

Slagge fra affaldsforbrænding

Status og udviklingsmuligheder år 2003

affald danmark

Thomas Astrup & Thomas H. Christensen

Miljø & Ressourcer DTU
Danmarks Tekniske Universitet

September 2003

Forord

Dette statusnotat om slagter fra affaldsforbrænding er udarbejdet i foråret 2003 af Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet i samarbejde med en bred gruppe af aktører på slaggeområdet. Statusnotatet opridses kort den nuværende danske viden om forbrændingsslaggers kvalitet især i forhold til den eksisterende bekendtgørelse nr. 655 om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og de teknologiske muligheder for at forbedre slaggernes kvalitet. Statusnotatet har til formål at sammenfatte, hvad der er opnået af viden de senere år i en række gennemførte udviklingsprojekter, og dermed at etablere en fælles platform for identifikation af behov for og muligheder i yderligere udviklingsmæssige tiltag.

Statusnotatet indeholder dels en kort sammenskrivning af hovedproblemstillingerne vedrørende forbrændingsslagger, og dels resuméer af en række udviklingsprojekter, der er gennemført eller under udførelse; sidstnævnte findes i bilag til statusnotatet. Resuméerne er udarbejdet af de ansvarlige for projekterne og stillet til rådighed for statusarbejdet. På et seminar afholdt på DTU den 20. maj 2003 blev en del af projekterne kort præsenteret og et udkast til statusnotatet fremlagt til diskussion. På basis af seminaret er statusnotatet siden tilrettet og godkendt af styringsgruppen. Statusnotatet er et offentligt tilgængeligt dokument.

Udarbejdelsen af statusnotatet har været initieret af affald danmark og økonomisk støttet af I/S Vestforbrænding, I/S Amagerforbrænding, Elsam A/S Affald og Energi, Århus Kommunale Værker samt I/S Reno-Nord. Styringsgruppen har bestået af Kirsten Bojsen (I/S Vestforbrænding), som har været formand, Uffe Juul Andersen (I/S Amagerforbrænding), Frits Unold (Elsam A/S Affald og Energi) samt Thomas H. Christensen (Miljø & Ressourcer DTU). Civilingeniør Thomas Astrup, Miljø & Ressourcer DTU har været sekretær for styringsgruppen og har udført størstedelen af arbejdet på statusnotatet.

København, september 2003

Kirsten Bojsen
I/S Vestforbrænding
Formand for styringsgruppen

Sammenfatning og konklusion

I forbindelse med forarbejdet til bekendtgørelse nr. 655 af 27. juni 2000 om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder er på slaggeområdet igangsat en række udviklingsprojekter. Formålet med projekterne har været at belyse mulighederne for at forbedre slaggernes egenskaber med henblik på en bedre genanvendelse.

Dette statusnotat samler den viden og de erfaringer, der er fremkommet via 20 større udviklingsprojekter, og relaterer de enkelte projekter til hinanden. Endelig beskrives det faglige stade og de nødvendige udviklingsbehov, der bør gennemføres for at kunne nå en række strategiske mål, nævnes.

De omtalte udviklingsprojekter fokuserer primært på områderne:

- Prøvetagning og karakterisering af slaggeprøver.
- Lagring og modning af slaggen.
- Vask af slaggen med eller uden additiver.
- Udvaskning fra slaggen.
- Størrelsesfraktionering af slaggen.
- Udsortering af metaller.
- Nye muligheder for genanvendelse.
- Anlægs- og driftsparametre.

Udviklingsprojekterne har givet os væsentlig ny viden om slaggekvaliteten generelt og om mulighederne for at kunne forbedre slaggens egenskaber med henblik på en god genanvendelse. Følgende væsentlige konklusioner fra statusarbejdet kan opsummeres:

- Ingen forbrændingsslugger kan indpasses i bekendtgørelsens kategori 1 som følge af faststofindholdet.
- De fleste slugger kan, eventuelt med en forlænget modning, bringes til at overholde udvaskningskravene i kategori 3.
- Slaggen skal i langt de fleste tilfælde behandles intensivt for på alle punkter at overholde kravene til udvaskning i kategori 2. Det er her primært udvaskningen af sulfat samt Cr og Cu, der er problematisk. For visse slugger kan også tungmetaller som As, Cd, Ni og Pb være kritiske. På trods af, at udvaskningen ikke entydigt for alle slugger kan bringes til at overholde kategori 2 kravene, vurderes det i mange tilfælde muligt at kunne opnå en udvaskning på niveau med disse krav. Enkelte slugger kan dog uden egentlig forbedring overholde udvaskningskravene i kategori 2.
- Udviklingsprojekterne har vist en meget stor variabilitet i slaggekvaliteten både mellem anlæg og over tid for det enkelte anlæg. Dette gør, at resultaterne fra de mindre udviklingsprojekter, hvor usikkerhederne ikke er kvantificeret, skal benyttes med forsigtighed og at overførsel af "viden" om én slagge til en anden bør ske velovervejet.
- Den i udviklingsprojekterne mest lovende behandlingsform består med den nuværende viden af en kontrolleret modning af slaggen kombineret med en vask med tilsætning af additiver som HCO_3 eller CO_2 . Det kan dog ikke på

det nuværende stade garanteres, at en given slagge med denne behandling i fuld skala vil kunne bringes til at overholde bekendtgørelsens krav til kategori 2; der er her behov for yderligere demonstration.

- En optimal kombination af modning og slaggevask vil formentligt kræve at der for den enkelte slagge tilvejebringes en bedre faglig forståelse for hvilke mineralfaser der er styrende for opløseligheden.
- Det skønnes at selv ved forbedret modning og slaggevask vil ikke alle anlæg kunne opnå en slagge til genanvendelse efter bekendtgørelsens krav til kategori 2, hvorfor det foreslås at mulighederne for særlige anvendelse med godkendelse efter Miljøbeskyttelsesloven overvejes og udvikles.
- For at lette den administrative behandling af godkendelsessager foreslås det, at der udvikles miljøvurderingsværktøjer specielt rettet på genanvendelse af slagger.
- Det bør overvejes at søge en revision af den nuværende bekendtgørelses regler vedrørende især udvaskningen af Na, Cl og sulfat, da disse krav er restriktive i forhold til de saltmængder, der tilføres grundvandet omkring veje i forbindelse med glatførebekæmpelse. Der bør således være en mere balanceret hensyntagen til den situation hvorunder genanvendelsen finder sted.
- Der er med den nugældende lovgivning kun et beskedent incitament til at opgradere slaggerne fra kategori 3 til 2, idet arealet for genanvendelsen i begge tilfælde kortlægges efter Jordforureningsloven og mulighederne for genanvendelse efter kategori 2 ikke modsvarer de forventede omkostninger ved en opgradering.
- Det foreslås, at udarbejde miljøvurderinger af sandsynlige anvendelsesscenerier; herunder at klarlægge konsekvensen over lang tid af at anvende forskellige slagge kvaliteter og at vurdere den reelle nedsivning af tungmetaller til underliggende jordlag, når der tages højde for f.eks. sorption.
- Det foreslås fortsat, at undersøge mulighederne for en driftsmæssig optimering af forbrændingsprocessen og anlægsopbygningen med henblik på at forbedre slagge kvaliteten. Tilsvarende bør betydningen af affaldets sammensætning fortsat vurderes.

Følgende disponeringsscenerier anses på basis af statusarbejdet for at være de mest sandsynlige fremover:

- **Eksport.** Slaggen eksporteres primært til nyttiggørelse i udlandet. Der er ikke identificeret noget egentlig udviklingsbehov ved denne løsning.
- **Status quo.** Afsætningen foregår som i dag. Det forventes, at der er behov for at udføre relevante miljøvurderinger og udarbejde specifikke miljøvurderingsværktøjer til brug i godkendelsessager.
- **Bedst mulig slagge.** Slaggen oparbejdes og forbehandles bedst muligt ved vask og modning. Udover udviklingsbehovene nævnt ovenfor, vil der specifikt være behov for videreudvikling og demonstration af lovende behandlingsteknologier.
- **Nye anvendelser.** Slaggen forbedres bedst muligt og søges genanvendt ved nye løsninger. Specifikt er der her behov for videreudvikling af disse nye genanvendelsesløsninger.
- **Revision af lovgrundlag.** Som supplement til ovenstående scenarier (ekskl. eksport) søges grundlaget for og fastsættelsen af relevante krav i bekendtgørelsen revideret. Der er her behov for at udføre konkrete vurderinger af miljøkonsekvenser som et led i argumentationen.

Indholdsfortegnelse

1	Indledning.....	7
1.1	Formål.....	7
1.2	Afgrænsning	7
2	Baggrund og status	9
2.1	Slaggemængder.....	9
2.2	Sammensætning og udvaskning.....	10
2.3	Gældende lovgivning.....	12
2.4	Kritiske elementer i slaggen	14
2.5	Eksisterende slaggeoparbejdning.....	14
2.6	Eksisterende slaggegenanvendelse	15
3	Udviklingsprojekter.....	17
3.1	Oversigt.....	17
3.2	Prøvetagning, prøveoparbejdning og karakterisering	19
3.3	Lagring.....	20
3.4	Vask med og uden additiver	21
3.5	Organisk stof.....	23
3.6	Størrelsesfraktionering.....	24
3.7	Udsortering af metal	25
3.8	Potentielle nye anvendelser af slagge	25
3.9	Anlægs- og driftsparametre	26
4	Faglig status og centrale udviklingsområder	29
4.1	Faglig status.....	29
4.2	Udviklingsbehov	32
4.3	Disponeringsscenarier.....	33
5	Referencer	37

Bilag 1: Liste over deltagere i slaggeseminar på Miljø & Ressourcer DTU afholdt d. 20. maj 2003

Bilag 2: Resuméer af udviklingsprojekter

1 Indledning

1.1 Formål

Med ikrafttrædelsen i januar 2001 af bekendtgørelse nr. 655 om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder blev slagger til genanvendelse kategoriseret på en ny måde og der blev som noget nyt fokuseret på slaggernes udvaskningsegenskaber. Dette betød i praksis, at genanvendelsesmulighederne blev indskrænket og kravene til forbehandling øget.

For at imødekomme denne udvikling blev af forbrændingsanlæggene og andre aktører på området i forbindelse med forarbejdet til bekendtgørelsen igangsat en lang række undersøgelser for at udvikle forbehandlingsteknologier og forbedre forståelsen af udvaskningen fra slaggerne. Dette har resulteret i en væsentlig øget viden om mulighederne for at kunne forbedre slagge kvaliteten.

For at kunne udnytte den generede viden bedst muligt har der været behov for at skabe et overblik over denne viden og få belyst de behov der måtte være for forsat at udvikle området. Det er formålet med dette statusnotat at udfylde denne funktion.

1.2 Afgrænsning

Det er til stadighed et ønske fra forbrændingsanlæggene at frembringe den miljømæssigt set bedst mulige slagge kvalitet og opnå en god genanvendelse af slaggen. Arbejdet med at sammenfatte status på området skal primært ses som et udtryk for dette.

Bekendtgørelsens måde at kategorisere slaggerne efter indhold og udvaskningsegenskaber har både op til og efter ikrafttrædelsen været et naturligt udgangspunkt for udviklingsprojekterne. Derfor tager gennemgangen og diskussionen af udviklingsprojekterne i dette statusnotat tilsvarende udgangspunkt i bekendtgørelsens kategorisering. Det er dog ikke et udtryk for at forbrændingsanlæggene ønsker at begrænse udviklingen til bekendtgørelsens rammer.

Statusnotatet tager udgangspunkt i situationen i Danmark. Udenlandske undersøgelser er ikke gennemgået og kun omtalt i enkelte tilfælde, hvor undersøgelsen har været direkte sammenfaldende med det danske udviklingsprojekt.

Ved slagge menes i denne sammenhæng det faste restprodukt som fjernes for enden af risten ved forbrænding af affald. Slaggen kan derved i varierende omfang omfatte ristegennemfald og evt. tilbageført kedelaske. I statusnotatet anvendes begrebet slagge - afhængig af sammenhængen - både om frisk slagge, som den fraføres anlægget, og om en oparbejdet og modnet slagge.

2 Baggrund og status

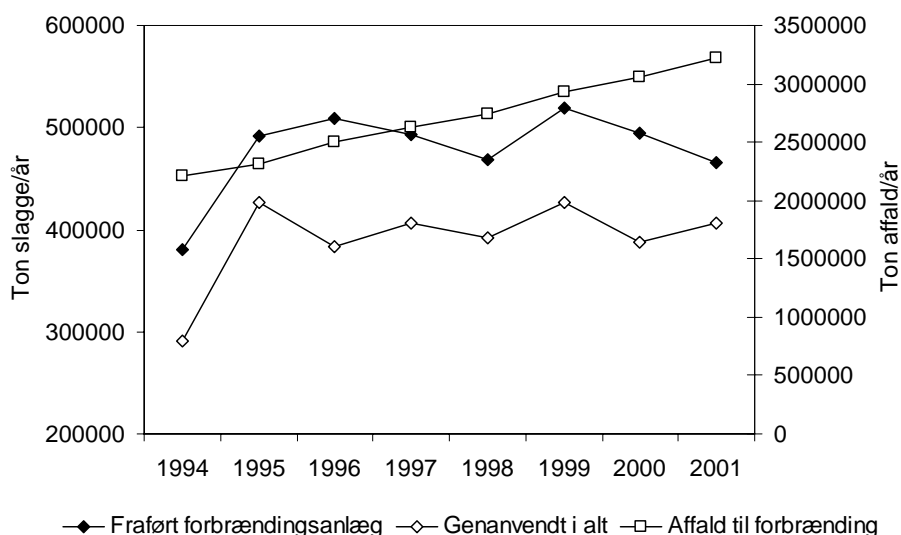
Kapitlet giver en kort beskrivelse af de eksisterende forhold på slaggeområdet indtil gennemførelsen af dette statusarbejde. Bl.a. gennemgås relevant lovgivning på området, og de mest kritiske elementer i slaggen i forhold til udvaskningskravene udpeges. Desuden nævnes forhold omkring udvaskning og faststofindhold samt genanvendelse og slaggeoparbejdning.

2.1 Slaggemængder

Figur 1 viser slaggemængder der er fraført danske forbrændingsanlæg i perioden 1995-2001 baseret på data registreret i Miljøstyrelsens affaldsstatistik (Miljøstyrelsen, 1995-2002). Det ses at der årligt er blevet fraført omkring 500.000 tons slagge fra de danske anlæg. Det skal bemærkes, at slaggemængderne dækker over mængder fraført forbrændingsanlæggene, hvilket medfører en vis "kunstig" variation fra år til år afhængig af afsætningen.

De fraførte slaggemængder modsvares af en jævn vækst i affaldsmængderne modtaget til forbrænding i samme periode; affald til forbrænding ses at stige med ca. 1 mio. tons i perioden fra ca. 2,2 mio. tons årligt til 3,2 mio. tons årligt. Umiddelbart kan dette indikere, at slaggeproduktionen i perioden ikke har været koblet til den generelle vækst i affaldsmængderne, men også at ikke-brændbart affald i stadig mindre grad tilføres forbrændingsanlæggene.

Den årlige genanvendelse af slagge har ligget relativt konstant omkring 400.000 tons pr. år. Den samlede genanvendelse har i perioden været 75 % - 87 % af slaggemængden. I hele perioden har der gennemsnitligt været fraført omkring 180 kg slagge pr. tons indfyret affald.



Figur 1. Affaldsmængder til forbrænding samt slaggemængder fraført forbrændingsanlæggene og genanvendt i perioden 1994 til 2001 (Miljøstyrelsen, 1995-2001).

2.2 Sammensætning og udvaskning

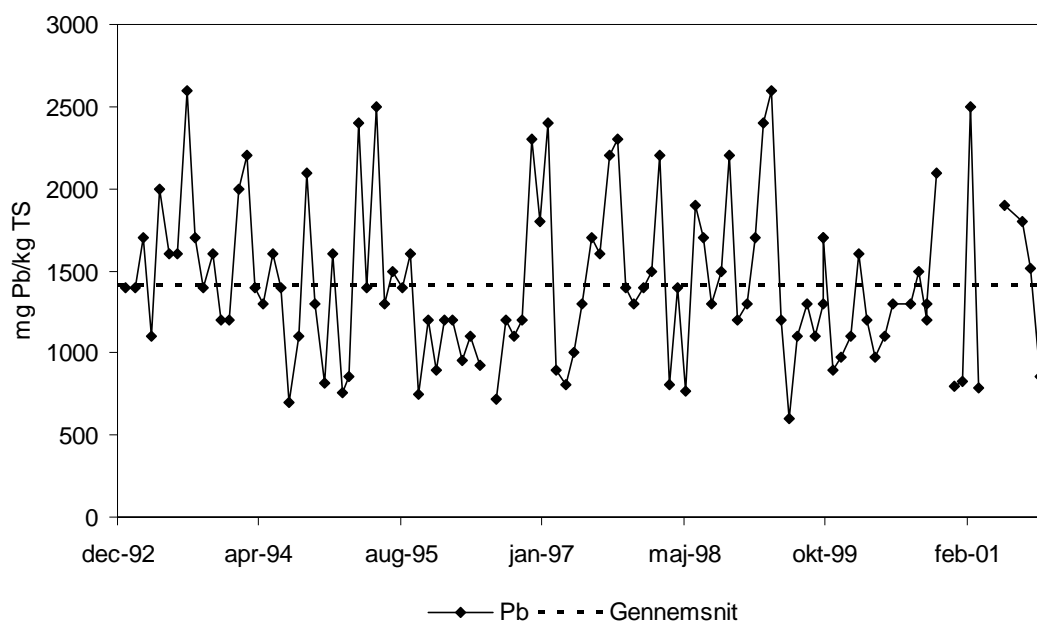
Som udgangspunkt skal det understreges, at slaggens sammensætning - og tilsvarende dens udvaskningsegenskaber - afhænger af en lang række parametre såsom typen og sammensætningen af det indfyrede affald, anlægstypen og de overordnede driftsparametre men også de mere detaljerede driftsforhold på selve risten samt endelig oparbejdningen af slaggen og forholdene under modningen.

Der er således nærmest uendelig mange variationsmuligheder, men alligevel er slaggen som materiale - overordnet set - forholdsvis ensartet. I tabel 1 er som eksempel vist typiske værdier for indholdet af salte og tungmetaller i slaggen fra Vestforbrænding. Det ses, at der er betydelige variationer i værdierne for de enkelte elementer. I figur 2 ses dataene for indholdet af Pb i slaggen fra Vestforbrænding i perioden 1993-2001. Det ses her, at der er en forholdsvis stor variation i perioden. Det skal dog bemærkes, at denne variation både inkluderer den sande variation i Pb-indholdet i slaggen, men også den usikkerhed der er forbundet med prøvetagning og analyse.

Data for udvaskningen fra slagger udviser i lighed med faststofindholdet en stor variation: endda ofte en endnu større variation på det enkelte element end tilfældet er for faststofindholdet. I de fleste tilfælde ses der en betydelig udvaskning af salte som Cl, Na, Ca, K og sulfat, mens der kan ses en mere moderat udvaskning af tungmetallerne med enkelte undtagelser (se eksempel på udvaskningsdata i tabel 2).

Tabel 1. Indhold af udvalgte elementer i slaggen fra Vestforbrænding i prøver udtaget i perioden 1993-2001.

		Interval	Middel	Variationskoefficient, Cv	Antal prøver
pH		9,9 - 11,1	10,6	2 %	107
Alkalinitet	meq/kg	1,8 - 3,8	2,9	17 %	94
Glødetab	%	0,2 - 3,8	1,7	46 %	88
Al	g/kg	45,0 - 56,1	50,3	11 %	21
Ba	g/kg	1,1 - 2,4	1,5	4 %	4
Ca	g/kg	89,1 - 104	94,9	8 %	21
Fe	g/kg	46,7 - 77,8	65,1	21 %	21
K	g/kg	7,4 - 8,6	8,1	7 %	21
Mg	g/kg	10,5 - 11,2	10,7	3 %	21
Mn	g/kg	0,9 - 1,0	0,9	5 %	4
Na	g/kg	33,3 - 39,2	35,4	7 %	4
Cu	g/kg	3,4 - 11,0	5,6	28 %	21
Zn	g/kg	2,0 - 4,8	3,1	29 %	21
Pb	g/kg	0,6 - 2,6	1,4	34 %	106
As	mg/kg	7,6 - 24	14,5	81 %	21
Cd	mg/kg	1,0 - 12,0	2,7	66 %	105
Cr	mg/kg	57 - 352	113,9	81 %	21
Hg	mg/kg	0,01 - 0,62	0,11	74 %	107
Ni	mg/kg	73 - 390	138	57 %	21



Figur 2. Tidsmæssig variation på data for indholdet af Pb i slaggen fra Vestforbrænding i perioden 1993 - 2001.

Ofte er det meget små andele af faststofindholdet, i størrelsesordenen promiller, der ses udvasket i de mest anvendte udvaskningstest, som f.eks. en test med liquid-to-solid ratio (L/S) på 2 l/kg eller en L/S 10 l/kg batchtest (CEN, 2002). Typisk er den for udvaskningen tilgængelige andel maksimalt få procent af faststofindholdet i slaggen. Det skal bemærkes, at der meget sjældent kan observeres nogen meningsfuld sammenhæng mellem tungmetallindholdet og udvaskningen fra en slaggeprøve.

Tabel 2. Udvasning af udvalgte elementer ved L/S 2 jf. bekendtgørelse nr. 655 på 26 prøver af forbrændingsslagge fra Odense Kraftvarmeværk udtaget i perioden 2001-2002. Udvasningen af tungmetallerne er desuden givet som promille af faststofindholdet.

		Interval	Middel	Variationskoefficient, Cv	% af faststofindhold	
					Interval	Middel
pH		8,6 - 11,6	11	8 %	-	-
Ledningsevne	mS/cm	3,99 - 7,09	5,4	18 %	-	-
Cl	mg/kg	780 - 3200	2000	28 %	-	-
SO ₄ ²⁻	mg/kg	240 - 4000	1840	57 %	-	-
Na	mg/kg	240 - 7800	1590	85 %	-	-
Ca	mg/kg	180 - 1500	560	79 %	-	-
As	µg/kg	4 - 28	15	42 %	0,17 - 1,6	0,63
Cd	µg/kg	0,3 - 1	0,4	47 %	0,02 - 0,18	0,10
Cr	µg/kg	20 - 700	190	100 %	0,13 - 7,7	1,9
Cu	µg/kg	500 - 4000	2100	51 %	0,22 - 2,0	0,97
Ni	µg/kg	4,8 - 24	12	38 %	0,07 - 0,35	0,16
Pb	µg/kg	2 - 110	12	190 %	0,0 - 0,16	0,02
Zn	µg/kg	2 - 180	40	95 %	0,0 - 0,07	0,02

Dette skyldes dels at andre faktorer end tilgængeligheden af et metal er styrende for udvaskningen: f.eks. pH, opløselighed af mineraler, kompleksering og sorption. Frigivelsen af et specifikt tungmetal er således påvirket af slaggens sammensætning i øvrigt og dens måde at reagere med vand på. Udvaskningen af salte derimod er oftest kontrolleret af tilgængeligheden og dermed i højere grad - men ikke udelukkende - af faststofindholdet.

Saltene vil ofte udvaskes efter ganske få L/S - i størrelsesordenen 2-10 l/kg, mens tungmetallerne og mere tungtopløselige mineraler, f.eks. silikater, sandsynligvis vil fortsætte med at kunne udvaskes til meget høje L/S-værdier over 1000 l/kg. Slagger har i højere grad end andre forbrændingsrestprodukter en meget porøs struktur og partiklerne udgøres ofte af aggregater, hvorved udvekslingen mellem de indre porer og udvaskningsmediet kan have en forsinkende effekt på udvaskningen.

2.3 Gældende lovgivning

Forarbejde og baggrund

Genanvendelse af slagger er i Danmark reguleret ved Bekendtgørelse nr. 655 af 27. juni 2000 om Genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder (Miljø- og Energiministeriet, 2000).

Forarbejdet til bekendtgørelsen blev indledt i midten af 1990'erne og har omfattet flere vurderinger af mulighederne for at inkludere udvaskningskrav til jord og restprodukter (se bl.a. Hjelmar et al., 1998). Forbrændingsanlæggene har været involveret i processen som sparringspartner for Miljøstyrelsen og har deltaget med repræsentanter fra Affaldsteknisk Samarbejde/Affald Danmark og DAFONET i diverse følgegrupper.

Det endelige grundlag for fastsættelsen af udvaskningskravene er af Miljøstyrelsen beskrevet i Miljøprojekt nr. 467-1999 (Rasmussen og Dahlstrøm, 1999). Overordnet set er der taget udgangspunkt i grundvandskvalitetskriteriet og generelle baggrundskoncentrationer i grundvand, og via modelberegninger for en række anvendelsesscenarioer bestemt opblandingsforholdet mellem perkolat og grundvand. Herfra er beregnet den maksimalt accepterede koncentration i perkolatet.

Genanvendelsesmuligheder

Bygge- og anlægsarbejder opfattes i bekendtgørelsen som etablering af veje, stier, pladser, støjvolde, ramper, diger, dæmninger, jernbaneunderbygning, ledningsgrave, terrænregulering, anlæg på søterritoriet samt opfyldning i gulve og underfundamenter. Al anvendelse der ikke er omfattet af bekendtgørelsen skal ske i henhold til Miljøbeskyttelsesloven (Miljø- og Energiministeriet, 2001).

Bekendtgørelsen opstiller tre kategorier som jord og slagge grupperes efter afhængig af specifikke krav til faststofindhold og udvaskning, se tabel 3. Slagger kan ikke indpasses kategori 1 pga. af faststofindholdet og kan derved ikke uden tilladelse genanvendes til bygge- og anlægsarbejderne omfattet af bekendtgørelsen.

I kategori 2 er der fastsat begrænsninger på lagtykkelsen af slaggelag under veje, stier og pladser m.v. samt krav om belægningen på eller opbygning af volde, ramper osv.

I kategori 3 er det primært tilladt at anvende slaggen under veje med tæt belægning samt under stier og i ledningsgrave med fast belægning. Se tabel 4 for en opsummering af genanvendelsesmulighederne.

Slagger i kategori 2 og 3 skal i alle tilfælde placeres over højeste grundvandspejl og mindst 30 m fra nærmeste drikkevandsboring. Ved genanvendelse kan slagger oplagres på stedet uden overdækning i op til 4 uger fra modtagelsen og med tæt overdækning i op til 6 måneder fra modtagelsen.

Tabel 3. Krav til faststofindhold og udvaskning for jord og slagge til genanvendelse (Miljø- og Energiministeriet, 2000).

		Kategori 1	Kategori 2	Kategori 3
Faststofindhold				
As	mg/kg	0 - 20	> 20	
Pb	mg/kg	0 - 40	> 40	
Cd	mg/kg	0 - 0,5	> 0,5	
Cr-total	mg/kg	0 - 500	> 500	
Cr(VI)	mg/kg	0 - 20	> 20	
Cu	mg/kg	0 - 500	> 500	
Hg	mg/kg	0 - 1	> 1	
Ni	mg/kg	0 - 30	> 30	
Zn	mg/kg	0 - 500	> 500	
Udvaskning				
Cl	mg/l	0 - 150	150 - 3.000	
SO ₄ ²⁻	mg/l	0 - 250	250 - 4.000	
Na	mg/l	0 - 100	100 - 1.500	
As	µg/l	0 - 8	8 - 50	
Ba	µg/l	0 - 300	300 - 400	
Pb	µg/l	0 - 10	10 - 100	
Cd	µg/l	0 - 2	2 - 40	
Cr	µg/l	0 - 10	10 - 500	
Cu	µg/l	0 - 45	45 - 2.000	
Hg	µg/l	0 - 0,1	0,1 - 1	
Mn	µg/l	0 - 150	150 - 1.000	
Ni	µg/l	0 - 10	10 - 70	
Zn	µg/l	0 - 100	100 - 1.500	

Prøvetagning og testning

Bekendtgørelsen angiver, at der skal udtages mindst 50 delprøver á 2 kg hver, som sammenstikkes til en prøve på 100 kg. Der er ikke specificeret yderligere krav til prøvetagningsmetoden. Prøven sigtes ved en soldstørrelse på 45 mm; større partikler skal nedknuses og tilføres sigten igen. Det er tilladt at fjerne uformalbart materiale blot mængden af dette registreres. Den sigtede prøve riffelneddeles til 5 kg, som nedknuses til under 4 mm. Den nedknuste prøve riffelneddeles videre til 2 prøver, hvoraf den ene anvendes til karakterisering af faststofindholdet og den an-

Tabel 4. Tilladte genanvendelsesmuligheder i kategori 2 og 3 opsummeret.

	Kategori 2	Kategori 3
Veje	Fast belægning ¹⁾ , maks. 1 m lag	Tæt belægning ²⁾ , maks. 1 m lag
Stier	Fast belægning, maks. 0,3 m lag	Fast belægning, maks. 0,3 m lag
Pladser	Fast belægning, maks. 1 m lag ³⁾	-
Ledningsgrave	Fast belægning	Fast belægning
Ramper	Fast belægning, maks. 4 m lag	-
Støjvolde	Fast belægning, maks. 5 m lag	-
Fundamenter og gulve	Ingen indeklimaproblemer, maks. 1 m lag under bygninger	Ingen indeklimaproblemer, maks. 1 m lag under bygninger

1) Fast belægning: asfalt, beton, fliser samt min. 1 m kategori 1 jord.

2) Tæt belægning: asfalt, beton etc. samt bortledning af overfladevand.

3) For pladser har der i en overgangsperiode været lempeligere krav til overfladebelægningen samt til L/S 2 udvaskningskravene for Cl (1,5 g/l), Na (1 g/l) og sulfat (2 g/l).

den til udvaskningstest.

Faststofindholdet bestemmes efter oplukning jævnfør DS 259 og TOC bestemmes efter prEN 13137. Batchudvaskning sker ved L/S 2 i henhold til prEN 12457-3 (CEN, 2002).

Øvrige bestemmelser

Udover en regulering af genanvendelsen angiver bekendtgørelsen desuden krav til producenten om at deklarere slaggen med oplysninger om produktionssted, kategorien af slaggen, eventuel rensningsproces samt bl.a. metoden for prøvetagning.

Genanvendelse af slagge kræver jf. bekendtgørelsen en anmeldelse til amtet. Amtsrådet har mulighed for at give dispensation fra begrænsningerne til genanvendelsesmulighederne i kategori 2 og 3 jf. bekendtgørelsen (se tabel 4). Hvis det anses for miljømæssigt forsvarligt kan amtet således tillade anvendelse af kategori 3 slagge til anvendelser, der ellers kun er tilladt i kategori 2.

Amtet er forpligtet til at lade genanvendelsen indgå i amtets kortlægning efter jordforureningsloven (Lov nr. 370 af 2. juni 1999 om Forurenet jord). Da slagge i praksis anses for at kunne have skadelig virkning på miljøet, medfører dette at arealet for genanvendelsen registreres i henhold til Jordforureningsloven. I praksis betyder dette bl.a., at de fremtidige muligheder for anvendelse af arealet indskrænkes og at amtet kan meddele bestemte vilkår i forbindelse med en tilladelse til bygge- og anlægsarbejder på arealet.

2.4 Kritiske elementer i slaggen

I praksis er det slaggens udvaskningsegenskaber, der er bestemmende for hvilken kategori slaggen kan placeres i, idet der reelt ikke er krav til faststofindholdet i kategori 2 og 3 (se tabel 3).

Som tidligere anført er der store variationer i slagge kvaliteten, hvilket betyder at forskellige elementer i udvaskningstesten vil være kritiske for de forskellige forbrændingsanlæg. Der er dog en række fællestræk for slagge som helhed:

- Ingen slagge falder inden for kategori 1 som følge af faststofindholdet.
- Ingen eller kun i ganske få tilfælde opfylder slaggen kategori 2 kravene med hensyn til udvaskningen. I nogle tilfælde kan kategori 2 kravene overholdes med de lempede saltkrav.
- De fleste slagge kan med den nuværende oparbejdning genanvendes efter kategori 3; evt. efter en udvidet modning og lagring.

Situationen er således for en væsentlig del af de danske slagge, at genanvendelsesmulighederne er begrænset til kategori 3. I de fleste tilfælde vil en decideret forbehandling udover den nuværende oparbejdning være nødvendig, hvis genanvendelsen skal ske efter kategori 2. Dette vil kræve en mere grundlæggende forbedring af udvaskningsegenskaberne. I den forbindelse er udvaskningen af saltene (sulfat, Cl og Na) samt tungmetallerne Cu, Cr og evt. As, Ni, Cd og Pb ofte problematiske (se tabel 5 for en oversigt over 10 jysk/fynske anlæg).

2.5 Eksisterende slaggeoparbejdning

Den eksisterende slaggeoparbejdning består overordnet af to processer: oplagring og sortering. Typisk er oplagringen inddelt i to dele, således at der er en primær oplagring á ca. 2-8 uger inden sortering og en sekundær oplagring efter sortering indtil slaggen kan afsættes til genanvendelse. Nogle forbrændingsanlæg foretager en magnetisk separation af slaggen umiddelbart inden slaggen fraføres anlægget,

Tabel 5. Udvaskning (L/S 2) af udvalgte elementer i 10 slaggeprøver fra 10 jysk-fynske anlæg og angivelse af antal prøver i hver kategori jf. bekendtgørelsen (fra Sander, 2002).

		Variationsområde	Antal prøver:		
			Kategori 2	Kategori 3	Udenfor Kategori ¹⁾
Al	mg/l	<1-200			
Ca	mg/l	100-630			
Cl	mg/l	270-2600	0	10	0
K	mg/l	100-820			
Mg	mg/l	<0,05-0,61			
Na	mg/l	170-1600	0	9	1
SO ₄ ²⁻	mg/l	130-2100	2	8	0
TOC	mg/l	10-156			
As	µg/l	<5-17	3	7	0
Cd	µg/l	<0,3	10	0	0
Cr	µg/l	3-1600	2	6	2
Cu	µg/l	24-3300	1	5	4
Ni	µg/l	<5-13	7	3	0
Pb	µg/l	1-1300	8	1	1
Zn	µg/l	<10-79	10	0	0

1) Udvaskningen af det pågældende element er over kravet til kategori 3.

mens andre fraseparerer magnetiske genstande i forbindelse med en sigtning af slaggen.

Efter den primære oplagring tilføres slaggen et sorteringsanlæg, hvor slaggen sigtes ved en soldstørrelse på typisk 50 mm. Herved fremkommer to størrelsesfraktioner, hvoraf den fine fraktion udgør omkring 90 - 95 % på vægtbasis. Begge fraktioner frasepareres herefter magnetisk materiale. Den ikke-magnetiske del af den fine fraktion udgør den harpede slagge (ca. 85 %). Fra den ikke-magnetiske del af den grove fraktion fjernes undertiden visse metalgenstande (kobberspøler m.v.) samt større slaggeklumper, der kan nedknuses og tilføres sorteringsanlægget igen. I nogle tilfælde udsorteres uforbrændt papir og plast i forbindelse med sigtningen.

Jernskrot og evt. kobber og aluminium frasorteret slaggen genanvendes efterfølgende, mens en sigterest fra den grove fraktion deponeres. Evt. udsorteret papir og plast tilbageføres til forbrændingsanlægget. Den harpede slagge modnes efterfølgende ved oplagring indtil genanvendelse. Denne sekundære oplagring varer typisk mindst 2 - 4 måneder afhængig af den primære oplagring og mulighederne for afsætning af slaggen.

For karakterisering af slaggen i henhold til bekendtgørelsen organiseres den mængdemæssigt i partier á 5000 tons. Der tages prøver af slaggepartiet efter modning. Nogle oparbejdningsanlæg udtager delprøverne manuelt fra slaggebunken ved hjælp af gummiged, og andre maskinelt ved et transportbånd. Maskinel udtagning forudsætter, at slaggen overføres til et transportbånd, hvilket nemmest gøres i forbindelse med sorteringen. Ved prøvetagning på dette tidspunkt vil den primære oplagring ofte være så lang som mulig for at opnå en tilstrækkelig modning af slaggen inden prøvetagningen.

2.6 Eksisterende slaggegenanvendelse

Anlægstekniske krav til slagge kvalitet

Der har i Danmark og visse dele af Europa været en betydelig tradition for genanvendelse af slagge til anlæggelse af veje, pladser og stier. Dette beror primært på,

at de materialetekniske egenskaber ved en modnet slagge er tilstrækkeligt gode til disse anvendelser.

Som udgangspunkt skal slagge anvendt til anlægsarbejder opfylde de samme krav som findes til jomfruelige materialer, dog er der i nogle tilfælde udarbejdet supplerende forskrifter, f.eks. i forbindelse med vejbygning (Pihl og Milvang-Jensen, 2002).

Af materialekrav til slagge kan f.eks. nævnes krav til partikelstørrelser, vandindholdet og renheden (andelen af uforbrændt eller dårligt forbrændt organisk affald). Det primære ønske er naturligvis at anvende et materiale med tilpas formstabilitet, bæreevne, frostbestandighed, drænevne osv. I forbindelse med indbygningen i bundsikringslag tilrådes ekstra opmærksomhed på komprimeringen af lagene (Pihl og Milvang-Jensen, 2002). Det skal understreges, at brug af slagge funktionsmæssigt er fuldt på højde med jomfruelige materialer når blot de rette specifikationer og arbejdsprocesser anvendes.

Eksempler på genanvendelse

Genanvendelsen af slagge er typisk foregået i anlægsarbejder som f.eks.:

- Bundsikring ved anlæggelse af parkeringspladser og veje.
- Fyld ved havneudvidelser, ramper, støjvolde og dæmninger.
- Opbygning af fundamenter under bygninger.
- Mindre projekter som små parkeringspladser, stier, private småveje osv.

De mindre projekter kunne f.eks. omfatte nogle få læs slagge. Den mængdemæssige fordeling mellem de små projekter og større projekter har været afhængig af afsætningsmulighederne samt organiseringen af afsætningen og distributionen af slaggen fra de enkelte anlæg.

Ved ikrafttræden af den nugældende bekendtgørelse er antallet af mindre projekter med genanvendelse på private arealer mindsket betydeligt. Dette skyldes primært, at anvendelsen af slagge uanset kategori 2 eller 3 medfører registrering af grunden jf. Jordforureningsloven.

Den nuværende genanvendelse sker således primært til projekter, hvor ejeren af arealet for genanvendelsen ikke påvirkes af en registrering eller til projekter der under alle omstændigheder skal godkendes efter Miljøbeskyttelsesloven. Det er således ofte lidt større projekter som f.eks. anlæggelse af pladser, hvor slagge i dag genanvendes. Dette har medført et øget behov for oplagringskapacitet, idet afsætningen af slaggen er mere ujævn end tidligere.

3 Udviklingsprojekter

Kapitlet giver en oversigt over de gennemførte udviklingsprojekter og sammenfatter - på tværs af de enkelte projekter - den opnåede viden.

3.1 Oversigt

Undersøgte problemstillinger

Der er identificeret 20 større danske udviklingsprojekter gennemført eller iværksat i perioden 1999 - 2003; et enkelt projekt blev dog gennemført i 1997. Hensigten med projekterne har dels været at opnå en øget forståelse af mulighederne for forbedring af slaggens kvalitet med henblik på øget genanvendelse og dels specifikt at optimere på udviklede behandlingsprocesser. Tabel 6 giver en oversigt over projekterne.

Den væsentligste fokus i projekterne er givet udvaskningen af de elementer, der er kritiske i forhold til genanvendelse af slaggen i henhold til Miljø- og Energinisteriets bekendtgørelse nr. 655; i særlig grad sulfat, natrium, klorid, krom og kobber. Det har været ønsket at forstå de mekanismer, der kontrollerer udvaskningen af disse elementer og derefter udvikle metoder til at begrænse udvaskningen fra den færdige slagge.

Udover udvaskningen er der undersøgt betydningen af prøvetagning og -oparbejdning, muligheder for at forbedre slaggens fysiske karakteristika ved frase-

Tabel 6. Oversigt over større danske slaggeprojekter i perioden 1997 - 2003. Den alfabetiske angivelse svarer til præsentationen i bilagene.

A	JAWA-1: Sygehusaffald og slaggens hygiejne kvalitet på I/S Amagerforbrænding
B	JAWA-2: Sempel slaggevaske med og uden tilsætning af natriumbikarbonat
C	Nøjagtighed ved prøvetagning af slagge fra affaldsfyret forbrændingsanlæg
D	Udvikling i udvaskning fra lagret råslagge fra I/S Vestforbrænding
E	Demonstrationsplads for slaggeanvendelse
F	Ferrox-stabilisering af slagge fra affaldsforbrændingsanlæg
G	C-RES Restprodukt-database med data for slagge fra affaldsforbrændingsanlæg
H	Stabilisering af slagge fra affaldsforbrænding ved vask, separation og lagring
I	Teknisk og økonomisk vurdering af anlæg for udsortering af ikke jernmetaller
J	Mulighed for vask af slagge fra affaldsforbrænding før genanvendelse
K	Kornstørrelsessortering af slagge
L	Kvalitet af slagge fra forbrændingsanlæg
M	Livscyklusvurdering af slaggegenanvendelse i vejbygning
N	Modellering af udvaskning fra slagge
O	Efterbehandling af slagge
P	Separation af affaldsforbrændingsslagge for optimeret udnyttelse af slaggefraktioner
Q	Udvaskning af kobber og organisk stof fra slagge
R	Udvaskning fra slagge i cement-stabiliserede bundsikrings- og bærelag
S	Marin anvendelse af slagge fra affaldsforbrændingsanlæg
T	Kvalitetsforbedring gennem lagring og vask med CO ₂ i slaggeslukningen

Tabel 7. Oversigt over undersøgte emner i de enkelte slaggeprojekter (A-T).

Slaggeprojekter:	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
Variabilitet/inhomogenitet		x	x	x			x	x												
Prøvetagning/oparbejdning			x																	
Analyseusikkerhed			x																	
Kornstørrelse: totalindhold										x	x			x						
Kornstørrelse: udvaskning			x					x		x	x			x	x					
Udvaskningstests: type							x												x	
Nedknusning								x							x					
Lagring, modning af slagge		x		x				x		x					x		x			x
Intern slaggevask: slaggebad		x								x										x
Ekstern slaggevask								x		x					x					
Vådseparering: kornstørrelse										x	x				x					
Tilsætning af NaHCO ₃		x						x							x					
Tilsætning af CO ₂								x												x
Tilsætning af Fe-oxider						x														
Organisk stof								x							x		x			
Pilot/fuldskalaudvaskning					x									x						
Anlægs- og driftsparametre										x		x			x					
Slaggers hygiejnekvalitet	x																			
Udsortering af metaller									x							x				
Nye anvendelser																			x	
LCA-betragtninger														x						

parering af fine kornstørrelser, muligheder for udsortering af ikke-magnetiske metaller fra slaggen samt endelig potentielle fremtidige genanvendelsesmuligheder for slaggen.

Tabel 7 opsummerer væsentlige faktorer, som er undersøgt i de enkelte udviklingsprojekter med henblik på at forbedre slaggens udvaskningsegenskaber. Som det ses af tabellen har en primær indgang til at forbedre udvaskningen været at undersøge muligheden for at fjerne problemstofferne ved at vaske slaggen, ligesom effekten af at tilsætte forskellige additiver under vaskeprocessen er blevet undersøgt. Desuden har betydningen af specifikke kornstørrelsesfraktioner for den samlede udvaskning været undersøgt; her specielt muligheden for at fjerne den fine fraktion. Endelig har problemstillingen omkring slaggens inhomogenitet og tidsmæssige variationer på sammensætningen været adresseret i flere undersøgelser.

Det skal bemærkes, at man i udlandet, f.eks. Japan, har tradition for termisk behandling af forbrændingsrestprodukter. Dette er mest anvendt på røggasrensingsprodukter, men termisk behandling af slagge kan også forekomme. Denne behandlingsform er ikke undersøgt i de danske udviklingsprojekter, idet metoden er meget energikrævende og vil i Danmark næppe kunne anses for at være miljøøkonomisk rentabel sammenlignet med de undersøgte behandlingsformer som vask og modning.

Væsentlige sammenhænge

I tabel 8 er sammenstillet de overordnede behandlingsmuligheder, som er blevet undersøgt, og kvalitativt angivet de sammenhænge til udvaskningen af de mest kritiske elementer. Tabellen giver således et overblik over de forskellige behandlingsprocessers evne til at påvirke udvaskningen af specifikke elementer i slaggen som f.eks. Cr og sulfat.

Det ses af tabellen, at flest projekter har vist en klar forbedring ved vask af slaggen uanset variationen i de enkelte slaggers sammensætning. Forbedringen

gælder både salte og tungmetaller. Udvaskningsegenskaberne kan yderligere forbedres ved tilsætning af additiver, men effekten afhænger i højere grad af slaggens specifikke sammensætning og karakteristika i øvrigt. Det skal dog bemærkes, at færre undersøgelser omfatter effekten af additiver sammenlignet med undersøgelser af effekten ved vask alene. Lagring ses desuden at have en tydelig dokumenteret forbedrende effekt på udvaskningen, dog med undtagelse af sulfat der opnår en øget udvaskning ved lagring. Fraseparering af de fine partikler ses endvidere at have en effekt; primært på sulfat, men formentlig også på tungmetaller.

I de følgende afsnit vil de væsentligste aspekter af udviklingsprojekterne blive gennemgået nærmere og de primære resultater præsenteret.

3.2 Prøvetagning, prøveopbehandling og karakterisering

Problemstillinger

En væsentlig forudsætning for at kunne karakterisere den løbende produktion af slagge er muligheden for at udtage repræsentative delprøver af det samlede slaggeparti. Dette har betydning dels i relation til at afgøre om slaggepartiet overholder kravværdierne i bekendtgørelsen eller ej og dels i relation til udviklingsprojekter, hvor det ønskes at kvantificere specifikke effekter af en given behandling.

Som det ses af gennemgangen i kapitel 2 er slagge fra affaldsforbrænding et yderst inhomogent materiale både fysisk og kemisk. Inhomogeniteten omfatter dels variationer inden for et specifikt slaggeparti og dels variationer over tid og mellem forskellige anlæg. Dette medfører, at selve prøveudtagningen og den efterfølgende opbehandling kræver særlig opmærksomhed.

Erfaringer

Møller og Pedersen (2001) har undersøgt usikkerhederne forbundet med manuel prøvetagning, mekanisk prøvetagning og prøvetagning ved "stopped belt" metoden. Ligeledes er betydningen af prøveopbehandling undersøgt, herunder nedknusning og neddeling af prøven efter udtagning. Endelig har Pedersen og Møller (2003) udtaget en mængde delprøver af slagge fra 3 forskellige anlæg ved hjælp af "stopped belt" metoden. Flere andre udviklingsprojekter har i større eller mindre grad adresseret inhomogeniteten af slaggen og variationen i analyseresultater.

Det er generelt fundet, at der er meget betydelige variationer på resultaterne - både mht. udvaskning og mht. sammensætning af slaggen - fra analyser af "ens" slaggeprøver. Dette gælder, både når prøverne er udtaget manuelt og når de er udtaget ved "stopped belt" metoden.

Det observeres typisk, at den relative usikkerhed på bestemmelsen af udvaskning af både salte og tungmetaller specificeret i bekendtgørelsen er af størrelsesordenen 20 % - 100 % (Møller og Pedersen, 2001; Pedersen og Møller, 2003; Skaarup, 2001; Mogensen, Projekt B). Der ses en betydelig variation på f.eks. sulfatbestemmelser, men størst usikkerhed findes på bestemmelse af Cu-udvaskningen. Dette skyldes formentlig kobbers binding til organisk stof og ændringer ved lagring af slaggen (Møller og Pedersen, 2001). Graden af lagring og tilrettelæggelsen af prøvetagningen har sandsynligvis derfor stor betydning ved bestemmelse af Cu-udvaskningen. Det skal bemærkes, at Skaarup (2001) ved manuel prøvetagning fandt en relativ god overensstemmelse på Cu-indholdet ved 9 prøver (relativ usikkerhed under ca. 30 %).

Boddum og Skaarup (2002) finder, at den relative usikkerhed på selve udvaskningstesten er af størrelsesordenen 5 % på bestemmelsen af saltudvaskningen. Analyseusikkerheden kan ofte sættes til 5 % - 10 %. Den samlede usikkerhed på

bestemmelsen mindskes væsentligt, hvis prøverne nedknuses før neddeling (Møller og Pedersen, 2001).

Konklusion

Ved karakterisering af slaggen i henhold til bekendtgørelsens kravværdier er det væsentligt at gøre sig klart, at der kan være betydelige usikkerheder knyttet til bestemmelsen, og at prøvetagningen og -oparbejdningen kan spille en central rolle for størrelsen af denne usikkerhed. I denne sammenhæng vil det være nyttigt i højere grad end det er tilfældet nu at få kvantificeret den fejl - eller usikkerhed - der i forhold til en referencemetode introduceres ved de mest anvendte metoder til prøvetagning og -oparbejdning.

Den store usikkerhed knyttet til prøvetagning af slagge er væsentlig at erkende også i forbindelse med udviklingsprojekter, hvor der med meget begrænsede ressourcer prøvetages af en større bunke slagge for eksempel før og efter en behandling eller modning.

3.3 Lagring

Problemstillinger

Traditionelt har slaggen været modnet ved lagring i en eller flere måneder, da erfaringen viser, at de materialetekniske egenskaber af betydning for genanvendelsen (f.eks. ekspansion) forbedres væsentligt ved lagring. Selve lagringen ønskes optimeret med henblik på at minimere tidsforbruget men samtidig at opnå den bedst mulige slagge kvalitet. Der er derfor behov for mere detaljeret at forstå de ældningsprocesser, der foregår i en slaggebunke under lagringen for at kunne optimere håndteringen af slaggen.

Graden af modning varierer formentlig betydeligt internt i en enkelt slaggebunke som følge af stedmæssige forskelle i udvaskning og CO₂ optagelse. Dette forhold har betydning for karakterisering, herunder prøvetagningen, af slaggebunken.

Erfaringer

Generelt observeres det, at udvaskningsegenskaberne forbedres ved lagringen. Dette skyldes flere forhold:

- Ændring af de geokemiske egenskaber ved optagelse af CO₂ (karbonatisering) og fald i pH.
- Opløsning af mineraler og udfældning af nye sekundære mineraler.
- Binding af opløste tungmetaller til slaggematrixen ved sorption.
- Fjernelse eller omdannelse af tilgængelige organiske ligander f.eks. ved fordampning, udvaskning eller ændret binding til slaggematrixen.
- Udvasning af letopløselige salte.

Skaarup (2001) undersøgte udvaskningen fra en enkelt slaggebunke under lagring i op til 183 dage og fandt, at ældningen havde en markant effekt på Cu-udvaskningen, ligesom det blev observeret, at der var sket en nedvaskning til dybere lag i slaggebunken. For de øvrige tungmetaller sås ingen klar tendens muligvis bortset fra Ni-udvaskningen, der synes at falde med lagringen. Mogensen (Projekt B) ser, at udvaskningen af Cu, Cr, Pb, Cl og Na mindskes ved lagring, mens udvaskningen af sulfat øges. Boddum og Skaarup (2002) observerer tilsvarende, at sulfatudvaskningen øges ved lagring, mens Na og Cl reduceres. Dette er også tilfældet hos Sander (2002), der desuden ser, at Cu-udvaskningen mindskes. Crillesen

og Hjelmar (Projekt T) finder ligeledes, at lagringen medfører en reduceret Cu-udvaskning, men også at udvaskningen af Zn mindskes. Derimod ses ingen effekt på Pb. Grøn (Projekt Q) observerer desuden, at Cu-udvaskningen er reduceret i modnet slagge.

Det er givet, at slaggen kan undergå geokemiske forandringer under lagringen over nogle måneder (op til 6-8 måneder er undersøgt), og at disse forandringer har en betydelig effekt på slaggens udvaskningsegenskaber. Det er generelt erfaringen, at lagringen af slagge i 3-6 måneder medfører mindre udvaskning af salte og tungmetaller, dog med undtagelse af sulfat hvor lagringen har den modsatte effekt. I visse tilfælde lagres slagge helt op til omkring 12 måneder for at reducere udvaskningen af specielt Cu tilstrækkeligt.

Konklusion

Der er ikke i udviklingsprojekterne fremkommet nogen detaljeret forståelse af de geokemiske ældningsprocesser, der har betydning under lagringen, men snarere blevet fastlagt nogle overordnede sammenhænge til udvaskningen af specifikke elementer. Der er i udlandet lavet flere mere detaljerede undersøgelser vedrørende ældningsprocesser i slagge (se f.eks. omtale i Sabbas et al., 2003), men der mangler en mere anvendelsesorienteret gennemgang af ældningsprocesserne og mulighederne for at optimere lagringen under danske forhold. Herunder måske især hvorledes lagringen påvirker mængden af opløseligt organisk stof, der er vist at påvirke udvaskningen af Cu, men muligvis også påvirker andre tungmetaller.

3.4 Vask med og uden additiver

Problemstillinger

Ud fra et ønske om at forbedre slaggens egenskaber og mulighederne for genanvendelse har man vurderet at vask er den mest realistiske vej ud fra et ønske om at minimere energi- og ressourceforbruget ved behandlingen. I mange projekter har man til vaskprocessen tilsat additiverne NaHCO_3 og/eller CO_2 for at øge fjernelser af sulfat. I et enkelt projekt er anvendt Fe(II)-oxider til binding af tungmetallerne. Fokus har i alle tilfælde været på at forbedre slaggens udvaskningsegenskaber.

Det har vist sig, at en simpel vask - f.eks. ved at øge vandforbruget i slaggebadet - ofte ikke er tilstrækkeligt til at forbedre udvaskningsegenskaberne. Det er derfor i flere projekter blevet undersøgt, hvorvidt tilsætning af additiver under vasken kan have en positiv effekt på udvaskningen efterfølgende. Det primære fokus har været på at forbedre udvaskningen af sulfat samt Cr og Cu.

Erfaringer

En række projekter har undersøgt slaggevaske enten i laboratoriet (Boddum og Skaarup, 2002; Sander, 2002), i selve slaggebadet (Mogensen, Projekt B; Boddum og Skaarup, 2000; Crillesen og Hjelmar, Projekt T) eller i pilotskala i et vaskeanlæg (Boddum og Skaarup, 2000). Mogensen (Projekt B), Boddum og Skaarup (2002), Sander (2002), Crillesen og Hjelmar (Projekt T) samt Lundtorp (2002) har endvidere undersøgt effekten ved tilsætning af additiver (NaHCO_3 , CO_2 og Fe(II)).

Overordnet set - og på tværs af projekterne - kan det tydeligt observeres, at vask af slaggen har en forbedrende effekt på udvaskningsegenskaberne efterfølgende. Dette gælder primært for saltene (sulfat, Cl og Na) samt Cu og til en vis grad Cr og Pb.

Der er ikke den samme overordnede, entydige tendens med hensyn til effekten af additiverne. I projekterne der undersøger vask med NaHCO_3 og CO_2 (Mo-

gensen, Projekt B; Boddum og Skaarup, 2002; Sander, 2002; Crillesen og Hjelmar, Projekt T) konkluderes det generelt, at en forbedrende effekt på udvaskningen af Cl og Na formentlig skyldes simpel vask i processen og ikke tilsætning af additiv.

Ved tilsætning af NaHCO_3 og/eller CO_2 er der generelt observeret en øget opløselighed af sulfat i procesvandet som følge af tilsætningen af karbonat. Men i de efterfølgende udvaskningstests er der kun i få tilfælde set en varig effekt. Det vurderes, at sulfat i den ikke-behandlede slagge er bundet i kombinerede Ca- og Al-forbindelser, idet der ses en øget frigivelse af disse elementer ved vaskeprocessen (Sander, 2002). Den generelle opfattelse er, at sulfat efter vask med eller uden additiver er kontrolleret af opløseligheden af gips, hvorfor der ikke ses nogen entydig effekt af behandlingen.

Tungmetallerne - primært Cr og Cu, men også Pb - ses i visse tilfælde at få en reduceret udvaskning som følge af additiverne, men det er ikke altid klart hvorvidt reduktionen kan skyldes en pH-effekt eller den integrerede vask af slaggen. Sander (2002) samt Boddum og Skaarup (2002) fandt, at behandling af modnet slagge gav en bedre udvaskning relativt til samme behandling af en frisk slagge.

Stabilisering med Fe(II) viser primært en effekt på Pb, hvilket dels skyldes en pH-sænkning og dels tilførslen af jernoxider. Også Cu, Zn og Cr opnår forbedrede udvaskningsegenskaber.

Samlet set kan erfaringerne med vask og effekten af additiverne opsummeres som følgende:

- Den største effekt opnås ved vask af slaggen; både for salte og tungmetaller.
- Der kan ofte opnås en yderligere - men mindre - effekt ved tilsætning af NaHCO_3 eller CO_2 . Dette gælder både salte og tungmetaller, men effekten varierer betydeligt mellem de enkelte forsøg og mellem projekterne.
- Stabilisering med Fe(II) adskiller sig primært ved en effektiv binding af Pb.
- Vask med og uden additiver giver på modnet slagge - isoleret set - bedre udvaskningsegenskaber.

Konklusion

Der er i projekterne undersøgt en række forskellige vaskeprocesser med og uden tilsætning af additiver, men der er ikke fremkommet nogen enkeltstående og robust løsning til forbedring af slaggen generelt, således at kategori 2 kravene i bekendtgørelsen kan overholdes. Det er dog vist, at der kan opnås betydelige forbedringer på den enkelte slagge, og at det for det enkelte element er muligt at opnå en udvaskning meget tæt på eller lige under kategori 2 kravene. De primære problemer knytter sig til saltene - fortrinsvis sulfat - samt Cr og Cu.

Det ses tydeligt af projekterne, at der er en meget stor variation på de anvendte slagger - både internt i enkelte projekter, men også fra projekt til projekt. Dette gør det vanskeligt entydigt og på tværs af forskellige slagger at fastslå den ønskede sammenhæng mellem behandling og effekt. Kun enkelte af projekterne har forsøgt at kvantificere hvorvidt en effekt af additiverne er signifikant i forhold til en simpel vask. Slaggerne, der anvendes i de fleste projekter, er ofte kun karakteriseret ved meget få parametre, hvilket gør det vanskeligt at konkludere på tværs af projekterne og isolere den udslagsgivende faktor i forsøgene. En vigtig pointe ved fremtidige demonstrationsprojekter vil være at medtage en mere grundlæggende karakterisering af den undersøgte slagge. Det vil formentlig være nødvendigt ved storskala implementering af vaskeprocesser at foretage et indledende feasibility-study for at tilrette processen til den specifikke slagge.

Det må endvidere erkendes, at forståelsen af de geokemiske forandringer slaggen undergår i forbindelse med vaskeprocesserne ikke er tilstrækkelig til at

kunne løse problemet med udvaskningen af f.eks. sulfat, Cr og Cu. Der er desuden behov for et bedre kendskab til hvorledes resultater fra specifikke udvaskningstests kan anvendes til at vurdere forholdene under og efter behandlingen; ofte vil de geokemiske forhold være forskellige i de to situationer.

Der er lavet en del udenlandske undersøgelser (se f.eks. referencer i Sabbas et al., 2003) af de geokemiske forhold under ældning og fuldskala lagring/deponering af slagge, hvilket i nogle tilfælde også inkluderer "vask", men der bør - set i relation til den danske situation - fremover fokuseres på de geokemiske ændringer under decideret behandling af slaggen.

I kun et enkelt af projekterne (Bendz og Flyhammar, Projekt N) er betydningen af kinetikken for frigivelsen af salte og tungmetaller til væskefasen vurderet. Der vil være behov for fremover at undersøge kinetikken i vaskeprocesser nærmere for at kunne optimere behandlingen af slaggen.

3.5 Organisk stof

Problemstillinger

Der har vist sig at være en relativ klar sammenhæng mellem opløst organisk stof i udvaskningsmediet og udvaskningen af kobber. Det er dermed nødvendigt at forstå mulighederne for kompleksering af Cu med organisk stof og ændringerne i sammensætning og egenskaber af det organiske stof under lagring samt ved vaskeprocesser.

Erfaringer

Flere projekter har set en korrelation mellem udvaskningen af organisk stof og Cu (Mogensen, Projekt B; Sander, 2002; Boddum og Skaarup, 2002), mens andre ikke har observeret nogen entydig tendens (Skaarup, 2001). Der ses generelt en tydelig reduktion i udvaskningen af TOC ved lagring, hvilket oftest kan korreleres til Cu-udvaskningen.

Grøn (2003; Projekt Q) har lavet en mere detaljeret undersøgelse af sammenhængen mellem organisk stof og udvaskningen af Cu. Der rapporteres dels en tydelig korrelation mellem udvaskningen af TOC og Cu, og dels at udvaskningen af begge falder ved lagring af slaggen. Slaggen er i undersøgelsen modnet i laboratorieskala under fugtige forhold men uden en egentlig udvaskning, hvorfor den reducerede udvaskning af TOC ikke skyldes en fjernelse med perkolat dannet under lagringen. Det vises desuden, at mikrobiel nedbrydning af organisk stof sandsynligvis ikke spiller nogen rolle. I stedet konkluderer man, at reduktionen i udvaskning af TOC efter lagring skyldes fordampning af organiske syrer og/eller en immobilisering af TOC. Undersøgelsen omfattede desuden en fraktionering af det organiske stof, hvilket viste, at Cu primært var associeret til de større organiske molekyler som f.eks. humusstoffer (Grøn, 2003).

Sander (2002) finder, at TOC-udvaskningen kan reduceres væsentligt ved vask af slaggen; reduktionen er lidt over 80 % af udgangsniveauet, hvilket svarer til den reduktion Grøn (2003) ser ved lagring af slaggen. Mogensen (Projekt B) og Boddum og Skaarup (2002) finder ligeledes at vask af slaggen reducerer udvaskningen af organisk stof.

Konklusion

Samspillet mellem organisk stof og Cu har primært været undersøgt i en række udenlandske projekter (se f.eks. Meima et al., 1999), mens de danske udviklingsprojekter i højere grad har dokumenteret en sammenhæng mellem Cu og TOC-udvaskningen samt vist at specifikke behandlinger (f.eks. lagring eller vask) mu-

liggør en reduktionen af udvaskningen. Der er ingen tvivl om, at det organiske stof er en primær indgang til forståelsen af Cu-udvaskningen fra slaggen fra danske anlæg også.

En opsamling på udenlandske erfaringer sammenholdt med en nærmere undersøgelse af ændringer i sammensætningen, bindingen til slaggematricen og mængden af det organiske stof ved lagring og vask vil være nyttig for fremover at kunne optimere de forskellige processer med henblik på en minimal Cu-udvaskning.

3.6 Størrelsesfraktionering

Problemstillinger

Det vides, at tungmetaller - i forbindelse med forbrændingsprocesser - opkoncentreres på overfladen af små askepartikler som følge af deres store specifikke overflade. Det har derfor været undersøgt om en fraseparering af partikler med kornstørrelser under ca. 0,1 mm kan forbedre slaggens egenskaber. Udover et ønske om at forbedre indholdet af tungmetaller i slaggen og dens udvaskningsegenskaber, har det også været ønsket at forbedre de materialetekniske egenskaber så slaggen i højere grad kunne finde anvendelse i bygge- og anlægsprojekter.

Erfaringer

Bendz og Flyhammer (Projekt N) har bl.a. undersøgt udvaskning fra specifikke kornstørrelsesfraktioner med henblik på opbygning af en model for udvaskning fra slagge. Det vises, at det specifikke overfladeareal af partiklerne i en given kornstørrelsesfraktion er den primære parameter til korrelation af frigivelsen af salte til væskefasen. Det vises endvidere, at reaktioner på (interne) partikeloverflader generelt er styrende for frigivelsen, og at diffusion i den faste fase af udvaskningen kan give et væsentligt bidrag. Dette gælder alle partikelstørrelser. Det er desuden fundet, at gips kan være kontrollerende for væskekoncentrationerne af Ca og sulfat.

Boddum og Skaarup (2002) undersøgte i laboratoriet effekten af fraseparering af kornstørrelser $< 125 \mu\text{m}$ ved vask. Det blev fundet, at sulfat var opkoncentreret i den fine fraktion. Den primære og mest entydige effekt ved udskilning af den fine fraktion under vask både med og uden additiver ses for sulfat, Na, Cr, Mo og organisk stof. Det var hovedsageligt sulfat og Mo, der blev yderligere forbedret ved tilsætning af additiver relativt til vask.

Boddum og Skaarup (2000) har ved vask af slagge i et jordvaskeanlæg fundet, at flere tungmetaller og salte var opkoncentreret i den fine fraktion $< 100 \mu\text{m}$. Det blev konkluderet, at den kombinerede vask og separation i vaskeanlægget havde en positiv effekt på udvaskningen af sulfat, As, Pb, Cd og Zn ligesom de anlægstekniske egenskaber af slaggen var forbedret.

Crillesen (Projekt K) finder ligeledes en opkoncentrering af Cl og S i den fine fraktion, mens mest Cu blev fundet i grus-fraktionen. Pb blev fundet i størst koncentration i sand-fraktionen. For de øvrige undersøgte elementer kunne der ikke ses nogen korrelation til kornstørrelsen. Udvaskeegenskaberne af en kombineret sand og grus fraktion blev vurderet og der blev observeret en forbedret udvaskning, dog var saltudvaskningen stadig over kravene i bekendtgørelsen. Møller og Pedersen (2001) finder, at sulfat og Cr er opkoncentreret i kornstørrelser $< 4 \text{ mm}$.

Konklusion

Det er givet, at en fjernelse af finfraktionen vil medføre en fjernelse af salte og tungmetaller fra slaggen. Det er overvejende sandsynligt, at sulfat og de fleste tungmetaller er opkoncentreret i den fine fraktion. Muligvis vil opløsning af de

oprindelige og udfældning af sekundære sulfatholdige mineraler som f.eks. gips i en vaskeproces medføre en yderligere opkoncentrering i den fine fraktion, hvorfor det kan være formålstjenstligt at frasortere denne.

I undersøgelserne af fraseparering af en fin fraktion i pilotskala er det vanskeligt at adskille effekten af den integrerede vaskeproces fra effekten af størrelsesfraktioneringen af slaggen. Det er sandsynligt, at frasepareringen vil kunne have en effekt på udvaskningsegenskaberne, men effekten bør dokumenteres og demonstreres yderligere i pilotskala for at virkningen udelukkende kan tilskrives separationsprocessen. Det er desuden usikkert, hvorvidt opløselighedskontrol af f.eks. sulfatkoncentrationen også efter fraktioneringen vil modvirke effekten af sulfatfjernelsen med den fine fraktion, eller om en korrekt designet separationsproces vil kunne forbedre en simpel slaggevaske tilstrækkeligt.

3.7 Udsortering af metal

Problemstillinger

Traditionelt sker der en fraseparering af magnetiske metalgenstande i forbindelse med oparbejdningen af slagge, men det har været ønsket at vurdere potentialet for udsortering af ikke-magnetiske metaller fra slaggen med henblik på genanvendelse af disse.

Erfaringer

Hansen (Projekt P) har i fuld skala undersøgt udsorterede mængder og kvaliteter af den ikke-magnetiske fraktion fra fire slaggepartier. Slaggen er forinden separation blevet homogeniseret ved sigtning og nedknusning. Fraseparationen af ikke-magnetiske emner over 6 mm blev foretaget ved hjælp af luftdyser. Det er vurderet, at den ikke-magnetiske fraktion udgør ca. 0,16 % - 0,45 % af råslaggen på vægtbasis og den magnetiske fraktion udgør ca. 3,6 % - 6,9 %. Kvaliteten af det udsorterede metal er vurderet som god.

Staal (Projekt I) vurderede baseret på tyske og hollandske erfaringer, at udsortering af metalliske og ikke-metalliske fraktioner ved hjælp af magnet og eddy-current teknik samt manuel sortering vil kunne udsortere mængder af samme størrelsesorden som Hansen (Projekt P); nemlig ca. 6 % for den magnetiske fraktion og ca. 0,4 % for den ikke-magnetiske fraktion.

Konklusion

Det er vist - dels i Danmark og dels i udlandet, at det er muligt at udsortere den ikke-magnetiske fraktion i lighed med den magnetiske, og at renheden er tilstrækkelig til, at metallerne kan genanvendes. En beslutning om implementering af yderligere metalseparation vil i Danmark formentlig primært blive baseret på mulighederne for afsætning af slaggen i øvrigt (jævnfør Staal, Projekt I). Det er i de gennemførte undersøgelser ikke belyst om den øgede fjernelse af metal påvirker udvaskningen.

3.8 Potentielle nye anvendelser af slagge

Problemstillinger

For at udvikle genanvendelsesmulighederne er det vigtigt løbende at vurdere potentielle anvendelser. I relation til de skærpede krav til genanvendelse af slagge ved bygge- og anlægsarbejder har der været et specifikt behov for at undersøge nye afsætningsmuligheder.

Erfaringer

Fem projekter omhandler aspekter i forbindelse med anvendelse af slagge: Crillesen og Hjelmar (Projekt E) samt Bendz og Flyhammar (Projekt N) om udvaskning fra slagge ved anvendelse som bundsikringslag under veje, Birgisdottir og Christensen (Projekt M) om livscyklusvurdering af genanvendelse af slagge i vejbygning, Christensen og Bager (Projekt R) om anvendelse af slagge i cementbaserede bærelag under veje samt Baun et al. (Projekt S) om anvendelse af slagge til opfyldning i forbindelse med marine anlæg.

I projektet om cementbaserede bærelag er det fundet, at substituering af grus og kulflyveaske med slagge giver et produkt med tilstrækkelige styrkeegenskaber og at udvaskningen formentlig er mindre end fra granulære slagge (Christensen og Bager, Projekt R). Baun et al. (Projekt S) vurderer, at udvaskningen i marint miljø er størst i anlægsfasen, men at den samlede udvaskning sandsynligvis er relativt begrænset. Crillesen og Hjelmar (Projekt E) har indledende vurderet, at randeffekter langs kanten af veje vil være væsentlig ved vurdering af fremtidig udvaskning fra slagge under veje.

De øvrige projekter er endnu på et indledende stadie, og der er endnu ingen konklusioner.

Konklusion

Det primære fokus med hensyn til genanvendelsesmuligheder for slaggen er i forbindelse med vejbygning samt i relation til anvendelse ved marine anlægsarbejder. Begge disse udviklingsområder vil fortsat kræve en indsats i de kommende år før der kan udtrages mere detaljerede konklusioner.

3.9 Anlægs- og driftsparametre

Problemstillinger

Det vurderes, at der på længere sigt er et væsentligt potentiale for forbedring af slaggekvaliteten ved optimering og regulering af forbrændingsprocessen. Det er i den forbindelse vigtigt at få fastlagt hvilke anlægsteknologier og driftsformer, der resulterer i den bedste slaggekvalitet.

Erfaringer

Nielsen og Clement (Projekt L) omfatter en kortlægning af overordnede anlægs- og driftsparametre som: ovn- og ristetype, opholdstid, temperaturer samt oplysninger om det indfyrede affald. Dette sammenholdes med de udførte slaggeanalyser (jf. bekendtgørelsen) for om muligt at fastlægge sammenhænge til slaggekvaliteten. Der er endnu ikke fremkommet konklusioner fra projektet.

Amagerforbrænding, Vestforbrænding og Elsam har i konkrete tilfælde haft erfaring for, at en øget udbrænding af slaggen har medført en bedre slaggekvalitet; herunder særligt en reduceret metaludvaskning. Dette forhold er eksempelvis blevet observeret på anlæg med roterovn efter risten. Ligeledes har det vist sig at have betydning hvorvidt ristegennemfaldet genindfyres i ovnen eller ej. Det skønnes tilsvarende at have betydning, hvorvidt kedelasken tilbageføres til ovnen eller blandes i slaggen henholdsvis i flyveasken. Redoxforholdene i ovnen og på risten anses også for at have betydning for udvaskningen af metaller.

Overordnet set er der ingen tvivl om, at opbygningen og driften af anlægget har en væsentlig betydning for de faste restprodukters karakteristika.

Konklusion

Den primære fokus er p.t. at fastlægge overordnede sammenhænge mellem anlægskarakteristika og slagge kvaliteten. Der er endnu ikke gennemført detaljerede undersøgelser af forbrændingsprocessens indflydelse på slagge kvaliteten. Udviklingsområdet vil kræve en væsentlig indsats i de kommende år før den nødvendige viden haves til at kunne optimere på anlægsdriften.

4 Faglig status og centrale udviklingsområder

Kapitlet opsummerer den faglige viden fremkommet via de gennemførte udviklingsprojekter og angiver de væsentligste fremtidige udviklingsbehov. Desuden skitseres relevante fremtidige disponerings- og udviklingsscenerier.

4.1 Faglig status

På baggrund af den viden der i de senere år er tilvejebragt om slaggekvallitet, udvaskning og teknologier til forbedring af slaggen, er der i det følgende opsummeret en række delkonklusioner.

Slaggekvallitet generelt

- Faststofindholdet i slagger varierer betydeligt forbrændingsanlæggene imellem. Variationen skyldes formentlig en variation i de affaldstyper, der tilføres anlæggene samt den anvendte forbrændingsteknologi og driftsform.
- Slaggernes udvaskningsegenskaber som bestemt i udvaskningstest varierer betydeligt mellem forbrændingsanlæggene. Variationen kan delvist skyldes forskelle i slaggens kemiske sammensætning bestemt af affaldet der forbrændes, men er formentligt i væsentligt omfang påvirket af det enkelte forbrændingsanlægs teknologi og driftsform.
- Slaggens kvallitet kan tilsyneladende variere væsentligt over tid inden for det enkelte anlæg både hvad angår faststofindhold men også med hensyn til udvaskningen. Dette kan til en vis grad skyldes usikkerhed på slaggekaraktariseringen, men formentlig også driftsmæssige variationer over tid på det enkelte anlæg og den enkelte ovn. Dette stiller store krav til prøvetagningen, både i den rutinemæssige monitoring og i forbindelse med forsøgs- og demonstrationsprojekter.
- Slaggen oparbejdes i de fleste tilfælde før genanvendelse, dels ved modning og dels ved sortering. Denne oparbejdning forbedrer dels de anvendelsestekniske aspekter og dels reduceres udvaskningen for de fleste komponenter. Reduktionen i udvaskningen er markant for tungmetallerne, men ikke altid for saltene. I flere tilfælde øges udvaskningen af sulfat.
- Slaggen kan i ingen tilfælde overholde kravene til genanvendelse efter kategori 1 som specificeret i bekendtgørelsen. Slaggen har i de fleste tilfælde meget vanskeligt ved at overholde udvaskningskravene til genanvendelse i kategori 2 hvad angår saltene (især sulfat) samt Cr, Cu, Ni, As og Pb. Generelt kan slaggen bringes til at overholde udvaskningskravene i kategori 3, men i visse tilfælde kan kravene til Cu-udvaskningen være meget vanskelige at opfylde uden en forlænget modning.

Prøvetagning og karakterisering

- Slagger er meget inhomogene både indenfor et enkelt parti, men formentlig også over tid. Udtagning af repræsentative prøver bør gøres velovervejet og efter dokumenterede principper for at minimere usikkerheden på bestemmelsen. Usikkerheden på bestemmelsen af faststofindhold eller udvaskning kan ofte være i størrelsesordenen 20-100 %.
- Bekendtgørelsens krav til faststofindhold og udvaskning tager ikke højde for denne relativt store usikkerhed på karakterisering (f.eks. vil pH i udvaskningstesten have stor betydning for karakteriseringens resultat), ligesom der eksisterer et skisma mellem nedknusning af slaggen i udvaskningstesten og den faktiske anvendelse som større partikler. Nedknusning vil sandsynligvis medføre en øget frigivelse i udvaskningstesten sammenlignet med udvaskningen i fuld skala.

Udvaskning fra slagge

- Udvasningen fra slaggen, som bestemt ved en L/S 2 udvaskningstest, udgør for tungmetaller kun en meget lille del af slaggens totalindhold (typisk under nogle få promille), mens der for saltene (Cl, Na og sulfat) i mange tilfælde kan udvaskes 30-100 % af totalindholdet.
- De væsentligste parametre af betydning for udvaskningen af tungmetaller er pH og tilstedeværelsen af opløseligt organisk stof (primært af betydning for kobber). Slaggens mineralsammensætning - og dermed de opløsningsstyrende faser - er formentlig også af afgørende betydning for sulfat og de fleste tungmetaller. Der findes visse udenlandske undersøgelser på dette område, men ingen væsentlige undersøgelser af dansk slagge. Viden om opløsningsstyrende faser kan være af betydning i forbindelse med vurdering af mulighederne for vask og våd oparbejdning af slagge samt relationen mellem udvaskningstest og udvaskning i faktisk forekommende anvendelsesscenarier.
- Fordelingen af de kritiske komponenter mellem partikelfraktioner i slaggen er kun undersøgt i enkelte tilfælde på dansk slagge. Specielt tungmetallerne forventes at være opkoncentreret i den fine fraktion, men de rapporterede undersøgelser har ikke været helt konsistente på dette område. Fordelingen kan have betydning både for udvaskningen og for muligheden for at fjerne særligt belastede fraktioner fra slaggen.

Muligheder for forbedring af slagge kvalitet

- Slaggens udvaskningsegenskaber er afgørende for klassificeringen af slaggen jf. bekendtgørelsens kategori 2 og 3. Hvis kvaliteten skal forbedres med henblik på øget genanvendelse i henhold til bekendtgørelsen, skal udvaskningsegenskaberne forbedres.
- Modning over nogle måneder tillader hydratisering og karbonatisering af slaggen samt stabilisering af det organiske stof. Mekanismen for stabiliseringen af det organiske stof kendes endnu ikke i et omfang, så det kan udnyttes til optimering af modningen.
- Ved modningen sænkes pH og udvaskningen reduceres for de fleste tungmetaller, mens udvaskningen ofte stiger for sulfat. Sidstnævnte skyldes formentlig, at den opløselighedsstyrende fase skifter fra et blandet mineral indeholdende Ca, Al og sulfat til gips; idet førstnævnte er styrende ved højt pH, mens gips er styrende ved lavere pH.
- I nogle tilfælde har modning reduceret udvaskningen af Na og Cl fra slaggen. Dette kan skyldes udvaskning under modningen via overskydende ned-

bør, men muligvis også ændringer i kornstørrelsesfordelingen over dybden i en slaggebunke, idet prøveudtagningen får øget betydning, hvis der ikke tages hensyn til stedlige variationer i slaggebunken forårsaget af modningsprocessen.

- Modningen er væsentlig både for reduktion af tungmetaludvaskningen og forbedring af de geotekniske egenskaber i forbindelse med genanvendelsen, men modning alene er ikke tilstrækkelig til at slaggen overholder udvaskningskravene til genanvendelse i forhold til kategori 2. I de fleste tilfælde kan slaggen evt. ved forlænget modning bringes til at overholde kategori 3 kravene.
- Ved vask af slaggen opløses store mængder salte, hvilke efterfølgende resulterer i en reduceret udvaskning for Na og Cl. Reduktionen i udvaskningen af sulfat er imidlertid lille, hvilket formentligt skyldes at sulfatudvaskning er opløselighedsstyret og derved ikke i væsentlig grad påvirket af, at en stor del af sulfatmængden fjernes ved vasken. Vask af slaggen forbedrer i nogle tilfælde udvaskningen af Pb, Cr og Cu, men Cu bringes ikke ned under udvaskningskravet til genanvendelse i kategori 2 som følge af vasken.
- Vask med anvendelse af natriumbikarbonat giver i visse tilfælde bedre resultater for sulfat, men sjældent i et omfang som tillader genanvendelse i kategori 2. Anvendelsen af natriumbikarbonat tilfører slaggen ekstra Na, men dette skønnes at kunne fjernes ved yderligere skylning. Vask med natriumbikarbonat kan desuden i visse tilfælde forbedre udvaskningen af især Cu, Cr og Pb, men dette skyldes formentlig primært kombinationen af vask og den pH-sænkning som bikarbonattilsætningen medfører. Effekten af pH-sænkningen er dog af mindre betydning relativt til den pH-sænkning der finder sted ved modning. Anvendelse af CO₂ i stedet for bikarbonat er tilsvarende observeret at kunne have en positiv effekt på udvaskningen af tungmetaller, mens sulfatudvaskningen ikke gav tilsvarende entydige resultater. I forbindelse med fuldskala vask med natriumbikarbonat er der observeret visse tekniske problemer ved pumpning og dosering.
- Ved anvendelse af et rimeligt vandforbrug (maksimalt 2-5 m³/ton slagge afhængig af recirkulering og efterskylning af slaggen) er det generelt vanskeligt at opnå en slagge kvalitet - specielt med hensyn til saltene, der tillader genanvendelse efter kategori 2. Nogle slagge kan dog godt overholde kravene med den nuværende oparbejdning.
- En mekanisk fjernelse af magnetiske- og ikke-magnetiske metaller (primært Al, Cu, messing og rustfrit stål) synes teknologisk muligt og indtægt fra salg af metallerne lovende. Effekten i forhold til ændring af udvaskningen kendes ikke, men udsorteringen medfører formentlig ikke nogen væsentlig forbedring af metaludvaskningen, da denne sandsynligvis ikke er styret af egentlige metalgenstande i slaggen.
- Mekanisk fjernelse af finfraktionen (f.eks. omkring 10 % på vægtbasis) synes teknologisk muligt, men det er endnu ikke undersøgt i hvilket omfang dette kan ændre udvaskningen af de kritiske komponenter.
- Der er formentlig et potentiale for forbedring af slagge kvaliteten ved optimering af driftsbetingelserne i ovnen; f.eks. anses både graden af udbrænding og redoxforholdene på risten at have betydning for slagge kvaliteten og udvaskningen.

Genanvendelse af slagge

- Slaggers geotekniske egenskaber medfører, at slagge udgør et godt alternativ til jomfruelige materialer i forbindelse med anlægsarbejder. Set i relation

til de materiale tekniske egenskaber er der ingen væsentlige hindringer for genanvendelse af slagge. Genanvendelsen skønnes mængdemæssigt i dag at ske med ca. 50 % i kategori 3 og ca. 50 % med godkendelse efter Miljøbeskyttelsesloven eller med dispensation i henhold til bekendtgørelsen.

- En væsentlig barrierer for genanvendelsen er med den gældende lovgivning, at lokaliteten, hvor slaggen udlægges, registreres i henhold til Jordforureningsloven. Da lokaliteten registreres uanset om slaggen genanvendes i henhold til kategori 2 eller 3, er det fra modtagerens synspunkt mindre væsentligt hvilken kategori slaggen kan klassificeres efter.
- Den væsentligste begrænsning i genanvendelsesmulighederne i kategori 3 er i forhold til kategori 2, at slagge her ikke kan anvendes til etablering af pladser. Da det i mange tilfælde kan være vanskeligt at opgradere slaggen til kategori 2 og genanvendelse i pladser er en betydelig afsætningsmulighed, er dette krav i praksis en barriere for genanvendelsen.
- I forbindelse med genanvendelse af slagge til vejbygning og større pladser er det en væsentlig begrænsning, at slaggen jf. bekendtgørelsen maksimalt må ligge uafdækket i 1 måned inden etablering af et fast dæklag. Arbejdsgangen i denne type anlægsprojekter indebærer, at underlaget skal være etableret inden dæklaget (f.eks. i form af asfalt) udlægges; dette kan i mange tilfælde ikke lade sig gøre inden for tidsgrænsen.

4.2 Udviklingsbehov

Der er via de mange gennemførte udviklingsaktiviteter opnået en væsentlig forøget indsigt i problemstillingen omkring udvaskning fra slaggen, men det må også konstateres at der er stor variation mellem slagge fra forskellige anlæg og over tid inden for det enkelte anlæg. Det må ligeledes konstateres, at der er mange mekanismer og processer der endnu ikke forstås, og der er ikke fundet enkelte meget overbevisende metoder til på sikker vis at oparbejde slaggen til at opfylde kravene til genanvendelse efter bekendtgørelsens kategori 2. De væsentligste parametre i almindelighed synes at være sulfat og kobber, hvis udvaskning tilsyneladende er styret af forskellige mekanismer. Dette forhold stiller ekstra krav til oparbejdningen.

Ud fra et ønske om den miljømæssigt "bedst mulige slagge" og afhængig af de disponeringsmuligheder der satses på, kan følgende udviklingsbehov identificeres (ikke prioriteret rækkefølge):

- Ved enhver genanvendelse som granulært materiale eller monolitisk materiale vil modning af slaggen være relevant, da dette fremmer den tekniske anvendelse og reducerer udvaskning især af Cu, Cr og Pb: modningens forløb bør derfor kendes bedre. Det bør fastlægges hvilke parametre (f.eks. temperatur, vandindhold og lufttilgang), der er styrende for den resulterende udvaskning af specifikke elementer. Herved kan modningen muligvis optimeres og det kan vurderes hvor meget udvaskningen kan reduceres.
- Sulfat vil være en kritisk parameter ved genanvendelse og en nærmere forståelse af de opløselighedsstyrende faser, bl.a. under modningen og i forbindelse med vask vil være vigtig ved optimering af disse processer.
- Kobber vil være en kritisk parameter og nærmere forståelse af mekanismen for Cu-udvaskningen og tilbageholdelsen i jorden under genanvendelseslokaliteten vil være nødvendig for reduktion af Cu-udvaskningen og risikovurdering af en evt. kortvarig højere udvaskning. Det bør ligeledes undersøges hvorvidt Cu kan være bundet til små partikler og transporteres via kolloider.

- Der bør udarbejdes forslag til relevante krav til udvaskningen fra monolitiske materialer ligesom der eksisterer krav til udvaskning fra granulære materialer. Dette er relevant ved cementstabiliserede bærelag både ved genanvendelse i veje og ved anvendelse i større anlæg i medfør af Miljøbeskyttelsesloven.
- Der bør fortsættes med udarbejdelsen af en vejledning til brug ved godkendelse af genanvendelse jf. bekendtgørelsen.
- Der bør udarbejdes værktøjer og procedurer som støtte til udarbejdelsen af miljøvurderinger med henblik på godkendelse af genanvendelsesprojekter, der ikke er omfattet af bekendtgørelsens kategori 2 og 3.
- Mulighederne for at anvende en udvaskningstest med fastholdt pH i stedet for den nuværende bør undersøges. Det er forventeligt, at en sådan test vil resultere i en mere robust karakterisering af udvaskningsegenskaberne og minimere indflydelsen fra f.eks. pH-variationer i et slaggeparti. Dermed kan betydningen af prøvetagningen på det endelige resultat mindskes.
- Risikoen for yderligere udvaskning i forbindelse med uafdækket oplagring ved anlægsarbejder udover den ene måned som er specificeret i bekendtgørelsen bør vurderes.
- Betydningen af at nedknuse slaggepartikler til under 4 mm i udvaskningstesten bør vurderes nærmere i relation til faktiske oparbejdnings- og anvendelsesscenarier, hvor ikke nedknuste partikler er involveret.
- Der kan ikke peges på en bestemt udvikling inden for oparbejdningen for at sikre opfyldelse af udvaskningskravene i kategori 2 for granulære slagge, men det foreslås at der foretages en fastlæggelse af en mulig realistisk oparbejdning og at denne udføres i pilotskala på en række slagge for at demonstrere hvilken kvalitet der kan opnås. Disse resultater kan herefter vurderes i forhold til nuværende kravværdier og indgå i integreret miljøvurdering af slaggedisponeringen baseret på livscyklusbetragtninger.
- Viden om langtidsaspekterne ved genanvendelse af kategori 2 henholdsvis kategori 3 slagge bør vurderes nærmere (f.eks. hvilke forskelle er der i miljøpåvirkningen over 100 år ved samme anvendelsesscenarie?).
- Miljømæssig vurdering af potentiel nedsivning af kritiske tungmetaller fra genanvendt slagge og gennem underliggende jordlag (mængder, migrationsafstande osv.).
- Mulighederne for en driftsmæssig optimering af affaldsforbrændingen med hensyn til forbedring af slagge kvaliteten bør undersøges yderligere.
- Mulighederne for affaldets indflydelse på slagge kvaliteten bør undersøges yderligere.
- Der bør gennemføres en nærmere analyse af behovet for nye og bedre afsætningsmuligheder samt effekten af at kunne afsætte slagge til anvendelse efter kategori 2.
- Genanvendelsesmulighederne - f.eks. til særlige typer anvendelser - kan udvikles yderligere for at forbedre afsætningsmulighederne.

4.3 Disponeringsscenarier

De fremtidige muligheder for disponering af slaggerne er i høj grad styret af de lovgivningsmæssige rammer, der eksisterer på området. Med udgangspunkt i den eksisterende lovgivning og set i lyset af den opnåede viden og de ovenfor skitserede udviklingsbehov, er de mest sandsynlige og realistiske disponeringsmuligheder kort opsummeret i det følgende. De enkelte udviklingsbehov er benævnt A - J.

Eksport

Strategisk beslutning: Der fokuseres på afsætning til nyttiggørelse i udlandet frem for genanvendelse i Danmark. Eksport til nyttiggørelse skal godkendes af Miljøstyrelsen i henhold til Eksportforordningen. Der findes ingen egentlige udviklingsbehov ved denne løsning.

Status quo

Strategisk beslutning: Slaggen modnes tilstrækkeligt til at udvaskningen overholder kategori 3 kravene. Afsætningen af slaggen sker til genanvendelse i kategori 3 eller med dispensation til genanvendelse efter kategori 2 samt i henhold til Miljøbeskyttelsesloven. Dette vil formentlig kræve øget behov for oplagingskapacitet.

Primære udviklingsbehov:

- A Miljøvurdering af sandsynlige anvendelsesscenerier, herunder en klarlægelse af de miljømæssige konsekvenser på længere sigt ved genanvendelse med forskellige slagge kvaliteter.
- B Værktøjer og procedurer til brug ved miljøvurdering af en specifik genanvendelse.

Bedst mulig slagge

Strategisk beslutning: Slagge kvaliteten forbedres med en bredspektret indsats med henblik på at opnå den bedst mulige kvalitet under hensyntagen til de miljø- og ressource mæssige omkostninger ved behandlingen.

Slaggen forventes generelt set stadig kun at kunne afsættes i henhold til kategori 3 eller med dispensation efter kategori 2 samt med godkendelse efter Miljøbeskyttelsesloven.

Primære udviklingsbehov:

- A Miljøvurdering af sandsynlige anvendelsesscenerier, herunder en klarlægelse af de miljømæssige konsekvenser på længere sigt ved genanvendelse med forskellige slagge kvaliteter.
- B Værktøjer og procedurer til brug ved miljøvurdering af en specifik genanvendelse.
- C Fortsat udvikling af behandlingsteknologier og demonstration af lovende teknologier i større skala på flere slagge.
- D Fortsat undersøgelse af geokemiske processer ved slaggebehandling med henblik på at øge forståelsen af de opløsningskontrollerende mekanismer.

Nye anvendelser

Strategisk beslutning: Nye genanvendelsesmuligheder udvikles for på længere sigt at forbedre afsætningsmulighederne. Slaggen forbehandles i relevant omfang afhængig af de valgte genanvendelsesløsninger. Slaggen forventes her primært at blive anvendt efter særlig godkendelse i henhold til Miljøbeskyttelsesloven.

Primære udviklingsbehov:

- A Miljøvurdering af sandsynlige anvendelsesscenerier, herunder en klarlægning af de miljømæssige konsekvenser på længere sigt ved genanvendelse med forskellige slagge kvaliteter.
- B Værktøjer og procedurer til brug ved miljøvurdering af en specifik genanvendelse.
- C Fortsat udvikling af behandlingsteknologier og demonstration af lovende teknologier af relevans for de forventede nye genanvendelsesløsninger.
- D Fortsat undersøgelse af geokemiske processer ved slaggebehandling med henblik på at øge forståelsen af de opløsningskontrollerende mekanismer.
- E Fortsat udvikling af nye genanvendelsesløsninger, som f.eks. marin anvendelse eller cementstabiliserede bærelag under veje, herunder en skitsering af relevant slagge kvalitet ved en given type genanvendelse.
- F Fastlæggelse af miljø- og ressourcemæssigt begrundede krav til slaggens udvaskningsegenskaber relateret til en specifik genanvendelsesløsning (f.eks. udvaskningskrav til monolitiske materialer anvendt i vejbygning).

Revision af lovgrundlag

Strategisk beslutning: Der arbejdes på at få revideret den eksisterende bekendtgørelse på udvalgte punkter, således at lovgivningen i højere grad tager hensyn til den situation hvorunder genanvendelsen finder sted samt de realistiske muligheder for forbedring af slaggen. Såfremt dette opfyldes, forventes slaggen med den nødvendige forbehandling at kunne genanvendes indenfor rammerne af bekendtgørelsen.

Scenariet er primært et supplement til scenarierne: "Status quo" og "Bedst mulig slagge". Der bør fokuseres på et eller flere af følgende punkter i bekendtgørelsen og forarbejdet til bekendtgørelsen:

- Ændring af krav til udvaskning af salte. Ved anvendelse af slagge i veje, stier og pladser, hvor der gennemføres glatførebekæmpelse, har den reelle saltudvaskning fra slaggerne sandsynligvis en minimal betydning for grundvandet i forhold til forureningen med vejsalt (se Carlson et al., 1998). Dette punkt er relateret til fastsættelsen af baggrundskoncentrationer i forarbejdet til bekendtgørelsen.
- Ændring af krav til udvaskning af metaller og salte. Det har vist sig at være muligt med en kontrolleret forbehandling at nå på niveau med eller indenfor kravene til udvaskningen i kategori 2. En revision af kravene bør drøftes med myndighederne, så kategori 2 kravene afspejler, en balance mellem hvad der er muligt at opnå for slagge, og de ønskede miljøkrav.
- Revision af krav til metaludvaskning. I de modelberegninger, der ligger til grund for fastsættelsen af udvaskningskravene i bekendtgørelsen, er ikke taget højde for sorption i jordlaget under udlagt slagge. Metallernes vandringshastighed er reduceret væsentlig og høje koncentrationer fra den første fase af udvaskningen vil udjævnes væsentligt herved.
- Ændring af udvaskningstest til test med fastholdt pH. I den nuværende udvaskningstest har variationer i pH (og dermed prøvetagningen) unødigt stor betydning for resultatet af karakteriseringen. Ved at basere udvaskningskravene på en udvaskningstest med fastholdt pH ved f.eks. 9, vil karakteriserin-

gen formentlig blive mere robust overfor mindre variationer i testbetingelserne.

- Tilladelse til at anvende kategori 3 slagge i pladser. De langsigtede miljømæssige konsekvenser ved at anvende en forbehandlet slagge klassificeret efter kategori 3 til pladser er sandsynligvis minimal sammenlignet med anvendelse af kategori 2 slagge.
- Ændring af krav til uafdækket oplag. En nuancering af kravene til uafdækket oplag vil sandsynligvis ikke medføre væsentligt ændrede miljømæssige konsekvenser på langt sigt.

Primære udviklingsbehov:

- A Miljøvurdering af sandsynlige anvendelsesscenarier, herunder en klarlægning af de miljømæssige konsekvenser på længere sigt ved genanvendelse med forskellige slagge kvaliteter.
- C Fortsat udvikling af behandlingsteknologier og demonstration af lovende teknologier i større skala på flere slagge.
- D Fortsat undersøgelse af geokemiske processer ved slaggebehandling med henblik på at øge forståelsen af de opløsningskontrollerende mekanismer.
- G Konvertering af eksisterende udvaskningskrav for den nuværende udvaskningstest til en test ved fastholdt pH.
- H Miljømæssig vurdering af potentiel nedsivning af metaller med inddragelse af sorption og kompleksering ved forskellige hydrologiske forhold og i forskellige anvendelsesscenarier.
- I Miljømæssig vurdering af konsekvenserne ved uafdækket oplag udover grænserne beskrevet i bekendtgørelsen (f.eks. afhængig af årstiden og typen af genanvendelse)
- J Fortsat undersøgelse af udvaskningen i fuld skala og fastlæggelse af kildestyrken fra slagge genanvendt til veje og pladser i henhold til bekendtgørelsen.

5 Referencer

- Boddum, J.K.; Skaarup, J. (2000): Muligheder for vask af slagge fra affaldsforbrænding før genanvendelse i bygge- og anlægsarbejde. AFATEK A/S.
- Boddum, J.K.; Skaarup, J. (2002): Stabilisering af slagge fra affaldsforbrænding ved vask, separation og lagring. AFATEK A/S, Center for Restprodukter UR-1. Udkast.
- Carlson, B.B.; Nielsen, M.Æ.; Bjerg, P.L.; Christensen, T.H.; Pedersen, J.K. (1998): Vejsalt genfindes i høje koncentrationer i grundvandet. Stads- og havneingeniøren, 3, 32-36.
- CEN (2002): Characterization of waste - Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges - Part 3. European Standard EN 12457-3. European Committee for Standardization, Brussels.
- Dahlstrøm, K.; Rasmussen, P.O. (1999): Restprodukters påvirkning af grund- og indvindingsvand. Miljøprojekt nr. 467. Miljøstyrelsen.
- Grøn, C. (2003): Udvaskning af kobber og organisk stof fra affaldsforbrændingslagge. C-RES Nyhedsbrev, nr. 7, 5-8.
- Hjelmar, O.; Holm, P.; Lehmann, N.K.J.; Asmussen, O.; Rose, N. (1998): Grundlag for nyttiggørelse af forurenede jord og restprodukter. Miljøprojekt nr. 415. VKI, Quest Geoscience.
- Lundtorp, K. (2002): Ferrox-stabilisation of bottom ash from MSW incineration. The Ferrox-project. Babcock & Wilcox Vølund.
- Meima, J.A.; van Zomeren, A.; Comans, R.N.J. (1999): Complexation of Cu with dissolved organic carbon in municipal solid waste incinerator bottom ash leachates. Environ. Sci. Technol., 33, 1424-1429.
- Miljø- og Energiministeriet (1999): Lov nr. 370 af 2. juni 1999 om Forurenede jord. Miljø- og Energiministeriet.
- Miljø- og Energiministeriet (2000): Bekendtgørelse nr. 655 af 27. juni 2000 om Genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder. Miljø- og Energiministeriet.
- Miljø- og Energiministeriet (2001): Lovbekendtgørelse nr. 753 af 25. august 2001 om Bekendtgørelse af lov om miljøbeskyttelse. Miljø- og Energiministeriet.
- Miljøstyrelsen (1995-2002): Affaldsstatistik. Opsummering af danske affaldsmængder; udkommer typisk året efter det opgjorte år i form af en orientering. Miljøstyrelsen.
- Møller, H.; Pedersen, N.M. (2001): Undersøgelse af nøjagtighed ved prøvetagning af modnet, harpet slagge fra et affaldsfyret anlæg. Elsam A/S, I/S Amagerforbrænding. Notat for DAFONET.
- Pedersen, N.M.; Møller, H. (2003): Undersøgelse af variabilitet af modnet, harpet slagge fra forbrændingsanlæg. I/S Amagerforbrænding, Elsam A/S. Notat for DAFONET.

Pihl, K.A.; Milvang-Jensen, O. (2002): Bundsikringslag af forbrændingsslagge. Rapport 118. Vejteknisk Institut, Vejdirektoratet.

Sabbas, T.; Poletini, A.; Pomi, R. Astrup, T.; Hjelmar, O.; Mostbauer, P.; Cappai, G.; Magel, G.; Salhofer, S.; Speiser, C.; Heuss-Assbichler, S.; Klein, R.; Lechner, P. (2003): Management of municipal solid waste incineration residues. Waste Management, 23, 61-88.

Sander, B. (2002): Affaldsforbrænding. Efterbehandling af slagge - Slutrapport for Eltra PSO-projekt nr. 1991. Tech-wise.

Skaarup, J. (2001): Udvikling i udvaskning fra lagret råslagge fra I/S Vestforbrænding ovn 5. AFATEK A/S.

Bilag 1: Deltagere i slaggeseminar d. 20. maj 2003 på DTU

AFATEK A/S	Jørgen Skaarup Jens Boddum
Babcock & Wilcox Vølund	Erhardt Mogensen
DHI – Institut for Vand og Miljø	Ole Hjelmar Jette Bjerre Hansen Dorthe L. Baun Christian Grøn
dk-TEKNIK	Susanne Westborg
Elsam A/S Affald & Energi	Frits Unold
Elsam A/S	Bo Sander Svend Aage Jensen Hans Møller Charles Nielsen
I/S Amagerforbrænding	Uffe Juul Andersen Henrik Birch Niels Møller Pedersen
I/S Reno-Nord	Henrik Skovhaug,
I/S Vestforbrænding	Henrik Ørnebjerg Kim Crillesen Kirsten Bojsen
Institut för Geoteknologi, Lund	Peter Flyhammar
Miljø & Ressourcer DTU	Thomas H. Christensen Thomas Astrup Harpa Birgisdottir Christian Riber
RAMBØLL	Tore Hulgård
RGS 90 A/S	Karsten Ludvigsen
Sekretariat for Aluminium & Miljø	Jim Hansen
SGL, Malmö	David Bendz
SYSÄV, Malmö	Raul Grönholm Tommy Nyström
Sønderborg Kraftvarme I/S	Jens Chr. Hansen
Tech-wise A/S	Michael Johansen Jesper Staal
Vejteknisk Institut, VD	Knud A. Pihl
Aalborg Portland	Dirch H. Bager
Århus Kommunale Værker	Erik Damgaard Hanne Rasmussen Preben Stjernholm

Bilag 2: Udviklingsprojekter

- A JAWA-1: Sygehusaffald og slaggens hygiejnekvalitet på I/S Amagerforbrænding
- B JAWA-2: Sempel slaggevask med og uden tilsætning af natriumbikarbonat
- C Nøjagtighed ved prøvetagning af slagge fra affaldsfyret forbrændingsanlæg
- D Udvikling i udvaskning fra lagret råslagge fra I/S Vestforbrænding
- E Demonstrationsplads for slaggeanvendelse
- F Ferrox-stabilisering af slagge fra affaldsforbrændingsanlæg
- G C-RES Restprodukt-database med data for slagge fra affaldsforbrændingsanlæg
- H Stabilisering af slagge fra affaldsforbrænding ved vask, separation og lagring
- I Teknisk og økonomisk vurdering af anlæg for udsortering af ikke jernmetaller
- J Mulighed for vask af slagge fra affaldsforbrænding før genanvendelse
- K Kornstørrelsessortering af slagge
- L Kvalitet af slagge fra forbrændingsanlæg
- M Livscyklusvurdering af slaggegenanvendelse i vejbygning
- N Modellering af udvaskning fra slagge
- O Efterbehandling af slagge
- P Separation af affaldsforbrændingsslagge for optimeret udnyttelse af slaggefraktioner
- Q Udvasning af kobber og organisk stof fra slagge
- R Udvasning fra slagge i cement-stabiliserede bundsikrings- og bærelag
- S Marin anvendelse af slagge fra affaldsforbrændingsanlæg
- T Kvalitetsforbedring gennem lagring og vask med CO₂ i slaggeslukningen

Projekt	A
Projekttitel	JAWA-1: Sygehusaffald og slaggens hygiejnekvalitet på I/S Amagerforbrænding
Projektperiode	2001 - 2002
Forfatter	Erhardt Mogensen, Babcock & Wilcox Vølund
Kontakt	em@volund.dk
Finansiering	I/S Amagerforbrænding, Babcock & Wilcox Vølund
Rapporter	Ingen

Formål

Målet for JAWA-1 forsøgene var at undersøge hvilken indflydelse genindfyring af ristegennemfaldet har på slaggens hygiejnekvalitet.

Udført arbejde

Om formiddagen på hverdage samforbrænder I/S Amagerforbrænding sygehusaffald (klinisk risikoaffald) med det øvrige blandede husholdnings- og industriaffald.

Prøver af ristegennemfald og slagge blev udtaget til mikrobiologisk analyse for smittekim og bakterier på levnedsmiddellaboratorium om morgenen før sygehusaffald blev indfyret og igen midt på formiddagen samtidig med indfyring af sygehusaffald. Prøverne blev udtaget hver dag i fire uger; i alt blev udtaget 40 prøver. Der blev desuden undersøgt betydningen af vandtemperaturen i ristegennemfalds- og slaggetransportørerne

Efterfølgende gennemførte Statens Seruminstitut en smitterisiko-undersøgelse af ristegennemfaldet under indfyring af sygehusaffald, bl.a. ved indfyring af mærkede og smittekim-podede injektionskanyler.

Hovedresultater

Mikrobiologisk undersøgelse

Der blev ikke fundet spor af kolibakterier eller salmonella i nogen af de 40 prøver hverken med eller uden sygehusaffaldsindfyring. Enterococcer blev konstateret i én af forsøgsugerne, men i gennemsnit med kun 60 bakterier pr. gram i slaggen før der blev indfyret sygehusaffald og med 20 bakterier pr. gram i ristegennemfaldet mens der blev indfyret sygehusaffald.

Der fandtes meget små mængder af clostridium perfringens bakterier i nogle af prøverne og der kunne måles meget små mængder smittekim i alle prøverne, men der kunne ikke konstateres klar forskel i nogen retning når der blev indfyret sygehusaffald sammenlignet med normal drift uden sygehusaffald. Den højeste målte clostridium perfringens værdi lå på 5 bakterier pr. gram hvilket er 0,5 % af den tilladte mængde i varmebehandlet pålæg.

Den første af de fire forsøgsuger kørtes der med vandtemperatur 60-65 °C i ristegennemfalds- og slaggetransportørerne og i de tre efterfølgende forsøgsuger med vandtemperatur 70-75 °C. Effekten af dette kunne konstateres på kintals-værdierne idet der ved 60-65 °C målttes cirka 7000 kim pr. gram slagge og cirka 4000 kim pr. gram ristegennemfald i gennemsnit. Ved forsøgskørslerne med 70-75 °C målttes tilsvarende cirka 1000 kim pr. gram slagge og cirka 800 kim pr. gram ristegennemfald i gennemsnit.

Seruminstituttets risikoundersøgelse

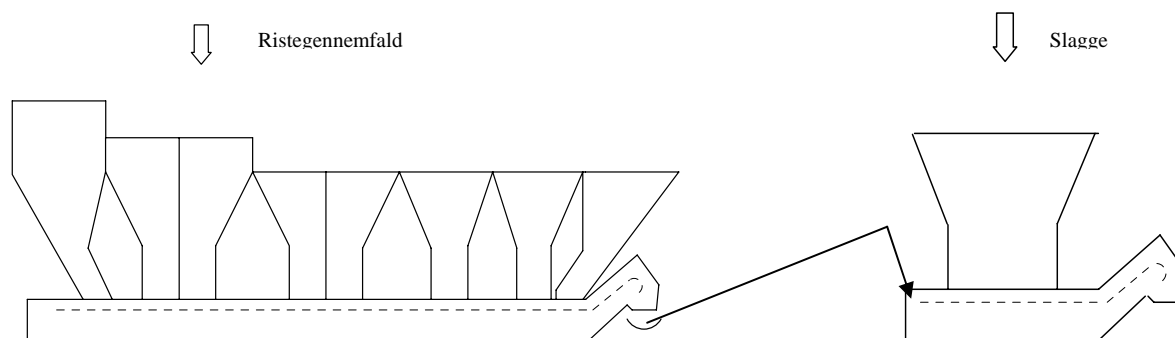
1400 mærkede injektionskanyler blev indfyret sammen med sygehusaffaldet via sideindfyringsslidsken over rist 3 i ovnen der er udstyret med i alt 8 riste. Det blev registreret at antallet af genfundne mærkede kanyler i ristegennemfaldet under rist 3 - 8 var cirka 20 % og at fordelingen af genfundne mærkede kanyler under hver rist stemte overens med fordelingen for alle øvrige genfundne kanyler fra sygehusaffaldet.

Herefter blev 1960 mærkede og podede kanyler indfyret sammen med sygehusaffaldet. Hver af kanylerne var podet med 5×10^6 bacillus subtilis sporer. De genfundne kanyler blev undersøgt på Dansk Seruminstitut hvor det kunne konstateres at de tilsatte sporer var blevet reduceret til under 10^{-6} i de indfyrede kanyler i forhold til startantallet.

Under drift er vandets $\text{pH} \geq 12$ i ristegennemfalds- og slaggetransportøren. Statens Seruminstitut undersøgte derfor dette stærkt forurenede og basiske vands evne til at dræbe enterococcus faecalis vegetative celler ved 65°C og 80°C . I begge tilfælde blev de vegetative celler reduceret til under 10^{-5} i forhold til startantallet.

Konklusion

Resultatet af JAWA-1 forsøgene er blevet at ristegennemfaldet i dag hældes direkte i slaggen og at genindfyring af ristegennemfald til ovnen er stoppet når sygehusaffald indfyres gennem ovnens sideindfyringsslidske. Hvis sideindfyringen er ude af drift kan hospitalsaffaldet midlertidigt indfyres sammen med det almindelige affald - uden genindfyring af ristegennemfald - mod at vandtemperaturen styres præcist til en høj temperatur.



Figur 1. Skitse af opsamling af ristegennemfald og slagge, Amagerforbrænding.

Projekt	B
Projekttitel	JAWA-2: Simpel slaggevask med og uden tilsætning af natriumbikarbonat
Projektperiode	2001 - 2002
Forfatter	Erhardt Mogensen, Babcock & Wilcox Vølund
Kontakt	em@volund.dk
Finansiering	I/S Amagerforbrænding, Babcock & Wilcox Vølund
Rapporter	Ingen

Formål

Målet for JAWA-2 forsøgene var at undersøge om slaggens kvalitet forbedres ved en simpel vask og at undersøge om slaggens kvalitet forbedres ved tilsætning af NaHCO_3 i forbindelse med en simpel vask.

Udført arbejde

Slaggeforsøgsoversigt

Der blev udført fem 7-døgns forsøg hvor 2-4 kg slagge og en slaggevandsprøve blev udtaget hver 8. time. Slaggen blev opsamlet i én tønde for hver af de fem uger. Slaggevandsprøverne blev straks filtreret og hældt i helt fyldte prøveglas m. skruelåg.

Slaggekølesystemet og ristegennemfaldsopsamlingsystemet på AF's linie 4 består af to stållamel transportører neddykket i hver sit bassin med et samlet vandvolumen på ca. 30 m³. Der tilsættes under normal drift vand svarende til den mængde, der fjernes med den våde slagge og fordampning samt med et overløb til gulvafløb på 2-4 m³ i timen.

I slaggetransportøren blev der i de fem uger kørt henholdsvis uden vandudskiftning (A) og med vandudskiftning (B og C) og der blev i vandudskiftningsforsøgene kørt henholdsvis uden kemikalietilsætning (B) og med kemikalietilsætning (C.1, C.2 og C.3) som følger:

- Uden overløb dvs. der tilsattes kun vand svarende til det der fjernes med den våde slagge og fordampning.
- Vandtilførsel blev øget i retning af normal drift, men så der var et overløb på slaggesystemet svarende til L/S 1 l/kg. Derved opnåedes en simpel vask i slaggesystemet. Ved forbrænding af 15 tons affald i timen svarede det til, at der var et overløb på 1,5 - 2 tons vaskevand i timen. Det tilførte vand var drikkevand.
- Svarer til B, men til vandet blev der tilsat natriumbikarbonat, NaHCO_3 (bagepulver), som bevirker at især CaCO_3 fældes og at noget sulfat skulle frigøres fra slaggen og føres bort med vaskevandet. C.1. 5 gram, C.2. 10 gram og C.3. 15 gram NaHCO_3 pr. kg slagge.

Tilberedning af slaggeprøver før analyse

Slaggetønderne blev afleveret til DHI umiddelbart efter hvert 7-døgns forsøg. Erfaringen viser, at det er irrelevant at lave udvaskningstests på frisk slagge pga. den høje pH, som påvirker udvaskningen. Efter almindelig håndtering af slaggen (harpning og midlertidig lagring) reduceres pH som regel. For at simulere dette har DHI ældet slaggeprøverne under kontrollerede forhold udendørs før analyse ved beluftning, befugtning og overdækket. Der blev ikke dannet perkolat under ældningen.

Efter 2 - 3 måneders kontrolleret ældning var pH på alle 5 prøver (hver ca. 25 kg, < 45 mm) faldet til omkring pH 10 (se tabel 1) og karbonatiseringen var formodentlig pænt fremskreden svarende til den karbonatisering slaggen har undergået, når slaggen anvendes som bundsikring ved vejbyggeri.

Fra hver af de fem 25 kg slaggebunker blev der udtaget 3 stk. prøver á 3 kg. Der er således udført udvaskningstests på 3 delprøver fra hvert af de fem 7-døgns forsøg, herudfra er middelværdi og standardafvigelse på resultaterne fra hvert af 7-døgns forsøgene beregnet. På de 3 delprøver fra hvert

af de fem 7-døgns forsøg er der desuden lavet en DS 259 bestemmelse af tungmetallindholdet jævnfør bekendtgørelsens krav.

Forlænget ældning

Efter udtagning af ovennævnte 3 x 5 slaggeprøver til analyse fortsatte den kontrollerede ældning hos DHI udendørs på resten af slaggen bortset fra C1. Ud over ovennævnte 2 - 3 måneders ældningsresultater er der således også 7 - 8 måneders ældningsresultater på fire af 7-døgns-forsøgene. Resultaterne er vist i tabel 1. Efter 7 - 8 måneders ældning var pH på disse fire slaggeprøver faldet til mellem 8,2 og 8,9.

Hovedresultater og konklusion

Salte i vaskevandet

En simpel vask ved L/S 1 l/kg i slaggesystemet, fjerner klorid fra slaggen idet overløbsvandets kloridindhold er ca. 1200 mg/l. Dette øges til 1300 - 1500 mg/l ved NaHCO₃ tilsætning.

Overløbsvandets natriumindhold på 500 - 800 mg/l stiger - ikke overraskende - ligefrem proportionalt med tilsætningen af NaHCO₃ til ca. 3600 mg/l ved højeste dosering (C.3).

Overløbsvandets sulfatindhold på 200 mg/l ved vandtilsætning 1:1 stiger til 1200 mg/l ved tilsætning af 10 gram NaHCO₃ pr. liter og til 1600 mg/l ved 15 gram. Dette bekræftes af S-total analyserne idet overløbsvandets total-S på ca. 100 mg/l stiger til ca. 500 mg/l ved tilsætning af 10 gram NaHCO₃ pr. liter og til 700 mg/l ved 15 gram.

Sulfatudvaskning fra slaggen

Som anført ovenfor vaskes der en øget mængde sulfat ud af slaggen ved tilsætning af NaHCO₃, men dette kan ikke aflæses på udvaskningsanalyserne på selve slaggen (se tabel 1). Resultaterne af udvaskningstesten er klare: Tilsætning af NaHCO₃ under slaggekølingen i en vådtransportør har ingen effekt på sulfatudvaskningen fra ældet slagge, dvs slagge som er lagret 2-3 måneder under beluftning og befugtning til pH ≤10. Uanset om slaggen har været vasket ved L/S 1 og tilsat NaHCO₃ er sulfatudvaskningen fra slaggen ca. 1000 mg/l i gennemsnit - og med 95 % 's sandsynlighed < 1600 mg/l - uanset om der er tilsat NaHCO₃ eller ej.

Udvaskning og forlænget ældning

Kontrolleret forlænget slaggeældning til i alt 7-8 måneder forøger sulfatudvaskningen betragteligt til typisk 1700 - 1800 mg/l og altså op til cirka 50 % af bekendtgørelsens øvre grænse for kategori 3 slagge. Natriumudvaskningen reduceres derimod en anelse. Kloridudvaskningen fra slaggen reduceres også og slaggen, der var blevet tilsat 10 - 15 gram NaHCO₃ per kg når ned omkring bekendtgørelsens øvre grænse for kategori 2 slagge med en kloridudvaskning på 150 mg/l.

Kromudvaskning

Resultaterne viser, at kromudvaskningen fra slaggen reduceres markant ved tilsætning af 10 - 15 gram NaHCO₃ per kg slagge under en simpel vask. Kromudvaskningen fra en vasket slagge er 300 µg/l i gennemsnit - og med 95 % 's sandsynlighed < 500 µg/l hvilket er bekendtgørelsens øvre grænse for kategori 3 genanvendelse. Dette ses efter 2-3 måneders ældning. En længere ældningstid (7-8 måneder) resulterer i at kromudvaskningen falder fra 300 µg/l til ca. 20 µg/l. Hvis der tilsættes 10 - 15 gram NaHCO₃ per kg slagge under vask falder kromudvaskningen til kun 10 µg/l efter 2-3 måneders ældning og den halveres yderligere ved ældning til 7 - 8 måneder.

Uden vask er kromudvaskningen på 40 µg/l i gennemsnit - og med 95 % 's sandsynlighed < 65 µg/l. Ved forlænget ældning falder kromudvaskningen fra 40 µg/l til ca. 5 µg/l.

Kobberudvaskning

Resultaterne viser en nøje sammenhæng mellem kobber-udvaskning fra slaggen og udvaskningsvandets indhold af opløst organisk kulstof DOC (dissolved organic carbon). F.eks

Tabel 1. Resultater af batchudvaskningstest (prEN 12457-3, del 1) på slaggeprøver lagret i 2-3 og 7-8 måneder givet som en middelværdi $\pm 2 \times$ standardafvigelsen. Desuden er slaggebekendtgørelsens øvre grænseværdier for kategori 2 og 3 medtaget.

		A		B		C1	C2		C3			
Ældet (mdr.)		2-3	7-8	2-3	7-8	2-3	2-3	7-8	2-3	7-8	Kat. 2	Kat. 3
pH		10,0 $\pm 0,4$	8,7	9,8 $\pm 0,4$	8,8	9,8 $\pm 0,3$	9,8 $\pm 0,6$	8,2	9,7 $\pm 0,4$	8,6		
DOC	mg/l	100 ± 18	31	23 ± 3	11	25 ± 12	18 ± 6	8,5	20 ± 3	0,7		
Klorid	mg/l	900 ± 152	920	490 ± 114	280	280 ± 90	230 ± 70	130	190 ± 62	170	150	3000
Sulfat	mg/l	1200 ± 116	1800	920 ± 330	1800	870 ± 220	960 ± 420	1500	1200 ± 240	1700	250	4000
Ca	mg/l	460 ± 34	710	270 ± 380	710	260 ± 34	580 ± 72	470	360 ± 170	520	-	-
Na	mg/l	560 ± 40	540	330 ± 84	200	290 ± 100	560 ± 110	180	300 ± 104	280	100	1500
As	$\mu\text{g/l}$	2,3 $\pm 1,2$	2,2	1 ± 0	1,0	< 0,9 $\pm 0,2$	< 0,9 $\pm 0,2$	1,7	0,9 $\pm 0,2$	2,0	8	50
Cd	$\mu\text{g/l}$	0,6 $\pm 0,12$	0,3	0,7 $\pm 0,6$	0,2	0,4 ± 0	0,6 $\pm 0,6$	0,5	0,3 $\pm 0,2$	0,2	2	40
Cr	$\mu\text{g/l}$	39 ± 24	5	310 ± 220	18	70 ± 132	8 ± 5	2	6,3 $\pm 5,0$	3	10	500
Cu	$\mu\text{g/l}$	1900 ± 700	580	340 ± 162	110	410 ± 600	160 ± 64	60	230 ± 240	80	45	2000
Ni	$\mu\text{g/l}$	9,7 $\pm 3,0$	11	< 3,3 $\pm 2,4$	2	< 3,3 $\pm 2,4$	< 3,7 $\pm 1,2$	4	2 ± 0	3	10	70
Pb	$\mu\text{g/l}$	9,5 $\pm 6,2$	3	11 ± 34	2	2,0 ± 0	13 ± 38	2	1,3 $\pm 1,2$	2	10	100
Zn	$\mu\text{g/l}$	< 10 ± 0	10	< 47 ± 128	< 10	< 10 ± 0	< 140 ± 460	< 10	< 10 ± 0	10	100	1500

ledsages en kobberudvaskning på 1900 $\mu\text{g/l}$ af en DOC på 100 mg/l og en udvaskning på 350 $\mu\text{g/l}$ ledsages af en DOC på ca. 25 mg/l.

Resultaterne viser herudover, at kobberudvaskningen fra slaggen reduceres markant ved at vaske slaggen ved L/S 1 i slaggetransportøren og at kobberudvaskningen fra slaggen reduceres betydeligt ved at forlænge slaggens ældningsperiode.

Uden vask er kobberudvaskningen på 1900 $\mu\text{g/l}$ i gennemsnit - og med bekendtgørelsens øvre grænse på 2000 $\mu\text{g/l}$ for kategori 3 genanvendelse er denne høje kobberudvaskning problematisk. Ved en længere ældningsperiode (7 - 8 måneder) falder kobberudvaskningen fra 1900 $\mu\text{g/l}$ til ca. 600 $\mu\text{g/l}$.

En vask giver en kobberudvaskning på 350 $\mu\text{g/l}$ i gennemsnit - og med 95 % 's sandsynlighed < 500 $\mu\text{g/l}$. Tilsætning af 10 - 15 gram NaHCO_3 per kg slagge under vasken reducerer kobberudvaskningen til ca. 200 $\mu\text{g/l}$ i gennemsnit, men da bekendtgørelsens øvre grænse for kategori 2 er på kun 45 $\mu\text{g/l}$ giver dette ikke umiddelbart mulighed for nemmere genanvendelse af slaggen i praksis. Forlænget ældning til 7 - 8 måneder reducerer kobberudvaskningen fra vasket slagge fra ovennævnte 350 $\mu\text{g/l}$ til ca. 100 $\mu\text{g/l}$ og kobberudvaskningen på ovennævnte 200 $\mu\text{g/l}$, hvis der tilsættes NaHCO_3 under vasken reduceres tilsvarende til ca. 70 $\mu\text{g/l}$ i gennemsnit og kommer således tæt på kategori 2 kravet.

Blyudvaskning

Pb-udvaskningen er beskeden selv om Pb-indholdet i slaggen typisk ligger på ca. 50 % af en mulig fremtidig Pb-grænseværdi for farligt affald på 2500 mg/kg. Når der i slaggetransportøren vaskes ved L/S 1 vil totalindholdet af Pb med 95 % 's sandsynlighed ligge under 2000 mg/kg og dermed sikkert

under 2500 mg/kg. Uden vask af slaggen viser resultaterne imidlertid, at Pb-indholdet svinger voldsomt mellem analyserne, så der kun er 65 % 's sandsynlighed for at indholdet bestemt ved DS259 ligger under 2500 mg/kg. Det vil kræve et relativt omfangsrigt datagrundlag for sikkert at afgøre om Pb-indholdet er over eller under 2500 mg/kg, hvilket er en svaghed ved den valgte analyse og forstyrrende for diskussion om Pb-indhold og Pb-udvaskning for forbrændingsslagge.

Projekt	C
Projekttitel	Nøjagtighed ved prøvetagning af slagge fra affaldsfyret forbrændingsanlæg
Projektperiode	2000 - 2003
Forfatter	Niels Møller Pedersen, I/S Amagerforbrænding Hans Møller, Elsam A/S, Kemi & Miljø
Kontakt	Niels Møller Pedersen: nmp@amfor.dk, tlf. 3268 9351 Hans Møller: hm@elsam.com, tlf. 9954 5302
Finansiering	DAFONET i samarbejde med I/S Amagerforbrænding og AFATEK A/S
Rapporter	Undersøgelse af nøjagtighed ved prøvetagning af modnet, harpet slagge fra et affaldsfyret anlæg. Nov. 2001. Undersøgelse af variabilitet af modnet, harpet slagge fra forbrændingsanlæg. Jan. 2003.

Formål

Energi- og Miljøstyrelsens bekendtgørelse nr. 655 af 27/6/2000 "Bekendtgørelse om genanvendelse af jord og restprodukter til bygge- og anlægsarbejder" anviser grænseværdier og metode til prøvetagning og analyse af slagge. For at planlægge en velegnet prøvetagningsstrategi er det nødvendigt, at kende variabiliteten af slaggen. Med kendskab til variabiliteten kan desuden udarbejdes kontrolregler for klassificering efter bekendtgørelsen.

Udført arbejde

Der blev i juli 2001 foretaget prøvetagning af lagret, sorteret slagge på Amagerforbrænding ved forskellige metoder, manuelt i henhold til bekendtgørelsen, mekanisk i henhold til anerkendt metode for prøvetagning og manuelt efter anerkendt referencemetode. På baggrund af analyseresultaterne blev bestemt designparametre for mekanisk prøvetager og bestemt usikkerheder på prøvetagning, prøveopberedning og laboratoriets prøveforberedelse og analyse.

I september 2002 blev undersøgelsen suppleret med prøvetagning af slagge fra tre andre forbrændingsanlæg på AFATEK's oparbejdningsplads på Ydernæs ved Næstved. Der blev udtaget prøver efter manuel referencemetode og resultaterne blev anvendt til at bestemme variabilitet på delprøverne og dimensioneringsgrundlag for prøvetagningsplan til opnåelse af en given nøjagtighed.

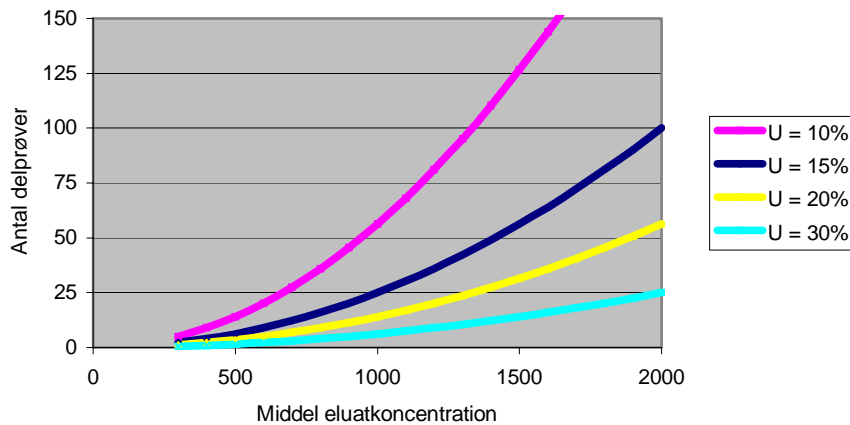
Hovedresultater

Af de undersøgte parametre er måling af sulfat, krom og kobber behæftet med størst usikkerhed. For disse parametre varierer den relative usikkerhed på en måling, hvor der er udtaget 20 delprøver fra 32 % til 88 %. Eluatets pH og ledningsevne bestemmes med en usikkerhed på henholdsvis 5 og 10 %. Usikkerheden reduceres mærkbart ved nedknusning af den udtagne prøve inden neddeling til 5 kg.

Brug af manuel prøvetagning af slagge kan medføre store systematiske fejl. Formentlig på grund af, at de manuelt udtagne prøver har en kornstørrelsesfordeling, der ikke er repræsentativ.

For prøvetagningen på Amagerforbrænding kunne bestemmes usikkerhed på prøveudtagningen, prøvetilberedningen, analysen og dermed den samlede usikkerhed på resultatet. Den relative usikkerhed, hvor den udtagne prøve indeholder 20 delprøver og der laves én analyse af prøven, blev bestemt.

På baggrund af resultaterne fra prøvetagningen på Ydernæs kan beregnes det antal delprøver der skal tages for at opnå en given nøjagtighed. Antallet gælder under forudsætning af at usikkerheden ved prøvetilberedningen minimeres ved at nedknuse prøven til en kornstørrelse på 10 mm før neddelingen og derefter benytte mekanisk neddeling til en slutprøve på 5 kg.



Figur 1. Antal delprøver, der skal udtages til klassifikation af en slagge som kategori 3 med en given sikkerhed, med hensyn til kobber analysen, afhængig af middelkoncentrationen af den pågældende slagge.

Konklusion

Hovedkonklusionerne fra de to gennemførte undersøgelser kan sammenfattes således:

- Lagret og sorteret slagge er generelt et meget inhomogent materiale. Inhomogeniteten, udtrykt ved variansen af delprøverne, stiger kraftigt med stigende eluatkoncentration.
- Analysen for kobber er behæftet med den største usikkerhed.
- Slagge der er lagret i 3 måneder eller mere, er ikke nødvendigvis stabiliseret. Efter udtagning og yderligere homogenisering kan der efter 3 ugers henstand ske ændringer i slaggens udvaskningsegenskaber.
- Under forudsætning af mekanisk prøveudtagning og nedknusning inden neddeling til 5 kg prøve kan eluatkoncentrationen af kobber bestemmes med følgende nøjagtighed:
 - Kategori 2 slagge: Analyseværdi $\pm 20 \mu\text{g/l}$ svarende til en relativ usikkerhed på ca. 45 %. Hvis analyse nøjagtigheden skal forbedres, skal det ske i prøvetilberedningen og analysen.
 - Kategori 3 slagge: Analyseværdi $\pm 300 - \pm 600 \mu\text{g/l}$ afhængig af antal delprøver. Ved udtagning af 50 delprøver har den udtagne prøve en usikkerhed på $\pm 400 \mu\text{g/l}$ svarende til en relativ usikkerhed på 20 %.

Projekt	D
Projekttitel	Udvikling i udvaskning fra lagret råslagge fra I/S Vestforbrænding
Projektperiode	2000 - 2001
Forfatter	Jørgen Skaarup, AFATEK A/S
Kontakt	Jørgen Skaarup: mail@afatek.dk, tlf. 4634 7700
Finansiering	AFATEK A/S
Rapporter	Intern rapport

Formål

At følge udviklingen i udvaskning under normal lagring af slaggen på pladsen i Holme Olstrup. Projektet blev koordineret med en mere systematisk undersøgelse foretaget ved DHI.

Udført arbejde

Alle prøver udtaget af AFATEK blev udført som stikprøver ved at en gravemaskine blev kørt op på toppen af bunken og gravede et hul på prøvetagningsstedet. Prøvetagningen af bunke 8 blev udført den 11. december 2000 og den 1. marts 2001 for den lagrede råslagge (AFATEK) og den 6. marts og 29. maj 2001 for den harpede slagge (dk-TEKNIK).

Ved den første prøvetagning den 11. december 2000 blev taget stikprøver cirka 3,5 meter oppe i bunken det vil sige fra bunden af cirka 1, 5 meter dybe udgravninger fra toppen af bunken. De tre steder blev fastsat i tid til cirka 10/10 (62 dages lagring), cirka 27/10 (45 dages lagring) og cirka 20/11 (21 dages lagring).

De fem udtagne stikprøver er sammenlignet dels med den løbende kontrol af bunke 8 udtaget på Vestforbrænding (0 - 60 dage og 0 til 30 dage) dels med kontrolprøver af den harpede slagge efter 148 og 183 dage.

Al forbehandling er udført af dk-Teknik og analyserne er foretaget ved dk-teknik's foranstaltning på af SWEDAC akkrediteret laboratorie under registreringsnummer 1087.

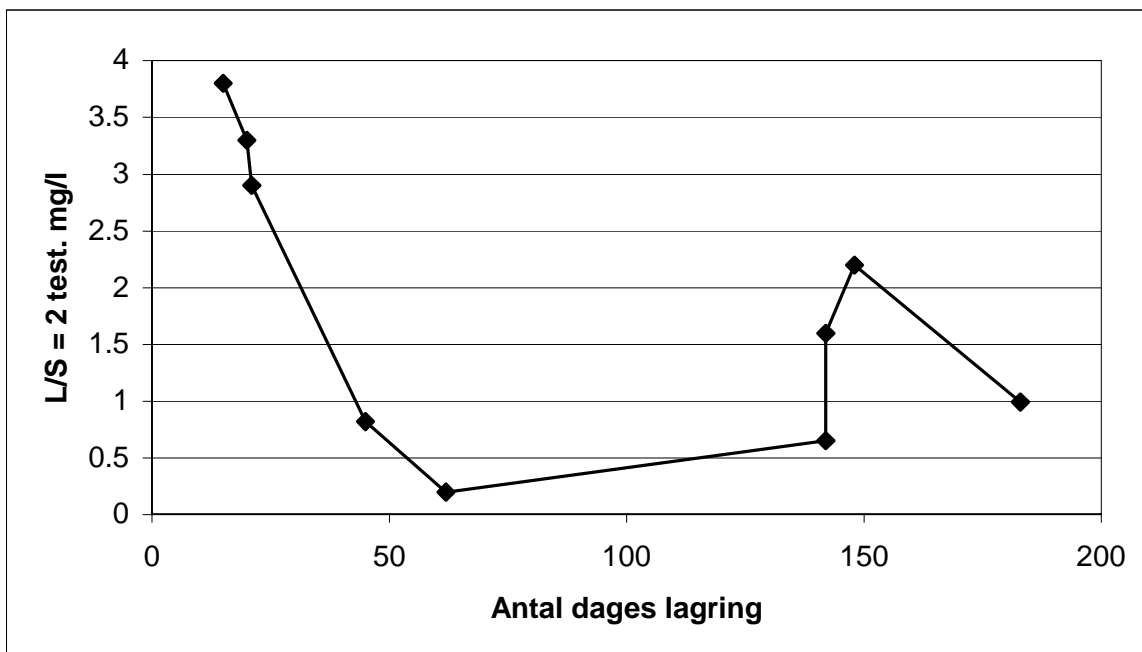
Hovedresultater

Totalindholdet i slaggen er vist i tabel 1 som gennemsnitsværdier. Udvasningen er bestemt ved L/S 2 jf. Bekendtgørelse nr 655 af 27. juni 2000. Data for kobber er vist i figur 1.

Tabel 1. Gennemsnit og standard afvigelse af totalindhold i slagge fra oven 5 bunke 8.

Statistiske parametre for målt total indhold i alle 9 prøver				
Parameter	Enhed	N vægtet middelværdi	Standard afvigelse	Std.Avg. i % af Φ
Arsen	mg/kg	13	2,7	21
Cadmium	mg/kg	2,5	0,77	31
Krom	mg/kg	100	9,1	9
Kobber	mg/kg	4500	1370	31
Kviksølv	mg/kg	-	-	-
Nikkel**	mg/kg	116	26	22
Bly	mg/kg	1500	440	29
Zink	mg/kg	2600	450	17

** For nikkel er én ekstrem værdi i kontrolprøverne udeladt i den statistiske behandling.



Figur 1. Kobberudvaskning som funktion af lagring (VF Ovn 5, bunke 8 2000).

Konklusion

Det må konkluderes, at den nuværende procedure for prøvetagning giver reproducerbare resultater for totalindhold med en standard afvigelse ((n-1) vægtet) på op til cirka 30 %.

Det er i denne undersøgelse bekræftet, at der ingen sammenhæng er mellem det totale indhold af et stof og udvaskningen af det samme stof.

Resultater med en prøvetagning i henholdsvis 1,5 og 3,5 meter dybde bekræfter, at der er sket en nedvaskning af salte og metaller mod bunden af bunken under lagring.

Bortset fra kobber og krom når udvaskningen af alle metaller et niveau svarende til kategori 1 i Miljøstyrelsens bekendtgørelse efter 21 dages lagring. Krom ligger i kategori 3 en faktor 6 - 8 over kategori 1, mens kobber har svært ved at komme i kategori 3.

Slaggen fra ovn 5 var først efter 183 dages lagring i stand til at opfylde alle krav til bekendtgørelsens lempeligste kategori 3. Den problematiske faktor var udvaskning af kobber i L/S = 2 testen på mere end 2 mg/l.

Der er derfor især behov for at undersøge hvilke faktorer, der betinger en reduktion af udvaskningen af kobber. På længere sigt skal undersøges om udvaskningen af både kobber og krom kan bringes ned til det krævede niveau for kategori 1, således at slaggen kan deklareres i kategori 2, hvilket så kun er betinget af slaggen's høje totale indhold af metaller med mere.

Projekt	E
Projekttitel	Demonstrationsplads for slaggeanvendelse
Projektperiode	2002 – 2005
Forfatter	Kim Crillesen, I/S Vestforbrænding Ole Hjelmar, DHI - Institut for Vand og Miljø
Kontakt	Kim Crillesen: kc@vestfor.dk, tlf. 4485 7284
Finansiering	Danske forbrændingsanlæg (DAFONET)
Rapporter	Ingen

Formål

For at undersøge den reelle påvirkning af omgivelserne ved anvendelsen af slagge under pladser og veje har DAFONET (Danske Forbrændingsanlægs Netværk) etableret en demonstrationsplads på Ydernæs ved Næstved. Hensigten er blandt andet at foretage en validering af de forudsætninger, data og modelberegninger, der indgår i Miljøstyrelsens risikovurderinger, som ligger til grund for kriterierne i den nye bekendtgørelse nr. 655 af 27. juni 2000, har DAFONET iværksat et demonstrationsprojekt i fuld skala.

Udført arbejde

Demonstrationspladsen der består af 6 mindre pladser hvoraf 4 har en overflade på ca. 100 m², mens 2 har en overflade på ca. 200 m² er anlagt, og selve undersøgelsesfasen, der har en varighed på 3 år er påbegyndt ultimo oktober 2002. I alle pladser er der udlagt 50-70 cm slagge kompakteret ad 3 gange i lag à ca. 20 cm tykkelse, på samme måde som slagge normalt udlægges som bundsikringslag under veje. Der er anvendt slagge fra 3 forskellige forbrændingsanlæg. Alle pladser med undtagelse af én er udstyret med LPDE plastmembran i bunden af pladsen med et ovenliggende drænlag, samt pumper og brønde til opsamling af perkolat.

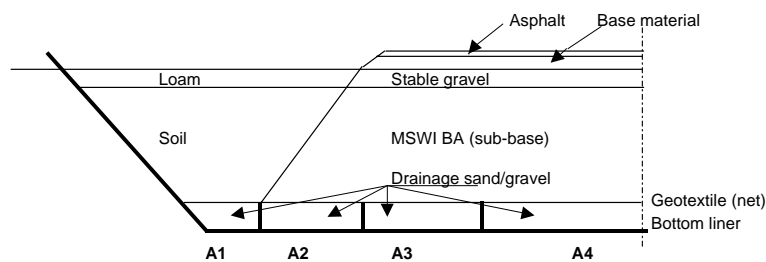
3 af pladserne er kun dækket med grus med henblik på at forøge infiltrationen og perkolationen af slaggelaget. Formålet er at undersøge kildestyrken af forureningskomponenterne som funktion af tid og L/S. To andre pladser har overfladebelægninger af henholdsvis SF-sten og asfalt. Formålet er at undersøge nedsivningsreduktionsfaktoren for henholdsvis flisebelægning (sten) og asfalt, samt at undersøge randeffekter ved nedsivning af afstrømmet overfladevand fra vejprofilen.

Den sidste plads er konstrueret uden bundmembran. Formålet er at undersøge forureningsvolumenet i den sekundære aquifære. Forureningsfanen søges registreret og påvist ved analyse af grundvandsprøver fra de 5 grundvandsboringer placeret nedstrøms feltet.

Indretning af pladser

For at undersøge randeffekter nærmere er bundmembranen under plads felt (A) med asfaltbelægning inddelt i flere separate sektioner jf. tegning, figur 1.

A1 opsamler nedsivende vand der ikke har passeret slaggelaget, A2 vand der har passeret både



Figur 1. Tværsnit af nedstrømsenden af plads felt (A) med asfaltbelægning, der viser inddelingen af bundmembranen og perkolatopsamlingssystemet i separate sektioner.

jord og slagge, A3 vand, der har sivet horisontalt ind under asfaltlaget, der slutter i skellet mellem A2 og A3. A4 er det store midterfelt under asfalten, som i princippet opsamler vand, der er sivet igennem asfaltlaget.

De øvrige pladser på nær plads F (B, C, D, E) er indrettet med et stort midterfelt og to randfelter, bestående af de to opstrøms randfelter og de to nedstrøms randfelter henholdsvis. Plads felt (F) har ingen bundmembran. Bunden af pladserne er udført med hældning. Perkolatet (infiltreret regnvand, der har perkoleret slaggelaget ned til bundmembranen) opsamles i de forskellige membransektioner, hvorfra det via gravitation ledes gennem en vandlås til en pumpebrønd. Inden bortledning registreres mængden af vand fra hver enkelt perkolat-opsamlings-sektion fra alle pladserne separat ved hjælp af vandmåler samt ved registrering af antallet af pumpestarter og pumpetid. Dataene opsamles og lagres i en computer og videresendes elektronisk til DHI med passende mellemrum. Endvidere opsamles data for nedbør og øvrige vejrdata. Der bliver med jævne mellemrum foretaget analyser af perkolatet samt af vandprøverne fra grundvandsboringerne nedstrøms plads felt (F).

Hovedresultater

Der er foretaget registrering af vandmængder og nedbør for de første 3 måneder af pladsens levetid. Endvidere er der foretaget kemiske undersøgelser af slaggeprøver fra alle 6 pladsafsnit, herunder udvaskningstest.

Resultaterne viser ikke overraskende, at der er opsamlet meget lidt perkolat i de sektioner, der er dækket af asfalt. Den registrerede perkolatproduktion i sektion A4, skyldes sandsynligvis frigivelsen af slaggens indhold af initialvand. De store mængder perkolat er opsamlet i nedstrømsfelterne, som modtager afstrømmet overfladevand fra pladsen.

Tabel 2 viser, at kun 76 % af nedbøren er blevet opsamlet som perkolat fra plads-felt B med SF sten som overfladebelægning. Der er ikke opsamling af overfladevand fra dette plads-felt. Det fremgår generelt, at midterfelterne kun opsamler 5-20 % af nedbøren selv om de udgør ca. 55-60 % af arealet, mens nedstrøms randfelterne opsamler 55-85 % af nedbøren selv om de kun udgør ca. 20 % af arealet.

Tabel 1. Vandbalance for de 3 første måneder for demonstrationsplads felt (A) med asfalt overfladebelægning. Placering af membran sektioner A1 til A4 er vist i figur 2.

Feltinddeling af bundmembran under plads (A)	Procent af overflade areal	Procent perkolat opsamlet	Procent nedbør opsamlet som perkolat
A4 – midter felt (slagger)	51.8	2.6	2.6
A3 – randfelt under asfalt (slagger)	4.2	0.1	0.1
A2 – randfelt uden for asfalt (slagger & jord)	4.0	1.0	1.0
A1 – randfelt uden for asfalt (jord)	8.6	56.1	56
A5 – øvrige 3 randfelter	31.4	40	40.2
A – alle felter	100	100	99.9

Tabel 2. Vandbalance resultater for 4 af demonstrationspladserne udstyret med bundmembran for de 3 første måneder efter etablering.

Plads felt	Oprindelse af BA	Overflade belægning	Procent nedsivningsvand opsamlet som perkolat			
			Opstrøms randfelter	Nedstrøms randfelter	Midter felt	Total
B	MSWI 1	SF-sten	14	53	9.7	76
C	MSWI 1	Ærtegrus	12	84	5.3	102
D	MWSI 2	Ærtegrus	23	55	20	98
E	MSWI 3	Ærtegrus	18	72	11	100
Omtrentlige procentdel af areal			17 - 24	21 - 24	55 - 62	100

Tabel 3. Data fra udvaskningstests på slaggen i de 6 pladser sammen med grænseværdierne.

Parameter	Unit	Demonstration unit						Limit values	
		A	B	C	D	E	F	Category	
		BA1	BA1	BA1	BA2	BA3	BA1	2	3
pH	-	9.0	10.1	9.7	9.8	10.2	10.2	-	-
Conduct.	mS/m	280	290	290	360	470	270	-	-
Chloride	mg/l	360	380	340	590	920	350	150 (1500)	3000
Sulphate	mg/l	880	820	920	830	790	750	250 (2000)	4000
Ca	mg/l	230	200	250	270	150	170	-	-
Mg	mg/l	0.34	0.22	0.39	0.37	0.09	< 0.2	-	-
Na	mg/l	350	390	340	440	760	380	100 (1000)	1500
K	mg/l	67	70	59	150	240	69	-	-
Al	mg/l	17	16	18	30	55	19	-	-
As	mg/l	< 0.012	< 0.011	< 0.010	< 0.015	< 0.0021	< 0.010	0.008	0.050
Ba	mg/l	0.047	0.036	0.048	0.056	0.030	0.044	0.300	4.000
Cd	mg/l	0.00020	0.00019	0.00019	0.00036	0.00047	0.00018	0.002	0.040
Co	mg/l	0.00042	0.00050	0.00041	< 0.00005	0.00007	0.00035	-	-
Cr	mg/l	0.00071	0.014	0.0069	0.0037	0.0059	0.022	0.010	0.500
Cu	mg/l	0.30	0.32	0.27	0.052	0.32	0.35	0.045	2.000
Hg	mg/l	< 0.00002	0.00004	0.000047	< 0.00002	< 0.00002	0.000044	-	-
Mn	mg/l	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	-	-
Mo	mg/l	0.11	0.11	0.097	0.21	0.28	0.11	-	-
Ni	mg/l	0.0040	0.0051	0.0051	0.0007	0.0023	0.0039	0.010	0.070
Pb	mg/l	0.0014	0.00091	0.00051	0.00089	0.00081	0.00040	0.010	0.100
Zn	mg/l	0.0059	0.0053	0.0037	0.0040	0.0057	0.0037	0.100	1.500
DOC	mg/l	18	18	17	6.3	47	19	-	-

Numbers in parentheses are temporarily increased limit values applicable to MSWI BA.

Disse foreløbige resultater giver tydelig indikation af randeffekter.

Laboratoriearbejder

Der er udført udvaskningstest af slagge separate fra alle 6 plads felter, selvom 4 af felterne indeholder den samme type slagge. Tabel 3 viser udvaskningsdata for de enkelte pladser.

Konklusion

Foreløbige resultater af vandbalancer indikerer, at randeffekter har væsentlig indflydelse på beregning og fortolkning af resultaterne. Der pågår karakterisering af alle de anvendte slaggetyper. Udvasningsdata for alle slaggetyper på anvendelsestidspunktet foreligger.

Resultaterne fra laboratorieundersøgelserne og fra pladserne vil blive anvendt til opstilling af realistiske beskrivelser af kildestyrke og forureningsbevægelse fra affaldsforbrændingsslagge, anvendt som bundsikringslag under veje og pladser. Projektets tidshorisont er 3 år.

Projekt	F
Projekttitel	Ferrox-stabilisation of bottom ash from MSW incineration
Projektperiode	2002
Forfatter	Kasper Lundtorp, Erhardt Mogensen, Babcock & Wilcox Vølund ApS
Kontakt	Kasper Lundtorp: kal@volund.dk
Finansiering	EU-LIFE 99 Programme (LIFE 99ENV/DK000615), AV Miljø, I/S Amagerforbrænding, I/S Vestforbrænding, og Babcock & Wilcox Vølund
Rapporter	Se referencer

Objectives

The objective of this study was to get a first hand impression of the Ferrox-process ability to stabilise bottom ash with respect to heavy metals and salts. A more detailed description of this study is presented in Lundtorp (2002). The Ferrox-process is a stabilisation process for combustion residues based on the addition of ferrous iron. A more detailed description of the process is presented in Lundtorp (2001).

Activities

Two samples were extracted from the bottom ash pit after mixing of grate siftings and bottom ash (takes place concurrently) from I/S Vestforbrænding Line 5. From two primary samples of 10-12 tonnes, two samples of 240-245 kg were obtained. These were named reference 19-02-02 and reference 20-02-02. Of these two samples 2 and 4 part samples each of 30 kg were Ferrox-stabilised. Three part samples were stabilised with $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ and three with FeCl_2 . Table 1 summarises the main variables for the Ferrox-stabilisations.

The six stabilised samples and the two reference samples were divided into halves (15 kg each). One half was dried at room temperature and leaching tested. The other half was placed on trays in a cupboard with a relative humidity of 100 % and 40 °C. When pH dropped below 10, the material was dried at room temperature and leaching tested. This pH was reached after 8-9 days for the Ferrox-treated bottom ash and after 22-25 days for the untreated bottom ash.

Two leaching tests were used: A batch compliance leaching test (CEN prEN 12457, part 1, L/S 2 l/kg) and a pH static leaching test at L/S 10 l/kg with DM water and pH fixed to 9.0 by addition of nitric acid. The eluate from the leaching tests and the wastewater samples were analysed for Cl^- , Na, SO_4^{2-} , Cu, Cr, Pb, Cd, Ni, As, and Zn.

Results

The leaching of Na from the fresh bottom ash is slightly reduced like it is for Cl^- (see Figure 1). No effect on the leaching of Na from the aged bottom ash is observed.

Comparing the results of the leaching tests for Cu and the pH (see Figure 2) it can be seen that

Table 1. Overview of the main variables for the Ferrox-stabilisations.

Name	Stabilising agent	Fe/BA ratio %	L/S-ratio l/kg	BA ¹ – sampling date	pH after pH adjustment	pH in the wastewater
T2	FeSO_4	1.7	1.5	19/2-02	10.2	12.6
T4	FeCl_2	1.3	1.5	19/2-02	9.0	9.9
T5	FeSO_4	2.3	1.6	20/2-02	8.6	12.1
T6	FeSO_4	2.6	1.9	20/2-02	7.5 (rising)	10.4
T7	FeCl_2	1.9	1.5	20/2-02	9.0	10.4
T8	FeCl_2	1.8	1.5	20/2-02	9.7	10.6

¹ BA: Bottom ash.

the differences in pH cannot solely explain the reduction in the leaching.

The leaching of As and Cd is very low and any effect from the Ferrox-treatment cannot be seen. The result of the leaching test with regard to Ni is unambiguous. Zn behaves similar to that of Pb.

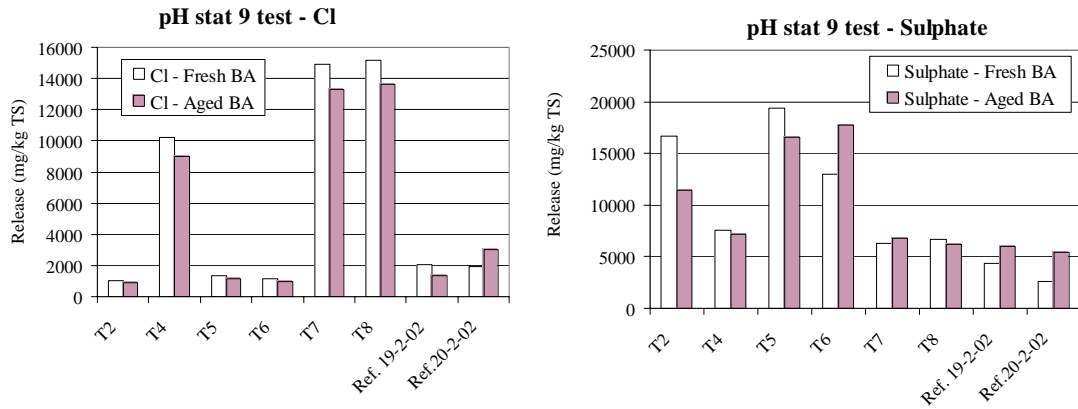


Figure 1. Leaching of Cl and Sulphate from Ferrox-treated and untreated bottom ash. T2, T5, and T6 are Ferrox-treated with $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$. T4, T7, and T8 are Ferrox-treated with FeCl_2 .

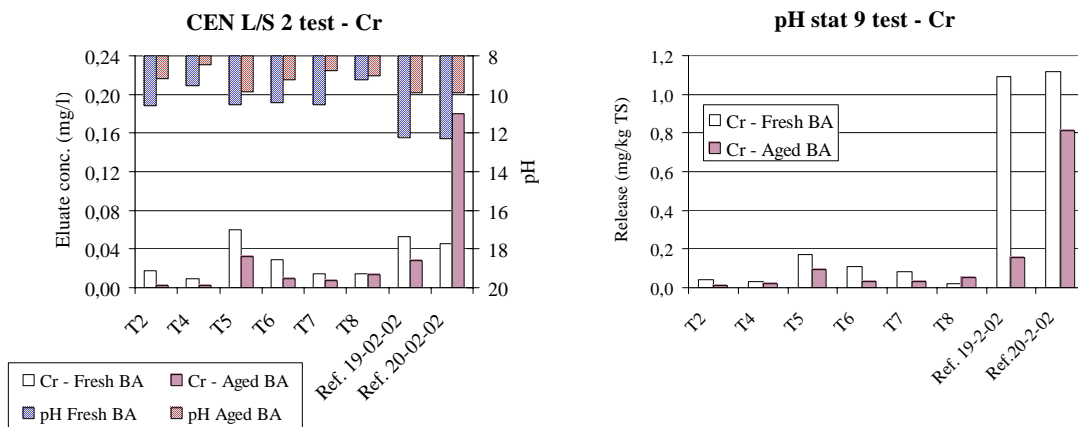


Figure 2. Leaching of Cr from Ferrox-treated and untreated bottom ash. T2, T5, and T6 are Ferrox-treated with $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$. T4, T7, and T8 are Ferrox-treated with FeCl_2 .

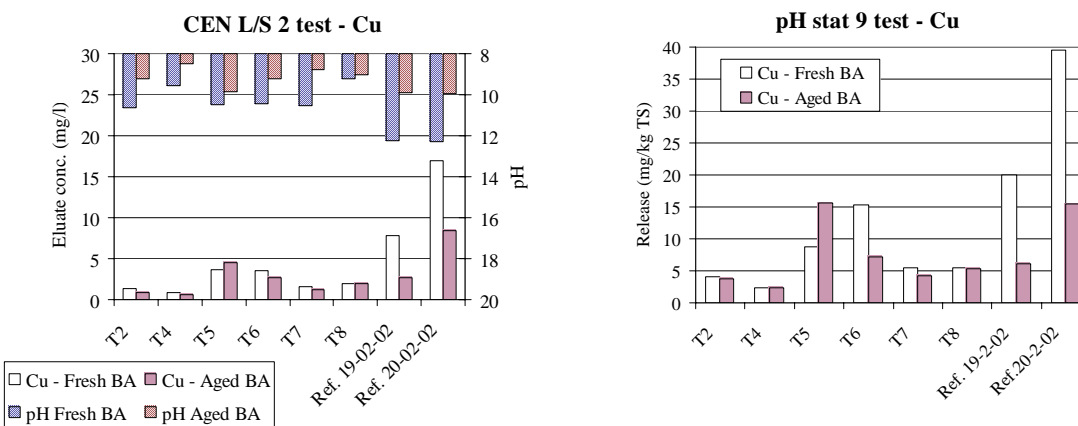


Figure 3. Leaching of Cu from Ferrox-treated and untreated bottom ash. T2, T5, and T6 are Ferrox-treated with $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$. T4, T7, and T8 are Ferrox-treated with FeCl_2 .

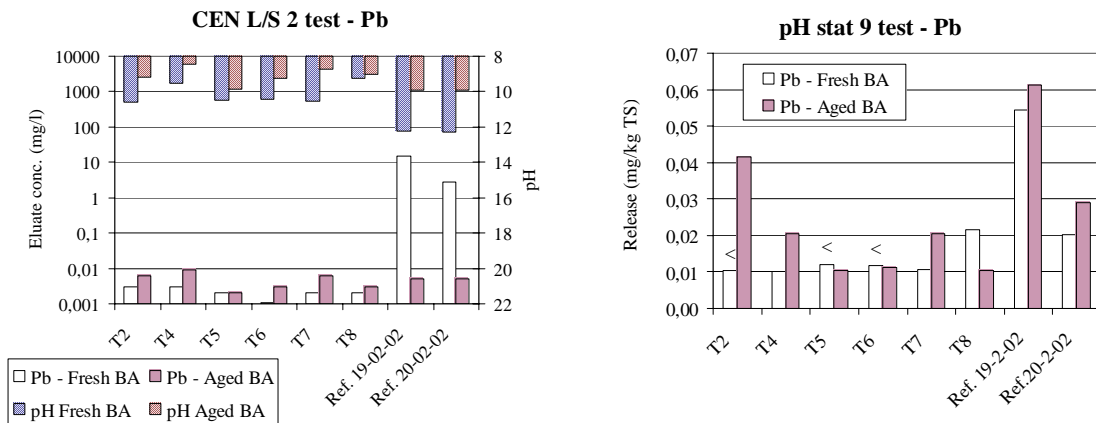


Figure 4. Leaching of Pb from Ferrox-treated and untreated bottom ash. T2, T5, and T6 are Ferrox-treated with $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$. T4, T7, and T8 are Ferrox-treated with FeCl_2 .

The wastewater from the Ferrox-treatment contains low concentrations of trace elements except the wastewater from T7 and T8 that contains 2.8-2.9 mg Cu/l (The other treatments result in a concentration of $\text{Cu} \leq 0.05$ mg/l). The amount of salts in the wastewater is generally high and is influenced by the anions added with the stabilising agent (Cl^- or sulphate).

In this study the bottom ash was crushed prior to leaching. Thereby exposing fresh material for leaching which was not available during the Ferrox-stabilisation. The crushing prior to the leaching tests can therefore blur the results. However, this study clearly shows that Ferrox-stabilisation of bottom ash improves the leaching properties of the ash.

Conclusion

The Ferrox-treatment reduces the leaching of Cu and Cr from bottom ash in general. Especially from a fresh bottom ash the release of Cu can be reduced by a factor of 5-11 by stabilisation with Fe(II). Ferrox-treatment of fresh bottom ash reduces the leaching of Pb by more than three orders of magnitude due to the effect on pH. Overall the Ferrox-process improves the short term leaching properties of bottom ash with respect to Cu, Pb, Zn, and to a lesser extent Cr. The process also improves the leaching properties with respect to Cr and Cu on a long-term basis simulated by a forced ageing. The results indicate that the leaching of salts is reduced by the process. However, if FeCl_2 is added as stabilising agent it increases the leaching of Cl^- . If FeSO_4 is used, the leaching of sulphate on a short term is increased, but not on a long-term basis simulated by a forced ageing. FeCl_2 provided the best stabilisation with regard to trace elements on a short-term basis.

References

- Lundtorp, Kasper (2001). The Ferrox-process in an industrial scale – Developing a stabilisation process for air pollution control residues from municipal solid waste incineration. Ph.D. thesis. Environment & Resources DTU, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark.
- Lundtorp, Kasper (2002). The Ferrox-project – Ferrox-stabilisation of bottom ash from MSW incineration. Report. Babcock & Wilcox Vølund ApS. Denmark.

Projekt	G
Projekttitel	C-RES restprodukt-database med data for egenskaber og sammensætning af slagger fra affaldsforbrænding
Projektperiode	2002 - 2003
Forfatter	Ole Hjelmar, Jette Bjerre Hansen og Anders Klinting, DHI – Institut for Vand og Miljø
Kontakt	Ole Hjelmar: oh@dhi.dk, tlf. 4516 9405
Finansiering	Center for Restprodukter
Rapporter	Ingen

Formål

Formålet med projektet er at tilvejebringe en database for restprodukter, herunder ikke mindst slagger fra affaldsforbrænding, som kan benyttes af såvel partnerne i C-RES (Center for Restprodukter) som af andre, der skal kontrollere, håndtere, behandle eller markedsføre restprodukter. Database skal omfatte såvel logistisk information som oplysninger om restprodukternes miljømæssige og geotekniske/funktionelle egenskaber. Kun kvalitetssikrede data vil blive indlagt i databasen, som såvidt muligt skal være kompatibel med allerede eksisterende systemer i ind- og udland. Database forventes sammen med tilsvarende databaser i andre europæiske lande at indgå i et europæisk database-netværk. Database vil være tilgængelig via C-RES' hjemmeside, www.c-res.dk.

Udført arbejde

Baseret på diskussioner og ønsker fremsat af deltagerne i C-RES er der i Access opbygget en databasestruktur, som efterfølgende er blevet underkastet en række undersøgelser og afprøvninger på testpersoner med henblik på opdagelse og udbedring af fejl og mangler. Databasestrukturen er endvidere blevet diskuteret i C-RES' koordinationsgruppe, specielt med henblik på tilpasning til behovet for logistiske oplysninger omkring de restprodukter, som indgår i databasen, og til behovet for standard-udtræk af oplysninger i form af tabeller og grafer fra databasen. Arbejdet med indlægnings af eksisterende data er i fuld gang og omfatter i første omgang logistiske oplysninger vedrørende produktion, behandling og prøvetagning af restprodukter (og jord) samt resultater af undersøgelser af sammensætning af (faststofanalyser) og stofudvaskning fra disse. Database kan håndtere og indeholder resultater af batchtests i et eller flere trin (herunder specielt prEN 12457-3 (del 1)), kolonnetests, tilgængelighedstests, pH-statistiske tests, tankudvaskningstests for såvel granulære som monolitiske materialer, lysimeterundersøgelser og fuldskalaobservationer samt informationer om geotekniske/funktionelle egenskaber. Data kan indlægges manuelt, men der er også udviklet rutiner til semi-automatisk indlæggelse af data fra standardskemaer i Excel-format. Såvel eksisterende og nye data produceret af C-RES egne medlemmer som data produceret af andre samt publicerede data vil blive indlagt i databasen, forudsat de overholder de opstillede kvalitetskrav. En af de væsentligste attraktioner ved databasen vil være den meget store mængde af data for sammensætning af og udvaskning fra slagger og (mange) andre restprodukter, som den vil indeholde.

Hovedresultater

I tabel 1 ses en oversigt over de vigtigste typer af oplysninger, som p.t. kan indlægges i databasen. Ved hjælp af data-ejerens egen identifikation af prøven kan der skabes links til andre oplysninger om den samme prøve, om den restproduktmængde, hvorfra den undersøgte prøve er udtaget, eller om produktionsstedet for det pågældende restprodukt. Som udgangspunkt har kun dataejer adgang til egne data, med mindre andet er specificeret. Hver enkelt dataejer må tage stilling til tilgængeligheden af egne data. Data genereret indenfor samarbejdet i C-RES vil generelt være tilgængelige for alle C-RES-medlemmer, ligesom en række data forventes at blive offentligt tilgængelige, en del dog formentlig på anonymiseret form. F.eks. vil et forbrændingsanlæg, som har fået indlagt testresultater for et givet parti slagger, uden videre kunne hente alle data om den pågældende slaggeprøve (og om

Tabel 1. Nogle af de vigtigste oplysninger, som kan indlægges i databasen.

Informationer om produktionssted, produktionsproces og producent af restproduktet
Informationer om restprodukttypen
Informationer om restproduktets behandling
Informationer om prøvetagningen
Identitet af prøvetagnings-, testnings- og analyselaboratorier
Informationer om forbehandling af laboratorieprøve, testprøve og testportion (iht. til CEN/TC 292)
Informationer om anvendte test- og analysemetoder
Resultater af faststofanalyser
Resultater af udvaskningstests
Resultater af lysimetertests
Resultater af fuldskalaundersøgelser
Resultater af funktionelle/geotekniske eller vejtekniske tests
Referencer

andre slaggeprøver fra samme anlæg). Man kan så vælge at importere dataene i Excel og selv behandle dem, eller man kan vælge at anvende de eksisterende, standard-udtræksformer, hvor man f.eks. på tabelform eller grafisk kan sammenligne egne data med tilsvarende statistiske oplysninger (f.eks. middelværdi og spredning af udvaskningen af Cu i en given periode) for slagger fra alle andre danske affaldsforbrændingsanlæg, der har leveret data til databasen. Diverse grænseværdier vil ligeledes kunne indgå i sammenligningen. Sådanne udtræk vil kunne genereres direkte på web-siden. Der vil løbende foregå en produktudvikling af databasen med hensyn til nye udtræksformer, som er tilpasset konstaterede behov.

Konklusion

Der er etableret en database for miljømæssige og funktionelle data for restprodukter og jord, og en række miljømæssige restproduktdata, herunder resultater af undersøgelser af slagger fra affaldsforbrænding, er indlagt. Tilgængelige oplysninger om restprodukters funktionelle egenskaber vil blive indlagt i løbet af sommeren 2003. En internet-baseret adgang til databasen fra www.c-res.dk og de første udtræksformer forventes etableret i maj/juni 2003. Nye data vil løbende blive indlagt i databasen, og nye udtræksformer vil blive udviklet efter behov. Der forventes etableret links til andre databaser.

Finansiering og samarbejder

Databasen er udviklet af DHI indenfor rammerne af Center for Restprodukter (C-RES), som er et samarbejde mellem I/S Amagerforbrænding, I/S Vestforbrænding, RGS90 A/S, Babcock & Wilcox Vølund ApS, Dansk Restprodukt håndtering A.m.b.A., SYSAV AB, Miljø & Ressourcer DTU, Vejteknisk Institut, Institut for Geoteknologi ved Lunds Teknisk Højskole, Teknologisk Institut og DHI. Samarbejdet er baseret på en centerkontrakt (1999 – 2003) og er finansieret af de medvirkende virksomheder og GTS-institutter samt Ministeriet for Videnskab, Teknologi og Udvikling. Yderligere informationer om C-RES kan findes på hjemmesiden, www.c-res.dk.

Projekt	H
Projekttitel	Stabilisering af slagger fra affaldsforbrænding ved vask, separation og lagring
Projektperiode	2002 - 2003
Forfatter	Jens Kjærgaard Boddum, AFATEK A/S
Kontakt	Jens Kjærgaard Boddum: jkb@afatek.dk, tlf. 4634 7700
Finansiering	Center for Restprodukter via samarbejde mellem DHI, Amagerforbrænding, Vestforbrænding, RGS90 A/S, SYSAV, Tech-wise, Vejteknisk Institut og AFATEK A/S
Rapporter	"Stabilisering af slagger fra affaldsforbrænding ved vask, separation og lagring – Laboratorieforsøg med mobilisering og udvaskning af salte og mineraler, herunder specielt sulfat og kobber" C-RES, R&D projekt UR-1 – DHI, Agern Allé 11, 2970 Hørsholm.

Formål

Projektet blev gennemført med det formål at fastlægge en metode til at forbedre forbrændingsslaggens miljømæssige egenskaber. Specielt var fokus på at begrænse udvaskningen af sulfat og kobber fra slaggen. Som det endelige mål var sat efterlevelse af kategori 2 kravene til udvaskning af salte og kobber.

Udført arbejde

Projektet baseredes på en række forsøg i laboratorieskala. Der blev i alle tilfælde behandlet på en forbrændingsslagge, der var knust til <4 mm. Dette skete for at muliggøre udtagelsen af repræsentative prøver til forsøgene. Der blev behandlet slagge fra Vestforbrændings Anlæg 1-4 og Anlæg 5.

Der blev indledt med en række forforsøg. Disse skulle klarlægge hvilke faktorer, der var væsentlige for at sikre en effektiv udvaskning af slaggen. Faktorer som den naturlige variation på udvaskningsbestemmelsen, ligevægtstidens og partikelstørrelses betydning for saltudvaskningen blev undersøgt. Ved forforsøg blev ligeledes søgt metoder til at mobilisere svovl fra faststoffasen, for at muliggøre en fjernelse af svovl. Mobiliseringen af svovl skete ved tilsætning af additiver. Det blev fundet, at der kunne opnås en væsentlig mobilisering af svovl, ved tilsætning af karbonat.

Efterfølgende blev det i tre forsøgsrækker forsøgt, at behandle slaggen jf. resultater af forforsøg. Selve behandlingen skete i batche med opslæmning af slaggen i vand ved L/S – forhold fra 2-4 l/kg. Batchene var fuldt omrørte for at sikre god kontakt mellem faststof og væske.

Der blev behandlet prøver med tilsætning af natriumkarbonat (s), natriumbikarbonat (s) og kuldioxid (g). Et grundigt efterbehandlingstrin var nødvendigt, for at sikre, at de udvaskede stoffer fjernes fra den behandlede slagge.

Effekten af vasken bestemtes ved udvaskningstest jf. Miljøstyrelsens bekendtgørelse nr. 655 af 27. juni 2000.

Hovedresultater og konklusion

Det blev fundet, at udvaskningen af natrium og klorid kunne begrænses til kategori 2 ved ren vandbehandling. Der var behov for en grundig vaskeproces, efterfulgt af skylning to gange.

Ved simpel vask i vand blev sulfatudvaskningen ikke reduceret tilstrækkeligt. Efter tilsætning af hydrogenkarbonat og indblæsning af kuldioxid øgedes opløseligheden op til den tilgængelige mængde (bestemt i L/S = 100 l/kg). Imidlertid var udvaskningen i den efterfølgende L/S=2 test fortsat over kravet på 250 mg/l. Derfor blev det forsøgt at fjerne finfraktionen (125 µm), i hvilken svovl fandtes opkoncentreret med en faktor 4. Herefter var det muligt at efterleve kategori 2 kravet.

For både natrium, klorid og sulfat var der marginal forskel mellem den opnåede udvaskning og kategori 2 kravene.

Specielt fra Anlæg 5 slaggen var udvaskningen af kobber fra den ubehandlede slagge oftest høj, 1-3 mg/l. Ved behandling alene med vand reduceredes udvaskningen til 0,2-0,4 mg/l. Det havde ikke nogen effekt på kobberudvaskningen at tilsætte karbonat eller indblæse kuldioxid. Der blev ikke

fundet nogen effektiv metode til at reducere kobberudvaskningen til under kategori 2 kravet, som er <0,045 mg/l.

Der blev fundet en høj korrelation mellem udvaskningen af kobber og udvaskningen af NVOC. Derfor antoges det, at kobber var bundet i stabile organiske komplekser. En undersøgelse blev iværksat med henblik på at uddybe dette (Grøn, 2002).

Fra den friske Anlæg 5 slagge var udvaskningen af bly problematisk, som følge af pH-værdier over 12. pH reduceredes ved tilsætning af hydrogenkarbonat og indblæsning af kuldioxid. Dette medførte fald i blyudvaskningen, oftest til under kategori 2 kravet.

Kromudvaskningen viste sig ligeledes problematisk, idet kategori 2 kravet på 10 µg/l var overskredet i flere tilfælde. Der sås tendens til at specielt behandlingen med hydrogenkarbonat mobiliserede krom. Der blev ikke fundet midler til at afhjælpe dette problem.

Det kunne på baggrund af forsøgene konkluderes, at det er tvivlsomt om der kan fremstilles en slagge af kategori 2 kvalitet, specielt hvis behandlingen skal ske med et moderat energi- og ressourceforbrug.

Projekt	I
Projekttitel	Teknisk og økonomisk vurdering af anlæg for udsortering af ikke jernmetaller i forbrændingsslagge
Projektperiode	2002
Forfatter	Jesper Staal, Tech-wise A/S
Kontakt	Jesper Staal: jst@techwise.dk, tlf. 6568 4450
Finansiering	Elsam A/S Affald og Energi i samarbejde med Tech-wise A/S
Rapporter	Ingen

Formål

Arbejdet er gennemført for at vurdere de tekniske og økonomiske muligheder ved etablering af et centralt placeret slagge behandlingsanlæg med en kapacitet på 140.000 tons. Formålet med anlægget skulle være at neddele slaggen, samt udsortere jern og ikke jernmetaller.

Baggrunden for arbejdet var implementeringen af: "Bekendtgørelse om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder", forud for implementeringen forventedes det at slaggen ikke ville kunne genanvendes som kategori 2-slagge, men kun som kategori 3-slagge, der ville være vanskeligere at afsætte indenlands.

Et behandlingsanlæg som det beskrevne vil muliggøre genanvendelse i Tyskland, da behandlingen svarer til den oparbejdning forbrændingsslagge gennemgår i Tyskland, før den kan genanvendes som fyldmateriale. Skulle afsætningen svigte i Danmark vil det da være muligt efter en oparbejdning på det beskrevne anlæg at afsætte overskydende slagge i Tyskland.

En del af økonomien i et slagge behandlings anlæg skal bæres af de udsorterede metal fraktioner, det har derfor været en del af arbejdet, at vurdere det udsorteringspotentiale der er tilstede med anvendelse af eddy-current-teknik.

Hovedresultater

Anlægsbeskrivelse

Efter lagring af slaggen tilføres den med en frontlæsser en harpe/sigte, herved frasorteres slaggedele, jern, uforbrændt og andet større end 200 mm.

Jern fjernes fra denne fraktion med kranhængt sortermagnet. Ikke jernmetaller og uforbrændt materiale såsom træstød og telefonbøger m.m. fjernes med håndkraft. Den øvrige del af fraktionen opsamles, og når mængden er tilstrækkelig, neddeles dette med en mobil neddeler, og tilføres anlægget sammen med råslaggen.

Fraktionen > 200 mm udgør ca. 5 % af råslaggen. Fraktionen < 200 mm føres med en vibrationsrende, til en båndtransportør, i omkastet til næste båndtransportør, er placeret en båndmagnet, som fjerner jernmetaller fra slaggen. De fraseparerede jernmetaller tilføres en resetromle, hvor påbrændt slagge fjernes.

Med båndtransportøren, pos. 5, føres slaggen videre til en harpe, hvor slaggen deles i 3 fraktioner, henholdsvis:

- Fraktion 0-15 mm føres med et bånd til et mellemlager.
- Fraktion 15-40 mm tilføres en ikke jernmetal (NE-metaller)-udskiller (eddy-current-teknik), og NE-metaller opsamles. Slaggen tilføres en vindsigte, hvor uforbrændt og andre lette fraktioner udskilles. Slaggen opsamles.
- Fraktion 40-200 mm tilføres et sorterbånd, hvor uforbrændt og NE-metaller udtages manuelt. Slaggen opsamles, og når et passende volumen er til rådighed, neddeles dette med en transportabel neddeler, og den neddelte slagge tilføres anlægget på ny.

Fraktionerne 0-15 og 15-40 blandes med en frontlæsser og tilføres et lager for 3 måneders lagring, hvorefter slaggen kan genanvendes som kategori 3-slagge.

Udsorteringspotentiale

I anlægget udskilles jern. Jernet forventes at udgøre ca. 6%. Baseret på en slaggemængde på 140.000 tons pr. år fås ca. 8.000 tons jern pr. år.

I anlægget udskilles NE-metaller. NE-metaller forventes at udgøre ca. 0,4%. Baseret på en slaggemængde på 140.000 tons pr. år fås ca. 560 tons NE-metaller pr. år.

Den oparbejdede slagge er i størrelse fra 0-40 mm vil udgøre ca. 130.000 tons pr. år. Værdierne for NE metaller er baseret på erfaringer fra Tyske og Hollandske anlæg

Økonomi

Omkostning for at finansiere og drive anlægget er estimeret til 2,5 mill kr./år. Der er i dette estimat ikke medtaget omkostninger til arealanskaffelser. Indtægt fra salg af jern og ikke jernmetaller er estimeret til ca. 2 mill kr./år

Nettoomkostningen til drift af anlægget andrager ca. 0,5 mill kr./år svarende til ca. 3,5 kr. pr tons slagge.

Konklusion

Efter direktivets ikrafttrædelse har det vist sig at der fortsat er gode afsætnings muligheder for affaldsslagge i kategori 3, der er derfor ikke arbejdet videre med projektet.

Projekt	J
Projekttitel	Mulighed for vask af slagge fra affaldsforbrænding før genanvendelse i bygge- og anlægsarbejder
Projektperiode	1999 - 2000
Forfatter	Jens Kjærgaard Boddum, AFATEK A/S
Kontakt	Jens Kjærgaard Boddum: jkb@afatek.dk, tlf. 4634 7700
Finansiering	AFATEK A/S og I/S Vestforbrænding med tilskud fra Den Grønne Jobpulje
Rapporter	"Mulighederne for vask af slagge fra affaldsforbrænding før genanvendelse i bygge- og anlægsarbejde" Arbejdsrapport – Forår 2000. AFATEK A/S, Håndværkervej 70, 4000 Roskilde

Formål

Projektet blev gennemført med det formål, at afprøve egnede metoder til vask af slagge fra affaldsforbrænding og vurdere metoderne i relation til Miljøstyrelsens krav. Fokus var på udvaskningen af natrium, klorid og sulfat. Det blev samtidig søgt, at vurdere mulighederne for at forbedre de anlægstekniske egenskaber, for at fremme afsætningsmulighederne.

Udført arbejde

Der blev gennemført to forsøg: dels et fuldskala forsøg og dels et pilotskala forsøg.

I fuld skala blev afprøvet vask af slagge i slaggeudtaget umiddelbart efter forbrænding. Forsøget blev gennemført på I/S KARA, på en Vølund risteovn med tre riste. Ovnens kapacitet på 3 tons pr. time, derved producerende 0,6 tons slagge pr. time.

Vasken skete ved erstatning af det vand, der sædvanligvis benyttes til at slukke slaggen. Fra normalt anvendt recirkuleret vand skiftedes til rent brugsvand. Der benyttedes øgede vandmængder sammenlignet med normal drift. Et vandforbrug på 0,5, 1, 2 og 4 l/kg blev forsøgt. Der blev udtaget prøver af ubehandlet slagge (direkte fra tredje rist), normalt behandlet slagge samt fra hver af de behandlede slagge. Effekten af vasken blev fastlagt ved at gennemføre udvaskningstest på delprøver af de ubehandlede og behandlede slagge. Eluaterne herfra blev analyseret for pH, ledningsevne, calcium, kalium, natrium, klorid og sulfat.

I pilot skala blev afprøvet vask af slagge på jordvaskeanlæg. Anlægget, der tilhørte KK Miljøteknik A/S var designet til behandling af 250 – 1000 kg materiale pr. time. Der blev behandlet en slagge fra Vestforbrændings Anlæg 1-4. Af hensyn til vaskeanlægget var slaggen var sigtet over 10 mm sold og magnetisk metal var frasorteret.

Selve behandlingen bestod af et homogeniserings og udvaskningstrin i en slæmmetromle, efterfulgt af separation af fint og organisk materiale med vibrationssigte og sandsnegl. Finfraktionen blev afvandet i tykner og kammerfilterpresse. Der blev udtaget prøver af sand- og grusfraktionen, af finfraktionen og af organisk materiale. Der blev forsøgt behandling ved et vandforbrug på 1,5, 4 og 10 l/kg samt et trettrins behandlingsforsøg med et vandforbrug på 1,5 l/kg i hvert trin.

Der blev foretaget udvaskningstest på sand- og grusfraktionen. I eluaterne herfra bestemtes pH, ledningsevne, calcium, kalium, natrium, klorid og sulfat. I alle faststoffraktioner blev bestemt pH, TS, alkalinitet, glødetab, Cl, Tot-S, Na, K, Ca, As, Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn.

Hovedresultater

Forsøget med vask i direkte forlængelse af forbrændingsprocessen viste, at der ikke var den store effekt af at erstatte det normalt anvendte genbrugsvand med rent brugsvand. Selv ved et væske : faststofforhold (L/S) på 4 l/kg, var der meget begrænset reduktion i udvaskningen af saltene natrium, klorid og sulfat. Dette formodes at skyldes, at det recirkulerede vand der benyttedes omkring forsøgstidspunktet var af en god kvalitet, dvs. med et lavt saltindhold. Udvasningen fra slaggen udtaget direkte på risten var høj, omkring det dobbelte af hvad der udvaskedes fra de øvrige prøver.

Kategori 2 kravene til udvaskning af salte blev aldrig nået ved forsøgene. Der var intet der tydede på at de kunne nås ved den afprøvede behandlingsproces.

Ved forsøget med vask på pilotskala jordvaskeanlæg, blev udvaskningen af natrium og klorid reduceret til under kategori 2 kravene. Der nåedes udvaskning på 80 mg Na/l og 120 mg Cl/l. Disse udvaskninger krævede behandling ved et vandforbrug på 4 m³ pr. tons slagge.

Udvaskningen af sulfat kunne begrænses, men ikke tilstrækkeligt til at kategori 2 kravet kunne efterleves. Det bedste resultat der opnåedes var udvaskning på 380 mg SO₄/l, fra 1 måned gammel slagge behandlet ved et L/S på 10 l/kg.

Det konstateredes, at lagring af slaggen betød en væsentlig stigning i udvaskningen af sulfat. Fra 1 måned gammel slagge var udvaskning 550 mg/l stigende til 1300 mg/l da slaggen var tre måneder gammel. pH måles til hhv. 10,8 og 9,6.

Der konstateredes en væsentlig opkoncentrering af alkalinitet, svovl og calcium i finfraktionen. Opkoncentreringen af svovl var ca. en faktor 5. Af tungmetallerne viste arsen, cadmium, bly og zink tendens til opkoncentrering i finfraktionen.

Anlægsteknisk opnåedes en forbedring af slaggen, idet mængden af finfraktion <100 µm blev reduceret til tæt på 0. Dette giver et materiale med væsentligt bedre drænegenskaber, hvilket er væsentligt ved de fleste anlægsarbejder hvor slagge benyttes. Glødetabet i sand- og grusfraktionen blev reduceret som følge af frasortering af organisk materiale. Dette var ligeledes medvirkende til at forbedre de anlægstekniske egenskaber.

Konklusion

Generelt kunne det på forsøgene konkluderes, at en stor del af slaggens indhold af letopløselige salte kan udvaskes meget enkelt. Et traditionelt slaggekølingsbassin vil oftest være tilstrækkeligt. Hvis Miljøstyrelsens kategori 2 krav skal efterleves er mere omfattende og ressourcekrævende processer nødvendige. For natrium og klorid nåedes kravet ved behandling på jordvaskeanlæg. Sulfat kræver yderligere tiltag, f.eks. stabilisering i faststoffasen.

Projekt	K
Projekttitel	Kornstørrelse sortering af slagger
Projektperiode	1997
Forfatter	Kim Crillesen, I/S Vestforbrænding
Kontakt	kc@vestfor.dk, tlf. 4485 7284
Finansiering	Balticon, I/S Amagerforbrænding, I/S Vestforbrænding og AFATEK A/S
Rapporter	Ingen

Formål

For at undersøge om en kombinerede separations- og vaskeproces er velegnet til fjernelse af salte og letopløselige tungmetaller samt den fine fraktion (filler) fra slagger, er der gennemført en kornstørrelsesfraktionering af slagger på et mobilt vådsorteringsanlæg. Det væsentligste formål var at undersøge om Balticons mobile anlæg til vådseparation, oprindeligt beregnet til jord og gadeopfej, kunne frasortere meget fine partikler fra slaggen. Samtidig ønskedes det undersøgt hvor effektiv processen var med hensyn til fjernelse af letopløselige salte. Slaggens vejtekniske egenskaber kan forbedres ved at fjerne filleret materialet, partikler med en kornstørrelse under 0,1 mm eller mindre. Fjernes filleret materiale fra slaggen øges slaggens vandledningsegenskaber, hvorved slaggen dræner bedre. Reduktion af saltudvaskningen blev et krav i Miljøstyrelsens bekendtgørelse nr. 655 af 27. juni 2000.

Udført arbejde

Anlægsbeskrivelse

Anlægget består af to dele. Den første del er selve separationsanlægget, der fysisk separerer partiklerne i forskellige fraktioner efter kornstørrelse. Den anden del udgøres af et spildevandsbehandlingsanlæg, der kan udskille og separere de fine partikler fra vandfasen og dermed rense vandet. Anlægget er udviklet til fraktionering af gadeopfej, og alle afskæringsværdier var indstillet med henblik på optimal anvendelse af dette materiale. Gadeopfej sorteres i 5 fraktioner. En affaldsfraktion af større partikler (>10 mm), en organisk fraktion, en sandfraktion (0,06-2mm), en sand/ grus fraktion (2-10 mm), samt en fraktion bestående af afvandet filterkage fra vandbehandlingen. Sandfraktioner og filterkage kan genanvendes i asfaltindustrien. Maskestørrelsen på 0,06 mm var valgt i henhold til et krav fra asfaltindustrien, der vil anvende den fine fraktion som filler i asfalt og ikke ønskede at gå længere ned i afskæringsværdi.

I undersøgelsen blev anvendt harpede slagger fra Amagerforbrænding. Slaggerne blev opdelt i de samme 5 fraktioner som gadeopfej og med samme afskæringsværdier. Den organiske fraktion viste sig at bestå af uforbrændt kulstøv.

Procesbeskrivelse

Slaggen blandes først med vand og ledes hen over en vibratorsi med maskestørrelse 10 mm. Store emner sies fra. Den resterende opløste slaggemasse ledes igennem en roterende tromlesi med maskestørrelse 0,06 mm. Vaskevandet indeholder nu en opløsning af fine partikler. Opslemningen ledes til vandbehandling, hvor der tilsættes flokkuleringsmidler. Den flokkulerede opslemning ledes via en lamelseparator tilbage i systemet og recirkuleres. Slammet afvandes i en sibåndspresse. Filterresten fra tromlesien ledes til en hydrocyklon. Den lette fraktion herfra ledes hen over en buesi hvor den organiske fraktion (<10 mm) filtreres fra. Den resterende sand/grus fraktion opdeles i en fin og en grov fraktion ved at lade blandingen passere endnu et si. De 5 fraktioner vejes og analyseres for tungmetaller og salte.

Resultater

Der blev over 1 time behandlet ca. 22 tons slagge og anvendt ca. 1,5 - 2,5 tons vand, hvilket giver et L/S forhold på $L/S \approx 1:10 = 0,1$. Det lave L/S forhold beror på at processen ikke er lagt an på at vaske slagge. Derfor recirkuleres vaskevandet.

En decideret vask vil kræve $L/S = 1-10$ l/kg og dermed langt større mængder vand end der blev anvendt. Vaskeprocessen blev ikke søgt optimeret gennem anvendelse af større mængder vand.

Der ses generelt ikke en opkoncentrering af tungmetaller i de finere fraktioner.

Tabel 1. Resultater af analyse af totalindhold bestemt efter partiel oplukning (DS259)

Total mgd.: 22 t		Affalds-fraktion >10 mm	Organisk fraktion 0,06 - 10 mm	Sand fraktion 0,06 - 2 mm	Grus fraktion 2 - 10 mm	Filler fraktion <0,06 mm
Mængde	tons	1,9	1,5	7,3	8,2	3,1
	pct-andel	8,6%	6,8%	33,2%	37,3%	14,1%
pH		8,5	8,2	8,5	8,4	7,9
Alkalinitet	mol/kg TS	1,3	1,4	1,9	1,8	2,8
Gødeta	%	5,4	16	2,9	3,3	20
Klorid	mg/kg TS	1600	1900	1100	1800	4600
Natrium	mg/kg TS	4700	5200	6400	7000	3700
Kalium	mg/kg TS	1500	1600	1600	1700	990
Kalcium	mg/kg TS	25000	34000	43000	41000	46000
Tot-svovl	mg/kg TS	2200	3100	2400	2400	8000
Auminium	mg/kg TS	17000	21000	24000	21000	21000
Arsen	mg/kg TS	9,2	7,9	9,5	12	11
Krom	mg/kg TS	70	90	100	110	70
Kadmium	mg/kg TS	3,5	1,6	2,8	3	3,3
Kobber	mg/kg TS	6000	2000	4800	7200	2300
Nikkel	mg/kg TS	90	90	100	100	85
Bly	mg/kg TS	640	350	2500	740	830
Zink	mg/kg TS	1600	900	2000	1600	1600

Dette var ellers imødeset, da tidligere undersøgelser tyder på, at tungmetaller adsorberer til overfladen af partiklerne. De finere partikler har større overflade pr. vægtenhed, hvorfor der er en større koncentration af tungmetaller i de fine partikelfraktioner. Resultaterne bekræfter imidlertid ikke dette.

Dog ses, at svovl tilsyneladende opkoncentreres i filterkagen med en hyppighed 3 gange større

Tabel 2. Resultat af udvaskningstest CEN prN 12457 A, udført på blandingsprøve af sand- og grusfraktionen.

	Blanding af sand- og grusfraktion		Andel af totalindhold
	mg/l	mg/kg	
pH	8,4	-	-
Alkalinitet (mmol/l)	0,7	-	-
Ledningsevne (mS/cm)	2	-	-
Klorid	200	400	1%
Natrium	280	560	38%
Kalium	310	620	28%
Kalcium	240	480	9%
Sulfat	820	1640	68%
Kobber	0,0054	0,011	9,00E-07
Bly	0,001	0,002	6,00E-07

end i de øvrige fraktioner. Dette beror muligvis på, at sulfat efter initialopløsningen genudfælder som gips og fraføres med det fine materiale. Bly har en øget genfindingshyppighed i sandfraktionen (0,05 – 2 mm) der er en faktor 3-4 gange større end i de øvrige fraktioner. Målinger af blyindholdet i slaggen udviser dog en naturlig stor variation, og det er vanskeligt at sige, om der er tale om signifikant adfærd. Kobber opkoncentreres i de større partikelfraktioner successivt efter kornstørrelse, størst i grusfraktionen (2-10 mm). Dette skyldes muligvis, at kobber findes i slaggen som neddelte partikler af overvejende elementært kobber.

Konklusion

Resultaterne af forsøget viste at vådfractionering er meget velegnet til slagge og effektivt frasorterer fine partikler med afskæringsværdier på 0,06 mm, og sandsynligvis også mindre. Samtidig anvender processen kun små mængder vand. Forsøget bekræftede endvidere, at den fine fraktion (<0,06 mm) udgør en stor bestanddel af slaggen (14%). Som en ekstra gevinst viste forsøget, at den organiske fraktion af uforbrændt kan udskilles separat til eventuel genindfyring.

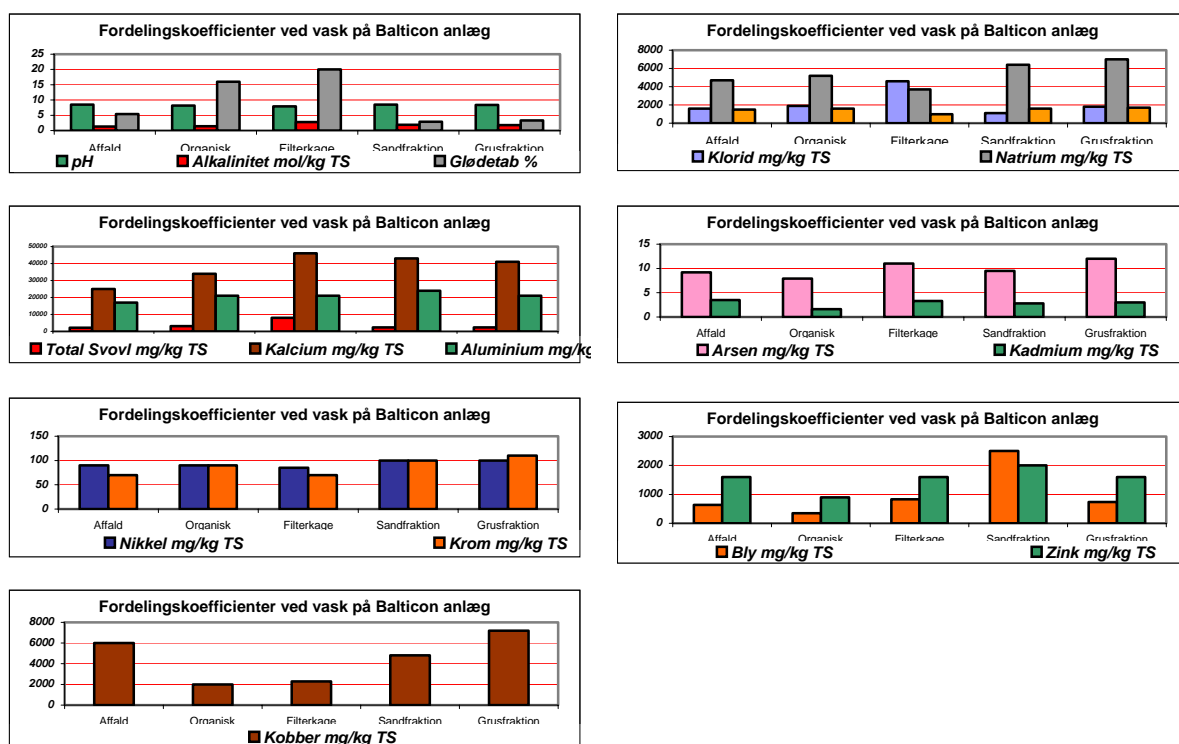
Udskillelsen af både den fine fraktion og den organiske fraktion bidrager til at øge kvaliteten og værdien af slaggen som råstof i bygge- og anlægsarbejder. Undersøgelsen viste, at der er potentiale for at nyttiggøre både den fine fraktion og den organiske fraktion.

Generelt ses ikke en signifikant udskillelse af tungmetaller i én fraktion frem for en anden.

Dog opkoncentreres kobber tilsyneladende på større partikler, hvilket kan skyldes, at kobber foreligger overvejende som elementært kobber. Bly findes tilsyneladende helst i fraktionen 0,06 – 2 mm (sand), mens sulfat overvejende findes i fillerfraktionen (<0,06 mm).

Øvrige metaller som arsen, krom, nikkel, kadmium og zink genfindes i lige store mængder i alle fraktioner uanset partikelstørrelse.

Udvaskningen viser, at der er fjernet store mængder salte, specielt sulfat, hvilket giver forhåbning om, at saltproblemet kan løses ved vask.



Figur 1. Indhold af en række stoffer fordelt på de 5 fraktioner.

Projekt	L
Projekttitel	Kvalitet af slagge fra forbrændingsanlæg
Projektperiode	2002 - 2003
Forfatter	Joan Maj Nielsen og Jan Oluf Clement, COWI A/S
Kontakt	Joan Maj Nielsen: jmn@cowi.dk, tlf. 4597 1042
Finansiering	Miljøstyrelsen i samarbejde med I/S Amagerforbrænding og I/S Vestforbrænding
Rapporter	Ingen endnu, udgives af Miljøstyrelsen

Formål

Projektets overordnede formål er at undersøge mulighederne for at forbedre slagge kvaliteten via optimering af affaldsforbrændingsprocessen. Det antages at forbrændingsprocessen har stor indflydelse på slaggens karakteristika, bl.a. temperaturforhold, opholdstid og ristetype. Projektet søger at belyse sammenhængen mellem slagge kvaliteten og anlæg- og procesparametre på forbrændingsanlæggene.

Målet tænkes nået ved at indsamle viden fra danske forbrændingsanlæg, om hvilke parametre der har indflydelse på slagge kvaliteten.

Udført arbejde

Der er blevet udarbejdet et spørgeskema, der indeholder spørgsmål vedr.:

- affaldstype og forbehandling
- slagge, slaggebehandling og slaggeprøver
- anlægparametre: ovn, ristetype og styring
- procesparametre: opholdstid, forbrændingstemperatur, ilt og røggas og primær/sekundær luft.

Spørgeskemaet er blevet sendt til de affaldsforbrændingsanlæg, der ønsker at deltage i undersøgelsen. Følgende 25 affaldsforbrændingsanlæg har accepteret at deltage i undersøgelsen:

- AVV
- Bofa
- Fynsværket
- Knudmoseværket
- Frederikshavn Affaldskraftvarmeværk
- Hadsund Forbrænding
- Horsens Kraftvarmeværk
- I/S Amagerforbrændning
- I/S FASAN
- I/S KARA
- I/S KAVO Energien
- I/S Kraftvarmeværk Thisted
- I/S REFA
- I/S Reno Nord
- I/S Vestforbrænding
- I/S Aars Varmeværk
- Kolding Affaldskraftvarmeværk
- Kraftvarmeværk Haderslev
- Nordforbrænding
- Svendborg Kraftvarmeværk
- Sønderborg Kraftvarme I/S

- VEGA
- Vejen Kraftvarmeværk
- Vestfyns Forbrænding
- Århus Kommunale Værker - Forbrændingen

Derudover er affaldsforbrændingsanlæggene blevet bedt om at stille slaggeanalyserne for 2001 til rådighed. Alle modtagne data behandles fortroligt.

Status pr. 15. marts 2003: 14 af de 25 deltagende anlæg har returneret det udfyldte spørgeskema og fremsendt kopi af slaggeanalyserne for 2001.

Hovedresultater

Da dataindsamlingen endnu ikke er færdiggjort, er databehandlingen ikke påbegyndt og der er derfor ikke nogle resultater at præsentere. Det forventes dog at en stor del af databehandlingen vil være færdiggjort inden slaggeseminariet, hvorfor resultaterne vil blive præsenteret på seminariet.

Det forventes at være muligt at rapportere hvilke anlægs- og procesparametre der har størst indflydelse på slagge kvaliteten

Konklusion

Ingen endnu.

Projekt	M
Projekttitel	Livscyklusvurdering af vejbygning og anvendelse af restprodukter fra affaldsforbrænding
Projektperiode	2001 – 2004
Forfatter	Harpa Birgisdóttir, Thomas H. Christensen, Miljø & Ressourcer DTU
Kontakt	Harpa Birgisdóttir: hab@er.dtu.dk
Finansiering	I/S Vestforbrænding, I/S Amagerforbrænding, Vejdirektoratet, DTU
Rapporter	Ingen

Formål

Projektet har til formål at opstille en første generations livscyklusvurderingsmodel for vejbygning og anvendelse af slagger og restprodukter fra affaldsforbrænding, idet energimæssige, ressourcemæssige og miljømæssige emissioner kvantificeres for centrale vej kategorier, der udføres og vedligeholdes med forskellige teknologier og materialer.

Blandt materialerne indgår oparbejdede slagger og restprodukter fra affaldsforbrænding og blandt teknologierne indgår nye kombinationer af slagger/ restprodukter og cement/beton til brug i bærelag.

Udført arbejde

Projektet har været i gang i godt 1½ år og har arbejdet fortrinsvis bestået af selve modeludviklingen, etablering af modellens database og udvikling af de principper som skal anvendes til vurdering af miljøpåvirkninger fra hhv. genanvendelse eller deponering af slagger og restprodukter fra affaldsforbrænding.

Modeludvikling

Modeludviklingen indebærer hovedsagelig udvikling af principper bag brugerflade (bl.a. hvilke data brugeren skal råde over og indtaste) og beregningsmetoder (alt fra hvorledes mængder af de anvendte ressourcer kvantificeres til hvorledes udvaskning af komponenter fra vejbygningsmaterialer opgøres som miljøpåvirkninger). Selvom modellen er baseret på en allerede eksisterende LCA metode, nemlig UMIP-metoden, var det alligevel nødvendigt at udvikle en metode til at foretage livscyklusvurdering af vejsystemer. Der er adskillige grunde til dette, f.eks. kompleksiteten af konstruktionen af et vejsystem og dets lange levetid (som faktisk ikke kendes på forhånd). Der er udviklet scenarier for at foretage livscyklusvurdering af vejsystemer i samarbejde med Vejdirektoratet og entreprenører i vejsektoren.

Database

Der er indsamlet LCI-data for en række processer og ressourcer som indgår i modellens database (LCI består for Life Cycle Inventory, på dansk Livscyklusopgørelse). Disse er bl.a.:

- Fremstilling af vejbygningsmaterialer (grusgravsmaterialer, asfalt, beton, afvandringsrør osv.).
- Transport og maskinoperationer for vejbygningsmaskiner.
- Oparbejdning af slagger på Amagerforbrænding, AFATEK og i Århus.

Miljøvurdering

Udvaskning af tungmetaller og salte er en af de væsentligste miljøpåvirkninger, når restprodukter erstatter jomfruelige materialer. Udvaskning kan foregå i lang tid, uanset om materialet bliver deponeret eller brugt i vejsektoren. Muligheden for at sammenligne miljøpåvirkningerne fra udvaskning med andre miljøpåvirkninger har været en større svaghed ved anvendelse af livscyklusvurderinger og en af årsagerne til at LCA ikke er blevet brugt i større omfang til at vurdere miljøpåvirkninger ved deponering af materialer med en lang udvaskningsperiode.

I denne model er problemet løst på en måde der giver et nyt perspektiv i LCA metodologien. Udvaskningen fra restprodukterne er ikke beregnet som mængden af substanser udvasket over en defineret tidshorizont, f.eks. 100 år, som man tidligere har gjort i LCA. Her er udvaskningen set i sammenhæng med udvaskningen af de samme substanser fra den omliggende jord og fra andre (jomfruelige) materialer, der bruges i vejkonstruktion. Koncentrationen af de udvalgte substanser i jordvæsken i omgivelserne betragtes som et acceptabelt niveau og tidshorizonten for udvaskningen fra restprodukterne betragtes indtil koncentrationen af substanserne er nået ned på niveau med omgivelserne. Forsøg med udvaskning bliver foretaget med granulære og monolitiske materialer (både naturlige materialer og restprodukter) for at opbygge en database for udvaskning fra materialer og jord

Hovedresultater og konklusion

Idet der ikke foreligger en færdigudviklet model er der ikke blevet udført modelberegninger som viser resultater fra scenarier for genanvendelse af restprodukter fra affaldsforbrænding i vejbygning.

Der foreligger dog en række delresultater, bl.a. LCI-data for oparbejdning af slagge på Amagerforbrænding, AFATEK og i Århus, beregning på tidshorisonter for udvaskning af slagge og restprodukter, beregninger af energiforbrug i anlægs- og driftsfase af en jysk motorvej osv..

Nærmere oplysninger om livscyklusvurderingsmodellen: Dansk Vejtidskrift, April 4, 2003.

Projekt	N
Projekttitel	Modeling leaching from bottom ash
Projektperiode	2000 - 2006
Forfatter	David Bendz, Swedish Geotechnical Institute Peter Flyhammar, Department of Engineering Geology, Lund University
Kontakt	David Bendz: david.bendz@swedgeo.se Peter Flyhammar: peter.flyhammar@tg.lth.se
Finansiering	Center for Restprodukter, SYSAV, M&R DTU, and the Swedish road administration
Rapporter	Se referencer

Objectives

The overall objective is to develop a predictive model that describes the leaching of contaminants from a construction where bottom ash is used as an alternative ballast material. Specific objectives are to:

- Develop a conceptual model, a qualitative description of the processes, events, emission scenarios and boundary conditions that are crucial for assessing the leaching behavior of bottom ash in a construction. Obviously there is not a unique way of developing a conceptual model based on the available basic information and there is not a unique way of developing a mathematical model based on the conceptual model.
- Investigate the significance of diffusional transport resistance, dispersion, surface controlled reactions and degree of undersaturation for the overall leaching behavior at particle, column and lysimeter scale of major and trace elements.

Activities

Description of the process system

Interaction matrices have been used to systematically describe the process system (road construction) qualitatively and to identify crucial process, interactions and emission scenarios for residues in road constructions. The function of the system was broken down into a number of important components, properties and processes through a top-down approach. By analyzing these and their interactions a conceptual model can be developed (Bendz et al., 2003a).

Experiments in batch and column scale

Batch and column experiments have been performed at the department of Environment & Resources, DTU. The experiments included physical characterization of the bottom ash particles and leaching- and tracer experiments:

- Leaching- and tracer experiments in batches at L/S 20 were performed with 3-month old MSWI bottom ash separated into eight different particle sizes. Physical properties of the particles, the specific surface (BET), pore volume and pore volume distribution over pore sizes (BJH) was determined for all particle classes by N₂ adsorption/desorption experiments. The diffusion resistance was determined independently by separate tracer (tritium) experiments (Tüchsen et al, 2003).
- Three column experiments at different flow rates were performed in order to investigate the influence of physical and chemical non-equilibrium on the leaching process. By conducting a tracer experiments simultaneously the physical transport parameters could be determined by inverse modeling independently (Bendz et al, 2003b; Cheng, 2001).

Ongoing 2-D experiment

Leaching experiments and modeling of the leaching process in 2-D in an intermediate scale (250 kg bottom ash) using a physical model of a road section at the Department of Engineering Geology, LTH, is currently taking place.

Results

Some common features of physical pore structure for bottom ash particles of different sizes were revealed by N₂ adsorption/desorption experiments. Not surprisingly, the specific surface was found to be the major material parameter that governed the leaching behavior of Chloride, Potassium, Sodium, Calcium and Sulphate for all particle sizes. Accordingly, the smallest particles, having the largest specific surface, give a disproportional contribution to the overall leaching behavior.

Inverse modeling of the release of Cl⁻, K⁺, Na⁺, using empirical rate laws, revealed that surface reaction was the overall rate controlling mechanism for all particle sizes with exception of the first phase of leaching. Diffusion gave a significant contribution to the apparent leaching kinetics for all elements during the first 10-40 hours (depending on the particle size) of leaching in batches at L/S 20. For sulfate and calcium the coupled effect of diffusion resistance and the degree of undersaturation in the intra particle pore volume, with respect to Gypsum, was found to be a major rate limiting dissolution mechanism for both early and late times.

In the column experiments the effects of nonuniform flow arising due to physical heterogeneity were accounted by treating transport within the framework of the stochastic-convective reactive process. Model simulations focusing on the relative influences of physical versus chemical processes on the apparent dispersion revealed the significance of the distributions of travel times and dissolution kinetics. The flow interruption method was used to investigate the presence of rate limited transport processes.

Conclusion

Description of the process system: For the purpose of predictive modeling of emissions the road ought to be treated as an integrated system instead of treating the diffusion controlled domain and the advection controlled domain separately.

Experiments in batch and column scale: So far the modeling of the leaching process in bottom ash has been restricted to Chloride, Potassium, Sodium, Calcium and Sulphate. Future work will be focused on modeling of the release and transport of trace metals. Based on the conducted work it may be concluded that the influence of physical leaching processes is significant for early times. Although their importance as rate limiting processes diminish with time, they may still be important when coupled with chemical processes. In general and for all elements, the asymptotic leaching behavior is governed by surface reaction, solubility and possibly the field scale heterogeneity. Modeling leaching as a 1-D stochastic-convective reactive process seems to be an attractive alternative instead of approaching the problem with heavy artillery 3-D numerical transport and reaction codes.

References

- Bendz, D., P. Flyhammar, T.R. Ginn (2001) The formation and movement of pH fronts along preferential flow paths in MSWI bottom ash, Symposium Sardinia 2001, Eight International Waste Management and Landfill Symposium, October 1-5, Cagliari, Italy, vol. I, 479-488.
- Bendz, D., P. Flyhammar, J. Hartlén, M. Elert (2003a) *Leaching from residues used in highway applications – a system analysis*, In: Environmental Impact Assessment of Recycled Hazardous Waste Materials On Surface and Groundwaters: Chemodynamics, Toxicology, Modeling and Information System, Water Pollution Series, Springer Verlag (in press).
- Cheng, D. (2001) Study of leaching from MSWI Bottom Ash, Master Thesis, Supervisors: T.H Christensen, P.L Tüchsen, IMT, DTU, 75 p.
- Tüchsen, P.L., D. Bendz, D., T.H. Christensen (2003) The dissolution kinetics of major elements in municipal solid waste incineration bottom ash (Manuscript)
- Bendz, D., P.L. Tüchsen, T.H. Christensen (2003b) The dissolution of major elements and transport of non-sorbing solute in municipal solid waste incineration bottom ash, (Manuscript)

Projekt	O
Projekttitel	Efterbehandling af slagge
Projektperiode	2000 - 2001
Forfatter	Bo Sander, Elsam A/S
Kontakt	bos@elsam.com, tlf. 7923 3325
Finansiering	Eltra PSO-midler
Rapporter	"Affaldsforbrænding. Efterbehandling af slagge. Slutrapport for Eltra PSO-projekt nr. 1991", juli 2002.

Formål

Ved ikrafttrædelsen af Bekendtgørelse nr. 655 pr. 1. januar 2001 er der i Danmark indført skærpede krav til slagge fra affaldsforbrænding, der ønskes nyttiggjort til bygge- og anlægsformål. Bekendtgørelsen indebærer, at der skal udføres udvaskningstest på slaggen og der er i tilknytning hertil opstillet kravværdier for salte (klorid, sulfat og natrium) og tungmetaller (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb og Zn) i eluatet i henhold til anvendelsesområde (kategori 2 og 3).

De meget lave kravværdier for kategori 2 medfører en betydelig indskrænkning af slaggens anvendelsesmuligheder. Tidligere undersøgelser har vist, at slaggevaske med rent vand ikke kan nedbringe opløseligheden af sulfat tilstrækkeligt, men at tilsætning af karbonat til vaskevandet kan mobilisere sulfat fra slaggen.

På denne baggrund har projektets mål været at gennemføre laboratorieundersøgelser af slaggeudvaskning med karbonatilsætning med henblik på fastlæggelse af optimale procesbetingelser for efterbehandling af slagge, herunder hvorledes også de skærpede krav til udvaskning af tungmetaller kan opfyldes samt at beskrive behovet for pilotforsøg og foretage en økonomisk evaluering af processen.

Udført arbejde

Der er i projektet gennemført 8 forsøgsserier med 31 enkeltforsøg omfattende slagge fra fem forskellige affaldsforbrændingsanlæg. Ved forsøgene er hydrogenkarbonatstøkiometrien varieret fra 0 til 4, og der er herudover foretaget forsøg med store slaggepartikler og med tilsætning af additiver.

Hovedresultater og konklusion

De udførte laboratorieforsøg med vask af affaldsslagge under tilsætning af natriumhydrogenkarbonat har vist, at der kan opnås gode resultater med hensyn til mobilisering af slaggens sulfatindhold og den som følge heraf reducerede opløselighed af sulfat.

Ved vask af affaldsslagge neddelt til < 4 mm i laboratorieskala med et L/S-forhold på 2 og tilsætning af natriumhydrogenkarbonat er det i de fleste tilfælde muligt at opfylde kategori 2-krav i bekendtgørelse nr. 655 for klorid, sulfat og natrium for både frisk og modnet slagge. Dog ses i nogle tilfælde mindre overskridelser, hvilket for klorid og natriums vedkommende kan tilskrives, at skylningen ikke altid er effektiv nok. Overskridelser for sulfat skyldes formodentligt, at en sulfat/karbonatstøkiometri på 3 for nogle slaggetyper ikke er tilstrækkelig høj.

I praksis er det dog en ikke-neddelt slagge, der skal behandles og kravene i bekendtgørelse nr. 655 om nedknusning af slagge før udvaskningstesten gennemføres, medfører en yderligere frigørelse af salte, der vil kunne bidrage væsentligt til udvaskningen. Hertil kommer, at det i et fuldskalavaskeanlæg vil være vanskeligt at opnå en lige så effektiv skylning som i laboratoriet. I praksis vil det således næppe være muligt generelt at nå kategori 2-krav for saltene ved slaggevaske ved et vandforbrug på i størrelsesordenen 2 m³/ton tør slagge. En udskilning af finfraktionen < 0,1 mm vil i et vist omfang kunne forbedre resultaterne.

For As, Cd, Ni, Pb og Zn kan kategori 2-kravene som regel overholdes efter vask af slagge. As kan dog i nogle tilfælde ligge en anelse over kravværdien. For Cr og Cu er kategori 2-kravene derimod meget problematiske.

Ved vask af frisk slagge er det i ingen tilfælde lykkedes at komme under kravværdierne, og der er ikke fundet additiver, der kan løse problemet. For Cr ligger værdierne typisk en faktor 2-6 over kravværdien og for Cu typisk en faktor 2-4.

Ved vask af modnet slagge er situationen bedre. Modning af slagge reducerer opløseligheden af Cr og Cu betydeligt, og det lave udvaskningsniveau kan fastholdes efter en vaskeproces. Nogle slaggeprøver kan overholde kategori 2-krav for Cr og Cu efter modning, men det gælder langt fra altid. Der mangler viden om under hvilke lagringsforhold, der kan opnås en effektiv reduktion af opløseligheden af Cr og Cu under modning. Modnet slagge vil dog under alle omstændigheder være det bedste udgangspunkt for vask af slagge.

Det næste naturlige skridt i en procesudvikling vil være pilotskalaforsøg med vask af slagge under tilsætning af natriumhydrogenkarbonat. Formålet med pilotskalaforsøgene vil være at få fastlagt hvilken slagge kvalitet, der vil kunne opnås ved vask af frisk og modnet slagge af forskellig oprindelse, dvs., hvor tæt man i praksis kan komme på kategori 2-kravene for salte samt Cr og Cu.

Et jordvaskeanlæg med udskilning af finfraktioner vil i princippet være et godt udgangspunkt for pilotforsøg med vask af slagge fra affaldsforbrænding. For at opnå tilfredsstillende resultater for udvaskning af klorid og natrium ved begrænset vandforbrug vil det dog være nødvendigt at tilføje et trin til skylning af den vaskede slagge. Skyllenvandet recirkuleres til det første vasketrin. Et pilotanlæg til slaggevaske bør have en kapacitet på ikke mindre end 500 kg slagge/time.

Den økonomiske vurdering af slaggevaskeprocessen viser, at behandlingsomkostningerne ved en kapacitet på 100.000 ton slagge/år udgør omkring 200 DKK/ton, hvilket er langt mindre end omkostningerne til deponering. Slaggevaske vil dog kun være relevant, hvis kravene til kategori 2 bliver lempet.

Projekt	P
Projekttitel	Separation af affaldsforbrændingsslagge for optimeret udnyttelse af slaggefraktioner og slagge
Projektperiode	2002 - 2003
Forfatter	Jim Hansen, Sekretariat for Aluminium & Miljø
Kontakt	alu-info@inet.uni2.dk, tlf. 6614 4410
Finansiering	Miljøstyrelsen, Program for renere produkter mv. – 2001. Udviklingsordningens 4. Ansøgningsrunde 2001, Affald/Genanvendelse - 5.1.3. Udvalgte indsatsområder: - Slagger fra forbrændingsanlæg. Projektet gennemføres i samarbejde med H.J. Hansen Genvindingsindustri A/S, ELSAM, AFATEK og EAA/Packalu
Rapporter	Ingen endnu, udgives af Miljøstyrelsen

Formål

Vurdering af genvindingspotentialer for aluminium fra forbrændingsslagge fra de danske affaldsforbrændingsanlæg baseret på gennemførelse af testseparation på uafhængige slaggepartier. Herunder vurdering af kvaliteten af den separerede, ikke magnetiske metalfraktion og sammenligning med europæiske erfaringsdata. Vurdering af separationspotentialer for andre elementer i forbrændingslaggen.

I separationsprojektet afprøves ny "detection/ejection" baseret separationsteknologi og metalseparation gennemføres på basis af bearbejdning af frisk råslagge for at minimere påvirkningen af metallernes kvalitet i det stærkt korrosive slaggemiljø.

Udarbejdelse af overordnet kalkulation af nødvendige investeringsomfang mht. etablering af separationsfaciliteter sat i forhold til spredningen af anlæg, anlægsstørrelser og slaggemængder.

Udført arbejde

I perioden august 2002 til marts 2003, er der på H.J. Hansen Genvindingsindustri A/S's anlæg i Odense gennemført separation af metaller fra 5 individuelle partier af frisk råslagge omfattende i alt ca. 230 ton slagge. I forbindelse med sammensætningen af slaggepartier er det søgt at dække et væsentligt og repræsentativt udsnit af affaldsdannelsen i Danmark. I tilknytning til udtagningen fra de specifikke værker er der samtidig skelet til anvendte forbrændingsteknologi og ovntype. De ca. 230 ton fordeler sig på udtagning fra hhv.:

- ELSAM:
 - slaggepartier fra Odense Kraftvarmeværk ca. 90 ton
 - slaggepartier Vejen ca. 60 ton
- AFATEK:
 - slaggeparti fra KARA ca 30 ton
 - slaggeparti fra Vestforbrænding ca. 30 ton

Forbehandling. Slaggepartierne er forbehandlet ved almindelig sigtning i rotertromle på Odense Nord Miljøcenter for opdeling af slaggen i hhv. lille og stor fraktion. Sigtefraktionen indeholdende store emner er efterfølgende neddelte og genindblandet den samlede fraktion før afsluttende oparbejdning på separationsanlæg.

Oparbejdning af metaller. Den efterfølgende oparbejdning af metal foregår ved at den homogeniserede metalliske slagge indføres i separationsanlægget, hvor det ikke magnetiske metal frasorteres via "detection/ejection" teknologi. De identificerede metalemner på transportbåndet udskilles via luftdyser. Den magnetiske jernfraktion udtages med overbåndmagneter. Anlægget er indstillet til oparbejdning på partikelstørrelser over 6-7 mm. [Øvrig anlægsbeskrivelse v. H.J. Hansen Genvindingsindustri A/S].

Sammenfaldende med separationen er gennemført en screening af indsatsen mht. slaggeseparation i Europa – hovedsageligt Frankrig og Holland.

Hovedresultater

En foreløbig samlet vurdering af testseparationer og udbytte:

- Udbyttet af ikke magnetisk metal svinger fra mellem 0,16 % og 0,45 % af råslaggen.
- Udbyttet af magnetisk fraktion svinger fra mellem 3,6 og 6,9 % af råslaggen.
- Udbyttet vurderes pga. renhed i sortering og ringe grad af oxidering, af en så høj kvalitet, at metalfraktionerne [såvel forbrændingsjern som de ikke magnetiske metaller] kan fases direkte ind i øvrige metalfraktioner fra shredder.
- Genvindingspotentialiet fra sigtefraktionen < 6 mm vurderes at indeholde betydelige mængder metal. Resultat af afsluttende separation, marts 2003 for afklaring af metalpotentialiet i den fine sigte fraktion er ikke afsluttet. En ikke offentlig gjort undersøgelse foretaget i Holland understøtter vurderingen af tilstedeværelsen af et betydeligt metalpotential.
- Udbyttet er, med forbehold for variationerne og det relativt beskedne testgrundlag på ca. 230 ton, sammenligneligt med realiseret udbyttet i andre lande fx. Holland hvor det gennemsnitlige realiserede udbytte af aluminium ligger på 0,36 % af den samlede forbrændingsslagge. Information fra Frankrig er ikke færdigbearbejdet, men genvindingsprocenten (ud fra fransk opgørelsesmetode) skønnes at ligge en anelse højere.
- Separationsprocessen vurderes ikke at have haft nogen negativ indflydelse på slaggens beskaffenhed i forhold til den efterfølgende anvendelse heraf.

Projekt	Q
Projekttitel	Udvaskning af kobber og organisk stof fra bundslagge
Projektperiode	2002 - 2003
Forfatter	Christian Grøn, Trine Thorup Andersen, Jette Bjerre Hansen, Jørn Isaksen, Susanne Klem, DHI - Institut for Vand og Miljø Lone Nordquist, Eurofins A/S
Kontakt	Christian Grøn: chg@dhi.dk, tlf. 4516 9570
Finansiering	Vestforbrænding, Amagerforbrænding og DHI (C-RES). Eurofins A/S deltog endvidere i undersøgelsen
Rapporter	Udvaskning af organisk stof og kobber fra bundslagge, april 2003, DHI

Formål

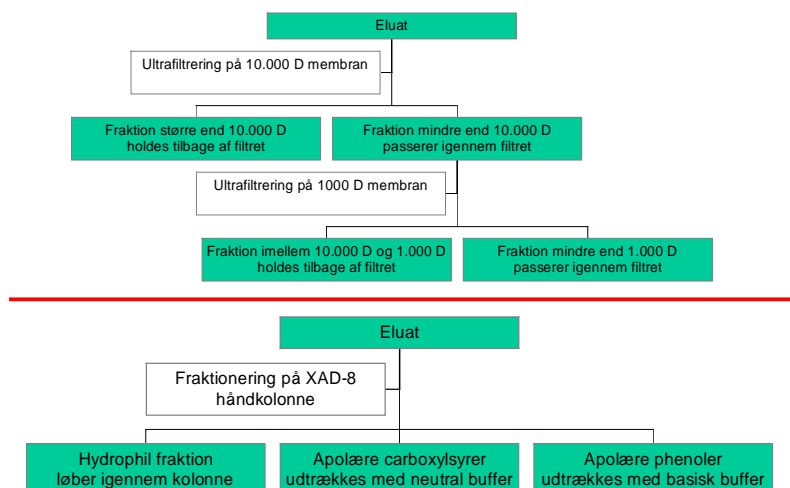
Der er på Vestforbrænding (VF) fundet udvaskning af kobber fra slagge i uønsket høje koncentrationer fra ét anlæg (Vest Anlæg 5, risteovn), men væsentligt lavere (faktor 50) koncentrationer fra et andet (Vest Anlæg 1-4, rotéovn). Der er ligeledes højere udvaskning af total organisk kulstof (TOC) fra anlæg 5 end fra anlæg 1-4. Reduktion af udvaskning af både kobber og organisk stof er fundet efter modning af slaggen. Høj udvaskning af kobber fra slagge, kobling til udvaskning af organisk stof og udvaskningsreduktion ved modning er tilsvarende rapporteret fra internationale og andre danske undersøgelser.

Der er derfor foretaget en afgrænset undersøgelse af koblingen imellem kobber og TOC udvaskning, samt af årsagerne til den forskellige udvaskning for de to anlæg på Vestforbrænding. De konkrete mål for undersøgelsen har været at belyse:

- Sammensætningen af udvaskeligt organisk stof fra de to slaggetyper
 - Hvorfor er udvaskningen af organisk stof og kobber fra de to slaggetyper forskellig, og hvilke konsekvenser har det for modning/behandlelighed?
- Effekt af modning på organisk stof sammensætning og mulig involvering af mikrobiel omsætning
 - Hvordan kan modning designes for at opnå acceptable slutudvaskeligheder for kobber?

Udført arbejde

Der er gennemført en undersøgelse af TOC-fraktioner i eluater og deres binding af kobber, samt undersøgelse af mikrobiel omsætning af organisk stof under ældning af slagge. Undersøgelsen er gennemført som en kombination af modningsforsøg, udvaskningsforsøg, fraktionering af udvasket organisk stof og kobber efter molekylvægt og polaritet/syrestyrke, samt mikrobielle



nedbrydningsforsøg. Principperne for fraktionering af opløst organisk stof og kobber i eluater fra slagge er vist i nedenstående figur, øverst fraktionering efter molekylvægt, nederst efter polaritet/syrestyrke.

Hovedresultater

Undersøgelsen har under kontrollerede forhold vist, at:

- Eluatet fra slagge fra Anlæg 1-4 indeholder mindre kobber end fra Anlæg 5, formodentlig pga.:
 - et lavere indhold af kobber og organisk stof i slaggen
 - en lavere udvaskelighed af slaggens kobber på grund af anderledes binding i mineralfasen
 - en dårligere kompleksbinding af kobber for de kortkædede, organiske syrer i eluatet på grund af deres anderledes kemiske egenskaber
- Eluatet fra slagge fra Anlæg 5 indeholder mindre kobber efter modning, formodentlig på grund af:
 - en lavere udvaskelighed af slaggens kobber på grund af ændret binding i mineralfasen
 - fordampning af de kompleksbindende kortkædede, organiske syrer under modningen
 - binding af kompleksbindende organisk stof til slaggens mineralfase

Perkolatdannelse og mikrobiologisk nedbrydning af kompleksbindende, udvaskningsfremmende organisk stof var ikke af betydning for den reducerede udvaskning af kobber efter modning.

Reduktionen i kobberudvaskning ved modning var cirka 85% og gav overholdelse af restproduktbekendtgørelsens kategori 3 grænse, men ikke af kategori 2 grænsen.

Konklusioner

Undersøgelsen er færdiggjort, med enkelte behov for afklarende undersøgelser, men hovedkonklusionerne med hensyn til design af slaggemodning er:

- Der er ikke nødvendigt at designe efter optimal mikrobiel omsætning
- Der er ikke nødvendigt at designe efter optimal udvaskning
- Design skal tilsigte maksimal fordampning af organiske syrer og binding af organiske stoffer i slaggen
- Design skal tilsigte maksimal omdannelse af slaggens mineralmatrice med hensyn til binding af kobber
- Modning i bunker med god tilgang af luft, vanding uden vandmætning, samt periodisk vending er dermed det rette udgangspunkt for design af modningsteknik

Det væsentligste manglende punkt vedrørende design af slaggemodning er undersøgelser af modningens tidsafhængighed (hvor længe skal slaggen ligge til modning) og optimering af den fysiske udformning af slaggebunker, nødvendig vanding og nødvendig vending.

Projekt	R
Projekttitel	Udvaskning fra slagge i cement-stabiliserede bundsikrings- og bærelag
Projektperiode	2001 - 2003
Forfatter	Thomas H. Christensen og Zuansi Cai, Miljø & Ressourcer DTU, Danmarks Tekniske Universitet Dirch H. Bager, Research and Development Centre, Aalborg Portland A/S
Kontakt	Thomas H. Christensen: thc@er.dtu.dk, tlf. 4525 1603
Finansiering	Aalborg Portland A/S, Miljø & Ressourcer DTU samt Ferroxyprojektet
Rapporter	Se referencer

Formål

Ved at cement-stabilisere forbrændingsslagge med 3-5 % cement opnås et monolitisk produkt med fornuftige styrkeegenskaber og reduceret udvaskning. Produktet kan potentielt anvendes som bærelag i veje, parkeringspladser og havneanlæg. Styrkeegenskaberne afhænger primært af cementindholdet og kan dimensioneres efter ønske. Udvaskningen fra cement-stabiliserede monolitiske prøver er målt i tank-udvaskningstest og sammenlignet med udvaskningen fra tilsvarende udstøbninger med grus i stedet for slagge. Der findes ikke danske kriterier for udvaskningen fra monolitiske slagge, men præliminære omregninger viser, at udvaskningen fra cement-stabiliseret slagge er mindre end fra granulær slagge.

Udført arbejde

Der er gennemført udstøbninger af en række cementbaserede bærelag, idet traditionelle materialer som grus og kulflyveaske i forskellige kombinationer er substitueret med Ferroxy-behandlet flyveaske/røggasrensningsprodukter, slagge samt sammensintrede slagge og Ferroxy-behandlet røggasrensningsprodukter. Der i alt udført 9 forskellige dupliserede udstøbninger. Her rapporteres kun resultater for referenceudstøbninger (grus og kulflyveaske) og for udstøbninger hvor slagge (to forskellige, BA1 og BA2) er substitueret med grus: i alt 6 monolitter repræsenterende 3 forsøgskombinationer.

Udstøbningerne er udført på Aalborg Portlands forskningslaboratorium (per m³: 50 kg cement, 110 kg kulaske, 2150 kg grus eller 1800 kg slagge), forseglede og modnet i 7 dage før styrkeprøvningen. Styrken var 8-11 MPa, hvilket er tilstrækkeligt for anvendelse i bærelag i visse vejtyper. Efter 14 dage udboredes kerne (diameter 100mm, højde 150 mm) til tank-udvaskningstest. Disse blev gennemført efter Hollandske standarder med 8 prøver udtaget over 64 døgn. Prøverne er analyseret for salte og tungmetaller.

Hovedresultater

Indholdet af metaller var ca. 100 gange højere i prøverne med slagge end i prøverne med grus, hvilket betyder at det cementstabiliserede materiale kun bør benyttes til specifikke formål. Udvaskningen af klorid og natrium var en faktor 20-100 højere end i referencen, mens kalium, calcium og sulfat kun var 2-10 gange højere end fra referencen. Udvaskningen fra slaggeprøverne var forhøjet i forhold til referencen for Cu (50 gange), Cd, Pb og Zn (5 gange), men ikke for Cr og Ni.

Udvaskningskurverne viste for enkelte elementer at udvaskningen var styret af diffusion, men for de fleste elementer var udvaskningen fra prøverne med slagge aftagende over tid, hvilket tyder på øget kemisk retardation i monolitten. Den fysiske retardation var ens i alle prøver, men retardationen af tungmetaller var væsentligt højere i prøverne med slagge end i prøverne med grus. Tabel 1 viser målte fluxe over 64 dage samt estimerede effektive diffusionskoefficienter for de elementer, hvis udvaskninger styret af diffusion.

Tabel 1. Målte akkumulerede udvaskninger over 64 dage (M_x , 64 dage i mg/m^2) og estimerede effektive diffusionskoefficienter (pD_{ex} , $-\log(\text{ms}^{-2})$). De 2 værdier repræsenterer duplikater. Værdien for pD_{ex} er kun angivet for elementer, hvis udvaskning er styret af diffusion.

x	Reference Kulaske + grus		Exp.1 Kulaske + BA1		Exp. 2 Kulaske + BA2	
	M_x	pD_{ex}	M_x	pD_{ex}	M_x	pD_{ex}
Al*	165	13.1	4200	*	4930	*
	115	13.6	5500	*	4610	*
As*	<3	b	<3	*	<3	*
	<3	b	<3	*	<3	*
Ba*	6.0	13.7	18.7	*	14.8	*
	4.0	14.2	16.0	*	13.0	*
Ca	5370	13.9	13400	14.6	10000	14.6
	4240	14.4	8280	15.0	9520	14.8
Cd*	<0.12	>15.0	0.57	*	0.56	*
	<0.12	>15.0	0.46	*	0.42	*
Cl	420	b	29600	a	37700	a
	1100	b	31100	a	32150	10.4
Cr	6.70	10.4	3.29	a	3.48	a
	6.95	11.3	4.11	a	2.97	13.4
Cu*	<0.6	>16.3	27.5	*	28.5	*
	0.6	14.2	30.1	*	25.7	*
Fe*	24	13.0	11.0	*	10.2	*
	30	13.5	8.3	*	8.3	*
K	3220	10.3	20750	a	23150	a
	3320	10.6	21250	a	19600	10.7
Mg*	50	*	11.9	*	11.0	*
	51	*	13.9	*	9.2	*
Mn*	<6.0	>13.5	<6.4	*	<6.2	*
	<6.0	>13.6	<6.5	*	<6.0	*
Na	1440	10.3	52700	a	63550	a
	1430	10.5	58550	a	55600	10.4
Ni*	<0.6	>13.1	3.1	*	<0.62	*
	<0.6	>12.8	<0.6	*	<0.60	*
Pb	<0.6	>11.7	2.25	16.9	1.12	a
	0.75	11.7	0.85	17.4	1.39	a
Se*	<3	b	<3	*	<3	*
	<3	b	<3	*	<3	*
SO ₄	2080	11.6	5880	a	9040	a
	2130	12.1	9390	a	7030	a
Zn*	<6.1	>14.0	<6.4	*	6.4	*
	<6.1	>13.0	6.8	*	5.8	*
V*	6	11.2	0.7	*	8.1	*
	7	11.5	8.2	*	6.7	*

*) Kun en enkelt sammenblandet prøve blev analyseret og udvaskningsmekanismen kan derfor bestemmes. a) pD_e kan ikke beregnes, da udvaskningen ikke kun er diffusionsstyret. b) Tilgængelighedstesten var under detektionsgrænsen.

Konklusion

Cement-stabilisering (5 %) af slagger tilfører materialet styrkeegenskaber og reducerer udvaskningen. Præliminære udregninger som betragter udvaskningen per arealenhed og tid for granulære slagger anvendt i veje tyder på at udvaskningen fra de monolitiske materialer kan overholde eksisterende danske grænser.

Referencer

- Cai, Z.; Bager, D.H.; Jensen, D.L. & Christensen, T.H. (2003): Reuse of stabilized flue gas ashes from solid waste incineration in cement-treated base layers for pavements. *Waste Management & Research*.
- Cai, Z.; Bager, D.H.; Mosbæk, H. & Christensen, T.H. (2003): Leaching from solid waste incineration ashes used in cement-treated base layers for pavements. Accepted for publication in *Waste Management*.
- Odei-larbi, E. & Khawaja, I. (2003): Reuse of incinerator ashes in road construction. M. Sc. Thesis. Environment & Resources DTU, Technical University of Denmark, February 2003.

Projekt	S
Projekttitel	Marin anvendelse af slagge fra affaldsforbrændingsanlæg
Projektperiode	2002 - 2003
Forfatter	Dorthe Lærke Baun, Jesper Holm, Ole Hjelmar, DHI – Institut for Vand og Miljø
Kontakt	Dorthe Lærke Baun: dlj@dhi.dk, tlf. 4516 9441
Finansiering	I/S Amagerforbrænding, I/S Vestforbrænding og Center for Restprodukter (C-RES). DHI samarbejder endvidere med RGS 90 om projektet ”Baltic Gate, vurdering af potentiel stofemission ved opfyldning med forurenede materialer”. Dette projekt er finansieret af RGS 90 og Center for Restprodukter (C-RES).
Rapporter	Ingen endnu; vil blive afrapporteret i "Marin anvendelse af slagge fra affaldsforbrændingsanlæg: Miljømæssige konsekvenser" samt en rapport i forbindelse med projektet ”Baltic Gate, ”Vurdering af potentiel stofemission ved opfyldning med forurenede materialer”

Formål

Formålet med projektet er at undersøge de miljømæssige konsekvenser af at anvende affaldsforbrændingsslagge i stedet for friktionsfyld og/eller sand til opfyldning i forbindelse med kajanlæg eller andre anlægsarbejder i marine miljøer.

Udført arbejde

Projektet har omfattet etablering af scenariebeskrivelser for opbygning og drift af et kajanlæg ved anvendelse af affaldsforbrændingsslagge. Den miljømæssige belastning af omgivelserne opdeles i 2 faser, anlægsfasen og driftfasen. I anlægsfasen vil der være betydelig stofudvaskning, mens der i driftfasen kun vil være meget begrænset stofudvaskning og denne stofudvaskning vil sandsynligvis være domineret af eller sammenlignelig med diffusion.

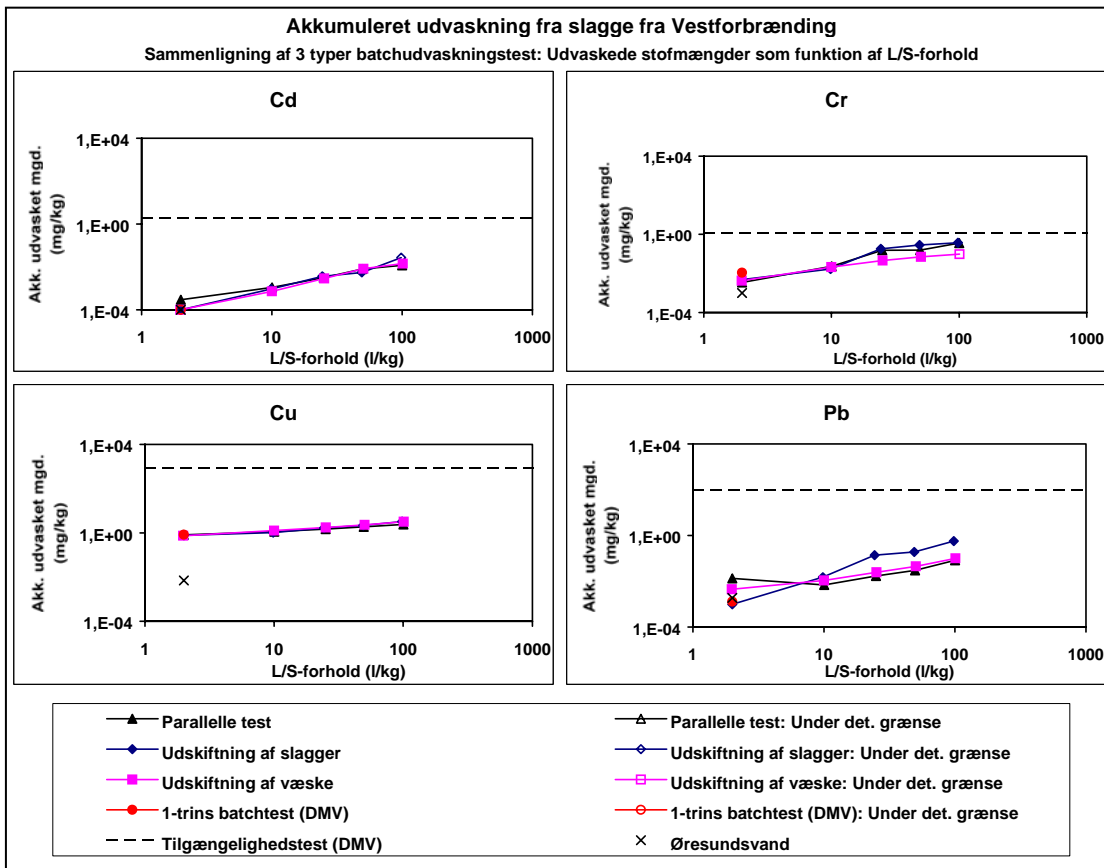
Den eksperimentelle del af projektet har omfattet laboratorieforsøg og pilotskalaforsøg. I laboratoriet er der udført 5 typer udvaskningstests på harpet lagret slagge fra Amagerforbrænding og Vestforbrænding: enkelte batchtests ved forskelligt væske/faststofforhold (L/S-forhold), sekventielle batchtests med udskiftning af vand, sekventielle batchtests med udskiftning af slagge, tankudvaskningstests for granulære materialer samt tilgængelighedstests. Til udvaskningen er der primært anvendt Øresundsvand for at få en god simulering af stofudvaskningen i marine miljøer. Pilotskalaforsøgene blev udført, så slaggen faldt ned igennem vandet på samme måde, som det vil være tilfældet ved opbygning af marine anlæg. Pilotskalaforsøgene blev kun udført på harpet lagret slagge fra Amagerforbrænding med Øresundsvand som udvaskningsvæske. Som led i forsøgene blev betydningen af falddybden for slaggen gennem vandet undersøgt. Ud fra forsøgene i pilotskala er det muligt at bestemme den resulterende ”effektive” L/S-værdi, som den her målte stofudvaskning svarer til i forhold til batchudvaskningstestene.

Hovedresultater

Udvaskningstests i laboratieskala

Som eksempel på resultaterne af de gennemførte batchudvaskningstests er de opnåede resultater for udvalgte sporelementer for slaggen fra Vestforbrænding vist i figur 1. Der var ingen entydig forskel på de opnåede resultater ved anvendelse af forskellige typer af udvaskningstests. De akkumulerede udvaskede mængder var således uafhængige af opbygningen af den anvendte udvaskningstest, og der kan vælges den testtype, der er mindst ressourcekrævende.

De gennemførte tankudvaskningstests viste, at udvaskningen i starten af testen var domineret af diffusion. Herefter blev det tilgængelige indhold af de fleste stoffer reduceret i slaggens overfladelag, hvorved stofudvaskningen faldt. Estimer af stofudvaskningen over en 10 års driftperiode viste, at der kun vil ske en meget begrænset udvaskning af sporelementer. Den samlede afgivelse af det enkelte



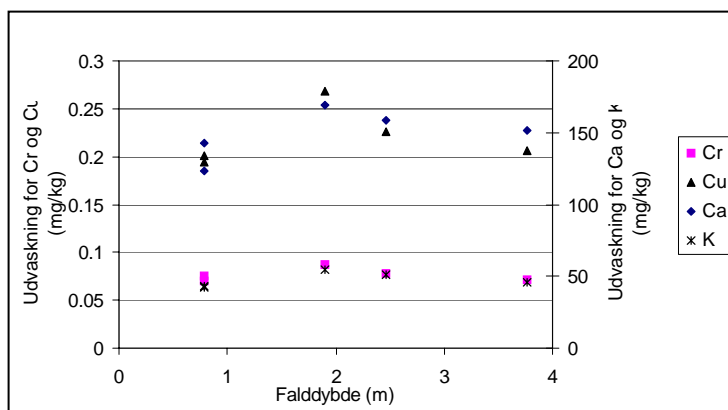
Figur 1. Den akkumulerede udvaskning af Cd, Cr, Cu og Pb som funktion af L/S-forholdet for forskellige typer batchudvaskningstests for harpet lagret slagge fra Vestforbrænding.

sporelement vil over 10 år typisk være under 10 mg/m^2 og for de fleste sporelementer endda under 1 mg/m^2 .

Pilotskalaforsøg

Udvalgte resultater af pilotskalaforsøgene er vist på figur 2, hvor den samlede stofudvaskning fra slaggen er vist som funktion af falddybden. Som det fremgår af figuren var stofudvaskningen fra slaggen uafhængig af falddybden.

Ved pilotskalaforsøgene blev der opnået et gennemsnitligt L/S-forhold på 1,2 l/kg. Foreløbig sammenligning med stofudvaskningen ved batchudvaskningstestene i laboratorieskala gav et



Figur 2. Samlet udvaskning fra slaggen for Cr og Cu (y-akse i venstre side) samt Ca og K (y-akse i højre side) som funktion af gennemsnitlig falddybde.

tilsvarende L/S-forhold. De opnåede resultater tyder således på, at stofudvaskningen generelt ikke var påvirket af forsøgsmetoden. Dette vil blive nærmere vurderet inden projektet afsluttes.

Konklusion

Det beskrevne projekt er endnu ikke afsluttet, men vil blive afsluttet i løbet af foråret 2003. Overordnet set kan det konkluderes, at stofudvaskningen fra slagge ikke er afhængig af falddybden ved opfyldning i marine miljøer. Det kan ligeledes konkluderes, at batchudvaskningstests i laboratorieskala kan anvendes til at bestemme den forventede udvaskede stofmængde fra slagge i forbindelse med opbygningen af marine anlæg som f.eks. havne.

Tankudvaskningstests viste, at stofudvaskningen i forbindelse med driftfasen i begyndelsen vil være diffusionskontrolleret. Der vil dog ret hurtigt være reduceret tilgængeligt indhold i slaggens overfladelag, hvorved stofudvaskningen vil falde, og selv over en lang driftsperiode som f.eks. 10 år, vil der sandsynligvis kun ske en meget begrænset udvaskning af sporelementer på under 10 mg/m².

Projekt	T
Projekttitel	Kvalitetsforbedring gennem lagring og vask med CO ₂ i slaggeslukningen
Projektperiode	2001
Forfatter	Kim Crillesen, I/S Vestforbrænding Ole Hjelmar, DHI - Institut for Vand og Miljø
Kontakt	Kim Crillesen: kc@vestfor.dk, tlf. 4485 7284
Finansiering	Ansaldo Vølund, I/S Vestforbrænding
Rapporter	Ingen

Formål

Stor udvaskning af visse tungmetaller fra friske slagge var baggrunden for dette to-delte projekt, der sigter dels på fastlæggelse af ældningsprocessernes betydning for udvaskningen fra slagge, dels på undersøgelse af mulighederne for at forbedre kvaliteten af slagge ved vask og tilsætning af kuldioxid i slaggeslukningsprocessen på anlægget.

Lagringsforsøget (A) havde til formål at følge og registrere de ændringer i udvaskningsegenskaber for slagge fra Vestforbrænding anlæg 5, som lagring i fugtig tilstand i kontakt med atmosfærisk luft medfører. Forsøget blev gennemført dels i fuldskala dels i mindre skala under mere kontrollable forhold på DHI.

Kvalitetsforbedringsforsøget (B) udført direkte i slaggeslukningsprocessen på Vestforbrænding havde til formål at undersøge indflydelsen af vask med store mængder vand (og kvaliteten af vaskevandet) samt om der kunne opnås en forceret modning af slaggen gennem tilførsel af CO₂ i slukningsbadet (pushersystemet).

Udført arbejde

Lagringsforsøg A

Der er løbende udtaget prøver fra slaggebunke på Holme Olstrup (5000 tons), som er behandlet efter "normal" procedure, hvilket vil sige sprinkling efter behov uden vendinger. Sideløbende er der udtaget prøver fra en mindre bunke på DHI (200 kg), som er blevet vandet og vendt efter behov.

Forbedringsforsøg B

I slaggepushersystemet (slaggeslukning) på Vestforbrænding er der i alt udført 10 forsøg. Der er udført forsøg med normal vandmængde til slaggeslukning (L/S=0,2), med større mængder vaskevand (L/S=2), samt med større mængder vand og samtidig tilsætning af CO₂. Endvidere er betydningen af at anvende rent vand til slaggeslukning i stedet for vaskevand fra ristegennemfaldsmayfran undersøgt.

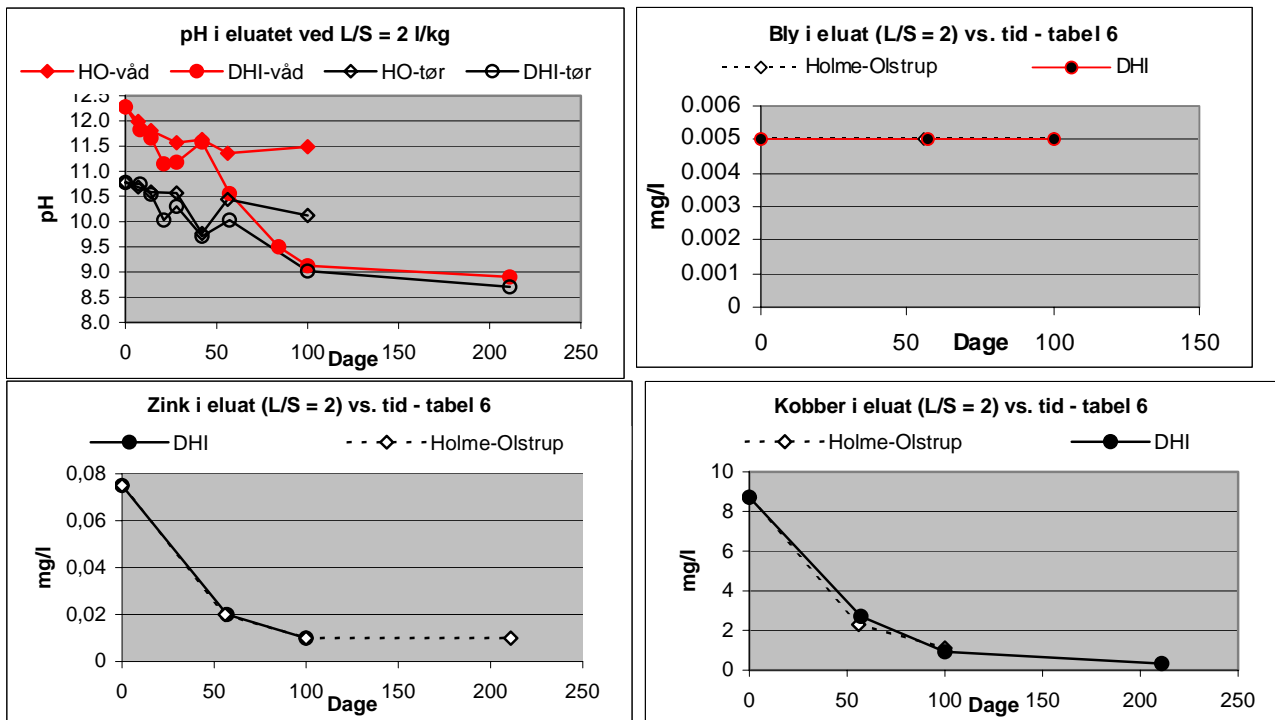
Hovedresultater

Lagringsforsøg A

De fire delfigurer i Figur 1 viser udvaskningen af pH, bly, kobber og zink fra lagrede slagge på henholdsvis Holme Olstrup og DHI. Bortset fra bly, som viser afvigende resultater, ses en væsentlig reduktion i alle parametre under den 211 dage lange lagring.

De to øverste kurver på pH-grafen er pH målt på våd slagge, mens de to nederste er pH målt på tørret slagge. Det bemærkes, at de kontrollerede mindre bunker på DHI viser et hurtigere (større) pH-fald end de store bunker på Holme Olstrup. Det bemærkes endvidere, at selv om tørringsprocessen tilfører CO₂, og dermed forårsager et pH-fald, elimineres tørringsprocessens indflydelse tilsyneladende efterhånden, idet pH på DHI bunken efter 211 døgn ender på det samme resultat uanset tørring eller ej.

Der ses en væsentlig effekt af ældningsprocesserne på udvaskningsresultatet på alle parametre. Udvasningen fortsætter tilsyneladende med at falde med tiden.



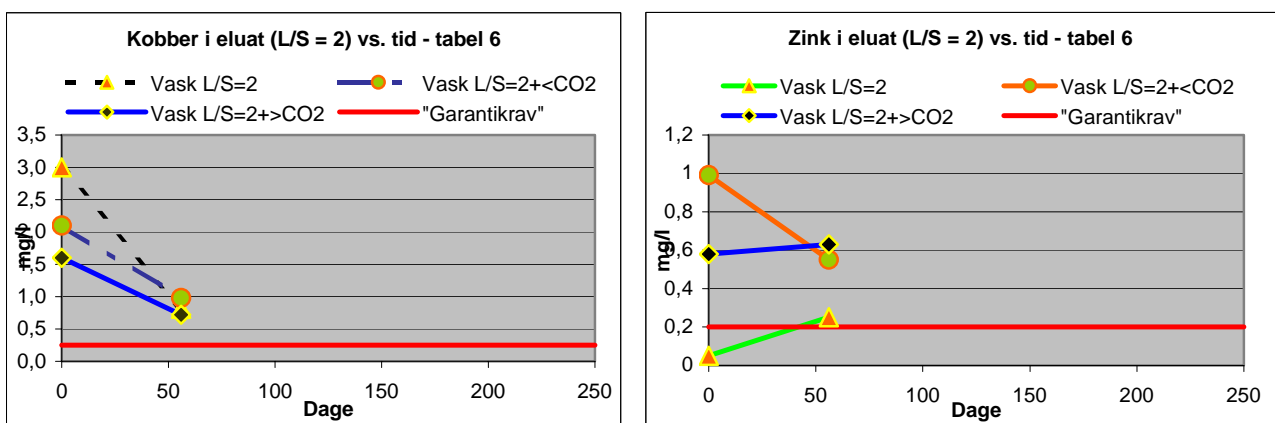
Figur 1. Resultatet af lagringsforsøget på Holme Olstrup og DHI.

Forbedringsforsøg B

På Figur 2 ses resultatet af vaskeforsøget i slaggeslukningsprocessen. Der er afbildet resultaterne af forsøg med 1) vask med vand, 2) vask med vand + 20 kg/h CO₂, 3) vask med vand + 50 kg/h CO₂. Det første plot (på y-aksen) svarer til referencetilstand (L/S=0,2), mens det andet plot svarer til forsøgsbetingelserne.

Resultaterne er entydige for kobber, mens resultaterne for zink ser meget mærkelige ud. Vask med vand uden tilsætning af CO₂ viser lav initialudvaskning af zink ved referencetilstand og større udvaskning ved vask (L/S=2). For zink gælder at den afgørende faktor ikke er mængden af vaskevand eller tilsætning af kuldioxid men pH. pH ved referenceforsøget kun med vand var 11, men 12,3 ved forsøgsbetingelserne, hvilket forklarer den øgede udvaskning af zink ved dette forsøg. For kobber ses en positiv effekt ved vask, mens det tilsyneladende er ligegyldigt om der tilsættes kuldioxid. Kobberudvaskningen reduceres med gennemsnitlig med en faktor 3.

Resultaterne er afbildet på en tidsakse. Dette er naturligvis irrelevant, og er kun gjort for at kunne plote resultaterne på samme grafer, som resultaterne af lagringsforsøgene.



Figur 2. Eluatkoncentrationer i vaskeforsøg.

Konklusion

Forsøg (A) bekræfter, at lagring af slagge har en væsentlig positiv indflydelse på metaludvaskningen fra slagge. For de pH-følsomme metaller bly og zink reduceres udvaskningen hurtigt til under kategori 2 kravværdierne. For kobber blev den laveste udvaskning nået efter 211 døgn og viste 0,320 mg/l (L/S=2), og således et stykke fra kategori 2 krav-værdien på 45 µg/l (L/S=2).

Forsøg (B) viser, at initial-vask af slagge på anlægget er ligegyldig for de pH-følsomme metaller bly og zink, mens den har en positiv effekt på udvaskningen af kobber, og reducerer således initialudvaskningen af kobber med en faktor 2-3. Dette kan muligvis medføre, at kravet til den efterfølgende lagringstid reduceres.