

## Anvendelse af slagger fra affaldsforbrænding i Danmark – et bidrag til den cirkulære økonomi



**Udarbejdet af Danish Waste Solutions ApS**

**i samarbejde med**

**AFATEK A/S**



## Forord

Dansk Affaldsforening (DAF) er interesseorganisation for danske kommuner og affaldsselskaber og dermed også for næsten alle affaldsforbrændingsanlæg i Danmark. DAF ser affaldet som en ressource i den cirkulære økonomi og går fuldt og helt ind for maksimal udnyttelse af ressourcerne i affaldet: Maksimal genbrug og genanvendelse af materialer og maksimal energiudnyttelse af de materialer, der ikke kan genbruges eller genanvendes.

Danmark kan betragtes som et af foregangslandene med hensyn oparbejdning og anvendelse af slagger fra affaldsforbrændingsanlæg med energiudnyttelse med en lovmæssig regulering, der sikrer miljøet mod uacceptable påvirkninger, og en oparbejdningsteknologi og logistik, der sikrer, at de behandlede slagger har en kvalitet, som betyder, at de kan erstatte råvarer som for eksempel stabilt grus fra grusgrave. Som et led i oparbejdningen genvindes der desuden betydelige mængder metaller fra slagterne.

Der har siden 2020 været fornyet fokus på regelgrundlaget for genanvendelse af slagger fra danske affaldsenergianlæg, ikke mindst i lyset af nyere europæisk dialog om klassificering af bl.a. restprodukterne. Den regulatoriske og driftsmæssige praksis for håndtering af slagternes anvendelse, som er udviklet gennem mange år i Danmark, findes desværre ikke velbeskrevet i noget nyere samlet kompendium. DAF har derfor anmodet Danish Waste Solutions ApS med input fra branchen (AFATEK A/S) om at udarbejde et notat, der beskriver de erfaringer, betingelser og gældende praksis for genanvendelse af slagger fra affaldsforbrændingsanlæg som en del af den cirkulære økonomi. Notatet forventes at kunne bruges af affaldsbranchen og aftagere af slagger, men også som generelt informationsmateriale for en bredere offentlighed.

Notatet er udarbejdet af Ole Hjelmar og Jiri Hyks (Danish Waste Solutions) med bidrag fra Jens Kallesøe og Søren Dyhr-Jensen (AFATEK) i perioden marts – september 2022. Arbejdet er blevet fulgt og kommenteret af en styregruppe bestående af følgende:

Allan Kjersgaard, DAF/DAFONET  
Helena Havnø, DAF (marts – maj 2022)  
Hanne Ørbæk Johnsen, DAF (fra maj 2022)  
Jonas Nedenskov, Amager RessourceCenter (ARC)  
Kim Crillesen, I/S Vestforbrænding  
Kenneth Schmidt Christiansen, Fjernvarme Fyn  
Jørgen Haukohl, Rambøll  
Frank Sandgaard, Meldgaard Miljø  
Jens Kallesøe, AFATEK  
Søren Dyhr-Jensen, AFATEK  
Jiri Hyks, Danish Waste Solutions  
Ole Hjelmar, Danish Waste Solutions

Arbejdet har været finansieret af DAFONET, som er et netværk for erfaringsudveksling om driftsforhold, inklusive slaggehåndtering, under Dansk Affaldsforening med deltagelse af alle affaldsforbrændingsanlæg.



## Indholdsfortegnelse

	Side
Forord.....	1
Resumé.....	5
1. Affaldsforbrændingsslagger i den cirkulære økonomi.....	7
2. Hvad er slagger?.....	8
3. Slaggenes fysiske/funktionelle egenskaber.....	10
4. Slaggenes kemiske og miljømæssige egenskaber.....	12
5. Miljøbeskyttende foranstaltninger og lovgivning.....	14
6. Slaggehåndtering i praksis i Danmark.....	17
7. Fortsat behov for udvikling.....	21



## Resumé

Gennem en fremsynet miljø- og energipolitik kombineret med en god offentlig planlægning og privat udviklingsarbejde har Danmark over en årrække etableret et af verdens mest effektive affaldsbehandlingssystemer. Den største del af det affald (pt. ca. 4 millioner tons/år), som ikke kan genanvendes, og som er forbrændingsegnet, tilføres i dag de 23 moderne danske affaldsforbrændingsanlæg, der producerer fjernvarme og elektricitet, og som derfor ofte benævnes affaldsenergianlæg. Den termiske behandling af forbrændingsegnet affald har kraftigt reduceret behovet for affaldsdeponering. Samtidig yder en avanceret behandling af 650.000 – 700.000 tons rå slagger og efterfølgende anvendelse af 550.000 – 600.000 tons færdigt "slaggegrus" per år til vejbygningsformål og en årlig genvinding af 47.000 – 53.000 tons metaller (primært jern, kobber og aluminium) et væsentligt bidrag til den cirkulære økonomi gennem erstatning af naturlige råstoffer.

Nyttiggørelsen af slaggerne bidrager således positivt til den danske samfundsøkonomi, men det er en forudsætning, at anvendelsen af slaggegruset sker på en kontrolleret måde og efter de foreskrevne miljøregler. Slaggerne indeholder nemlig også små mængder af stoffer, som, hvis de gældende regler ikke overholdes, på længere sigt ville kunne skade mennesker og miljø. For at sikre, at dette ikke sker, skal slaggerne overholde grænseværdier for indhold og udvaskning af en række uønskede stoffer, og de skal desuden følge nogle regler for hvor og hvordan, de må anvendes. Disse grænseværdier og regler, som har til formål at beskytte grundvand og overfladevand samt menneskers helbred mod uacceptable påvirkninger, og som er baseret på risikovurderinger foretaget af Miljøstyrelsen, har siden 2001 på næsten uændret form været beskrevet i den såkaldte Restproduktbekendtgørelse (pt. BEK nr. 1672/2016).

Slaggegruset har stor lighed med stabilt grus, og efter frasortering af metal og modning har det en høj bæreevne. Under forudsætning af at det overholder miljølovgivningens krav til indhold og udvaskning af potentielt skadelige stoffer, kan det, inden for nogle fastlagte rammer, anvendes til vejbygning. I mere end 20 år har slaggegrus været anvendt i bundsikringen af veje, hvor det erstatter bundsikringsgrus. Bæreevnen er lige så høj som for stabilt grus. Det betyder, at slaggegrus nu også kan anvendes i bærelaget af vejen som erstatning for stabilt grus, der er den bedste (og dyreste) gruskvalitet fra de danske grusgrave. Det har yderligere vist sig, at slaggegrus kan indgå i et BSM-produkt (BitumenStabiliseret Materiale), der er laget lige under asfaltlaget (imellem bærelag og asfalt-slidlaget). Det er lykkedes at etablere en certificeret produktion af slaggegrus. En tredjedel af slaggerne i Danmark er endvidere deklareret i forhold til klimabelastningen gennem en Miljøvaredeklaration (EDP).

Kemisk set består slaggegruset af en række hovedkomponenter (primært silicium, calcium, jern, aluminium, magnesium, natrium, kalium, ilt), der er stoffer eller mineraler, som vi også finder i nogenlunde samme størrelsesorden i lithosfæren, dvs. de øverste 100 km fra den faste jordoverflade og indad mod jordens kerne. Ud over hovedkomponenterne indeholder slaggegruset også en lang række grundstoffer i meget mindre mængder. De findes også alle i forvejen i lithosfæren, men en del af dem er opkoncentreret i slaggegruset sammenlignet med lithosfæren. Det drejer sig (i aftagende rækkefølge) blandt andet om svovl, zink, kobber, klorid, bly, barium, strontium, bor, krom, nikkel, tin, antimon, vanadium m.fl. Nogle af disse stoffer er uønskede i slaggegruset, da de kan have negative effekter på miljøet, hvis de spredes i for store koncentrationer til miljøet, hvor der især er fokus på risikoen for forurening af jord, grundvand og overfladevand. Oparbejdningen af slaggegruset tager derfor sammen med de eksisterende grænseværdier for indhold og udvaskning af potentielt skadelige stoffer og de fastlagte begrænsninger og betingelser for anvendelsen af slaggegruset sigte på at minimere potentielle stofemissioner og sikre, at der ikke kan ske nogen uacceptabel påvirkning af jord, grundvand og overfladevand i forbindelse med nyttiggørelse af slaggegruset.

På trods af de høje forbrændingstemperaturer, som destruerer næsten alt organisk materiale, kan det ikke på forhånd afvises, at nogle specifikke organiske stoffer, som for eksempel PCB, polyklorerede dioxiner og furaner, perfluorerede og polyfluorerede alkylforbindelser (PFAS) og bromerede flammehæmmere kan være til stede i slaggen i meget små mængder. De hidtidige undersøgelser af danske slagge har vist, at både indhold og udvaskning af disse stoffer i slaggegruset er meget små, når dette anvendes efter forskrifterne. Det skal dog nævnes, at kendskabet til indhold og udvaskning af PFAS og bromerede flammehæmmere er baseret på et begrænset antal undersøgelser af danske slagge, men udviklingen på området følges nøje.

Efter sorteringen for metaller kontrolleres kvaliteten i forhold til både miljø og byggetekniske egenskaber, hvorefter slaggegruset lægges i færdigvarelageret klar til anvendelse i et vejbyggeri. Certificeret slaggegrus følger Dancerts "Supplerende bestemmelser for certificering af produktionsstyring for affaldsforbrændingsslagge til brug i bærelag i vejbyggeri".

Den største del af slaggegruset anvendes til byggeri af veje og pladser. En del anvendes også til byggeri af ramper, dvs. underbygninger til vejanlæg. Slaggegrus anvendes f.eks. på genbrugsstationer, hvor plads- og vejbyggeri er kombineret. I projekter til landbruget kan slaggegrus anvendes til niveauregulering, fundamenter

**2022-11-27**

til bygninger, pladser og tilslutningsveje. Størrelsen af projekterne kan variere ganske meget. En typisk gennemsnitsværdi er ca. 15.000 tons, men de varierer fra store projekter på f.eks. 140.000 tons til nogle få tusind tons. Der er eksempler på levering af mere end 300.000 tons til et enkelt projekt, hvor byggeriet kan foregå over flere år. Der arbejdes på at levere til større projekter, således at den gennemsnitlige projektstørrelse kan øges. Store projekter skal som regel underkastes en specifik risikovurdering i henhold til Miljøbeskyttelsesloven.

Selv om vi i Danmark allerede er nået et godt stykke vej med inddragelsen af affaldsforbrændingsslagger i den cirkulære økonomi, er der fortsat plads til forbedringer, og nye udfordringer kommer stadig til. Blandt disse arbejdes der bl.a. med:

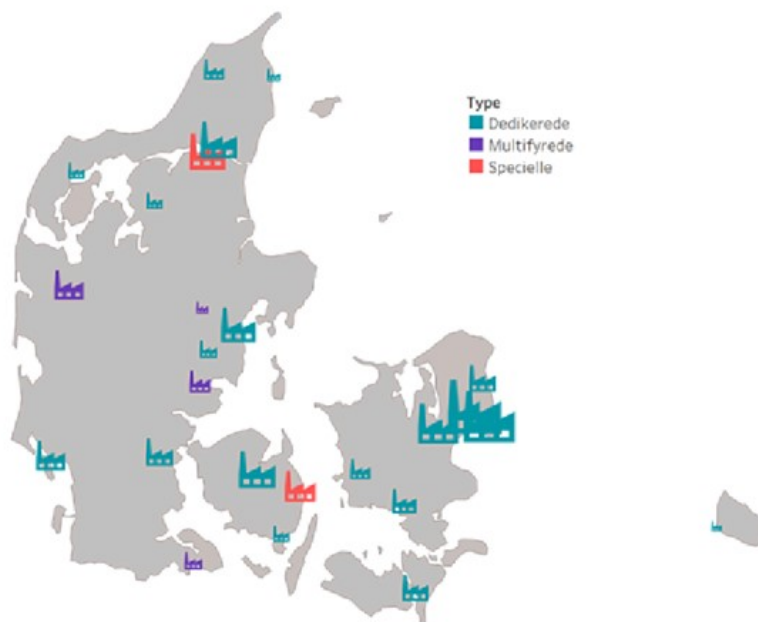
- Forbedret genvinding af jern og ikke-magnetiske metaller samt rustfrit stål
- Genundnyttelse af tidligere anvendte slagger fra de seneste 20 år
- Vurdering af risikoen for miljø og mennesker af nye, potentielt forurenende stoffer (herunder PFAS)

Det har været typisk for danske forhold, at branchen har reageret hurtigt og konstruktivt på opståede udfordringer i forhold til anvendelsen af slaggen, bl.a. også med hensyn til klassificering af som ikke-farligt eller farligt affald efter introduktionen af nye regler for klassificering i forhold til HP14 – Økotoksisk. Dette skyldes blandt andet, at der i Danmark altid har været et nært samarbejde affaldsenergianlæggene imellem og med myndighederne med fokus på miljøbeskyttelse og ressourceudnyttelse. Det kan bl.a. nævnes, at Miljøstyrelsen netop har taget initiativ til undersøgelse af indhold og udvaskning af PFAS i danske affaldsbehandlingslagger.



## 1 Affaldsforbrændingslagger i den cirkulære økonomi

I dag ved de fleste danskere, at affald som udgangspunkt bør betragtes som en ressource, der i videst mulige omfang bør indgå i den cirkulære økonomi. For at udnytte ressourcerne i affaldet skal det først og fremmest genanvendes. Den største del af det affald, som ikke kan genanvendes, og som er forbrændingseget (pt. ca. 4 millioner tons om året), brændes i dag i 23 moderne affaldsforbrændingsanlæg, der producerer fjernvarme og elektricitet, og som derfor ofte benævnes affaldsenergianlæg.



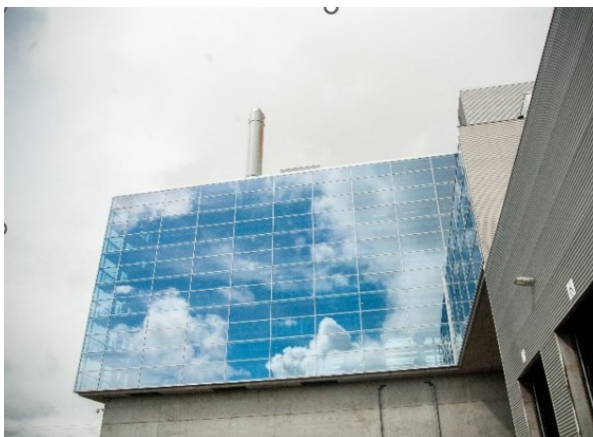
Affaldsforbrændingsanlæg i Danmark (BEATE 2018 - 2019)<sup>1</sup>.

Ved forbrændingsprocessen reduceres affaldets volumen med ca. 90 % og vægten med ca. 70 – 80 %. Ved forbrænding af 1 ton affald dannes der ca. 200 kg slagge, der efter behandling (herunder modning og frasortering af metaller), især anvendes som erstatning for råmaterialer til vejbygning. En stor del af de mest forurenende stoffer i det forbrændte affald renses fra røggassen, før denne udledes, og opsamles som røggasrensningsrestprodukter (30 – 35 kg per ton forbrændt affald). Disse røggasrensningsrestprodukter må behandles yderligere med henblik på sikker deponering eller avanceret nyttiggørelse/råstofudvinding.

Gennem en fremsynet miljø- og energipolitik kombineret med en god offentlig planlægning og privat udviklingsarbejde har Danmark over en årrække etableret et af verdens mest effektive affaldsbehandlingssystemer. Det betyder at forbrændingseget affald, der ikke i sig selv kan genanvendes, energiudnyttes, og hvor den største restfraktion fra energiudnyttelsen, slagge, indgår i den cirkulære økonomi og erstatter naturlige råstoffer under kontrollerede og miljøbeskyttende forhold. Danmark er jo et lille land med begrænsede råstoffressourcer og begrænset plads til placering af affaldsdeponeringsanlæg. Den termiske behandling af forbrændingseget affald har kraftigt reduceret behovet for affaldsdeponering (Danmark var det første land, der har kunnet gennemføre et forbud mod deponering af forbrændingseget affald). Samtidig yder en avanceret behandling af 650.000 – 700.000 tons rå slagge og efterfølgende anvendelse af 550.000 – 600.000 tons færdigt "slaggegrus" per år til vejbygningsformål et væsentligt bidrag til den cirkulære økonomi gennem erstatning af naturlige råstoffer som for eksempel grus fra grusgrave. Behandlingen af slagge omfatter også udvinding og oparbejdning af jern og andre metaller.

Nyttiggørelsen af slagge bidrager således positivt til den danske samfundsøkonomi, men det er en forudsætning, at slaggeanvendelsen sker på en kontrolleret måde og efter de foreskrevne miljøregler. Slagge indeholder nemlig også små mængder af stoffer, som, hvis de gældende regler ikke overholdes, på længere sigt ville kunne skade mennesker og miljø. For at sikre, at dette ikke sker, skal slagge overholde grænseværdier for indhold og udvaskning af en række uønskede stoffer, og de skal desuden overholde nogle regler for hvor og hvordan, de må anvendes.

<sup>1</sup> Viegand Maagøe: BEATE 2018 – 2019, Benchmarking af affaldssektoren – Forbrænding. Energistyrelsen.



Energnist i Kolding (Dansk Affaldsforening)



ARC på Amager (Rambøll)

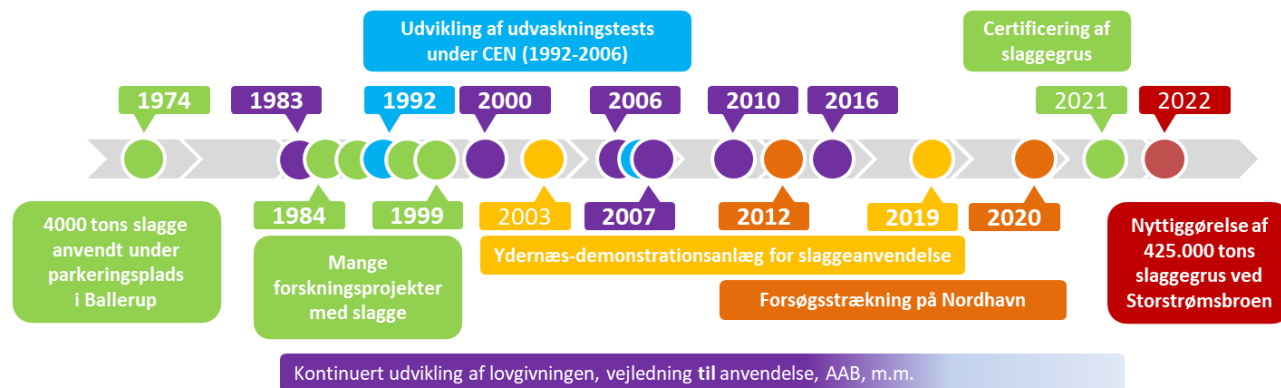


ARGO i Roskilde (Rambøll)



Vestforbrænding i Glostrup (Vestforbrænding)

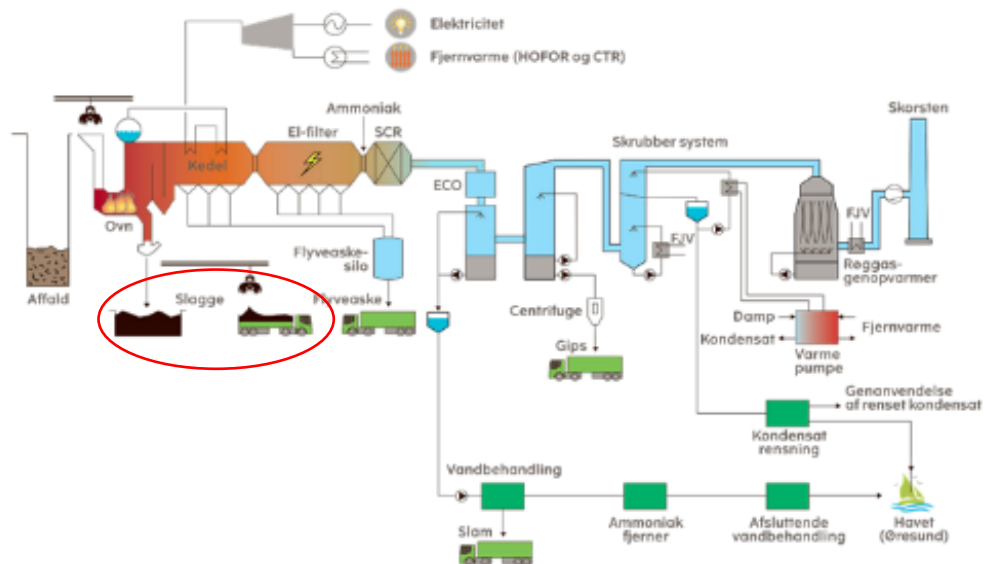
I det følgende fortælles historien om slaggeanvendelse i Danmark, suppleret med en række konkrete facts om slaggenes egenskaber, tidsmæssig udvikling af anvendelse og regler for anvendelse (se figuren), om slagge som en del af cirkulær råstoføkonomi og om videre udviklingsarbejde.



Genanvendelse af slagge i Danmark – en tidslinje

## 2 Hvad er slagge?

Affaldsforbrændingslagge (i det følgende blot kaldt slagge) er den forbrændingsrest, som udtages for enden af risten i bunden af ovnen på et affaldsenergianlæg, og som derfor også benævnes bundaske (se figuren på næste side).



Principskitse af et moderne affaldsenergianlæg (ARC i København). Slaggeproduktionen ved bunden af risten er indrammet. Det kan ses en størstedelen af processerne på anlægget er rettet mod energiuudnyttelse og rensning af røggassen for en række uønskede stoffer, inden den på rensede form kan udledes til atmosfæren.

Under opholdet på risten, som fører affaldet gennem ovnen, forbrændes dette ved temperaturer på op til ca. 1050 °C. Herved destrueres næsten alt biologisk og organisk materiale i affaldet, som omdannes til råslagge, der typisk nedkøles ved passage af et vandbad. Råslaggen (med ca. 20 % fugtindhold) består af jernskrot (typisk 7 – 9 %), andre metaller såsom kobber, aluminium, rustfrit stål og zink (typisk 2 – 3 %) samt en blanding af små og store partikler af glas, beton/keramik, jord og smeltede eller sammensintrede<sup>2</sup> slaggeprodukter af mineralisk sammensætning (typisk 85 – 90 %).



Et eksempel på råslagge efter nedkøling med vand.

Under udendørs oplagring af råslaggen i bunker fordampes der en del af det oprindelige fugtindhold og slaggen kan underkastes en mekanisk metalgenvindingsproces.

Jern fjernes fra råslaggen ved hjælp af magneter og udnyttes efter yderligere oprensning til fremstilling af nye jernprodukter og stål.

Større stykker af ikke-magnetiske metaller som aluminium, kobber eller rustfrit stål frasorteres ved håndsortering mens små stykker/partikler af ikke-magnetiske metaller (som også kan omfatte guld og sølv) kan frasorteres ved hjælp såkaldte hvirvelstrømsseparatorer eller specielle sensorer og efterfølgende oparbejdes til rene metaller.

Efter frasortering af metaller og udendørs oplagring i en periode, hvorunder det mineralske slaggemateriale stabiliseres (modnes) gennem optag af kuldioxid (CO<sub>2</sub>) fra atmosfæren ("karbonatisering"), samt yderligere behandling (f.eks. knusning af store partikler, sigtning), oparbejdes slaggematerialet til såkaldt *slaggegrus*.

Slaggegruset har stor lighed med stabilt grus, og under forudsætning af at det overholder miljølovgivningens krav til indhold og udvaskning af potentielt skadelige stoffer, kan det, inden for nogle fastlagte rammer, som omtales nærmere i det følgende, anvendes til vejbygning, hvor det erstatter naturgrus af den bedste kvalitet fra de danske grusgrave.

<sup>2</sup> Sammenkittede (men ikke helt smeltede) pga. høj temperatur

### 3 Slaggernes fysiske/funktionelle egenskaber

#### Velegnede til vejbygning

Det er velkendt, at slagger efter sortering og modning har en høj bæreevne og derfor kan anvendes i byggeri af veje og tilsvarende anlægsprojekter. I mere end 20 år har slaggegrus været anvendt i bundsikringen af veje, hvor slaggegruset erstatter bundsikringsgrus.

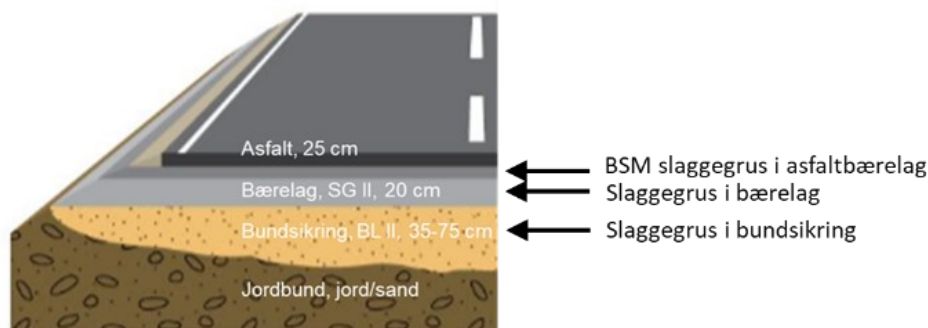
Det har desuden vist sig, at bæreevnen er lige så høj som for stabilt grus. Det betyder, at slaggegrus nu også kan anvendes i bærelaget af vejen, hvor den erstatter stabilt grus, der er den bedste (og dyreste) gruskvalitet fra de danske grusgrave.

Det har yderligere vist sig, at slaggegrus kan indgå i et BSM-produkt (BitumenStabiliseret Materiale), der er laget lige under asfaltlaget (imellem bærelag og asfaltlaget).

I figuren nedenfor ses opbygningen af en typisk vej, hvor slaggegrus kan indgå i alle tre lag af vejen. For bærelagets vedkommende mangler der nu kun Vejdirektoratets udbudsforskrift, som er i proces og forventes klar inden for det næste år. For BSM-laget mangler resultatet af den igangværende fuldskalatest af produktet i adgangsvejen til Lynetteholm. Slaggegrus i BSM er dog allerede nævnt i vejreglen for BSM.

Inden for en overskuelig fremtid vil slaggegrus efter al sandsynlighed kunne anvendes i næsten hele vejens opbygning og dermed bidrage til aflastningen af vores grusgrave, når både bundsikringsgrus og stabilt grus kan erstattes.

Baggrunden for de gode resultater er et mangeårigt udviklingsarbejde med laboratorieforsøg, fuldskalaforsøg og endelig fuld certificering af oparbejdningen af slaggegruset samt af selve gruskvaliteten. Certificeringen er foreløbig gennemført for en del af slaggemængden i Danmark, men undersøgelser har vist, at alle slagger kan certificeres, og at ca. 90 % af den samlede mængde vil have en kvalitet svarende til stabilt grus mens ca. 10 % vil have en kvalitet svarende til bundsikringsgrus.



Skitse, der viser lagene i en vejopbygning. Bundsikring, BL: Bundsikringslag, Bærelag, SG: Stabilt Grus, BSM: Bitumen Stabiliseret Materiale baseret på slaggegrus er bærelag for asfaltlaget.

#### Laboratorieforsøg

I projektet "RecAsh", der var et 3-årigt innovationsprojekt støttet af Innovationsfonden, blev der udført en række tests af slaggegruset, der viste at bæreevnen (det såkaldte E-modul) var sammenlignelig med stabilt grus (<https://afatek.dk/projekter/recash-recovery-of-resources-in-bottom-ash>).

#### Fuldskalaforsøg

I en prøvestrækning i Nordsøvej i København er slaggegrusets bæreevne testet over nu i alt 10 år startende i 2012. Den samlede trafikbelastning over årene svarer til en såkaldt T5. Vejdirektoratet fortsætter målingerne i forventning om at slaggegruset ikke alene holder til en T5-belastning, men også til den højeste trafikklasse T7, hvorefter slaggegrus vil kunne anvendes i både bundlaget og bærelaget i alle typer af veje. ([https://www.vejdirektoratet.dk/sites/default/files/publications/forsgsstrkning\\_p\\_nordhavnen.pdf](https://www.vejdirektoratet.dk/sites/default/files/publications/forsgsstrkning_p_nordhavnen.pdf)).

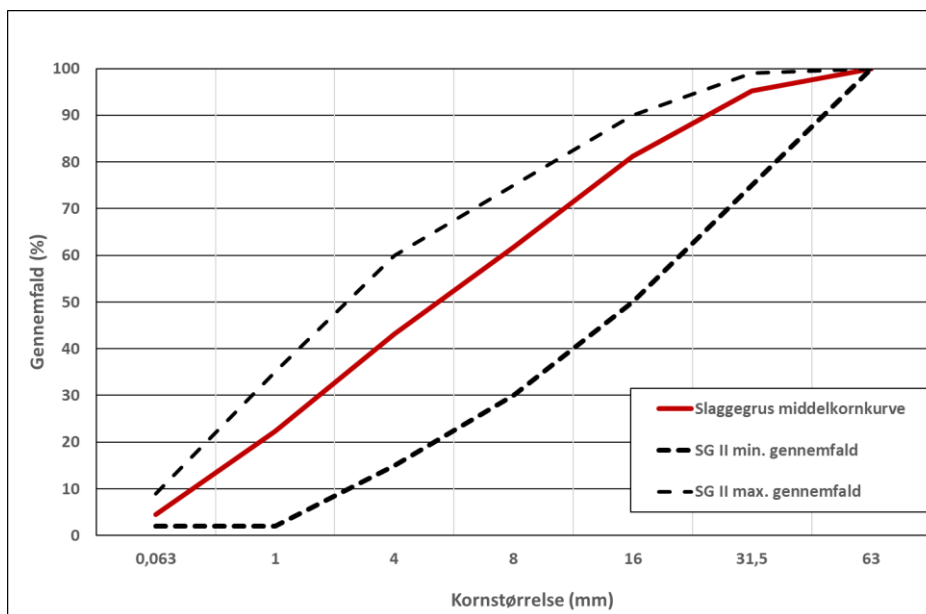


Test af slaggegrus i Nordsøvej i København fra 2012 til foreløbigt 2022 (AFATEK).

### Certificering

En virksomhed er foreløbigt certificeret til produktion af slaggegrus, hvor kvalitetsstyringen af oparbejdningen af slaggegruset fra råslaggen omfatter indgangs- og udgangskontroller, prøvetagning til den miljømæssige og den byggetekniske prøvning. Når begge prøvningsrapporter opfylder kriterierne, udstedes en deklaration, der følger slaggegruset til brugeren af dette i vejbyggeriet. Der er dokumentation for produktets kvalitet både i forhold til miljøet og i forhold til de byggetekniske egenskaber. Alle aktører, som rådgivende ingeniører, miljøansvarlige og byggeansvarlige i kommuner og private virksomheder kan således være sikre på kvaliteten.

Prøvningsrapporten for de byggetekniske egenskaber skal vise overholdelse af en række parametre som kornstørrelsesfordeling, renhed (antal af lette korn), udbrændingsgrad, skørhed af de enkelte korn (Los Angeles test) samt andet – efter normen: DS/EN 13285 (<https://afatek.dk/sites/afatek.dk/files/media/document/Certifikat%20Slaggegrus%2023.12.2020.pdf>). Af de nævnte parametre er kornstørrelsesfordelingen den vigtigste til forklaring af slaggegrusets høje bæreevne. Som vist i figuren herunder, vil kornkurven for slaggegrus i langt de fleste tilfælde (ca. 90 %) ligge inden for øvre og nedre grænse for stabilt grus.



Graf med middelkornkurve af slaggegrus 0/31,5 mm og kornkurveafgrænsning for Stabilt Grus kvalitet II (SG II) jf. Vejdirektoratets AAB for stabilt grus.

### EPD – Environmental Product Declaration (Miljøvaredeklaration)

I 2021 er slaggegrus desuden deklareret i forhold til klimaet. Foreløbigt er ca. en tredjedel af slaggerne i Danmark deklareret af EPD-Danmark. På basis af en livscyklusanalyse for Afateks produktion af slaggegrus er der opgjort et GWP (Global Warming Potential) på op til -10 kg CO<sub>2</sub> pr. ton slaggegrus. Under modningen (karbonatiseringen) af slaggen optages der CO<sub>2</sub> fra luften. Hvis der i stedet anvendes naturgrus, belastes klimaet med 2 – 5 kg CO<sub>2</sub> pr. ton grus (skønnet værdi, da der endnu ikke findes EDP for naturgrus). Klimaet kan således aflastes ved brug af slaggegrus i forhold til naturgrus.

## 4 Slaggenes kemiske og miljømæssige egenskaber

### Slaggesammensætning og BAT-krav

Selv om nyttiggørelsen af slagge bidrager positivt til den danske samfundsøkonomi, er det en forudsætning, at slaggeanvendelsen sker på en kontrolleret måde og efter de foreskrevne miljøregler, da slagge indeholder også små mængder af stoffer, som, hvis de gældende regler ikke overholdes, på længere sigt ville kunne skade mennesker og miljø.

Sammensætningen af affaldsforbrændingslagge afhænger af sammensætningen af det forbrændte affald samt typen af forbrændingsanlæg og driftsforholdene for dette. De moderne danske affaldsenergianlæg er underkastet en række EU-regler, herunder direktivet om industrielle emissioner (IED), som stiller en række såkaldte BAT-krav (dvs. krav om anvendelse af bedst tilgængelige teknik – Best Available Techniques) på miljøbeskyttelsesområdet. BAT-kravene sikrer bl.a., at udbrændingsgraden af slagge er tilstrækkeligt effektiv (målt som restindhold af organisk kulstof (TOC), der ikke må overstige 3 vægt-%). Det kan nævnes, at danske slagge i dag gennemsnitligt ligger på TOC = 0,77 vægt-%. Miljøstyrelsen godkender affaldsforbrændingsanlæg og fører tilsyn med driften af disse, herunder overholdelsen af BAT-kravene. Der stilles også krav til temperaturerne i forbrændingskammeret, hvilket på den ene side skal sikre destruktion af skadelige organiske stoffer i affaldet og på den anden side skal forhindre, at der dannes nye skadelige stoffer under forbrændingen og røggasrensningen. Desuden er der krav om slagge skal opsamles separat fra andre restprodukter (flyveaske, røggasrensningsprodukter, mv.).

### Hovedsammensætning

Kemisk set består slaggegruset af en række hovedkomponenter, der er stoffer eller mineraler, som vi også finder i nogenlunde samme størrelsesorden i lithosfæren, dvs. de øverste 100 km fra den faste jordoverflade og indad mod jordens kerne. I tabellen her ses indholdet af hovedkomponenter i 11 prøver af slaggegrus fra danske forbrændingsanlæg i 2020 og 2021, udtrykt som minimums- og maximumsindhold af stofferne på oxidform. Til sammenligning ses det gennemsnitlige indhold i lithosfæren af de samme oxider. Det er indholdet af disse stoffer eller mineraler, som giver slaggegruset de fysiske egenskaber, som muliggør dets anvendelse til entreprenørmæssige formål.

Grundstof	Oxidform	Slaggegrus		Lithosfæren
		Min Vægt-%	Max Vægt-%	Gennemsnit Vægt-%
Silicium (Si)	SiO <sub>2</sub>	39,4	54,2	59
Calcium (Ca)	CaO	11,8	17,9	5,0
Jern (Fe)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7	12,0	7,3
Aluminium (Al)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,6	8,4	15
Magnesium (Mg)	MgO	1,1	1,8	3,5
Natrium (Na)	Na <sub>2</sub> O	0,90	1,4	3,8
Kalium (K)	K <sub>2</sub> O	0,45	0,62	3,1
Titan (Ti)	TiO <sub>2</sub>	0,36	0,54	1,0
Mangan (Mn)	MnO	0,081	0,23	0,12
Fosfor (P)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,051	1,2	0,27

### Uorganiske sporelementer

Ud over hovedkomponenterne indeholder slaggegruset også en lang række grundstoffer i små mængder. De findes alle i forvejen i lithosfæren, men som det fremgår af nedenstående tabel er en del af disse opkoncentrerede i slaggegruset sammenlignet med lithosfæren. Nogle af disse stoffer er uønskede i slaggegruset, da de kan have negative effekter på miljøet, hvis de spredes i for store koncentrationer til miljøet, hvor der især er fokus på risikoen for forurening af jord, grundvand og overfladevand.

Grundstof	Slaggegrus		Lithosfæren	Grundstof	Slaggegrus		Lithosfæren
	Min Vægt-%	Max Vægt-%	Gennemsnit Vægt-%		Min Vægt-%	Max Vægt-%	Gennemsnit Vægt-%
Svovl, S	0,48	1,1	0,06	Lithium, Li	0,0020	0,0039	0,0065
Zink, Zn	0,30	0,55	0,008	Kobolt, Co	0,0013	0,0037	0,0040
Kobber, Cu	0,15	4,2	0,007	Arsen, As	0,0010	0,0025	0,0005
Klorid, Cl	0,067	0,40	0,05	Molybdæn, Mo	0,00052	0,0019	0,00023
Bly, Pb	0,043	0,12	0,0016	Selen, Se	0,00020	0,0010	0,000009
Barium, Ba	0,021	0,063	0,043	Kadmium, Cd	0,00019	0,00070	0,00002
Strontium, Sr	0,019	0,031	0,015	Sølv, Ag	0,00019	0,00080	0,0000007
Bor, B	0,015	0,026	0,001	Bismuth, Bi	0,00010	0,00050	-
Krom, Cr-total	0,014	0,05	0,02	Thallium, Tl	0,000050	0,00025	-
Nikkel, Ni	0,010	0,028	0,01	Krom 6, Cr(VI)	0,000038	0,00018	-
Tin, Sn	0,006	0,17	0,04	Beryllium Be	0,000021	0,000039	0,00028
Antimon, Sb	0,0025	0,019	-	Kviksølv, K	0,000020	0,00010	0,00001
Vanadium, V	0,0023	0,0038	0,015				

Oparbejdningen af slaggegruset tager derfor sammen med de eksisterende grænseværdier for indhold og udvaskning af potentielt skadelige stoffer og de fastlagte begrænsninger og betingelser for anvendelsen af slaggegruset sigte på at minimere potentielle stofemissioner og sikre, at der ikke kan ske nogen uacceptabel påvirkning af jord, grundvand og overfladevand i forbindelse med nyttiggørelse af slaggegruset.

### Organiske forbindelser

På trods af de høje forbrændingstemperaturer, som destruerer næsten alt organisk materiale, kan det ikke på forhånd afvises, at nogle specifikke organiske stoffer, som for eksempel PCB, polyklorede dioxiner og furaner, perfluorede og polyfluorede alkylforbindelser (PFAS) og bromerede flammehæmmere kan være til stede i slaggen i meget små mængder. I en nyligt afsluttet undersøgelse af slaggegrus fra danske affaldsforbrændingsanlæg udført for Miljøstyrelsen har man derfor inddraget analyser af slaggerne for nogle af disse stoffer (<https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2022/05/978-87-7038-420-9.pdf>). Resultaterne viste, at kun én ud af de 11 slagge havde et (meget begrænset) indhold af polycykliske aromatiske hydrokarboner, PAH (US EPA 16), over detektionsgrænsen på 0,1 mg/kg. Ingen slagge havde indhold af PCB7 over detektionsgrænsen på 0,01 mg/kg, og ingen af de 11 slagge havde indhold af flygtige benzenlignende stoffer (BTEX) over detektionsgrænsen. To af slaggeprøverne blev analyseret for indhold af polyklorede dioxiner og furaner, som for ingen af dem oversteg 0,009 µg TEQ/kg TS. De samme to slaggeprøver blev også analyseret for indhold af PFAS. For den ene blev der ikke målt PFAS over detektionsgrænsen på 0,0005 mg/kg TS, mens der i den anden målt i alt 0,0045 mg/kg af 3 PFAS-stoffer. Dette ligger under Miljøstyrelsens jordkvalitetskrav (krav til ren jord). Der gennemføres jævnligt undersøgelser af, om slaggerne indeholder "nye" stoffer eller stofgrupper (senest PFAS), som kunne tænkes at få betydning for betingelserne for håndtering og anvendelse af slaggerne. Det kan bl.a. nævnes, at Miljøstyrelsen netop har taget initiativ til undersøgelse af indhold og udvaskning af PFAS i danske affaldsbehandlingslagge.

### Beskyttelse af grundvand

I Danmark består drikkevandsforsyningen stort set 100 % af grundvand, og sikringen af grundvandskvaliteten mod forurening, også fra udlagt slaggegrus, er derfor højt prioriteret. Grundvandsbeskyttelse har således gennem mange år været en vigtig del af regelsættet omkring anvendelse af slaggegrus.

Man kan ikke bruge analyser af slaggegrusets sammensætning, som de netop ovenfor omtalte til at vurdere, om en given slaggeanvendelse vil kunne udgøre en risiko for forurening af grundvandet. Her er man nødt til at anvende såkaldte udvaskningstests, hvor man undersøger, i hvor høj grad de forskellige stoffer i slaggen kan opløses i gennemsvivende (regn)vand, altså mobiliseres, og efterfølgende transporteres gennem jorden til grundvandet, som derved – afhængigt af stoftyper og stofmængder – eventuelt kan påvirkes, så grundvandskvalitetskriterierne overskrides. Som nævnt nedenfor er der gennem de seneste 20 – 30 år i Danmark akkumuleret en betydelig viden om stofudvaskning fra slagge og de dermed forbundne potentielle miljørisici.

### Risikovurderinger og forsknings- og demonstrationsprojekter

På grundlag af risikovurderinger, hvor der er skabt en sammenhæng mellem resultatet af en udvaskningstest på slaggegrus og påvirkningen af grundvandet omkring et anvendelsesprojekt med slaggegruset, er der fastlagt grænseværdier for udvaskning af en række udvalgte stoffer, som vil sikre grundvandskvaliteten, og som skal overholdes, hvis man ønsker at anvende slaggegruset (se afsnit 6). Gennem de seneste 22 år er alle partier af slaggegrus, som er blevet nyttiggjort, først blevet testet for sammensætning og stofudvaskning. Da et parti af slaggegrus, som skal testes, maksimalt må være på 5.000 tons, foreligger der på nuværende tidspunkt flere tusind sæt analyse- og testresultater, hvilket har givet et indgående kendskab til slaggegrusets sammensætning og udvaskningsegenskaber og udviklingen af disse over tid. Herudover er der gennemført en række forsknings- og udviklingsprojekter til belysning af forskellige aspekter af risikovurdering og miljøbeskyttelse i forbindelse med nyttiggørelse af slaggegrus.

Øverst på næste side ses fotos fra et stort demonstrationsprojekt, som blev gennemført i perioden 2002 – 2019, hvor der blev opsamlet perkolat (gennemsvivende nedbør) fra 5 testfelter med slaggegrus udlagt som 50 cm bundsikring i 4 x 100 m<sup>2</sup> og 1 x 200 m<sup>2</sup> med forskellige overfladetildækninger (perlesten, fliser og asfalt). Projektet, der var finansieret af DAFONET, har givet værdifulde informationer om udvaskningen af slagge over længere tid og om sammenhængen mellem stofudvaskningen i laboratorieskala og fuldskala. Selv på verdensplan er demonstrationsprojektet ganske unikt, især fordi laboratorieudvaskningstestene blev udført efter de dengang helt nye CEN-standarder, og fordi det er gennemført over så lang tid (17 år). De færreste storskalaundersøgelser har været mere end 3 – 5 år.



Fotos fra demonstrationsanlægget for slaggeanvendelse på Ydernæs i 2002 - 2019 (DanWS).

I forbindelse med ovennævnte projekt og en nylig undersøgelse af 11 nyere prøver af slaggegrus udført for Miljøstyrelsen er der gennemført en række udvaskningstests i laboratoriet, ligesom der er indsamlet flere tusind sæt resultater af de rutinemæssige udvaskningstests, som er udført på prøver af slaggegrus gennem de seneste godt 20 år. Dette har givet et indgående kendskab til stofudvaskningen fra slaggegrus under forskellige forhold, hvilket muliggør beskrivelser af udvaskningsforløbet over kortere og længere tid og under forskellige miljø- og klimamæssige forhold. Resultaterne anvendes blandt andet som realistisk input til matematiske modeller, som benyttes både til risikovurdering i specifikke situationer og til beregning af grænseværdier for stofudvaskning fra slaggegrus, som sikrer grundvandet (og overfladevandet) mod uacceptable påvirkninger fra slaggegrus, som ønskes anvendt til vejbygning og lignende.

#### Kendskab til stofudvaskningen fra slaggegrus

De stoffer, som udvaskes i størst mængde fra slaggegrus, er salte (klorider og sulfater af Na, Ca, og K). Selv om de ikke umiddelbart betragtes som farlige, kan de have en negativ effekt på grundvand, hvis de er til stede i for store mængder (de findes i grundvandet i forvejen, men i små koncentrationer). Det skal der tages hensyn til i forbindelse med nyttiggørelse af slaggegrus. Der er dog som regel større fokus sporelementer og tungmetaller (bl.a. As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb og Zn). Disse stoffer kan under forskellige forhold udvaskes fra slaggegruset i mængder, som kræver at de gældende betingelser for håndtering og anvendelse slaggegrus overholdes. I modsat fald og ved forkert anvendelse kan de udgøre en potentiel risiko for kvaliteten af lokalt grundvand og overfladevand, hvor de fleste af dem i øvrigt også er til stede som baggrundskoncentrationer, men i meget små mængder. Undersøgelsen af de 11 nyere slagge-prøver viste også, at udvaskningen af organiske stoffer som BTEX, hydrokarboner, PAH og PCB er så lille, at den oftest ikke kan måles.

## 5 Miljøbeskyttende foranstaltninger og lovgivning

#### Den første bekendtgørelse om anvendelse af slagger

Den første version af den danske miljøbeskyttelseslov trådte i kraft i 1973, men inkluderede ikke slaggeanvendelse. Der var således ingen egentlige danske regler for anvendelse af slaggegrus til f.eks. bundsikring under veje og parkeringspladser i 1974, da der som den første større slaggeanvendelse blev anvendt 4000 tons slagger fra Vestforbrænding under parkeringspladsen ved Ballerup Rådhus. Der blev etableret mulighed for udtagning af prøver af det gennemsvivende vand (perkolat) og overfladeafstrømmende vand, og udvaskningen af salte og metaller blev i mere end 20 år efterfølgende fulgt. Metalindholdet var generelt meget lavt, og ofte indeholdt det overfladeafstrømmende vand mere metal end perkolatet (det gjaldt specielt for bly, som jo fandtes i benzinen dengang).

Den første danske bekendtgørelse, som specifikt omhandlede slaggegrus, var *Bekendtgørelse nr. 568 af 6. december 1983 om anvendelse af slagger og flyveaske*, der fastsatte regler for, i hvilket omfang slagger og flyveaske fra forbrænding af affald (og kul) kunne anvendes i forbindelse med bygge- og anlægsarbejder uden tilladelse efter miljøbeskyttelsesloven. Bekendtgørelsen skelnede således ikke mellem slagger og flyveaske. Den satte kun grænseværdier for indhold af cadmium, kviksølv og bly. Slaggerne kunne normalt overholde grænseværdier, men flyveasken kunne ikke. Der blev stillet krav om overdækning med asfalt, beton eller andet vandstandsende lag, minimumsafstand til drikkevandsboringer på 20 m og anbringelse over højeste grundvandsspejl samt højeste gennemsnitlige lagtykkelse på 1 m. Selv om de samme regler formelt gjaldt både for slagger og flyveaske, har det faktisk, at flyveasken ikke kunne anvendes, haft den miljømæssigt positive effekt, at der allerede på dette tidlige tidspunkt har været et incitament til at opsamle og håndtere slagger og flyveaske adskilt. Dette blev i løbet af anden halvdel af 1980'erne og 1990'erne blev en selvfølge, og er i dag et af de absolutte BAT-krav i EU-direktivet om industrielle emissioner (IED).

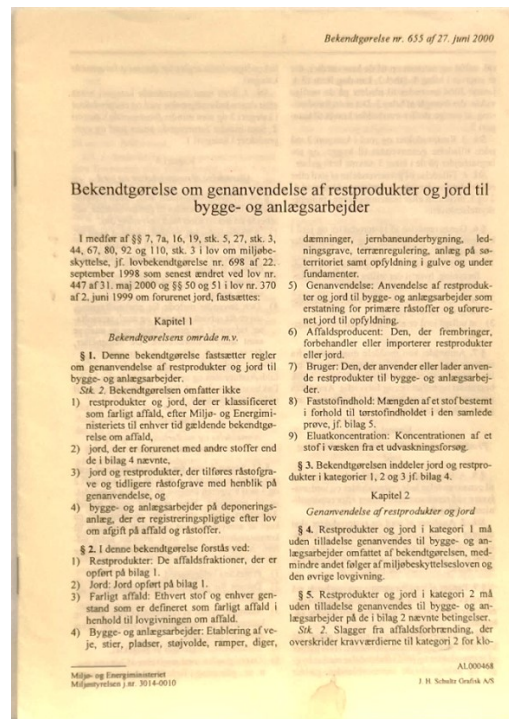
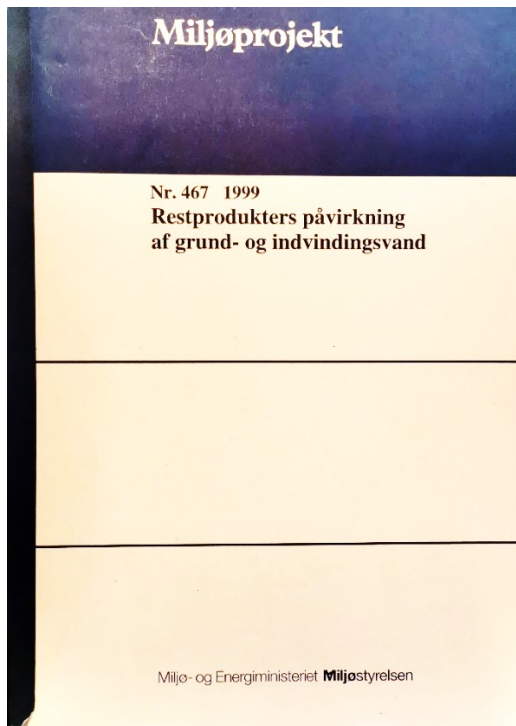


## De nuværende miljøbeskyttelsesregler om anvendelse af slaggegrus

Bekendtgørelse 568/1983 forblev i kraft i perioden 1984 – 2000. Men allerede i slutningen af 1980'erne var der en voksende generel erkendelse af, at risikoen for forurening af grundvand i forbindelse med anvendelse af slaggegrus til entreprenørmæssige formål var forbundet med slaggegrusets udvaskningsegenskaber og ikke med totalindholdet i slaggerne af potentielt forurenende stoffer. Dette førte senere til inddragelse af krav om udvaskningstests i reglerne for slaggeanvendelse. I forskerverdenen var udviklingen af metoder til testning af stofudvaskning begyndt allerede i 1970'erne, og i 1992 begyndte man at udvikle fælleseuropæiske standarder for udvaskningstests i CEN-regi.

Op gennem 1990'erne blev der gennemført en række projekter vedrørende kemisk og udvaskningsmæssig karakterisering af slagge, identificering af hvilke stoffer, der findes i slaggegruset, og hvilke af disse, det vil være relevant at sætte indholds- og udvaskningsmæssige grænser for. Der blev gennemført vurderinger af risikoen for grundvandspåvirkning ved forskellige former for anvendelse af slaggegrus (scenarier) og hvilke tiltag, der kunne reducere denne risiko, det blev undersøgt, hvilke typer udvaskningstests, som ville være relevante, hvorledes resultaterne skulle fortolkes, og hvorledes de kunne relateres til risikoen for grundvandspåvirkning. Mange af disse undersøgelser blev udført på foranledning af Miljøstyrelsen med henblik på at sikre, at anvendelse af slaggegrus kunne ske uden skade på miljøet.

Efter et langt forarbejde med gennemførelse af en række risikovurderinger til modelmæssig afprøvning af forskellige forebyggende miljøbeskyttelsesforanstaltninger samt høringer og ekspertdiskussioner udsendte Miljøstyrelsen *Bekendtgørelse nr. 655 af 27. juni 2000 om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder* til afløsning af Bekendtgørelse 568/1983 fra 1. januar 2001.



En del af dokumentationen af forarbejdet (til venstre) for BEK 655/2000 (til højre).

## De gældende miljøbeskyttelsesregler for anvendelse af slaggegrus baseret på risikovurdering

Den nye bekendtgørelse fra 2001 udgjorde et vigtigt skridt fremad med hensyn til at beskytte ikke alene grundvandskvalitet, men også menneskers sundhed i forbindelse med anvendelse af slaggegrus. Bekendtgørelsen angiver grænseværdier for de forurenende stoffer (metaller og salte), som udvaskes, når restprodukter anvendes til bygge- og anlægsarbejder. Grænseværdierne skal sikre, at der ikke sker en uacceptabel forureningspåvirkning af grundvandet. Samtidig angives specifikke betingelser for, hvordan slaggerne må anvendes.

Kriterier for faststofindhold er fastsat på baggrund af jordkvalitetskriterierne, der sikrer, at man kan færdes på arealer uden sundhedsmæssige risici (Kategori 1). Hvis disse ikke kan overholdes, må der i betingelserne for anvendelse tages forholdsregler, som sikrer mennesker og dyr mod kontakt med slaggerne (Kategori 2 og Kategori 3). Dette vil være tilfældet for affaldsforbrændingsslagge.

For udvaskningskriterierne er der to niveauer: Ét, hvormed det kan afgøres, om mængden af stoffer, der udvaskes, svarer til udvaskningen fra ren jord og dermed indikerer, at restproduktet kan anvendes frit (Kategori 1 - hvis kravene til stofindhold for denne kategori også er overholdt) eller med visse forholdsregler og restriktioner (Kategori 2), og ét, hvormed det kan afgøres, om de udvaskede stofmængder er acceptable, når der tages yderligere forholdsregler og gælder yderligere restriktioner (Kategori 3).

I boksen på næste side ses de miljømæssigt betingede grænseværdier for faststofindhold og stofudvaskning for de forskellige kategorier af slaggegrus og de tilhørende begrænsninger for anvendelsen af dette i en nøddeskal. I perioden siden 2001 er bekendtgørelsen løbende blevet opdateret 5 gange, men kriterierne for anvendelse af slaggegrus er ikke blevet ændret i forhold til BEK 655/2000, med undtagelse af tilføjelsen af udvaskningskriterier for selen (Se) i 2010. Beskrivelsen i boksen svarer til den gældende bekendtgørelse BEK 1672/2016.

Forudsætningerne for de risikovurderinger, som Miljøstyrelsen lagde til grund for beregningen af grænseværdierne for stofudvaskning var af hensyn til miljøbeskyttelsen forholdsvis konservative (overvurderer virkningen), og har også betydet, at de beregnede grænseværdier er ret restriktive. Det betyder blandt andet, at slaggegrus aldrig vil kunne opfylde kravene til fri anvendelse (Kategori 1), og dansk slaggegrus vil normalt heller ikke kunne opfylde kravene til Kategori 2. Til gengæld vil stort alt dansk slaggegrus opfylde kvalitetskravene til Kategori 3. Det åbner mulighed for anvendelse af slaggegruset til almindelige vejprojekter, men ved større anvendelser, som for eksempel de nedenfor viste eksempler på anvendelse ved større anlægsarbejder, skal der udføres specifikke risikovurderinger med beskrivelse af miljøbeskyttende foranstaltninger og resulterende miljøpåvirkning for at opnå tilladelse efter §19 eller godkendelse efter §33 i Miljøbeskyttelsesloven.

#### Bekendtgørelsen nr. 1672/2016: Grænseværdier og betingelser for anvendelse af slaggegrus til bygge- og anlægsformål

Kun slagger klassificeret som ikke-farligt affald kan anvendes i henhold til bekendtgørelsen

**Kategori 1:** Fri anvendelse (ikke aktuel for slaggegrus)

**Kategori 2 og 3:**

Minumsdistance til drikkevandsboringer: 30 m

Placering over højeste grundvandsspejl

**Kategori 2-slagger kan anvendes til:**

**Veje** - Fast belægning, maksimal højde 1 m

**Stier** - Fast belægning, maksimal højde 0,3 m

**Pladser** - Fast belægning, maksimal højde 1 m

**Ledningsgrave** - Fast belægning

**Ramper** - Fast belægning, maksimal højde 4 m, i længderetning mindst 15 promilles fald

**Støjvolde** - Fast belægning, maksimal højde 5 m. Kroens bredde må maksimalt være 2 m. Sider skal udføres med anlæg på 2 m eller mindre.

**Fundamenter og gulve** - maksimal højde 1 m

**Kategori 3-slagger kan anvendes til:**

**Veje** - Tæt belægning og bortledning af overfladevand, maksimal højde 1 m.

**Stier** - Fast belægning, maksimal højde 0,3 m

**Ledningsgrave** - Fast belægning

**Fundamenter og gulve** - maksimal højde 1 m

**Tæt belægning:** Asfalt, beton mm, der reducerer mængden af vand, der trænger gennem overfladen. Bortledning af overfladevand medfører, at højst 10 % af nedbøren vil komme i kontakt med slaggegruset.

**Fast belægning:** Asfalt, beton, fliser, minimum 1 m Kategori 1-jord mm. der sikrer mod kontakt.

Stofindhold	Enhed	Kategori 1	Kategori 2	Kategori 3
Total organisk kulstof, TOC	Vægt-%	3	3	3
Arsen, As	mg/kg TS	20		
Kadmium, Cd	mg/kg TS	0,5		
Krom-total, Cr	mg/kg TS	500		
Krom 6, Cr(VI)	mg/kg TS	20		
Kobber, Cu	mg/kg TS	500		
Kviksølv, Hg	mg/kg TS	1		
Nikkel, Ni	mg/kg TS	30		
Bly, Pb	mg/kg TS	40		
Zink, Zn	mg/kg TS	500		
<b>Stofudvaskning</b>				
Klorid	mg/kg TS	300	300	6000
Sulfat	mg/kg TS	500	500	8000
Natrium, Na	mg/kg TS	200	200	3000
Arsen, As	mg/kg TS	0,016	0,016	0,1
Barium, Ba	mg/kg TS	0,6	0,6	8
Kadmium, Cd	mg/kg TS	0,004	0,004	0,08
Krom-total, Cr	mg/kg TS	0,02	0,02	1
Kobber, Cu	mg/kg TS	0,090	0,090	4
Kviksølv, Hg	mg/kg TS	0,0002	0,0002	0,002
Nikkel, Ni	mg/kg TS	0,020	0,020	0,14
Bly, Pb	mg/kg TS	0,020	0,020	0,2
Selen, Se	mg/kg TS	0,020	0,020	0,06
Zink, Zn	mg/kg TS	0,200	0,200	3

Faststofindhold af TOC bestemmes i henhold til EN 15936 (ikke EN13137)

Faststofindhold af metaller bestemmes efter oplukning i henhold til DS 259

Stofudvaskning bestemmes ved L/S = 2 l/kg i henhold til EN 12457-1

Restprodukter/slaggegrus, som ikke er omfattet af Kategori 1, 2 eller 3 eller de beskrevne anvendelser, kan eventuelt opnå tilladelse/godkendelse efter Miljøbeskyttelseslovens § 19 eller § 33. Det vil ofte forudsætte en specifik risikovurdering.

### Klassificering af slagger

Bekendtgørelse nr. 1672/2016 om anvendelse af restprodukter mv. gælder som vist ovenfor kun for slagger, der er klassificeret som ikke-farligt affald. Affaldsforbrændingsslagger har lige som i de fleste andre europæiske lande hidtil været og er fortsat som udgangspunkt betragtet som ikke-farligt affald og er dermed omfattet af BEK 1672/2016.

EU-reglerne for klassificering af affald er beskrevet i Affaldsbekendtgørelsen (BEK 2512/2021) og for den senest færdiggjorte del i Rådforordning (EU) 2017/997 om afgørelse af, om affald skal klassificeres som farligt affald pga. den farlige egenskab "økotoksicitet" (benævnt HP14<sup>3</sup>). Rådforordningen angiver principperne for klassificering i forhold til HP14, men giver stort set ingen vejledning i, hvorledes klassificeringen i praksis skal gennemføres.

Resultatet er, at reglerne for affaldsklassificering i henhold til HP14 varierer fra land til land. I Danmark findes der pt. ikke nogen officiel vejledning i, hvorledes en HP14-klassificering skal gennemføres, og ansvaret for klassificering af affald som farligt eller ikke-farligt er lagt ud i de enkelte kommuner. Det skabte på et tidspunkt en vis usikkerhed omkring slaggers klassificering i forhold til HP14. Der er dog udviklet et forslag til, hvorledes man i Danmark kunne klassificere slagger fra affaldsforbrænding<sup>4</sup> med hensyn til HP14. Metoden, der er baseret på undersøgelse af biotilgængeligheden af potentielt farlige stoffer, blev anvendt på 12 danske og 12 europæiske affaldsforbrændingsslagger, som alle blev klassificeret som ikke-farligt affald.

Et finsk/svensk udviklingsprojekt<sup>5</sup> har udviklet og afprøvet en anden metode (den såkaldte T/D protocol) på 9 nordiske prøver af affaldsforbrændingsslagger, som også alle blev klassificeret som ikke-farligt affald. Der er således væsentlige indikationer på, at affaldsforbrændingsslagger normalt vil kunne klassificeres som ikke-farligt affald med hensyn til HP14 (dette gælder også med hensyn til de øvrige farlige egenskaber, som indgår i den samlede klassificering).

Det kan i øvrigt bemærkes, at grænseværdierne og anvendelsesbetingelserne i BEK 1672/2016 netop tager sigte på at beskytte vandmiljøet mod de økotoxiske påvirkninger, som HP14 er udtryk for. Det ville således rent faktisk være fuldt forsvarligt, hvis bekendtgørelsens anvendelsesområde blev udvidet til også at omfatte affaldsforbrændingsslagger, som var klassificeret som farligt affald alene med hensyn til HP14.

### Arbejds miljøbeskyttelse

Der er udarbejdet sikkerhedsdatablade, som følger slaggeleveringer til slutmodtageren på stedet, hvor slaggerne skal anvendes. Sikkerhedsdatabladene indeholder relevante oplysninger om slaggenes egenskaber, klassificering, toksicitet, potentielle risici i forbindelse med håndtering og udlægning, osv. Der gives information om, hvorledes man ved at holde slaggegruset befugtet undgår risiko for støvdannelse, og der informeres om behov for og anvendelse af personlige værnemidler i forbindelse med udlægningen.

## 6 Slagge håndtering i praksis i Danmark

---

### Slaggemodning

Når råslaggen fra forbrændingsanlægget ankommer til slaggepladsen, lægges den i miler. Inden i milerne stiger temperaturen, og der sker en modning af slaggen, samtidig med at den tørrer ud. Under modningen, der tager 2 til 3 måneder, stabiliseres de geotekniske og miljømæssige egenskaber, således at slaggegruset efter genvinding af metaller kan anvendes til f.eks. vejbygning.

Figuren øverst på næste side viser slagger under modningsprocessen.

---

<sup>3</sup> HP14 = Hazardous Property (Farlig Egenskab) 14. En affaldsforbrændingsslagges klassificering som farligt eller ikke-farligt affald vurderes for HP14's vedkommende ved at sammenligne slaggens indhold af en række relevante stoffer med fastlagte grænseværdier for disse stoffers potentielle akutte eller kroniske toksiske skadevirkninger på akvatiske (vandlevende) organismer.

<sup>4</sup> Danish Waste Solutions (2020): Konsolidering af metode til Klassificering af affaldsforbrændingsslagger i henhold til HP14. Projekt udført for AFATEK, ARC, Reno-Nord, Energnist, Fjernvarme Fyns Affaldsenergi A/S og Kredsløb.

<sup>5</sup> Wahlström, M., Tiberg, C., Fedje, K.K., Mäkelä, T., Kikuchi, J., Mohammadi, A.S (2022): Ecotoxic properties of ashes in hazardous waste classification. Adaptation of the transformation/dissolution (T/D) protocol for assessment of ecotoxic properties of waste ashes. TemaNord 2022-525, Nordic Council of Ministers.



*Modning af slaggen i 2 – 3 måneder giver tør slagge på 10 – 12 % fugtindhold - tilstrækkeligt til effektiv frasortering af metaller.*

### **Metalsortering**

Selv om metaller som jern, rustfrit stål, kobber, zink og aluminium kun udgør en mindre del af slaggen, repræsenterer disse en betydelig værdi. Efter modningen i milerne er slaggen tør nok til, at der kan sorteres metaller fra den. Den første sortering sker ved hjælp af en båndmagnet, som kan fjerne større emner bestående af magnetisk jern. 5-6 % af den producerede råslagge kan efter rensning sælges som jern til genanvendelse.

Den videre frasortering af ikke-magnetiske metaller sker i et sorteringsanlæg, hvor slaggen sigtes op i 5 kornstørrelsesfraktioner ned til mindre end 1 mm. De ikke-magnetiske metaller (dvs. kobber, aluminium, zink, messing, rustfrit stål og selv ædelmetaller som sølv og guld) sorteres fra ved forskellige metoder. Ved denne sortering fjernes tæt på 90 % af alle metaller fra slaggen i størrelser ned til under 1 mm. Erfaringen viser, at ikke-magnetiske metaller samt rustfrit stål udgør ca. 2 % af den indkommende mængde af råslagge. Denne mængde er fordelt med ca. 1,8 % fra metalsorteringsanlæg og ca. 0,2 % fra håndsortering. De 1,8 % af ikke-magnetiske metaller fra metalsorteringsanlæg fordeler sig med ca. 70 % som aluminium og ca. 30 % som en blanding af Cu, Zn samt en meget lille andel rustfrit stål.



*Tør slagge fugtindhold på 10 – 12 % giver mulighed for frasortering af metaller ned til 1 mm og for samlet at give en høj genvindingsgrad af ikke-magnetiske metaller som kobber, messing, zink, aluminium og ædle metaller som guld og sølv. I visse tilfælde frasorteres også rustfrit stål.*

2022-11-27

De frasorterede ikke-magnetiske metaller omsmeltes og genanvendes som erstatning for udvinding af nye metaller. Totalt genvindes der i Danmark omkring 12.000-13.000 tons ikke-magnetiske metaller (primært aluminium og kobber) og 35.000-40.000 tons jern fra de ca. 650.000- 700.000 tons rå affaldsforbrændings-slagge, der hvert år behandles.

Det kan nævnes, at produktion af primært aluminium ved elektrolyseprocessen er energikrævende, og dens "CO<sub>2</sub>-fodafttryk" varierer derfor mellem mindre end 4 tons CO<sub>2</sub>-ækvivalenter per ton aluminium i vandkraftbaserede regioner til mere end 20 tons CO<sub>2</sub>-ækvivalenter per ton aluminium i kulkraftbaserede regioner. Genanvendelsesprocessen af aluminium kræver en væsentlig mindre mængde energi og udleder mindre CO<sub>2</sub>: ca. 0,5 ton CO<sub>2</sub>-ækvivalenter per ton aluminium<sup>6</sup>.

### Slaggegrus

Efter sorteringen for metaller kontrolleres kvaliteten i forhold til både miljø og byggetekniske egenskaber, hvorefter slaggegruset lægges i færdigvarelageret klar til anvendelse i et vejbyggeri.

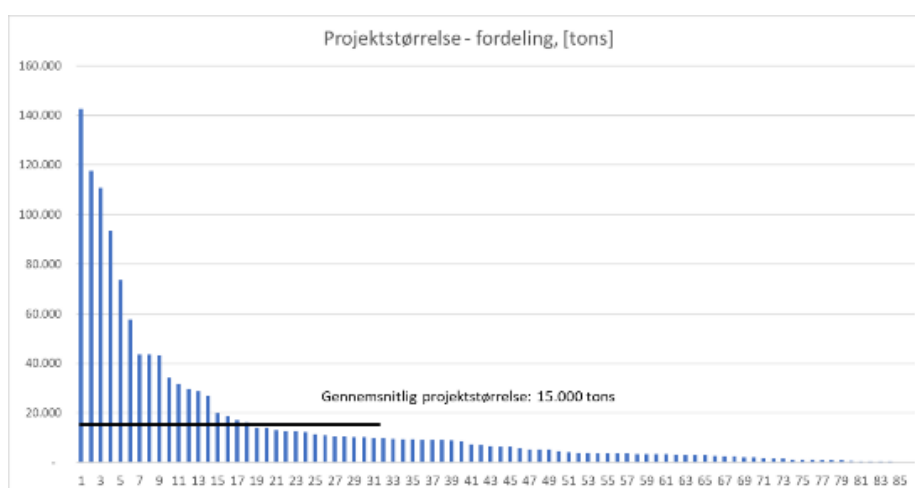


Oparbejdet slagge – færdigt, certificeret slaggegrus

Certificeret slaggegrus følger Dancerts "Supplerende bestemmelser for certificering af produktionsstyring for affaldsforbrændingsslagge til brug i bærelag i vejbyggeri" (<https://afatek.dk/sites/afatek.dk/files/media/document/Certifikat%20Slaggegrus%2023.12.2020.pdf>).

### Størrelse af anvendelsesprojekter

Som det fremgår af figuren nedenfor, leveres der slaggegrus til projekter af meget forskellig størrelse, hvor der dog skal ses bort fra de allermindste projekter, der i nogle tilfælde kan udgøre efterlevering inden for rammerne af et større projekt. De største projekter (her i størrelsen 140.000 tons), kan variere ganske meget. Der er eksempler på levering af mere end 300.000 tons til et enkelt projekt, hvor byggeriet kan foregå over flere år.



Størrelse af projekter, hvortil slaggegrus er leveret over en 5-årig periode.

Der arbejdes på at levere til større projekter, således at den gennemsnitlige projektstørrelse kan øges. Det kan bl.a. ske ved, at der med certificeret slaggegrus nu kan leveres til en større del af et vejbyggeri – til både bundsikring og bærelag. Yderligere et nyt produkt, bitumenstabiliseret materiale (BSM), kan som tidligere nævnt give mulighed for, at en større del af vejens opbygning kan bestå af slaggegrus.

<sup>6</sup> <https://www.climateaction.org/news/carbon-footprint-of-recycled-aluminium>

**Typer af projekter**

Den største del af slaggegruset anvendes til byggeri af veje og pladser. En del anvendes også til byggeri af ramper, dvs. underbygninger til vejanlæg. Slaggegrus anvendes f.eks. på genbrugsstationer, hvor plads- og vejbyggeri er kombineret. I projekter til landbruget kan slaggegrus anvendes til niveauregulering, fundamenter til bygninger, pladser og tilslutningsveje.

**Eksempel på et stort projekt - Storstrømsbroen**

I byggeriet af den nye Storstrømsbro er der anvendt ca. 250.000 tons slaggegrus ved etablering af ramper, der forbinder vejene til broen. På rampens højeste sted er der nu indbygget slaggegrus i 11 meters højde.

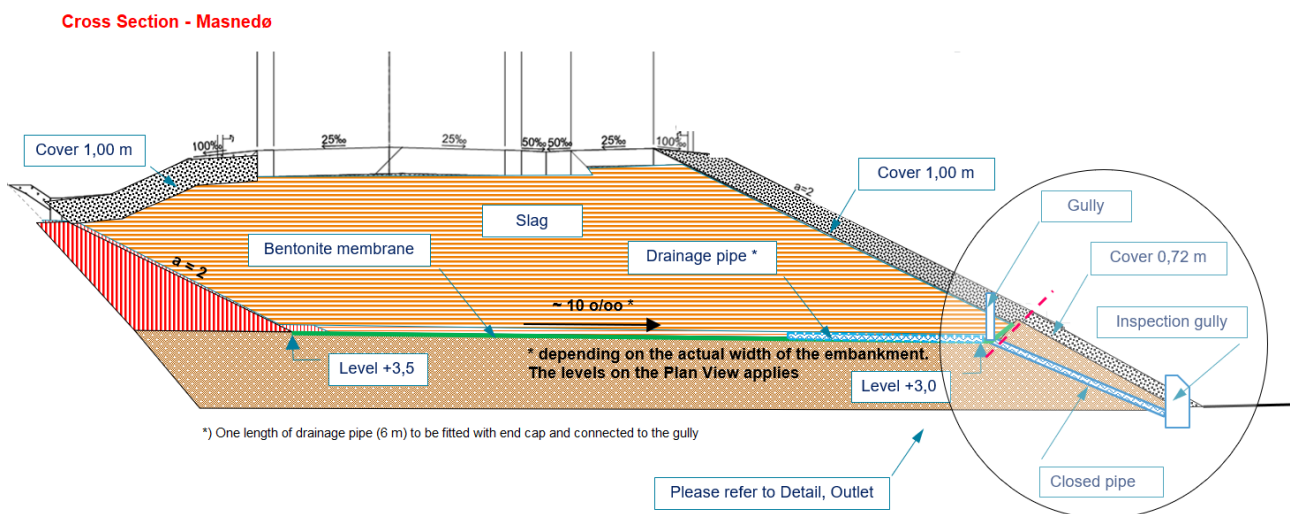
Der er givet en miljøgodkendelse efter § 33, bl.a. fordi projektet har stor fyldhøjde, og fordi miljømyndigheden i dette tilfælde har ønsket en miljøvurdering af både anlægs- og driftsfasen (driftsfase: samlet levetid på 100 år). Miljøtilladelsen har givet mulighed for, at der forud for byggeriet kunne indrettes et område, hvor slaggegrus kunne tilføres løbende og lægges op i et mellemlager for hurtigere indbygning i ramperne.

Som vist i den nederste del af figuren nedenfor har Vejdirektoratet etableret et omfattende monitoreringssystem med det formål at uddrage erfaringer med brug af slaggegrus. Således er der bl.a. etableret en bentonitmembran og dræn/opsamlingsbrønde under slagkerne for opsamling og analyse af vand, der eventuelt siver ned igennem slagkerne. Det forventes dog ikke, at der vil være en nævneværdig nedsivning af vand gennem slagkerne - nok i anlægsfasen, men ikke i driftsfasen. Samtidig har slagkerne en stor kapacitet for at rumme og tilbageholde vand, hvilket er en god egenskab, da slagkerne skal tilføres en betydelig vandmængde under indbygningen, for at maksimal komprimering kan opnås.



Slaggegrus i eksternt færdigvarelager

Byggeområdet ved den nye Storstrømsbro med oplag af slaggegrus klar til indbygning.



Snit af vejens opbygning, hvor slaggegrus anvendes i ramperne.

### Eksempel på et typisk vejprojekt

I nedenstående figur er vist en vej, hvor der indbygges slaggegrus i bundsikringen. Efter Vejdirektoratets udbudsforskrift udlægges slaggen i lag af 20 cm og komprimeres. Slaggegruset skal være godt fugtigt (optimalt vandindhold) for at de skarpkantede korn kan glide sammen og udgøre et stærkt lag.



Eksempel på slaggegrus anvendt i bundsikringen af veje.

### Eksempel på en cykelsti

I nedenstående figur er vist et eksempel på slaggegrus anvendt i en cykelsti. Den viste cykelsti er beliggende i bymæssig bebyggelse og derfor relativt smal. Andre cykelstier er egentlige cykelveje, der skal kunne tage en betydelig trafikmængde. Med en national politik for en kraftig udbygning af cykelstinet, understøttet af en statslig støtteordning forventes kommunerne i de kommende år at få behov for store mængder slaggegrus til dette formål.



Slaggegrus anvendt i en cykelsti.

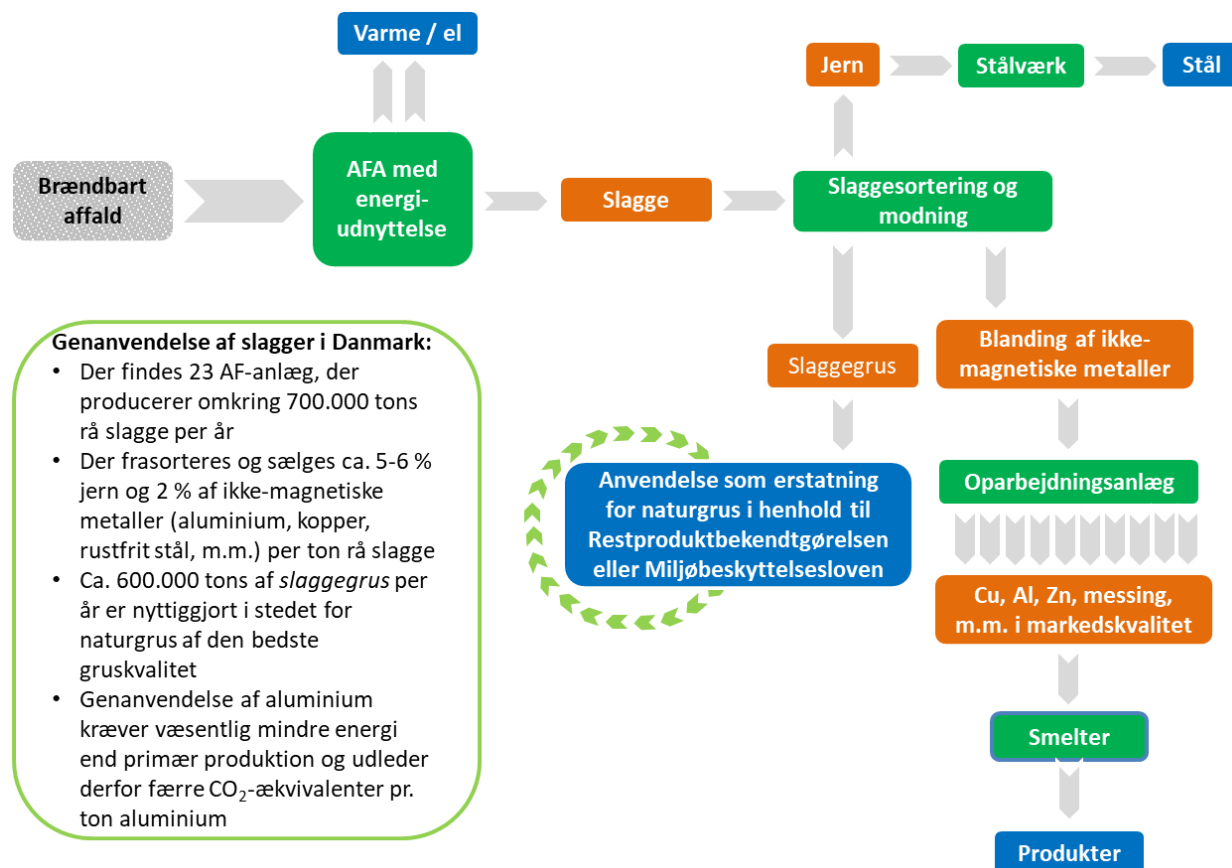
## 7 Fortsat behov for udvikling

### Den aktuelle situation

I figuren på næste side ses en overordnet beskrivelse af, hvorledes vi i Danmark, som beskrevet i det foregående, søger at udnytte materiale- og energiressourcerne i det affald, som tilføres affaldsforbrændingsanlæggene, fordi det ikke umiddelbart i sig selv kan genanvendes eller nyttiggøres. Figuren fokuserer på behandlingen af slaggerne og viser ikke håndteringen af de mindre restproduktstrømme (kedelaske, flyveaske, røggasrensingsprodukter), som stadig i væsentligt omfang må deponeres, men som også er genstand udviklingsaktiviteter med henblik på ressourceoptimering og inddragelse i den cirkulære økonomi under behørig hensyntagen til miljøet og menneskers sundhed.

Selv om vi her i landet allerede er nået et godt stykke vej med inddragelsen af affaldsforbrændingslagger i den cirkulære økonomi, er der fortsat plads til forbedringer, og nye udfordringer kommer stadig til. Blandt disse arbejdes bl.a. med:

- Forbedret genvinding af jern og ikke-magnetiske metaller samt rustfrit stål
- Genudnyttelse af tidligere anvendte slagge fra de seneste 20 år
- Vurdering af risikoen for miljø og mennesker af nye, potentielt forurenende stoffer



Overordnet beskrivelse af ressourceudnyttelsen af slagge fra forbrænding af affald.

### Forbedret udvinding af jern og ikke-magnetiske metaller

Selv om de effektiviteter for genvinding af metal, som er opnået af metalsorteringsanlæggene i Danmark, generelt ligger højt, er der stadig potentiale til forbedring, især inden for sortering af kobber og ædelmetaller i fraktionen mindre end 1 mm. Udenlandske erfaringer indikerer, at denne fraktion kan indeholde ikke ubetydelige mængder af kobber, men også guld (0,2 – 1 mg/kg), sølv (5 – 20 mg/kg) samt platingruppemetaller (i mindre mængder). Behandlingsbranchen holder øje med den nyeste udvikling på området og vurderer løbende, om nye tiltag skal implementeres i Danmark.

### Genvinding af rustfrit stål

Jern og metaller i slagge genvindes generelt med en høj genvindingsgrad. Derimod genvindes rustfrit stål kun sjældent fra slaggen – i Danmark kun fra en mindre del af slaggemængden. Rustfrit stål kan ikke frasorteres med sædvanlig teknik bestående af forskellige typer af magneter. Det kræver brug af særlige teknikker som sensormaskiner, der bl.a. benytter lufttryk til afskydning af rustfrit stål. Nyere teknikker, der for eksempel kan frasortere stænger af rustfrit stål, er også under udvikling.

Det har betydning for den samlede genvindingsgrad af metaller, at denne metaltype også genvindes. Dertil kommer, at renheden af slaggegruset øges. Det har særlig betydning med den seneste udvikling, hvor slaggegrus nu kan anvendes i de øvre lag i vejaksen – i bærelag og i BSM-laget, hvor konstruktionsarbejdet stiller større krav til materialet. (se ovenfor).



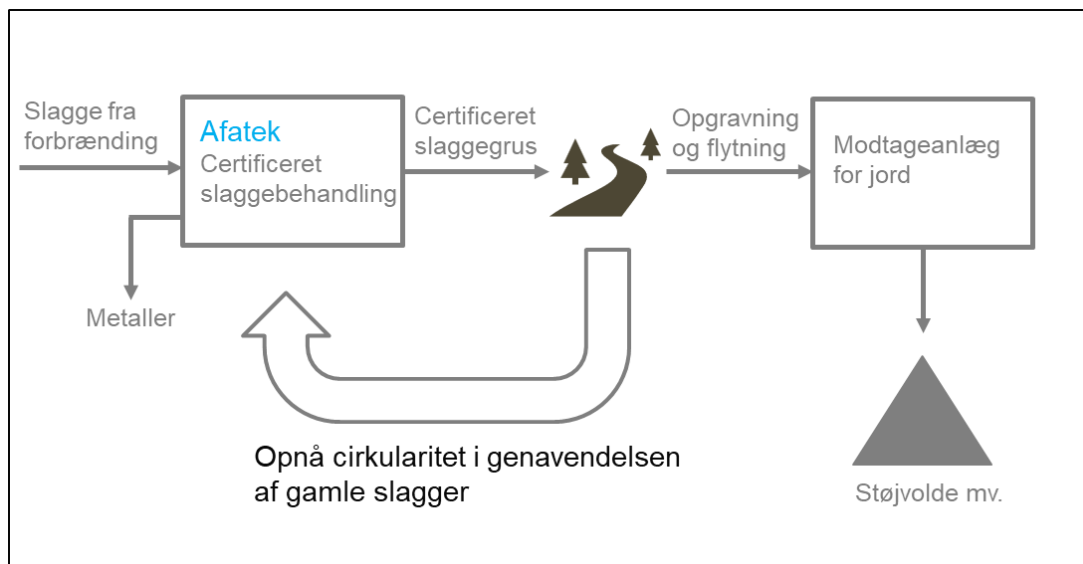
### Cirkularitet i gamle slagger

Gennem de seneste 50 år er der nyttiggjort ca. 30 millioner tons slagge i Danmark. I de første år kunne slaggen som nævnt anvendes med kun få restriktioner og ofte i relativt små projekter. Efter indførelse de mere restriktive krav til slagge kvalitet og anvendelsesbetingelser i 2001 er slaggen blevet anvendt i væsentligt større projekter, og anvendelserne er nu registreret, således at man ved, hvor slaggerne (ca. 12 millioner tons) er anbragt, og hvem der har produceret dem.

Når en vej skal nedlægges, er det i dag almindelig praksis (efter reglerne i Jordflytningsbekendtgørelsen), at byggematerialerne opgraves i blandet form og køres til et modtageanlæg for jord. Efter analyse anbringes de i f.eks. en støjvold eller tilsvarende, hvor kun lavere materialekvaliteter som jord kan erstattes.

Sammen med kommunerne København og Vordingborg, Region Sjælland og Miljøstyrelsen, har Afatek taget initiativ til at gennemføre et projekt, hvor nedlæggelse af f.eks. en vej vil foregå ved, at den adskilles i de enkelte dele, som konstruktionen består af (asfalt, naturgrus, slagge, jord). Slaggen føres tilbage til et slaggeanlæg, hvor den sorteres for metaller og efter miljøtestning bliver til certificeret slaggegrus klar til anvendelse i byggeri af nye veje og nu igen kan erstatte den bedste kvalitet naturgrus.

På denne enkle måde kan slagger, som allerede er anvendt én (eller flere) gange, bringes tilbage i cirkulation på et højt niveau i materiale-hierarkiet. Denne løsning er efterspurgt blandt kommuner og andre brugere af slaggegrus, der gerne vil vide, hvordan man kommer af med slaggegruset, når man ikke længere har brug for det. Med udsigt til mangel på naturmaterialer forventes der at være et stort behov for at kunne genvinde gamle slagger - også det slaggegrus, vi anvender i dagens og fremtidige vejprojekter. På denne måde bibeholdes der god kontrol med et kontamineret restprodukt – hvilket også var hensigten, da man i Restproduktbekendtgørelsen stillede krav om registrering af slutanvendelsen af slaggerne.



*Cirkularitet i gamle slagger, som gensorteres til certificeret slaggegrus frem for nedgradering til støjvolde.*

### Nye potentielt forurenende stoffer

På trods af omfattende viden om slaggenes indhold af mange potentielt forurenende stoffer og deres udvaskningsegenskaber, identificeres der fra tid til anden nye grupper af forurenende stoffer, som potentielt kunne være problematiske i forhold til udnyttelsen af slaggegrus. Der tales eksempelvis om forskellige bromerede organiske forbindelser, herunder bromerede flammehæmmere, som er kemikalier, der kan tilsættes plast, skum og møbeltekstiler for at forhindre brand. Disse er for nylig identificeret i sydkoreanske slagger som følge af medforbrænding af større mængder af bromeret plast. Selv om medforbrænding af større mængder af bromeret plast ikke er almindelig praksis i Danmark, vil målinger af disse forbindelser i en række repræsentative prøver af slaggegrus, kunne udføres af akkrediterede laboratorier for at muliggøre en korrekt vurdering af potentielle risici, og hvordan de i givet fald undgås. Desuden ses PFAS, som gennem lang tid blandt andet har været brugt i mange dagligvarer og i emballage, i disse år at have spredt sig i et uventet stort omfang. Selv om de ovenfor omtalte analyser af nogle få slagger for indhold af PFAS viste meget lave værdier, har Miljøstyrelsen igangsat en bredere undersøgelse af indhold og udvaskning af PFAS fra slagger for at kunne belyse og danne grundlag for at imødegå en eventuel risiko for spredning af disse stoffer i forbindelse med anvendelse af slaggerne.

### **Afsluttende bemærkninger**

Den seneste produktudvikling med certificeret slaggegrus og BSM-slaggegrus (samt en række igangværende udviklingsprojekter) er typisk drevet af brugerne af produktet (byggeentreprenører, rådgivende ingeniører og myndigheder). Det har været typisk for danske forhold, at branchen har reageret hurtigt og konstruktivt på opståede udfordringer med anvendelsen af slaggen, bl.a. også med hensyn til klassificering af affald som ikke-farligt eller farligt efter introduktionen af nye regler for klassificering i forhold til HP14 – Økotoksisk (se beskrivelsen ovenfor).

En forklaring kan være, at der i Danmark altid har været et nært samarbejde affaldsenergianlæggene imellem og sammen med myndighederne med fokus på miljøbeskyttelse og ressourceudnyttelse.