

Slaggegrus og BSM

sparer CO₂ i ny adgangsvej til Lynetteholmen



**AF TORBEN BOES
OVERGAARD**

Boes Consulting
torben@
boes-consulting.dk

Ved etableringen af en ny adgangsvej til Lynetteholmens jordtransporter i Københavns Havn er der sat fokus på anvendelse af genbrugsmaterialer og nye løsninger for at opnå store CO₂-besparelser. På hovedparten af vejen erstatter forbrændingsslagger de traditionelle ubundne lag og på knap 500 m anvendes Bitumenstabiliseret materiale (BSM) fremstillet af slaggegrus i stedet for traditionelle asfalt- eller cementbundne bærelag. Denne artikel beskriver opbygningen og de opnåede resultater.



**AF OLE GRANN
ANDERSSON**

Teknologisk Institut
olan@teknologisk.dk

Lynetteholmens nye transportvej

I forbindelse med den planlagte opfyldning på Lynetteholmen er der etableret en ny jordtransportvej. I et nyt udviklingsprojekt indgår slaggegrus i stor skala på vejstrækningen på Prøvestenen. Formålet med projektet er at sænke CO₂-aftrykket samtidig med, at man sparer på naturlige ressourcer som grus og sand, når der i fremtiden anlægges nye veje. Udviklingsprojektet er et samarbejde mellem By &

Havn, Afatek, Boes Consulting, Teknologisk Institut og Vejdirektoratet.

Det er planlagt, at der skal transporteres 77,8 millioner tons jord til Lynetteholmen via den nye transportvej. Vejen er dimensioneret til 320.000 NÆ10/år med en forventet levetid på 20 år. Den totale trafikmængde er altså 6,4 millioner NÆ10 svarende til trafikklasse T7. Der er en port i starten af vejen samt en brovægt, så alle indgående transportere kan ind-



AF FINN THØGERSEN

Vejdirektoratet
fit@vd.dk



**AF SØREN DYHR-
JENSEN**

Afatek A/S
sdj@afatek.dk



Figur 1: Den nye adgangsvej til Lynetteholmen løber langs Prøvestenens vestlige side (t.h. på foto) og fortsætter efterfølgende ud over en dæmning. Vejen vil gennem en årrække skulle bære tunge jordtransporter.

vejes. Dette betyder, at man til stadighed kan følge med i, hvor stor en trafikbelastning vejen har været udsat for.

Gode erfaringer fra tidligere anvendelse af slaggegrus

I 2012 blev der udført et forsøgsprojekt med anvendelse af forbrændingsslagge og andre restprodukter til erstatning for naturmaterialer i bundsikring og bærelag i en jordtransportvej i Nordhavnen. Vejdirektoratet har udført målinger af bæreevne samt sporkøring og jævnhed på denne forsøgsstrækning årligt lige siden. Målingerne viser at forbrændingsslagge (slaggegrus fra Afatek) har samme eller bedre bæreevne end SG II som bærelagsmateriale samt, at det kan erstatte BL II som bundsikringsgrus (Ref. A). Transportvejen var dimensioneret til trafikklasse T5 med en levetid på 15 år og har nu efter 10 år fået en belastning tæt på trafikklasse T6 uden tegn på sporkøring eller andre skader.

Slaggegrus fra Afatek

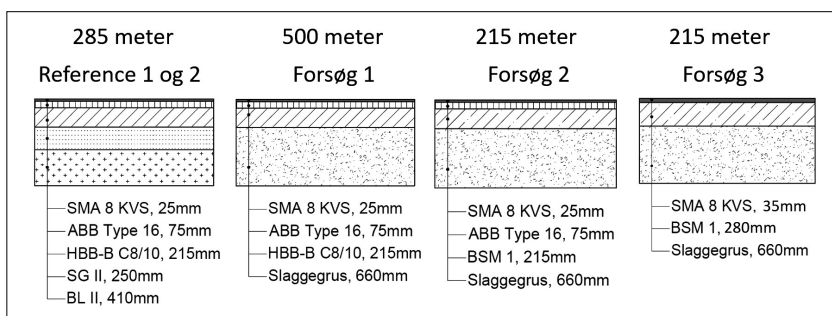
Forbrændingsslagge er et restprodukt fra energiudnyttelse af husholdningsaffald m.v. på forbrændingsanlæg. Hovedparten af forbrændingssluggerne på Sjælland aftages af det fælleskommunale selskab Afatek, som oprenser forbrændingssluggen for metaller og diverse uforbrændte rester. Efter behandlingen hos Afatek har produktet, som nu kaldes slaggegrus, opnået en renhed svarende til kategori 3 jævnfør Restproduktbekendtgørelsen samt en geoteknisk kvalitet svarende til SG II. Slaggegrus 0/31,5 mm er certificeret af Dancert til brug i bærelag i vejbyggeri og deklarerer i overensstemmelse med kravene i DS/EN 13285:2018 samt supplerende bestemmelser.

BSM koldblandet asfaltbærelag reducerer CO₂-belastningen

Som et led i bestræbelserne på at sænke CO₂-aftrykket blev det besluttet, at dele af den nye adgangsvej skulle fremstilles med BSM bærelag. BSM (Bitumen Stabiliseret Materiale) er et i Danmark relativt nyt bærelagsmateriale, som typisk frem-



Figur 2: Formodet verdenspremiere: Udlægning af slagge-baseret BSM på adgangsvejen til Lynetteholmen.



Figur 3: Opbygning af de forskellige vejsektioner på forsøgsstrækningen af transportvejen til Lynetteholmen.

stilles af knust genbrugsasfalt. Der tilsættes 2,0-2,5% ny, varm bitumen i en ellers helt uopvarmet blandeproces. Ved dosering i blanderen injiceres ca. 3% vand med trykluft ind i den nye bitumen, hvorved den skummer op og fylder 10-20 gange sit oprindelige volumen. Dette sikrer en god fordeling og smøreeffekt. Under blandingen tilsættes desuden lidt "frit" vand for at øge bearbejdigheden, samt 0,5-1,0% cement som klæbeaktiv filler. Resultatet bliver et punktvis bundet bærelag, som f.eks. kan erstatte traditionelle, varmblandede asfaltbærelag eller HBB. Med den uopvarmede fremstillingsproces og anvendelse af lokale genbrugsmaterialer opnås en stor CO₂-besparelse med BSM [Ref. B]. I projektet på Lynetteholmens adgangsvej er BSM-konceptet bragt et skridt videre, ved at BSM her fremstilles af Afateks slaggegrus i stedet for knust genbrugsasfalt, hvilket reducerer

CO₂-aftrykket yderligere. Anvendelsen af slaggegrus i BSM er i overensstemmelse med Vejdirektoratets Udbudsforskrift for BSM-KMA [Ref. C].

Omfattende forundersøgelser af slagge-baseret BSM

Forud for projektets opstart havde Teknologisk Institut gennemført indledende laboratorieafprøvning af BSM med slaggegrus. I denne forbindelse blev der ved sporkøringstest (jf. DS/EN 12697-22, small size air, 45°C) på 10 cm tykke BSM-plader påvist en sporkøring på under 1 mm. Dette er fuldt på højde med gode varmblandede asfaltbærelag og indikerer derfor stor stabilitet. Der blev til Lynetteholm-projektet efterfølgende gennemført et omfattende mix-design i overensstemmelse med Vejdirektoratets AAB for BSM-KMA for optimering af BSM-recepten. For at afdække andre mulige tekniske aspekter blev mix- »



Figur 4: Komprimering med tung gummihjulstrømler af det øverste af to lag slagge-BSM.



Figur 5: Næsten betonagtig overflade af den færdigkomprimerede slagge-BSM.

| BSM testdata | Enhed | Dag 1 | Dag 2 | Krav jf. AAB for BSM-KMA |
|--|-------|-------|-------|--------------------------|
| Spaltetrækstyrke, tør (25°C) (prVD 32-3 / DS/EN 12697-12) | kPa | 370 | 458 | ≥ 200 |
| Vandfølsomhed (prVD 32-3 / DS/EN 12697-12) | % | 77,3 | 79,9 | ≥ 70 |
| Stivhedsmodul (20°C) (prVD 32-3 / DS/EN 12697-26C) | MPa | 1.760 | 2.040 | ≥ 1.000 |
| Marshall-stabilitet (25°C) (prVD 32-3 / DS/EN 12697-12) | kN | 35,8 | 36,4 | ≥ 12,0 |

Tabel 1: Laboratoriedata fra prøvning af slagge-BSM udlagt på Lynetteholmens adgangsvej 16-17/8-2022.

design supplerende gennemført i overensstemmelse med Sydafrikanske Sabita's TG2-manual [Ref. D] for BSM, i et samarbejde med specialister fra firmaet Loudon International. For at sikre en optimal bearbejdelighed blev der grundet slaggens porestruktur tilsat et betydeligt højere vandindhold end ved fremstilling af BSM på basis af genbrugsasfalt. De gennemførte mix-designs viste begge optimale egenskaber ved tilsætning af 2,2% skumbitumen 40/60 og 0,8% cement.

Opbygningen af transportvejen – sandsynligvis med verdenspremiere

Dimensioneringen af de alternative opbygninger af jordtransportvejen til Lynetteholmen er udført af det anerkendte sydafrikanske firma Loudon International, som har mange års erfaring med anvendelse og dimensionering med BSM.

Slaggegrus fra Afatek er anvendt på en ca. 1 km lang strækning som erstatning 1:1 for naturmaterialer til bundsikring samt ubundet bærelag. Derudover er der på ca. 430 meter af strækningen ydermere anvendt slaggegrus som tilslag til BSM som erstatning for et hydraulisk bundet bærelag samt på halvdelen af strækningen også som erstatning for asfaltbindelaget. Det betyder, at transportvejen på den sidste del af forsøgsstrækningen indeholder slaggegrus fra bund af vejkasse til lige under det 35 mm tynde slidlag. Selve opbygningen af de forskellige delstrækninger fremgår af Figur 3. Det formodes, at der ved anvendelse af BSM baseret på forbrændingsslagge er tale om en verdenspremiere, da et sådant produkt ikke tidligere er set omtalt i litteraturen.

Munck Havne og Anlæg A/S har været hovedentreprenør på anlægning af trans-

portvejen, og SR-Gruppen har været underentreprenør i forbindelse med fremstilling, udlægning og komprimering af BSM baseret på slaggegrus.

Vejdirektoratet har efter transportvejens færdiggørelse målt bæreevnen på forsøgsstrækningen ved hjælp af faldlods-målinger. Strækningen er desuden instrumenteret med forskellige sensorer, som kan følge belægningsopbygningens reaktioner på de tunge jordtransporter igennem en årrække. Disse data vil derfor blive fulgt efter vejens åbning for trafik.

Fine testdata fra produktion og udlægning af BSM

Der blev gennemført omfattende laboratorieprøvning for belægningen udlagt på transportvejen til Lynetteholmen, såvel efter de danske som sydafrikanske forskrifter. Alle data overholdt med stor margin de givne specifikationer. Tabel 1 viser, at både spaltetrækstyrkeværdien (udtryk for materialets kohætion/sammenhængskraft) og stivhedsmodulet (udtryk for bæreevnen) omtrent var det dobbelte af AAB kravet. Endelig blev den målte trykstyrke efter Marshall-metoden (25°C) ca. 3 gange så høj som minimumsværdien. Supplerende spaltetrækstyrkeforsøg og vandfølsomhedsbestemmelse efter Sabita TG2 viste tilsvarende data.

BSM-belægningen blev produceret af SR-Gruppen på deres mobile Wirtgen KMA-anlæg opstillet ved siden af Afateks lagerbunker på Selinevej ikke langt fra adgangsvejen til Lynetteholmen. Slagge-BSM-materialet blev af SR-Gruppen udlagt med asfaltudlægger og komprimeret med vibrationstrømle og tung gummihjulstrømle. Der blev opnået et fint komprimeringsresultat, som tilfredsstillede de givne krav med en pæn margin. Det færdige resultat blev en belægning med en næsten betonagtig, tæt overflade (se foto) og en særdeles høj minimums-komprimeringsgrad på 100,5%.

Beregning af CO₂-besparelser

Slaggegrus optager store mængder CO₂ på grund af karbonisering i materialet og har derfor et negativ Global Warming Potential (GWP). Anvendelse af slaggegrus som erstatning for naturmaterialer i vejkonstruktioner vil derfor kunne give store CO₂-besparelser.

Der er ikke udført en egentlig LCA på transportvejen og dermed kendes de faktiske CO₂-bidrag ikke for referencestrækninger og de forskellige forsøgsstrækninger. Man kan dog godt lave et sammenlignende overslag på et CO₂-bidrag for de materialer, som er anvendt i de forskellige vejopbygninger. Dette har vi forsøgt at gøre som en sammenligning mellem opbygningen på referencestrækningen og forsøgsstrækning 3, hvor den mest omfattende anvendelse af genbrugsmaterialer har fundet sted.

I vores beregninger af materialernes CO₂-bidrag har vi anvendt eksisterende EPD'er for asfalttyper og ubundne materialer anvendt til bundsikring og bærelag. Der er ikke fundet en EPD for HBB, og CO₂-bidraget for dette materiale er derfor som en konservativ vurdering sat til CO₂-bidraget fra forbruget af de to hovedmaterialer, cement og SG II. Teknologisk Institut har tidligere beregnet en LCA for BSM med tilslag af knust asfalt (Ref. B), og denne kan anvendes til at lave et overslag på en BSM med tilslag af slaggegrus. Processen er den samme, og det anvendte mixdesign for BSM er det samme i LCA-rapporten og i transportvejen til Lynetteholmen. Det betyder, at den eneste større forskel, der er mellem BSM med tilslag af knust asfalt og BSM med tilslag af slaggegrus, er forskellen i EPD for de to tilslag. Overslaget fremgår af Tabel 2, hvor det ses, at BSM med tilslag af slaggegrus har et CO₂-bidrag, som er ca. 65 % mindre end en BSM med tilslag af knust asfalt.

De i beregningsoverslagene anvendte densiteter og GWP-værdier for vejbygningsmaterialerne fremgår af Tabel 3. GWP-værdierne er i alle tilfælde beregnet som vuggeport- (A1-A3) scenarier. Med baggrund i GWP-værdierne i tabellen kan man derfor lave et skønsmæssigt over-

slag over den mulige CO₂-besparelse per m² ved anvendelse af slaggegrus som bundsikring, bærelag og tilslag til BSM i det aktuelle projekt. Resultatet af dette overslag fremgår af Tabel 4 og 5. I dette eksempel ses det, at GWP-bidraget reduceres fra en emission på ca. 40 kg CO₂-eq/ton til en emission på ca. 0 kg CO₂-eq/ton med anvendelse af slaggegrus som erstatning for naturmaterialer i alle vejkassens lag undtaget selve asfaldslaget. ●

| Materiale | BSM knust asfalt kgCO ₂ -eq/ton | | BSM Slaggegrus kgCO ₂ -eq/ton |
|----------------|---|-------------|---|
| Bitumen | 46% | 8,19 | 8,19 |
| Cement | 34% | 6,05 | 6,05 |
| Genbrugsasfalt | 12% | 2,14 | |
| Slaggegrus | | | -9,47 |
| Transport | 5% | 0,89 | 0,89 |
| Diesel | 3% | 0,53 | 0,53 |
| Samlet | 100% | 17,8 | 6,2 |

Tabel 2. Overslagsberegning af CO₂-bidrag fra BSM med tilslag af slaggegrus. Udgangspunkt for BSM med tilslag af knust asfalt fra LCA beregning fra Teknologisk Institut (Ref. B).

| Materiale | Ref. densitet Mg/m ³ | GWP kgCO ₂ -eq/ton | Kilde |
|----------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| SMA 8 KVS PMB | 2,3 | 85,4 | Asfaltindustrien branchegennemsnit |
| ABB 16 | 2,3 | 53 | Asfaltindustrien branchegennemsnit |
| HBB-B | 2,3 | 62,2 | 100 kg FutureCem og 900 kg SG II |
| SG II | 2 | 2,6 | EPD NCC Nyrand Produktgruppe 2 |
| BL II | 1,7 | 2,6 | EPD NCC Nyrand Produktgruppe 3 |
| Slaggegrus | 1,7 | -9,97 | EPD Slaggegrus Afatek |
| BSM slaggegrus | 1,8 | 6,2 | Beregnet overslag |

Tabel 3. Referencedensiteter og GWP-værdier for vejmaterialer anvendt i transportvejen til Lynetteholmen.

| Referencestrækning | | | Forsøgstrækning 3 | | |
|--------------------|------------------|---|-------------------|------------------|---|
| Materiale | Tykkelse (mm) | GWP kgCO ₂ -eq/m ² | Materiale | Tykkelse (mm) | GWP kgCO ₂ -eq/m ² |
| SMA 8 KVS | 25 | 4,9 | SMA 8 KVS | 35 | 6,9 |
| ABB 16 | 75 | 9,1 | BSM slaggegrus | 280 | 3,1 |
| HBB-B C8/10 | 215 | 27,4 | Slaggegrus | 660 | -11,2 |
| SG II | 250 | 1,3 | Samlet | 975 | -1,2 |
| BL II | 410 | 1,8 | | | |
| Samlet | 975 | 44,5 | | | |

Tabel 4 og 5. Sammenlignende skønsmæssige overslag over GWP for referencestrækning samt den forsøgstrækning med største udskiftning af naturmaterialer med slaggegrus på transportvejen til Lynetteholmen. Beregninger udført af Boes Consulting.

Referencer

- Overgaard T., Winkler M., Thøgersen F. & Dyhr-Jensen S.: Slaggegrus 0-31,5 mm som bærelagsmateriale i vejbygning - Trafik og Veje, januar 2020.
- LCA-vurdering af BSM-KMA-Bærelag, Teknologisk Institut, 22. marts 2021.
- Vejdirektoratet: Arbejdsbeskrivelse for BSM-KMA – AAB/SAB-P, Udbud og kontrahering, Dec. 2021.
- Sabita: Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, TG2, 3rd edition, June 2020.