

# Slaggegrus 0/31,5 mm

## som bærelagsmateriale i vejbygning



**TORBEN BOES  
OVERGAARD**

Boes Consulting

torben@boes-consulting.dk

Nye undersøgelser af de geotekniske egenskaber af slaggegrus viser, at de på en række vigtige områder er fuldt på højde med stabilt grus kvalitet II. Målinger af lagmodul og sporkøring på en forsøgsstrækning med anvendelse af slaggegrus som bærelag tyder efter 7 års brug på, at slaggegrus kan anvendes, som en fuldgældig erstatning for stabilt grus kvalitet II til bærelag i veje, selv i de højere trafikklasser.



**MOGENS WINKLER**

Winkler Engineering  
mwi@w-eng.dk

### Cirkulær økonomi

Affald fra husholdninger og industri sorteres og genanvendes i dag i stor stil. Den del af affaldet, som ikke kan genanvendes direkte, bliver omdannet til klimavenlig energi på store affaldsenergianlæg. Forbrænding af affald til energiproduktion er en hundrede år gammel tradition i Danmark, først som fjernvarme, og i dag som en kombination af elproduktion og fjernvarme. Ved at bruge affald til at lave energi, kan der spares på fossile brændstoffer, som olie, gas og kul.

Når energien i affaldet er udnyttet ved forbrænding, er der en rest af ikke-brændbare materialer tilbage. Denne affaldsforbrændingslagge består hovedsageligt af metaller, keramiske materialer, glas, sten og aske.

### Moderne slaggebehandling

Når affaldsforbrændingslagge ankommer til Afateks modtagepladser lægges den i miler. Indeni milerne stiger temperaturen, og der sker en modning af slaggen samtidig med, at den tørrer ud. Under modningen, der tager 2 til 3 måneder, bindes tungmetallerne til slaggen således, at slaggen kan anvendes til f.eks. vejbygning.

Metaller, som jern, rustfrit stål, kobber og aluminium, udgør op mod 10 % af slaggen, og disse me-

taller udgør en stor 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.

Den videre sortering for metaller sker i et ultramoderne sorteringsanlæg, hvor slaggen sigtes op i 6 kornstørrelsesfraktioner, og metallerne sorteres fra ved forskellige metoder. I denne sortering kan umagnetiske metaller også sorteres fra, det vil sige metaller, som kobber, aluminium, zink, messing, rustfri stål og selv ædelmetaller, som sølv og guld. Ved denne sortering fjernes tæt på 90 % af alle metaller fra slaggen. De frasorterede metaller omsmeltes og genanvendes, som erstatning for udvinding af nye metaller.

Efter metalsorteringen bliver de forskellige fraktioner af slagge samlet igen, og herved opstår et rent mineralprodukt, som kaldes slaggegrus 0/31,5 mm.

### Ny viden fra laboratorieforsøg

I forbindelsen med det nyligt afsluttede projekt "Recovery of Resources in Bottom Ash" (RecAsh), der var et 3-årigt Grand Solutions projekt støttet af Innovationsfonden, er der kommet meget ny viden om de geotekniske egenskaber af slaggegrus.



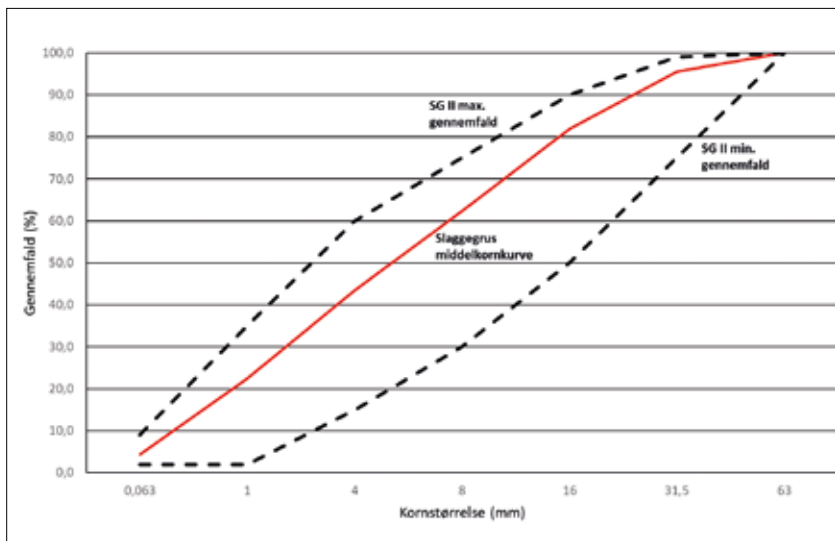
**FINN THØGERSEN**

Vejdirektoratet  
ft@vd.dk



**SØREN  
DYHR-JENSEN**

Afatak A/S  
sdj@afatek.dk



Figur 1. Graf med middeldkornkurve af slaggegrus 0/31,5 mm og kornkurveafgrænsning for stabilt grus kvalitet II (SG II) jf. Vejdirektoratets AAB for stabilt grus [2].

Projektet havde to hovedformål, nemlig at optimere genvindingen af metaller fra slaggen, samt at indsamle ny viden om slaggegrus geotekniske egenskaber sammenlignet med stabilt grus. De geotekniske undersøgelser skulle sikre, at den slaggegrus, som fremstilles efter optimeringen af slaggebehandlingen, kan anvendes til de samme formål, som før optimeringen, dvs. bundsikringsmateriale i vejbygning. Derudover skulle der indsamles data, som kan bidrage til, at slaggegrus i fremtiden kan tillades anvendt, som bærelagsmateriale i vejbygning.

I RecAsh-projektet blev en lang række af slaggegrusets geotekniske egenskaber med mere undersøgt og sammenlignet med stabilt grus [1].

### Geotekniske egenskaber af slaggegrus

Kornstørrelsesfordelingen af slaggegrus 0/31,5 mm svarer ganske nøje til stabilt grus kvalitet II (SG II), det vil sige, at kornkurven ligger indenfor, og typisk i den øvre halvdel af, kornkurveafgrænsningen for SG II. (se Fig. 1).

Både kornkurve, kapillær stighøjde og hydraulisk ledningsevne af slaggegrus er sammenlignelige med de værdier, som kendes fra SG II, som ikke vurderes frostfølsomt. Dette passer godt med ældre frost/tø undersøgelser af slaggegrus, som også viser, at materialet ikke er frostfølsomt.

Slaggegrus har traditionelt set været betragtet, som et materiale bestående af ret svage partikler, og ældre målinger af partikelstyrken ved Los Angeles (LA) forsøg udført af Vejdirektoratet viser LA-værdier fra 45-55 (jo lavere LA-værdi desto stærkere materiale) [3]. Partikelstyrkeforsøg i RecAsh-projektet viser derimod LA-værdier fra 36-42 på slaggegrus fra Afatek, hvilket er tæt på de krav, man for eksempel stiller til LA-værdi på et stærkt bærelagsmateriale, som knust beton (LA-krav  $\leq 40$ ). Forbedringen i LA-værdien for slaggegrus skyldes formodentlig ændringer i processeringen af slaggegruset, især de mekaniske processer, som slaggen udsættes for under metalsorteringen.

E-moduler af naturmaterialer, som anvendes i vejbygning, har traditionelt set

været fastsat baseret på empiriske data. E-modulet for slaggegrus, der jo er et forholdsvis nyt materiale i vejbygning, har som en konservativ antagelse været sat til 100 MPa. Indenfor de seneste år er der udført en del forsøg med bestemmelse af vejmaterialers E-moduler ved hjælp af triaksialforsøg. I forhold til vurdering af E-modul af ukendte eller nyere materialer kan man derfor udføre sammenlignende triaksialforsøg med for eksempel SG II, der har et materiale E-modul på 300 MPa. Dette er gjort for slaggegrus 0/31,5 mm for at kunne vurdere dets elasticitetsmodul og deformationsegenskaber. Forsøgene er udført efter internationale standarder (EN 13286-7) hos VTI i Sverige. Der kan aflæses to parametre ud fra triaksialforsøgene, nemlig elastisk deformation (E-modul) og plastisk deformation. Den elastiske deformation karakteriseres ved hjælp af E-modulet, der siger noget om stivheden (styrken) af materialet. Den plastiske »

### Typiske værdier for slaggegrus 0/31,5 mm

#### Kornkurve gennemfald:

- 45 mm = 100 %
- 32 mm = 96 %
- 16 mm = 82 %
- 8 mm = 62 %
- 4 mm = 44 %
- 1 mm = 22 %
- 0,063 mm = 5 %
- Renhed (lette korn) = 6 cm<sup>3</sup>/kg
- Indhold af organisk kulstof (TOC) = 0,8 %
- Los Angeles værdi = 40 %
- CE-mærket efter DS/EN 13242 med normativ reference GA75, GTANR, f9 og LA50 (forventet 2020).
- Normativ reference efter DS/EN 13285 er GE, OC 75, UF 9 og LF 2.
- Kategori 3 efter restproduktbekendtgørelsen BEK. nr. 1672:2016.

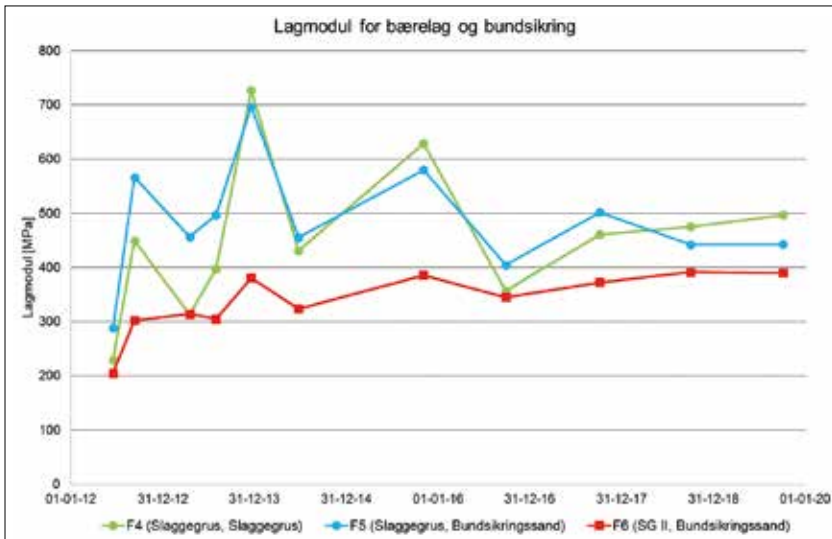


Fig. 2. Udvikling i lagmodul for det kombinerede lag af bundsikring plus bærelag på Nordsøvej for referencesektion (SG II og bundsikringsand) sammenlignet med sektioner med slaggegrus, som bærelagsmateriale. Lagmoduler er vist som gennemsnit mellem let side og tung side af vejen.

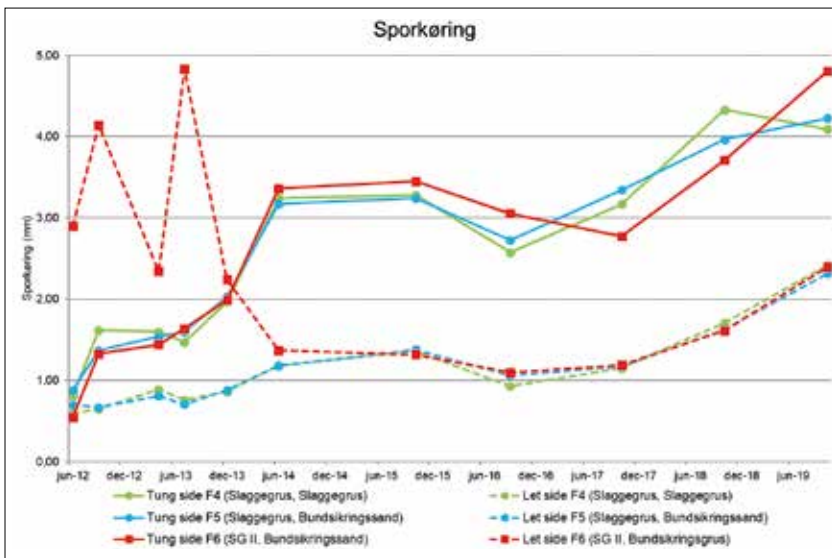


Fig. 3. Udvikling i sporkøring på sektioner med slaggegrus, som bærelagsmateriale, sammenlignet med referencesektionen (SG II og bundsikringsand).

deformation fortæller noget om, hvor meget materialet deformeres ved gentagne trykpåvirkninger, og dermed noget om materialets tendens til sporkøring.

Resultaterne af triaksialforsøgene viser, at slaggegrus efter en kort modningsperiode udviser E-moduler på højde med E-moduler målt på SG II. I forhold til plastisk deformation udviser slaggegruset endog lavere værdier, og dermed mindst lige så svag tendens til sporkøring, som SG II.

Resultaterne af de geotekniske undersøgelser viser altså, at slaggegrus 0/31,5 mm har gode geotekniske egenskaber på højde med dem, som kendes fra SG II. Slaggegrus kan derfor, hvis de miljømæssige forhold tillader det, anvendes, som erstatning for SG II i bærelag i vejbygning og andre anlægskonstruktioner.

Kvaliteten af slaggegrus 0/31,5 mm fremstillet hos Afatek kontrolleres og analyseres systematisk, og materialet forventes at opnå et produktcertifikat med CE-mærke til brug som bærelag i løbet af 2020.

Da slaggegrus 0/31,5 mm er defineret som et restprodukt, skal det bemærkes, at anvendelse af slaggegrus skal følge anvisningerne i restproduktbekendtgørelsen BEK. nr. 1672:2016 [4].

### Ny viden fra fuldskalaforsøg på Nordsøvej

Vejdirektoratet udgav i starten af 2012 en udbudsforskrift for anvendelse af affaldsforbrændingsslagge til bundsikringslag i vejbygning, hvor slaggen blev vurderet bedre til vejbygning end hidtil antaget [5]. I forbindelse med et nyt opfyldningsområde i Nordhavn blev det senere på året besluttet at udføre en prøvestrækning med anvendelse af slaggegrus og andre genbrugsmaterialer, hvor disse ma-

terialer blev anvendt som bundsikringslag og som ubundet bærelag i forskellige kombinationer. Der blev blandt andet udført en sektion med bærelag af slaggegrus og bundsikringslag af sand, samt en sektion med både bærelag og bundsikringslag af slaggegrus. Siden færdiggørelsen af Nordsøvej i juni 2012 er der jævnlig blevet udført faldlodsmålinger, samt måling af sporkøring på forsøgsstrækningen med genbrugsmaterialer, samt på en referencestrækning med normal opbygning af vejen, hvor bundsikringslaget består af sand og bærelaget af SG II [6].

I Figur 2 vises udviklingen i lagmodul for bærelag og bundsikring målt med stort faldlod [7]. Der er anvendt gennemsnitlige værdier af måledata fra let side og tung side af vejen. Den tunge side er vejsiden ud til opfyldningsområdet, hvor lastbilerne har været fyldt op med jord til opfyldningen. Begge sider viser den samme trend. Det ses, at strækningerne med slaggegrus, som bærelag i alle årene, har samme eller i de fleste målinger højere lagmodul end referencestrækningen med SG II som bærelag. Efter 7 års brug er lagmodul for referencestrækningen ca. 400 MPa, mens det er 50-100 MPa bedre for strækningerne med slaggegrus.

Udvikling i sporkøring på sektioner med slaggegrus som bærelag i forhold til referencestrækningen kan ses i Figur 3. Det ses tydeligt, at sporkøring på strækningerne med slaggegrus som bærelag er i fuldstændig samme størrelsesorden, som på referencestrækningen. Sporkøring efter 7 års drift er kun ca. 4-5 mm i den tunge side af vejen og lidt over 2 mm i den lette side af vejen [7]. Data viser også, at det meste af sporkøringen i den tunge bane er sket i starten af måleperioden og mest i det ene hjulspor, hvilket tyder på, at der snarere er tale om en efterkompri-

## Afatek A/S

AFATEK behandler og genanvender slagge, der er et restprodukt fra energiodnyttet affald fra affaldsbehandlingscentrene i Østdanmark.

Vi sikrer, at de mineraler, metaller og jern, der er tilbage i slaggen, efter at energien i affaldet er blevet til grøn strøm og fjernvarme, udnyttes fuldt ud.

Vores målsætning er at få mest muligt ud af slaggen, sådan at vi gradvist genanvender mere og mere.

AFATEK er et aktieselskab, som er ejet af: I/S Vestforbrænding, I/S Norfors, I/S AffaldPlus, I/S ARGO og REFA Energi A/S.

### Kontaktdata:

Selinevej 18  
2300 København S  
Tlf. +45 39667800  
mail@afatek.dk

mering af asfalten. Bærelagenes bidrag til sporkøringen må indtil videre antages at være meget lille.

Trafikbelastningsmålinger viser, at der efter 6 års drift, dvs. frem til sommeren 2018 har været 474.000 lastbiler, som kan beregnes til at have kørt med 8,3 mio. ton jord. I udgangspunktet blev der regnet med flytning af 10 mio. ton jord over 15 år, så der er flyttet væsentlig mere jord per år indtil nu end forudsat. Den tunge side af strækningen har gennem hele tidsperioden været belastet med en løbende trafik svarende til den højeste trafikklasse T7.

Over en normal dimensioneringsperiode på 20 år vil den nuværende trafikbelastning på 3,37 mio. Æ10 svare til, at vejen er belastet i den øvre ende af trafikklasse T4. Hvis trafikken fremskrives med et år, dvs. til sommeren 2019, så er vi nu oppe på 196.000 Æ10/år, svarende til T5.

For at komme op i T6 vil vi skulle vente til ca. 2023, antaget at trafikken fortsætter uændret.

Faldlodsmålinger og måling af sporkøring forventes fortsat på Nordsøvej indtil trafikklasse T7 er opnået. Målingerne af lagmodul og sporkøring på Nordsøvej viser altså, at slaggegrus fungerer lige så godt eller bedre end SG II, som bærelagsmateriale i vejbygning til mindst trafikklasse T5, idet vejen stadig fungerer upåklageligt. Der er pt. intet, som tyder på, at slaggegrus som bærelagsmateriale ikke skulle fungere lige så godt som SG II, også op til den højeste trafikklasse.

I forhold til anvendelse af slaggegrus til bærelag ville det være godt, hvis der indenfor en kortere årrække kunne udfærdiges en udbudsforskrift for anvendelse af slaggegrus til bærelag i vejbygning. ●

## Litteratur

1. Overgaard, T. & Winkler, M. (2019): RecAsh – Geotechnical testing of IBA. Upubliceret delrapport til Innovationsfondens Grand Solutions project, "RecAsh – Recovery of Resources in Bottom Ash".
2. Vejdirektoratet (2016): Almindelig arbejdsbeskrivelse, Stabilt grus – AAB, Udbud, december 2016.
3. Pihl, K.A., Berg, F. and Milvang-Jensen, O. (2004). Bundsikring af forbrændingslagge – efter europæiske standarder. Vejteknisk Institut, rapport 133, 2004. Vejdirektoratet.
4. BEK. nr. 1672:2016. Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter, jord og sorteret bygge- og anlægsaffald. Miljø- og Fødevarerministeriet, Miljøstyrelsen, j.nr. MST-7549-00048.
5. Vejdirektoratet (2012): Almindelig arbejdsbeskrivelse, Bundsikringslag af forbrændingslagge – AAB, Udbud, marts 2012.
6. Vejdirektoratet (2014). Forsøgsstrækning på Nordhavnen. Forbrændingslagge som bundsikring og ubundet bærelag til vejbygning. Vejdirektoratet, Rapport 522, 2014.
7. Vejdirektoratet (2019). Upublicerede måledata fra forsøgsstrækningen på Nordsøvej.