



PRODUKTVALIDERINGSRAPPORT

Anvendelse af Afatek's slaggegrus i BSM bærelag til veje

Opgave udført for AFATEK A/S

30. juni 2021



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**



Produktvalideringsrapport: Anvendelse af Afatek's slaggegrus i BSM bærelag til veje

Opgave udført for AFATEK A/S

Rekvirent:

AFATEK A/S
Selinevej 18
2300 København S

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Gregersensvej 4
2630 Taastrup
Byggeri og Anlæg

i samarbejde med:

Boes Consulting
Jonstrupvej 152
2750 Ballerup

Kvalitetssikring:

Sagsansvarlig: Ole Grann Andersson, tlf. 7220 3209, olan@teknologisk.dk
Ansvarlig for afsnit 2: Torben Boes Overgaard, tlf. 2240 1494, torben@boes-consulting.dk
KS: Signe Hellested Jensen, tlf. 7220 1515, sije@teknologisk.dk

Opgavenr.: 978018

Versionsnr.: 01

30. juni 2021

Resultater af Institutts opgaveløsning beskrevet i denne rapport, herunder fx vurderinger, analyser og udbedringsforslag, må kun anvendes eller gengives i sin helhed, og må alene anvendes i denne sag. Institutts navn eller logo eller medarbejdernes navn må ikke bruges i markedsføringsøjemed, medmindre der foreligger en forudgående, skriftlig tilladelse hertil fra Teknologisk Institut, Direktionssekretariatet.



Indhold

1.	Indledning	4
2.	Beskrivelse af slaggegrus	5
2.1.	Oprindelse af slaggegrus	5
2.2.	Fremstilling af slaggegrus	5
2.3.	Geotekniske egenskaber	6
2.4.	Miljøvaredeklaration for slaggegrus	8
2.5.	Miljø og myndigheder	8
3.	Baggrund og generelt om BSM	9
4.	Det anvendte slaggegrus	12
4.1.	Kornfordeling	12
4.2.	Modificeret Proctor	13
5.	Laboratorieprøvning af BSM fremstillet af slaggegrus	14
5.1.	BSM-proportionering med slaggegrus	14
5.2.	Laboratoriefremstilling af BSM	14
5.3.	Referencedensitet	16
5.4.	Maksimaldensitet og hulrumsberegning	16
5.5.	Vandfølsomhed	16
5.6.	Bæreevne (stivhedsmodul)	17
5.7.	Marshall-stabilitet	18
5.8.	Sporkøringsmodstand	19
5.9.	TSRST kulde-revnemodstand	21
6.	Praktisk anvendelse og belægningsdimensionering	22
7.	Sammenfatning	23



1. Indledning

Efter aftale med AFATEK A/S har Teknologisk Institut, Byggeri og Anlæg i samarbejde med Boes Consulting udarbejdet denne produktvalideringsrapport for dokumentation af AFATEK slaggegrus' egnethed som basistilslagsmateriale til BSM bærelag (BitumenStabiliseret Materiale, koldblandet asfalt) i dansk vejbygning.

Slaggegrusets generelle egenskaber beskrives indledningsvis i afsnit 2 af Torben Boes Overgaard, Boes Consulting. Rapportens efterfølgende afsnit, udarbejdet af Ole Grann Andersson, Teknologisk Institut, giver en nærmere definition af BSM og beskriver efterfølgende resultaterne fra et medio 2021 gennemført, omfattende laboratorieprøvningsprogram. Undersøgelserne viser, at AFATEK's slaggegrus er egnet som basistilslagsmateriale til BSM bærelag.

2. Beskrivelse af slaggegrus

2.1. Oprindelse af slaggegrus

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. Med de fremtidige planer for anvendelse af carbon capture teknologier på forbrændingsanlæggene vil forbrændingen også på sigt kunne opnå at blive CO₂-neutral.

Når energien i affaldet er udnyttet ved forbrænding, er der en rest af ikke-brændbare materialer tilbage. Denne rest, kaldet affaldsforbrændingsslagge, består hovedsageligt af sten, aske, keramiske materialer, glas og metaller. Affaldsforbrændingsslaggen er et restprodukt, som anvendes til fremstilling af slaggegrus.



Fig. 2.1.1: AFATEK er producent af slaggegrus fra affaldsforbrændingsslagger.

2.2. Fremstilling af slaggegrus

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



Efter lagringen sker der en genvinding af metaller fra slaggen i forskellige sorteringsprocesser. 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 5 kornstørrelsesfraktioner ned til 1 mm 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. Genvindingen af metaller fra slaggen ligger tæt på 90 % i de fraktioner som er større end ca. 1 mm. De frasorterede metaller omsmeltes og genanvendes, som erstatning for udvinding af nye metaller. Efter metalsorteringen bliver de forskellige fraktioner af slagge blandet igen og herved opnås et rent mineralprodukt som betegnes slaggegrus 0-31,5 mm.

Den gennemsnitlige sammensætning af slaggegrus i forhold til en klassifikationsprøvning (DS/EN 933-11) fremgår af nedenstående tabel:

Slagge (Rc)	Natursten (Ru)	Porebeton/tegl (Rb)	Asfalt (Ra)	Glas (Rg)	Metal, træ, plastik (X)
91 %	0,8 %	2,5 %	0,0 %	3,7 %	1,0 %

Tabel 2.2.1. Gennemsnitlig sammensætning af slaggegrus.

2.3. Geotekniske egenskaber

Slaggegrus har gode geotekniske egenskaber og kan bruges som erstatning for naturmaterialer i vejbyggeri og andre anlægskonstruktioner.

Kvaliteten af slaggegrus 0-31,5 mm fra Afatek kontrolleres og analyseres systematisk. Produktet er certificeret af Dancert efter "Supplerende bestemmelser for certificering af produktionsstyring for affaldsforbrændingsslagge til brug i bærelag i vejbyggeri".

De tekniske krav til slaggrus 0-31,5 mm (se tabel 2.3.1) svarer i realiteten til de krav som stilles til stabilt grus kvalitet II (SG II) og den normative reference jævnfør DS/EN 13285 (GE, OC 75, UF 9, LF 2) for slaggegrus 0-31,5 mm og SG II er den samme. Den gennemsnitlige kornkurve og kravgrænser fremgår af Fig. 2.3.1.

For at sikre, at materialet har en acceptabel kornstyrke, stilles der desuden krav til knusningsmodstand (Los Angeles koefficient) af slaggegrus, som skal være mindre end 50. I realiteten ligger den gennemsnitlige Los Angeles koefficient for slaggegrus på under 40, hvilket er det krav Vejdirektoratet stiller til f.eks. knust beton til bærelag.

Udover ovennævnte stilles der også krav til indhold af organisk stof, renhed (lette korn) samt indhold og udvaskning af farlige stoffer, hvoraf de sidste to krav kommer fra Restproduktbekendtgørelsen.



Sammenholdt med SG II er den største forskel, at slaggegrus har en lavere referencedensitet samt et væsentligt højere optimalt vandindhold. Det betyder bl.a. at materialet typisk skal vandes godt før komprimering, men også, at materialet ikke er så følsomt over for nedbør under udlægning og komprimering.

Egenskab	Prøvningsmetode	Forventet værdi	Max. værdi/krav
Renhed (indhold af lette korn)	DS/EN 933-11	6 cm ³ /kg	≤15 cm ³ /kg
Indhold af organisk kulstof (TOC)	DS/EN 15936	0,7%	≤3 %
Knusningsmodstand (Los Angeles koefficient)	DS/EN 1097-2	39	<50
Referencedensitet	DS/EN 13286-5	1,71 Mg/m ³	
Korndensitet	DS/EN 1097-5	2,66 Mg/m ³	
Farlige stoffer - faststofindhold	DS 259	Kat. 3	Kat. 3 eller bedre
Farlige stoffer - udvaskning af stoffer	DS/EN 12457-1	Kat. 3	Kat. 3 eller bedre

Tabel 2.3.1: Forventede værdier af egenskaber for slaggegrus 0-31,5 mm samt kravværdier jævnfør certificeringsordningen for slaggegrus til bærelag.

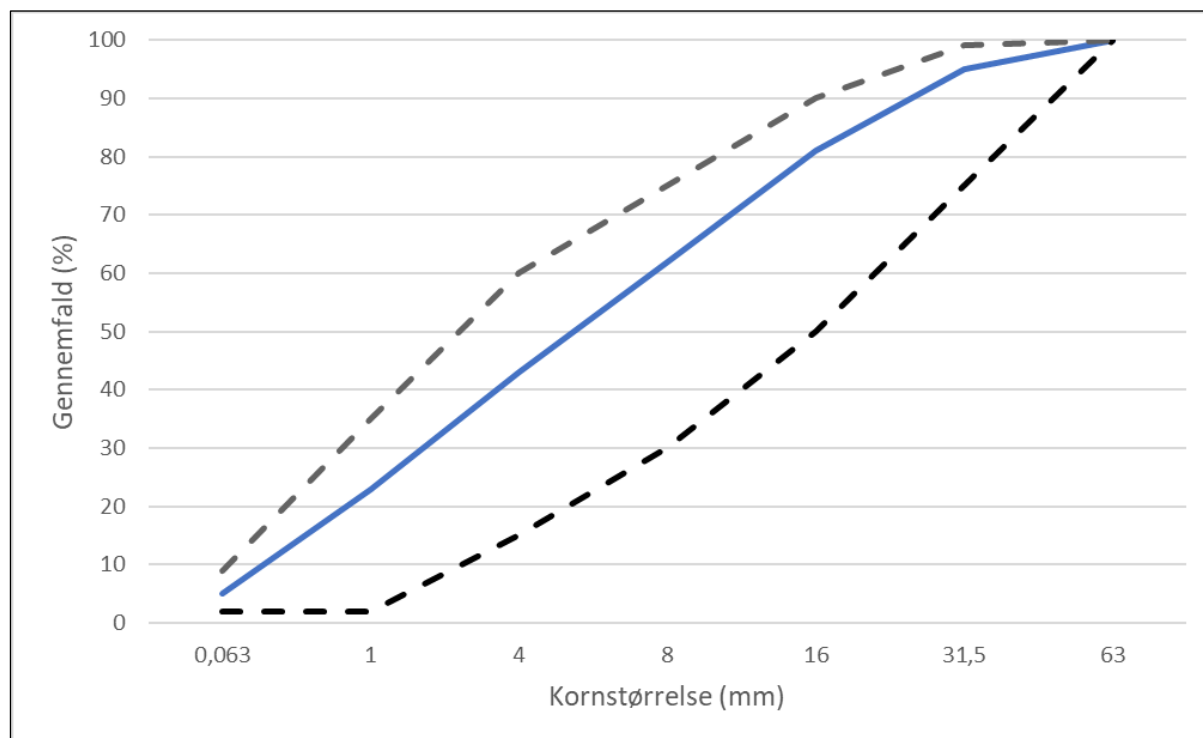


Fig. 2.3.1: Graf visende den gennemsnitlige kornkurve af slaggegrus 0-31,5 mm samt kornkurveafgrænsningerne for materialet jævnfør certificeringsordningen for slaggegrus til bærelag.



2.4. Miljøvaredeklaration for slaggegrus

Der er fremstillet en miljøvaredeklaration¹ (også kaldet EPD) for slaggegrus baseret på en vugge-til-port LCA, hvor alle relevante og afgørende processer er medregnet. Under lagringen optager slaggegrus CO₂ fra luften og resultatet for klimapåvirkning (GWP) bliver derfor til et samlet negativt resultat (svarende til CO₂ optag) på 9,97 kg CO₂ eq/ton slaggegrus (se tabel 2.4.1):

MILJØPÅVIRKNINGER PER TON SLAGGEGRUS		
Parameter	Enhed	A1-A3
GWP	[kg CO ₂ -eq.]	-9,97E+00

Tabel 2.4.1: Klimapåvirkning (GWP) af slaggegrus beregnet fra vugge-til-port (A1-A3).

2.5. Miljø og myndigheder

Genanvendelse af forbrændingsslagge er reguleret af Miljøstyrelsens Bekendtgørelse nr. 1672 af 15/12/2016 om anvendelse af restprodukter, jord og sorteret bygge- og anlægsaffald. Bekendtgørelsen skal sikre, at genanvendelsen sker under hensyntagen til grundvandsbeskyttelse. Slaggegrus 0-31,5 mm er deklareret som et kategori 3 restprodukt og må uden tilladelse anvendes til bygge- og anlægsarbejder som specificeret i restproduktbekendtgørelsen. Der stilles specifikke krav til type af overdækning, tykkelsen af slaggegruset samt afstand til indvindingsanlæg for vandforsyning og afstand til grundvandet. Slaggegruset skal endvidere afgrænses med markeringsnet. Der er anmeldelsespligt, og brugen af slagge på en matrikel vil blive registreret i henhold til jordforureningsloven.

Der er endnu ikke en godkendt dansk testmetode til HP14, hvorfor der ikke kategoriseres eller deklarerer i henhold til EU's økotoksiske kriterier. Afatek har dog, allerede inden de nye regler trådte i kraft, taget initiativ til at udvikle en testmetode og har løbende testet slaggen. Den testmetode, som er under udvikling, har indtil videre vist, at slaggegruset ikke vil blive deklareret som farligt affald i henhold til HP14-kriterierne.

¹ Afatek's EPD for slaggegrus er tilgængelig på <https://www.epddanmark.dk/epd-databasen/>



3. Baggrund og generelt om BSM

Afateks slaggegrus har igennem en årrække fundet anvendelse som erstatning for bundsikring og ubundet bærelag (stabilt grus) i vejopbygninger. Denne rapport beskriver resultaterne af en forsøgsrække, hvor anvendelse af slaggegrus er dokumenteret til brug i koldblandede asfaltbærelag, BSM, til erstatning for varmblandede GAB-bærelag i en vejopbygning.



Fig. 2.1: AFATEK er producent af slaggegrus fra affaldsslagger.

I løbet af de seneste år er der i Danmark sat fokus på et helt nyt, koldasfalt bærelagsmateriale. Der er tale om produktet BSM, som er en forkortelse for Bitumen Stabiliseret Materiale. BSM fremstilles ofte af genbrugsasfalt, men kan også fremstilles af andre granulerede materialer, herunder forskellige grustyper. BSM fremstilles i en kold blandeproces, hvor basis-grusmaterialet stabiliseres med en lille mængde af varm bitumen, som ved hjælp af trykluft og vand omdannes til skumbitumen. Opskumningsprocessen bevirker, at bitumen får et stærkt forøget volumen og dermed bedre kan dispergeres. Det færdige produkt bliver et punktvis sammenbundet bærelagsmateriale med en bæreevne, som ligger et sted imellem ubundne stabilt grus bærelag og varmblandede asfaltbærelag.

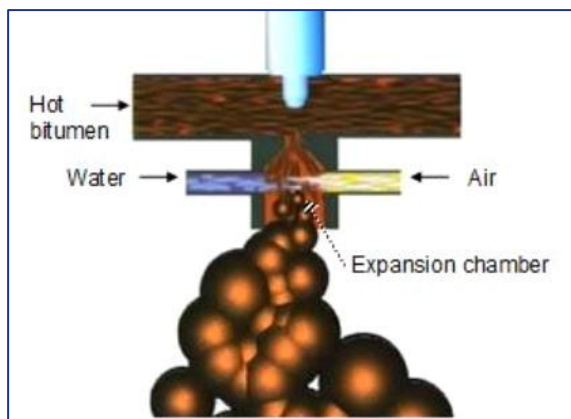


Fig. 3.2: Princip for skumbitumenfremstilling
(Kilde: Sabita TG2 2020)



Fig. 3.3: BSM er punktvis sammenbundet
(Kilde: Sabita TG2 2020)

BSM fremstilles ofte efter KMA-metoden (Kold Mix Anlæg) på et mobilt blandeværk (se fig. 3.4), men kan formodentlig også fremstilles på et traditionelt asfaltværk, hvis dette er udstyret med bitumen-skumningsaggregat. Endelig kan BSM fremstilles in-situ med specielle fræse-/blandemaskiner. Ved in-situ metoden vil en stor del af BSM-materialets "stenmateriale" dog udgøres af den på stedet opfræsede belægning, men det er muligt at tilføre slaggegrus ved at sprede det ud på vejen forud for BSM insitu fremstillingen.



Fig. 3.4: Eksempel på mobilt KMA-anlæg til fremstilling af BSM (Kilde: Wirtgen)

BSM kan benyttes som en "naturlig overgang" imellem grus og asfalt og kan erstatte eller reducere det nødvendige asfaltbærelag på vejen. BSM har ikke samme tæthed og slidstyrke overfor direkte trafikpåvirkning som varmblandet asfalt. Derfor afsluttes BSM-belægninger normalt med et traditionelt asfaltslidlag på toppen. BSM's fremstillingsproces er kold (uden tørring og opvarmning af stenmateriale) og der kræves ingen import af råvarer fra udlandet, bortset fra en lille mængde bitumen. Dette bevirker, at løsningen udviser store besparelser på CO₂-emissionerne fra hele fremstillingsforløbet, sammenlignet med traditionel, varm asfalt.

BSM kan derfor ses som et vigtigt redskab i vejsektorens bestræbelser på at opfylde regeringens 2030-mål for CO₂-reduktion og en større grad af bæredygtighed med høj grad af cirkulær ressourceøkonomi.



Det forventes, at BSM i løbet af den nærmeste fremtid vil vinde generelt indpas i dansk vejbygning, bl.a. som en kærkommen håndsrækning til en lang række "nødlidende" kommuneveje, hvor der igennem en årrække ikke har været mulighed for at afsætte tilstrækkelige økonomiske ressourcer til at kunne opretholde en god belægningstilstand.

BSM er et ret nyt produkt i dansk vejbygning, men har igennem en længere årrække været anvendt i udlandet, bl.a. i USA, Sydamerika og specielt i Sydafrika, hvor SABITA's specialister har udgivet den hidtil mest omfattende tekniske vejledning for BSM². Erfaringer herfra viser, at BSM ikke blot kan fremstilles på basis af genbrugsasfalt, men også kan fremstilles på basis af andre stabile grus- og stenmaterialer. Det lave energiforbrug og genanvendelsen af lokale råvarer gør, at BSM får et markant lavere CO₂-aftryk end for traditionelle asfaltbærelag. Da AFATEK's slaggegrus jo er et vigtigt bidrag til den cirkulære ressourceøkonomi, synes slaggegruset at passe fint ind i det bæredygtige BSM-koncept.

Teknologisk Institut har på ovennævnte baggrund gennemført et omfattende laboratorieprøvningsprogram til afdækning af slaggegrusets egnethed til BSM og de deraf opnåede mekaniske og funktionelle egenskaber, samt en vurdering af det slagge-baserede BSM-materiales holdbarhed.

² Sabita: Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials, TG2, Third Edition, June 2020



4. Det anvendte slaggegrus

Teknologisk Instituts vejlaboratorium har i forsommeren 2021 udtaget en materialeprøve af AFATEK's slaggegrus 0/32 mm. Prøven er udtaget 20/5-2021 på AFATEK's lager på Selinevej i København. Følgende data er fundet:

4.1. Kornfordeling

Ved sigteanalyse af den udtagne slaggegrusprøve er de i tabel 4.1.1 angivne data fundet: Tabellen indeholder endvidere den i afsnit 2 omtalte, typiske kornfordeling for 0/32 slaggegrus. Endelig omfatter tabellen vejledende grænseværdier for stenmateriale egnet til BSM-fremstilling, jf. Sabita's TG2 manual for BSM-fremstilling (visse af værdierne er interpoleret, da Sabita anvender andre sigtestørrelser). Sigteanalyse af slaggegruset er udført jf. DS/EN 933-1 med tørsigtning (uvasket).

 Sigte (mm)	SIGTEANALYSE			
	0/32 AFSL Aktuel	0/32 AFSL Typisk	TG2 BSM Min	TG2 BSM Max
64		100	100	
31,5	100	95	86	
25	97		74	
22,4	96		68	
16	86	81	58	100
11,2	78		49	92
8	69	62	42	82
5,6	58		35	72
4	49	43	30	63
2	35		22	48
1	24	23	15	37
0,5	15		10	29
0,25	9		7	22
0,125	5		5	17
0,063	3,1	5	4	14
Note: AFSL 0/32 = AFATEK slagge 0/32. TG2 = Sabita TG2 manual for BSM, visse data interpoleret				

Tabel. 4.1.1: Data fra sigteanalyse af det anvendte slaggegrus, sammenlignet med anbefalet kornkurveinterval for BSM jf. Sabita TG2, 2020.

Det ses af tabellen, at den udtagne prøve, som er anvendt til de i rapporten efterfølgende beskrevne forsøg, ligger rimeligt nær AFATEK's deklarerede typiske kornfordelingsværdier. Endvidere ses ved sammenligning med kolonnerne med Sabita TG2's grænsekurver, at slaggegruset fint tilfredsstillende disse grænsekurver, om end fillerindholdet (< 0,063 mm) er en anelse lavt. Dette ses dog også typisk for knust asfalt anvendt til BSM og udgør derfor ikke umiddelbart et problem. De opnåede data for den aktuelle prøve er endvidere opstillet grafisk i efterfølgende diagram, jf. figur 4.1.1, sammenholdt med Sabita TG2's grænsekurver.

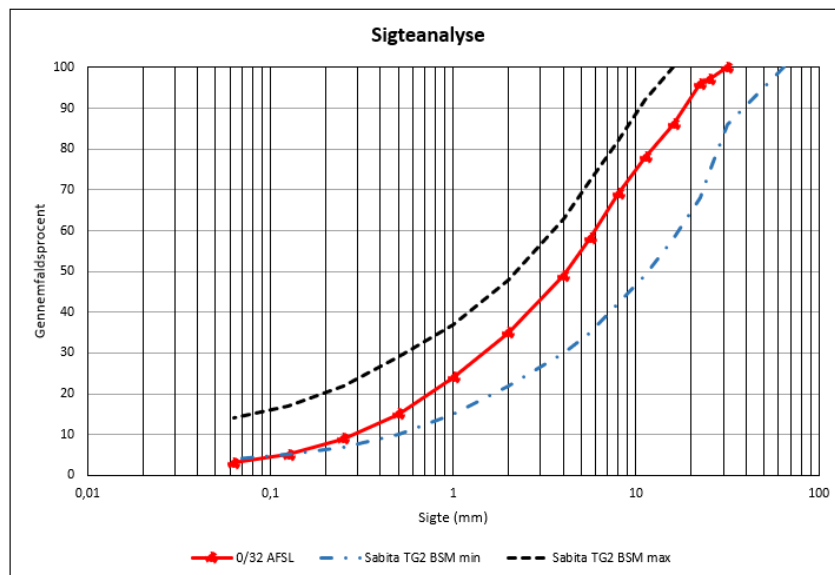


Fig. 4.1.1: Sigtekurve for anvendt slaggegrus fra Afatek, sammenholdt med TG2's grænsekurver for BSM.

4.2. Modificeret Proctor

Det indgår som en grundlæggende forudsætning for at kunne optimere BSM-materialers sammensætning, at det anvendte tilslagsmateriales optimale vandindhold (og relaterede maksimale densitet) er bestemt ved modificeret Proctor-forsøg, jf. DS/EN 13286-2.

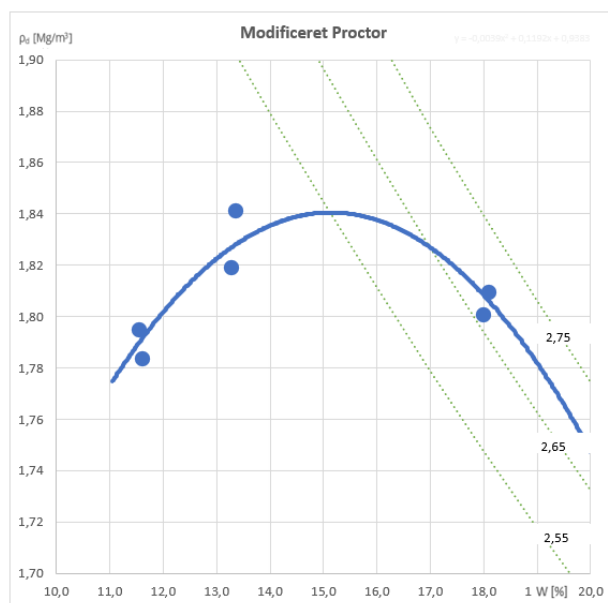


Fig. 4.2.1: Modificeret Proctor-kurve for slaggegruset.

Bemærk, at Proctor-kurven viser, at materialet har et optimalt vandindhold (W_{opt}) på hele 15,4% og derfor vil kræve en høj vandtilsætning under BSM-produktion og indbygning.



5. Laboratorieprøvning af BSM fremstillet af slaggegrus

5.1. BSM-proportionering med slaggegrus

Der er i Teknologisk Instituts laboratorium foretaget en blanding af BSM fremstillet på basis af Afatek's slaggegrus med følgende sammensætning:

- Basismateriale: AFATEK slaggegrus 0/32 mm
- 0,8% cement (som klæbeaktiv filler)
- 2,3% bitumen 70/100, heraf 2,8% skumningsvand tilsat in-line i bitumendoseringen
- 4% procesvand (naturligt vandindhold i prøven 9,4% og tilstræbt totalt = $W_{opt} - 2\% = 13,4\%$).

Den valgte sammensætning er valgt ud fra erfaring samt retningslinjer i Sabita TG2-manualen. Der er ikke udført egentligt mix-design.

Ved fremstilling af BSM anvendes normalt en klæbeaktiv filler for at forbedre vedhæftningen mellem stenmateriale og bitumen og typisk tilsættes 0,8% cement, hvilket derfor er anvendt i denne blanding.

Det anvendte bitumenindhold på 2,3% er antaget ud fra et erfaringsmæssigt skøn og Sabita TG2's retningslinjer for optimalt bindemiddelindhold set i forhold til det givne slaggegrus' kornkurve og materialetype.

Procesvandet tilsættes på samme vis som kendt ved anvendelse af slaggegruset som ubundet bærelag, for at give materialet den nødvendige bearbejdelighed ved indbygning.

5.2. Laboratoriefremstilling af BSM

Ud fra den ovenfor oplistede materialesammensætning er der i Teknologisk Instituts vejlaboratorium gennemført fremstilling af BSM til efterfølgende prøvning. BSM-materialet er fremstillet ved hjælp af det i figur 5.2.1 viste udstyr, som består af en bitumenskumningsenhed, en blandemaskine og et indstampningsapparat. Bitumenskumningsenheden skaber ved in-line indblanding af små vandmængder i varm bitumen den ønskede skumbitumen. Den opskummede bitumen sprøjtes direkte ind i den sammenhængende blandemaskine, hvor BSM-materialet blandes. Efter afsluttet blanding fremstilles Ø150 mm prøvelegemer ved vibrationsindstampning med speciel stamper. De indstampede prøver hærdes 72 timer i varmeskab ved 40 °C (for udtørring af alt vand) før prøvning gennemføres. Samme forløb anvendes ved indtromling af testplader til sporkøringstest.

Der er i forlængelse af blandingerne fremstillet 9 stk. Ø150 x 60 mm prøvelegemer til bestemmelse af referencedensitet, spaltetrækstyrke, vandfølsomhed og stivhedsmodul, samt 2 stk. testplader i 100 mm tykkelse til sporkøring og endnu en plade er anvendt til udsavning af TSRST-bjælker for test af BSM-materialets revnemodstand. Endvidere er der gennemført Marshall-stabilitetstest ved 25°C på prøvelegemerne, som først blev anvendt til bestemmelse af stivhedsmodul.



Fig. 5.2.1: Laboratorieudstyr til fremstilling af BSM (Kilde: Wirtgen). Til venstre vibrationsindstamper, i midten BSM-blendmaskine, som på billedet er sammenkoblet med skumbitumen fremstillingsenheden til højre i billedet.



Fig. 5.2.2 viser, at nyproduceret BSM med slaggegrus har den ønskede sammenhængskraft når man trykker en prøve sammen i handsken.



Fig. 5.2.3: Vibrationsindstampet BSM-prøvelegeme baseret på AFATEK slaggegrus. Pæn, tæt overflade.



5.3. Referencedensitet

Der er som gennemsnit af de 9 vibrationsindstampede prøvelegemer bestemt en gennemsnitlig referencedensitet jf. DS/EN 12697-6 (geometrisk) som det fremgår af nedenstående tabel:

Densitet (vibration 2x60 sek, Ø150 mm legemer)	1,980 Mg/m ³
--	-------------------------

Tabel 5.3.1: Densitet af BSM

5.4. Maksimaldensitet og hulrumsberegning

Maksimaldensitet	2,725 Mg/m ³
Lufthulrum	27,3 %

Tabel 5.4.1: Opnået maksimaldensitet og beregnet hulrumsniveau.

Det ses, at BSM-materialet fremstillet på basis af slaggegrus har et ret højt indre hulrum, hvilket også bekræftes af det høje Proctor-vandindhold. Der er dog visuelt tale om ganske små luftporer, da prøvelegemerne generelt fremtræder som meget tætte i overfladestrukturen.

5.5. Vandfølsomhed

En betingelse for at BSM-materialer kan opnå god holdbarhed er, at materialet udviser tilstrækkelig lav vandfølsomhed (d.v.s. tilstrækkelig høj grad af modstand mod udvaskning). Vandfølsomheden bestemmes som det procentvise forhold mellem vandlagrede og tørt lagrede prøvelegemers spaltetrækstyrke, jf. DS/EN 12697-12, idet der dog anvendes Ø150 mm legemer og testtemperatur 25 °C.

Vandfølsomhedstest	Spaltetrækstyrke, våd, kPa	Spaltetrækstyrke, tør, kPa	Vandfølsomhed (ITSR), %
Aktuel BSM m/slagge	246	269	91
Vejl. grænseværdier	>225	>125	>70

Tabel 5.5.1: Data for vandfølsomhedsbestemmelse af BSM baseret på Afatek slaggegrus. Vejledende grænseværdier fra Sabita TG2 2020 er indsat til sammenligning, sammen med dansk grænseværdi for ITSR.

Som det fremgår af ovenstående tabel 5.5.1 er der for den testede BSM-blanding generelt opnået fine data og en høj modstand mod udvaskning (vandfølsomhed), som indikerer lang forventet levetid.



Fig. 5.5.1: Spaltetrækstyrkebestemmelse for evaluering af vandfølsomhed

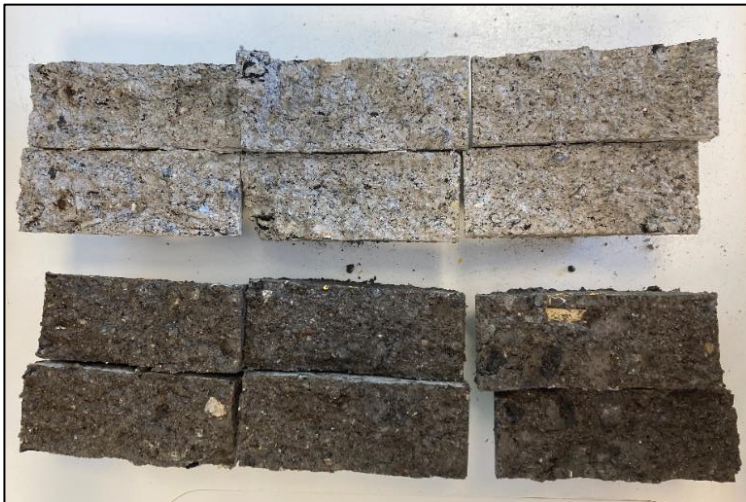


Fig. 5.5.2: Brudflader på de tre tørre legemer (øverst) og våde (nederst). Det ses, at alle legemer har udvist et nydeligt, retlinet spaltetræk-brud.

5.6. Bæreevne (stivhedsmodul)

For at kunne vurdere BSM-materialets bæreevnemæssige egenskaber er der i laboratoriet på Ø150 mm prøvelegemer foretaget bestemmelse af BSM-materialets stivhedsmodul ved 20 °C, jf. DS/EN 12697-26, Annex C (IT-CY) (se også fig. 5.6.1 ovenfor):

Stivhedsmodul ved 20 °C	1670 MPa
-------------------------	----------

Tabel 5.6.1: Stivhedsmodul af BSM på slaggegrus



Fig. 5.6.1: Bestemmelse af stivhedsmodul på BSM. Der afgives små belastninger lodret og den tilhørende horisontale udbøjning måles, hvorefter stivhedsmodulet beregnes.



Erfaringstal for laboratorieblandinger af BSM baseret på knust genbrugsasfalt viser typisk et niveau for stivhedsmodul ved 20°C på ca. 1.000 - 1500 MPa, hvor varmblandet asfalt typisk ligger på 2-4.000 MPa. Den slaggegrus-baserede BSM udviser således med 1670 MPa et pænt højt stivhedsmodul, som indikerer en god bæreevne, som nærmer sig varmblandet asfalts bæreevne.

5.7. Marshall-stabilitet

Efter den ikke-destruktive bestemmelse af stivhedsmodul, er der efterfølgende udført Marshall-test jf. DS/EN 12697-34, idet der dog er anvendt Ø150 mm x 60 mm BSM prøvelegemer og en testtemperatur på 25°C. Følgende Marshall-stabilitetsværdier er fundet:

Marshall-stabilitet	37,6 kN
---------------------	---------

Tabel 5.7.1: Marshall-stabilitet bestemt ved 25°C på vibrationsindstampede Ø150 mm prøvelegemer.



Fig. 5.7.1: Marshall-trykstyrke-prøvning af Ø150 mm BSM prøvelegeme ved 25°C.

Som det fremgår af tabel 5.7.1 er der for den slaggegrus-baserede BSM fundet en særdeles høj Marshall-stabilitet. Dette harmonerer fint med den høje sporkøringsmodstand omtalt i det efterfølgende afsnit.



5.8. Sporkøringsmodstand

En vigtig egenskab for BSM er at sikre, at materialet ikke sporkøres i nævneværdigt omfang under trafikens belastning. Der er derfor i laboratoriet udført sporkøringsstest på hele 10 cm tykke testplader, som er indtromlet af BSM-blandingen fremstillet på basis af 100% AFATEK slaggegrus. Testen er gennemført som dobbeltbestemmelse i henhold til DS/EN 12697-22, small size device, med lufttermostatering og en standard testtemperatur på 45°C.

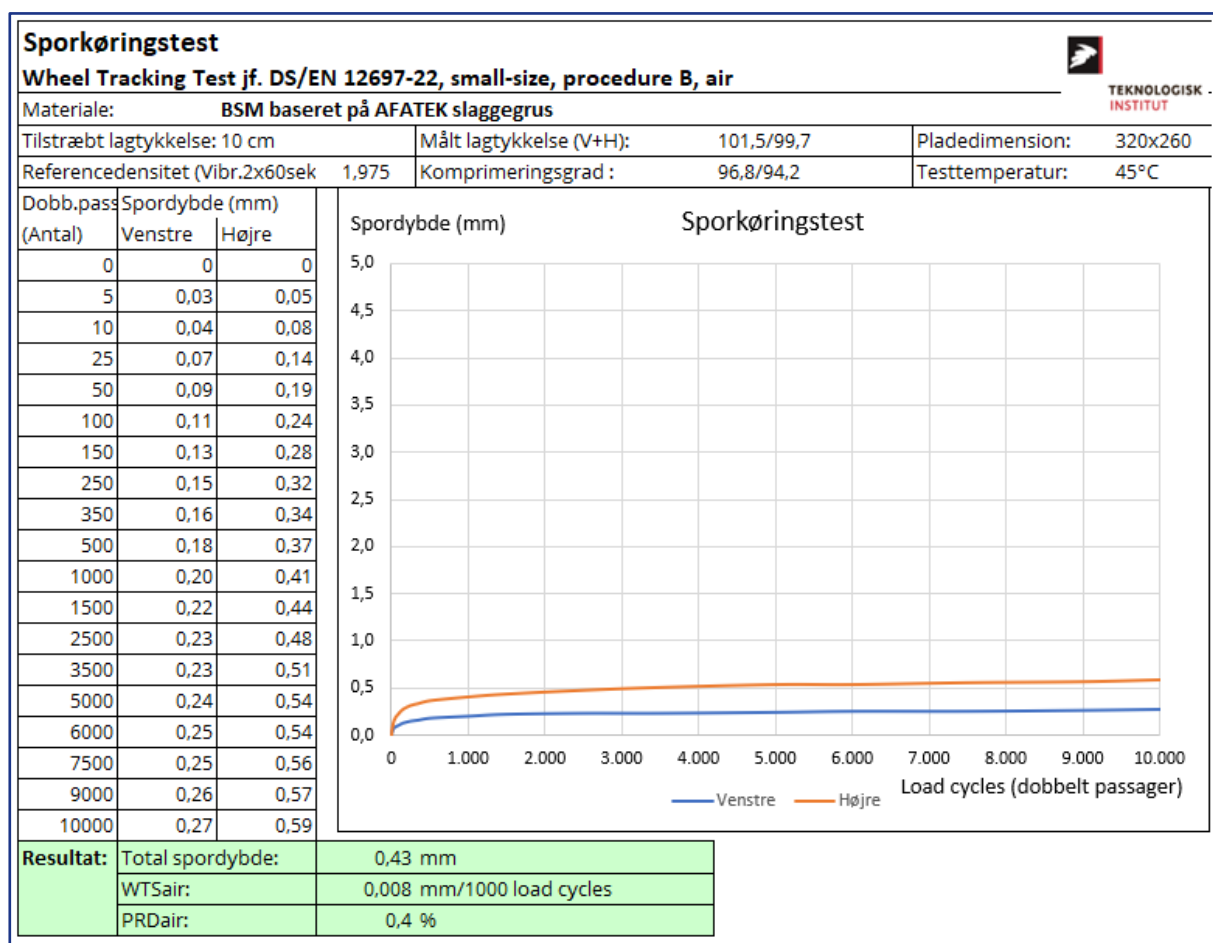


Fig. 5.7.1: Sporkøringsstest af BSM med 100 % AFATEK slaggegrus (dobbeltbestemmelse).

Som det fremgår af ovenstående figur 5.7.1 er der opnået en særdeles lav sporkøring på gennemsnitligt blot 0,43 mm efter 10.000 dobbeltpassager af hjulet ved 45 °C (samme testtemperatur og betingelser som anvendes for prøvning af varmblandet asfalt). Dette endda til trods for testpladernes moderate komprimering, som ikke helt er oppe på 100% komprimeringsgrad. Den lille forskel på de to delbestemmelser skal givetvis primært ses i lyset af den tilsvarende forskel i komprimering (se øverst i tabellen, fig. 5.7.1), men under alle omstændigheder ses meget lav sporkøring.

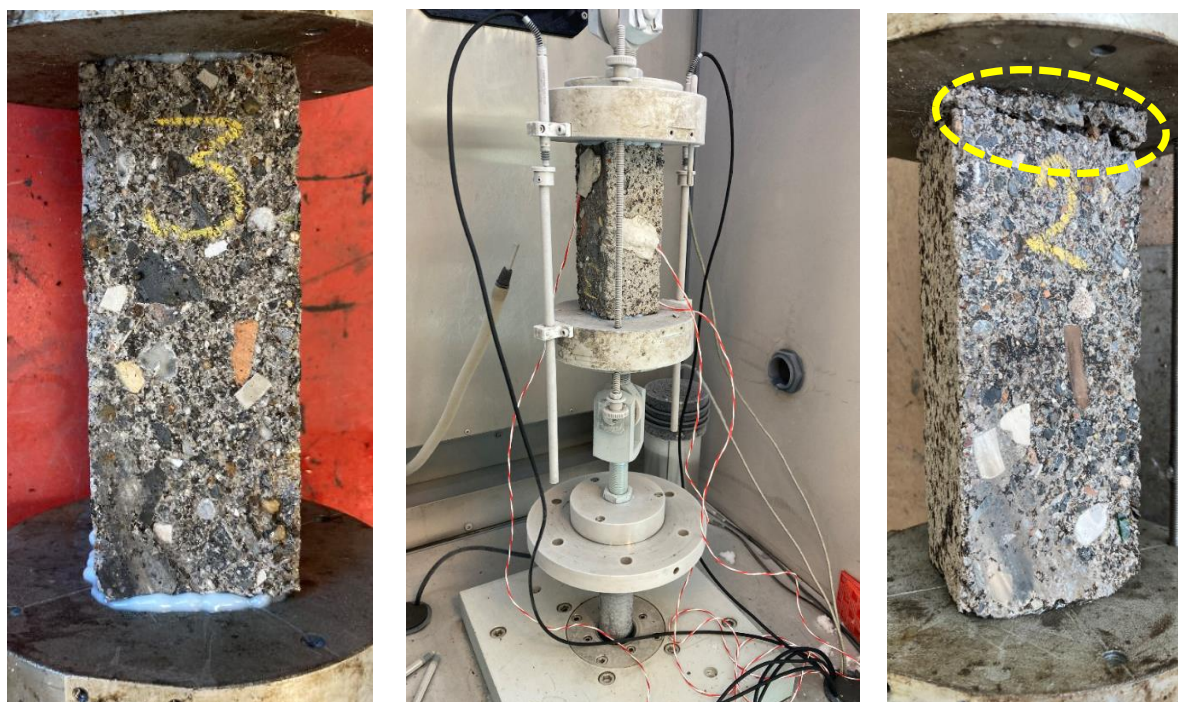
Testen dokumenterer således, at BSM-materialet med AFATEK slaggegrus har en særdeles god modstand mod sporkøring, hvor traditionelle varmblandede GAB-bærelag under samme testbetingelser typisk udviser væsentlig højere grad af sporkøring, måske op imod 5 mm eller mere.



Fig. 5.7.2: Billedet viser de to 10 cm tykke testplade af BSM med slaggegrus efter afsluttet sporkøringstest med 10.000 dobbeltpassager ved 45 °C: Trods 10 cm pladetykkelse kan sporet i midten af pladerne knap anes med det blotte øje.

5.9. TSRST kulde-revnemodstand

I forlængelse af det øvrige prøvningsprogram er der fra indtromlede plader af den slaggegrus-baserede BSM udsavet bjælker/prismer til prøvning af BSM-materialets kulde-revne-modstandsevne. Hertil anvendes TSRST-testen (Thermal Stress Restraint Specimen Test), udført i henhold til DS/EN 12697-46: 2020. Testen er foretaget på udsavede bjælker med dimensionerne 60 x 60 x 160 mm.



Under TSRST testen fastlimes en BSM-bjælke i top og bund (fig. 5.9.1 (t.v.)), så den ikke kan bevæge sig. Dernæst nedkøles med fast rate (fig. 5.9.2, midt), indtil der opstår så store trækspændinger fra nedkøling at bjælken revner (fig. 5.9.3 (t.h.)) og brudtemperatur og -kraft aflæses.

Ved TSRST-testen fikses en BSM-bjælke i begge ender med epoxylim. Herefter nedkøles med en konstant rate af minus 10°C per time. Jo koldere bjælken bliver, desto mere vil materialet forsøge at trække sig sammen. Til sidst revner testbjælken og brudtemperatur og tilhørende indre trækraft aflæses som udtryk for materialets revnemodstandsevne.

En lav brudtemperatur i nærheden af -30°C indikerer rigtig god revnemodstand, hvorimod en brudtemperatur højere end -10°C typisk indikerer dårlig/kritisk revnemodstand.

TSRST revnemodstandstest	Brudtemperatur	Peak tensile stress (maksimal trækspænding)
BSM-bjælker m/ AFATEK slagge	-33,2°C	0,2 MPa

Tabel 5.9.1: Resultat af gennemført TSRST-test (middel af tre delbestemmelser). Den opnåede meget lave brudtemperatur indikerer flot revnemodstand, på niveau med de bedste varmblandede asfaltmaterialer.

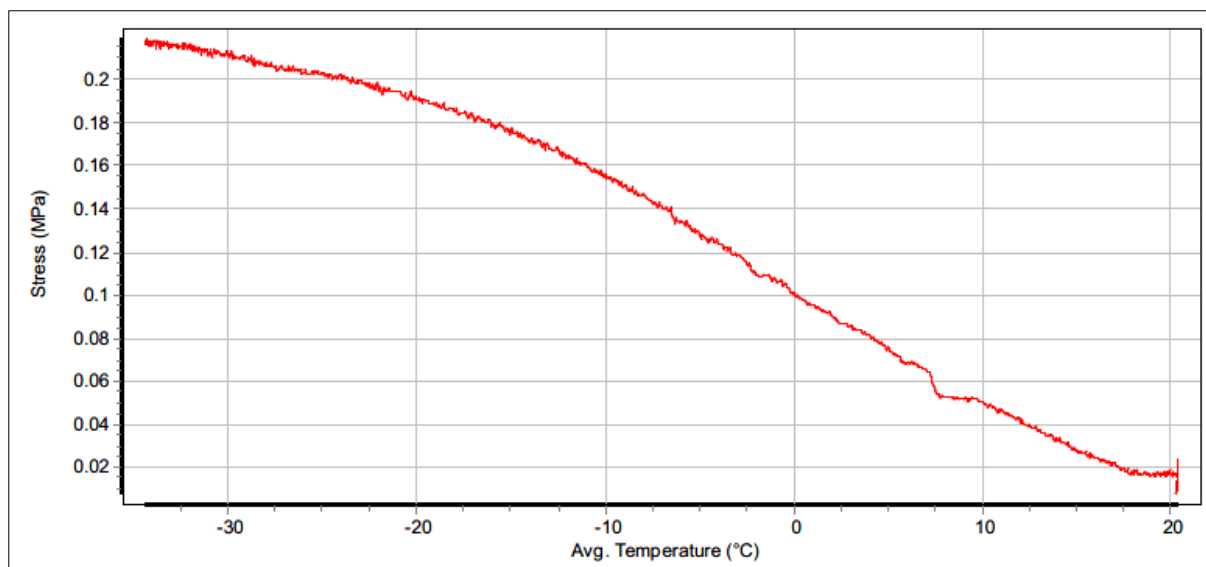


Fig. 5.9.2: Eksempel på nedkølingsforløb og stigning af indre trækspænding, når temperaturen bevæger sig fra højre mod venstre med $-10^{\circ}\text{C}/\text{time}$.

Det ses af resultatet fra TSRST revnemodstandstesten, at det AFATEK slaggegrusbaserede BSM-materiale udviser en meget flot lav brudtemperatur, på niveau med de bedste varmblandede asfaltmaterialer, til trods for at BSM er et punktvis bundet materiale. Dette indikerer således meget lille revnerisiko, hvilket også er oplyst som sydafrikanske erfaringer fra praktisk anvendelse over en årrække.

6. Praktisk anvendelse og belægningsdimensionering

BSM kan principielt både anvendes til hel eller delvis erstatning for asfaltbærelag. Da BSM er en ny materialetype, kan det nuværende danske dimensioneringsværktøj, MMOPP, ikke umiddelbart anvendes til belægningsdimensionering af opbygninger med BSM.

Der pågår i øjeblikket et videre afklaringsarbejde omkring dette emne.

I Sydafrika, hvor BSM har været anvendt igennem en årrække, anvender man andre dimensioneringsprogrammer. De sydafrikanske belægningsspecialister fra firmaet LOUDON har dog til Teknologisk Institut oplyst, at man som en tommelfingerregel skal påregne at øge belægningens lagtykkelse med ca. 25% for at kunne sikre samme bæreevne og holdbarhed, hvis varmblandet asfaltbærelag (GAB) erstattes med BSM. I tilfældet ved fremstilling af BSM baseret på AFATEK slaggegrus er der dog set usædvanligt høje stivhedsmoduler i laboratoriet, hvorfor det muligvis ikke vil være nødvendigt at øge lagtykkelsen med alle 25% hvis GAB-bærelag erstattes af slagge-BSM.

Under alle omstændigheder er det vigtigt, at BSM afdækkes med 4-5 cm varmblandet asfaltslidlag – både af hensyn til at undgå opvridning fra direkte trafikpåvirkning og dels også for at sikre BSM-laget imod direkte vandnedsivning.



7. Sammenfatning

Denne produktvalideringsrapport belyser de opnåede egenskaber ved anvendelse af AFATEK's slaggegrus til fremstilling af Bitumen Stabiliseret Materiale, BSM.

BSM vinder i dag indpas som hel eller delvis erstatning for varmblandede asfaltbærelag, da der kan opnås en markant reduktion af CO₂-belastningen, idet BSM fremstilles i en kold proces og anvender genbrugsmaterialer som tilslag.

AFATEK's slagge passer fint ind i dette koncept og en netop udarbejdet officiel EPD (miljøvaredeklaration) viser endda et negativt CO₂-aftryk for slaggegruset.

Rapporten beskriver resultaterne opnået ved et meget omfattende testprogram, hvor en lang række funktionelle egenskaber er testet og dokumenteret for et slagge-baseret BSM bærelagsmateriale.

Prøvningsprogrammet viser følgende:

- Typisk AFATEK slaggegrus 0/32 er kornfordelmæssigt velegnet til BSM-fremstilling,
- Den testede slagge-BSM opnår fine spaltetrækstyrker, både tørre og våde, og dermed et fint højt niveau for vandfølsomheden, altså modstanden mod udvaskning over tid.
- Den testede slagge-BSM udviser et stivhedsmodul ved 20°C på 1670 MPa, hvilket er højt,
- Den testede slagge-BSM udviser stor stabilitet, både med Marshall-trykstyrke test og ved sporkøringstest ved 45°C, mindst på niveau med nogle af de bedste varmblandede asfalttyper
- Den testede slagge-BSM udviser stor kulde-revnemodstand, mindst på niveau med nogle af de bedste varmblandede asfalttyper.

Forsøgsseriens resultater bekræfter således, at der ses et stort potentiale for at anvende AFATEK's slaggegrus til fremstilling af BSM-bærelag til vejbygning.