Bitumen Stabiliseret Materiale, BSM

Dokumentation udført i 2021 for Vejdirektoratet

21. december 2021, Rev.01

TEKNOLOGISK INSTITUT

TEKNOLOGISK
INSTITUT

Bitumen Stabiliseret Materiale, BSM

Dokumentation udført i 2021 for Vejdirektoratet

Rekvirent:
Vejdirektoratet
Att.: Projektleder Henrik Majlund
Videnskoordinering og vejstandarder
Carsten Niebuhrs Gade 43, 5. sal
1577 København V

Udarbejdet af:
Teknologisk Institut
Gregersensvej 4
2630 Taastrup
Byggeri og Anlæg

Kvalitetssikring:
Sagsansvarlig: Ole Grann Andersson, tlf. 7220 3209, olan@teknologisk.dk
Godkendt af: Maria Felsgård-Hansen, tlf. 7220 1326, mafe@teknologisk.dk

Opgavenr.: 957132
Versionsnr.: Rev.01

21. december 2021

Forsidefoto: Udlægning af BSM på hovedlandevej nord for Viborg. Indsat foto: Borekerner af BSM.

Resultater af Instituttets 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. Instituttets navn eller logo eller medarbejderens navn må ikke bruges i markedsføringsøjemed, medmindre der foreligger en forudgående, skriftlig tilladelse hertil fra Teknologisk Institut, Direktionssekretariatet.

TEKNOLOGISK
INSTITUT

Indhold

1. Indledning 5
2. Baggrund 5
3. Formål 6
4. Laboratorieprøvningsmetoder 6
   4.1. Ny reference-indbygningsmetode 6
   4.2. Nye danske prøvningsmetoder for BSM 6
   4.3. Tilpasning af testbetingelser i CEN-standarder 7
5. Erfaringsopsamling på BSM-teststrækninger fra 2020 8
   5.1. Udfordringer ved opboring af BSM-kerner 8
   5.2. Dataudtræk og konklusioner 9
   5.2.1. Densiteter: 9
   5.2.2. Stivhedsmodul 9
   5.2.3. Spaltetrækstyrke og vandfølsomhed 10
   5.2.4. Marshall-stabilitet på borekerner 10
6. Afdækning af nedbrydningskriterier for BSM 11
   6.1. BSM's stivhedsmodul 11
   6.2. Undersøgelse af BSM's brudmekanismer 12
   6.3. Udmattelsesegenskaber for BSM 14
   6.4. Konklusion vedrørende nedbrydningskriterier 15
7. Fiberforstærkning af BSM 16
8. Vedhæftning og anvendelse af aktiv filler 18
   8.1. Kalkfiller 19
   8.2. Bio-flyveaske 19
   8.3. Flydende amin-klæbeforbedrere, type A 19
   8.4. Flydende amin-klæbeforbedrer type B 19
   8.5. "Grøn" cement 20
   8.6. Dataoversigt 20
   8.7. Konklusion, klæbeaktiv filler/additiv 21
9. Vurdering af forskellige tilslagsmaterialers egnethed til fremstilling af BSM 21
   9.1. BSM fremstillet af knust beton 21
   9.2. BSM fremstillet af stabilt grus, SG II 22
   9.3. BSM baseret på forbrændingsslagge (FS) 24
10. Erfaringer fra fuldskalastrækninger udført i 2021 28

10.1. Sønderborup – Assentoft: BSM insitu 28
10.2. Hovedlandevej 416, Viborg N (VD-entreprise 53/2021): BSM-KMA 31
11. Afdækning af BSM's temperaturafhængighed i ydersæsonen 33
12. Udenlandske erfaringer 36
13. Udbudsforskrift for BSM-KMA 37
14. Oplæg til videre arbejde 37

1. Indledning

Efter aftale med Henrik Majlund, Vejdirektoratet, har Teknologisk Institut, Byggeri og Anlæg i perioden januar – december 2021 gennemført den her afrapporterede opgave, omfattende diverse laboratorieydelser for udredning og afdækning af BSM's egnethed som bærelag under danske forhold. Opgaven er således en direkte forlængelse og opfølgning på tilsvarende opgaver gennemført i 2019 og 2020 for den indledningsvise efterprøvning, dokumentation og udvikling af et praktisk anvendeligt dansk BSM-koncept. Målet med arbejdet har været at kunne danne erfaringsgrundlag for udgivelsen af den nye udbudsforskrift (UF) for BSM. I første omgang for BSM-KMA, produceret på et mobilt blandeanlæg, men det er intentionen, at der i forlængelse heraf også udarbejdes en UF for BSM insitu.

2. Baggrund

BSM er en forkortelse for Bitumen Stabiliseret Materiale. BSM fremstilles i en uopvarmet proces på baggrund af granuleret genbrugsasfalt som blandes med ca. 1,9-2,5% skumbitumen. Skumbitumen fremstilles typisk af varm vejbitumen 40/60 eller 70/100, som in-line tilsættes trykluft og ca. 2,5-3,5% rent vand. Herved opskummes bitumen og antager (kortvarigt) en volumenforøgelse på 10-20 gange sit oprindelige volumen. Der tilsættes desuden typisk 0,5-1,0% cement som klæbeaktiv filler, samt lidt ekstra vand ("procesvand") for at give "smøreeffekt" under udlægning og komprimering af bærelagsmaterialet. Slutproduktet er et punktvis bundet bærelagsmateriale med en styrke og bæreevne, som ligger imellem ubundne bærelag og traditionelle varmasfalt bærelag ("GAB"). BSM afsluttes normalt altid med et slidlag af varmblandet asfalt. Dette gøres dels for at holde BSM-belægningen tæt, da den typisk har et højere hulrum end varmblandet asfalt, og dels fordi BSM-lagets overflade, grundet de punktvise bindinger, ikke tåler direkte påvirkning af tunge vridende/bremsende kræfter fra lastbiler på samme vis som varmblandet asfalt. På meget let trafikerede veje kan asfaltslidlaget evt. erstattes af en simplere overfladebehandling. På stærkt trafikerede veje, som motorveje, anvendes til gengæld typisk såvel slidlag som bindelag af varmblandet asfalt ovenpå BSM-laget.

BSM-konceptet er i det væsentlige udviklet af maskinproducenten Wirtgen i samarbejde med sydafrikanske SABITA og er anvendt igennem en årrække i bl.a. Sydafrika, USA, Sydamerika og Canada, men er hidtil kun anvendt i begrænset omfang i Europa. Da konceptet er baseret på lokal fremstilling af BSM i en uopvarmet proces og baseret på lokal genbrugsasfalt, opnås en betydelig CO_2-besparelse ved anvendelse af BSM, sammenlignet med en belægningsopbygning med traditionel GAB til samme trafikbelastning. Vejdirektoratet har derfor i 2019 iværksat en indledende afdækning af potentialet for introduktion af BSM i Danmark, med henblik på at udgive den i december 2021 netop udgivne udbudsforskrift (UF) for BSM – i første omgang for BSM-KMA, hvor BSM fremstilles på et mobilt blandeanlæg (Kold Mix Anlæg). Efterfølgende tilstræbes udarbejdet en tilsvarende UF for insitu fremstillet BSM, hvor BSM-produktionen foregår i en speciel fræse-/blandemaskine direkte på vejen.

De tidligere opnåede data og konklusioner fra diverse prøvestrækninger fremgår af en række rapporter udarbejdet af Teknologisk Institut for Vejdirektoratet. Rapporterne kan findes på såvel Vejdirektoratets Vejregel-hjemmeside, som på Teknologisk Instituts hjemmeside. Der henvises specielt til årsrapporten fra 2020, som giver et sammendrag af de opnåede erfaringer ved udgangen af 2020, og som danner grundlag for det videre arbejde i 2021.

3. Formål

Ifølge aftale med Vejdirektoratet har dette års tests og undersøgelser haft det primære formål at konsolidere den hidtil opbyggede erfaring med BSM, for derved at skabe det bredest mulige fundament for udgivelsen af en ny udbudsforskrift for BSM-KMA.

Dette års prøvnings- og dokumentationsprogram omfatter således både opfølgende tests på BSM-strækninger udført i 2020 og gennem laboratorieblandinger afdækning af en række forskellige forhold, som har betydning for forståelsen af BSM's funktionsegenskaber og for den praktiske anvendelse, herunder f.eks. sæsonafgrænsninger i vinterperioden.

4. Laboratorieprøvningsmetoder

BSM-konceptet er som udgangspunkt baseret på erfaringerne beskrevet i tyske Wirtgens manualer og anbefalinger fra sydafrikanske SABITA's BSM-manual, Technical Guideline TG2, i seneste version fra 2020. Disse er dog ikke officielle prøvningsstandarder. BSM er ikke omfattet af de europæiske CEN-standarder, men det danske arbejde med prøvning af BSM har så vidt muligt taget udgangspunkt i anvendelse af officielle CEN-metoder, hvor visse testbetingelser dog er modificeret. Der er desuden, på baggrund af de tidligere indhøstede danske erfaringer, udarbejdet tre nye prøvningsmetoder for BSM, udgivet som "prVD" prøvningsmetoder i regi af Vejdirektoratet (omtales nærmere i et efterfølgende delafsnit).

4.1. Ny reference-indbygningsmetode

Det er i årsrapporten fra BSM-arbejdet i 2020 beskrevet, at der er foreslået en ny, dansk procedure for fremstilling af prøvelegemer til bestemmelse af referencedensitet samt efterfølgende mekanisk prøvning. Den valgte metode er dog yderligere simplificeret primo 2021, hvor det er valgt, at alle cylinderformede prøvelegemer til bestemmelse af BSM's referencedensitet og efterfølgende mekanisk afprøvning foretages ved indbygning af prøvelegemer med nominel diameter 150 mm og en nominel højde på 60 mm. Materialet indbygges á to lag, som hver komprimeres med 60 sekunders vibration med Wirtgen's WLV-1 eller tilsvarende. Den nye, simplificerede fremgangsmåde giver referencedensiteter omtrent på niveau med den i 2020 midlertidigt foreslåede metode, men med større nøjagtighed og ensartethed. Den nye metode sikrer således, at der anvendes en realistisk referenceværdi i forhold til den i marken opnåede komprimering, hvor det tilstræbes, at der skal kunne opnås en middel-komprimeringsgrad på mindst 95% og ingen enkeltværdier under 92%.

4.2. Nye danske prøvningsmetoder for BSM

Der er i forbindelse med det i denne rapport beskrevne laboratoriearbejde udarbejdet tre nye danske prøvningsforskrifter, som er udgivet i december 2021:

- prVD 32-01-2021: Bestemmelse af ekspansionsrate, halveringstid og optimalt vandindhold for skumbitumen til BSM.
- prVD 32-02-2021: Laboratorieblanding af BSM
- prVD 32-03-2021: Fremstilling af BSM-prøvelegemer

Den første prøvningsforskrift beskriver processen i laboratoriet, når bitumen opskummes og hvordan optimal skumning foretages, herunder fastlæggelse af skumningsvandmængde og -temperatur, så krav til skummets ekspansionsrate og halveringstid overholdes. Den næste metode beskriver hvordan skumbitumen-baseret BSM blandes korrekt i laboratoriet og den sidste beskriver hvordan prøvelegemer fremstilles til efterfølgende bestemmelse af referencedensitet, spaltetrækstyrke, vandfølsomhed, stivhedsmodul og Marshall-stabilitet. Desuden beskrives hvordan prøveemner (plader) til sporkøringstest fremstilles.

4.3. Tilpasning af testbetingelser i CEN-standarder

Som tidligere nævnt, er der til BSM-prøvning så vidt muligt anvendt kendte, fælleseuropæiske standarder, udarbejdet til prøvning af varmblandet asfalt, jf. DS/EN 12697-serien. Visse testparametre er dog ændret eller justeret, herunder bl.a.:

- Sporkøringstest udføres som udgangspunkt i overensstemmelse med DS/EN 12697-22, Der anvendes small-size device, testtemperatur 45°C og nominel 100 mm lagtykkelse af prøvelegemer (plader). Prøvelegemer indbygges jf. DS/EN 12697-33, roller sector, men ved stuetemperatur, uden opvarmning af materiale eller udstyr, til en tilstræbt komprimeringsgrad på 98-101%.

- Spaltetrækstyrke og bestemmelse af vandfølsomhedstallet foretages jf. DS/EN 12697-12, men på Ø150 mm vibrationsindstampede legemer og ved 25°C.

- BSM-materialets stivhedsmodul bestemmes jf. DS/EN 12697-26, Annex C, IT-CY, på Ø150 x 60 mm vibrationsindstampede legemer ved en tilstræbt testtemperatur på 20°C.

- Den gammelkendte Marshall stabilitetstest for varmblandet asfalt er genintroduceret som en relativt simpel metode til vurdering af BSM-materialers stabilitet (trykstyrke). Testen foretages dog for BSM på nom. Ø150 mm vibrationsindstampede legemer og ved en testtemperatur på 25°C. Der er indledningsvis gennemført forsøg på laboratorieblandinger af BSM på hhv. 0/16 og 0/32 mm knust genbrugsasfalt, hvor der er fundet stabiliteter i størrelsesorden 16,5 hhv. 18,5 kN. (Enkeltstående forsøg viser, at dette sv.t. til Marshall-stabiliteter i størrelsesorden 2,5-3 kN ved 60°C).

Alle disse ændringer er indarbejdet i den nye udbudsforskrift for BSM-KMA, som blev udgivet af Vejdirektoratet 2.december 2021.

Fig. 4.1: Som noget nyt er der i 2021 introduceret bestemmelse af Marshall-stabilitet på BSM-prøvelegemer.
Testen udføres dog på Ø150 mm vibrationsindstampede prøvelegemer og ved en testtemperatur på 25 °C.

5. Erfaringsopsamling på BSM-teststrækninger fra 2020

Som det fremgår af 2020-årsrapporten, blev der i 2020 udført 7 strækninger rundt omkring i landet, som blev fulgt tæt op med laboratorieprøvning. BSM-strækningerne repræsenterer materialer fremstillet efter såvel KMA- som insitu-princippet. Fire af disse strækninger er medio 2020 hver blevet fulgt op ved udtagning af en serie på 9 stk Ø150 mm borekerner, som efterfølgende blev analyseret i Teknologisk Instituts asfaltlaboratorium. Der er udtaget borekerner fra følgende strækninger:

- Rennebjergvej Nord, Slagelse Kommune: BSM-KMA
- Rennebjergvej Syd, Slagelse Kommune: BSM-insitu
- Buesøvej, Lejre Kommune: BSM-KMA
- Hjallerup-motorvejen: BSM-insitu.

5.1. Udfordringer ved opboring af BSM-kerner

Ved modtagelse af de eksternt opborede kerner kunne det generelt konstateres, at kernernes bund fremstod afrundet/afslidt og mindre intakt end den øvre del af BSM-laget. Dette fænomen er imidlertid ikke forårsaget af dårlig BSM, men skyldes uheldige omstændigheder i forbindelse med opboringen. Som udgangspunkt er håndtering af Ø150 mm borekerner noget tungere og mere besværlig end for traditionelle Ø100 mm borekerner, som kendt fra varmblandet asfalt. Det viste sig under opboringen, at de fleste BSM-kerner kilede sig fast i borerøret og dermed var vanskelige at få ud. Der blev derfor anvendt en teknik, hvor kernerne blev udsat for bor-omdrejninger i skiftende retning indtil kernen slap i røret og faldt ned i borehullet, hvorfra den afslutningsvis blev opsamlet med løftebøjler. Denne håndtering formodes at have forårsaget beskadigelserne på kernerne. Betragtes borehullernes sider, ses dog fine lodrette skær, som viser, at den let nedbrudte bund af borekernerne ikke skyldes manglende sammenhæng i belægningen. SABITA's TG2-manual anbefaler da også en relativt forsigtig fremgangsmåde, hvor der ligeledes kun anvendes minimale mængder kølevand under borearbejdet. Da alle laboratorietests imidlertid foretages på Ø150 x 60 mm cylindriske prøvelegemer, blev prøvningsprogrammet foretaget på de øverste 60 mm af BSM-laget, som var ubeskadiget fra opboringen.

Fig. 5.1: Eksempel på opborede BSM-kerner (på billedet placeret med bunden opad)

Resultaterne fra de enkelte tests i denne forsøgsrække er nærmere beskrevet i de følgende delafsnit.

5.2. Dataudtræk og konklusioner

5.2.1. Densiteter:

Der blev for hovedparten af strækningerne fundet densiteter, som svarer rimeligt godt overens med de i 2020 opnåede densiteter ved komprimeringskontrol med Troxler isotopsonde. Dog ligger borekerne-densiteterne for Hjallerup-strækningen højere end fundet med Troxler i 2020. Dette kan muligvis skyldes, at der er indbygget to asfaltlag (ABB og SMA) ovenpå BSM-laget, som derved er blevet komprimeret yderligere efter den direkte komprimeringskontrol ovenpå BSM-laget.

Densitet og højder: Tilsavede BSM-borekerner for laboratorietests (øverste 60 mm) - Kernediameter ca. 143 mm.													2020 data	
Serie A	**Kerne**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**		**GNSN**	Troxler	Ref.vibr.
SR-Gruppen, KMA	**Lagtykk (mm)**		61,6		62,2		61,5	61,7	61,6	61,7		**61,7**		
Rennebjergvej	**Densitet (Mg/m³)**		1,954		2,034		2,011	1,942	2,029	1,942		**1,985**	1,969	1,868
Serie B	**Kerne**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**		**GNSN**		
Arkil, Insitu	**Lagtykk (mm)**	60,4	60,8	60,7	60,4	60,7	60,6	60,7	60,7	60,7		**60,6**		
Rennebjergvej	**Densitet (Mg/m³)**	2,055	2,069	2,073	1,978	2,239	2,04	2,039	2,06	2,037		**2,066**	2,036	1,920
Serie C	**Kerne**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**		**GNSN**		
SR-Gruppen, KMA	**Lagtykk (mm)**	61,5	61,2	61,7	60,5	61,4	61,5	61	61,4	61,7		**61,3**		
Buesøvej	**Densitet (Mg/m³)**	2,045	2,027	2,035	1,947	2,007	1,964	2,085	1,994	1,982		**2,010**	1,929	1,915
Serie D	**Kerne**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**GNSN**		
Arkil, Insitu	**Lagtykk (mm)**	60,4	60,7	60,3	60,7	61,1	60,5	60,8	60,6	60,2	60,3	**60,6**	1,858 (h)	
Hjallerup	**Densitet (Mg/m³)**	1,949	1,993	2,058	2,068	1,954	2,107	1,975	2,028	2,061	1,949	**2,014**	1,865 (v)	1,847

Fig. 5.2: Opnåede densiteter på borekerner fra de 4 strækninger, sammenlignet med densiteter opnået i 2020.

Densitetsbestemmelserne målt på borekerner fra 2021 stemmer i det væsentlige overens med Troxler isotopsonde-data fra samme strækninger i 2020 og bekræfter således, at hurtige Troxler-målinger (korrigeret for vandindholdet) ved indbygningskontrol med rimelighed kan erstatte borekerner, som skal afvente en vis styrkeopbygning før opboring af kerner kan foretages.

5.2.2. Stivhedsmodul

Der er på samtlige BSM-borekerner bestemt stivhedsmodul jf. DS/EN 12697-26, IT-CY. Stivheden er bestemt ved såvel 20 som 10°C for samtidigt at kunne vurdere BSM-materialernes temperaturfølsomhed. De opnåede data fremgår af efterfølgende tabel:

Strækning	ITSM 10°C kerner	ITSM 20°C kerner	ITSM 20°C 2020 lab.
A. Rennebjergvej KMA	2.937	1.771	1.144
B. Rennebjergvej Insitu	3.060	1.677	799
C. Buesøvej, KMA	2.427	1.411	773
D. Hjallerup-motorvej	2.435	1.685	619 og 1.460
Middel	2.715	1.636	959

Fig. 5.3: Opnåede stivhedsmoduler bestemt på borekerner ved 10 hhv. 20°C, sammenlignet med de i 2020 vibrationsindstampede reference-prøvelegemer af samme produktion.

Følgende ses af tabellen:

- Der synes for materialestivheden ikke umiddelbart at være nogen signifikant forskel på om BSM-materialet er fremstillet efter KMA- eller insitu-princippet.

- Stivhedsmodulet bestemt på borekerner ved 20°C er væsentligt højere end det i 2020 bestemte på laboratorieindstampede prøver (med den daværende indstampningsprocedure). Dette viser dels, at komprimeringen i marken givetvis har været bedre end hvad der blev opnået med den tidligere anvendte laboratorie-indstampningsmetode, men kan også indikere, at BSM-belægningerne har opnået en øget styrke gennem et års hærdning og trafikering på vejen. De initialt bestemte værdier kan således betragtes som konservative.

- Stivhedsmodulet bestemt på borekerner ved 10°C er i gennemsnit ca. 1,7 gange højere end stivheden bestemt på samme prøvelegemer ved 20°C. Dette viser tydeligt, at BSM ikke opfører sig som et ubundet materiale, men viser en temperaturafhængig stivhed, som det også er kendt fra traditionel, varmblandet asfalt. Ved dimensionering af BSM-belægninger bør man derfor skele til nedbrydningsmekanismer og temperaturkorrektioner som de, der er gældende for varmblandet asfalt.

5.2.3. Spaltetrækstyrke og vandfølsomhed

BSM-materialets spaltetrækstyrke er et udtryk for materialets indre kohæsionskraft. Jo højere spaltetrækstyrke, desto bedre sammenhængskraft. Spaltetrækstyrken bestemmes ved en testtemperatur på 20°C og bestemmes både på et sæt tørt lagrede prøvelegemer og på et sæt, som efter vandmætning med vacuum lagres under vand i 24 timer før prøvning. Vandfølsomhedstallet beregnes efterfølgende som forholdstallet mellem det våde og det tørre prøvesæt. Som udgangspunkt anbefales at vandfølsomhedstallet skal være mindst 70%, hvilket praktisk taget er opnået for samtlige serier. Ingen af materialerne udviser således risiko for "stripping" eller udvaskning af bitumen pga klæbesvigt.

Strækning	Spaltetræk-styrke, tør (kPa)	Spaltetræk-styrke, våd (kPa)	Vandfølsom-hed, ITSR (%)	Vandfølsomhed lab. 2020 (%)
A. Rennebjergvej KMA	298	210	71	75
B. Rennebjergvej insitu	348	325	93	91
C. Buesøvej KMA	375	259	69	93
D. Hjallerup-motorvejen	278	225	81	76
Krav jf. AAB for BSM-KMA	> 200	(Sabita TG2 recommend: >125)	≥ 70	≥ 70

Fig. 5.4: Sammenhørende værdier for spaltetrækstyrke og vandfølsomhed for de 4 borekerneserier, sammenholdt med 2020-værdier opnået for laboratoriefremstillede prøvelegemer, samt kravværdier jf. den nye UF for BSM-KMA udgivet december 2021.

5.2.4. Marshall-stabilitet på borekerner

Der er i prøvningsserien foretaget bestemmelse af Marshall-stabiliteten ved trykprøvning af alle borekernerne. Testen er foretaget på de samme borekerner som forud blev anvendt til stivhedsmodulbestemmelse, da stivhedstesten ikke er en destruktiv test. Marshall-testen er på BSM udført ved en testtemperatur på 25°C, hvor Marshall-stabilitet på varmblandet asfalt foretages ved 60°C. Data for stabilitet af BSM kan derfor ikke umiddelbart sammenlignes direkte med stabilitetsværdier for varmblandet asfalt. For de fire borekerneserier er følgende data opnået:

Strækning	Marshall-stabilitet, 25°C (kN)
A. Rennebjergvej KMA	12,5 (8,3 – 16,7)
B. Rennebjergvej Insitu	14,6
C. Buesøvej, KMA	13,2
D. Hjallerup-motorvej	15,9

Fig. 5.5: Gennemsnitlige Marshall-stabiliteter for hver af de 4 borekerneserier.

Det ses af fig. 5.5, at der for alle fire strækninger i gennemsnit opnås omtrent samme Marshall-stabilitetsdata. Dette indikerer, ligesom for stivhed, spaltetrækstyrke og vandfølsomhed, at det indbyggede BSM-materiale ikke er signifikant afhængig af den anvendte metode til fremstilling af BSM (KMA eller insitu).

6. Afdækning af nedbrydningskriterier for BSM

En af udfordringerne ved introduktion af BSM til danske veje er hvordan man belægningsdimensioneringsmæssigt skal betragte BSM. Skal BSM regnes som grus eller asfalt? Det danske dimensioneringsprogram MMOPP har ikke mulighed for at introducere en ekstra belægningstype, hvorfor Vejregelarbejdsgruppe Dimensionering fortsat arbejder på at finde en ideel løsning.

Figur 6.1: En af BSM's udfordringer er at finde ud af de eksakte mekanismer (trykspændinger og tøjninger) samt nedbrydningskriterier for denne nye belægningstype.

6.1. BSM's stivhedsmodul

Som det fremgik af resultaterne fra borekernerne omtalt i afsnit 5, ses en klar temperaturafhængighed for BSM, hvor stivhedsmodulet målt ved 10 °C er ca. 1,7 gange højere end samme målt ved 20 °C. Omtrent samme forhold er fundet for test af BSM-belægningen på Vådagervej i 2019 og supplerende forsøg på laboratorieblandinger. Laboratorieforsøgene afrapporteret i 2020 viste endvidere ved TSRST kulde-revne-modstands-forsøg, at BSM har en tydelig brudtemperatur, som ligger omtrent på niveau med varmblandet asfalt med samme bitumenhårdhed. De opnåede trækspændinger ved kuldebruddet er grundet den punktvise sammenbinding af BSM-materialet lidt svagere end for varmblandet asfalt, men ikke desto mindre er BSM lige så "udholdende" som varmblandet asfalt før kuldereevner opstår.

Alt dette peger således i retning af, at BSM dimensioneringsmæssigt *ikke* skal betragtes som et ekstra stærkt grusbærelag, men snarere som en form for asfaltlag med et stivhedsmodul, som ligger midt imellem grus og asfalt.

6.2. Undersøgelse af BSM's brudmekanismer

På føromtalte baggrund er der som demonstrationsforsøg gennemført trepunkts bøjeforsøg på udsavede bjælker af BSM (80 x 80 x230 mm), udsavet fra indtromlede sporkøringsplader.

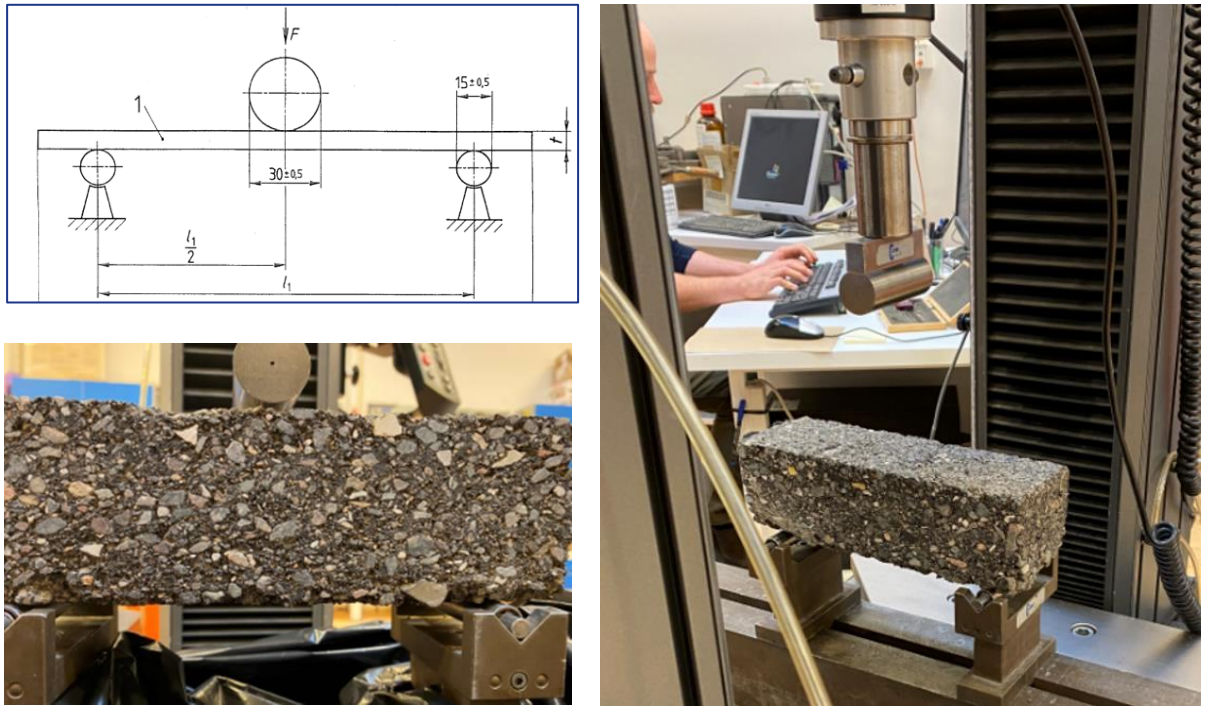


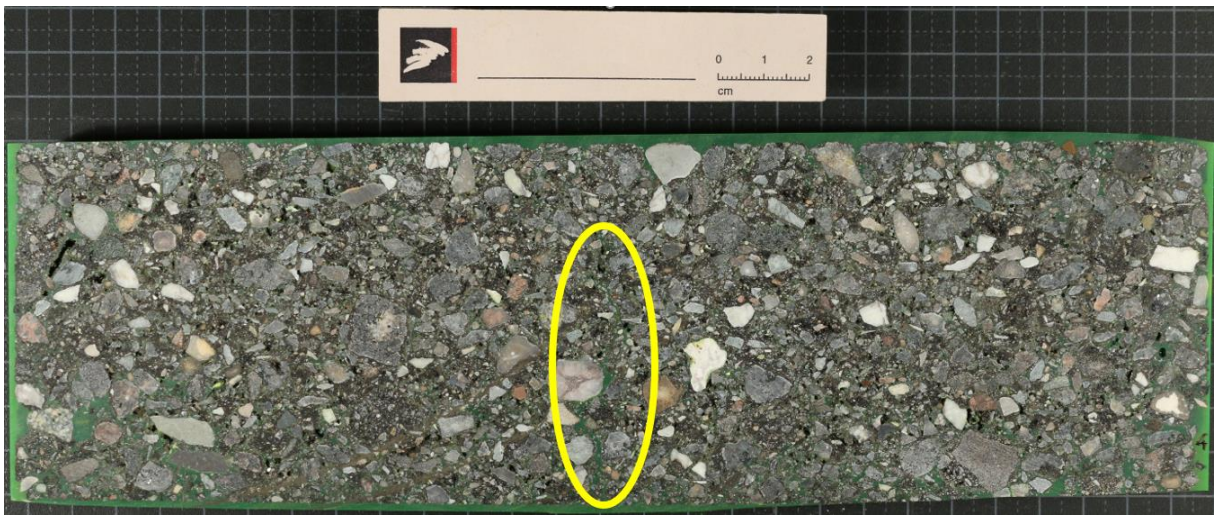
Fig. 6.2: Trepunkts bjælke-bøjeforsøg på BSM med udstyr jf. DS/EN 310. Øverst t.v. opstillingsprincippet, Til højre BSM-bjælke klar til test. Nederst t.v. BSM-bjælke under test.

De omtalte trepunkts bøjeforsøg er udført med varieret (lav) deformationshastighed for at kunne iagttage brudmekanismen.

Der ses, som for asfalt, en trækbruds-revnedannelse, som starter i bunden, midt under belastningsbjælken. Jo større deformation, desto længere vokser brudrevnen opad. Det er under forsøgene lykkedes at afbryde belastningen sv.t. ca. 80 % brudgennemgang.

Herefter er BSM-bjælken afmonteret og coatet med fluorescerende epoxy. Der er herefter fremstillet et planslib (fig. 6.3), som er fotograferet både i normalt lys og i ultraviolet lys, hvor den epoxyudfyldte revne træder tydeligt frem og dermed synliggør revnen tydeligt (fig. 6.4).

Som det fremgår af de efterfølgende fotos (fig. 6.3, 6.4 og 6.5), ses en helt traditionel brudmekanisme med "bottom-up" revnedannelse, når den påførte last medfører udbøjning, som giver træktøjninger i bunden af bjælken, som medfører overskridelse af materialets maksimale trækspænding.



Figur 6.3: BSM-bjælke fra trepunkts bøjeforsøg, afbrudt efter ca. 80% revnegennemgang nedefra.

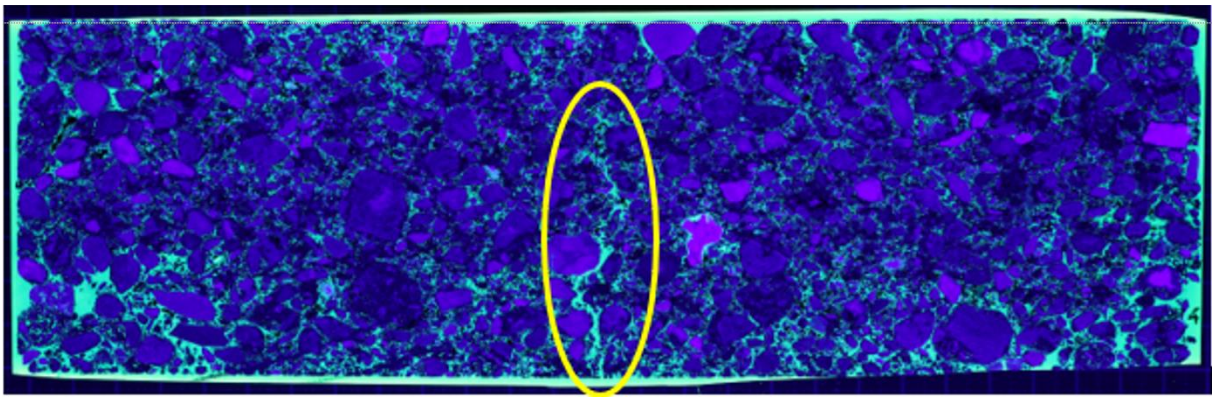


Fig. 6.4: Samme BSM-bjælke som vist i fig. 6.3, men her under ultraviolet belysning, hvor revnen tydeligt træder frem.

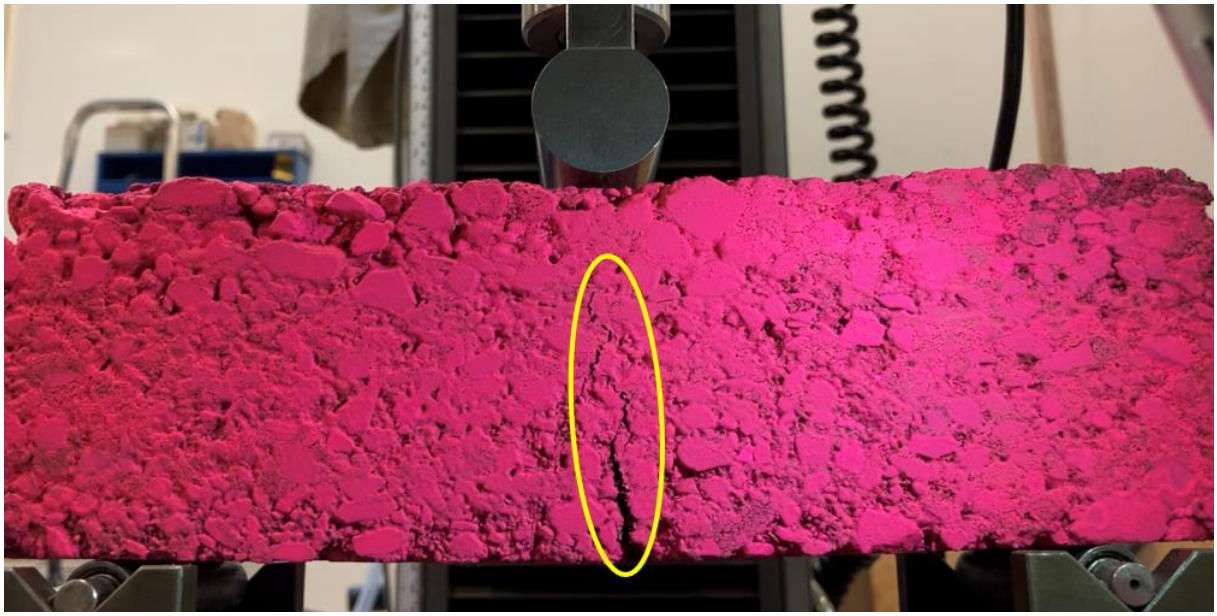


Fig. 6.5: BSM-bjælke rødmalet for synliggørelse af revne. Deformationshastighed 1 mm/min. Afbrudt efter ca. 80 % revnegennemslag. Samme revnemekanisme som set i fig. 6.3 og 6.4 på anden bjælke.

6.3. Udmattelsesegenskaber for BSM

Der er i forsøgsrækken gennemført udmattelsestest på en laboratorieblandet BSM, fremstillet på "traditionel" vis af 0/16 mm knust genbrugsasfalt fra Gammelrand, tilsat 2,1% skumbitumen 70/100 og 0,8% cement. Ved forsøget er der fremstillet Marshall-indstampede legemer med Ø100 mm nominel diameter. Udmattelsesforsøget er gennemført på helt sædvanlig vis som for test af varmblandet asfalt jf. DS/EN 12697-24 Annex E (IT-CY) ved 10 °C og er udført med Pavetest DTS30 servo-hydraulisk udstyr for optimal præcision. (Prøvningen er desuden for BSM standard-blandingen supplerende gennemført ved 20 °C til orientering for temperaturvariation).

Der er desuden gennemført supplerende udmattelsestest af BSM som er fiberarmeret med indblanding af kunststof-fibre for opnåelse af længere levetid (se mere om fibermodificering af BSM i et senere afsnit). Resultatet af udmattelsesforsøgene fremgår grafisk af figur 6.6. I figuren indgår tillige en udmattelseskurve opnået for et traditionelt varmblandet AB 8t asfaltslidlag fremstillet af klippegranit og med samme bitumentype 70/100. Det skal i denne sammenhæng bemærkes, at en sådan asfaltslidlagstype typisk har væsentligt bedre udmattelsesegenskaber end et grovere og mere bitumenfattigt GAB-asfaltbærelag. Ved sammenligning af BSM og AB 8t er er således tale om en meget "konservativ" eller "hård" vurdering af BSM's udmattelsesegenskaber.

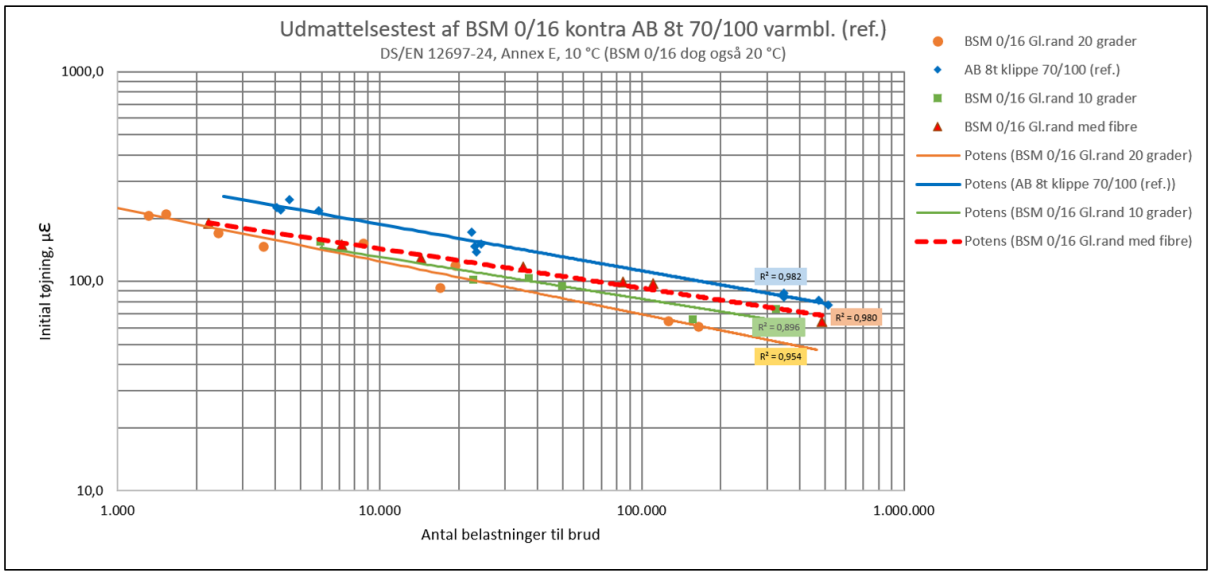


Fig. 6.6: Resultat af gennemført udmattelsestest på "standard" BSM ved 10°C (grøn linje), sammenholdt med samme BSM ved 20°C (orange linje). Supplerende fremgår udmattelsestest på samme BSM ved 10°C men med fibermodificering (stiplet rød linje) og endelig er der til sammenligning indsat referencedata fra et varmblandet asfaltslidlag type AB 8t klippegranit bitumen 70/100 (blå linje).

Udmattelsestesten gennemføres ved i en spaltetræk-belastningsopstilling af påføre gentagne belastninger indtil træk-brud opstår. Ved belastningen registreres den initiale tøjning (deformation). Jo flere belastninger ved en given tøjning som belægningen kan tåle inden den bryder, desto bedre udmattelsesegenskaber (levetid) udviser belægningen. Diagrammet i figur 6.6 afbilder på y-aksen størrelsen på den initiale deformation ved en given belastning og x-aksen viser hvor mange belastninger belægningen kan tåle før træthedsbrud opstår.

Det ses af figur 6.6, at der for "standard" BSM ved 10°C (grønne linje) opnås et udmattelsesforløb, som linje-hældningsmæssigt nogenlunde svarer til den varmblandede referenceasfalt (blå linje). Den grønne linje for BSM ligger dog lavere i diagrammet og indikerer derfor (som forventet) lavere udmattelsesmodstand. Med andre ord tåler en BSM ikke helt så stor udbøjning som en varmblandet slidlagsasfalt. Dette harmonerer fint med, at man altid øger lagtykkelsen af bærelaget, hvis der anvendes BSM i stedet for varmblandet asfalt, idet det dog samtidigt skal erindres, at varmblandede GAB-bærelag typisk har ringere udmattelsesegenskaber end AB 8t slidlaget, som er betydeligt mere bindemiddelrigt.

Den orange linje repræsenterer BSM-blandingen testet ved 20°C og viser blot, som forventet på grund af den lavere stivhed, en i diagrammet lidt lavere liggende linje, næsten parallel med den grønne linje for samme materiale målt ved 10 °C. Igen ses således en temperaturafhængighed af BSM's funktionsegenskaber.

Den stiplede røde linje, som repræsenterer den fibermodificerede BSM, har et lidt "fladere" forløb og nærmer sig mere og mere linjen for AB 8t jo lavere den initiale tøjning er. Dette indikerer, at hvis man dimensionerer en belægningsopbygning med BSM med tilstrækkelig lagtykkelse og styrke af underlaget til at undgå store udbøjninger i laget, vil der kunne opnås samme udmattelsesmodstand som for et varmblandet asfaltslidlag. Da springet i E-modul fra stabilt grus til BSM desuden er lavere end springet mellem stabilt grus og GAB-asfaltbærelag, opnås med BSM som "koblingslag" en mere "balanceret" opbygning, som igen (teoretisk) mindsker risikoen for overbelastninger i toplaget og dermed dannelse af udmattelsesrevner.

Sammenlignes linjerne for BSM med og uden fibermodificering ses endvidere af grafen, at der ved f.eks. en initial tøjningsværdi på 100 microstrain (Y-aksen) opnås udmattelsesbrud ved ca. 35.000 belastninger (x-aksen) for "standard" BSM-materialet (grønne linje), mens der for den fibermodificerede BSM (stiplede røde linje) ved samme initialtøjning på 100 microstrain først opstår udmattelsesbrud ved 70.000 belastninger – svarende til en fordobling af den tålte trafikbelastning. Fibermodificering af BSM kan således give en forlænget levetid (Se mere om afprøvning af fibermodificering i et senere afsnit af denne rapport).

Den overordnede konklusion af de gennemførte udmattelsesforsøg er, at BSM følger en udmattelsesmekanisme, som svarer til varmblandet asfalt, om end BSM tåler færre udbøjninger af en given størrelse før der opstår træthedsbrud. Dette kompenseres der for ved belægningsdimensioneringen, dels ved at øge lagtykkelsen af BSM-laget i forhold til et varmblandet asfaltslidlag og tillige opnås med BSM en styrkemæssigt mere "jævnt balanceret" opbygning, som igen mindsker risikoen for store udbøjninger i laget.

6.4. Konklusion vedrørende nedbrydningskriterier

De gennemførte laboratorieforsøg og observationer viser, at BSM ikke opfører sig som et ubundet materiale, men derimod udviser funktionsegenskaber, som langt hen ad vejen ligner egenskaber og mekanismer, som gælder for varmblandet asfalt. Dette synes at være vigtigt input til Vejregelarbejdsgruppe Dimensionerings videre arbejde med optimering af belægningsdimensionering med BSM. Det foreslås endvidere, at arbejdsgruppen udarbejder et katalog for standard-befæstelser for de lavere trafikerede vejkategorier, således at der opnås en simpel tilgang, når BSM anvendes på mindre trafikerede veje.

7. Fiberforstærkning af BSM

Ser man på BSM-materialers funktionsegenskaber, kan det konstateres, at BSM har god trykstyrke og sporkøringsmodstand og i det væsentlige opfører sig som et varmblandet asfaltmateriale. Dog har BSM grundet den kun punktvise sammenbinding af partiklerne med skumbitumen ikke samme trækstyrke som varmblandet asfalt. Det er kendt fra f.eks varmblandet asfalt og beton, at materialerne kan opnå forbedret trækstyrke/bæreevne ved at indblande fibre i massen. Der er derfor i nærværende projekt også foretaget en indledende undersøgelse for initial afdækning af potentialet for optimering af BSM's egenskaber ved tilsætning af fibre.

Det skal for god ordens skyld bemærkes, at der ikke er tale om tilsætning af cellulosefibre, som er baseret på "papiruld" og som benyttes i varmblandet asfalt af SMA-typen for at undgå bitumenafrinding. Når vi taler om fibertilsætning i BSM er der tale om anvendelse af fiberforstærkning, som kan øge materialets trækstyrke væsentligt.

Ved det gennemførte forsøg er der valgt en kunststof-fibertype baseret på 19 mm lange fibre. Denne fibertype er ifølge producenten velegnet til forstærkning af varmblandet asfalt og er derfor valgt som udgangspunkt for forsøget. Producenten oplyser, at der typisk skal tilsættes 0,5-0,8 kg fibre per tons asfalt og at vådblandetiden mindst skal være 45 sekunder.

Fig. 7.1: Nærbillede af de gule, 19 mm lange kunststoffibre anvendt i BSM-blandingen.

På baggrund af ovennævnte oplysninger er der fremstillet en laboratorieblanding, baseret på en "standard" BSM-recept:

- Basis genbrugsasfalt: 0/16 mm knust genbrugsasfalt fra Gammelrand,
- 2,2% skumbitumen 70/100 (2,8% skumningsvand),
- 1% cement som klæbeaktiv filler
- Vandindhold sv.t. Mod.Proctor minus 2%
- 20 gram kunststoffibre til en 30 kg BSM-blanding (sv.t. 0,67 kg fibre per tons BSM)

Som det fremgår af afsnit 6, figur 6.6 er der udført udmattelsestest på BSM med fibre. Udmattelsestesten viser en forbedring af udmattelsesegenskaberne, idet fibermodificeringen omtrentligt fordobler det tilladelige antal belastninger før brud ved en given initial tøjning (nedbøjning).

Fig. 7.2: Indtromlet plade af fibermodificeret BSM i 10 cm tykkelse. Bemærk de gule fibre, som pga farven er tydeligt synlige, men homogent fordelt i BSM-materialet.

Der er efterfølgende udført 3-punkts bøjeforsøg, svarende til de i afsnit 6 omtalte, på bjælker af fibermodificeret BSM (se figur 7.3 nedenfor).

Fig. 7.3: Revnedannelse opstået i BSM med fiberforstærkning.

Der ses for den fiberiblandede BSM et revneforløb på samme vis som for de ikke-fibertilsatte varianter. Dog tillades en betydeligt større deformation (tøjning) før brud. (Resultaterne er ikke nærmere beskrevet i denne rapport, da de ikke følger en officiel asfaltprøvningsforskrift, men forsøget er gennemført for visualisering af brudmekanismen og bekræfter en øget revnemodstand). Dette falder fint sammen med de i afsnit 6 omtalte iagttagelser og resultater fra de gennemførte udmattelsesforsøg.

Der er på 60 x Ø150 mm (nominel diameter) vibrationsindstampede prøvelegemer bestemt et stivhedsmodul ved 20 °C på 1775 MPa og ved 10 °C på 2806 MPa. Til sammenligning er der for en referenceblanding af samme BSM uden fibre fundet et stivhedsmodul ved 20 °C på 1460 MPa (se tabellen, fig. 7.4).

Resultaterne bekræfter, at fibermodificeringen øger stivhedsmodulet. Desuden viser de fundne data at stivhedsmodulet øges med en faktor 1,6 når testtemperaturen sænkes fra 20 til 10 °C. Dette er svagt mindre end den faktor 1,7-1,8, som tidligere er fundet for ikke-fibermodificeret BSM og synes derfor at kunne indikere, at BSM's temperaturfølsomhed mindskes, når blandingen er fibermodificeret, men flere analyser er nødvendige for at verificere dette.

Testdata fiber-modificeret BSM	ITSwet spalte-træk, (kPa)	ITSdry spalte-træk, (kPa)	ITSR vandføl-somhed, (%)	ITSM stivhed, 20°C (MPa)	Marshallstab. 25°C (kN)
BSM m/fibre	251	289	87	1775	16,2
BSM reference	166	211	79	1460	14,1

Fig. 7.4: Data for laboratorieprøvning af BSM med/uden fibertilsætning (amid-/polypropylen fibre)

Det fremgår af tabellen, figur 7.4, at BSM-materialets indre kohæsion forbedres ved fibertilsætning, idet såvel den tørre som våde spaltetrækstyrke forøges, ligesom vandfølsomhedstallet forbedres. Der er for den fibermodificerede blanding opnået en Marshall-stabilitet (Ø150 mm legemer, testtemperatur 25 °C) på 16,2 kN mod 14,1 for referenceblandingen uden fibre. Dette indikerer ligeledes en vis styrkeforbedring.

Det er ikke muligt på det foreliggende, begrænsede grundlag at fastslå det eksakte potentiale for fibermodificering af BSM. De begrænsede forsøgsdata fra denne testserie viser dog, at man med fibermodificering af BSM som den i forsøget anvendte er i stand til at forbedre materialets kohæsion og udmattelsesmodstand (og dermed holdbarhed) samt stivhedsmodul og trykstyrke. Det vil dog kræve et mere omfattende testprogram end det i denne rapport beskrevne for at kunne afdække effekten af forskellige fibertyper, optimere sådanne BSM-varianter og kunne fastslå den eksakt opnåede gevinst. Endelig bør den opnåede gevinst naturligvis også holdes op imod merprisen for de pågældende fibre, for at kunne vurdere "value-for-money".

8. Vedhæftning og anvendelse af aktiv filler

Udgangspunktet for vores danske BSM-belægninger har som tidligere omtalt været de sydafrikanske erfaringer, som beskrevet i SABITA's TG2-manual og Wirtgens håndbøger. I disse omtales nødvendigheden af at tilsætte 0,5 – 1,0 % cement eller hydratkalk som klæbeaktiv filler. Det er i Danmark valgt at anvende cement som klæbeaktiv filler, på samme vis som kendt fra varmblandede asfaltslidlag.

I forbindelse med BSM-arbejdet har Teknologisk Institut udarbejdet en LCA-analyse for BSM-KMA for SR-Gruppen (Rapporten ligger officielt tilgængelig på Teknologisk Instituts hjemmeside). Det fremgår af rapporten, at man for vejopbygninger af kategori T3 og T4 kan opnå store CO_2-besparelser (i størrelsesorden ca. 50-75% afhængig af scenarier). Beregningerne afdækker imidlertid også, at den i BSM tilsatte klæbeaktive filler i form af cement udgør i størrelsesorden 30% af BSM-materialets samlede CO_2-belastning. På denne baggrund er det i en forsøgsrække undersøgt, om cementen eventuelt vil kunne erstattes med andre, mindre CO_2-tunge additiver.
Det kan indledningsvis på forhånd udelukkes at erstatte cement med hydratkalk, idet hydratkalken hverken økonomisk eller CO_2-mæssigt er fordelagtig frem for samme mængde cement.

Der er derfor gennemført en forsøgsrække, hvor en BSM-blanding er tilsat forskellige additiver for at vurdere den opnåede vedhæftningseffekt, bedømt på spaltetrækstyrkeforsøg på 60 x Ø150 mm vibrationsindstampede BSM prøvelegemer og beregning af vandfølsomhedstal. Desuden er stivhedsmodulet og Marshall-stabiliteten orienterende bestemt. De opnåede data er gennemgået i det efterfølgende. En samlet oversigt fremgår af tabellen i efterfølgende fig. 8.1.

8.1. Kalkfiller

For at vurdere om der i BSM overhovedet er behov for cementens klæbeaktive egenskaber, eller der blot er behov for en forøget fillertilsætning, så skumbitumenpartiklerne kan opnå en større mørtelandel i blandingen, blev der indledningsvis udført en BSM-blanding, hvor der i stedet for cement blev tilsat 2,0% standard kalkfiller. Blandingen opnåede et uacceptabelt vandfølsomhedstal på blot 50%. Heraf konkluderes, at tilsætning af klæbeaktiv filler/additiv er nødvendig.

8.2. Bio-flyveaske

Det er kendt, at flyveaske kan have visse klæbeforbedrende egenskaber fra cementlignende bindinger. Det er derfor afprøvet, om tilsætning af 3% bio-flyveaske kan have en tilstrækkelig effekt til at kunne erstatte de 0,8% cement. Det ses af tabellen (fig. 8.1), at der trods en mængdeforøgelse fra 0,8% cement til 3,0% bio-flyveaske kun blev opnået en begrænset, men ikke tilstrækkelig klæbeforbedrende effekt (ITSR 61%). Der er dog kun forsøgt med en enkelt type af flyveaske. Det er derfor muligt, at yderligere testprogrammer gennemført med andre flyveasker kan have større effekt.

8.3. Flydende amin-klæbeforbedrere, type A

Det er kendt fra varmblandet asfalt, at man ved tilsætning af en passende mængde kemisk, flydende amin-klæbeforbedrer kan opnå god vedhæftning. Flydende amin-klæbeforbedrere består typisk af en form for fedtsyrekæde, som hæfter sig til bitumen. På fedtsyrekæden er knyttet en amino-gruppe (NH_2), som har en polariseret overflade-ladning, som tiltrækkes af normale stenmaterialers polaritet. Herved tiltrækkes bitumen til stenene og vandet fortrænges ved bindingen. Leverandørerne og produkterne anvendt i forsøget er kendte, men anonymiseret i denne rapport. Der er i blandingen anvendt klæbeforbedrer i en vægtmængde af 0,3% af bitumenmængden (som anbefalet til varmblandet asfalt) og der er desuden tilsat 0,8% kalk som erstatning for filler-andelen af cementen. Det ses dog af tabellen, figur 8.1, at der langt fra opnås tilstrækkelig klæbeforbedrende effekt, med en ITSR-værdi på blot 43%.

8.4. Flydende amin-klæbeforbedrer type B

Da ovennævnte forsøg (8.3) ikke gav tilstrækkelig effekt, blev der gennemført en indledende forsøgsrække, hvor tre forskellige andre, flydende klæbeforbedrere blev testet. I første omgang blev der udført skumningsforsøg med varm bitumen 70/100 for at vurdere amin-klæbeforbedrernes effekt på skumbitumens ekspansionsgrad og halveringstid. Det kunne her konstateres, at ingen af de tre klæbeforbedrere påvirkede skumbitumens ekspansionsgrad, men at alle tre klæbeforbedrere påvirkede halveringstiden (tiden før skumbitumens volumen er sunket sammen til det halve). Den bedste af de tre flydende klæbeforbedrer-kandidater, her anonymiseret og blot kaldet type B, blev udvalgt til en supplerende BSM-blanding. Der blev supplerende tilsat 3% kalkfiller for at sikre, at BSM-blandingen havde rigeligt med fillerindhold. Det nedslående resultat var dog, at der kun blev opnået et utilstrækkeligt vandfølsomhedstal på 44%.

8.5. "Grøn" cement

Der er på det danske marked introduceret en ny, mere "grøn" cementtype, som udleder betydeligt mindre CO_2 end den traditionelle standard cement.

Der er tale om en gennemprøvet innovation, der har været anvendt til brobyggerier i forskningsprojektet Grøn Beton II, med deltagelse af Teknologisk Institut. Det oplyses af producenten, at den grønne cement giver 30% reduktion af CO2-emissionen til fremstilling af cement, sammenholdt med traditionel cement. Det er derfor fundet interessant også at afprøve den grønne cements effekt i BSM. Der er gennemført endnu en BSM-blanding, hvor de 0,8% standard cement er erstattet af samme mængde "grøn" cement. Resultatet, som fremgår af sidste linje i tabellen, figur 8.1, viser, at der med en ITSR-værdi på 75% faktisk opnås fuldt tilfredsstillende egenskaber ved erstatning af standard cement med den nye, "grønne" cement.

8.6. Dataoversigt

Nedenfor er de opnåede data fra test af alternative klæbeforbedrere/additiver oplistet:

Afdækning af klæbeaktive tilsætningers effekt	ITSwet spaltetræk våd, (kPa)	ITSdry spaltetræk tør, (kPa)	ITSR vandfølsomhedstal (%)	ITSM stivhedsmodul 20°C (MPa)	Marshall stabilitet 25ºC (kN)
Kravværdier Jf AAB BSM-KMA	(>125)**	>200	>70	≥ 1.000	≥ 12
BSM ref. 0,8% Aalb..Portl. std. cement	252	283	89	1.910	23,0
BSM 0% cem., 2% kalkfiller	171	345	*50*	1.730	N/A
BSM 0% cem., 3% bio-flyveaske	161	262	61	1.242	21,2
BSM m/ 0,3%* aminklæbef. A + 0,8% kalk	132	303	*43*	1.550	23,2
BSM m/ 0,3%* aminklæbef. B + 3% kalk	142	322	*44*	1.160	20,0
BSM m/ 0,8% "grøn" cement	208	279	75	1.990	23,4

**) 0,3% af bitumenmængden. Klæbeforbedreren er homogent indblandet i bitumen før skumbitumenfremstillingen.*
***) Vejledende kravværdi fra den sydafrikanske SABITA TG2 manual. Der stilles ikke krav til ITSwet i den danske AAB.*

Fig. 8.1: Tabelmæssig oversigt over de udførte forsøg med alternative aktive fillere/klæbeforbedrere. Det ses, at kun "grøn" cement giver tilstrækkelig ITSR-værdi (vandfølsomhedstal).

8.7. Konklusion, klæbeaktiv filler/additiv

Det kan på det foreliggende grundlag konkluderes, at det er nødvendigt at tilsætte en klæbeaktiv filler for at opnå tilstrækkelig modstand mod udvaskning (tilstrækkeligt højt vandfølsomhedstal). Hvis der af CO2-belastningsmæssige årsager ønskes anvendt et mere gunstigt alternativ til cement, er der blandt de testede muligheder kun opnået tilstrækkelig effekt ved erstatning af traditionel standard cement med samme mængde "grøn" cement, som er en mere bæredygtigt fremstillet cementtype. Et eventuelt skift til denne type i BSM-produktionen bør dog igen overvejes i sammenhæng med produktets tilgængelighed og omkostning, som ikke er belyst i denne tekniske rapport. Der ses samtidigt et potentiale for nærmere afdækning af eksakt nødvendige tilsætningsmængder, ligesom den fortsatte udvikling af mere bæredygtigt fremstillede cement-produkter måske kan give basis for yderligere optimeringsforsøg.

9. Vurdering af forskellige tilslagsmaterialers egnethed til fremstilling af BSM

Der er i løbet af 2021 udført supplerende forsøg på BSM-blandinger, hvor der i stedet for knust genbrugsasfalt som basis-"stenmateriale" er anvendt følgende:

- Knust beton
- Stabilt grus
- Forbrændingsslagge-grus

Resultatet af forsøgene er kortfattet beskrevet i det følgende.

9.1. BSM fremstillet af knust beton

De senere års øgede fokus på restmaterialers genanvendelighed har foruden knust genbrugsasfalt også medført et fokus på bl.a. knust beton (KB) fra nedrevne bygninger og bygværker. Knust beton kan i dag anvendes som ubundet bærelag i henhold til Vejdirektoratets relevante vejregel, så dette restprodukt kunne også være interessant at teste som tilslag i BSM, ifald der ad åre måtte opstå mangel på egnet knust genbrugsasfalt.

Indledende BSM-forsøg baseret på 0/32 KB med meget lavt fillerindhold (ca. 1%) viste, at der var utilstrækkeligt med finstof til at skumbitumenpartiklerne kunne danne den nødvendige bitumen/fillermørtel. Resultatet blev et inhomogent materiale med bitumentrevler/-klumper.

Der blev efterfølgende udført en ny BSM-blanding med et andet KB 0/32 materiale, som denne gang havde 3,5% fillerindhold (gennemfald på 0,063 mm sigten). Det skal bemærkes, at knust beton er betydeligt mere "tørstigt" end knust asfalt, hvorfor det optimale vandindhold fra modificeret Proctorforsøg lå helt oppe på 10,5% mod normalt 6-7% for knust asfalt. Skumbitumenindholdet blev jf. SABITA TG2's retningslinjer hævet til 2,3% bitumen 70/100 og cementindholdet blev fastholdt på 0,8%. KB-blandingen resulterede i et rimeligt homogent BSM-materiale, hvorfra der kunne fremstilles Ø150 mm indstampede prøvelegemer på samme vis som for BSM fremstillet på knust genbrugsasfalt.

Opnåede data for BSM-blandingen med 0/32 KB fremgår af tabellen i figur 9.1.

BSM på 0/32 mm KB	Densitet (Mg/m³)	ITSwet (kPa)	ITSdry (kPa)	ITSR (%)	ITSM 20ºC (MPa)	Marshall-stab. (kN)
Opnåede testdata	2,07	382	417	92	1990	34,7

Fig. 9.1: Opnåede data for BSM fremstillet på baggrund af 0/32 mm knust beton

Fig. 9.2: Foto af Ø150 mm vibrationsindstampede prøvelegemer af BSM med 0/32 mm knust beton. De punktvise skumbitumenbindinger ses som sorte pletter i prøvelegemerne.

Som det fremgår af figur 9.2, opnås ikke et BSM-materiale med knust beton, som fremtræder lige så omhyllet, som det normalt er tilfældet for BSM på knust genbrugsasfalt. Ikke desto mindre viser tabellens data (fig. 9.1), at der opnås fine testdata.

Som det fremgår af ovenstående, kan det konkluderes, at der på basis af knust genbrugsbeton godt kan fremstilles BSM, som udviser tilfredsstillende funktionsegenskaber. Der er naturligvis her tale om data fra et enkeltstående forsøg, men ikke desto mindre ser det ud til, at der kan være et potentiale for denne type BSM som et alternativ, hvis knust genbrugsasfalt ikke kan tilvejebringes.

9.2. BSM fremstillet af stabilt grus, SG II

En anden mulighed for fremstilling af BSM kunne være at anvende et stenmateriale bestående af traditionelt stabilt grus kvalitet II (SG II 0/32 mm). Der er derfor i forsøgsrækken også gennemført en BSM-blanding på dette basis-stenmateriale.

	Gennemfaldsprocent		
	SG II 0/32	TG2 BSM	TG2 BSM
Sigte (mm)	Vasket	Min	Max
31,5	100	86	100
25	86	74	100
22,4	81	68	100
16	68	58	100
11,2	59	49	92
8	52	42	82
5,6	45	35	72
4	40	30	63
2	33	22	48
1	26	15	37
0,5	17	10	29
0,25	8	7	22
0,125	4	5	17
0,063	2,4	4	14

Note:

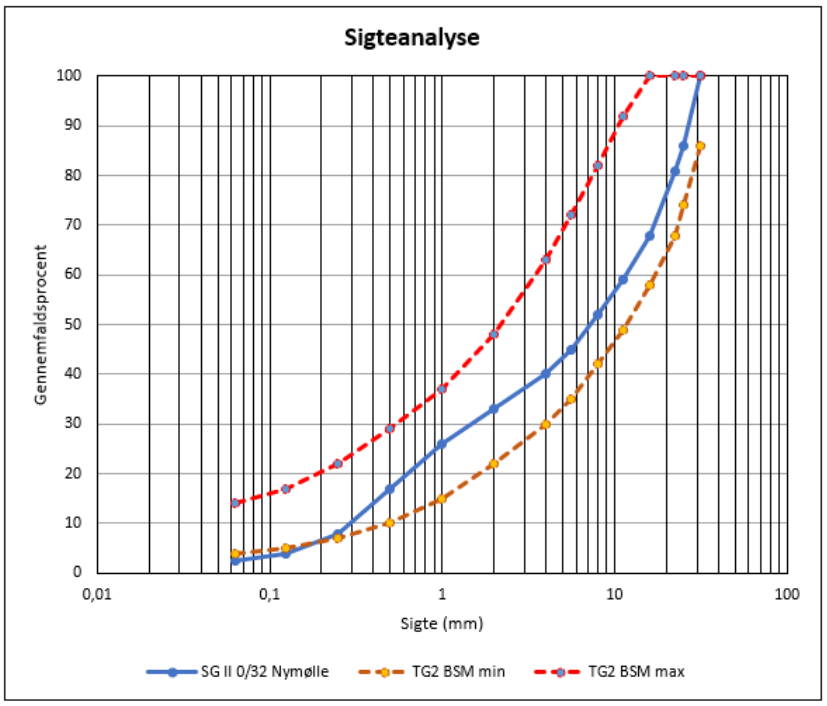


Fig. 9.3: Kornkurve for anvendt stabilt grus 0/32 mm, sammenlignet med SABITA TG2's anbefalede grænseværdier, hvis BSM ikke fremstilles udelukkende af knust genbrugsasfalt.

Det ses af figur 9.3, at den anvendte stabilt grus 0/32 mm praktisk taget overholder TG2's anbefalinger til BSM 0/32 (visse TG2-værdier er interpolerede, da TG2 anvender et andet sigtesæt end standard i Danmark).

Fig. 9.4: Fotos af BSM blandet på 0/32 SGII.

Som det fremgår af figur 9.4, blev der med SG II materialet kun opnået et mindre homogent og mindre tilfredsstillende BSM-materiale, som ikke i tilstrækkelig grad kunne omhylle eller fastholde de svage sten i SG II materialet. Resultatet blev derfor indstampede prøvelegemer, som var mindre sammenhængende og mere smuldrende end "normal" BSM og som absolut ikke kunne karakteriseres som "dryssefri".

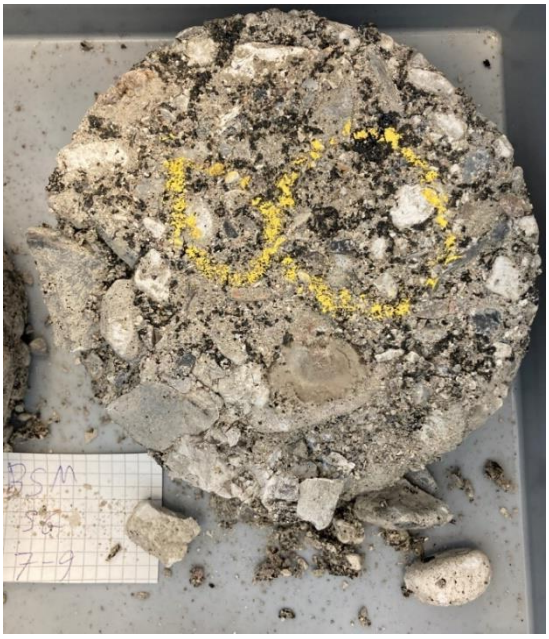


Fig. 9.5: Ø150 mm prøvelegeme fremstillet af SG II som basis-stenmateriale. Det ses, at materialet fremtræder mere løst og usammenhængende end "normal" BSM.

Som et udtryk for materialets manglende egnethed kan det oplyses, at der for blandingen faktisk blev opnået en Marshall-stabilitet ved 25 °C på 25,0 kN – men med særdeles store variationer mellem 14,7 og 34,0 kN.

Det må på baggrund af det gennemførte forsøg umiddelbart konkluderes, at det ikke kan tilrådes at fremstille BSM på baggrund af et basismateriale bestående af en dansk stabilt grus kvalitet II (SG II). Set i lyset af dagspressens jævnlige omtale af råvareknaphed og at de danske grusgrave sandsynligvis vil løbe tør for egnede materialer indenfor en kort årrække, synes det heller ikke hensigtsmæssigt at erstatte genbrugsmaterialet knust genbrugsasfalt med "jomfrueligt" stabilt grus, ligesom det bæredygtighedsmæssigt må betragtes som en forringelse.

9.3. BSM baseret på forbrændingsslagge (FS)

Det er kendt, at 0/32 mm forbrændingsslagger kan anvendes som erstatning for bundsikringslag af sand og grus, jævnfør AAB for bundsikring af forbrændingsslagge. Vejdirektoratet har endvidere over en årrække fulgt en serie fuldskalaforsøg med tung belastning, som indikerer, at FS også kan anvendes som ubundet bærelag, som erstatning for stabilt grus. Det fremgår desuden af en udarbejdet miljøvaredeklaration for forbrændingsslagge, at produktet har en (svagt) negativ CO2-belastning. Set i lyset af dette og det generelle fokus på genbrug og bæredygtige løsninger, blev det fundet nærliggende at undersøge forbrændingsslaggers egnethed som basismateriale til fremstilling af BSM. Teknologisk Institut har i en særskilt rapport udarbejdet for AFATEK A/S opstillet resultatet fra en detaljeret forsøgsrække. Rapporten er publiceret i 2021 og er bl.a. tilgængelig på Teknologisk Instituts hjemmeside, sammen med de tidligere udarbejdede BSM-rapporter for Vejdirektoratet.

	SIGTEANALYSE			
Sigte (mm)	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

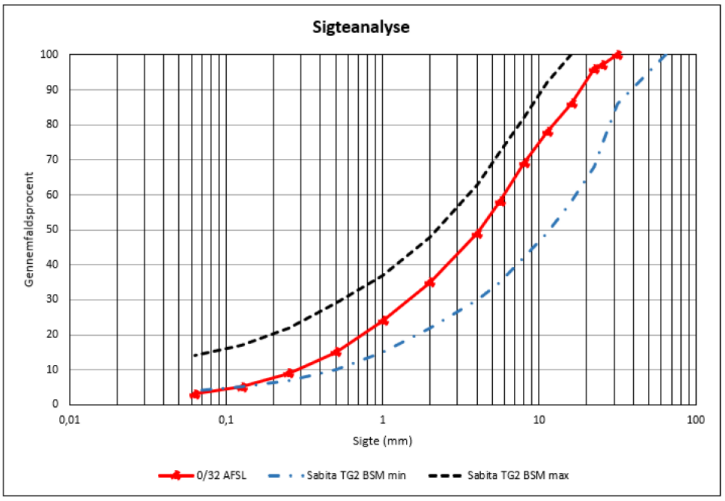
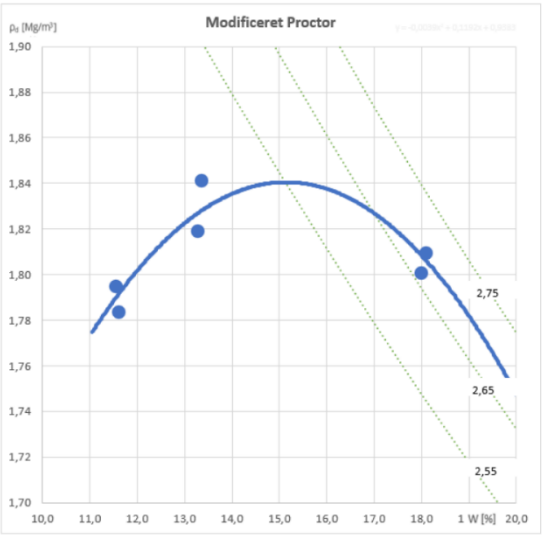


Fig. 9.6: Kornkurve for forbrændingsslagge 0/32 anvendt forsøgsvis til BSM-fremstilling, sammenholdt med SABITA TG2's anbefalede grænsekurver for BSM.

Som det fremgår af figur 9.6 overholder den testede forbrændingsslagge fint SABITA TG2's vejledende grænseværdier for BSM, bortset fra et marginalt lavere fillerindhold. Forbrændingsslaggen burde på denne baggrund umiddelbart være velegnet til BSM-fremstilling.



For at kunne bestemme forbrændingsslaggens optimale vandindhold blev der indledningsvis gennemført et modificeret Proctor-forsøg på normal vis. Resultatet viste som ventet, grundet forbrændingsslaggens porøsitet og sammensætning, et meget højt optimalt vandindhold (W_{opt}) på godt 15 %.

Fig. 9.7: Modificeret Proctor test på forbrændingsslagger viste et meget højt optimalt vandindhold.

Der blev herefter gennemført en laboratorielanding af BSM med 0/32 mm forbrændingsslagger tilsat 0,8% cement og 2,3 % skumbitumen 70/100. Vandindholdet blev som sædvanligt justeret til W_{opt} minus 2%-point.

Fig. 9.8: Billedet t.v. viser hvordan det nyblandede BSM-materiale på forbrændingsslagger på ideel vis kan formes til en "snebold" med fingrene. Til højre ses Ø150 mm vibrationsindstampede prøvelegemer af BSM med forbrændingsslagger. Det ses igen, at der opnås nydelige, homogene og helt sammenhængende prøvelegemer med pæn, tæt overfladestruktur.

BSM på 0/32 mm forbr-slagger (FS)	Densitet (Mg/m³)	ITSwet (kPa)	ITSdry (kPa)	ITSR (%)	ITSM 20ºC (MPa)	Marshall-stab. (kN)
Opnåede testdata	1,98	246	269	91	1670	37,6

Fig. 9.9: Testdata fra prøvning af BSM baseret på forbrændingsslaggegrus.

På baggrund af bestemmelse af referencedensiteten og materialets maksimaldensitet er prøvelegemernes indbyggede hulrum beregnet til ca. 27%. Til trods for dette hulrum ses (fig. 9.9) et særdeles højt vandfølsomhedstal på 91%, hvilket indikerer, at selvom slaggematerialet har en relativt stor porøsitet, så er porestrukturen så fin, at der ikke optages ret meget vand, trods vacuummætning og 24 timers lagring af det våde prøvesæt under vand. Der ses således fine værdier for spaltetrækstyrke, (modstand mod) vandfølsomhed, stivhedsmodul og en meget høj Marshall-stabilitet (trykstyrke).

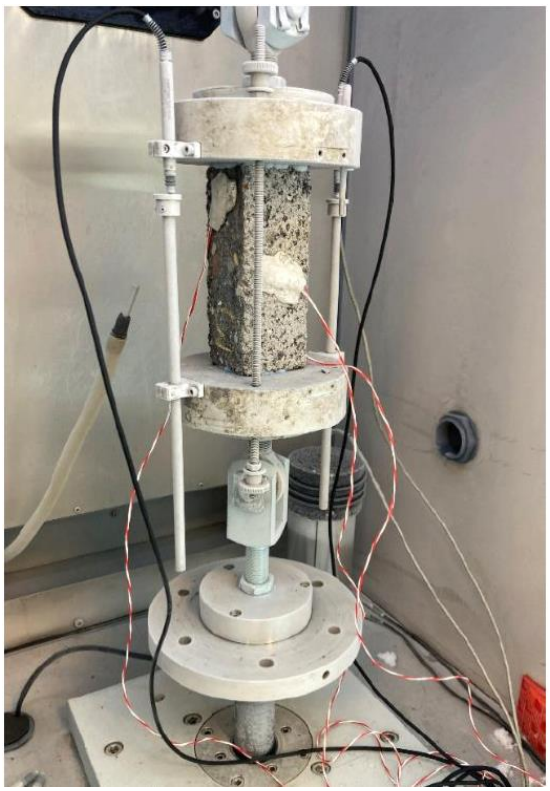
Der er desuden gennemført sporkøringstest (DS/EN 12697-22, small size) ved 45 ºC på 10 cm tykke prøvelegemer (plader), indtromlet af BSM med FS. Det kunne ved forsøget konstateres, at den fremstillede BSM med forbrændingsslagger har en særdeles høj sporkøringsmodstand.

Fig. 9.10: Testplader af FS-baseret BSM i sporkøringsapparat efter afsluttet sporkøringstest. Selv efter 10.000 dobbeltpassager af hjulet med tryk som en lastbil kan sporet knapt nok anes.

Resultatet af sporkøringstesten fremgår af nedenstående tabel:

Sporkøringstest	WTT total spordybde (mm)	WTS tracking rate (mm/1000 cycles)	PRDair (spordybde i % af total pladetykkelse)
BSM med 0/32 mm forbrændingsslagger	0,43	0,008	0,4

Fig. 9.11: Resultat fra sporkøringstest på BSM fremstillet af forbrændingsslagger. Der ses en særdeles høj sporkøringsmodstand.



Afslutningsvis er der i den omtalte forsøgsrække gennemført en såkaldt TSRST-test (Thermal Stress Restrained Specimen Test), hvor materialets brudtemperatur bestemmes, når et fikseret legeme nedkøles gradvist indtil der opstår brud pga interne trækspændinger.

Forsøget viste en brudtemperatur helt nede på -33 °C, hvilket er fuldt på højde med gode varmblandede asfaltmaterialer. Der ses således ingen umiddelbar revnerisiko ved anvendelse af BSM bærelag med forbrændingsslagger.

Fig. 9.12: TSRST testopstilling: En udsavet bjælke af BSM placeres, så endefladerne er fastlimet til metalskiverne og dermed fikseret i lodret retning. Herefter nedkøles i klima-skab med 10 °C i timen, indtil brud opstår.

Fremstilling af BSM på baggrund af forbrændingsslagger, som det i forsøget anvendte, synes at være et lovende alternativ til BSM-fremstilling på baggrund af knust genbrugsasfalt.

En mere detaljeret vurdering af materialet bør dog også indebære udførelse af en forsøgsstrækning med fuldskala trafikbelastning.

10. Erfaringer fra fuldskalastrækninger udført i 2021

Teknologisk Institut har i 2021 gennemført laboratoriekontrol af BSM udlagt på to forskellige af Vejdirektoratets entrepriser. Den ene entreprise er baseret på insitu-metoden (speciel fræse-/blandemaskine direkte på vejen) og den anden baseret på KMA-metoden (mobilt blandeanlæg opstillet tæt ved udlægningsstedet).

10.1. Sønderborup – Assentoft: BSM insitu

Efter aftale med Vejdirektoratet har Teknologisk Institut den 14. juni 2021 udtaget en laboratorieprøve af BSM-in-situ materialet udlagt af Arkil Asfalt på motortrafikvejen Sdr. Borup – Assentoft syd for Randers. BSM-prøverne er udtaget på en delstrækning af motortrafikvejen, på kørebanen med retning mod Assentoft, hvor der har været observeret revneproblemer fra den eksisterende HBB-belægning. Efter affræsning af SMA-slidlaget og ABB-bindelaget, er den øvre del af HBB-bærelaget blevet affræset og insitu BSM-stabiliseret. I samme operation er tilført samme mængde genbrugsasfalt (blandingsforhold HBB:asfalt ca. 1:1), samt cement og flyveaske. BSM-stabiliseringen er således foretaget in-situ med Arkil's specielle Wirtgen CRi-maskine. Det er oplyst, at den samlede BSM lagtykkelse er ca. 17-18 cm.

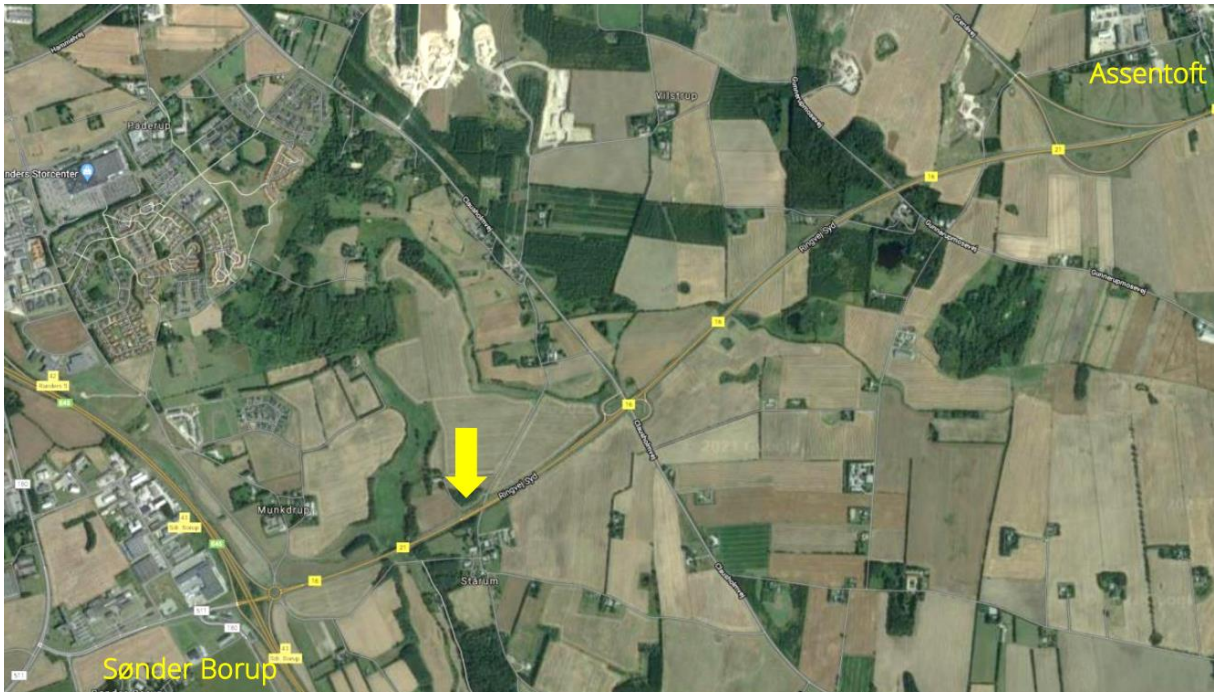


Fig. 10.1: Oversigtskort over Sønder Borup – Assentoft motortrafikvejen. Pilen viser prøveudtagningsstedet.

Den anvendte BSM-materialesammensætning på strækningen er som følger:

- Affræset HBB og asfalt (1:1)
- 2,4% skumbitumen med ca. 2,8% skumningsvand
- 4% flyveaske (tilført som ekstra filler, da HBB-affræsningen er meget "filler-fattig")
- 1% cement (klæbeaktiv filler)
- Samt tilført procesvand, løbende justeret for optimal kohæsion og bearbejdelighed.

Prøvningen omtalt i nærværende rapport vedrører alene BSM-laget, som efterfølgende blev afdækket med et nyt varmblandet asfaltslidlag i form af 5 cm SMA 11.

Fig. 10.2: Nærbillede af CRi-maskinens opsamling af udspredt genbrugsasfalt, flyveaske og cement. Bagved kører en traditionel asfaltudlægger med højkomprimeringsstrygejern samt en glatvalset vibrationstromle og en gummihjulstromle.

	Ny	*Erfa DK*	*Sabita TG2 manual for BSM*		
Sigte (mm)	BSM SdrBorup	Typisk 0/32 kn. asfalt	TG2 opfræs Ubehandlet	TG2 BSM Min	TG2 BSM Max
64	100	100	100	100	
31,5	94	100	78	86	
25	91	94	67	74	
22,4	90	94	64	68	
16	76	89	54	58	100
11,2	58	83	44	49	92
8	43	70	37	42	82
5,6	32	58	29	35	72
4	23	47	23	30	63
2	15	32	15	22	48
1	10	20	9	15	37
0,5	8	11	5	10	29
0,25	6	6	3	7	22
0,125	4	3	2	5	17
0,063	3,0	1,5	1	4	14

Fig. 10.3: Data fra sigteanalyse af BSM insitu materialet, sammenholdt med typiske BSM 0/32 data fra 2020 og SABITA TG2's grænseværdier.

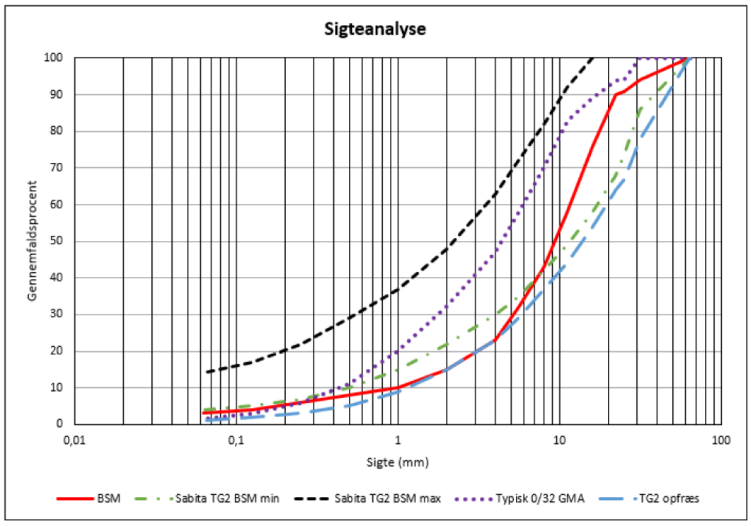


Fig. 10.4: T.v. sigteanalyse af BSM insitu. (data fra fig. 10.3 præsenteret grafisk) T.h. ses frasorterede partikler visuelt > 64 mm.

Det ses af fig. 10.4, at det kombinerede HBB/Knust asfalt BSM-insitu materiale er mindre finkornet end TG2's nedre grænsekurve, men samtidigt overholder minimum fillerindholdet, grundet den ekstra tilsatte flyveaske. Det skal dog for god ordens skyld bemærkes, at enkeltstående stenpartikler som visuelt var større end 64 mm blev frasorteret manuelt før prøvningen (se fig. 10.4).

BSM-prøven blev udtaget på udlægningsstedet og hastetransporteret til Teknologisk Instituts vejlaboratorium i Taastrup, så det kunne sikres, at prøvelegemerne blev fremstillet indenfor ca. 4 timer fra udtagningstidspunktet. Under opstarten af laboratoriefremstillingen af prøvelegemerne opstod der beklageligvis nedbrud i vibrationshammeren. Prøvelegemer anvendt i denne testserie er derfor alle alternativt fremstillet som Ø100 mm (nominel) Marshall-legemer, indstampet med 2x75 slag ved 20 °C. Data fra denne forsøgsserie er derfor ikke 100% sammenlignelige med øvrige data i nærværende rapport. Ikke desto mindre er der fundet fine værdier, hvilket fremgår af tabellerne i efterfølgende figur 10.5 og 10.6.
Det kan således konkluderes, at der er opnået fine data ved Arkils BSM insitu stabilisering af strækningen på baggrund af et basismateriale, som er halvt knust genbrugsasfalt og halvt knust HBB, tilsat normalt cementindhold, og desuden tilsat 3% flyveaske for at øge mørtelkonsistensen. Følgende data blev opnået:

BSM insitu Sdr.Borup - Assentoft	Densitet (Mg/m^3)	ITSwet (kPa)	ITSdry (kPa)	ITSR (%)	ITSM 20°C (MPa)	Marshall-hulrum (%)
Opnåede testdata	2,01	512	539	95	2350	15,1

Fig. 10.5: Opnåede testdata fra prøvning af Marshall-indstampede prøvelegemer.

Sporkøringstest BSM Sdr.Borup-Assent.	WTT total spordybde (mm)	WTS tracking rate (mm/1000 cycles)	PRDair (spordybde i % af total pladetykkelse)
BSM insitu	0,41	0,007	0,4

Fig. 10.6: Opnåede data fra sporkøringstest på BSM insitu materialet.

Der blev af Eurofins laboratorium supplerende på strækningen udført komprimeringskontrol med Troxler isotopsonde. Komprimeringskontrollen viste et højt komprimeringsniveau med en indbygget middelkomprimeringsgrad på 102,7% og mindste enkeltværdi 100,5%, set i forhold til den Marshall-indstampede referencedensitet.

10.2. Hovedlandevej 416, Viborg N (VD-entreprise 53/2021): BSM-KMA

Belægningsarbejdet med BSM blev udført som en del af Vejdirektoratets entreprise 53, 2021: "Klimavenlige slidlag og BSM 2021", Hldv. 416, km 39,950 - 41,110, ved Viborg. Denne entreprise er Vejdirektoratets første egentlige BSM-udbud.

Belægningsarbejdet, som blev udført af SR-Gruppen efter BSM-KMA metoden, omfattede udlægning af BSM-KMA bærelag på en 1.160 m lang strækning i 8,5 m bredde. Strækningen er en del af Nordre Ringvej mellem Aalborgvej og Løgstørvej (se kort indsat). BSM-udlægningen blev foretaget 16-17. september 2021. Teknologisk Institut har udtaget laboratorieprøver begge dage, som blev hastetransporteret til laboratoriet i Taastrup for fremstilling af prøvelegemer inden for ca. 4 timer. Laboratorieprøvningen er udført for SR-Gruppen som en del af kontraktdokumentationen overfor Vejdirektoratet som bygherre. Prøvningsomfang og metoder svarer derfor til det i Vejdirektoratets AAB for BSM-KMA 2021 anførte.

Fig. 10.7: Den omhandlede strækning på hldv. 416 fremgår af kortets rødmarkering.

Fig 10.8: BSM-KMA blev fremstillet af den fra strækningen forud affræsede asfalt med SR-Gruppens KMA-anlæg, som til formålet var opstillet på en plads nær ved udlægningsstedet.

Det er oplyst af SR-Gruppen, at BSM-materialet var produceret på basis af lokal genbrugsasfalt opfræset på strækningen og efterfølgende nedknust til et 0/16 mm materiale. Genbrugsmaterialet blev ved BSM-produktionen tilsat 0,8% cement som klæbeaktiv filler, ca. 2,2% skumbitumen (40/60) samt ca. 3,4% procesvand.

Fig. 10.9: Udlægning af BSM i 8,5 m bredde med højkomprimeringsstrygejern.

Følgende data blev fundet ved laboratorieprøvningen:

BSM insitu Sdr.Borup - Assentoft	ITSwet (kPa)	ITSdry (kPa)	ITSR (%)	ITSM 20ºC (MPa)	Marshall-stabilitet, 25ºC (kN)	Hulrum (%)
Opnåede testdata	265 (252 – 278)	300 (270 – 325)	89 (85 – 93)	1905 (1514 -2295)	21,6 (19,4 – 23,8)	15,5 (14,5-16,5)

Fig. 10.10: Data fra laboratorieprøvning af BSM udlagt 16-17/9-2021 på hldv. 416 ved Viborg Nord.

Som det fremgår af ovenstående tabel, er der opnået fine data fra SR-Gruppens BSM-KMA arbejde på hldv. 416 ved Viborg. Det skal for god ordens skyld også bemærkes, at variationerne imellem de to dagsproduktioner skyldes, at første dagsproduktion, som omfatter langt hovedparten af arbejdet, er produceret på affræset materiale uden makadam, hvorimod den resterende del, udlagt ved strækningens helle-anlæg på dag 2, er produceret på det resterende affræsede materiale, som kan indeholde lidt større sten fra det underliggende, gamle makadam-bærelag.

Der blev umiddelbart efter afsluttet tromling foretaget komprimeringskontrol af Eurofins med Troxler isotop. Resultatet udviste en fin middelkomprimeringsgrad på 98,3% og mindsteværdi 95,8%, altså for begge ca. 3% højere end kravet anført i AAB for BSM-KMA.

Der blev afslutningsvis udlagt ABB-bindelag og SMA-KVS-slidlag på hele strækningen.

11. Afdækning af BSM's temperaturafhængighed i ydersæsonen

Det fremgår af SABITA's TG2 manual, at BSM ikke bør udføres ved temperaturer under 10 °C. Det må formodentligt antages, at dette krav relativt nemt kan overholdes i et klima som i Sydafrika.
I Danmark, som har et noget koldere klima, vil en minimumstemperaturgrænse for BSM-arbejder på 10 °C dog medføre en væsentlig afkortning af belægningssæsonen, sammenlignet med varmblandet asfalt, hvor bærelag praktisk taget kan udføres hele året rundt.

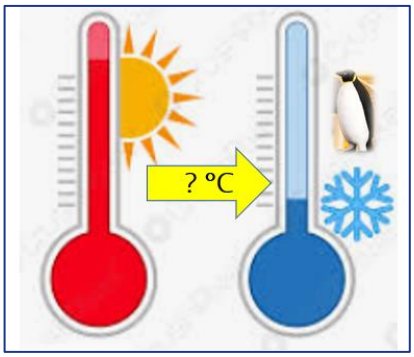


Fig. 11.1: En vigtig parameter for BSM-sæsonens længde er hvor lave materialetemperaturer som kan tillades uden at gå på kompromis med funktionsegenskaberne.

Man skal naturligvis indledningsvis være opmærksom på, at temperaturgrænsen på 10 °C gælder for *materialet*, altså den genbrugsasfalt, som BSM skal fremstilles af og ikke nødvendigvis lufttemperaturen. Alligevel ville det være af stor værdi at kunne forlænge BSM-udlægningssæsonen væsentligt ved at kunne arbejde med materialetemperaturer helt ned til 5 °C. Denne temperatur bør så til gengæld være minimumstemperaturen, hvis man skal sikre, at produktionen og procesvandet holdes frostfrit.

En interessant detalje registreret af SR-Gruppen er i øvrigt, at BSM materialets temperatur målt ved udlæggeren som regel er nogle få grader højere end den målte temperatur på genbrugsasfalten før BSM-fremstilling. Det er næppe den varme skumbitumens temperatur, som hæver hele BSM-materialets temperatur, da bitumenandelen er lav. Men en kombination af bitumenopvarmning, hærdevarme fra cementbindinger, samt hele blandeprocessens mekaniske påvirkning synes samlet at give et (beskedent) løft af materialetemperaturen ved udlægning.

For at kunne vurdere, om der opnås tilstrækkelige funktionsegenskaber ved fremstilling af BSM ved blot 5 °C, er der udført en omfattende forsøgsrække, hvor materialets tørre og våde spaltetrækstyrke og relaterede vandfølsomhedsværdi er bestemt. Desuden er der bestemt stivhedsmodul ved 20°C og Marshall-stabilitet ved 25 °C. Alle prøvningsdata data fremgår af tabellen i efterfølgende figur 11.2.

A) Indledningsvis er der gennemført en referenceblanding med en BSM 0/16 med 0,8% cement, 2,1% 40/60 skumbitumen og vandindhold sv.t. W_{opt} minus 2%-point. Materialet er standardmæssigt curet (hærdet) 72 timer ved 40 °C før prøvning.

B) Samme materiale er blandet ved 5 °C og curet i henholdsvis 7 og 28 døgn ved 5°C før test. Dette må anses som en "worst case scenario".
Det ses af fig. 11.2, at der end ikke efter 28 døgns lagring kan opnås tilfredsstillende data for spaltetrækstyrke og Marshall-stabilitet.

C) Der er i samme blanding foruden de 0,8% cement tilsat en flydende klæbeforbedrer i en mængde af 0,5% af bitumenmængden, for at se om dette kan hæve curing-processen ved 5 °C. Det ses af fig. 11.2, at der ligeledes for denne variant end ikke efter 28 døgn kan opnås tilfredsstillende spaltetrækstyrke.

D) Der er supplerende udført en blanding, hvor cementindholdet er hævet fra 0,8 til 2,0%, men fortsat blanding ved 5 °C og curing 7 hhv. 28 dage ved 5 °C.
Resultaterne i tabellen (fig. 11.2) viser en klar forbedring af alle data, som tydeligt ligger over de angivne minimumsværdier og resulterer i meget høje værdier for stivhedsmodul og stabilitet. Det store spring skyldes, at cementen begynder at danne stærkere, beton-/CG-lignende bindinger, foruden at vandfortrængningsevnen er i top. Der er dog en vis risiko for, at et højt cementindhold kan medføre øget risiko for "CG-revner" i belægningen, grundet for stor stivhed. Der er for denne blanding supplerende bestemt stivhedsmodul ved 40 °C, idet det er en tommelfingerregel kendt fra italienske erfaringer med koldblandet asfalt, at hvis revner skal undgås, så må stivheden ved 40 °C maksimalt udgøre 75% af stivheden for samme materiale målt ved 20 °C. I det konkrete tilfælde er forholdet blot 54%, så der burde ifølge italiensk erfaring ikke umiddelbart være kritisk revnerisiko, selvom sydafrikanerne fraråder cementindhold over 1%.

E) Som D, men med 1,4% cement i stedet for 2,0%. I dette tilfælde er cementindholdet droslet ned til et mere moderate niveau. Det ses af fig. 11.2, at denne blanding allerede efter 7 døgns hærdning ved 5°C udviser fuldt ud tilfredsstillende egenskaber.

F) Som B, men med efterfølgende curing ved 20 °C i 7 hhv. 28 døgn. Dette for at afdække om det er selve BSM-blandingen eller curings-temperaturen, som er udslagsgivende.
Det fremgår af fig. 11.2 at blandingen ikke udviser tilstrækkelige data efter 7 døgns hærdning og selv efter 28 døgns hærdning kun lige netop tilfredsstiller kravværdierne. Det er altså med andre ord også den kolde blanding, som influerer på slutresultatet og ikke kun den efterfølgende hærdning. En BSM udlagt i for koldt vejr vil således ikke udvikle fuld styrke trods varmere vejrforhold med tiden.

G) Blanding ved 5 °C, med 0,8% cement, men tillige tilsat 4% kalkfiller for at se om et øget fillerindhold initialt kan forbedre BSM-materialets mørtel så meget, at tilfredsstillende data kan opnås efter 7 hhv. 28 døgns lagring ved 5 °C.
Tabellen (fig. 11.2) viser data omtrent enslydende med data fra blanding F, altså utilstrækkelige data trods forbedret fillerindhold i mørtelen.

Forsøgets konklusion er derfor, som det nu fremgår af den nye UF for BSM-KMA, at der ved materialetemperaturer ned til 10 °C som hidtil skal anvendes et cementindhold på 0,5 – 1,0%, som også anbefalet af SABITA's TG2 manual. Ved temperaturer mellem 5 og 10 °C øges cementindholdet til 1,1 – 1,6%. Der bør ikke arbejdes med BSM ved materialetemperaturer under 5 °C.

Mix	Blande temp. °C	Curing døgn	Curing °C	ITS våd kPa	ITS tør kPa	ITSR %	ITSM 20°C, MPa	ITSM 40°C MPa	ITSM 40/20°C %	Marshall-stabilitet 25°C, kN
Vejl. Krav-værdi					≥ 200	≥ 70	≥ 1.000		Ita krav<75%	≥ 12,0
A.Ref.0,8%Ce.20°C	20	3	40	166	211	79	1459	-	-	14,1
B. Ref 0,8% cement, kold	5	7	5	82	113	73	790	-	-	10,2
	5	28	5	111 (88-122)	138 (130-153)	80	1.052	-	-	10,5
C. 0,5%(b) Wetfix +0,8% cement	5	7	5	82	123 (136)	67 (73)	913	-	-	12,8
	5	28	5	129	150	86	1.071	-	-	12,2
D. 2,0% cement	5	7	5	271	338	80	2.347	1274	54	25,1
	5	28	5	311	407	76	3.226	-	-	28,4
E. 1,4% cement	5	7	5	164	203	81	1.416	-	-	14,6
	5	28	5	214	269	80	1.900	819	43	20,6
F. 0,8%cement curet v/ 20°C	5	7	20	115	149	77	1057	-	-	12,2
	5	28	20	115	205	56	1449	-	-	16,6
G. 0,8%cem + 4,0%kalk	5	7	5	121	153	79	990	-	-	13,0
	5	28	5	147	203	72	1210	-	-	18,8

Fig. 11.2: Oversigt over opnåede testdata for forskellige blandinger og lagringsvilkår.

12. Udenlandske erfaringer

Som det tidligere har været nævnt, er der i fjernere verdensdele som Sydafrika, Nord- og Sydamerika, Canada og Australien etableret gode erfaringer med brug af BSM bærelag til veje. Kun i Europa er der endnu kun begrænsede erfaringer – og her fremtræder de danske erfaringer absolut blandt de mest omfattende og veldokumenterede.

Der har igennem en længere årrække været arbejdet sporadisk med koldblandede asfaltkoncepter i de forskellige europæiske lande, men flere steder uden anvendelse af genbrugsasfalt og nogle med for høje cementindhold, så der opstod revnedannelser, så disse erfaringer kan ikke umiddelbart videreføres som grundlag for det danske koncept.

I Tyskland har man hos BASt på en fuldskala prøvestrækning ("DuraBASt") udført en delstrækning med BSM bærelag og varmblandet asfaltslidlag. I forlængelse heraf er der udført en referencestrækning med varmblandet asfaltbærelag og slidlag.
Begge strækninger var dimensioneret til 1 mio. aksellaster. Belægningerne, som i øvrigt er fuldt instrumenterede med indbyggede sensorer, har i dag - via en trafiksimuleringsmaskine (MLS 10) - fået påført 2,2 mio. belastninger. Strækningen udført med BSM-bærelag udviser herefter blot 4,4 mm sporkøring (hvor acceptkriteriet var 10 mm efter 1 mio. passager) og ingen antydning af revnedannelser. Referencestrækningen udviser faktisk svagt *større* sporkøring, men fremtræder i øvrigt også uden revner.

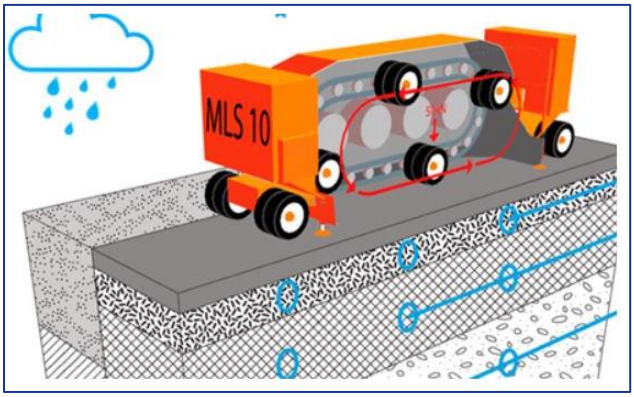


Fig. 12.1: BASt's trafiksimuleringsmaskine (kilde: BASt)

BASt konkluderer på denne baggrund, at BSM sporkøringsmæssigt er ligeværdigt med varmblandet asfaltbærelag. BASt har ikke anvendt et BSM-koncept helt identisk med det danske, men resultaterne viser også her, at BSM-materialer har stor styrke og holdbarhed.
Kilde: Mehdi Kalantari, BASt, Tyskland, 2021: "ASSESSING THE PERFORMANCE OF A COLD RECYCLED PAVEMENT WITH FOAMED BITUMEN UNDER ACCELERATED PAVEMENT TESTING (APT) WITH MOBILE LOAD SIMULATOR (MLS30)".

I Italien har man arbejdet igennem mere end 10 år med en form for koldblandet asfalt, som minder meget om det danske BSM-koncept. Det oplyses fra det italienske universitet i Ancona, at der foreligger gode erfaringer fra bl.a. flere motorvejsstrækninger. Der er i en anden opgave for Vejdirektoratet udført nogle enkeltstående sammenligninger med disse koncepter. Det begrænsede forsøgsomfang synes bl.a. at indikere, at BSM også kan udføres tilfredsstillende med anvendelse af bitumenemulsion som alternativ til skumbitumen. De italienske erfaringer er desuden baseret på anvendelse af gyrator-komprimerede prøveemner i stedet for den danske/sydafrikanske laboratoriemetode med vibrationsindstampning. Sammenlignende laboratorieforsøg viser, at de to metoder ikke giver samstemmende data og at det derfor er vigtigt at have øje for den anvendte indbygningsmetode i laboratoriet, når testdata fra udenlandske kilder efterfølgende sammenlignes med danske BSM-erfaringer.

13. Udbudsforskrift for BSM-KMA

På baggrund af de hidtil opnåede data og erfaringer ved afprøvning af BSM i både fuldskala og i laboratoriet, er der opnået et robust kendskab til BSM-materialers funktionsegenskaber, herunder hvordan materialerne sammensættes og prøves, så der opnås tilfredsstillende egenskaber.

Dette års supplerende prøvninger har medvirket til yderligere konsolidering af de indhøstede erfaringer og danner således grundlaget for den i december 2021 udgivne udbudsforskrift (UF) for BSM-KMA, som nu kan findes på Vejdirektoratets hjemmeside under vejregler. Med den nye udbudsforskrift har landets vejforvaltere – kommuner såvel som staten og private – fået et gedigent værktøj til at kunne udbyde opgaver med bærelag af BSM.

Det er planen, at arbejdet følges op med udarbejdelse af en tilsvarende UF for BSM insitu, snarest muligt i løbet af 2022.

14. Oplæg til videre arbejde

Det synes oplagt, at der i 2022 fortsat holdes fokus på dokumentation af funktionsegenskaber fra udvalgte nye fuldskala BSM-strækninger, såvel som opfølgning på eksisterende BSM-strækninger med nye opboringer og bæreevnemålinger, således at erfaringerne om produktets egenskaber yderligere konsolideres.

Det synes også oplagt, at der gennem et øget samarbejde med bl.a. tyske BASt vil kunne opnås yderligere erfaringer fra instrumenterede BSM-strækninger med indbyggede sensorer, ligesom muligheden for evt. at etablere en dansk teststrækning med indbyggede sensorer om muligt kan overvejes, måske som et led i et af de større infrastrukturprojekter, som forventes gennemført i løbet af den kommende årrække.

Desuden synes det oplagt, at der fortsat er fokus på den videre optimering af BSM's egenskaber gennem afsøgning af nye sammensætningsmuligheder. Dog er det fortsat vigtigt samtidigt at fastholde fokus på, at BSM er et relativt simpelt sammensat og produceret materiale, således at den høje grad af bæredygtighed og det gunstige prisniveau i praksis kan bibeholdes.

I forlængelse af publiceringen af den i 2021 udarbejdede UF for BSM-KMA er der nu åbnet op for, at landets bygherrer og vejforvaltere kan udbyde BSM-opgaver på standardiseret vis. Det er derfor også planlagt, at der i 2022 skal udarbejdes en UF for BSM-insitu. I denne forbindelse vil det derfor prøvningsmæssigt være oplagt bl.a. at se nærmere på insitu fræse-/blandemaskinernes fremstilling af asfaltgranulat og med prøvningsserier bl.a. fastslå og dokumentere den med denne metode opnåede ensartethed i det producerede BSM-materiale.

Endeligt synes det oplagt, at der i forlængelse af vejregelarbejdsgruppe Dimensionering's arbejde med optimering af belægningsdimensionering med BSM også bliver udarbejdet et katalog for standard-opbygninger med BSM til brug på de mindre belastede trafikkategorier.