasindholdet i slaggen er omkring 11 %, bør mulighederne for genanvendelse af denne råstofstrøm overvejes; alternativt kan man overveje, hvordan mængden af glas i affaldet kan reduceres.

Genanvendelse af glas forudsætter at glasfragmenterne kun består af glas og ikke er smeltet sammen med andre fragmenter, som forurener glasset. Det er kun en mindre del af glasfraktionen, der med de eksisterende forhold, opfylder dette krav, og derfor er det på nuværende

tidspunkt kun en delmængde af glasfraktionen, der kan indgå til genanvendelse af glas. Det synes derfor relevant, at undersøge hvorvidt ovnprocessen kan styres, så deformationen og omsmeltningen af glasfragmenterne reduceres. Derudover består glasfraktionen af flere forskellige typer glas som pga. sammenblandingen måske har en yderligere reduceret genanvendelighed: Glasfraktionen består især af farvet og klar husholdningsglas, samt af planglas. Yderligere udsortering af glas, fx med optisk teknologi vil sandsynligvis kræve, at slaggens finere partikler er blevet vasket fra; se mere om denne proces i afsnit 9.1.6.

9.1.3 Ferromagnetisk metal

Den ferromagnetiske metal i slaggen stammer typisk fra stålprodukter. Trods ståls høje smeltepunkt (1.150-1.500 °C alt efter type) er en betydelig del af stålfragmenterne i fraktionen 2-63 mm omdannet til jernoxidprodukter og smelter. Dette tyder på, at lokale forhold i ovnen danner temperaturer over driftstemperaturerne på 900-1.200 °C, eller at der dannes fluxlignende forhold, som sænker smeltepunktet. Det er derfor relevant at undersøge, om disse omdannelser reducerer genanvendeligheden af jernfragmenter fra slaggen, og i givet fald vurdere hvordan forbrændingsmiljøet kan gøres mere gunstigt, så høj genanvendelighed af jern og legeringsmetaller sikres.

Det er uklart i hvilket omfang slaggenes krystalstrukturer og dermed magnetiseringsevne påvirkes under forbrændingsprocessen i ovnen. Konkret er der observeret stor forskel på magnetiseringsevnen for jernrige fragmenter >63 mm. Det er velkendt, at der er forskel på ståltypers magnetiseringsevne i forhold til deres legeringsmetaller. Både koncentration og type legeringsmetal spiller ind. Eksempelvis er ståltyper med krom ferromagnetiske og vil antageligt blive udsorteret med magnetisk jern, mens indhold af nikkel kraftigt reducerer stålets ferromagnetiske egenskaber.

Det er uafklaret, hvorvidt magnetseparationsprocessen kan optimeres, så jernfragmenter med lav lødighed frasorteres i én bunke og ståltyper med legeringsmetaller udsorteres i en anden.

9.1.4 Ikke-magnetisk metal

De økonomisk vigtigste metaller i ikke-magnetisk metal-gruppen er aluminium og kobber.

Alle aluminiumsfragmenter fremtræder som smeltede aluminiums-'klumper', som generelt ikke er blandet med andre metaller. Forklaringen ligger antageligt i, at aluminiums lave smeltepunkt på 600 °C bevirker at hovedparten af aluminiumskomponenterne i affaldet smelter og flyder ned i bunden af risten og måske også igennem den for til sidst at størkne uden at reagere væsentligt med andre fragmenter i affaldet. Fra XRF-målingerne ved vi, at aluminium ofte findes med legeringsmetaller som magnesium og titanium; her er det værd at bemærke, at titanium vil øge smeltepunktet for aluminium.

Hvis det kan klarlægges præcist hvor og hvorfor aluminiumssmelten afkøler, kan der måske identificeres et potentiale for at optimere forholdene for, at aluminiumssmelten størkner i en

så ren form som muligt. Navnlig bør det undersøges om aluminium størkner i luften, på risten eller i 'kølesumpen'.

For fraktioner af ikke-magnetiske metaller <2 mm, som fx aluminium og kobber, har det ikke været muligt at separere partiklerne med de valgte sorteringsteknikker.

Mindst én dansk genbrugsvirksomhed udsorterer intakte mønter til genbrug. I prøvematerialet fra Amager Bakke blev der fundet to mønter, hvoraf den ene var en dansk 10-krone med smelteskader i kanten og den anden så skadet, at den ikke kunne identificeres. Kobberlegeringer, der er anvendt til disse mønter, har et smeltepunkt på 1.027 °C. Da ovnens arbejds-temperatur er i intervallet 900-1.200 °C, må det forventes, at en betydelig del af mønterne ikke vil være genanvendelige og kun vil udgøre skrot-metal-værdien. Statistisk set kan mønters nominelle værdi udgøre en betydelig værdi langt højere end metalindholdet i slaggen, hvorfor det giver mening at undersøge nærmere, om mønter kan skånes i forbrændingsprocessen.

En lille del af ikke-magnetiske metaller findes som indeslutninger i slaggesmelte og vil kun have beskeden mulighed for at kunne udnyttes, hvis altså de kan detekteres i fragmenter af slaggesmelte og efterfølgende knuses og separeres ud.

9.1.5 Slaggesmelte

Hovedparten af slaggefragmenterne består af mørke smeltede glasser, ofte sammenvokset med andre fragmenter i slaggen, så de samlet set fremstår som, hvad der for en geologs øjne, minder om vulkanske bjergartsaggregater, dvs. forskellige fragmenter som er delvist smeltet sammen i heterogene klumper. I slaggesmeltefragmenterne ses ofte genkendelige elementer som søm, jernbeslag, sakse og andre metalgenstande, som ikke er smeltet, men antageligt blot fanget i smelten. Derved har slaggesmelten opnået sin meget heterogene sammensætning.

At glas og jern mv. smelter kan være som følge af både lokale høje temperaturlommer, eller fordi noget af det brændbare affald har flux-virkning, der lokalt sænker smeltepunkterne for nogle af fragmenterne. Smeltepunktet for jern ligger typisk mellem 1.150-1.500 °C afhængigt af ståltypen og for glas i temperaturområdet 1.400-1.600 °C, dog med en begyndende deformation startende ved 900 °C. Som vi så i afsnit 6.2 udgør slaggesmelten et tab på omkring 37 % af det samlede råstofpotentiale, så hvis omdannelsen af glas og jern kan reduceres, vil dette øge mulighederne for genanvendelse.

Hvis man sammenligner den kemiske sammensætning af den samlede slagge med selve slaggesmelten, vurderes det, at der ikke er signifikant forskel, dvs. at smelteslaggen ikke i sig selv udgør et særligt råstofpotentiale i forhold til metalindholdet, og det vil derfor være mest oplagt at anvende slaggesmelten som stabilgrus eller som tilslag i beton, forudsat at miljøkrav kan overholdes.

9.1.6 <2 mm-fraktion

Da det er vanskeligt at foretage en effektiv fragmentseparation af støvfragmenter, har fokus for genanvendelsen af <2 mm-fraktionen koncentreret sig om dens anvendelse som stabilgrus; dvs. at bestanddelene skal have den rette kornkurve for at opfylde de geotekniske krav.

Da slaggens fine fraktion har et betydeligt indhold af tungmetaller, lægges slaggen til 'modning' i miler. Under denne 'modningsproces' bindes tungmetallerne til slaggens indhold af karbonater, og tungmetallernes mobilitet reduceres. To forhold gør modningsprocessen uheldig: (i) milerne optager meget plads og kræver en del arbejde, (ii) de karbonater, som under modningsprocessen udfældes på fragmenternes overflader, maskerer fragmenternes fysiske og kemiske egenskaber og nedsætter effektiviteten af den efterfølgende magnetseparation af fragmenterne. En vådseparation af bundslaggestrømmen, umiddelbart efter den har forladt ovnen, vil sandsynligvis give en mere effektiv magnetseparation, særligt for de mindste fragmenter. Derudover kan udvaskning af finfraktion udbygges med tyngdeseperation, hvor tungmetallerne koncentrerer i en særskilt fraktion, som forventeligt også vil indeholde ædelmetaller (se afsnit 9.3.3). Vådseparation kan eventuelt foregå med recirkuleret procesvand.

Ved anvendelse af en vådseparation umiddelbart efter ovnen, hvor fraktionen <2 mm fjernes, bliver overfladerne på de resterende fragmenter i slaggen renere. Dette vil øge præcisionen for de eksisterende eddy-current-separationsteknikker, og den øgede effektivitet vil antageligt give et højere udbytte og renere fraktioner af både aluminium og tunge metaller. Når fragmenterne er rene muliggør det desuden sortering med optisk teknologi, fx til frasortering af glas og andre specifikke fraktioner; alt efter om disse har mulighed for genanvendelse.

Ved eventuel fuld udnyttelse af slaggefragmenterne vil det være nødvendigt, at finde en anden anvendelse for <2 mm-restfraktionen fra vådseparation. Forsøg i Holland peger på at denne 'sand'-fraktion kan genanvendes som sand i byggeindustrien, hvor sandet, efter formaling til en kornstørrelse <0,1 mm, kan 'opgraderes' til 'aerated autoclave concrete' (AAC), hvis alkaliniteten kan bringes tilstrækkeligt ned.

Såfremt den ovennævnte vaskeproces kan udformes rent teknisk og implementeres, antages det, at processtrinnet med modning, og dermed binding af tungmetallerne, vil kunne reduceres betydeligt eller endda helt udgå.

9.2 Grundstofferne i slagge og flyveaske

Amager Bakkes WtE-anlæg producerer omkring 80.000 ton slagge pr. år og 10.000 ton flyveaske pr. år. På landsplan er produktionen omkring 11 gange større, dvs. samlet omkring 1 mio. ton pr. år. Relativt set er der derfor tale om betydelige råstofmængder, som alene ud fra et bæredygtighedshensyn tilskynder til overvejelser om råstofstrømmene i dag udnyttes optimalt, eller om der tabes råstoffer på grund af manglende kendskab til deres tilstedeværelse. Hvis man, ud fra et forsimplet synspunkt antager, at den kemiske sammensætning af slagge og flyveaske udtrykker råstofpotentialet, produceres der fra slaggen (<63 mm) og flyveasken i Amager Bakke årligt (estimat jf. Tabel 36):

- 10.000 ton aluminium
- 7.500 ton jern
- 2.000 ton titanium
- 1.500 ton fosfat
- Samt en del kobber, antimon og tin.

Disse er alle vigtige råstoffer i den danske industri; antimon er endda så sent som i 2017 karakteriseret som et kritisk råstof af EU-Kommissionen⁷.

Men hvor og hvordan er disse råstoffer bundet – og kan de nyttiggøres? I det følgende diskuteres nogle af de mulige sammenhænge, og grundstofferne vurderes på basis af tre forskellige screeningsprincipper: Hovedelementer, forhøjelse i forhold til jordskorpens koncentration og de EU-kritiske råstoffer.

Tabel 36. *Estimer af materialestrømme for hovedelementer (>0,1 %) samt udvalgte metaller med særligt forhøjet indhold; baseret på kemiske analyser for slagge og flyveaske.*

Kemisk betegnelse	Slagge	Slagge	Slagge	Flyve aske	Flyve aske	Flyve aske	Kritiske
	ARC	ARC	DK	ARC	ARC	DK	EU
	Koncentration (%)	ton pr. år (estimat)	ton pr. år (estimat)	Koncentration (%)	ton pr. år (estimat)	ton pr. år (estimat)	2017 liste
SiO ₂	48,0	38.400	432.000	13,0	10.400	117.000	Nej
CaO	20,0	16.000	180.000	23,0	18.400	207.000	Nej
Al ₂ O ₃	8,6	6.880	77.400	4,4	3.520	39.600	Nej
Fe ₂ O ₃ (T)	8,0	6.400	72.000	1,3	1.040	11.700	Nej
Na ₂ O	3,5	2.800	31.500	9,0	7.200	81.000	Nej
MgO	2,0	1.600	18.000	0,1	80	900	Ja
TiO ₂	1,3	1.040	11.700	1,2	960	10.800	Nej
K ₂ O	1,1	880	9.900	7,4	5.920	66.600	Nej
P ₂ O ₅	0,8	648	7.290	1,1	880	9.900	Ja
MnO	0,1	104	1.170	0,1	80	900	Nej
Zn				3,5	2.800	31.500	Nej
Sb				0,2	136	1.530	Ja
Sn				0,1	80	900	Nej

9.2.1 Hovedelementer – en begrænset indgangsvinkel til ressourcevurdering

Den kemiske sammensætning i slaggen domineres af silicium, calcium, og aluminium, hvilket i princippet svarer til årlige tonnager på langt over 1.000 ton, alene fra Amager Bakke. Men reelt har disse dominerende grundstoffer i slaggen ikke mulighed for at blive udvundet, da de, som materialekarakteriseringen har vist, er bundet i materialegrupperne glas, keramik, porcelæn, mursten, sand og sten. Af de mest dominerende grundstoffer i slaggen og flyveasken (Tabel 36) genanvendes kun en betydelig del af jernindholdet og en mindre del af

⁷ http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en

aluminiumsindholdet. Det er derfor relevant at se på, hvordan andelen af genanvendte grundstoffer kan øges.

Den kemiske sammensætning i slagge og flyveaske er meget forskellig (Tabel 36) både med hensyn til dominerende grundstoffer og koncentrationen af grundstofferne. For eksempel har flyveasken betydeligt højere indhold af zink, antimon og tin, mens der kun findes et meget lavt indhold af disse i slaggen. Zinkindholdet i flyveasken udgør 3,5 %, svarende til en årlig mængde på 2.800 ton pr. år.

Som nævnt ovenfor genanvendes en betydelig del af jern og stål allerede i og med, at der sker en udsortering disse fragmenterne. For aluminium dækker det kemiske indhold over både bjergarts-, glas- og metallisk aluminium. Da aluminium fra bjergarterne og aluminiumsilikatglas ikke, umiddelbart i hvert fald, kan genanvendes som metal, er det kun en mindre del af den samlede mængde aluminium i slaggerne, som kan genanvendes.

9.2.2 Grundstoffer forhøjet i forhold til Jordens skorpe – flere ressourcepotentialer

Indholdet af grundstofferne i slagge og flyveaske er oprindeligt udvundet fra bjergarter fra Jordens skorpe. Ved traditionel mineralefterforskning udvælges interessante områder ofte på basis af, hvor meget højere koncentration der findes af et givet grundstof i forhold til gennemsnitsindholdet i Jordens skorpe. Dette princip er testet for slaggen og flyveasken, vel vidende at de metallurgiske forhold for en mineralforekomst, med kun få velbestemte mineraler, ikke kan sammenlignes med tilfældige samlinger af komplekse materialer; helt svarende til den problematik der er nævnt i det foregående afsnit.

Indholdet af grundstoffer i slagge og flyveaske, som er forhøjet med mere end en faktor ti i forhold til gennemsnittet for jordskorpen ses i Tabel 37 (grønne celler). Det ses endvidere af kolonnen "Malm", at denne forhøjelse/opkoncentration ikke er ensbetydende med, at en ekstraktion af grundstoffet vil være kommerciel, fordi nogle grundstoffer i dag udvindes af restprodukter fra mineindustrien med indhold, der er væsentligt højere end koncentrationen i skorpen (fx antimon, cadmium og tin).

Konkret findes der i flyveasken 11 grundstoffer i koncentrationer, som er mere end ti gange højere end jordskorpens gennemsnitlige indhold; mens slaggen har otte grundstoffer med mere end 10 gange højere koncentration end skorpens gennemsnitlige indhold. Syv af disse grundstoffer findes i både slaggen og flyveasken: antimon, bismut, bly, cadmium, guld, sølv og tin. Samlet set har disse grundstoffer et øget ressourcepotentiale i forhold til de øvrige grundstoffer i slaggen og flyveasken. For at kunne vurdere om der i praksis findes egnede genanvendelsesmetoder til at udvinde dem, er der behov for yderligere undersøgelser for at beskrive, hvilke materialer der især indeholder disse grundstoffer; guld antages at være knyttet til slaggens støvfraktion, som diskrete korn (se afsnit 9.3.3).

I Tabel 37 ses referenceværdier for typiske indhold i malme og bi-produktkoncentrater (B). Selvom metalkoncentrationerne fra Amager Bakke ligger langt fra koncentrationsniveauerne i malme, er der brug for yderligere undersøgelser for at se, om der er økonomisk potentiale

i udvinding af råstofferne. Dog ved vi allerede nu, at udvinding af zink fra flyveaske vil danne et restprodukt, hvor metalkoncentratet eller oxidproduktet, ud over zink, vil have et forhøjet indhold af kobber, bly, tin, antimon, cadmium mv., som vil kunne udnyttes som biprodukt. Det vil sige, at når zink er udvundet, vil en ny udvindingsproces begynde på biproduktmetallerne (se afsnit 9.4), hvilket samlet set øger økonomien ved en sådan udvinding.

Tabel 37. Metaller i slagge og flyveaske hvor koncentrationen er mere end ti gange højere end i jordskorpen.

Grund stof	Slagge	Flyve aske	Jord skorpen	Slagge	Flyveaske*	Malm	Genanvendelse*	
	ARC	ARC	VERDEN	ARC	ARC	VERDEN		
	Koncentration (ppm)	Koncentration (ppm)	Koncentration (ppm)	Forhøjelse (ppm)	Forhøjelse*** (ppm)	Koncentration (%)	**	%
Sb	42	1.574	0,2	210	7.868	50	B	1-10
Cd	4,7	275	0,15	31	1.834	1,4	B	>10-25
Sn	146	1.182	2,2	66	537	3,5		>50
Pb	978	4833	10	98	483			>50
Bi	1,8	11	0,025	72	434	0,2	B	<1
Zn	3.055	36.660	78	39	432			>50
Br	7,3	898	3	2	299			NA
As	19	291	2,1	9	138			<1
Ag	3,2	11	0,079	41	136			>50
Au	476	319	3,1	154	103			>50
Mo	8,5	21	1,1	8	11			>25-50

Grønne celler: Koncentration mere end 10 gange forhøjet i forhold til jordskorpen.

*Genanvendelse i 2013, som vurderet UNEP's International Resource Panel⁸

**B: Biprodukt. Blank: Primært tale om et hovedprodukt i mineindustrien.

***Tabelværdier rangeret efter forhøjelse i flyveasken.

9.2.3 Vurderinger af indholdet af kritiske råstoffer i slagge og flyveaske

EU-Kommissionen har siden 2010 udarbejdet vurderinger af de råstoffer, som Kommissionen vurderer som kritiske for den europæiske industri. Et råstof klassificeres som 'kritisk', hvis det på samme tid har stor økonomisk betydning for (den europæiske) industri og risikoen for forsyningssvigt er høj. I 2017 konkluderede EU-kommissionen, at dette gjaldt for 26 mineralske råstoffer⁹.

Sideløbende med revideringen af EU's liste over kritiske råstoffer, er der udarbejdet europæiske strategier for at reducere importafhængigheden af råstoffer med særligt fokus på de kritiske råstoffer. Senest er 'cirkulær økonomi' tænkt ind i strategierne, som en måde at reducere importafhængigheden. I denne sammenhæng er det interessant at vurdere, hvorvidt der i slaggen og flyveasken er muligheder for at bringe disse råstoffer tilbage i det europæiske råstofkredsløb.

⁸ <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8850/Metal-recycling-opportunities-limited-infrastructure-Summary.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

⁹ http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en

I Tabel 38 ses hvilke metaller der findes i slagge og flyveaske fra Amager Bakke, og som samtidig er på EU's liste over kritiske råstoffer fra 2017. Som det ses i Tabel 38, omfatter de kemiske analyser af slagge og flyveaske 16 af de kritiske grundstoffer. Af disse har grundstofferne antimon, bismut og palladium 'interessante' koncentrationer; de øvrige kritiske råstoffer vurderes ikke at være i tilstrækkelige mængder til at begrunde yderligere undersøgelser.

Tabel 38. Metaller i slagge og flyveaske som er på EU's liste over kritiske råstoffer (2017).

Kemisk betegnelse	Enhed	Slagge	Flyve aske	Skorpen	Slagge	Flyve aske*	Kritiske
		ARC	ARC	Verden	ARC	ARC	EU***
		Koncentration	Koncentration	Koncentration	Forhøjelse	Forhøjelse**	2017 liste
Sb	ppm	42	1574	0,20	210	7868	JA
Bi	ppm	1,8	11	0,025	72	434	JA
Pd	ppb	74	38,5	6,3	12	6,1	JA
In	ppm	0,2	1,2	0,16	1,3	7,6	JA
W	ppm	6,3	5,3	1,1	5,7	4,8	JA
Pt	ppb	44	92,3	37	1,2	2,5	JA
Ge	ppm	0,6	2,8	1,4	0,43	2,0	JA
P₂O₅	%	0,81	1,1	1,5	0,54	0,74	JA
Ga	ppm	9,1	12,4	19	0,48	0,65	JA
Hf	ppm	5,0	2,1	3,3	1,5	0,64	JA
MgO	%	2,0	1,9	2,9	0,69	0,64	JA
Be	ppm	<1	1,0	1,9		0,51	JA
Co	ppm	33	13,0	30	1,1	0,43	JA
Nb	ppm	9,5	6,8	17	0,56	0,40	JA, REE
La	ppm	20	10,7	34	0,59	0,32	JA, REE
Eu	ppm	0,60	0,38	1,3	0,46	0,29	JA, REE
Ce	ppm	38	17,6	60	0,63	0,29	JA, REE
Y	ppm	14	7,8	29	0,48	0,27	JA, REE
V	ppm	60	50,8	190	0,32	0,27	JA
Pr	ppm	4,1	1,7	8,6	0,48	0,20	JA, REE
Gd	ppm	2,1	1,0	5,2	0,40	0,19	JA, REE
Nd	ppm	14	6,1	33	0,42	0,18	JA, REE
Sm	ppm	2,2	1,1	6	0,37	0,18	JA, REE
Tb	ppm	0,33	0,15	0,93	0,35	0,16	JA, REE
Yb	ppm	0,97	0,45	2,8	0,35	0,16	JA, REE
Er	ppm	1,00	0,45	3	0,33	0,15	JA, REE
Dy	ppm	1,8	0,83	6,2	0,29	0,13	JA, REE
Ho	ppm	0,30	0,16	1,2	0,25	0,13	JA, REE
Lu	ppm	0,20	0,07	0,57	0,35	0,13	JA, REE

*Grønne celler: Koncentration mere end 10 gange forhøjet ift. skorpen.

**Tabelværdier rangeret efter forhøjelse i flyveasken i forhold til gennemsnitskoncentration i skorpen

***I 2017 blev følgende råstoffer udpeget som kritiske for EU: Antimon, Beryllium, Bor, Kobolt, Cooking Coal, Fluor, Gallium, Germanium, Indium, Magnesium, Naturlig Grafit, Niobium, Fosfat Malm, Silicium Metal, Wolfram, Platin Gruppe Metal, Lette REE and Tunge REE, Barium, Bismuth, Hafnium, Helium, Naturligt Gummi, Fosfor, Scandium, Tantalum, and Vanadium¹⁰

¹⁰ <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/EN/COM-2017-490-F1-EN-MAIN-PART-1.PDF>

9.3 Grundstofindhold i udvalgte fraktioner af slagge

I dette afsnit beskrives udvalgte fraktioner af slaggen i forhold til råstofpotentialer.

9.3.1 Slaggesmeltefragmenter i 2-63 mm slagge

Ved slaggesmelte forstås sammensmeltede heterogene aggregater af slagge, som udgør 37 % af slaggefragmenterne i fraktionen 2-63 mm. Som vist i afsnit 6.4 består disse aggregater typisk af glassmelte dannet under forbrændingen. Fragmenterne er ikke analyseret i nærværende undersøgelse, men indledende undersøgelser i 2015 omfattede ICP-MS målinger af slaggesmelte. Ved sammenligning af data for slaggesmelten (fra 2015) med data for totalalkemien for slagge målt i denne undersøgelse ses kun en meget lille forskel; afvigelsen for alle grundstoffer er i gennemsnit på 30 %. Til sammenligning er forskellen på den kemiske sammensætning i slagge og flyveaske, målt som gennemsnitlig afvigelse, på omkring 600 %. Dette indikerer, at slaggesmelte har en sammensætning, der meget svarer til slaggens totalalkemi, og at slaggesmelte dermed umiddelbart ikke er associeret med signifikant forhøjede værdier af bestemte sporelementer. Der er dermed ikke indikationer på, at slaggesmeltes grundstofindhold er mere interessant som et råstofpotentialer, end slaggens totalalkemi, som diskuteret i afsnit 9.2.

9.3.2 Identificerede fragmenter i 2-63 mm slagge

Under materialekarakteriseringen af slaggefraktionen 2-63 mm kunne 63 % af fragmenterne sorteres ud i en af de tidligere nævnte materialegrupper (magnetisk metal, glas, bygge- og keramiske materialer og ikke-magnetiske materialer, se afsnit 9.1). XRF-målinger på et antal legeringsmetaller af fraktionen viste følgende typiske legeringer:

- I jernfragmenter: nikkel, magnesium og krom
- I aluminiumsfragmenter: titanium og magnesium
- I kobberfragmenter: zink og nikkel

Den kemiske sammensætning for glas er, alt efter glastype, dels hovedbestanddelene silicium, calcium og natrium, samt varierende indhold af kalium, aluminium og magnesium. I gruppen bygge- og keramiske materialer blev der observeret både byggematerialer, keramik, porcelæn, sten mv., som er forarbejdede geologiske materialer, og derfor ikke forventes at have et væsentligt indhold af sporelementer. Samlet set er der ikke belæg for, at der blandt de identificerede fragmenter, findes kilder, som vil forhøje værdierne af de fleste sporelementer, eksempelvis guld, palladium, antimon, bly, cadmium osv. Denne konklusion er central for vurderingen af sporelementindholdet i 0-2 mm slaggen som vurderes i næste afsnit.

9.3.3 Slagge – 0-2 mm-fraktion

En betydelig del af slaggen er finkornet; ca. 10 % af 0-63 mm-fraktionen er <2 mm, svarende til ca. 8.000 ton pr. år fra Amager Bakke. Med fraværet af mange sporelementer i de analyserede slaggefragmenter i størrelsen 2-63 mm formodes det, at sporelementkoncentrationer

er forhøjede i 0-2 mm slaggen. Da denne betragtning er fremkommet sent i projektførløbet, er der ikke foretaget målrettede ICP-MS-analyser, der kan bekræfte denne formodning.

Der er i stedet foretaget en teoretisk beregning for det mulige indhold af sporelementer i 0-2 mm slagge: som differencen mellem (i) totalkemien målt for slaggen med ICP-MS (som udtryk for slaggens samlede kemiske sammensætning) og (ii) det kemiske indhold af udvalgte grundstoffer i 2-63 mm-fraktionen (i de fleste tilfælde målt til 0 med XRF, men sat til 10 x jordskorpekonzentrationen, for at holde estimatet på et konservativt niveau). Ved sammenligning af ICP-MS-analyser på 2-63 mm slaggesmelte (fra 2015) med totalkemien for slaggen blev det fundet acceptabelt, at bruge slaggens total kemi som proxy for slaggesmelten (Tabel 39).

Endeligt kan 'slagge total' fratrækkes det vægtede indhold af '2-63 mm slaggesmelte' og '2-63 mm slagge minus slaggesmelte', hvorved indholdet i 0-2 mm slagge beregnes, se højre kolonne i Tabel 39. Resultatet viser, at en række metaller forekommer i koncentrationer, der er væsentligt forhøjede i forhold til den gennemsnitlige koncentration i jordskorpen; for nogle af metallerne ligger niveauerne endda over indholdet i flyveasken (for sammenligning se Tabel 39). For eksempel ses det, at guld, ud fra estimerne, forekommer i en høj koncentration på ca. 1,7 ppm, hvilket vil svare til 27 kg guld om året fra Amager Bakke. Tungmetaller som bly og cadmium forekommer også i høje niveauer og forklarer behovet for at stabilisere mobile tungmetaller i slaggen, før den kan bruges som stabilgrus til vejbyggerier.

Tabel 39. Kemisk sammensætning for 2-63 mm slagge (estimat) og for 0-2 mm slagge (beregnet estimat). Værdierne er rangeret efter, hvor forhøjede de er i forhold til koncentrationen i jordskorpen (grønne celler).

Grundstof	Slagge total	2 63 mm slagge smelte	2 63 mm slagge minus smelte enten målt eller estimeret		0 2 mm slagge		
	ICP MS (ppm)	Estimat (ppm)	Karakteriseringsring 2017 (ppm)	Jordskorpen x 10 (ppm)	Beregnet (ppm)	Forhøjelse	ton pr. år
Sb	42	42		2,0	149	746	2,4
Au	0,48	0,48		31	1,7	538	0,027
Pb	978	978		100	3.331	333	53
Bi	1,8	1,8		0,25	6,0	238	0,095
Sn	146	146		22	478	217	7,7
Ag	3,2	3,2		0,79	10	122	0,155
Cd	4,7	4,7		1,5	13	89	0,212
Zn	3.055	3.055	2.000	780	5.882	75	94

9.4 Flyveaske

Forventningen var, at den kemiske variation i flyveasken ville vise flyveaskens dag-til-dag variation og dermed (i) give et billede af udsvingene i flyveaskens råstofpotentiale, og (ii) vise hvilke grundstoffer, der har tendens til at korrelere og dermed indikere specifikke kilder i affaldet. Men, som beskrevet i kapitel 7, kan den målte kemiske variation i prøverne ikke tilskrives variationer i affaldet, men udtrykker snarere varierende sammenblandinger af

mindst to forskellige flyveaskeprodukter, der ikke udfælder samme sted i anlægget. Det antages, at de observerede forskelle skyldes, at der dannes både kedelaske (flyveaske udfældet ved fjernvarmekedlen) og ESP-flyveaske (Electro Static Precipitator); disse forhold er beskrevet på kulkraftværker¹¹.

Da kedelaske og elfilteraske er kemisk forskellige er der foretaget en separat råstofvurdering for disse to strømme. Desuden er mulighederne for en koncentrering af de partikler, som indeholder zink, overvejet, for på denne måde at forbedre råstofpotentialer i forhold til genanvendelse fra den resulterede elfilteraske. Det skal dog bemærkes, at undersøgelsen ikke omfattede dataindsamling på flyveaske typernes fysio-kemiske karakterer (SEM-undersøgelser), og betragtningerne er i stedet baseret på grundstoffernes korrelationer for at kunne identificere dels en mulig sammensætning af både kedelaske og elfilteraske, og dels til at estimere mængdeforholdet mellem de to typer.

9.4.1 Den kemiske sammensætning af kedelasken og elfilterasken

I denne undersøgelse fandt vi, at titaniumoxid og zink udviser den stærkeste negative korrelation (Figur 65), dvs. at de bedst repræsenterer de to typer flyveaske. I litteraturen er der eksempler på, at fraktionen med højt indhold af titaniumoxid stammer fra kedelaske, mens fraktionen med højt indhold af zink stammer fra elfilteraske¹².

Sandsynligheden for at enkelte af de indsamlede prøver kun repræsenterer én type flyveaske vurderes som lav, da de to typer flyveaske udfælder kontinuerligt til transportbåndet, hvor de blandes og derfor bør være repræsenteret i tilfældige blandingsforhold ved hver prøvetagning.

Vi må dog kunne antage, at ud af de 30 prøver som er udtaget og målt, er de to prøver med de mest ekstreme værdier for titaniumoxid og zink, de to prøver som bedst repræsenterer den kemiske sammensætning i hhv. kedelasken og elfilterasken; forudsat at naturlige tidsvariationer ikke tilfører en væsentligt fejlkilde på disse ekstremværdier.

For titaniumoxid findes ekstremværdierne i prøve 567659 (0,5 % TiO_2) og 567651 (1,7 % TiO_2). Den kemiske sammensætning for disse to prøver ses i Tabel 40 sammen med gennemsnitlige værdier for hhv. tre og fem prøver med de højeste TiO_2 -værdier. I tabellen ses de målte værdier for grundstofferne rangeret efter korrelationskoefficienten (r) med titaniumoxid, således at grundstoffer med størst affinitet med titaniumoxid (kedelasken) er i bunden, og grundstoffer med størst affinitet til zink (elfilterasken) er i toppen.

To usikkerheder knytter sig dog til udvælgelsen af enkeltprøver som repræsentanter for kedelasken og elfilterasken: (i) påvirkningen fra den naturlige grundstofvariation som følge af grundstofvariationer i affaldet, og (ii) at det er uvist i hvilket omfang, prøver med ekstremværdierne for zink og titaniumoxid repræsenterer en selvstændig type flyveaske uden at være influeret af den anden type.

¹¹ www.sciencedirect.com/book/9780081009451/coal-combustion-products-ccps

¹² www.sciencedirect.com/book/9780081009451/coal-combustion-products-ccps

Tabel 40. Estimeret sammensætning på kedelaske og elfilteraske, samt estimat af mængdefordeling mellem de to typer aske

Kemisk betegnelse	Enhed	Flyveaske		Elfilteraske			Kedelaske			Fordeling		
		Gennemsnit	Pearson (r) ift. Ti	Top Ti minimum (567659)	Top 3 Ti minimum gennemsnit	Top 5 Ti maksimum gennemsnit	Top Ti maksimum (567651)	Top 3 Ti maksimum gennemsnit	Top 5 Ti minimum gennemsnit	Top	Top 3	Top 5
Li	ppm	33,0	-0,9	58,0	47,0	45,0	22,0	25,7	27,0	0,69	0,69	0,66
Rb	ppm	128	-0,9	359	268	232	52,0	66,7	75,6	0,75	0,75	0,66
Zn	%	3,4	-0,9	7,2	5,7	5,3	1,7	2,2	2,4	0,70	0,70	0,66
Ge	ppm	2,8	-0,9	8,3	5,7	4,8	1,4	1,5	1,8	0,80	0,80	0,66
K ₂ O	%	7,1	-0,9	13,5	11,7	10,3	4,1	4,7	5,4	0,67	0,67	0,64
Cs	ppm	4,1	-0,9	13,5	9,0	7,9	1,0	1,6	1,9	0,75	0,75	0,62
Cu	ppm	1186	-0,9	1960	1587	1604	860	857	964	0,68	0,55	0,65
Sb	%	0,16	-0,9	0,36	0,27	0,25	0,07	0,10	0,10	0,69	0,69	0,61
Sn	%	0,12	-0,9	0,21	0,19	0,17	0,06	0,08	0,08	0,64	0,64	0,61
In	ppm	1,2	-0,9	2,2	2,0	1,8	0,7	0,8	0,9	0,66	0,66	0,61
Na ₂ O	%	8,6	-0,9	12,7	12,5	11,6	5,1	6,0	6,6	0,54	0,54	0,61
Ga	ppm	12,4	-0,8	29,0	20,3	18,4	9,0	10,3	10,2	0,83	0,83	0,73
Pb	ppm	4833	-0,8	>10.000	8950	8405	1860	2360	3224	0,63	0,62	0,69
Cd	ppm	275	-0,8	672	477	445	111	151	181	0,71	0,71	0,64
Ag	ppm	10,7	-0,7	12,1	15,1	14,7	4	5,7	6,0	0,17	0,17	0,45
Br	ppm	898	-0,6	> 1.000	1.000	>1.000	542	771	801	NA	NA	NA
Ni	ppm	47,7	-0,4	60,0	53,3	56,0	50,0	46,7	48,0	1,23	1,23	1,04
As	ppm	291	-0,4	637	510	375	234	188	227	0,86	0,86	0,57
Au	ppb	319	-0,4	385	382	352	225	285	274	0,41	0,41	0,42
Ti	ppm	0,11	-0,3	< 0,05	0,09	0,11	< 0,05	0,09	0,10	NA	NA	0,19
Mo	ppm	12,4	0,0	13,0	13,0	12,4	12,0	12,7	12,6	0,57	0,57	0,17
Pd	ppb	38,5	0,0	26,0	21,0	22,2	15,0	19,0	17,8	-1,13	-1,13	-3,70
V	ppm	50,8	0,3	65,0	49,3	47,6	61,0	53,0	54,6	3,55	3,55	0,46
Pt	ppb	92,3	0,4	36,0	50,0	58,6	84,0	101	84,6	1,17	1,17	1,30
Hg	ppb	25,4	0,4	< 5	6,0	10,4	25,0	27,7	41,6	NA	NA	0,48
Ta	ppm	1,0	0,5	0,32	0,51	0,54	1,0	1,0	1,1	0,93	0,93	0,72

Kemisk betegnelse	Enhed	Flyveaske		Elfilteraske			Kedelaske			Fordeling		
		Gennemsnit	Pearson (r) ift. Ti	Top Ti minimum (567659)	Top 3 Ti minimum gennemsnit	Top 5 Ti maksimum gennemsnit	Top Ti maksimum (567651)	Top 3 Ti maksimum gennemsnit	Top 5 Ti minimum gennemsnit	Top	Top 3	Top 5
W	ppm	5,3	0,6	3,3	4,3	4,3	6,1	6,4	6,0	0,72	0,72	0,60
Co	ppm	13,0	0,6	13,0	11,3	11,2	14,0	14,3	14,8	-0,03	-0,03	0,49
Fe ₂ O ₃ (T)	%	1,3	0,6	1,3	1,1	1,1	1,7	1,5	1,5	-0,02	-0,02	0,36
Cr	ppm	407	0,7	400	363	350	450	450	456	0,13	0,13	0,53
Zr	ppm	96,4	0,8	39,0	58,0	63,8	129	119,3	115	0,64	0,64	0,63
P ₂ O ₅	%	1,1	0,8	0,58	0,86	0,88	1,3	1,3	1,3	0,71	0,71	0,60
MnO	%	0,08	0,8	0,07	0,07	0,07	0,10	0,09	0,09	0,20	0,20	0,41
SiO ₂	%	12,2	0,8	8,4	8,6	9,4	19,2	16,9	16,3	0,36	0,36	0,41
REE		147	0,9	111	107	119	187	180	179	NA	NA	NA
CaO	%	22,6	0,9	10,1	13,2	15,7	32,0	29,7	28,6	0,57	0,57	0,53
Th	ppm	2,0	0,9	1,0	1,1	1,4	2,9	2,6	2,5	0,52	0,52	0,53
MgO	%	1,9	0,9	1,1	1,3	1,4	2,6	2,4	2,3	0,53	0,53	0,51
Sr	ppm	403	0,9	223	260	300	553	515	506	0,55	0,55	0,50
U	ppm	0,85	0,9	0,47	0,53	0,61	1,2	1,1	1,1	0,52	0,52	0,48
Ba	ppm	1.022	0,9	747	772	854	1.256	1.229	1.231	0,54	0,54	0,44
TiO ₂	%	1,2	1,0	0,52	0,69	0,77	1,7	1,6	1,6	0,58	0,58	0,51
Al ₂ O ₃	%	4,3	1,0	2,1	2,6	2,8	6,8	6,4	6,0	0,47	0,47	0,47
Be	ppm	1,0	LOD	< 1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	NA	NA	NA
Bi	ppm	10,9		10,1	13,0	11,4	10,2	9,2	10,7	7,57	7,57	0,76

Lilla: Mere end dobbelt så høj værdi i forhold til gennemsnit for flyveasken.

Grøn: mere end 20 % forhøjet i forhold til gennemsnittet.

Rød/gul henholdsvis større end 0,55 eller mindre end 0,45 – og dermed om den beregnede fordeling er signifikant eller ej. Usikre resultater er ikke fremhævet med farve.

9.4.2 Forholdet mellem kedelaske og elfilteraske

Middelværdien for titaniumoxid i alle flyveaskeprøver kan anvendes til at beregne den teoretiske volumenfordeling mellem kedelaske og elfilteraske. Middelværdien er principielt resultatet af, at grundstofferne i de to typer flyveaske er blandet sammen i det blandingsforhold, som vi er interesseret i at beregne. Med middelværdien, og ekstremværdierne, og under antagelse af, at der kun er to typer flyveaske, kan 'blandingsforholdet' beregnes.

Beregningseksempel. Da ekstremværdierne for titaniumoxid er hhv. 0,5 % og 1,7 %, og middelværdien for de 30 prøver er 1,2 %, udgør flyveasken med 1,7 % TiO₂ 58 % af den samlede flyveaskeproduktion:

$$\frac{1,2 - 0,5}{1,7 - 0,5} = 58 \%$$

At dette er det korrekte forhold, kan eftervises ved at beregne den gennemsnitlige koncentration af denne fordeling:

$$0,5 \% * 42 \% + 1,7 \% * 58 \% = 1,2 \%$$

Ved samme beregning for flyveaskens største grundstofkomponent, calcium, fås et tilsvarende forhold (57 %/43 %). Dette svarer nogenlunde til en 60/40-fordeling.

De resterende hovedelementer viser varierende forhold ved brug af denne beregning. For både magnesium og aluminium er forholdet tæt på 50/50, mens zink, kalium og natrium har en skæv fordeling med 60/40 (eller mere) ligesom for titaniumoxid. At vi ikke konsekvent ser en 60/40 fordeling kan skyldes, at der foregår en yderligere fraktionering af flyveaske med forskellige kemiske sammensætninger, enten for kedelasken og/eller for elfilterasken. Sandsynligvis fraktioneres elfilterasken yderligere, da der er flere sekventielle udtag af flyveaske fra elfilteret, hvorimod der fra kedlen kun udgår én materialestrøm. Endvidere kan det afvigende mængdeforhold, fundet ved beregningerne, skyldes variationer som følge af den varierende sammensætning af affaldet, der føres ind i anlægget.

9.4.3 Råstofpotentialet

Undersøgelserne har vist, (i) at flyveasken kan opdeles i to grupper, som har forskellig kemisk sammensætning: kedelaske og elfilteraske, og (ii) at der er indikationer på, at også elfilteraskens sammensætning varierer i forhold til, hvor den dannes og efterfølgende udfældes. Det overordnede volumenforhold for kedelasken og elfilterasken vurderes at være omkring 60/40. I vurdering af råstofpotentialet for disse strømme bør gennemsnittet af ekstremværdierne anvendes (Tabel 40), og det vurderes, at zinkindholdet i elfilterasken er omkring 5,3 % ved den i afsnit 9.4.2 beregnede 60/40 fordeling mellem kedelaske og elfilteraske.

Uanset om man betragter den kemiske sammensætning for de to prøver, der har ekstremværdierne for titaniumoxid og zink, eller om man betragter gennemsnittet for de fem prøver med det højeste indhold af titaniumoxid/laveste indhold af zink, sammenholdt med de fem prøver med det laveste indhold af titaniumoxid/højeste indhold af zink, er konklusionen klar:

- Kedelasken har et lavere indhold af tunge metaller og alkalimetaller;

- Elfilterasken har et forhøjet indhold af zink og andre tungmetaller som fx tin, kobber, sølv og guld, samt forhøjet indhold af alkalimetallerne kalium og natrium.

Det vurderes derfor, at potentialet for genanvendelse er størst, hvis disse strømme adskilles og ikke sammenblandes, som det sker i dag. Dette vurderes mere detaljeret nedenstående.

Elfilteraskens råstofpotentiale.

Elfilteraskens zinkindhold varierer mellem 1,7 og 7,2 % med et gennemsnit på 3,4 %; det høje indhold vurderes at repræsentere en fraktion af elfilterasken, som udgør under halvdelen af denne; samlet set estimeres zinkindholdet i elfilterasken at være lidt under 5,3 % (Tabel 39 og Tabel 40). For at kunne etablere en økonomisk udvinding af zink er det derfor nødvendigt at finde den delstrøm med det højeste indhold af zink. Sammen med zink har grundstoffer som kobber, tin, guld og sølv affinitet for at ende i elfilterasken og en udnyttelse af disse ressourcer bør ligeledes overvejes.

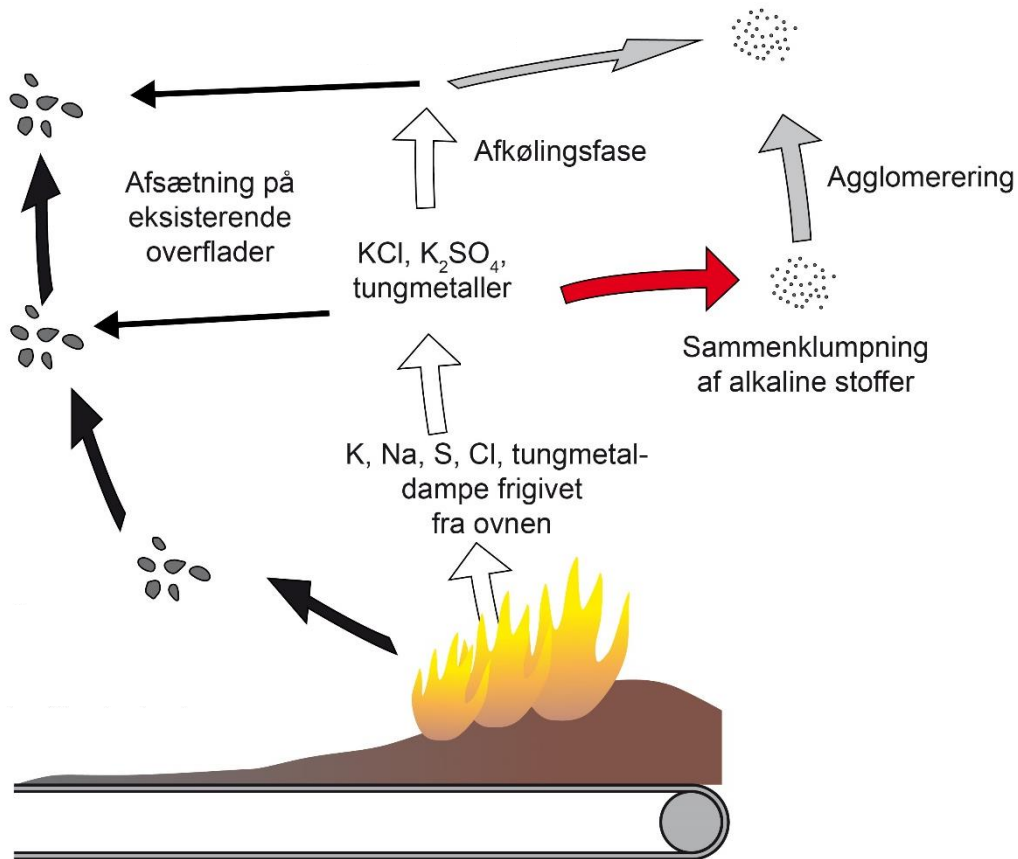
Udnyttelse af flyveaske undersøges for tiden i flere projekter, hvor man undersøger teknologier som sigter mod udvinding af zink fra flyveaske. I et af projekterne (HALOSEP) forsøger man at adskille flyveasken i tre fraktioner: (i) zinkkoncentrat, (ii) saltfraktion og (iii) en restfraktion. Håbet er, at fraktionerne kan anvendes til hhv. genanvendelse, vejsalt og som cementtilsætning. En af de parametre der er afgørende for metoden er koncentrationen af zink, da zink er det økonomiske hovedprodukt ved separationen. At nærværende undersøgelse har vist, at elfilterasken indeholder en højere koncentration af zink end kedelasken, kan derfor have betydning afhængig af de endelige resultater fra disse pilotprojekter.

Det generelt højere indhold af zink i flyveasken end i slaggen kan skyldes to forhold: (i) der udledes mere flyveaske med lav koncentration af zink med slaggestrømmen og/eller (ii) at temperaturen i ovnen er øget, så der derfor fordamper mere zink fra slaggen.

Zink er et af de metaller, der har det laveste kogepunkt, nemlig 907 °C, hvilket er i den nedre del af ovnens forbrændingstemperatur, som ligger på 1.100-1.200 °C. Dette kan forklare, hvorfor der ses en væsentlig mængde zink i flyveasken sammenlignet med slaggen. Helt svarende til zink er der også andre tungmetaller som fordamper ved de høje temperaturer i ovnen. Disse tungmetaller danner aerosoler der i høj grad reagerer med alkalimetallerne og danner aerosol-forbindelser, se Figur 71. Derfor antages det, at tungmetal-partiklerne er meget små, og at de først dannes, når temperaturen kommer under et vist niveau og derfor har tendens til at udfælde umiddelbart i kedlen.

I lighed med zink udviser de 'miljøproblematisk' tungmetaller (som fx cadmium og bly) store variationer, men korrelerer stærkt med zink (Figur 67). Det højeste indhold af tungmetaller blev (ligesom med zink) registreret i elfilterasken: antimon (0,36 %), cadmium (672 ppm) og bly (1.170 ppm). Til sammenligning lå gennemsnittet for alle 30 flyveaskeprøver på: antimon (0,16 %), cadmium (275 ppm) og bly (345 ppm). Særligt for antimon, som er hovedproblemet i forhold til tungmetalindhold, var der et højt niveau i denne prøve, nemlig med en faktor 3 i forhold til gennemsnittet.

Indholdet af tungmetaller lægger en begrænsning for, hvilke former for genanvendelse flyveasken kan anvendes til i byggesektoren, men samtidig kan det øge værdien af flyveasken, hvis den anvendes til metallurgisk genanvendelse (se afsnit 9.5.1).



Figur 71. Flyveaskens tilblivelse ved forbrænding. Tunge metaller og alkalimetaller danner forbindelser, som enten bliver til selvstændige partikler eller afsættes på eksisterende partikler¹³.

Kedelaskens råstofpotentiale

Høj alkalinitet er en betydelig udfordring for genanvendelse af flyveaske fra forbrænding af organisk materiale (flis, halm, affald etc.). Flyveaske fra affaldsforbrænding har et forhold mellem CaO, SiO₂ og Al₂O₃ svarende til produkter, der er anvendelige som tilsætning i cement (se Figur 73), men hvis flyveasken skal kunne anvendes i cementfremstilling, og som tilsætning til asfalt, skal alkaliniteten være <5 % (Na₂O-ækv.) jf. EN 450-1:2012: 'Flyveaske til betonformål'. Totalkemianalysen viser, at alkaliniteten i flyveasken fra Amager Bakke er omkring 16 %. Dog viser denne undersøgelse, at alkaliniteten har en stærk tendens til at følge den observerede todeling af flyveasken, hvorved alkaliniteten i kedelasken er betragtelig lavere (se Tabel 41). Der er dog ikke indikationer på, at alkaliniteten i kedelasken er reduceret tilstrækkeligt, da alkaliniteten målt i kedelasken fortsat ligger på 9 % (prøve 567651-2/4).

¹³ <https://docplayer.dk/46043330-Fyrrumsprocesser-primære-metoder-til-emissionsbegrænsning-forbrændingsberegninger.html>

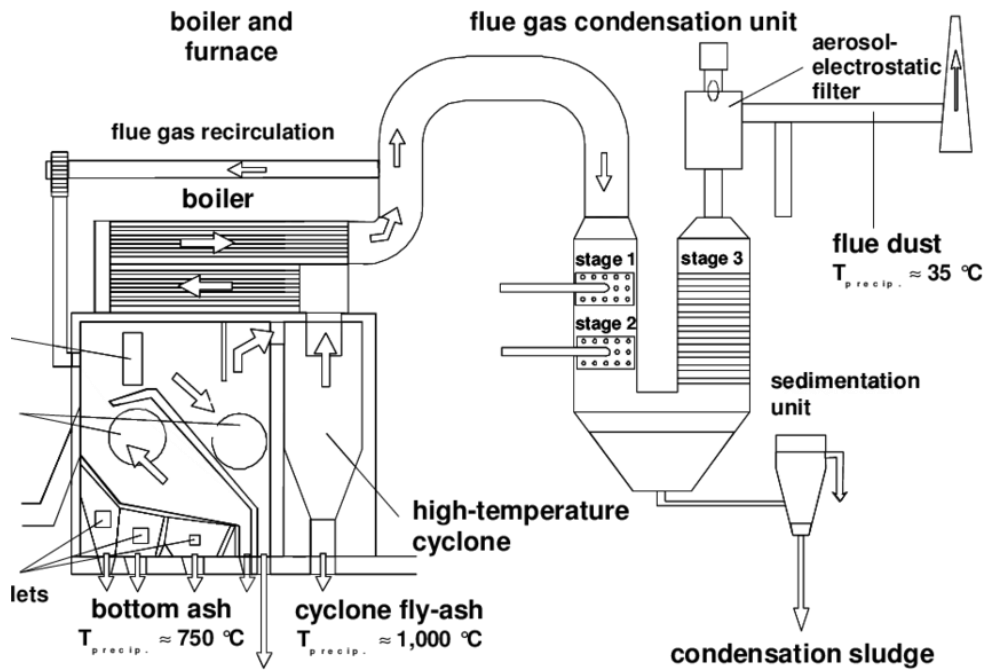
Tabel 41. Identificerede potentialer for genanvendelse af flyveaskens bestanddele.

Adskillelse af flyveaskeprodukter	Elfilter flyveaske (40 %)	<p>Højt indhold af zink og andre tunge metaller</p> <p>Udtages flyveaske fra elfilteret kan der måske være en bedre økonomi i forhold til at genanvende zink og andre tungmetaller. Data fra nærværende studie indikerer omkring 50 % mere zink i elfilterasken og i en fraktion af elfilterasken op mod dobbelt så højt et zinkindhold.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>% Zn</th> <th>% Sn</th> <th>ppm Cu</th> <th>ppm Ag</th> <th>ppb Au</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fraktion af elfilterasken:</td> <td>7,2</td> <td>0,21</td> <td>1.960</td> <td>15</td> <td>385</td> </tr> <tr> <td>Indikeret i elfilterasken:</td> <td>5,3</td> <td>0,17</td> <td>1.604</td> <td>15</td> <td>357</td> </tr> <tr> <td>Målt i flyveasken:</td> <td>3,5</td> <td>0,12</td> <td>1.186</td> <td>11</td> <td>319</td> </tr> <tr> <td>Indikeret i kedelasken:</td> <td>1,7</td> <td>0,06</td> <td>860</td> <td>4</td> <td>225</td> </tr> </tbody> </table>		% Zn	% Sn	ppm Cu	ppm Ag	ppb Au	Fraktion af elfilterasken:	7,2	0,21	1.960	15	385	Indikeret i elfilterasken:	5,3	0,17	1.604	15	357	Målt i flyveasken:	3,5	0,12	1.186	11	319	Indikeret i kedelasken:	1,7	0,06	860	4	225
		% Zn	% Sn	ppm Cu	ppm Ag	ppb Au																										
	Fraktion af elfilterasken:	7,2	0,21	1.960	15	385																										
Indikeret i elfilterasken:	5,3	0,17	1.604	15	357																											
Målt i flyveasken:	3,5	0,12	1.186	11	319																											
Indikeret i kedelasken:	1,7	0,06	860	4	225																											
Kedel flyveaske (60 %)	<p>Som tilsætning til cement</p> <p>Udtages flyveaske fra kedlen vil den have en lavere alkalinitet end flyveaske fra elfilteret. Om den lavere alkalinitet gør flyveasken tilstrækkeligt egnet som cement kan vi ikke konkludere ud fra dette studie. Kedelasken vil desuden indeholde et lavere niveau af tungmetaller.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>% Na₂O</th> <th>% K₂O</th> <th>ppm Cd</th> <th>ppm Pb</th> <th>% Sb</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Indikeret i kedel-asken</td> <td>5,1</td> <td>4,1</td> <td>111</td> <td>1.860</td> <td>0,07</td> </tr> <tr> <td>Målt i flyveasken:</td> <td>8,6</td> <td>7,1</td> <td>275</td> <td>4.833</td> <td>0,16</td> </tr> <tr> <td>Indikeret i elfilterasken:</td> <td>12,7</td> <td>13,5</td> <td>672</td> <td>8.405</td> <td>0,36</td> </tr> </tbody> </table>		% Na ₂ O	% K ₂ O	ppm Cd	ppm Pb	% Sb	Indikeret i kedel-asken	5,1	4,1	111	1.860	0,07	Målt i flyveasken:	8,6	7,1	275	4.833	0,16	Indikeret i elfilterasken:	12,7	13,5	672	8.405	0,36							
	% Na ₂ O	% K ₂ O	ppm Cd	ppm Pb	% Sb																											
Indikeret i kedel-asken	5,1	4,1	111	1.860	0,07																											
Målt i flyveasken:	8,6	7,1	275	4.833	0,16																											
Indikeret i elfilterasken:	12,7	13,5	672	8.405	0,36																											
Nye typer flyveaske	<p>Fremstilling af genanvendelige flyveaskeprodukter</p> <p>Følgende parametre kan desuden være styrende for, hvor hvilke partikler udfælder:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Strømningsforhold (turbulent eller laminar) og hastighed ved udfældningskamre • Temperatur, særligt i forhold til om zink fortætter eller ej <p>To forslag til måder hvorpå grundstoffer kan koncentreres i flyveasken:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) Anvendelse af eddy-current-teknologien på røggasen mens flyveaskepartiklerne er luftbårne. Herved opnås to strømme; én med et højt indhold af diamagnetiske partikler og én med de resterende partikler. Derefter udfældes partiklerne hver for sig, fx elektrostatisk. b) Anvendelse af cyklon-teknologi til at lave en tyngdeseperation af flyveasken, se Figur 72. <p>CC-SEM-metoden kan undersøge partiklernes kemiske sammensætning, rundhed, størrelse og densitet og dermed bruges til at vurdere forskellige typer partiklers udfældningsegenskaber med det formål at re-designe og optimere udfældningsforholdene.</p>																															

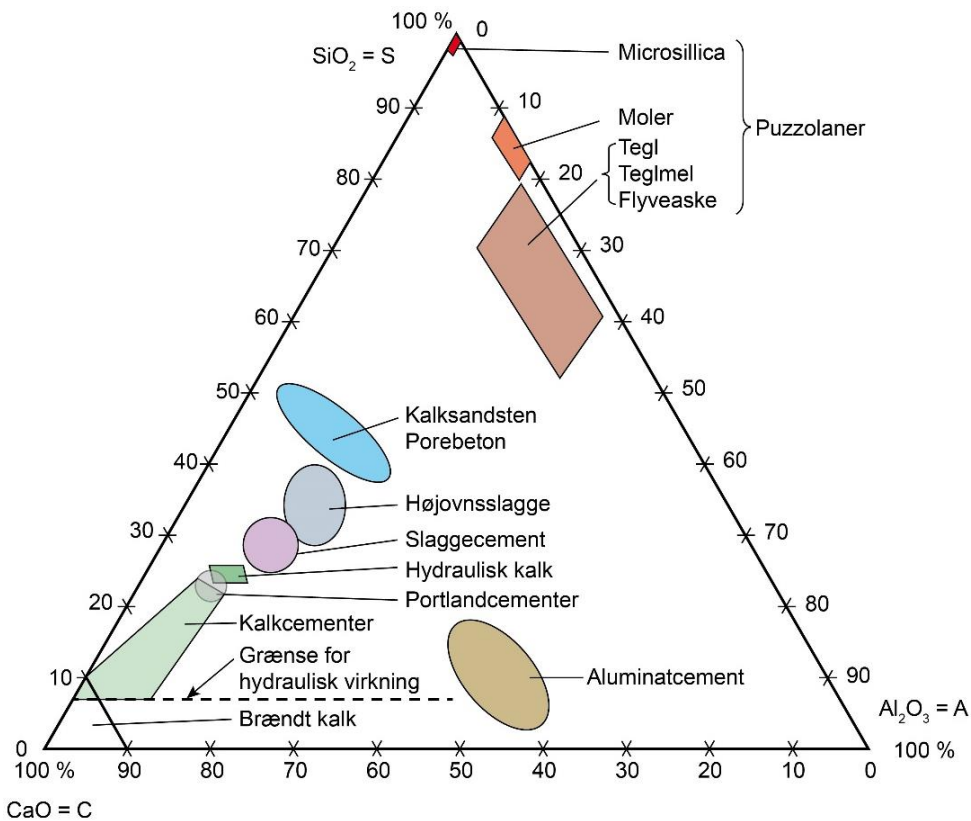
9.5 Metallurgiske udfordringer

Sammensætningen af metallerne i slagge og flyveaske er afgørende for, i hvilket omfang metallerne kan raffineres ud af materialestrømmene. Med andre ord, den 'rigtige' sammensætning af metaller er en forudsætning for, at metallernes råstofpotentialer kan udnyttes.

For både pyrometallurgi og hydrometallurgi gælder, at grundstoffer, som i henseende til fysio-kemiske egenskaber ligner hinanden, vil reagere næsten ens, og de vil under de metallurgiske processer have tendens til at ende i de samme koncentreter. Hvis de ønskede metaller ender i de koncentreter, som skal raffineres yderligere, vil dette være en positiv konsekvens og give mulighed for at øge økonomien for processen. Hvis det derimod kræver flere processer for at få ekstraheret dem fra hovedmetallet, vil det være fordyrende og kan være en hindring for kommercialisering af hovedproduktet.



Figur 72. Illustration af en ny teknologi, som hedder 'cyclon-teknologi', hvor tunge metaller separeres ud af flyveasken ved cyklon under høj temperatur¹⁴.

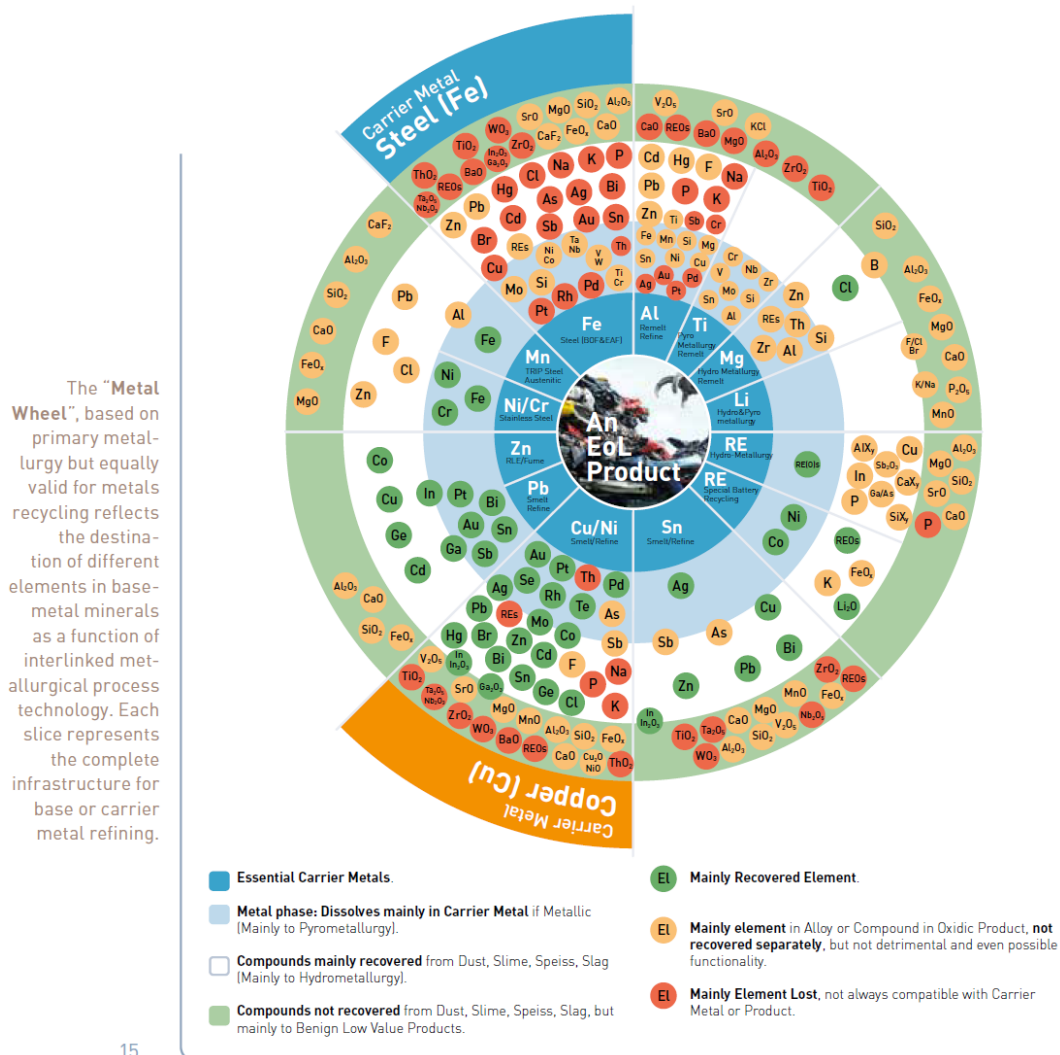


Figur 73 Uorganiske bindemidlers kemiske sammensætning¹⁵.

¹⁴ www.researchgate.net/publication/227021049 Fractionated Heavy Metal Separation in Bio-mass Combustion Plants-Possibilities Technological Approach Experiences

¹⁵ <https://docplayer.dk/19196430-Egenskaber-ved-beton-ved-samtidig-delvis-erstatning-af-cement-og-sand-med-traeaske.html>

Denne problematik er illustreret i 'Metalhjulet' i Figur 74, hvor hovedmetallerne, som er målet for udvindingen, er vist i cirkelns midte – kaldet de bærende metaller ('Carrier Metals'). For hver af disse hovedmetaller ses i figuren, hvor biprodukterne ender; (i) om de ender sammen med hovedmetaller efter den pyrometallurgiske proces (grå cirkel), (ii) om de ender i slagge, støv, aske mv. og kan udvindes samlet via hydrometallurgiske processer (hvid cirkel), eller (iii) om de ender i en rest, som ikke kan genanvendes (grøn cirkel). Metallernes farve i figuren angiver; (a) om metallerne udvindes særskilt (grøn), (b) om de down-cycles med ingen eller minimal funktionalitet (orange) sammen med hovedmetallet eller som blandingsprodukt, eller (c) om metallet går tabt, primært i lav-værdi-produkter (rød). Det fremgår således af Figur 74 at jern, aluminium, titanium og magnesium, affinitetsmæssigt kan grupperes sammen, tilsvarende fremgår for kobber, tin, antimon, zink og bly.



Figur 74. 'Metalhjulet' med angivelse af hovedmetaller og graden af genanvendelsen for biprodukter¹⁶.

¹⁶ <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8850/Metal-recycling-opportunities-limited-infrastructure-Summary.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

9.5.1 Flyveasken

Når elektroniskskrot behandles pyro-metallurgisk, fanger et elektrostatisk elfilter de metaller, som har affinitet med zink. Den samme affinitet er i denne undersøgelse observeret i metalsammensætningen i flyveasken fra elfilteret. Man kan derfor sammenligne udfældningsprocessen for flyveasken på forbrændingsanlægget med et trin i en reel raffineringproces. I denne undersøgelse er det fundet at grundstofferne zink, cadmium og bly udfældes i højere koncentrationer i elfilteret, og at den kemiske sammensætning i materialet som udgangspunkt har et øget råstofpotentiale sammenlignet med flyveasken set som en samlet materialestrøm. Resultaterne stemmer overens med resultaterne i metalhjulet (Figur 74).

Hvis der ved udfældning af asken på forbrændingsanlægget, eller ved andre processer, fx HALOSEP, kan dannes et koncentrat med højt zinkindhold, vil det derfor være meget sandsynligt, at de øvrige metaller med affinitet til zink kan blive udvundet og genanvendt, hvilket øger det økonomiske potentiale for at genanvende delstrømme af flyveasken.

9.5.2 Slaggen

Metalhjulet viser at fx jernskrot (stål) bliver omsmeltet uden at legeringsmetaller og andre metaller bliver udvundet. Nogle af legeringsmetallerne vil derfor indgå i nye jernprodukter, hvor de kan have en positiv funktionalitet for stålet; det kan fx gælde for silicium, molybdæn, niobium, mangan og wolfram – eller de vil have en negativ virkning for stålet – navnlig kobber og platingruppemetaller. Mange metaller vil dog gå tabt i slagge og aske fra processen. Når alle disse legeringsmetaller (positive som negative) ikke udvindes, skyldes det, at det ofte er billigere at tilsætte en renere stål til smelteprocessen for at komme under et givent toleranceniveau frem for at udvinde de uønskede indholdsmetaller.

Af metalhjulet ses, at legeringsmetallerne krom og nikkel, der som påvist ved materialekarakteriseringen, kan ende i magnetiske fraktioner fra metalsorteringen af råslagge, downcycles med den langsigtede følgevirkning, at de med tiden bliver opkoncentreret i stål, hvilket på lang sigt kan vise sig at reducere anvendelsesmulighederne for jernskrot, hvis der ikke tilføres nyt stål i produktionen. Derfor er det umiddelbart ikke positivt, hvis stål legeret med nikkel og krom ender i en fraktion med blandet jernskrot, ligesom det er et problem, at andre grundstoffer ophober sig i stålet. Herudover betyder det også, at nye metaller skal erstatte den del der mistes. Dette er en af lækagerne i den cirkulære materialestrøm.

10. Konklusion

10.1 Prøvegrundlag og testmetoder

Materialekaraktereringen af slagge og flyveaske er udført på 30 repræsentative prøver af slagge og flyveaske indsamlet i november-december 2017. Der blev indsamlet ca. 1.800 kg slagge og 36 kg flyveaske, som udgør en systematisk tidsserie for 30 ud af 32 dages produktion.

De tekniske undersøgelser er baseret på en kompositprøve af hver materialetype. Slaggekompositprøven er dannet ved neddeling af prøvestørrelse med splitter og efterfølgende størrelsessortering. Kompositprøvens 2-63 mm-fraktion er undersøgt og sorteret manuelt ved brug af magneter, metaldetektor og håndholdt XRF. Der er lavet kemiske analyser for hoved- og sporelementer for hver dagsprøve (30 slaggeprøver og 30 flyveaskeprøver), ligesom grundstofsammensætningen for slaggens 0-2 mm-fraktion og for to identificerede flyveasketyper er beregnet.

10.2 Slaggeresultater

Karakteriseringen har vist, at slagge i fraktionen 2-63 mm kan opdeles i fem råstofgrupper; magnetisk metal (29 %), glas (14 %), bygge- og keramiske materialer (14 %), ikke-magnetisk metal (6 %) og slaggesmelte (37 %). Det er estimeret, at Amager Bakke producerer omkring 4.000 ton ikke-magnetiske metaller og 18.400 ton magnetiske metaller (se Tabel 42). Om sættes disse estimer til produktionen fra alle forbrændingsanlæg i Danmark, svarer dette til en samlet produktion på ca. 45.000 ton pr. år af ikke-magnetiske metaller og 207.000 ton pr. år magnetiske metaller. Genvindingsbranchen tilstræber at foretage en funktionel genanvendelse af disse ikke-magnetiske og magnetiske metaller; foreløbige vurderinger indikerer dog, at legeringsmetallerne i stål går tabt (bliver down-cyclet). Det nuværende forretningskoncept giver ikke mulighed for at lave en funktionel genanvendelse af bygge- og keramiske materialer samt glas. Resultaterne peger på at dette potentiale bør undersøges nærmere.

Resultaterne viser desuden at den finkornede del af slaggen har et højt indhold af tungmetaller (antimon, guld, bly, bismuth, tin, sølv, cadmium, zink og palladium); fx skønnes indholdet af guld til 1,6 g/ton, svarende til 27 kg guld pr. år. Det foreslås at undersøge, om indsættelse af et vasketrin umiddelbart efter ovnen kan medføre at tungmetallerne indvindes. En sådan procesændring kan have både praktiske og økonomiske fordele, som fx:

- Færre miljøskadelige tungmetaller vil findes i <2 mm-fraktionen;
- Modningstrinnet forventes at være overflødig, hvorved omkostningerne reduceres og arealer frigøres;
- Bedre renhed muliggør optisk sortering og dermed udsortering af flere materialestrømme;
- Bedre renhed forbedrer separationen af metalfragmenter (>2 mm) og øger produktkvaliteten;

- Separation af udvalgte tungmetaller kan ved frasalg bidrage positivt til økonomien og kan samtidig nedbringe miljøudfordringerne og dermed gøre produktet mere anvendeligt.

Tabel 42. Oversigt over estimeret fordeling af udvalgte råstofgrupper indeholdt i slagge og flyveaske.

Materialestrømme		Fordeling	Estimeret vol. ARC	Estimeret vol. DK
Slagge			80.000 ton pr. år	900.000 ton pr. år
2-63 mm	>63 mm overstørrelser	5 %	4.000 ton pr. år	45.000 ton pr. år
	Bygge- og keramiske mat.	11 %	8.800 ton pr. år	99.000 ton pr. år
	Glas	11 %	8.800 ton pr. år	99.000 ton pr. år
	Ikke-magnetisk metal	5 %	4.000 ton pr. år	45.000 ton pr. år
	Magnetisk metal	23 %	18.400 ton pr. år	207.000 ton pr. år
	Slaggesmelte	29 %	23.200 ton pr. år	261.000 ton pr. år
	0-2 mm finfraktion	15 %	12.000 ton pr. år	135.000 ton pr. år
	- heraf guld	1,6 g/t	27 kg pr. år	297 kg pr. år
	- heraf antimon	149 g/t	2 kg pr. år	22 kg pr. år
Flyveaske			8.000 ton pr. år	90.000 ton pr. år
	Zink	3,5 %	280 ton pr. år	3.150 ton pr. år
	Bly	4.833 ppm		
	Cadmium	275 ppm	-	-
	Na ₂ O, K ₂ O	15,7 %	-	-
	Kedelaske	60 %	4.800 ton pr. år	54.000 ton pr. år
	- heraf zink	1,7 %	110 ton pr. år	1.250 ton pr. år
	- heraf bly	1.860 ppm		
	- heraf cadmium	111 ppm	-	-
	- heraf Na ₂ O, K ₂ O	9,2 %	-	-
	Elfilteraske	40 %	3.200 ton pr. år	36.000 ton pr. år
	- heraf zink	5,3 %	170 ton pr. år	1.900 ton pr. år
	- heraf bly	8.405 ppm		
	- heraf cadmium	672 ppm	-	-
	- heraf Na ₂ O, K ₂ O	26,2 %	-	-

- Ikke beregnet

Observationer af deformationer på slaggefragmenterne indikerer, at de har været påvirket af et ovnmiljø, som svarer til temperaturer højere end 1.200 °C, og der observeres en høj procentdel slaggesmelte, høj deformeringsgrad for glas, høj andel smeltet magnetisk metal samt varmebeskadigelse af mønter, hvilket reducerer genvindingspotentiallet.

10.3 Flyveaskeresultater

De kemiske analyser af flyveasken sandsynliggør, at flyveaskeprøverne repræsenterer mindst to typer flyveaske, som har hver deres kemiske signatur. Der er formentlig tale om 'kedelaske' og 'elfilteraske', som er beregnet til at udgøre henholdsvis 60 % og 40 %. Elfilterasken har forhøjet indhold af zink og andre tungmetaller som antimon, tin, kobber, sølv og guld. De fundne resultater peger på, at man bør ændre i processen, så de to typer kan adskilles med henblik på at genindvinde ovennævnte metaller fra elfilterasken og opnå en mindre restriktiv deponering eller konstruktiv anvendelse til fx cementfremstilling af kedelasken og elfilteraske-restproduktet fra genvinding af tungmetaller.

10.4 Modellering af affaldssammensætningen

Der er udarbejdet en numerisk model, som på basis af slaggen og flyveaskens kemiske sammensætning, kan estimere sammensætningen af det affald, der har resulteret i slaggens og røggassens (og dermed flyveaskens) sammensætning. Et sådant værktøj kan bruges til konkrete vurderinger af, hvor der er brug for bedre kildesortering. Der udestår udvikling af bedre referencedata og yderligere produktudvikling inden værktøjet kan tages i brug.

Geocenter Danmark er et formaliseret samarbejde mellem de fire selvstændige institutioner De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Institut for Geoscience ved Aarhus Universitet samt Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning (IGN) ved Københavns Universitet og Geologisk Museum under Statens Naturhistoriske Museum.

9 788778 715210

MiMa rapport 2019/1

Urban-X-projektet: Karakterisering af slagge og flyveaske fra affaldsforbrændingsanlægget Amager Bakke

Overvejelser om råstofpotentialet

2. udgave

Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa) har i samarbejde med Amager Ressource Center (ARC) undersøgt sammensætningen af slagge og flyveaske fra ARC's Waste-to-Energy-anlæg, Amager Bakke. Anlægget genererer energi på basis af husholdningsaffald fra borgere og virksomhedsaffald fra fem kommuner i hovedstadsområdet. Formålet med undersøgelsen var: (i) at vurdere om disse restprodukter indeholder oversete råstofstrømme, som ikke udnyttes på nuværende tidspunkt, og (ii) at udvikle en metode til at bestemme affaldets oprindelige sammensætning på basis af slaggens og flyveaskens sammensætning.

Der blev i 2017 indsamlet 30 prøver af slagge og flyveaske; disse prøver repræsenterer en tidsserie på 30 dage. Slaggen er indsamlet direkte fra det transportbånd, der fører dem ud af ovnen, mens flyveasken er udtaget fra et rørsystem, som findes umiddelbart inden en opbevaringssilo. Udtagning af repræsentative prøver fra den meget heterogene slagge er en udfordring, som påvirker sikkerheden i de opnåede resultater.

Slaggen er vurderet ud fra to kriterier: (i) visuel sortering af komponenter og (ii) kemiske analyser. Den visuelle sortering identificerede følgende råstof-hovedgrupper: Bygge- og keramiske materialer, glas, ikke-magnetiske metaller, magnetiske metaller, smelteslagge og en finkornet fraktion (<2 mm). De kemiske analyser af den finkornede fraktion viser forhøjet indhold af blandt andet antimon og guld, samt en række tungmetaller. MiMa har foreslået ændringer i procesrutinerne med henblik på at nyttiggøre metallerne i denne fraktion og for at reducere indholdet af miljøskadelige stoffer i restslaggen inden den eventuelt bruges til anlægsopgaver. Det forventes, at de foreslåede procesrutiner desuden vil optimere separationen af metalfraktionerne og øge potentialet for udsortering af glas.

Kemiske analyser af flyveasken har påvist, at den består af to delstrømme: (i) aske fra elfilteret og (ii) kedelaske, som hver for sig har forskellig kemisk signatur. Undersøgelsen har vist, at især zink findes i høje koncentrationer (varierende fra 1,7-7,2 %; gennemsnit 3,5 %). Elfilterasken indeholder den største koncentration af zink og miljøskadelige tungmetaller. Separation af elfilterasken kan derfor give mulighed for at ekstrahere kommercielle grundstoffer og reducere det volumen af flyveasken, som kræver deponering.

MiMa har udviklet en numerisk model, som, på basis af slaggen og flyveaskens kemiske sammensætning, kan estimere sammensætningen af det affald, der afbrændes. Dette værktøj giver mulighed for at monitorere dynamikken i borgernes husholdningsaffald – og giver, når det er færdigudviklet, mulighed for at etablere målrettede kildesorteringskampagner.

Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa) er et rådgivende center under De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS). MiMa formidler viden om mineralske ressourcers værdikæde fra efterforskning og udvinding til forbrug, genanvendelse og udviklingen af nye teknologier.