Dokumentation af BSM i 2020

Samlet oversigt over BSM-prøvning for Vejdirektoratet

21. december 2020

TEKNOLOGISK INSTITUT

TEKNOLOGISK
INSTITUT

Dokumentation af BSM i 2020

Samlet oversigt over BSM-prøvning for Vejdirektoratet

Rekvirent:
Vejdirektoratet
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.: 2008194 - H
Versionsnr.:01

21. december 2020

Forsidefoto: Færdig BSM-belægning med afsluttende SMA-slidlag på Rennebjergvejs nordlige del (Kilde: SR-Gruppen).

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 4
2. Baggrund 5
3. Dokumenterede BSM-strækninger 9
4. Udførelsen 11
5. Laboratoriedata 15
   5.1. Genbrugsasfalten 15
   5.2. BSM-proportionering og mix-design 17
6. Laboratorieprøvning af BSM 19
   6.1. BSM prøveudtagning og forberedelse 19
   6.2. Referencedensitet 19
   6.3. Opnåede densiteter og hulrum 21
   6.4. Vandfølsomhed 21
   6.5. Stivhedsmodul og bæreevne 21
   6.6. Sporkøringsmodstand 23
   6.7. Triaxial-test 24
   6.8. TSRST revnemodstand 27
   6.9. Ældningsresistens (PAV) 29
   6.10. Bearbejdelighed (Gyratorkomprimering) 31
7. Planslibsanalyse af BSM 33
8. BSM fremstillet af knust asfalt og -beton 38
   8.1. Knust beton i forskellige fraktioner 38
   8.2. BSM-blanding af 50% knust genbrugsasfalt 0/32 og 50% knust beton 0/40 mm 39
   8.3. Vandfølsomhed 39
   8.4. Stivhedsmodul 39
   8.5. Sporkøringstest 39
   8.6. Vurdering af potentialet for BSM på blanding af knust asfalt og beton 41
9. Konklusion på BSM 2020-dokumentation 42
10. Forslag til det videre arbejde 43

TEKNOLOGISK
INSTITUT

1. Indledning

Efter aftale med Henrik Majlund, Vejdirektoratet, har Teknologisk Institut, Byggeri og Anlæg i løbet af 2020 gennemført de i denne rapport beskrevne opgaver med opfølgning, prøvning og dokumentation af den nye bærelagstype BSM (Bitumen-Stabiliseret Materiale). Laboratorieprøvningen er gennemført som en del af Teknologisk Instituts kontraktopgave for Vejdirektoratet om BSM-laboratorieydelser inkl. udredning og afrapportering, 2020. Dette arbejde er iværksat med et mål om at kunne benytte erfaringerne som grundlag for at kunne udarbejde en vejregel for BSM, så materialet også vil kunne udbydes og anvendes bredt af landets mange kommuner og vejejere.

Den i denne rapport omtalte dokumentation for laboratorieprøvning af BSM er dels baseret på data fra en række danske fuldskala-udlægninger i 2020 og dels fra supplerende laboratorieblandinger for afdækning af specifikke forhold. Fuldskala-strækningerne er gennemført af de to entreprenørfirmaer SR-Gruppen og Arkil, som hver benytter deres fremgangsmåde. SR-Gruppen benytter det såkaldte KMA-princip med et mobilt blandeanlæg, hvor Arkil benytter in-situ stabilisering med en speciel fræse-/blandemaskine. Begge principper er nærmere omtalt i det efterfølgende afsnit 2.

Teknologisk Institut har for Vejdirektoratet, i forlængelse af de udførte BSM-arbejder, udarbejdet en række dokumentationsrapporter for hver enkelt af dette års gennemførte og laboratoriemæssigt dokumenterede fuldskala-strækninger. Nærværende rapport er således en overbyggende slutrapport for årets BSM-erfaringer.

De enkelte BSM-strækningers delrapporter kan ligesom denne rapport findes på Teknologisk Instituts hjemmeside, som også rummer rapporterne fra de indledende erfaringer i 2019.
Rapporterne er publiceret på Teknologisk Instituts hjemmeside:
https://www.teknologisk.dk/projekter/koldblandet-asfalt-baerelag-bsm/41567?cms.query=BSM
Rapporterne vil ligeledes i nær fremtid kunne findes på Vejdirektoratets hjemmeside.

2. Baggrund

Der er i Danmark i de seneste år sat øget fokus på at nedbringe vejsektorens CO_2-aftryk og en samtidig søgning efter konstruktionsløsninger med en høj grad af cirkulær ressourceøkonomi. Asfaltindustrien har i væsentlig grad bidraget med en generelt øget anvendelse af gammel genbrugsasfalt i den nye, varme asfalt. I forlængelse af dette har Vejdirektoratet desuden ønsket at afprøve og dokumentere et i Danmark nyt koncept for fremstilling af bærelagsmaterialer, BSM, hvilket er en forkortelse for Bitumen-Stabiliseret Materiale.

BSM fremstilles typisk af 100% genbrugsasfalt, som i en uopvarmet blandeproces og uden forudgående tørring blandes med ca. 2-2,5% bitumen. For at opnå en god dispergering af det relativt lille bindemiddelindhold, bliver den varme bitumen umiddelbart inden dosering i blanderen skummet op med vand. Der tilsættes in-line, under tryk, en lille mængde vand (typisk ca. 2,3% af bitumen). Dette bevirker, at den traditionelle, varme vejbitumen skummer op og derved får et betydeligt større volumen, som sikrer en god dispergering og smøreeffekt i BSM-blandingen.

Fig. 2.1: Princip for skumbitumen in-line fremstilling (kilde: Wirtgen)

Der tilsættes desuden ca. 0,8-1,0% klæbeaktiv filler, typisk cement. Cementmængden må dog ikke blive væsentligt over 1%, idet man ikke ønsker at få cement-lignende bindinger, som efterfølgende kan give anledning til revner i det færdige BSM-produkt. Endelig tilsættes under den uopvarmede BSM-blandeproces en lille mængde procesvand, som skal sikre tilstrækkelig smøreeffekt i materialet under udlægningen. Den friskproducerede BSM skal normalt udlægges og komprimeres indenfor 4 timer fra produktionen, da BSM-materialet herefter tørrer ud og hærder op. Umiddelbart efter afsluttet komprimering på vejen kan laget trafikeres med lastbiler. Normalt afdækkes laget dog med varmblandet asfalt (eller på små veje evt. OB), for at sikre tilstrækkelig slidstyrke og vridningsmodstand i overfladen.

Slutproduktet bliver et "punktsvejset" eller punktvis bundet, bitumenstabiliseret bærelagsprodukt, som falder ind i en ny kategori af bærelagsmaterialer, som en mellemting mellem stabilt grusbærelag og varmblandede asfaltbærelag. BSM kan principielt også fremstilles af andre tilslagsmaterialer end genbrugsasfalt, f.eks. blandinger af knust asfalt og knust beton, eller andre egnede tilslagsmaterialer. I den indledende screening og dokumentation af BSM-materialers egenskaber i 2019-20 er der dog i praksis udelukkende fokuseret på BSM fremstillet af 100% genbrugsasfalt.

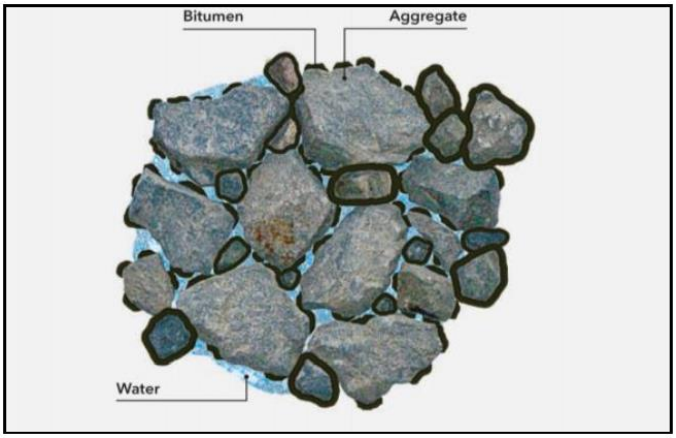

Fig. 2.2: Principskitse for det punktvis sammenbundne BSM-bærelagsmateriale. (Kilde: SABITA TG2 manual, BSM, 2020).

BSM-konceptet er igennem mere end 10 år succesfuldt anvendt i fjernere destinationer som Sydafrika, Sydamerika og USA, men er hidtil kun meget begrænset anvendt i Europa og dermed ikke dokumenteret under danske klima- og vejbygningsmæssige forhold før denne dokumentationsopsamling. Der anvendes specielle maskiner/anlæg til fremstilling af BSM. Disse fremstilles primært af maskinproducenten Wirtgen, som også fremstiller specielt laboratorieudstyr til mix-design og dokumentation af BSM. De mest veldokumenterede BSM-erfaringer stammer fra Sydafrika, men BSM er f.eks. også med succes benyttet på et stort motorvejsprojekt ved Sao Paolo, Brasilien (Ayrton Senna Highway med 200.000 ÅDT).

BSM kan principielt fremstilles på to forskellige måder. Enten kan BSM fremstilles på et mobilt blandeanlæg af forud affræset/knust asfalt Anlægget opstilles nær udlægningsstedet på en plads hvor den affræsede/knuste asfalt også er opstakket. Dette princip kaldes BSM-KMA, hvor KMA er en forkortelse for Kold-Mix-Anlæg. Alternativt kan BSM fremstilles in-situ med en speciel BSM fræse/blandemaskine, som i én arbejdsoperation fræser den gamle asfalt op og samtidigt tilsætter og indblander skumbitumen, hvorefter det fremstillede BSM-produkt udlægges med en bagvedkørende asfaltudlægger.

Uanset hvilket af de to fremstillingsprocesser som anvendes, betyder den uopvarmede blandeteknik og den høje anvendelse af lokale genbrugsmaterialer, at der ikke skal bruges energi til tørring og opvarmning af stenmaterialer, som det f.eks. er tilfældet for varmblandet asfalt. Desuden betyder anvendelsen af 100% genbrugsasfalt, at der ikke er behov for import og langdistancetransport af råvarer til BSM-fremstillingen. Alt i alt giver dette BSM-materialet en meget interessant bæredygtighedsprofil og et meget lavt CO_2-aftryk, sammenlignet med traditionel varmblandet asfalt.

Fig. 2.3: BSM har en interessant, "grøn" bæredygtighedsprofil

BSM-KMA fremstilles som tidligere nævnt på et specielt KMA-anlæg. Figur 2.4 viser en principskitse for opstilling af det mobile BSM-blandeanlæg med tilhørende bitumentankvogn og vandtankvogn samt cementsilo eller -tankvogn. Frontlæsseren fylder det opstakkede genbrugsasfaltmateriale i anlæggets doseringskasse, hvorefter det via doseringsbånd føres til den to-akslede tvangsblander. Skumbitumen tilsættes via doseringsanlæg samtidigt ned i blanderen, ligesom den klæbeaktive filler (typisk cement) doseres ned i blanderen. Det færdige BSM-materiale føres via transportbånd direkte til ventende lastbil, eller kan evt. opstakkes til senere afhentning (indenfor ca. 4 timer).

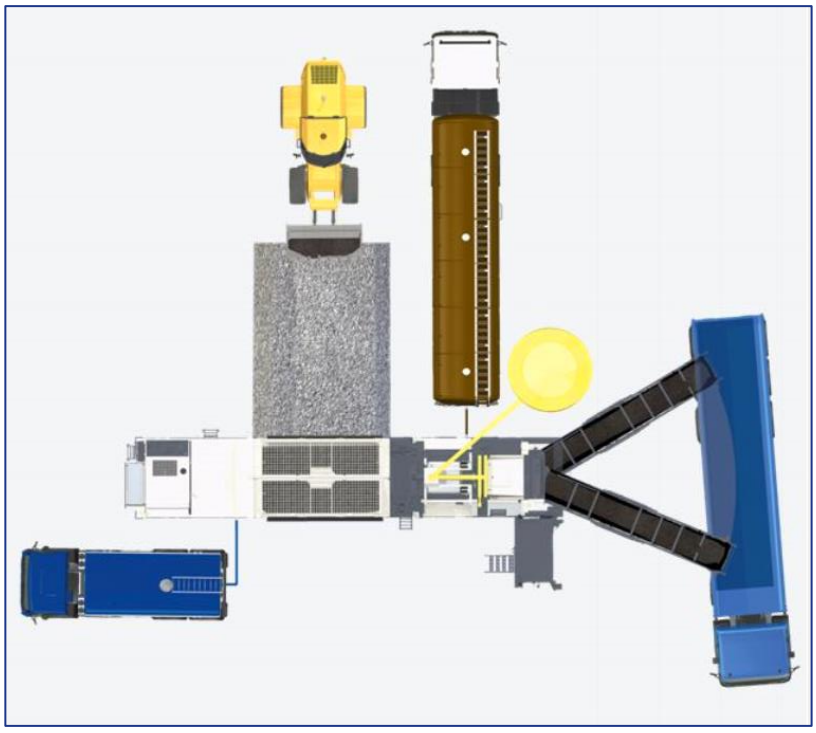

Fig. 2.4 Opstilling af BSM-KMA anlæg. (Kilde: Wirtgen)

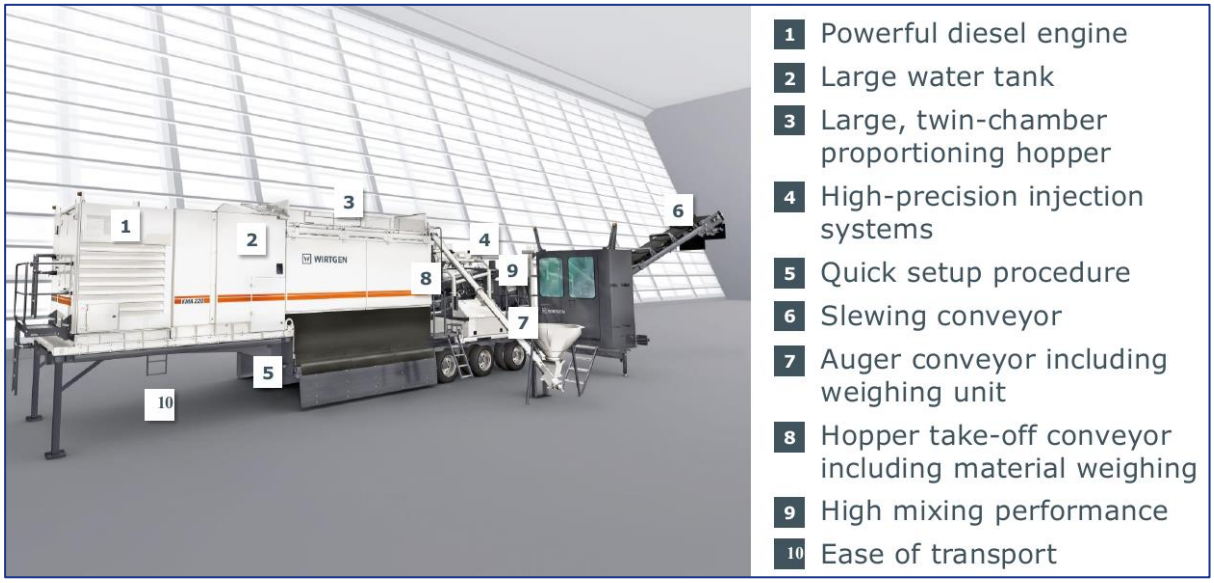

Fig. 2.5: Wirtgen BSM-KMA anlæg – detaljer på selve blandeanlægget (Kilde: Wirtgen).

BSM-In-situ fremstilles direkte på vejen med en speciel Wirtgen CRi-maskine, som i samme arbejdsoperation både opfræser den gamle asfalt og BSM-blander det opfræsede asfaltmateriale med skumbitumen. Ved BSM-In-situ arbejdet benyttes et længere "maskintog" (fig. 2.6) bestående af (1) cementspreder (klæbeaktiv filler), (2) vandtankvogn (procesvand), (3) bitumentankbil, (4) Wirtgen CRi-fræse/mixer BSM-maskine (hvor den netop affræsede asfalt stabiliseres med en lille mængde varm, opskummet bitumen), (5) asfaltudlægger (udlægger den netop producerede BSM i korrekt mængde og profil) samt efterfølgende både (6) glatvalset vibrationstromle og (7) tung gummihjulstromle for at sikre god komprimering i hele lagets dybde. Afslutningsvis udlægges typisk et varmblandet asfaltslidlag, efterfulgt af ny vejmarkering.

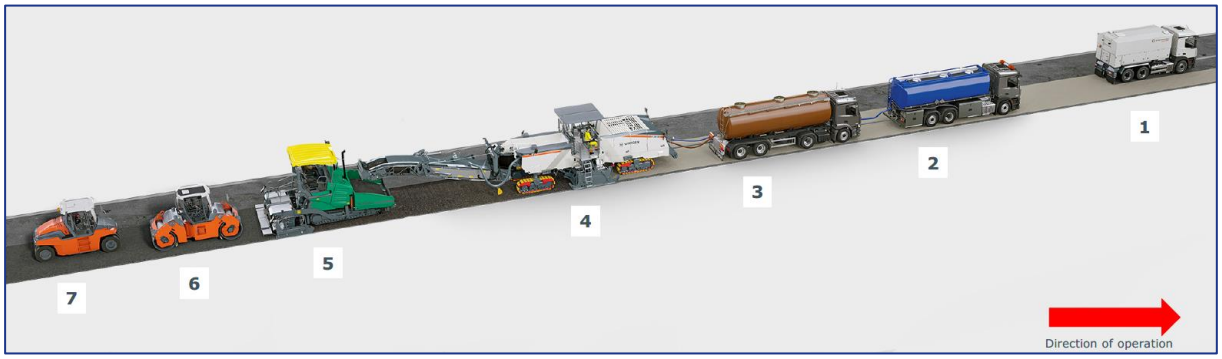

Fig. 2.6: "Udlægningstog" for in-situ BSM-produktion og udlægning (kilde: Wirtgen).

Fig. 2.7: Wirtgen CRi BSM-in-situ maskine.
(Kilde: Wirtgen).

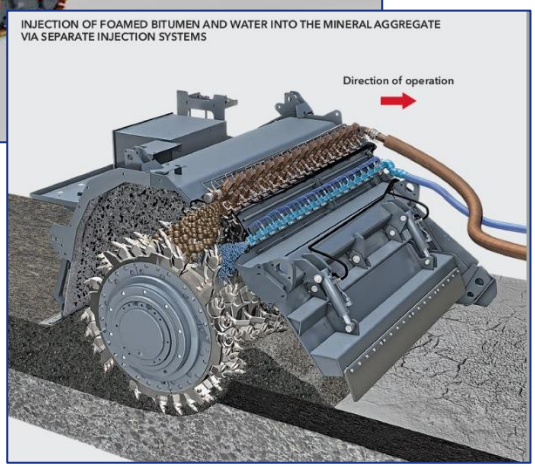

Fig. 2.8: Princip for skumbitumen- og vanddosering direkte ved opfræsningen af den gamle asfalt.
(Kilde: Wirtgen).

3. Dokumenterede BSM-strækninger

Der blev i 2019 udført en enkelt prøvestrækning med BSM, som indgik i Vejdirektoratets prøvnings- og dokumentationsarbejde. Der er desuden udført laboratorieprøvning og dokumentation af adskillige BSM-strækninger i 2020. Et samlet overblik fremgår af nedenstående oversigt:

Nr.	Udførelse	Strækning	Bygherre	Entreprenør	BSM-type	Genbrugs-asfalt
1	September 2019	Vådagervej	Næstved Kommune	SR-Gruppen	KMA	0/16 knust slidlags-GB
2	Maj 2020	Rennebjergvej N	Slagelse Kommune	SR-Gruppen	KMA	0/16 knust genbrug
3	Juni 2020	Rennebjergvej S	Slagelse Kommune	Arkil	In-situ	CRi-fræs + 0/16 kn. GB
4	Juni 2020	Ørbækvej	Faaborg-Midtfyns Kommune	Arkil	In-situ	CRi-fræs
5	Juli 2020	Buesøvej	Lejre Kommune	SR-Gruppen	KMA	0/32 kn. genbrug
6	August 2020	Buskmosevej	Sønderborg Kommune	SR-Gruppen	KMA	0/40 fræs + 0/32 kn.GB
7	September 2020	TSA 54, M40 Fyn	Vejdirektoratet	SR-Gruppen	KMA	Fræs lok. 0/32
8	September 2020	M80 Hjallerup	Vejdirektoratet	Arkil	In-situ	CRi-fræs

Tabel 3.1: Oversigt over udførte BSM-strækninger dokumenteret i nærværende rapport.

For mere detaljerede oplysninger om de enkelte strækninger henvises i øvrigt til de udarbejdede delrapporter for hver af de enkelte strækninger. Disse rapporter kan bl.a. findes på Teknologisk Instituts hjemmeside (se link i afsnit 1 i denne rapport).

På efterfølgende oversigtskort (fig. 3.1) kan de enkelte strækningers geografiske placering ses.
Som det ses af figuren, ligger BSM-strækningerne faktisk spredt over det meste af Danmarkskortet.

Fig. 3.1: Oversigt over BSM-strækningernes geografiske placeringer. BSM-KMA strækninger er markeret med blå farve, BSM-in-situ strækninger er markeret med grøn farve.

4. Udførelsen

Ved BSM-KMA-strækningerne (1), (2) og (5) er belægningsopbygningen udført ved at den gamle belægning (tynd asfalt, grus/makadam og øverste underbund) først er blevet gennemfræset og genkomprimeret som et nyt, homogent bærelag. I nogle tilfælde er dette lag samtidigt stabiliseret med kalk og/eller cement. Typisk er vejen ved samme lejlighed sideudvidet med op til 0,5 m i hver side.

Fig. 4.1: Gennemfræsning og homogenisering af den gamle vejbelægning (Her Buesøvej, Lejre).

Herefter blev der udlagt BSM-KMA, produceret på tilført, lokal genbrugsasfalt (GMA). Til sidst blev der på (2) og (5) udlagt et SMA-slidlag af varmblandet asfalt. Strækningen (1) blev dog som første forsøgsstrækning ikke påført et slidlag med det samme, idet man ønskede at vurdere BSM-overfladens robusthed overfor de tunge landbrugskøretøjer.

Fig. 4.2: Produktion af BSM på SR-Gruppens KMA-anlæg (Her ved Rennebjergvej-produktionen).

BSM-KMA-strækningen (6) er fremstillet efter samme koncept, men her er den gamle asfalt først affræset og lagt på lager ved strækningen før det ubundne makadam-underlag og det øverste af råjorden blev gennemfræset og kalk/cementstabiliseret. Herefter er der udlagt to lag (15 + 10 cm) BSM-KMA, hvor det nederste lag samt dele af det øverste lag er produceret på den fra strækningen affræ-

sede asfalt (uden knusning/opsigtning). Det øverste BSM-KMA-lag blev hovedsageligt produceret af tilført 0/32 mm knust genbrugsasfalt. Der blev afsluttet med et nyt varmblandet SMA-slidlag med polymermodificeret bitumen.

Fig. 4.3: Udlægning af BSM-KMA i fuld vejbredde med asfaltudlægger med højkomprimeringsstrygejern (Her på Buskmosevej).

BSM-KMA-strækningen (7) blev fremstillet med BSM-KMA, produceret af den lokalt affræsede asfalt. Underlaget for denne var en variant af BSM-KMA produceret af lokalt, stabiliseret grus. Der blev også her afsluttet med et varmblandet SMA-slidlag.

Fig. 4.4: Udlægning af BSM-KMA på motorvejsrampe ved Vissenbjerg, Fyn.

BSM-in-situ strækningen (3) blev produceret ved at der på den gamle vej først blev udlagt 4 cm tilført knust genbrugsasfalt samt udspredt cement. Herefter blev der in-situ BSM-stabiliseret i 10 cm dybde, således at de øverste 6 cm af den gamle asfalt blev stabiliseret sammen med den tilførte genbrugsasfalt. Ved BSM-udlægningen blev vejen samtidigt sideudvidet med 2x25 cm. Der blev afsluttet med et nyt, varmblandet asfaltbeton-slidlag (AB 8t).

Fig. 4.5: Maskinparken i aktion ved BSM-in-situ udlægning på Rennebjergvejs sydlige del. Vandtankvogn, bitumentankvogn, Wirtgen CRi BSM-maskine, asfaltudlægger samt skjult bag asfaltudlæggeren tillige glatvalset vibrationstromle og tung gummihjulstromle.

BSM-in-situ-strækningen (4) blev produceret ved BSM in-situ stabilisering af de øverste 12 cm gammel asfaltbelægning. Der blev afsluttet med et nyt, varmblandet SMA-slidlag i 80 kg/m2.

Fig. 4.6: Close-up af Arkil's Wirtgen Cri BSM-maskine.

Fig. 4.7: BSM-in-situ udlægning om natten på Ørbækvej ved Ferritslev.

På BSM-in-situ-strækningen (8) var der efter ca. 20 år opstået en del revner i det gamle asfaltbærelag. Derfor blev slid- og bindelaget affræset, hvorefter GAB-laget blev BSM-stabiliseret in-situ. Herefter blev der afsluttet med nyt ABB-bindelag og SMA-slidlag, som normalt for motorveje.

Fig. 4.8: BSM er i det seneste år afprøvet på vejkategorier lige fra småveje som Vådagervej i Slagelse til Frederikshavns-motorvejen, M80, hvor BSM på en delstrækning nu har erstattet GAB-bærelaget.

5. Laboratoriedata

I de følgende underafsnit er angivet nogle hovedtræk og uddrag fra de detaljerede strækningsrelaterede delrapporter.

5.1. Genbrugsasfalten

Produktion af BSM har i denne første og indledende fase udelukkende været fokuseret på fremstilling af BSM ud fra knust/fræset genbrugsasfalt og skumbitumen, selvom konceptet i praksis også åbner mulighed for anvendelse af andre granulære tilslagsmaterialer og anvendelse af bitumenemulsion i stedet for skumbitumen.

I de indledende laboratorieblandinger af BSM i 2019 og ved de første BSM-KMA-strækninger blev der anvendt 0/16 mm genbrugsasfalt, idet dette typisk er den mest tilgængelige fraktion af knust genbrugsasfalt, som er tilgængelig på de danske asfaltfabrikker. Efterfølgende er der i BSM-KMA produktionen også anvendt en større 0/32 mm knust genbrugsasfaltvariant. Denne størrelse er typisk for lagre af genbrugsasfalt hos entreprenører og nedbrydningsfirmaer, som benytter materialet til erstatning for stabilt grus.

Analyse Genbrugsasfalt (GMA) 0/32 mm,	GMA 0/32 m/bitumen ("uren")	KAS 0/31,5 samt KAB I og II jf. AAB, 2011 (sammenlign)	GMA 0/32 ekstraheret ("ren")
SIGTEANALYSE (DS/EN 933-1) Sigte (mm)	Gennemfald (%)	Gennemfald (%)	Gennemfald (%)
63	100	100	
31,5	100	75 – 99	
25	100		
22,4	94		100
16	85	50 - 90	97
11,2	76		90
8	63	30 - 75	82
5,6	47		70
4	36	15 - 60	59
2	21		45
1	12	2 - 35	36
0,5	5		28
0,25	2		19
0,125	1		13
0,063	0,4	0 - 9	10,3

Tabel. 5.1.1: Eksempel på sigteanalyse af genbrugsasfalt 0/32 hhv. "uren", inklusive bitumen (t.v.) og "ren", efter ekstrahering af bitumen med opløsningsmiddel (t.h.). I midterste kolonne er supplerende angivet de gældende vejregelkrav for knust asfalt (KAS) samt knust asfalt og beton (KAB).

Erfaringen fra 2020 er, at genbrugsasfalt normalt vil være velegnet til BSM-produktion, hvis den overholder kravene anført i Vejdirektoratets AAB for ubundne bærelag af knust asfalt og beton, med kategorierne KAS 0/16 hhv. KAS 0/32, samt KAB I og II.

I praksis er der typisk ikke den store forskel på 0/16 mm og 0/32 mm knust genbrugsasfalt, hvis man betragter de "rene", udvaskede kurver. Det er imidlertid de "urene" sigtekurver, som benyttes til BSM,

idet den gamle asfalt betragtes som "black rock" stenmateriale, hvor et agglomerat af sten, filler og bitumen betragtes som én tilslags-partikel.

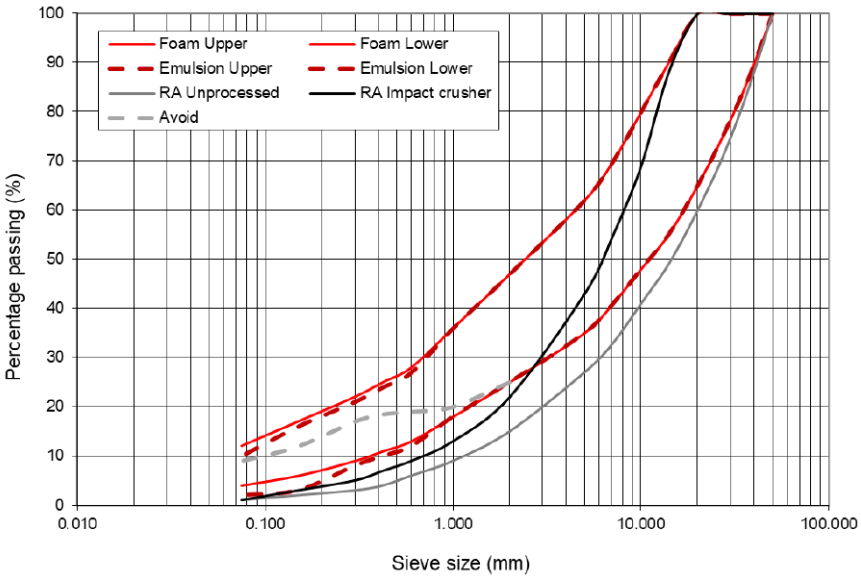

Fig. 5.1.1: Anbefalede grænseværdier for BSM fremstillet med skumbitumen (foam) og bitumen-emulsion, samt idealkurver for affræset asfalt (RA unprocessed) og for knust genbrugsasfalt knust med slagknuser (RA impact crusher). (Kilde Sabita TG2 BSM Manual, 2020).

Ifølge de sydafrikanske BSM-eksperter og Wirtgens vejledninger om BSM bør det forud for BSM-produktion sikres, at genbrugsasfalten ikke er så frisk, at den gamle bitumen har nævneværdig klæbeevne i kold tilstand. Dette tjekkes ved at man i laboratoriet foretager Marshall-indstampning ved 70°C af prøvelegemer af genbrugsasfalt. Prøvelegemerne opdeles i to sæt, hvor det ene lagres tørt, mens det andet lagres 24 timer i vandbad ved 25°C. Herefter udføres spaltetrækstyrketest på våde og tørre prøvelegemer og forholdet beregnes som vandfølsomheden. Wirtgen anbefaler at vandfølsomhedstallet er lavt, samt at den våde spaltetrækstyrke ikke overskrider 100 kPa. Det formodes at kravet om minimal klæbeevne er at sikre, at BSM'en fungerer som et punktvis bundet materiale og ikke delvis agerer som en sammenbundet asfalt. Når BSM kun er punktvis bundet, vil der (teoretisk set) ikke kunne forekomme gennemslagsrevner igennem laget. De danske er erfaringer viser, at knust genbrugsasfalt nu og da kan have lidt højere værdier, uden at dette har indikeret reelle problemer, men det bør formodentligt undgås f.eks. at lave BSM af helt "frisk" genbrugsasfalt, f.eks. fra overskudsproduktion af varmblandet asfalt.

Der er for en del af strækningerne gennemført både for-analyse af genbrugsasfalten og gennemført mix-design af BSM-recepten. I disse tilfælde udføres indledningsvis (foruden sigteanalyse og vandfølsomhed, som ovenfor nævnt) modificeret Proctor-forsøg for bestemmelse af det optimale vandindhold, samt den maksimale tørdensitet.

5.2. BSM-proportionering og mix-design

BSM fremstilles typisk af 100% genbrugsasfalt, som tilsættes 0,5 – 1,0 % klæbeaktiv filler i form af cement eller evt. hydratkalk. Typisk tilstræbes i praksis 0,8% cement for at kunne sikre, at den maksimale grænse på 1,0% ikke overskrides. Bliver cementindholdet for stort, kan der være risiko for at der opstår cement-bindinger i asfalten, som derved kan risikere at udvise svindrevnedannelser. BSM er således et specielt produkt, som både bitumen- og cementindholdsmæssigt afviger fra andre vejbygningsmaterialer.

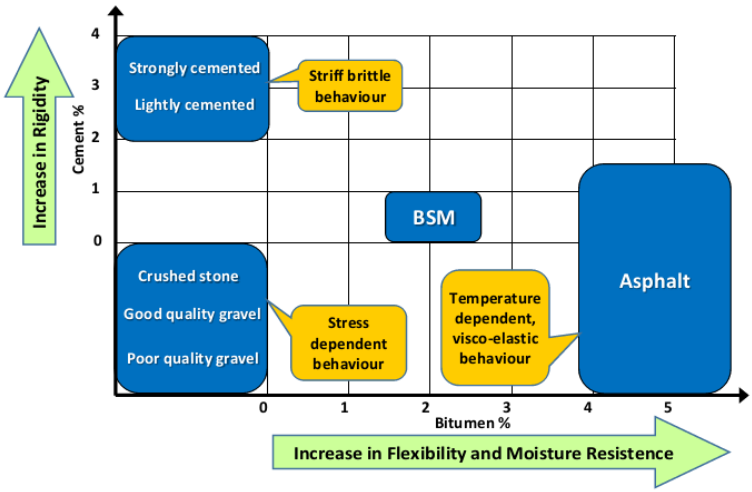

Fig. 5.2.1: BSM's sammensætningsmæssige placering i forhold til asfalt og CG.

Der er på flere af BSM-KMA strækningerne udført et forudgående mix-design, hvor BSM-materialets egenskaber ved 4-5 forskellige bindemiddelindhold er afdækket. I praksis viser disse mix-designs dog alle, at BSM-konceptet er relativt ufølsomt for materialevariationer.

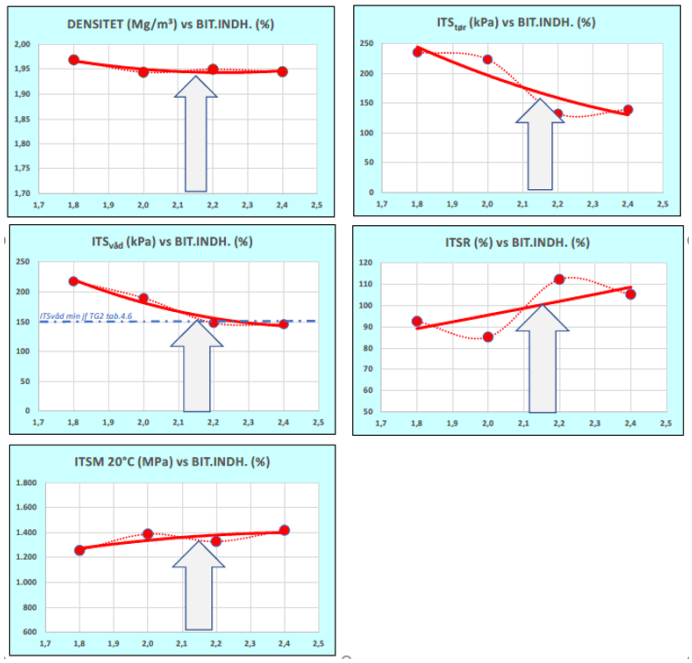

Fig. 5.2.2: Eksempel på mix-design kurver for BSM-optimering

Typisk fremstilles BSM med et skumbitumenindhold på 2,0 – 2,3%. Skumbitumen fremstilles af standard vejbitumen 70/100 eller 40/60 med en temperatur på 175°C og 2,8% skumnings-vand. Skumningsvandmængden fastlægges ved laboratorieforsøg hvor ekspansionsraten og halveringstiden af bitumenskum er afgørende for temperatur og skumnings-vandmængde.

Fig. 5.2.3 Bitumenskum ekspanderer

Fig. 5.2.4: Laboratorie-bitumen-skummer

Der tilsættes desuden procesvand i en mængde, så man i den færdige BSM har et vandindhold på ca. 2% under Proctor-vandindholdet W_{opt} ved optimal tørdensitet (modificeret Proctor). I praksis har erfaringen vist, at det nu og da kan være hensigtsmæssigt for komprimeringen at hæve dette vandindhold en anelse, men med stort fokus på, at det samlede vandindhold ikke overskrider W_{opt}. Der henvises til BSM 2019-rapporten for flere detaljer om skumningsforsøg og optimering.

Specielt i forbindelse med BSM-in-situ kan det være en udfordring, hvis der forud skal gennemføres et mix-design, da det anvendte genbrugsmateriale jo først skabes direkte under opfræsningen og da erfaringer fra forsøg gennemført i 2020 synes at indikere, at kornkurven for et CRi-fræset materiale ikke svarer eksakt til hvad der opnås ved en eventuel forudgående prøvefræsning af samme asfalt med en traditionel 0,5-, 1-, eller 2m-fræsemaskine. BSM-konceptet synes til gengæld at være så robust, at man som udgangspunkt oftest kan anvende nogle mere generelle betragtninger – i hvert fald så længe det drejer sig om BSM fremstillet på baggrund af opfræset og/eller knust genbrugsasfalt.

6. Laboratorieprøvning af BSM

6.1. BSM prøveudtagning og forberedelse

Det har i forbindelse med BSM-laboratoriearbejdet vist sig nødvendigt at foretage nogle justeringer og præciseringer af de anvendte metoder. Der vil blive udarbejdet nye prVD-prøvningsforskrifter til brug ved BSM-prøvning. Blandt ændringer kan nævnes curing-processen, hvor der anvendes en curing-procedure, hvor prøvelegemer efter fremstilling cures i minimum 72 timer ved 40°C i et ventileret varmeskab. Oprindeligt var der i den sydafrikanske TG2-manual specificeret eksakt 72 timer, hvilket ville betyde, at BSM kun kunne udføres på enkelte ugedage, hvis efterfølgende weekendarbejde i laboratoriet skulle undgås. Desuden er det foreskrevet (anbefalet) i den sydafrikanske manual, at BSM-prøver skal indstampes/vibreres/tromles inden der er gået 4 timer fra udtagningen af den friskproducerede BSM. Begrænsningen skyldes dels, at der kan ske optørring af vand, dels cementens effekt. Det har imidlertid vist sig ved forsøg, at hvis blot BSM udtages og opbevares i fyldte plastspande med helt tætsluttende låg, så vil lagring i op til 24 timer ikke have markant indflydelse på de efterfølgende opnåede laboratorietestdata (se evt. detaljer omtalt i delrapporten fra Buskmosevej i Sønderborg kommune). BSM udtages i øvrigt mest hensigtsmæssigt enten ved udlæggermaskinens snegle, eller (hvis KMA) på lastbilslæs ved KMA-anlægget.

6.2. Referencedensitet

Sabita's TG2 manual for BSM og Wirtgens laboratoriehåndbog for BSM beskriver, at komprimering af prøvelegemer skal foretages med vibrationsindstampning af Ø150 mm prøvelegemer, som skal indbygges i 3 lag (dog kun 2 til de tyndere legemer for stivhedsmodulbestemmelse). Prøverne skal med den specielle Wirtgen vibrationshammer vibreres indtil der opnås en densitet svarende til den maksimale tørdensitet fra modificeret Proctor-forsøg på det anvendte genbrugsmateriale. Der findes dog en time-out funktion, som default-mæssigt sættes til max. 20 sekunder pr. lag.

Denne fremgangsmåde, hvor der indbygges indtil en fast densitet er opnået, i stedet for at komprimere indtil en bestemt energi er anvendt, virker ikke umiddelbart logisk. Det har da også i praksis vist sig at denne metode er utilstrækkelig og ved anvendelse af densiteten fra vibrationsforsøgene er der set urealistisk høje komprimeringsdata fra Troxler isotop-sonde komprimeringskontroller fra strækningerne. Derfor blev det hurtigt besluttet, at der parallelt med vibrationsindstampningerne samtidigt skulle fremstilles Marshall-indstampede prøver med henholdsvis 2x50 og 2x75 slag. Marshall-indstampningerne har da også resulteret i mere konsistente densiteter og efterfølgende laboratoriedata, end det gør sig gældende ved de standardmæssigt vibrerede kerner. Marshall-metoden har dog den ulempe, at der kun anvendes Ø100 mm forme, så metoden er ikke ideel til 0/32 eller 0/40 mm BSM-produkter. Det blev på denne baggrund besluttet at gennemføre et laboratoriestudie, hvor der blev anvendt en række forskellige vibrationsindbygninger, alle med fast indbygningsenergi.

Fig. 6.2.1: Wirtgen vibrationsindstamper til BSM

Der blev ved dette forsøg anvendt samme 0/32 mm genbrugsasfalt som anvendt på Buesøvej i Lejre kommune. Ved at sigte efter at komprimeringen på Buesøvej skulle resultere i et typisk komprimeringsniveau på middel 95% og laveste enkeltværdi 92% blev det besluttet, at der ved fremtidige BSM-arbejder efter 2020 skal anvendes en referenceindbygning med 3 lag á 40 sekunders vibration (til de tyndere stivhedsmodul-kerner 2 lag á 40 sekunder).

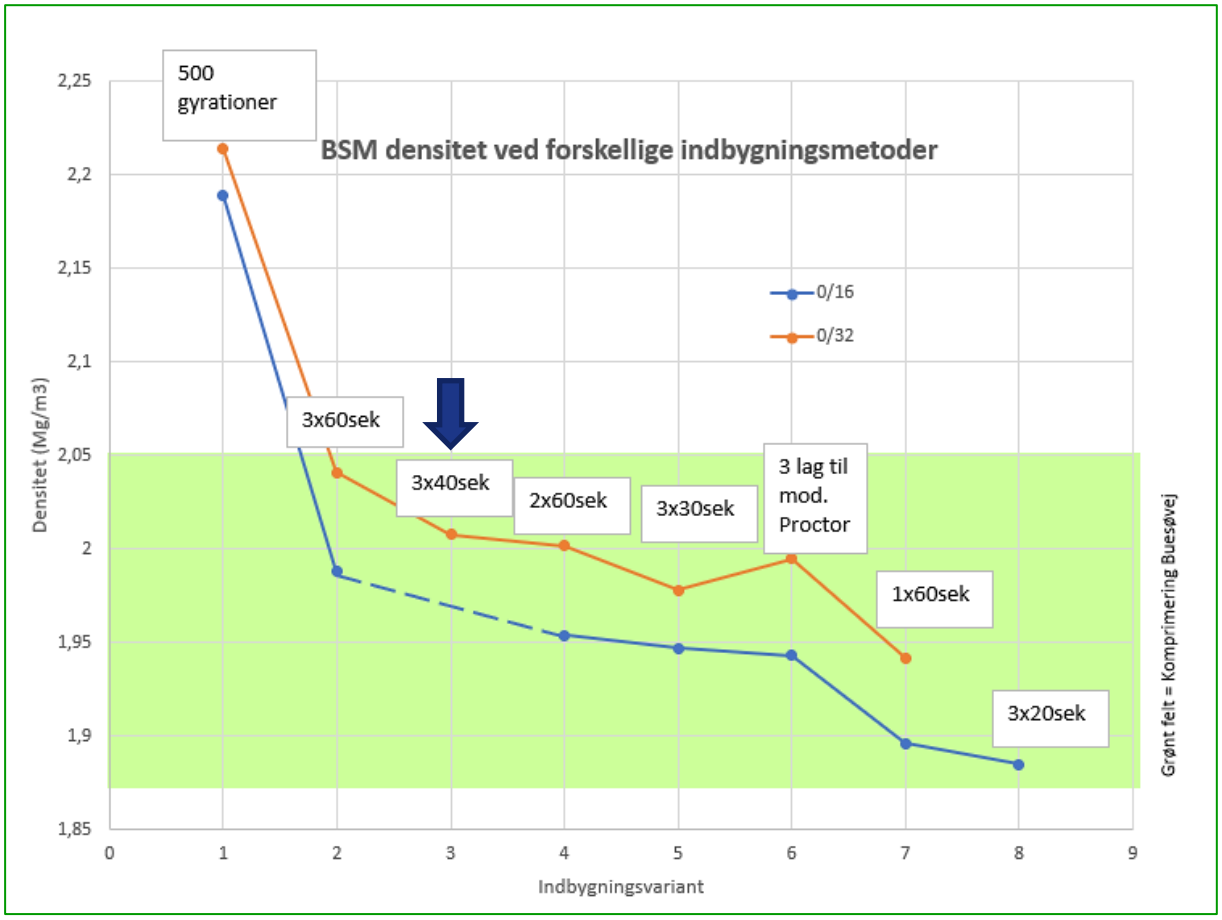

Fig. 6.2.2: Referencedensitet opnået ved forskellige komprimeringsenergier/-metoder på to forskellige BSM-produkter med hhv. 16 og 32 mm maksimalkornstørrelse.

Figur 6.2.2 viser de opnåede densiteter ved forskellig indbygning af samme BSM-varianter, henholdsvis med 0/16 mm genbrug fra Gammelrand og 0/32 mm genbrug som anvendt på Buesøvej. Det grønne felt viser komprimeringsniveauet fra fuldskalaudlægning på Buesøvej. Det ses, at vibration med 3x40 sekunder omtrentligt vil give 0/32-materialet et komprimeringsniveau som ønsket (komprimeringsgrad middel/min 95/92 %). Som yderligere reference for særdeles kraftig laboratorieindbygning er anvendt gyratorindbygning med 500 gyrationer i Ø100 mm form. Dette er dog absolut ikke et niveau som kan forventes genfundet i marken.

6.3. Opnåede densiteter og hulrum

Der er ved de gennemførte BSM-produktioner udført densitetsbestemmelse på såvel standard-vibrerede legemer som Marshall-indstampede legemer, hvor Marshall typisk har givet højest densitet. Der er samtidigt bestemt stendensitet på det ekstraherede stenmateriale fra prøverne, således at der efterfølgende kunne beregnes hulrum. Hulrumsniveauet varierer naturligvis fra strækning til strækning, men praktisk taget alle BSM-prøver har udvist et (laboratorieindbygget) referencehulrum på ca. 16-20 %, hvilket indikerer, at det punktvis bundne BSM-produkt ikke er tæt og derfor også af denne årsag normalt bør afdækkes med et afsluttende, beskyttende, tæt slidlag af varmblandet asfalt.

6.4. Vandfølsomhed

Der er på samtlige prøver gennemført bestemmelse af BSM-materialets vandfølsomhed, som bestemmes ud fra forholdet imellem spaltetrækstyrken for en serie af cylinderformede prøvelegemer vandlagret 24 timer ved 25°C og en tilsvarende serie lagret tørt. Uanset referenceindbygningsmetode (vibration eller Marshall) er der for alle BSM-strækninger set pæne, høje værdier, typisk mellem 75 og 100%, hvilket indikerer god vedhæftning i materialet.

Fig. 6.4.1: Spaltetrækstyrketest. Vandfølsomhedstallet bestemmes som forholdet mellem spaltetrækstyrken af våde og tørre legemer.

6.5. Stivhedsmodul og bæreevne

Der er generelt bestemt stivhedsmodul ved 20°C på de forskellige BSM-produktioner. Stivhedsmodulet er bestemt efter DS/EN 12697-26:2018, IT-CY. De fundne data varierer afhængig af indbygningsmetode af prøvelegemerne (vibration, Marshall 2x50 eller Marshall 2x75 slag), men ligger for alle målinger i gennemsnit med en stivhed på 8-900 MPa og et spænd fra 514 til 2148 MPa. Disse data synes at kunne underbygge forventningen om at der i marken, når BSM-laget er curet op og "indespændt" af et afsluttende slidlag, kan forventes E-moduler i nærheden af 1.000 MPa.

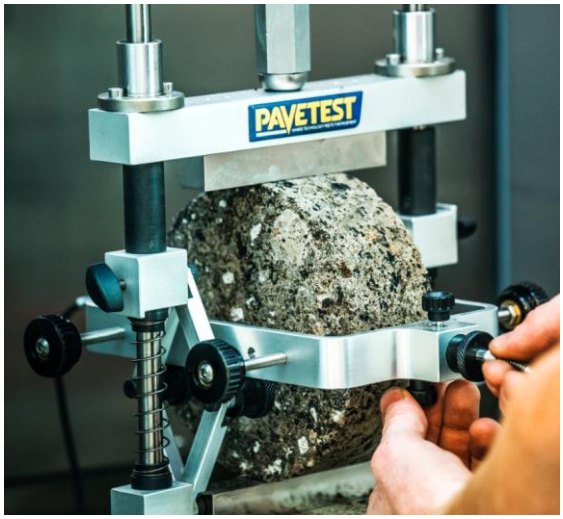

Fig. 6.5.1: Bestemmelse af stivhedsmodul på BSM-prøvelegeme.

Der er på en del af BSM-strækningerne supplerende foretaget faldlodsmålinger af Vejdirektoratet. Disse data indgår dog ikke i denne rapport, da der på udgivelsestidspunktet fortsat hersker en vis uklarhed med hensyn til eksakt tolkning af måledata, da BSM som et punktvis bundet, bitumenstabiliseret materiale umiddelbart hverken kan karakteriseres som et asfaltlag eller et ubundet grusbærelag. Sydafrikanerne, som har størst og længst erfaring med BSM-anvendelse i praksis, benytter en anden teoretisk tilgang til belægningsdimensionering ud fra et "Pavement number" system. Dette emne forventes taget op i det videre BSM-dokumentationsarbejde i 2021.

Fig. 6.5.2: Princip for bæreevnemåling med faldlod og geofoner, som ud fra "nedsynkningsbassinet" bestemmer lagenes materialestivhed.

Afrapportering af faldlodsmålinger fra BSM-strækninger i 2020 vil blive oplyst i særskilte rapporter for de enkelte strækninger.

6.6. Sporkøringsmodstand

Det blev indledningsvis diskuteret, om det ville være muligt at gennemføre sporkøringstest på BSM-materialer ud fra den traditionelle sporkøringstest for asfalt, DS/EN 12697-22, small size, air conditioning, eller om materialet ville være for "løst" bundet til at kunne testes på denne måde.

Det praktisk opnåede resultat har været flot, ofte med værdier på niveau med varmblandede asfaltbærelag. Der er ved flere lejligheder foretaget sporkøringstest af BSM i 2020. Der er konsekvent anvendt en sporkørings-pladetykkelse på 10 cm, hvilket er den maksimale lagtykkelse, som testmaskinen kan håndtere. Efter indtromling af sporkøringsplader til en densitet, som tilstræbes tættest muligt på referencedensiteten, er de laboratorieindtromlede BSM-plader blevet curet 72 timer ved 40 grader C, som traditionelt for BSM-prøvelegemer, inden sporkøringstesten igangsættes.

Fig. 6.6.1 (tv): Sporkøringstesten foretages som dobbelt-test i luft-termostateret klimakammer ved 45°C. Fig. 6.6.2 (th): Ved sporkøringstesten gennemføres 10.000 dobbelt-passager med hjulet og et tryk som svarer til et lastbilshjul.

Testen er udført på helt traditionel vis med 20.000 overkørsler (10.000 load cycles) ved 45 grader C i lufttermostateret klimakammer. Det skal bemærkes, at det under arbejdet ikke altid er lykkedes at indtromle sporkøringspladerne til et ønsket niveau på omkring 100% af referencedensiteten. En udfordring er her, at når en "frisk" BSM-prøve modtages i laboratoriet, skal indtromlingen af sporkøringspladerne foretages inden for 4 timer fra prøveudtagningen og dermed parallelt med, at man bestemmer referencedensiteten. Der kan derfor opstå lidt større variationer i sporkøringspladernes komprimeringsgrad end man er vant til fra varmblandet asfalt og det kan ikke udelukkes, at dette kan have en vis indflydelse på de individuelt opnåede resultater. Ses der bort fra den allerførste BSM-sporkøringstest, hvor pladerne var underkomprimeret, ses for de efterfølgende tre tests et fint niveau, på højde med varmblandet GAB:

Total Sporkøring (mm)	WTS_{air} (µm/ load cycle)	PRD_{air} (%)
0,6 - 5,1	0,09 – 0,02	0,6 - 5,1

Tabel 6.6.1: Opnåede sporkøringsdata for 3 forskellige BSM-produktioner i 2020.

Som det fremgår af tabel 6.6.1 ses generelt sporkøringsværdier på niveau med, hvad der typisk er forventeligt for varmblandede GAB-materialer og for en enkelt strækning, hvor pladerne har opnået en høj komprimering, ses praktisk taget slet ingen sporkøring – idet der blot registreres 0,6 mm sporkøring på en 100 mm tyk plade efter 20.000 overkørsler ved 45°C.

Fig. 6.6.3: Eksempel på 100 mm tykke sporkøringsplader af BSM efter afsluttet sporkøringstest. Der opnås kun minimal sporkøring i BSM-materialet.

Resultaterne viser således ikke blot, at det er muligt at udføre sporkøringstest på BSM, men også at BSM-materialet trods sin punktvis bundne struktur alligevel har meget høj sporkøringsstabilitet. Endelig skal man for BSM tænke på, at dette lag normalt ikke direkte trafikeres, men kun belastes ved et lavere tryk, grundet asfaltslidlagets trykspredende effekt.

6.7. Triaxial-test

BSM-materialets deformationsresistens kan alternativt også bedømmes ved udførelse af triaxialtest på Ø100 mm Marshall-indstampede (20 °C) prøvelegemer. Denne test er som udgangspunkt gennemført i overensstemmelse med DS/EN 12697-25:2016, metode B, med følgende testbetingelser jf. kategori D.2.8 i DS/EN 13108-20 (Testtemperatur 40°C, 50 kPa confining stress, 200 kPa axial load amplitude, frequency 1 Hz, Haversine pulse). Testudstyr: Pavetest DTS-30 (hydraulisk).

Testen udføres i en speciel triaxialcelle. Prøvelegemet placeres med en tætsluttende gummimembran omkring det cylinderformede legeme og der påføres v.h.a. trykluft et konstant tryk på legemet, til simulering af den i praksis opnåede sidestøtte ved belastning på vejen. Der påføres så en aksial pulserende belastning, som simulerer trafikkens trykpåvirkning.

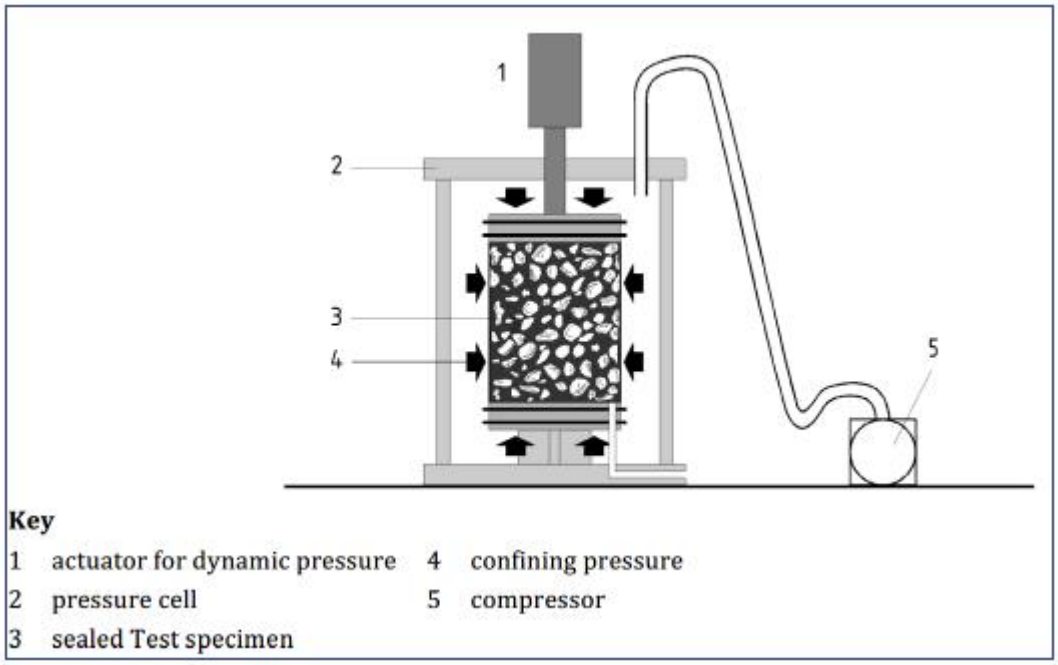

Fig. 6.7.1: Triaxialcelle, princip (Kilde: DS/EN 12697-25:2016).

De opnåede data fremgår af nedenstående tabel:

Permanent def. Total (mm)	Permanent def. Tot. I % af højde	Creep rate (µm/cyklus)
0,34 -1,52	0,45 – 2,02	0,014 – 0,104

Tabel 6.7.1: Spændet af triaxialtest-data fra fire bestemmelser på BSM-strækninger i 2020 (bestemt ved test med 10.000 cycles/40°C)

Den i ovenstående tabel angivne creep rate beregnes som hældningen af kurvens sekundære, praktisk taget lineære forløb (se eksempel figur 6.7.2), typisk beregnet ud fra krybningsværdier (deformation) ved hhv. 5.000 og 10.000 belastningscykler. Data er gennemsnit af tre enkeltbestemmelser, med mindre andet er anført under bemærkninger i tabellen.

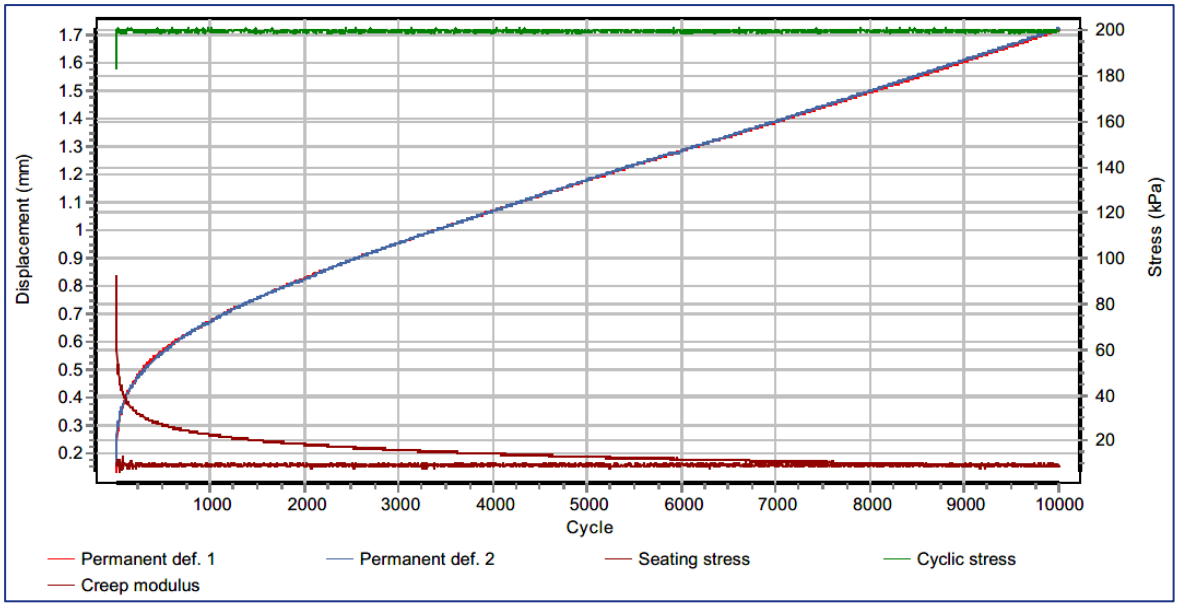

Fig. 6.7.2: Eksempel på deformationsforløbet ved triaxialtest på BSM-materiale

Fig. 6.7.3: Montering af BSM-legeme i triaxial-celle

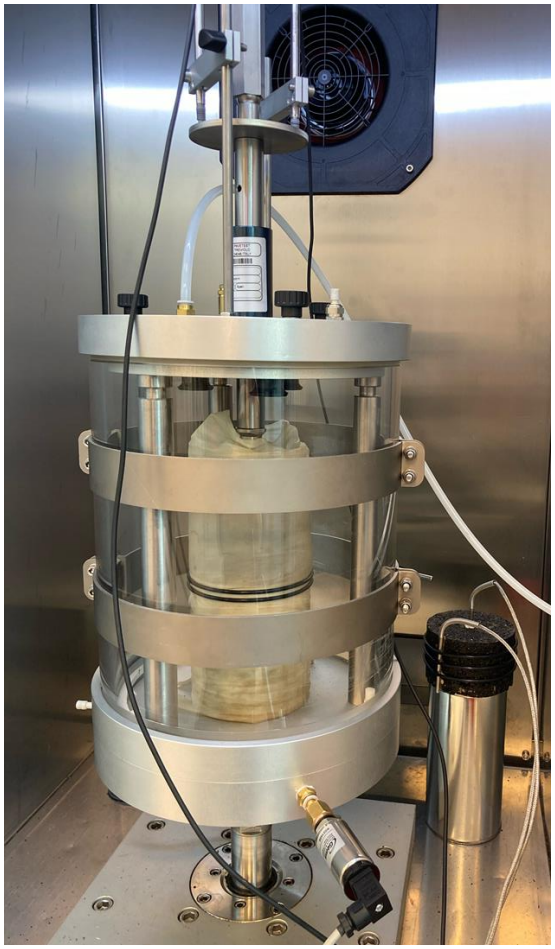

Fig. 6.7.4: Triaxial-celle klar til test

Det har hidtil ikke været kutyme i Danmark at anvende triaxialtest til bedømmelse af asfaltmaterialer, til trods for, at dette er en CEN-standardiseret testmetode, da man normalt kun har anvendt sporkøringstesten. Der foreligger således kun meget begrænsede erfaringer med danske asfaltmaterialers triaxialtest-data. Men, hvis man betragter CEN-produktstandarden DS/EN 13108-1 (asfaltbeton) ses, at der kan stilles krav til den maksimale creep-rate i kategorier som spænder fra 0,2 til 16 µm/cyklus. De testede BSM-materialer ligger således indenfor den bedste krav-kategori, under de valgte testbetingelser.

Triaxialtesten synes således at bekræfte sporkøringstestenes vurdering af, at der er tale om fint stabile BSM-materialer.

6.8. TSRST revnemodstand

Umiddelbart antages det jo, at det kun punktvis bundne BSM-materiale har en lav indre kohæsion, men spaltetrækstyrketests har vist, at materialerne har et pænt højt niveau, som i hvert fald indikerer en vis indre kohæsion i materialet. Spørgsmålet er så, om denne kohæsion fra punktbindingerne er så stærk, at den kan hindre eller forsinke revnedannelser i materialet. På denne baggrund er der for en enkelt af strækningerne (8) supplerende gennemført TSRST-test for vurdering af materialets revnemodstandsevne i koldt vejr. Testbjælkerne er her udsavet af en sporkøringsplade og tilpasset til TSRST-testens bjælkedimensioner.

TSRST er en forkortelse for Thermal Strain Restraint Specimen Test og går ud på, at man udsaver en bjælke af asfalt (eller her BSM), som placeres i testmaskinen og fikseres i sin længderetning ved fastlimning med epoxylim af bjælkens top og bund til metalplader. Opstillingen placeres i et klimakammer, som nedkøler med en fast rate på -10°C/time. Jo koldere prøven bliver, desto større indre trækspændinger opstår der fra materialets forsøg på sammentrækning. På et tidspunkt bliver prøven så kold, at bjælken revner. Brudtemperaturen og den tilhørende maksimale trækspænding er resultatet af prøvningen. Metoden er oprindeligt introduceret i USA, men har nu også fundet vej til Europa, hvor den kan findes som DS/EN 12697-46.

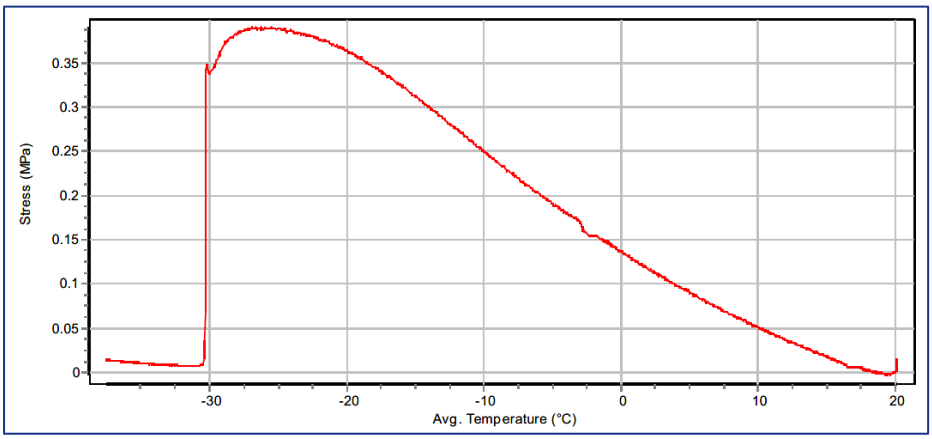

Fig. 6.8.1: Eksempel på udviklingsforløb ved nedkøling fra +20°C (fra højre mod venstre). Kurvens toppunkt er defineret som brudpunktet, hvor brudtemperatur og maksimal trækspænding aflæses.

Resultatet af den gennemførte TSRST-test fremgår af nedenstående tabel, hvor der til sammenligning er indsat erfaringsdata fra prøvning af en ældre SMA-belægning og en laboratorieblandet AB.

Strækning-ID	Brudtemperatur (ºC)	Maksimal trækspænding (MPa)
BSM (8)	-26	0,35
Erfa-data, ældre SMA	-22	1,8
Lab.blandet ABt	-29	4,5

Tabel 6.8.2: TSRST-data for BSM. Til sammenligning indsat erfa-data fra en ældre SMA (borekerner), samt fra en ny AB t (laboratorieblandet).

Fig. 6.8.2: Eksempel på brudt BSM-bjælke. TSRST-testen er gennemført på BSM-bjælker med dimensioner 60x60x160 mm. Bjælkerne er udsavet af laboratorieindtromlede sporkøringsplader og fikseret i top og bund ved epoxypålimning til testudstyrets fastholdte metalplader.

Det ses af tabel 6.8.2, at BSM-materialet (måske lidt overraskende) har en lav brudtemperatur på minus 26 grader C, svarende til en lidt ældre SMA-belægning og omtrent som for en ny, varmblandet ABt-belægning. Brudspændingen (max. trækspænding) er dog væsentligt lavere end for de varmblandede asfaltmaterialer og indikerer dermed som ventet, at BSM ikke har en indre kohæsion på niveau med varmblandet asfalt.

6.9. Ældningsresistens (PAV)

Der er i et enkelt tilfælde gennemført ældningstest, hvor Marshall-indstampede Ø100 mm BSM-prøvelegemer er ældet i en PAV-ovn (Pressure Ageing Vessel).

BSM-materialet er på grund af det relativt lave, nye skumbitumenindhold ikke et komplet ny-omhyllet materiale, som det er tilfældet for varmblandet asfalt. BSM er defineret som et punktbundet materiale. Som det fremgik af de tidligere i rapporten omtalte prøvninger, ligger materialets hulrumsindhold da også oppe på omkring 20%. Det kunne derfor være interessant at vurdere, om dette relativt åbne og punktvis bundne materiale er meget følsomt for ældning fra oxidation over tid. Der er derfor udført forsøg, hvor indstampede BSM-kerner udsættes for kunstig ældning i laboratoriet på et niveau, svarende til adskillige års ældning i praksis på vejen. Som indikator for ændringerne er her anvendt bestemmelse af stivhedsmodulet før/efter kunstig ældning.

Ældningsresistensen er i dette projekt bedømt med kunstig langtidsældning i PAV-ovn, jf. DS/EN 12697-52:2017. Testbetingelserne er følgende: PAV-ældning: 90°C i 20 timer (ifølge standarden svarende til "RILEM-ageing"). Anvendte prøvelegemer: 3 stk. Marshall-legemer, som på traditionel vis (for BSM) er indstampet 2x50 slag ved 20°C. Stivhedsmodulet før/efter ældning er på hver af de tre kerner bestemt ved 20°C jf. DS/EN 12697-26, IT-CY.

Ældningsresistens (PAV-hærdning)	FØR PAV-ældning	EFTER PAV-ældning	Stivhedsforøgelse (faktor)
Stivhedsmodul v/ 20°C (MPa),	772	1.859	2,4

Tabel 6.9.1: Resultat af PAV-ældnings indflydelse på stivhedsmodulet for BSM.

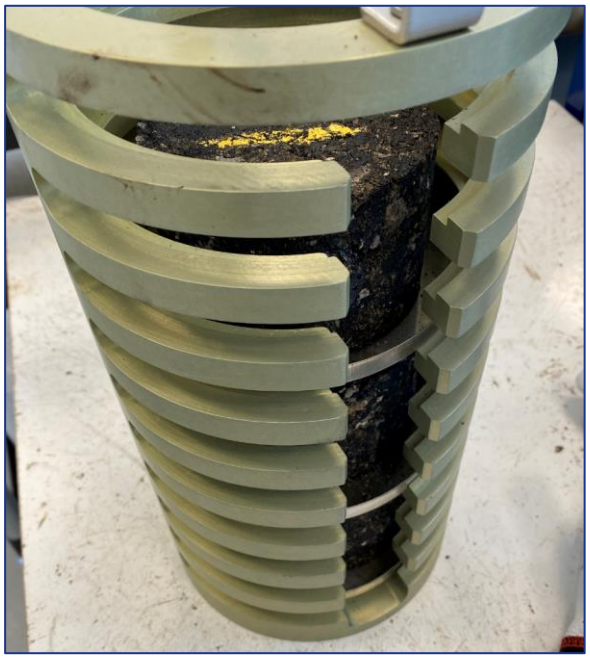

Fig. 6.9.1: De 3 Marshall-legemer monteret i rack.

Fig. 6.9.2: Rack'en placeres under låg i PAV-ovn.

Fig. 6.9.3: De tre Marshall-legemer efter afsluttet PAV-langtidshærdning. Kun den midterste af de tre kerner har vist marginalt bitumenafløb trods opvarmning til 90 °C i 20 timer under tryk.

Det opnåede resultat viser, at materialestivheden forøges til mere end det dobbelte efter kunstig langtidsældning med PAV-ovn. Dette indikerer således, at BSM's bæreevne, alt andet lige, forventeligt vil stige til omkring det dobbelte i løbet af sin levetid. Materialet udviser ikke sammenfald (sammensynkning) eller begyndende smuldring fra hærdeprocessen og virker således ret robust.

Det skal for god ordens skyld bemærkes, at der ikke er foretaget analyse af genindvundet bindemiddel før/efter langtidshærdningen. Dette skyldes dels, at genindvindingsprocessen er en destruktiv testprocedure, som ikke ville muliggøre at måle stivhed på eksakt samme kerner før/efter hærdning, dels at det ved genindvindingen ikke er muligt at adskille den ny-tilsatte bitumen (som danner punktbindingerne) fra den gamle bitumen i den affræsede asfalt.

6.10. Bearbejdelighed (Gyratorkomprimering)

Som nævnt i et tidligere afsnit, er der til brug for indbygning af prøvelegemer i årets opfølgningsarbejder anvendt vibrations- og Marshall-indstampning. En tredje mulighed for referencekomprimering er at foretage indbygning med en gyrator, som foretager en kombination af "ældende" og pressende komprimering. Komprimeringen styres af vinklen α, kraften F og omdrejningstallet n (antal gyrationer). Gyratorkomprimeringen er foretaget i henhold til DS/EN 12697-31 med Ø100 mm kerner.

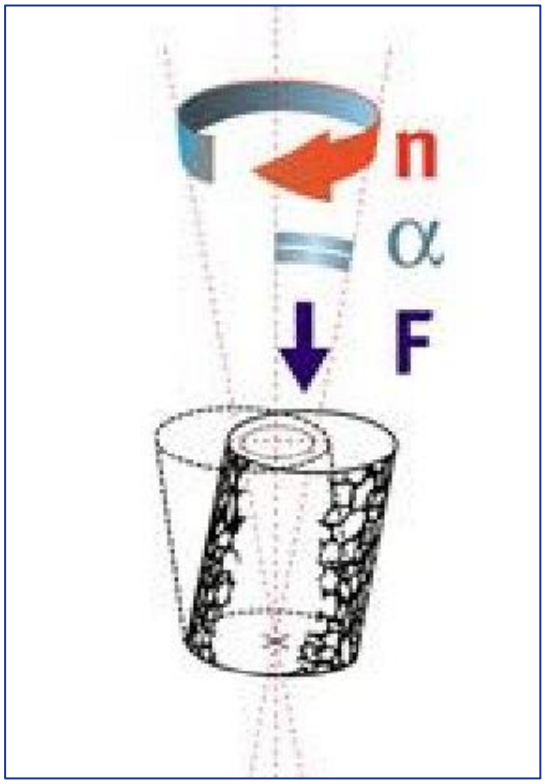

Fig 6.10.1: Princip for gyratorkomprimering

Fig. 6.10.2: Gyrator, klar til montering af prøvelegeme

Resultatet af gyratorkomprimeringsforsøgene fremgår af efterfølgende figur 6.10.3, som giver en grafisk afbildning af densitetsforsøgelsen som funktion af antal gyrationer. Til sammenligning er indsat densitetsværdien for "standard" vibrationsforsøg (mod fast densitetsværdi) for samme BSM-materiale. Det ses, at allerede efter ganske få gyrationer opnår gyratorkomprimeringen højere densitet. Gyrator-densiteten aftager med stigende gyrationsantal og stiger mest markant op til ca. 200 gyrationer,. Der er dog fortsat tale om Ø100 mm legemer, med den begrænsning dette giver i fht. BSM-materialets maksimale stenstørrelse. Det kan overvejes at følge op med Ø150 mm gyratorkomprimering på et senere tidspunkt, men i daglig brug forventes gyratorkomprimeringen dog ikke at blive standard, dels grundet metodens begrænsede udbredelse i Danmark og dels ud fra ønsket om at gøre BSM-konceptet så enkelt og robust som muligt i hverdagen.

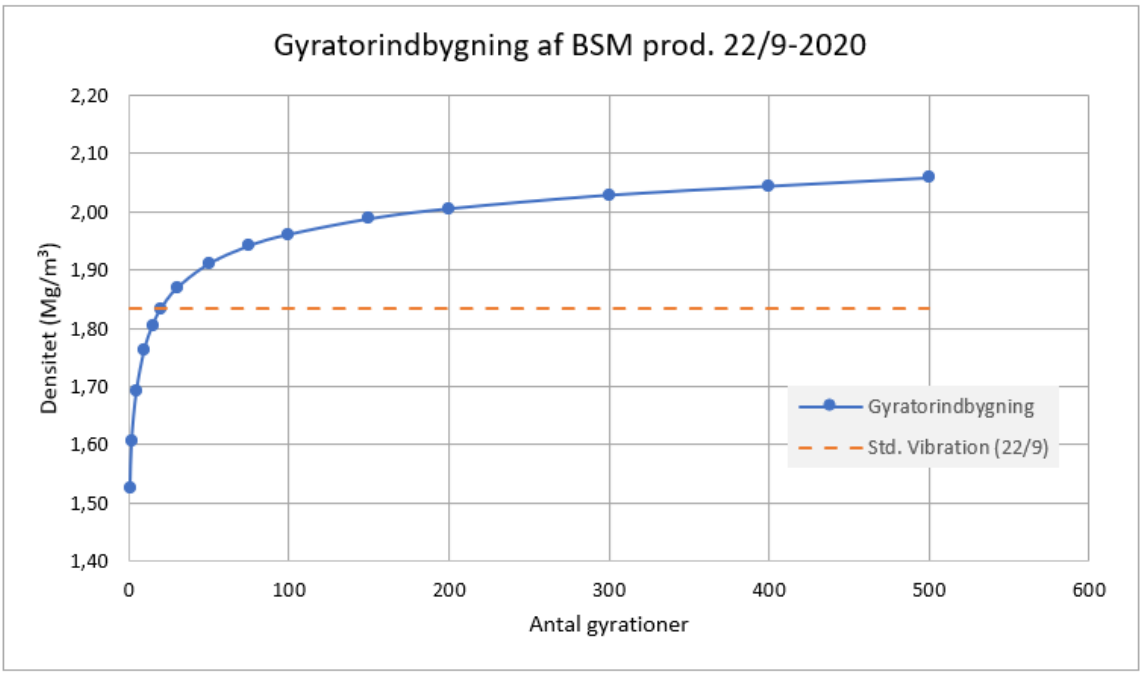

Fig. 5.3.6: Eksempel på densitetsudvikling ved gyratorindbygning af BSM, sammenholdt med standard vibrationsindbygning. Data er gennemsnit af tre delprøver med meget lille indbyrdes spredning. Kurven stopper først ved 500 gyrationer, som er et ekstremt højt tal – også for varmblandet asfalt.

Gyratorforsøgsrækken skal således alene ses som et forsøg på at udfordre BSM-materialet på hvor meget det kan komprimeres under ekstreme forhold.

7. Planslibsanalyse af BSM

Der er på udvalgte Marshall- og vibrationslegemer, samt udsnit af sporkøringsplader, foretaget planslibsanalyse for visuelt at kunne vurdere hulrumsfordelingen i materialerne. Kernerne/emnerne vakuumimprægneres med epoxy tilsat et fluorescerende farvestof og gennemskæres efterfølgende aksialt. Kernerne er gennemskåret og skærefladerne er undersøgt visuelt og i stereomikroskop ved normal og UV-lys.

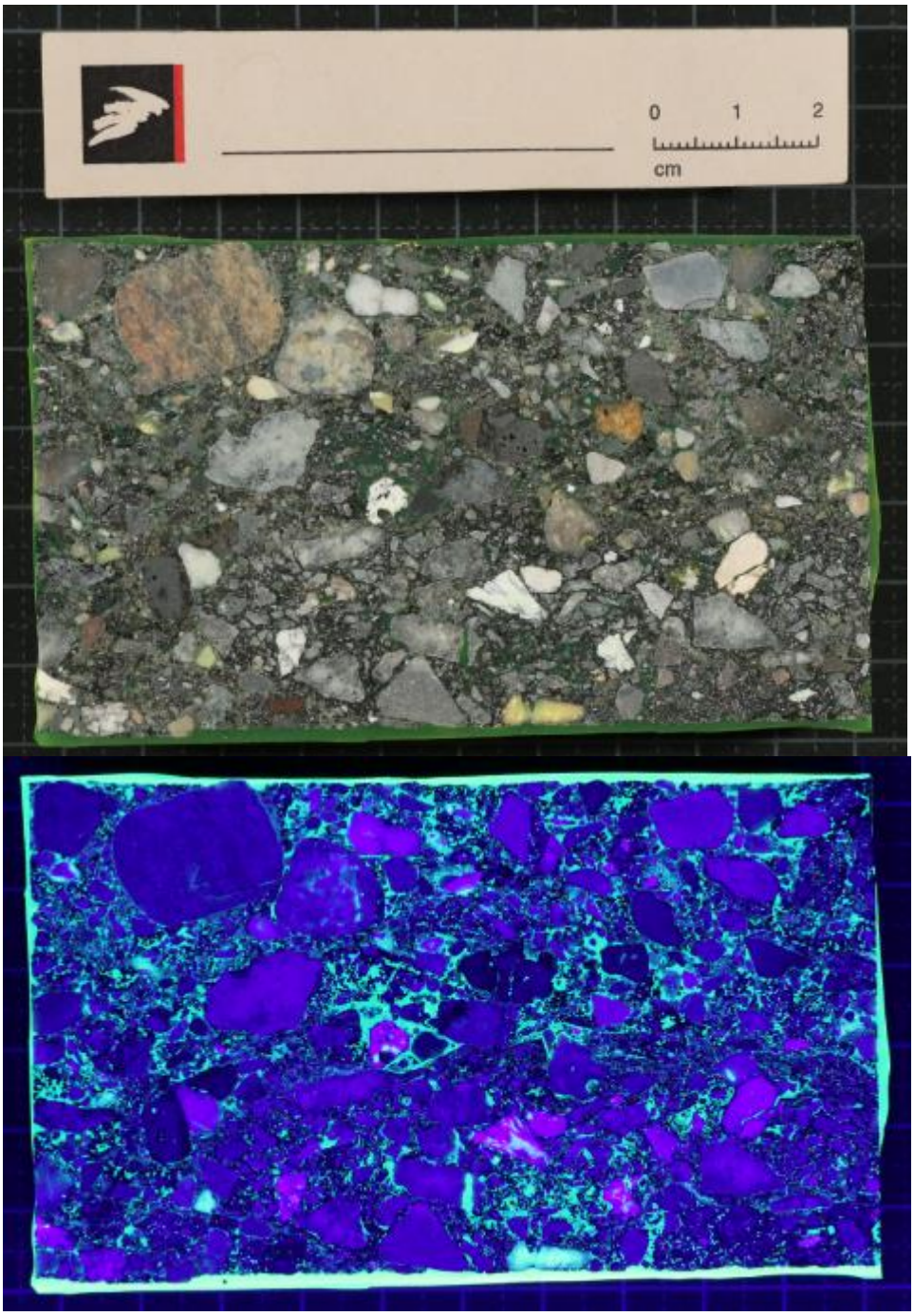

Fig. 7.1: Planslib af BSM. Ø150 mm standard vibrationskomprimeret prøvelegeme fra entreprise (7). Øverst i normalt lys og nederst i UV-lys, hvor hulrum fremtræder som lyseblå partier.
Da der er anvendt 3-lags komprimering er bunden – ikke overraskende – komprimeret tættere end toppen.

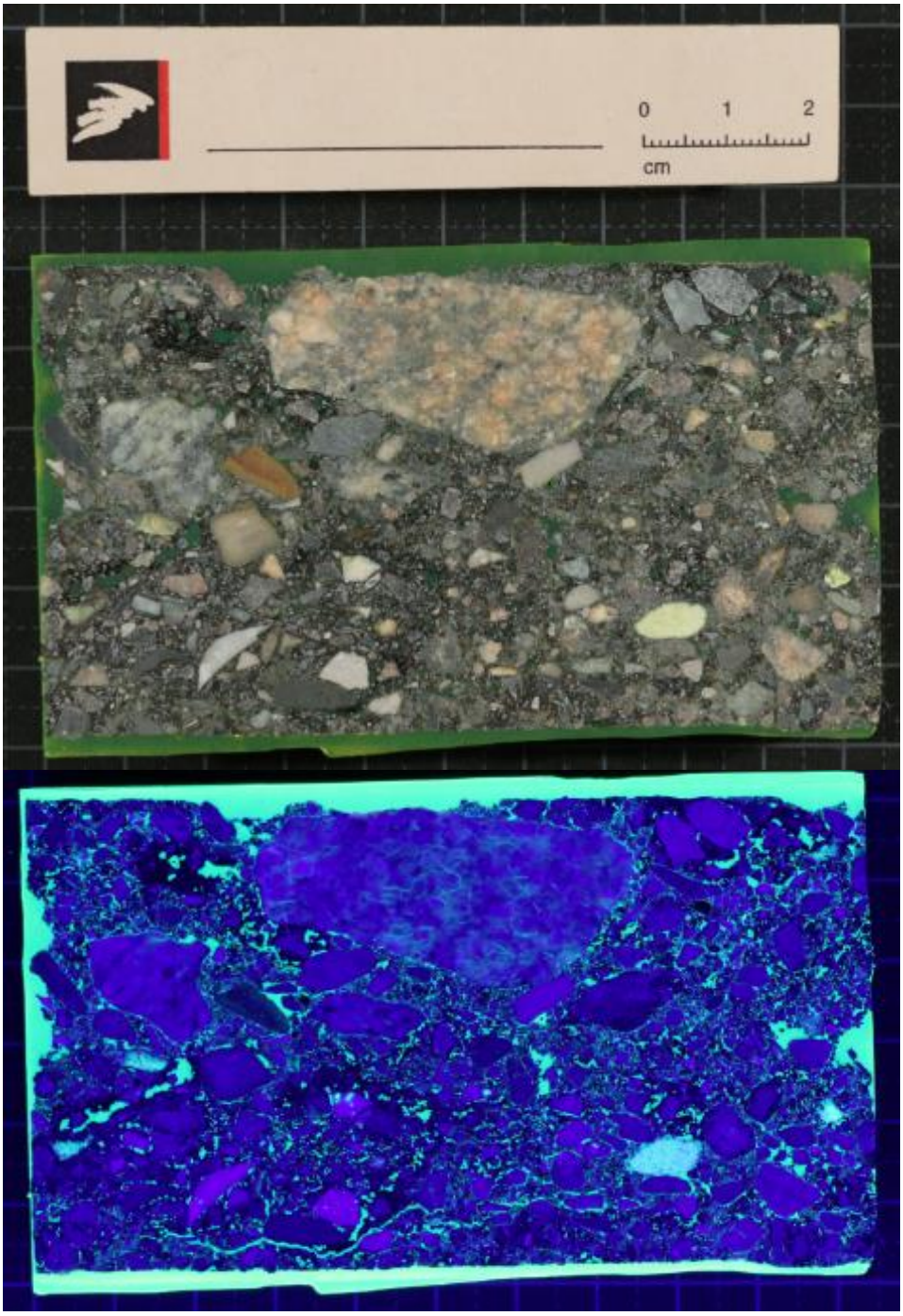

Fig. 7.2: Planslib af BSM Ø150 mm standard vibrations-indstampet prøvelegeme af grov BSM baseret på lokalt opfræset genbrugsasfalt med indhold af makadamsten fra underlaget (strækning (6)). Læg mærke til de punktvise hulrum omkring de større genbrugsasfalt-partikler.

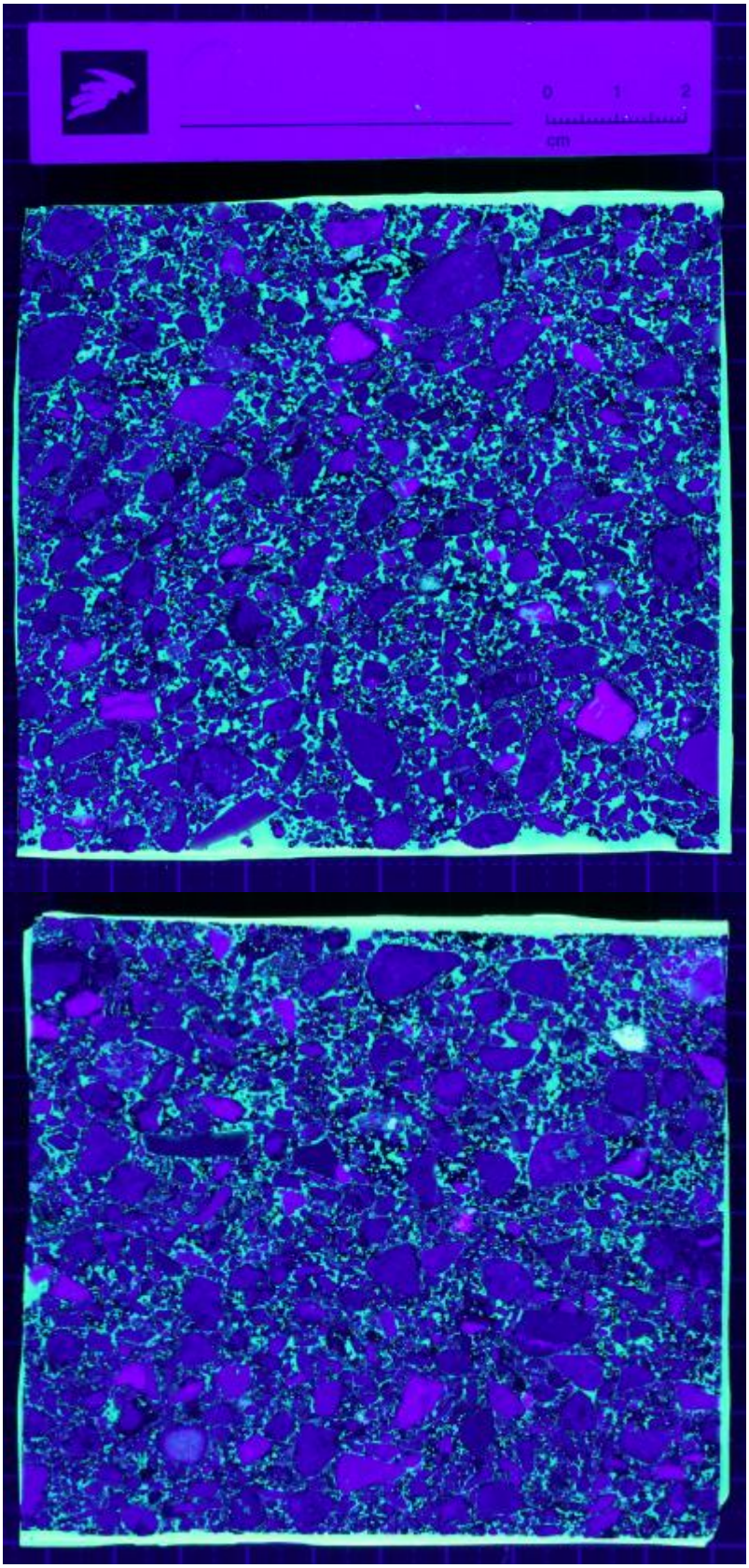

Fig. 7.3: Planslib af laboratorieblandet BSM-materiale til vurdering af optimal referencekomprimering.
Øverst ses UV-belyst snit af prøvelegeme som er indbygget i ét lag med 60 sekunders vibration.
Nederst ses samme materiale indbygget med 3 lag á 60 sekunder.
Det ses tydeligt, at hulrummet mindskes, når der er indbygget i flere lag, samt at den nederste tredjeldel, som har fået 3 gange komprimering (direkte plus 2 gange indirekte), er tættest.
På grund af BSM splitformenes udformning er det ikke muligt at vende prøvelegemerne om og stampe på bunden også, sådan som det er kendt fra Marshall-indstampning.

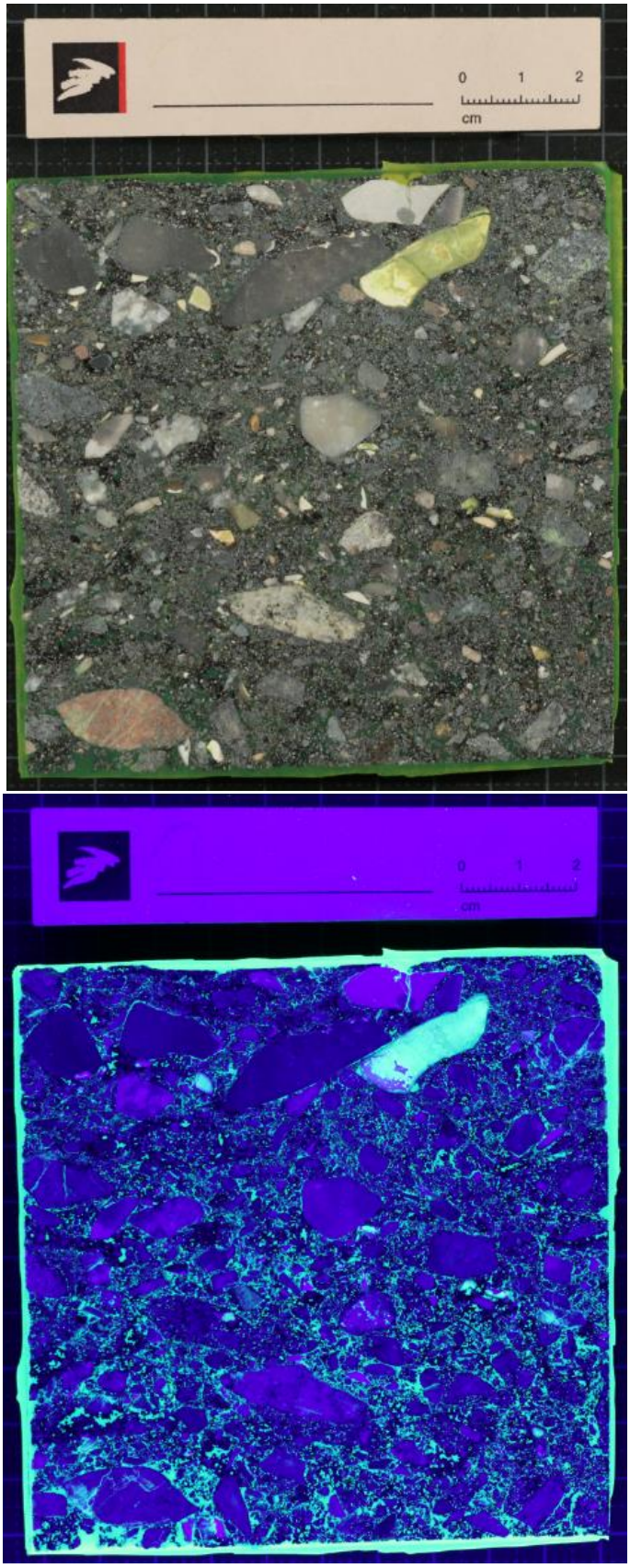

Fig. 7.4: Udsnit, BSM fra strækningen (8) indtromlet i sporkøringsplade. Øverst i normalt lys og nederst i UV-lys.
Det ses, at BSM-materialet er relativt velkomprimeret med ret små hulrum, primært i bunden af sporkøringspladen.

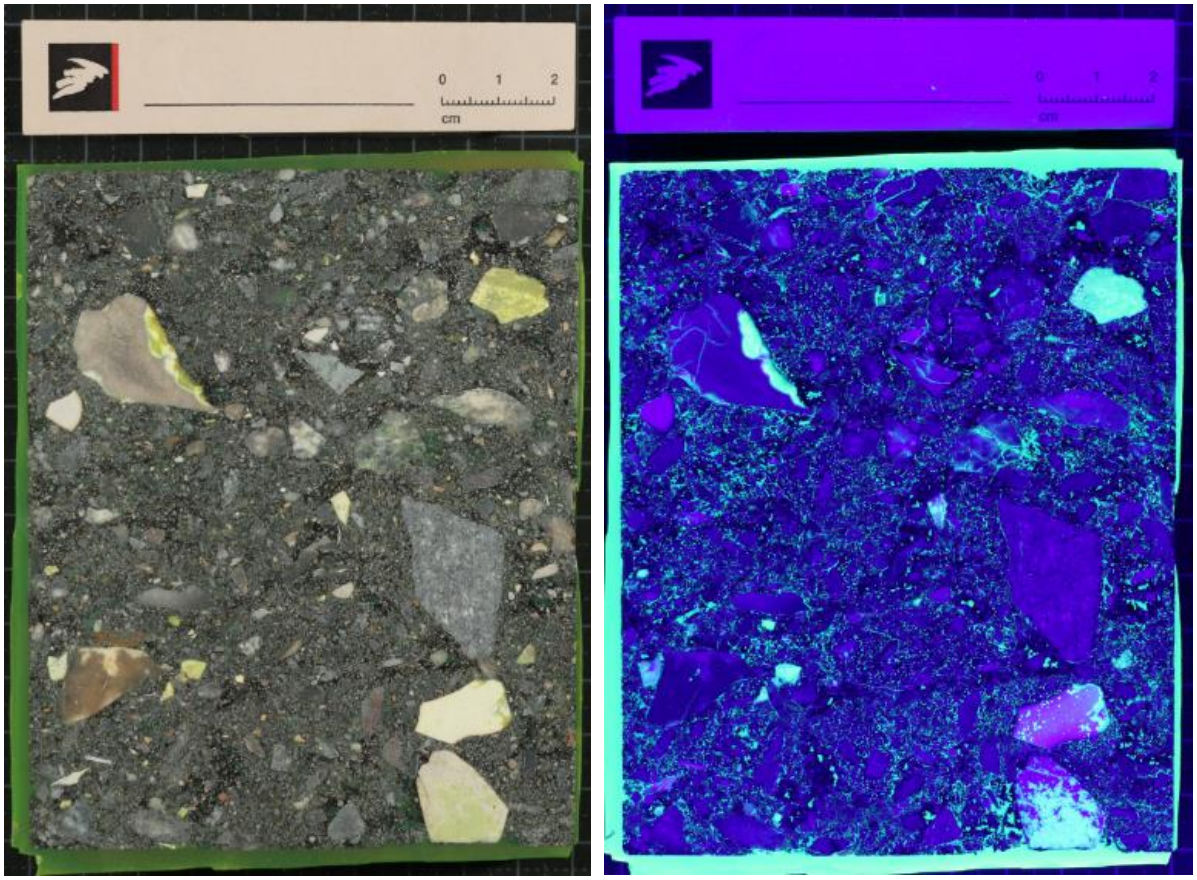

Fig. 7.5 Tværsnit af gyratorkomprimeret BSM-prøvelegeme af samme materiale som fig. 7.4, men her udsat for en ekstrem komprimeringsindsats på 500 gyrationer. Det ses, at hulrumsstørrelsen og antallet er reduceret ved denne ekstreme komprimeringsindsats.

Sammenfattende ses det af de gennemførte planslib, at BSM-materialet, trods et ret højt hulrum på omkring 15-20% ved standard vibrationskomprimering, primært har mange små hulrum, som kan relateres til det punktvis bundne materiale.

De udførte planslib giver en god forståelsesmæssig visualisering af BSM-materialers hulrumsstruktur og -fordeling. Planslibskonceptet kan således også benyttes som et vigtigt udviklingsværktøj, men skal ikke ses som et emne til egentlig laboratoriekontrol, hvor det jo i øvrigt tilstræbes at gøre BSM-konceptet så robust og simpelt i dagligdagen som muligt.

8. BSM fremstillet af knust asfalt og -beton

Dette afsnit belyser de materialetekniske muligheder for at kunne benytte et tilslagsmateriale til BSM, som består af en blanding af knust beton og knust asfalt. Sådanne blandingsprodukter forefindes hos flere danske nedbrydningsfirmaer/entreprenører og kan derfor ses som et interessant råvare-alternativ, ligesom der i dag generelt forekommer et stort overskud af knust beton fra diverse nedrivningsarbejder.

8.1. Knust beton i forskellige fraktioner

Der er i forbindelse med BSM-prøvningsarbejdet i 2020 gennem firmaet Wirtgen modtaget tre prøver af knust beton i fraktionerne 0/4 mm, 16/40 mm og 0/40 mm. De to førstnævnte fraktioner opstår som overskud ved frasigtning af en 4/16 fraktion, som kan genanvendes i betonproduktionen. Disse to fraktioner vurderes dog ikke umiddelbart interessante for anvendelse i en kombineret knust asfalt/beton variant af BSM. 0/40 knust beton (KB) virker dog til gengæld interessant. Der er på denne baggrund foretaget et blandeforsøg, hvor knust beton 0/40 er blandet 50:50% med knust genbrugsasfalt 0/32 (fra Munck Svogerslev, samme kilde som anvendt på strækningen (5).

Sigte (mm)	**0/4 Knust Beton** råvare	**16/40 Knust Beton** råvare	**0/40 Knust Beton** råvare	**0/32 Genbr. asfalt** Munck	**Filler** (cem.)	**KAB 50/50** Bereg-net	**KAB I+II** AAB-krav	**BSM KAB** Aktuel blanding	**BSM TG2** Target*
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100
45	100	100	100	100	100	100	75 - 99	100	90 - 100
31,5	100	59	89	100	100	95		89	82 - 100
25	100	29	78	100	100	89		85	70 - 100
22,4	100	14	72	94	100	83		83	68 - 100
16	100	3	62	85	100	74	50 - 90	74	58 - 100
11,2	100	2	51	76	100	64		69	50 - 90
8	100	2	42	63	100	53	30 - 75	60	42 - 80
5,6	99	2	35	47	100	41		50	36 - 80
4	92	2	31	36	100	34	15 - 60	42	32 - 70
2	73	2	26	21	100	24		31	22 - 48
1	58	2	23	12	100	18	2 - 35	21	15 - 37
0,5	41	2	17	5	100	12		12	10 - 28
0,25	19	1	10	2	100	7		6	6 - 20
0,125	19	0,7	6	1	93	4		3	5 - 17
0,063	3,2	0,4	4,6	0,4	85	3,2	0 - 9	1,5	4 - 14
Stendens.	2,564	2,437	2,535	2,705					
Mat.type	"ren"	"ren"	"ren"	"uren"	"ren"	"delvis"	"uren"	"uren"	

Tabel 8.1: Sigtekurver og nøgledata for råvarer og BSM-blanding.
Alle sigtegennemfald er opgivet i vægt-%. Densiteter er opgivet i Mg/m3.
**) Sabita TG2 manual for BSM, s. 48 tabel 4.7, ideal ved op til 50% genbrugsasfalt.*

En del af de i tabellen oplyste data fra TG2 er interpolerede værdier, da Sabita i TG2 manualen anvender alternative, engelske sigtestørrelser.
Ved "materialetype" betyder "uren" at sigteanalysen er gennemført på materiale inkl. bitumen.
Kolonnen "KAB 50/50" angiver den teoretiske kurve ved blanding af 50% 0/32 GMA Svogerslev og 50% 0/40 KB samt tilsat 0,8% cement (sigtekurve for cement er anslået).

Tabel 8.1 viser sigteanalysedata for de tre forskellige varianter af genbrugsbeton, samt den til blandingen anvendte 0/32 mm knust asfalt (og en anslået kornfordeling for cementfiller). Herefter den teoretisk beregnede kornfordeling for blandingen. Til sammenligning er indsat en kolonne med AAB-krav til knust asfalt og beton type I og II (AAB for ubundne bærelag af knust asfalt og beton). Det ses, at 50:50 blandingen fint svarer til AAB-kravene for KAB I og II. Desuden er i tabel 8.1 (grønmarkeret) indsat den reelt opnåede kornkurve for en BSM-laboratorieblanding efter ovennævnte blandingsforhold. Endelig er indsat de vejledende sydafrikanske grænseværdier for færdig BSM, når denne indeholder maksimalt 50% genbrugsasfalt (jf. Sabita's TG2-manual, 2020).

8.2. BSM-blanding af 50% knust genbrugsasfalt 0/32 og 50% knust beton 0/40 mm

Da den modtagne mængde af KB 0/40 var begrænset, er der ikke forud udført Proctorforsøg på blandingen af knust beton og knust asfalt. Der er ved vibrationsindstampninger af BSM taget udgangspunkt i en tidligere fundet (modificeret) Proctor-densitet på 2,02 Mg/m3, samt et antaget optimalt vandindhold på ca. 9% (ca. 2% højere end for ren knust asfalt). Der er ved BSM-blandingen fortsat anvendt en bitumen 70/100 med en tilsætningsprocent på 2,2 vægt-% skumbitumen. Der er tilsat 0,8% cement, svarende til typisk anvendt i praksis på vejen. De opnåede data fremgår af efterfølgende afsnit.

8.3. Vandfølsomhed

Følgende data er fundet for vibrationsindstampede Ø150 mm legemer af BSM 0/40 KAB:

Spaltetrækstyrke, våd (kPa)	Spaltetrækstyrke, tør (kPa)	Vandfølsomhed (%)
239	290	82 %

Tabel 8.3: Vandfølsomhedsdata for laboratoriefremstillet BSM 0/40 KAB.

8.4. Stivhedsmodul

Der er ved "normal" bestemmelse af stivhedsmodul ved 20°C fundet en værdi på hele 1.463 MPa for de Ø150 mm vibrationsindstampede kerner. Dette niveau er på højde med de bedste BSM-blandinger med tilslag af ren genbrugsasfalt.

8.5. Sporkøringstest

Der er også for BSM-blandingen med KAB 0/40 udført sporkøringstest i laboratoriet. Testen er på sædvanlig vis udført jf. DS/EN 12697-22 small-size device, air conditioning, med en testtemperatur på 45 °C – dog med den undtagelse, at testen kun er gennemført som enkelt-test på én plade i 10 cm tykkelse, da der ikke var tilstrækkeligt materiale til rådighed til at gennemføre en dobbeltbestemmelse.

Sporkøringspladen af det laboratoriefremstillede BSM-materiale opnåede ved den "friske" indtromling i indtromlingsapparatet en komprimeringsgrad på 96,8% - og dermed lige under idealet på 98-101%. Som det fremgår af figur 8.5.1 udviste den indtromlede plade med knust genbrugsbeton en betydeligt mere grov overflade end normalt set for BSM produceret af knust asfalt, men ikke desto mindre er der opnået et flot sporkøringsresultat med en meget lav deformation.

Fig. 8.5.1.: Grov overflade i 10 cm tyk plade af BSM m/ KAB 0/40 mm (kun én plade gennemført)

Fig. 8.5.2: 10 cm tyk Sporkøringsplade efter endt test. Man kan kun svagt ane et spor i midten af toppen af belægningen.

Sporkøringstesten viste - efter 10.000 dobbeltpassager af hjulet ved 45 grader C - blot 0,28 mm sporkøring, hvilket er en meget lav værdi. Endvidere ses praktisk taget ingen stigning i sporkøringsdeformationen mellem 5.000 og 10.000 dobbeltpassager, så tendensen/risikoen for fortsat sporkøring synes at være minimal.

8.6. Vurdering af potentialet for BSM på blanding af knust asfalt og beton

Den opnåede laboratorieblanding med lige dele knust asfalt 0/32 og knust beton 0/40 mm indikerer umiddelbart fine værdier med sporkøringsmodstand, stivhedsmodul og vandfølsomhed på samme niveau som for BSM fremstillet udelukkende af knust asfalt. Det ses dog af stendensiteterne i tabel 8.1, samt fotoet i fig. 8.5, at det knuste betonmateriale i det pågældende tilfælde indeholder en del store kalksten eller andre lettere korn, som muligvis over tid vil kunne generere mere nedbrydning, end forventeligt for ren genbrugsasfaltbaseret BSM.
Yderligere analyser vil måske kunne afspejle om dette er en udfordring, idet det ellers ud fra et cirkulært ressourceøkonomisk synspunkt virker oplagt at anvende en del af det store overskud af knust beton i BSM-produktionen, hvor dette økonomisk og transportmæssigt måtte være hensigtsmæssigt.

9. Konklusion på BSM 2020-dokumentation

Arbejdet med afprøvning og dokumentation af BSM-konceptets egnethed til danske forhold blev igangsat i 2019 og videreført i udvidet omfang i 2020. Foruden en lang række laboratorieblandinger af BSM-varianter er der nu udlagt 8 dokumenterede teststrækninger i Danmark, hvorfra data fra udtagne laboratorieprøver indgår i dette opfølgende dokumentationsarbejde. Den første (og mindste) af disse BSM-fuldskalastrækninger blev udført i 2019 og er efterfulgt af yderligere 7 strækninger i 2020, som vejkategorimæssigt spænder lige fra mindre kommuneveje til en jysk motorvej. Strækningerne omfatter både KMA-princippet (Kold Mix Anlæg) og In-situ fremstilling med speciel fræse-/blandemaskine og konklusionen fra de udførte laboratorieforsøg er, at begge koncepter virker efter hensigten. De to forskellige fremstillingsmetoder synes at supplere hinanden fint og giver derved et bredt anvendelsesgrundlag for BSM i Danmark.

Som udgangspunkt fremstilles BSM af 100% genbrugsasfalt, kun tilsat ca. 2,1 – 2,3 % opskummet bitumen, 0,5 – 1,0% cement (klæbeaktiv filler) og lidt procesvand. Bortset fra anvendelse af varm bitumen til skumbitumen er fremstillingsprocessen kold og baseret på (lokale) genbrugsmaterialer og er derved meget energibesparende med tilhørende lav CO2-belastning, sammenlignet med traditionelle asfaltbærelag. Der kan anvendes både 0/16 og 0/32 mm knust asfalt, eller direkte anvendelse af affræset asfalt (som det er tilfældet ved in-situ-metoden), såfremt denne har den "rigtige" kornstørrelse. Forud affræset men ikke knust asfalt bør dog typisk tjekkes for flager og evt. store makadamsten fra underlaget, som ellers kan nedsætte produktionskapaciteten af BSM. Tilført knust genbrugsasfalt kan tilsyneladende anvendes, hvis blot den opfylder de generelle vejregelkrav for KAS 0/16 hhv. KAS 0/32. For at undgå alt for "frisk" og klistrende genbrugsasfalt tjekkes genbrugsasfaltkilder typisk forlods ved vandfølsomhedstest på Marshall-indstampede prøvelegemer af den knuste asfalt. (Dette emne vil blive yderligere belyst i 2021). Hovedkonklusionen er således, at BSM er et ret robust koncept, som er relativt ufølsomt for variationer i de anvendte råvarer. Et enkeltstående laboratorieforsøg har endda eftervist, at blandinger af 50% knust asfalt og 50% knust beton også kan give en BSM med fuldt tilfredsstillende egenskaber.

De gennemførte laboratorieforsøg viser alle, at BSM har fin vandfølsomhedsmodstand (god vedhæftning), som indikerer sandsynlighed for god holdbarhed. Med hensyn til stabilitet – specielt i varmt vejr – viser de gennemførte sporkøringstests (standard test som for asfalt ved 45 °C), at BSM har god sporkøringsresistens, fint på højde med varmblandede asfaltbærelag. Man kunne så måske frygte, at BSM, som er et punktbundet materiale, kunne have lav indre kohæsion og dermed måske lav revnemodstand i koldt vejr. En gennemført TSRST-test af BSM's kulde-revne-modstand viser, at frisk BSM kan tåle temperaturer helt ned til -26 °C før der opstår kuldebrud, hvilket nogenlunde er på højde med værdier for frisk, varmblandet asfalt. Igen ses, at konceptet virker robust, holdbart og rimeligt uproblematisk.

Med hensyn til bæreevne af BSM, som forventeligt ligger et sted imellem stabilt grus og varmblandet asfalt, så viser laboratorieforsøgene et typisk stivhedsmodul ved 20 °C på 8-900 MPa. Denne må forventes at stige yderligere til ca. 1.000 MPa, når BSM indbygges på vejen og bagefter "indspændes" af et afsluttende, varmblandet asfaltslidlag. Denne rapport omhandler dog ikke data fra gennemførte

faldlodsmålinger af BSM-strækningernes bæreevne, da der endnu ikke foreligger en helt klar afdækning af, hvordan BSM mest korrekt indgår i danske MMOPP-dimensioneringsberegninger. Dette emne forventes fulgt yderligere op i 2021.

10. Forslag til det videre arbejde

Baseret på de i 2019-20 opnåede erfaringer med BSM opstilles en række forslagspunkter til det fortsatte erfarings- og dokumentationsindsamlingsarbejde i 2021. Som udgangspunkt har de indledende laboratorieforsøg jo – i det væsentlige – været baseret på Sydafrikanske erfaringer. Efterhånden som dansk BSM-erfaring opbygges, har det dog vist sig hensigtsmæssigt at ændre på flere procedurer, herunder f.eks. curing af prøvelegemer, som omtalt tidligere i denne rapport. Der foreligger dog fortsat en række emner, som vil være hensigtsmæssige at afdække nærmere, inden grundlaget for en vejregel for BSM kan fastlægges.

a) Prøveleger kontra stenstørrelse: Der bør til laboratorieprøvning fremadrettet alene fokuseres på fremstilling af Ø150 mm vibrations-indstampede prøvelegemer af BSM, idet erfaringerne fra 2020 viser, at Ø100 mm Marshall-legemer er for små, set i forhold til den maksimale kornstørrelse af den til BSM anvendte genbrugsasfalt. Dermed kan også anvendes ét og samme koncept uanset om der er tale om 0/16 eller 0/32 mm genbrugsasfalt.

b) Referenceprøvelegemer: En fast og velegnet procedure for fremstilling af referenceprøver er essentiel for en vejregel for at kunne opstille komprimeringskrav til den færdige belægning og for at kunne teste funktionsegenskaber af BSM-produktet. Den oprindelige, sydafrikanske BSM-laboratoriekomprimeringsmetode med vibration indtil fast, forud defineret densitet nås, vurderes ikke velegnet til danske forhold. Der blev i 2020 gennemført en serie laboratorieforsøg med forskellige antal indbygningslag og vibrationstider, med det formål at finde den bedst egnede metode til referenceindstampning af prøvelegemer.

   Forsøgsrækken, som også er omtalt i et tidligere afsnit af denne rapport, blev dog afsluttet med et "uens" komprimeringskoncept, som indebærer anvendelse af 75 mm høje prøvelegemer (jf. TG2/Wirtgens forskrifter) til test af spaltetrækstyrke/vandfølsomhed, indbygget i 3 lag, og 60 mm høje prøvelegemer (jf. CEN-metoden) til stivhedsmodulbestemmelse, indbygget i 2 lag. Det vurderes ud fra de opnåede erfaringer, at det vil være mest hensigtsmæssigt fremover at foretage en fravigelse fra det oprindelige koncept og anvende prøvelegemer med 60 mm højde til begge formål.

   Dette vil både simplificere laboratoriearbejdet og samtidigt sikre bedømmelse på mere ensartet grundlag, uanset hvilken af de to testmetoder man fokuserer på. Det foreslås derfor, at der i 2021 udføres et nyt laboratorieforsøg, hvor der af BSM-blandinger på samme råvarer fremstilles en ny serie af Ø150 mm og 60 mm høje prøvelegemer, vibreret i 2 lag med forskellig vibrationstid. Herefter vurderes de opnåede densiteter, spaltetrækstyrkeværdier og stivhedsmoduler, som sammenlignes med erfaringstal fra 2020. På denne baggrund fastlægges så den endelige referenceindbygningsmetode og hvert lags påkrævede vibrationstid.

c) "Konsolidering" af vandfølsomhedsbestemmelse på KAS: Til vurdering af knust genbrugsasfalts (KAS) egnethed til BSM – for undgåelse af for stor "klistereffekt" af det gamle bindemiddel – er der hidtil, jf. Wirtgens laboratoriehåndbog, anvendt en screeningstest baseret på vandfølsomhedsbestemmelse af Marshall-legemer fremstillet af ren genbrugsasfalt, indstampet ved 70 grader C. Der er i løbet af 2020 ved flere lejligheder konstateret genbrugsasfaltværdier, som lå i overkanten af Wirtgen-laboratoriehåndbogens anbefalinger, men hvor den resulterende BSM alligevel er blevet fin, med forventede data. Dette kan muligvis skyldes, at de 70 grader ligger over det erfaringsmæssigt typiske blødhedspunkt K&R for dansk genbrugsasfalt. Det foreslås derfor, at der gennemføres en supplerende forsøgsrække, hvor "ren" genbrugsasfalt indstampes ved lavere temperaturer for at finde den for danske forhold mest ideelle temperatur til screeningsforsøget.

d) Opfølgning på BSM-strækningerne fra 2020: Strækningerne bør holdes under observation og tiilstandsvurderes 1-2 gange i løbet af 2021 til erfaringsopsamling af hvordan de forskellige strækninger har klaret sig i det første "leveår".

e) Opfølgning på data fra strækningerne fra 2020: Erfaringerne fra diverse laboratorieforsøg viser, at man fint kan skære intakte prøvelegemer og bjælker ud af større BSM-prøveemner. Dermed kan man givetvis også udtage intakte borekerner af BSM. Det er derfor oplagt at følge op på det seneste års fuldskala-strækninger ved udtagning af borekerner. Dette vil både kunne benyttes til f.eks. validering af stivhedsmoduler til bæreevneberegninger og vil også kunne benyttes til at vurdere forskellige andre funktionsegenskaber, som kan sammenholdes med de laboratoriefremstillede prøver. Dette må anses som et vigtigt led i den videre afklaring af hvordan BSM mest hensigtsmæssigt indgår i dimensioneringsberegninger under danske forhold.

f) Afdækning af BSM's brudmekanismer: I forbindelse med dimensionering af BSM er det i 2020 diskuteret, om BSM evt. kan betragtes som en "simpel" asfalt, hvor man dimensionerer for træktøjninger i undersiden af belægningslaget, eller om man blot skal betragte BSM som et "forbedret" grusbærelag, som således dimensioneres ud fra tryk på oversiden af underlaget. Sydafrikanske erfaringer peger på at BSM kan betragtes som "et ubundet bærelag på steroider", men bl.a. de gennemførte danske TSRST-tests indikerer dog, at der forekommer en ikke helt ubetydelig indre kohæsion i materialet.

Fig. 10.1: Asfalt dimensioneres normalt ud fra træktøjning (udmattelsesbrud) i bunden af asfaltlaget (t.v.) hvorimod ubundne lag dimensioneres ud fra tilladeligt tryk på oversiden af underlaget (t.h.)

For at opnå en nærmere afdækning af BSM's brudkriterier tænkes gennemført en ny BSM-blandeserie i laboratoriet, hvorpå følgende tests udføres:

i. Udmattelsestest på Marshall-indstampede BSM-prøvelegemer (jf. DS/EN 12697-24 Annex E), hvor opnået udmattelsesniveau kan sammenlignes med erfaringsdata fra tidligere tests på varmblandet asfalt.

ii. Bjælke-bøjetests, hvor udsavede BSM-bjælker testes efter bjælkebelastningstest kendt fra betonkontrol. Data sammenlignes med tilsvarende tests udført på et eller flere varmblandede asfaltmaterialer.

iii. Yderligere afdækning af brudstyrke v.h.a. Marshall-test (men ved 25 grader C).

iv. Opfølgende triaxialtests af BSM

v. Evt. afdækning af BSM's revnemodstandsevne eller revneoverbyggende evne i speciel testopstilling, som udvikles til formålet.

g) BSM af knust asfalt, beton og grus: De hidtidige erfaringer for BSM er baseret på anvendelse af 100% genbrugsasfalt som basismateriale, men erfaringerne fra udlandet tyder på, at også andre materialer kan være egnet. Der blev i 2020 gennemført et enkeltstående, begrænset forsøgsprogram, hvor en BSM produceret på 50% knust asfalt og 50% knust beton blev testet. Resultatet blev fint (se videre omtaletidligere i denne rapport) og indikerer, at det kan være interessant at undersøge videre muligheder for fremstilling af BSM på de blandingsprodukter af knust asfalt og eton, som typisk er til rådighed hos f.eks. nedbrydningsentreprenører. Umiddelbart bør det dog undgås at anvende blandinger, som indeholder knust tegl, da dette er et noget svagere tilslagsmateriale.

Endelig vil det være hensigtsmæssigt at teste blandinger af knust asfalt og stabiltgrus, hvilket kan være relevant, hvis der f.eks. ønskes BSM i større tykkelse end den eksisterende asfalt på vejen, men der samtidigt ikke ønskes tilført supplerende knust genbrugsasfalt udefra.

h) Nye prøvningsmetoder: På basis af de hidtidige "konsolideringer" og erfaringer med BSM, herunder de danske tilpasninger af koncepter og prøvningsmetoder, vil det være oplagt at udarbejde supplerende beskrivelser af besluttede fravigelser, samt at udarbejde nye, supplerende testmetoder, hvor europæiske standardmetoder ikke anvendes – eller anvendes med modifikationer. Dette vurderes af væsentlig betydning for at kunne udgive en vejregel (AAB) for BSM.