

# Responsmålinger

## som komprimeringskontrol af slaggegrus



**AF TORBEN BOES  
OVERGAARD**  
Boes Consulting  
torben@  
boes-consulting.dk



**AF MOGENS  
WINKLER**  
Winkler Engineering  
mwi@w-eng.dk



**AF FINN THØGERSEN**  
Vejdirektoratet  
fit@vd.dk



**AF SØREN DYHR-  
JENSEN**  
Afatek A/S  
sdj@afatek.dk

### Indledning

Slaggegrus fra Afatek er et kvalitetskontrolleret og certificeret produkt, der fremstilles af forbrændings-slagge, som er restproduktet fra energiuudnyttelsen af rest- og industriaffald på en række sjællandske affaldsforbrændingsanlæg. Forbrændingslagge har gennem mange år været anvendt til bundsikrings-lag i vejbygning og som bærende lag under mindre konstruktioner. Fuldskalaforsøg med anvendelse af slaggegrus som bærelag i vejkonstruktioner har vist, at materialet med fordel kan erstatte stabilt grus kvalitet II som bærelagsmateriale.

Komprimeringskontrol på slaggegrus kan på grund af materialets indhold af metaller ikke foregå med isotopsondemåling, men skal udføres ved hjælp sandefterfyldningsmetoden. Denne metode er omstændelig og meget personafhængig og giver derfor en usikker bestemmelse af komprimeringsgraden.

Responsmålinger fra komprimeringstromler kan anvendes til at vurdere stivhed og komprimering af ubundne vejmaterialer. De målte værdier afhænger af en lang række parametre så som antal passager, lagtykkelse, materialetype, vandindhold med mere. Standard komprimeringskontrol sker i form af punkt-målinger, mens responsmålinger dækker hele det overkørte areal.

Responsmålingerne kan give øjeblikkelig information om komprimeringsresultatet, mens selve komprimeringen foregår, og de digitalt lagrede data kan udskrives på kort, der kan fungere som dokumentation i forhold til antal overkørsler samt opnåelse af korrekt komprimering.

Ved anvendelse af responsmålinger til komprimeringskontrol af vejmaterialer kan man reducere

eller måske helt undvære standard komprimeringskontrolmålinger. Responsmålinger giver også gode muligheder for at optimere på antallet af nødvendige tromlepassager.

### Metodebeskrivelse

Komprimeringstromler kan udstyres med måleudstyr, der kan måle responsen fra jorden af de vibrationer, som tromlen udsender. Disse responsmålinger udføres, mens tromlen komprimerer på materialet og kan anvendes til en kontinuerlig komprimeringskontrol af det udførte komprimeringsarbejde. Princippet for metoden fremgår af figur 1. Metoden kan anvendes for jord, friktionsmaterialer og fyldmaterialer af knuste bjergarter (CEN/TS 17006:2017).

For jord og friktionsmaterialer med op til 15 % < 0,063 mm er der en god korrelation mellem kom-

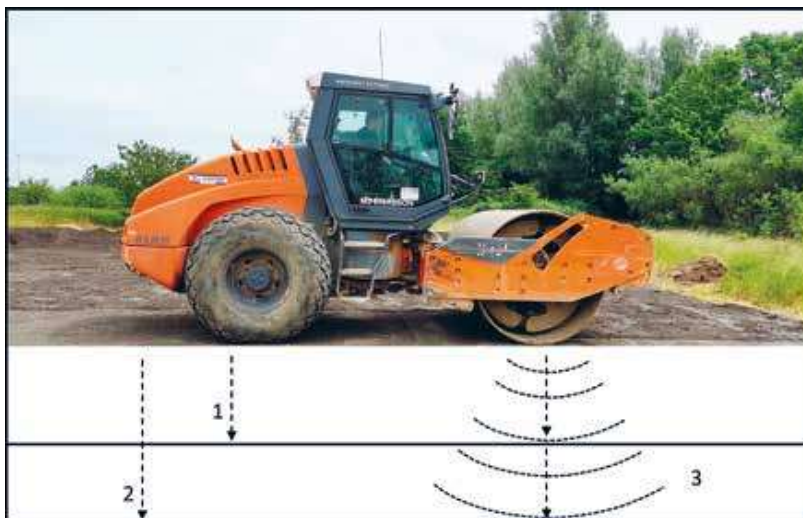
### AFATEK A/S

AFATEK behandler og genanvender slagge, der er et restprodukt fra energiuudnyttet affald fra affaldsbe-handlingscentrene i Østdanmark.

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

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



Figur 1: Skematisk princip for responsmålinger med en vibrationstromle. 1 = Komprimeringsdybde; 2 = måleddybde; 3 = udbredelse af vibrationer fra tromle.

Materiale / lagnummer	Tromlekørsler	Gennemsnitlig CMV-værdi	Ændring i CMV-værdi	Minifaldlod bæreevne lag gens.	Vandindhold målt i lag	Sandefterfyldning Gen. snit	Min-værdi
Råjord	0	-	-	18 MPa			
Råjord	4	16	2%	23 MPa			
Slaggelag 1	2	16	17%	13 MPa	16,5-19,6% (tydeligt vandovermættet)		
Slaggelag 1	4	27	8%	-	Efter udtørring, men ikke målt.		
Slaggelag 2	4	31	3%	28 MPa	11,5%	98%	96%
Slaggelag 3	4	37	4%	40 MPa	12,8%	101%	97%
Slaggelag 4	4	44	7%	50 MPa	13,1%	101%	94%

Figur 2: Resultater af målinger på de forskellige lag på forsøgsområdet. Responsmålinger fra tromleforsøgene udtrykkes i en værdi kaldet CMV (Compaction Measurement Value), der er et udtryk for det underliggende materiales stivhed. Ændring i CMV-værdi er fra næstsidsite til sidste overkørsel.

primeringsgrad og de målte responsværdier, hvis vandindholdet er mindre end materialets optimale vandindhold. I dette tilfælde er der ofte også en god korrelation mellem responsværdier og statisk eller dynamisk deformationsmodul.

### Komprimeringsforsøg med slaggegrus

For at afklare om responsmålinger kan erstatte sandefterfyldning som komprimeringskontrol på slaggegrus, har Afatek udført forsøg på et 500 m<sup>2</sup> stort areal. Denne arealstørrelse er i overensstemmelse med kravet til prøvestrækninger for slaggegrus til bundsikring - jævnfør Vejdirektoratets AAB. Forsøget er udført fra maj til august 2021 ved Afateks lagerplads på Ydernæs i Næstved. Arealets overflade er opmålt ved nivellering og har et ensartet

fald mod syd. Resultaterne af målinger på de enkelte lag på forsøgsområdet fremgår af figur 2 og er nærmere beskrevet i det efterfølgende.

Vejdirektoratets komprimeringskrav for slaggegrus anvendt som bundsikring er et gennemsnit >97 %, med en mindsteværdi  $\geq 94$  %, beregnet på basis af mindst fem målinger tilfældigt fordelt på prøvestrækningen. Dette krav er strengere, end hvad Vejdirektoratet stiller til for eksempel bærelag af stabilt grus, hvor et gennemsnit på >95 % og en mindsteværdi på  $\geq 92$  % er tilstrækkeligt.

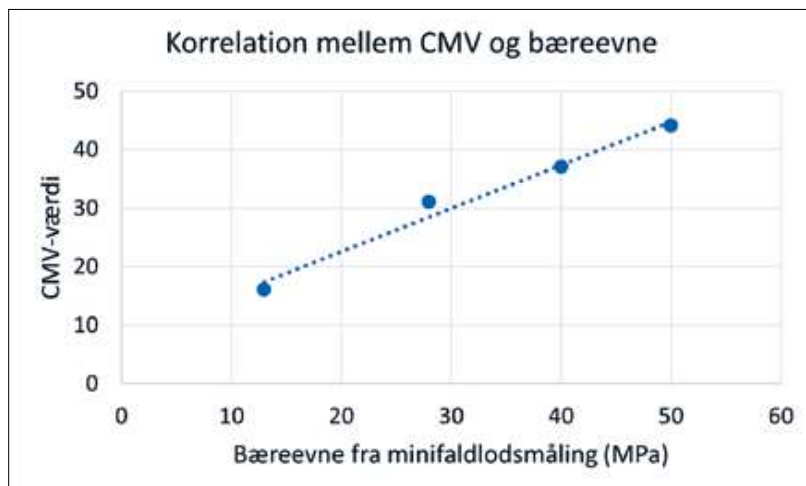
Til komprimeringen er der anvendt en glatvalset 13 tons tromle af typen Hamm H16i. Tromlen blev leveret af MJ Eriksson, som også stod for selve komprimeringsarbejdet. Kørselhastigheden var 2,0 km/t, og der blev anvendt vibration på 27 Hz

under komprimeringen. Tromlen var understyret med GPS og et tromleresponsystem af typen "Sitech Trimble, WorkOS". Dette system registrerer responsmålinger fra de underliggende materialer ned i en dybde af cirka en meter. Målingerne udtrykkes i en værdi kaldet CMV (Compaction Measurement Value), der er et udtryk for det underliggende materiales stivhed. CMV er en relativ værdi, der afhænger af tromlens vægt, hastighed, vibrationsfrekvens og amplitude samt materialetype og komprimeringsgrad.

Forsøgsområdet bestod efter afrømning af en let muldblandet siltholdig sand. Området er et fyldområde, der formodentlig aldrig har været komprimeret. Minifaldlodsmålinger på underbunden før komprimering giver en gennemsnitlig værdi på 18 MPa, som steg til 23 MPa efter fire overkørsler. Under forberedelsen af forsøgsområdet blev et elkabel overgravet, og der er derfor et aflangt område i den sydlige del af forsøgsområdet, hvor underbunden har en meget dårlig bæreevne. Ovenpå denne underbund blev der udlagt fire lag slaggegrus, som hver var 230 millimeter tykke før komprimering.

Slaggegruset anvendt i forsøget opfylder kravene jævnfør "Supplerende bestemmelser for certificering af produktionsstyring for affaldsforbrændingslagge til brug i bærelag i vejbyggeri" udgivet af Dancert, Teknologisk Institut. Det vil blandt andet sige, at slaggegruset opfylder de samme kornkurvekrav som en stabilt grus kvalitet II. Slaggegruset er i laboratoriet bestemt til at have en referencedensitet på 1,70 Mg/m<sup>3</sup> ved et optimalt vandindhold på 17,3 %. Slaggegruset har endvidere en Los Angeles-værdi på 31.

Data fra forsøget er opsummeret i figur 2, og resultater fra komprimering af de fire slaggegruslag er kort beskrevet i det efterfølgende. I det første slaggegruslag var materialet tydeligt overmættet med vand, og CMV-værdierne var lave efter de første to overkørsler. Efter nogle dages optørring blev der udført yderligere to komprimeringskørsler, hvor CMV-værdierne steg kraftigt. Forøgelsen i CMV- >>



Figur 3: Der ses en god korrelation mellem gennemsnitlige CMV-værdier og gennemsnitlig bæreevne fra minifalldmålinger på de færdigkomprimerede lag af slaggegrus.

værdi mellem tredje og fjerde overkørsel var på 8 %. I de tre følgende slaggegruslag stiger den gennemsnitlige CMV-værdi jævnt, mens forøgelsen i CMV-værdi er i alle tilfælde reduceret til <10 % mellem tredje og fjerde overkørsel i hvert lag. Sandefterfyldningsmålinger efter fire overkørsler viser alle gennemsnitlige komprimeringsgrader tæt på 100 % og ingen værdier mindre end 94 %.

## Resultater

Forsøgene viser, at responsmåling fra komprimeringsstromler er et effektivt værktøj til at kontrollere og dokumentere komprimeringen af slaggegrus. Målingerne viser, at komprimeringsgraden målt med sandefterfyldning i alle tilfælde er opfyldt, når ændringen i CMV-værdi fra en overkørsel til den næste er  $\leq 7\%$ . I Norge er kravet til ændring i CMV-værdi sat til  $\leq 10\%$ .

De absolutte gennemsnitlige CMV-værdier stiger, jo højere man kommer op i opbygningen, hvilket giver mening, da måledybden er cirka en meter. Gennemsnitlige værdier af bæreevne for slaggegruslagene målt med minifalld synes at korrelere godt med de gennemsnitlige værdier af CMV (figur 3). Dette passer godt med den eksisterende viden omkring dette.

Et eksempel på plot af CMV-værdier

fra lag fire kan ses i figur 4. Udover plot, som viser detaljerede og summerede CMV-værdier, kan systemet også generere plot over antal komprimeringskørsler samt ændringen i CMV-værdi. Det område, hvor et elkabel blev overgravet og retableret, og hvor komprimeringen og bæreevne var dårlig, ses tydeligt på plot af CMV-værdierne - selv helt op i fjerde slaggelag.

Forsøgene tyder på, at vandindholdet i slaggegrus til indbygning som bundsikring og bærelag ikke bør være så højt som anbefalet i Vejdirektoratets udbudsfor-skrift "Bundsikringslag af affaldsforbrændings-slagge – AAB, marts 2012". Her anbefales 0-4 procentpoint over vandindhold bestemt ved vibrationsforsøg. Det udførte forsøg viser, at vandindholdet i slaggegrus ved indbygning snarere bør ligge 3-5 % under vandindhold bestemt ved vibrationsforsøg.

I Vejdirektoratets udbudsfor-skrift "Bundsikringslag af affaldsforbrændings-slagge – AAB, marts 2012" anbefales det også, at der anvendes en glatvalset 4 tons tromle med seks overkørsler. Ud fra de udførte forsøg kan det anbefales at anvende en glatvalset 13 tons tromle med vibration og fire overkørsler.

Med baggrund i at slaggegrus har samme kornkurve, og i øvrigt mange af de samme geotekniske egenskaber som sta-

## KOMPRIMERINGSKONTROL AF SLAGGEGRUS VED RESPONSMÅLING

Ud fra erfaringerne i forsøget foreslås nedenstående foreløbige procedure for komprimering og komprimeringskontrol af slaggegrus indbygget som bundsikringslag og bærelag i vejkonstruktioner.

1. Slaggegrus indbygges med et vandindhold, som ligger 3-5 % under optimalt vandindhold.
2. Slaggegrus komprimeres med 13 tons tromle med vibration.
3. Anbefalede antal overkørsler (frem og tilbage) er cirka fire.
4. Acceptniveau for komprimering er, når ændring i gennemsnitlig CMV-værdi ved overkørsel er  $\leq 7\%$ . Dette forudsætter, at materialet komprimeres ved korrekt vandindhold.
5. Eventuelle områder ( $>10\text{ m}^2$ ) med væsentlig lavere CMV-værdier end den gennemsnitlige CMV-værdi bør vurderes nærmere.

bilt grus, kunne man godt argumentere for, at der ikke bør stilles strengere komprimeringskrav til slaggegrus end til stabilt grus. Begge komprimeringskrav er i øvrigt opfyldt i alle de sandefterfyldnings-målinger, der er udført i projektet.

## Vejdirektoratets arbejde med anvendelse af responsmåling som komprimeringskontrol

Resultaterne fra dette forsøg bidrager til den generelle erfaringsopsamling, som Vejdirektoratet er i gang med, med henblik på at indføre tromleresponsmålinger som et værktøj til måling og dokumentation af komprimeringsindsats. Der er ligeledes i 2021 i samarbejde med MJ Eriksson udført forsøg i forbindelse med udvidelsen af Fynsmotorvejen. I flere af vores nabolande har man i en del år i varierende grad brugt disse målinger til at kontrollere komprimeringen af ubundne materialer. Der findes forskellige procedurer man kan følge, fx som i ovennævnte forsøg hvor ændringen i respons fra



Figur 4: Plot af målte CMV-værdier efter fire komprimeringer af slaggegruslag fire. Target for CMV-værdien er arbitrært sat til 25 og range er sat til  $\pm 20\%$ . Ovalen (blå) viser området, hvor et elkabel blev gravet over, og hvor komprimeringen af underbunden er ringe. Den enkelte blokstørrelse med CMV-værdier er ca. 0,5 x 0,5 meter.

én overkørsel til den næste følges, og når denne ændring bliver mindre end en vis procentdel, kan materialet ikke optage mere komprimeringsenergi. En anden mulighed er, at man ud fra et mindre prø-

vefelt finder frem til en target-værdi for tromleresponsen, som så kan være retningsgivende for et større areal. Hensigten er, at der åbnes mulighed for, at responsmålinger kan vælges som alterna-

tiv procedure til komprimeringskontrol i Danmark. Dog, i hvert fald i første omgang, stadig suppleret med enkelte stikprøver til traditionel dokumentation af komprimeringsgrad. Disse stikprøver kan reduceres i tæthed, når man til gengæld får et bedre overblik over den totale komprimeringsindsats ud fra de fladedækkende responsmålinger. Det er forventningen, at man kan opnå et bedre og frem for alt mere ensartet komprimeringsresultat, hvor man i øvrigt også vil have langt bedre mulighed for at lokalisere eventuelt svage områder, som sandsynligvis ikke ville blive fundet ved traditionel stikprøvebaseret kontrol. ●

## Rådgivning med speciale i:

- Udbud
- Fagtilsyn
- Bygherrerådgivning
- Projekt- og byggeledelse
- Arbejds miljøkoordinering, AMK-P og AMK-B



Louise Via Borchersen  
Indehaver  
Tlf.: 6170 3191  
[Lb@Luccon.dk](mailto:Lb@Luccon.dk)  
[www.Luccon.dk](http://www.Luccon.dk)