



BSM – Undersøgelse af filleroptimering

- *Slutrapport, inklusive vurdering af effekt ved langtidslagring af BSM-prøvelegemer*

Opgave gennemført for Vejdirektoratet





**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

BSM – Undersøgelse af filleroptimering

- Slutrapport, inklusive vurdering af effekt ved langtidslagring af BSM-prøvelegemer

Opgave gennemført for Vejdirektoratet

Rekvirent:

Vejdirektoratet
Att.: Finn Thøgersen
Carsten Niebuhrs Gade 43
1577 Copenhagen 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 Felsingård-Hansen, tlf. 7220 1326, mafe@teknologisk.dk

Opgavenr.: 124670

Versionsnr.: 03 (slutrapport)

12-08-2022

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



Indhold

1.	Indledning	4
2.	Baggrund	4
3.	Formål	4
4.	Anvendt genbrugsasfalt	5
5.	Kornkurveoptimering.....	7
6.	Optimering af BSM-materialernes vandindhold	8
7.	BSM-blandinger og prøvningsresultater	9
7.1.	Delkonklusioner, korttidshærdning 72 timer:	10
7.1.1.	Generel vurdering af den samlede fillermængdes betydning	12
7.1.2.	Evaluering af temperaturens effekt på materialets stivhedsmodul	12
7.1.3.	Vandindholdskontrol	13
7.2.	BSM-blandingernes udvikling i egenskaber efter 2 måneders langtidslagring	13
7.2.1.	Temperatureffekt på langtidslagrede prøvelegemers stivhedsmodul	15
7.2.2.	Kontrol af restvandindhold.....	15
8.	Samlet konklusion	16



1. Indledning

Efter aftale med Finn Thøgersen, Vejdirektoratet, har Teknologisk Institut, Byggeri og Anlæg i april-maj 2022 gennemført en laboratorieprøvningsopgave med formål at undersøge mulighederne for videreudvikling og filleroptimering af BSM (Bitumen Stabiliseret Materiale) til brug som bærelag på motorveje og andre stærkt trafikerede veje.

Denne rapport er en den endelige udgave, inklusive data fra langtidslagring af prøveemner.

2. Baggrund

Der er igennem de seneste 3-4 år gennemført et omfattende test- og dokumentationsarbejde med afprøvning af BSM-konceptet under danske forhold, hvilket er udmundet i udgivelsen af en ny udbudsforskrift for BSM-KMA (Kold Mix Anlæg) ultimo 2021. Erfaringerne fra en række fuldskalastrækninger såvel som laboratorieblandinger viser, at BSM produceret af granuleret asfalt, tilsat 0,8% aktiv filler og ca. 2,1 – 2,2 % skumbitumen typisk resulterer i en belægning med et hulrum på ca. 15-20%, hvilket er noget højere end set for varmblandede asfaltbærelag. Tilsvarende udviser "traditionel" dansk BSM et stivhedsmodul, som er lavere end for varmblandet asfalt, hvilket betyder at bærelagets tykkelse af hensyn til belægningsdimensionering skal øges med ca. 25% for at opnå samme bæreevne og forventede levetid. Vejdirektoratet har derfor, inspireret af italiensk tilgang til BSM, ønsket at undersøge effekten og mulighederne for at sænke hulrummet ved tilsætning af en andel af stenmel eller kalkfiller til BSM-materialets genbrugsasfaltgranulat.

Teknologisk Institut udførte i 2021 for Vejdirektoratet en indledende undersøgelse og sammenligning af italiensk og dansk BSM, hvor fillerindhold, aktiv fillerindhold og bindemiddelttype blev varieret. Disse resultater gav dog ikke et entydigt billede af den opnåelige effekt, hvorfor det blev besluttet at gennemføre den i denne rapport omtalte, mere målrettede forsøgsrække.

3. Formål

Vejdirektoratet har et ønske om opnåelse af øget stivhed og lavere hulrum for BSM. Projektet har derfor til formål at løfte E-værdien ved justering i bunden af kornkurven (øget fillerindhold).

Følgende blandinger gennemføres:

- a) Sidste års "italienske" forsøg (2021) viste begrænset effekt ved tilsætning af 4% kalkfiller, hvilket resulterede i et samlet fillerindhold på ca. 4,5%, hvor italienerne foreskriver 4-8%. Der gennemføres derfor ny blanding, hvor kalkfiller indholdet øges så der opnås ca. 6-7 % samlet fillerindhold. Basis er fortsat en trad. skumbitumen-baseret BSM med samme genbrugsasfalt (0/16 Gammelrand).
- b) Rapportens mix E (foreslået af E. Bocci, Ancona) blev udført med tilsætning af 8% stenmel som resulterede i et samlet fillerindhold på 3,1%, men grundet samtidig tilsætning af ekstra emulsion og cement blev resultatet ikke entydigt. Der gennemføres derfor en blanding, hvor stenmelsindholdet øges, så der opnås ca. 6 -7 % resulterende fillerindhold (samlet stenmelsindhold dog < 20% jf. italienske forskrifter). Samme basis-BSM som a) med skumbitumen.



- c) Der gennemføres samme blanding som b) (evt. a) ovenfor, men med udgangspunkt i en genbrugsasfalt, opnået ved fræseforsøg i Vejen 8/4-2022 med SR-Gruppens Wirtgen WR in situ BSM-stabiliseringsmaskine.

På alle tre blandinger vibrations-fremstilles Ø150 mm prøvelegemer jf. gældende prVD'er og UF for BSM-KMA. Legemer cures 72 timer v/40°C i ventileret varmeskab. Densitet bestemmes på alle prøvelegemer og tillige en maksimaldensitet for hver blanding, så hulrum kan beregnes. Der udføres spal-tetrækstyrketest før/efter vandlagring og bestemmelse af vandfølsomhedstal. Desuden bestemmes stivhedsmodul ved 20°C og (forsøgsvis) ved 40°C før bestemmelse af Marshall-stabilitet ved 25°C.

Der suppleres med "Long-term curing" – ekstra blanding af alle tre varianter a-c og ekstra sæt kerner til test (densitet, stivhed, stabilitet) efter to måneder (om muligt både 20 og 40 °C før stabilitetsbestemmelse). Der gennemføres i denne forsøgsrække ikke wheel-tracking test og heller ikke gyrator-komprimering. Der holdes fokus på tjek af vandindholdet under testforløbet.

4. Anvendt genbrugsasfalt

Der er til blanding a) og b) anvendt 0/16 mm knust genbrugsasfalt fra Gammelrand (samme materiale og leverance som anvendt i forsøgsrækken med "italienske" varianter i 2021). For blanding c) er anvendt et 0/32 mm asfaltgranulat, udtaget ved et fræseforsøg udført i april 2022 med SR-Gruppens Wirtgen WR BSM in situ stabiliseringsmaskine. Kornkurver for de to materialer fremgår af nedenstående tabel 4.1 og efterfølgende figur 4.1.

Sted	0/16 GMA	Fræseforsøg	KAS 0/16	KAS 0/16	Sabita TG2 2020*	
	Gammelrand	Vejen, WR	min	max	(interpoleret)	
	2021	220408			TG2 min	TG2 max
Sigte (mm)	Genf.%	Genf.%	Genf. %	Genf.%	Genf.%	Genf. %
63		100	100	100	100	100
31,5		100	100	100	86	100
25		98			74	100
22,4		96			68	100
16	100	92	75	99	58	100
11,2	93	82			49	92
8	81	70	43	81	42	82
5,6	65	58			35	72
4	53	48	23	66	30	63
2	36	35	12	53	22	48
1	23	25	6	42	15	37
0,5	12	16	3	32	10	29
0,25	4	8			7	22
0,125	1	4			5	17
0,063	0,4	1,6	0	9	4	14

Tabel 4.1: Kornfordeling af de anvendte genbrugsasfalt varianter sammenholdt med AAB-krav til ubundne bærelag af knust asfalt (KAS) samt sydafrikanske Sabita's TG2-grænser for BSM.

Det WR-fræsedede materiale stammer fra et fræseforsøg i Vejen, hvor der med en Wirtgen WR BSM in situ maskine blev fræset i ca. 15 cm dybde på en belægning med ca. 8-10 cm asfalt og underliggende stabilt grus.

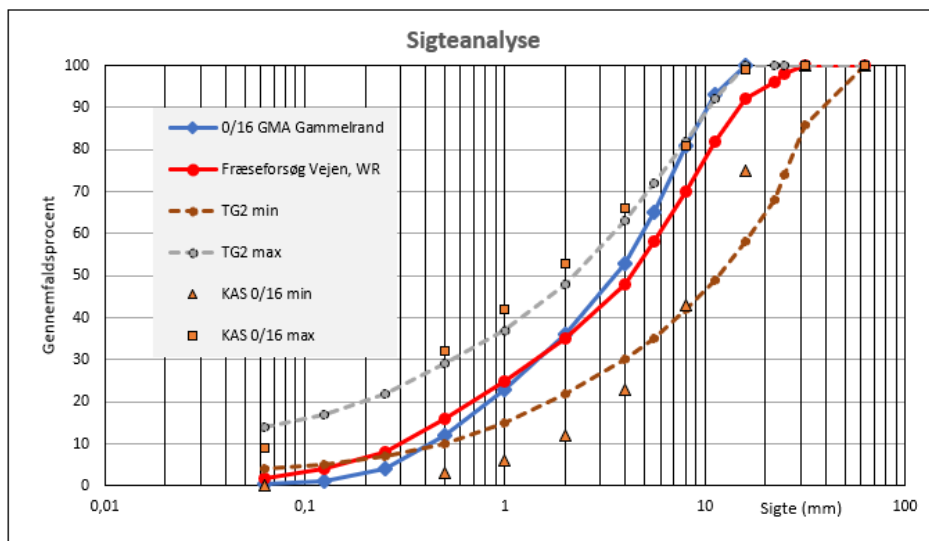


Fig. 4.1: Kornkurvefordeling 0/16 mm genbrugsasfalt Gammelrand (blå, fra 2021 rapport), og WR-asfaltgranulat (rød) benyttet i BSM-forsøgene. Til sammenligning er grænsekurver for KAS 0/16 mm samt Sabita TG2's grænser indsat

Det ses af tabel 4.1 og fig. 4.1 at WR-granulatet er lidt grovere end den anvendte 0/16 mm genbrugsasfalt (GMA) fra Gammelrand, men at begge overholder grænseværdierne for KAS 0/16 og bortset fra fillerindholdet også TG2's grænser.

Modificeret Proctor-test giver for 0/16 mm GMA Gammelrand et forløb som vist i fig. 4.2, med et optimalt vandindhold på 6,3% og en maksimal tørtdensitet på 1,99 Mg/m³.

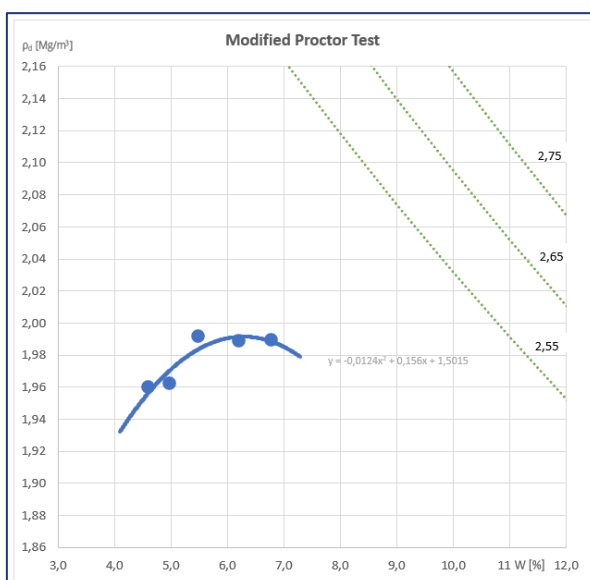


Fig. 4.2: Modificeret Proctortest med Ø150 mm form på 0/16 mm genbrugsasfalt, Gammelrand (fra 2021 rapport).

For WR-genbrugsasfalten opnås ved tilsvarende modificeret Proctor-test et svagt højere optimalt vandindhold på 7,2% og en næsten identisk maksimal tørtdensitet på 2,03 Mg/m³.

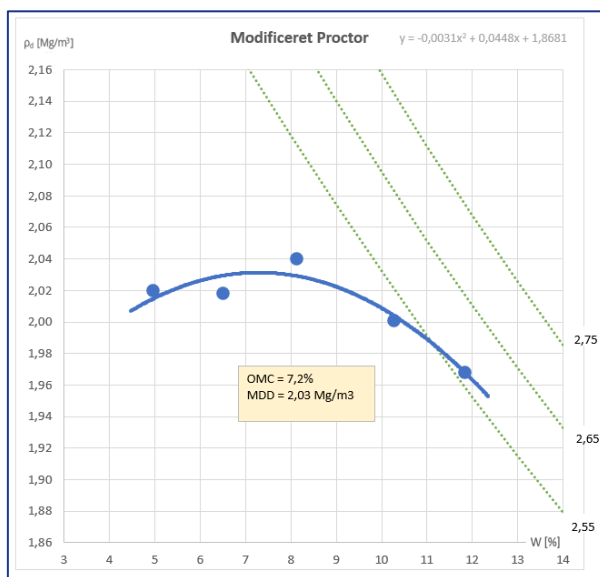


Fig. 4.3: Modificeret Proctor-test på WR-granulatet (fra fræseforsøg Vejen, april 2022)

5. Kornkurveoptimering

Ved de tre forsøgsblandinger er følgende kornkurvefordelinger beregnet:

Materiale	0/16 GMA Gl.rand	WR-fræs 0/32	0/2 stenmel Jelsa	Kalkfiller	Cement	BSM standard	BL a): BSM m/kalk	BL b): BSM stenmel	BL c): Fræs + stenmel	Sabita TG2 2020 (interpoleret)	
Andel GMA	100,0					99,2	93,2	79,2	0	TG2 min	TG2 max
Andel fræs		100,0				0	0	0	79,2		
Andel st.mel			100,0			0	0	20	20		
Andel kalk				100,0		0	6	0	0		
Andel cem					100,0	0,8	0,8	0,8	0,8		
Sigte (mm)	Genf. %		Genf. %				Genf. %	Genf. %	Genf. %	Genf. %	Genf. %
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
31,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	86	100
25	100	98	100	100	100	100	100	100	98	74	100
22,4	100	96	100	100	100	100	100	100	97	68	100
16	100	92	100	100	100	100	100	100	94	58	100
11,2	93	82	100	100	100	93	93	94	86	49	92
8	81	70	100	100	100	81	82	85	76	42	82
5,6	65	58	100	100	100	65	67	72	67	35	72
4	53	48	100	100	100	53	56	63	59	30	63
2	36	35	89	100	100	37	40	47	46	22	48
1	23	25	59	100	100	24	28	31	32	15	37
0,5	12	16	40	100	100	13	18	18	21	10	29
0,25	4	8	27	100	100	5	11	9	13	7	22
0,125	1,2	4	19	97	99	2	8	6	8	5	17
0,063	0,4	1,6	13	85	97	1,2	6,2	3,7	4,6	4	14

Tabel 5.1: Beregnet kornfordeling for BSM-varianterne a), b) og c) sammenholdt med en "traditionel" BSM uden ekstra filler/stenmel (fra 2021 forsøgsserie) samt sydafrikanske Sabita TG2's anbefalede grænsekurver. Det ses, at alle tre undersøgte blandinger a-b-c overholder TG2's grænser, som oplyses som heltal uden decimal.

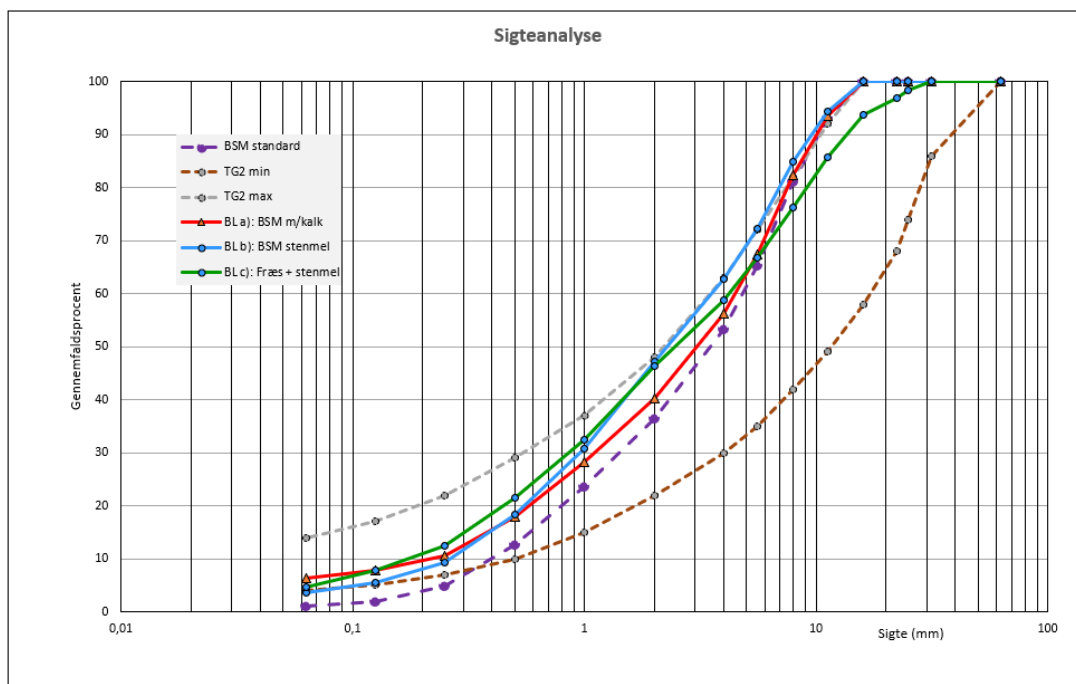


Fig. 5.1: Kornkurver for BSM-blanding a, b og c, sammenholdt med "standard" BSM og TG2 grænser.

Det ses, at det højeste fillerindhold opnås for blanding a) med 6% kalk.

6. Optimering af BSM-materialernes vandindhold

Når BSM-blandingers vandindhold optimeres, går man ud fra det optimale vandindhold, bestemt ved modificeret Proctor-forsøg. Det gælder dog ved udlægning af BSM i praksis om ikke at overskride det optimale vandindhold, da materialet derved mister styrke og kan være længe om at tørre tilstrækkeligt ned til at opnå en høj stabilitet.

Efter normal dansk praksis tilsættes BSM-blandinger derfor en vandmængde, så blandingen opnår et vandindhold svarende til det optimale vandindhold fra modificeret Proctor-forsøg, fratrukket 2%-point. Et springende punkt er nu hvordan tilsætningen af kalkfiller hhv. stenmel påvirker Proctor-kurven og dermed det optimale vandindhold.

Det forekommer umiddelbart logisk, at hvis BSM baseret på genbrugsasfalt tilsættes mere ubundet finstof (mere friktion), så må det optimale vandindhold antageligvis stige. Der er derfor i forsøgsrækken gennemført et modificeret Proctor-forsøg på 0/16 mm genbrugsasfalten fra Gammelrand (anvendt i blanding a og b), tilsat 20% Jelsa 0/2 mm klippe-stenmel (sv.t. blanding b). Resultatet fremgår af fig. 6.1.

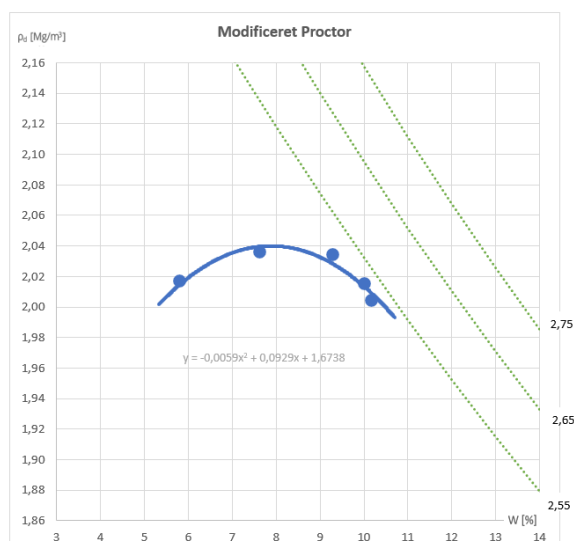


Fig. 6.1: Modifieret Proctor test på blanding af 80% 0/16 mm genbrugsasfalt fra Gammelrand og 20% 0/2 mm stenmel fra Jelsa. Optimal vandprocent er 7,9% og maksimal tørdensitet 2,04 Mg/m³.

Hvis man sammenligner resultatet med fig 4.2 (for tilsvarende genbrugsasfalt uden stenmel) ses, at det optimale vandindhold er steget fra 6,3 til 7,9% - altså 1,6 % højere. Den nye Proctor-værdi (for genbrugsasfalt plus stenmel) er derfor anvendt ved efterfølgende BSM-blanding b), hvor der således er tilstræbt et vandindhold på 5,9%.

Der er ikke i denne begrænsede forsøgsrække udført fornyet Proctor-test for de to andre varianter, men for blanding a) med ekstra kalk er vandindholdet skønsomt øget med 1% til 6,9%. For blanding c) med WR-granulat og stenmel er det tilstræbte vandindhold skønsomt på ovennævnte baggrund hævet med 2% til 7,2 %.

7. BSM-blandinger og prøvningsresultater

Der er ved alle tre forsøgsblandinger af BSM a-b-c anvendt samme skumbitumenindhold på 2,2% 40/60 bitumen, heraf 2,8% skumningsvand.

For alle tre blandinger (a-b-c) er der fremstillet 2x9 stk. Ø150 x 60 mm prøvelegemer, som er vibrationsindstampet med 2x60 sekunders vibration, efterfulgt af 72 timers curing (hærdning) ved 40°C i ventileret varmeskab.

Herefter er der bestemt densitet på alle prøvelegemer og på det ene sæt prøvelegemer fra hver serie bestemt spaltetrækstyrke ved 25°C af tørt og vådt lagrede legemer. Der er desuden bestemt stivhedsmodul ved 20 og 40°C, hvorefter der er bestemt Marshall-stabilitet ved 25°C. Endelig er der for hver serie bestemt maksimaldensitet, således at prøvelegemernes hulrum kan beregnes.

De opnåede data fremgår af den efterfølgende tabel.



Mix	Lagring, tid	Densitet Mg/m ³	Spaltetræk ITS _{tør} , kPa	Spaltetræk ITS _{våd} , kPa	Vandføls. ITS _R , %	Stivhedsmod ITSM20°C, MPa	Stivhedsmod ITSM40°C, MPa	Stivhedsmod 40°C : 20°C (%)	Marshall stabilitet 25°C, kN	Maksimal densitet Mg/m ³	Hulrum %
Blanding a) 0/16 Gl.rand 6% kalk	72t v/40°C	2,083	413	319	77,2	2583	1068	41,3	33,0	2,416	13,8
	72t v/40°C + 8 uger 20°C	2,060	399	349	87,5	3415	1547	45,3	29,9	2,416	14,7
	Ændring (%)	-1,1	-3,4	9,4	13,2	32,2	44,9		-9,4	0,0	6,9
Blanding b) 0/16 GMA 20%stenmel	72t v/40°C	2,026	328	269	82,0	1848	875	47,3	26,0	2,464	17,8
	72t v/40°C + 8 uger 20°C	2,024	323	237	73,4	2149	976	45,4	21,8	2,464	17,9
	Ændring (%)	-0,1	-1,5	-11,9	-10,5	16,3	11,5		-16,2	0,0	0,5
Blanding c) WR-granulat 20% stenmel	72t v/40°C	2,096	397	291	73,3	2391	1036	43,3	31,8	2,473	15,2
	72t v/40°C + 8 uger 20°C	2,078	498	349	70,1	2751	1216	44,2	33	2,473	16,0
	Ændring (%)	-0,9	25,4	19,9	-4,4	15,1	17,4		3,8	0,0	4,8
BSM m/ Gl.rand ren 2021 (ref.1)	72t v/40°C	1,918	212	166	78,3	1459	N/A		14,1	2,415	20,6
BSM m/WR granulat ren 2022 (ref. 2)	72t v/40°C	2,008	308	265	86,0	2284	N/A		24,6	2,438	17,6
BSM m/ Gl.rand+4%kalk, 2021 (ref.3)	72t v/40°C	1,971	248	196	79,0	1587	N/A		18,4	2,418	18,5
UF for BSM-KMA 2021 AAB-krav			≥ 200		≥ 70	≥ 1.000			≥ 12,0		

Tabel 7.1: Opnåede laboratoriedata for de tre BSM-blandinger a-b-c ved test umiddelbart efter afsluttet curing i 72 timer. Endvidere ses data for prøvelegemer langtidslagret i 8 uger.

I ovenstående tabel 7.1 indgår data fra tre forskellige referencer fra tidligere forsøg:

- Ref.1 er en "standard" BSM-blanding, baseret på samme 0/16 mm genbrugsasfalt fra Gammelrand som anvendt i blanding a og b. Data stammer fra forsøgsserie udført for Vejdirektoratet i 2021: "BSM - Comparison of Italian and Danish cold mix asphalt concepts".
- Ref. 2 er en laboratorieblending baseret på genbrugsgranulat opnået ved fræsning med en Wirtgen WR-fræsemaskine. Det opfræsedede materiale består af affræs af ca. 10 cm asfalt og 5 cm underliggende grus, hvorfor materialets kornkurve og fillerindhold er anderledes end for den knuste genbrugsasfalt fra Gammelrand. De anførte forsøgsdata stammer fra en endnu ikke publiceret forsøgsserie udført i 2022 for Vejdirektoratet.
- Ref. 3 er en "standard" BSM-blanding med knust genbrugsasfalt 0/16 mm fra Gammelrand, men i en tidligere forsøgsrække tilsat 4% kalkfiller. Data stammer fra rapporten "BSM - Comparison of Italian and Danish cold mix asphalt concepts", udarbejdet af Teknologisk Institut for Vejdirektoratet i 2021.

7.1. Delkonklusioner, korttidshærdning 72 timer:

- BLANDING A: Sammenlignes blanding a (tilsat 6% kalkfiller) og reference 1 (samme genbrugsasfalt fra Gammelrand) ses, at stivhedsmodulen ved 20°C øges fra 1459 MPa til 2583 MPa (næsten fordobling), samt at hulrummet reduceres fra 20,6% til 13,8%. Marshall-stabiliteten mere end fordobles fra 14 kN til 33 kN. Både tørre og våde spaltetrækstyrkeværdier fordobles næsten ved tilsætning af 6% kalk, men vandfølsomheden ses ikke forbedret. Samlet set ses klart forbedrede værdier ved kalktilsætning.



- **BLANDING B:** Sammenlignes blanding b (tilsat 20% klippegranit stenmel) med reference 1 (samme genbrugsasfalt Gammelrand) ses, at stivhedsmodul ved 20°C øges fra 1459 MPa til 1848 MPa, altså en mere begrænset forbedring. Tilsvarende falder hulrummet mere begrænset fra 20,6 til 17,8%. Marshall-stabiliteten øges fra 14,1 til 26,0 kN. Desuden øges begge spaltetrækstyrkeværdier og vandfølsomhedstallet forbedres lidt fra 78 til 82%.
- **BLANDING C:** Sammenlignes data fra blanding c (20% stenmel, WR-granulat) med reference 2 med samme genbrugsgranulat ses, at stivhedsmodul ved 20°C øges svagt fra 2284 til 2391 MPa. Tilsvarende falder hulrummet svagt fra 17,6 til 15,2%. Marshall-stabiliteten øges fra 24,6 til 31,8 kN. Den våde spaltetrækstyrke falder dog, ligesom vandfølsomhedstallet forringes fra 86 til 73% - altså netop over udbudsforskriftens grænseværdi på 70%.

Samlet ses må det konkluderes, at tilsætning af en relativt stor mængde kalkfiller (6%) har en klart positiv effekt på opnået stivhedsmodul, stabilitet og hulrumsniveau. Udfordringen ved implementering af denne variant i fuldskala BSM-produktion kan dog være at kunne dosere 6% kalk foruden de ca. 0,8% cement, hvilket ikke umiddelbart vurderes muligt med den eksisterende type af KMA-anlæg, ligesom en sådan dosering skønnes at kunne blive vanskelig at anvende ved in situ fremstilling af BSM. Resultatet giver dog et vist fingerpeg i retning af hvilke resultater, som teoretisk vil kunne opnås, så fremt der måtte blive anvendt et andet tilslagsmateriale med højere fillerindhold.

Tilsætning af 20% stenmel - for derved at kunne forøge fillerindholdet - har også en positiv effekt på stivhedsmodul, stabilitet og hulrumsniveau, om end der ses en noget mere begrænset effekt end ved tilsætning af 6% af kalk. Dette kan dels skyldes, at det samlede fillerindhold fra stenmelsvarianterne b og c ikke opnår et lige så højt fillerindhold som for blanding a med kalk, dels at tilsætning af stenmel samtidigt hæver sigtekurven omkring 2 mm sigten, så den resulterende sigtekurve får en "sandpukkel" tendens (som alt andet lige øger hulrummet) og rammer den øvre grænsekurve for BSM fra TG2-manualen. For at få et optimalt fillerindhold skulle stenmelsindholdet måske øges til 25-30%, men i så fald ville der samtidigt være behov for at tilsætte friske 8/11 mm sten for at sænke kurven igen - og i så fald bevæger man sig langt væk fra det oprindelige, bæredygtige koncept baseret udelukkende på genbrugsasfalt.

For blanding c er effekten af stenmel yderligere begrænset, hvilket bl.a. kan skyldes, at WR-fræs-granulatet både har et højere fillerindhold og et højere stenindhold og derfor i sig selv har et mere "ideelt" kornkurveforløb, hvorfor "forbedring" med stenmel har en begrænset effekt - og endda ses en lille negativ effekt på vandfølsomhedstallet.

Forsøgsrækken indikerer, at der for BSM kan opnås en hulumsreduktion og stivhedsforøgelse ved tilsætning af 20% stenmel eller 6% kalkfiller, hvor sidstnævnte har den tydeligste effekt. Det bør dog vurderes, om den indikerede gevinst står mål med det produktionsmæssigt mere komplicerede koncept, og muligvis mere begrænset CO₂-besparelse og økonomisk besparelse, sammenlignet med varmblandede asfaltbærelag.

Endelig viser ved sammenligning med data fra reference 2, at effekten fra ekstra fillertilsætning er ret begrænset, hvis det anvendte genbrugsmateriale allerede indeholder et lidt højere fillerindhold.



Fig. 7.1: BSM prøvelegemer før test. Bemærk, hvordan BSM-materialet (blanding a) med "standard" genbrugsasfalt fra Gammelrand, tilsat 6% kalkfiller (ses i forgrunden) fremtræder meget lysere end de bagved stående testserier af BSM fremstillet på normal vis med genbrugsasfalt uden ekstra fillertilsætning.

7.1.1. Generel vurdering af den samlede fillermængdes betydning

Hvis data i tabel 7.1 fra blanding a) (med 6% kalkfiller) sammenlignes med data fra reference 3 (som principielt er samme blanding med blot 4% kalkfiller i stedet for 6%, udført i 2021) ses umiddelbart en ret stor effekt på de opnåede data ved forøgelsen fra 4 til 6% kalk. Det kan umiddelbart virke overraskende, at de ekstra 2% kalkfiler skulle have så stor en forbedrende effekt på f.eks. stivhed og spaltettrækstyrke. Det skal dog i denne sammenhæng bemærkes, at reference 1 har et totalt fillerindhold (gennemfald på 0,063 mm) på blot 1,1%, reference 3 (med 4% kalk) har et samlet fillerindhold på 4,5% og blanding a) med 6% kalk et samlet fillerindhold på 6,2%.

Sammenlignes supplerende med data fra blanding b), som også er baseret på samme genbrugsasfalt, men tilsat 20% stenmel i stedet for kalk, ses data, som ligger betydeligt tættere på reference 3's data. Blanding b) er ganske vist baseret på stenmelstilsætning, men opnår med 3,7% resulterende fillerindhold en værdi, som ligger tæt på reference 3's 4,5% fillerindhold. Disse data synes således at antyde, at der sker en progressivt større forbedring af de opnåede testdata ved at gå fra 4 til 6% samlet fillerindhold, end det er tilfældet ved at gå fra 1 til 4% samlet fillerindhold. Det foreliggende datagrundlag vurderes dog for nuværende at være for spinkelt til at kunne fastslå en sådan effekt med nogen sikkerhed og ville i givet fald kræve flere undersøgelser og større datagrundlag for at kunne fastlægge denne tese med større sikkerhed.

7.1.2. Evaluering af temperaturens effekt på materialets stivhedsmodul

Der er efter aftale bestemt stivhedsmodul på de cylinderformede prøvelegemer både ved 20 og 40°C for at få et indblik i BSM-materialets stivhedsmæssige afhængighed af temperatur. De opnåede data for 72 timer hærkede prøver fremgår af nedenstående tabel 7.2.



Mix	Lagring, tid	Stivhedsmod ITSM20°C, MPa	Stivhedsmod ITSM40°C, MPa	Stivhedsmod 40°C : 20°C (%)
Blanding a) 0/16 Gl.rand 6% kalk	72t v/40°C	2583	1068	41,3
Blanding b) 0/16 GMA 20%stenmel	72t v/40°C	1848	875	47,3
Blanding c) WR-granulat 20% stenmel	72t v/40°C	2391	1036	43,3
BSM m/ Gl.rand ren 2021 (ref.1)		1459	N/A	
BSM m/WR granulat ren 2022 (ref. 2)		2284	N/A	
UF for BSM-KMA 2021 AAB-krav		≥ 1.000		

Tabel 7.2: Stivhedsmodul bestemt ved hhv. 20 og 40°C.

Det fremgår af tabel 7.2, at der for alle tre materialer ses et væsentligt fald i stivhedsmodul ved at øge testtemperaturen fra 20 til 40°C. Stivhedsmodulet målt ved 40°C udgør således gennemsnitligt kun ca. 45% af stivhedsmodulet målt ved 20°C. Dette synes at bekræfte at BSM ikke opfører sig som et ubundet bærelagsmateriale.

7.1.3. Vandindholdskontrol

Der er efter aftale foretaget orienterende kontrolvejning for at kunne følge restvandindholdet under lagrings-/prøvningsforløbet. Det har af gode grunde ikke været muligt at foretage vejning af de "vådt" indstampede prøvelegemer umiddelbart efter indstampning. Alle prøver er efter normal procedure blevet afformet efter ca. 3 timers indledende curing/hærdning i varmeskab ved 40°C. Vægten er herefter bestemt for alle prøvelegemer inden den videre ovncuring frem til i alt 72 timers curing ved 40°C. Herefter er prøvelegemerne kølet ned til 20°C og vægte genbestemt. Der ses for blanding A et gennemsnitligt vægttab mellem afformning og afsluttet curing på 3,4% og for blanding B på gennemsnitlig 3,6%. Prøvelegemerne fra serie C er kun vejet efter færdig ovn-curing, men formodes at have et tilsvarende vægttab på ca. 3,5%.

7.2. BSM-blandingernes udvikling i egenskaber efter 2 måneders langtidslagring

Som en del af forsøgsrækken er der for alle tre blandinger fremstillet 9 supplerende prøvelegemer, som er langtidslagret i 8 uger, for at vurdere om der derved kan ses en styrkeudvikling.



Fig. 8.1: For hver af de tre blanderecepter er der langtidslagret 9 stk. vibrationsindstampede kerner til test efter lagring i 8 uger. Bemærk også her, hvordan serie A (nederst, med 6% kalkfiller) er noget lysere end blanding C (øverst, WR-fræs med 20% stenmel) og meget lysere end blanding B (midterste hylde, genbrugsasfalt Gammelrand med 20% stenmel).

Resultatet af langtidslagringen ses i de grønmarkerede rækker i tabel 7.1, hvor de mørkere grønne rækker angiver den procentvise ændring i data ved lagring i 8 uger i stedet for 72 timer. For en del af parametrene ses både positive og negative ændringer som følge af langtidslagringen, hvilket i et vist omfang kan skyldes analyseusikkerhed og mindre prøveemne-variationer. Mest markant ændring ses for stivhedsmodulet, som ved 20°C øges med ca. 15 – 30% og stivhedsmodulet ved 40°C som øges 12 – 45% ved skift fra 72 timer til 8 ugers langtidslagring. Det bemærkes desuden, at ændringerne i stivhedsmodul er klart størst for blanding A, som indeholder 6% kalkfiller – og som derfor måske er et mere vandabsorberende materiale end de to varianter med stenmel, ligesom hulrummet er lavere.

Sammenfattende ses for alle tre afprøvede BSM-materialer at stivhedsmodulet øges væsentligt når lagringstiden forlænges. Dette synes også at harmonere med den generelle forventning om at der for fuldskala-udlagt BSM på vejen sker en vis styrkeudvikling i BSM-lagets bæreevne hen over nogle måneder efter udlægning.



7.2.1. Temperatureffekt på langtidslagrede prøvelegemers stivhedsmodul

Tabel 7.3 viser de tre BSM-blandingers stivhedsmoduler bestemt ved 20 hhv. 40°C, samt stivhedsmodulet ved 40°C's procentvise størrelse, set i forhold til stivhedsmodulet ved 40°C. Der ses som for de 72 timer normalt hærkede prøver også for 8 ugers hærkning at stivhedsmodulet ved 40°C udgør ca. 45% af stivhedsmodulet ved 20°C. Altså igen en bekræftelse af, at BSM's stivhed er temperaturafhængig, som det også er kendt for asfalt.

Mix	Lagring, tid	Stivhedsmod ITSM20°C, MPa	Stivhedsmod ITSM40°C, MPa	Stivhedsmod 40°C : 20°C (%)
Blanding a) 0/16 GI.rand 6% kalk	72t v/40°C	2583	1068	41,3
	72t v/40°C + 8 uger 20°C	3415	1547	45,3
	Ændring (%)	32,2	44,9	
Blanding b) 0/16 GMA 20%stenmel	72t v/40°C	1848	875	47,3
	72t v/40°C + 8 uger 20°C	2149	976	45,4
	Ændring (%)	16,3	11,5	
Blanding c) WR-granulat 20% stenmel	72t v/40°C	2391	1036	43,3
	72t v/40°C + 8 uger 20°C	2751	1216	44,2
	Ændring (%)	15,1	17,4	

Tabel 7.3: Stivhedsmoduler opnået ved forskellige lagringstider og temperaturer.

7.2.2. Kontrol af restvandindhold

For de 8 uger langtidslagrede prøvelegemer er vandindholdet for blanding a supplerende bestemt umiddelbart efter den udførte spaltetrækstyrkebestemmelse. Her ses for de tørt lagrede legemer et restvandindhold på 0,3% (altså praktisk taget ingen restvand) og for de vådt lagrede legemer et vandindhold på ca. 3,4%.



8. Samlet konklusion

Typisk dansk fremstillet BSM med tilslag af genbrugsasfalt udviser et filler-indhold, som ligger i underkanten af anbefalingerne angivet i sydafrikanske Sabita's TG2-manual. Det er derfor i en laboratorieforsøgsrække undersøgt om man ved at øge fillerindholdet vil kunne reducere BSM-materialets hulrum og samtidigt øge materialestivheden (bæreevnen). I forsøgsserien er en genbrugsasfalt-baseret BSM derfor "kornkurvejusteret" ved tilsætning af kalkfiller hhv. klippegranit-stenmel. Kornkurveberegninger viser, at det for den aktuelle genbrugsasfalt er muligt at tilsætte op til 6% kalkfiller eller 20% stenmel uden at kornkurven falder udenfor TG2's kurvebånd.

De fundne data fra forsøgsserien synes at bekræfte tesen om, at der med et forhøjet fillerindhold vil kunne opnås et forhøjet stivhedsmodul, samtidigt med et lidt lavere hulrum. Det ses dog også, at effekten er afhængig af det pågældende udgangspunkt (den anvendte genbrugsasfalt), idet effekten ved øget fillertilsætning til det ene af de to afprøvede genbrugsasfaltmaterialer, som stammer fra et fræseforsøg i 2022, er ret begrænset.

Ved vurdering af den fundne effekt i form af især stigninger i stivhedsmodul bør effekten i en samlet vurdering også sammenholdes med de praktiske udfordringer ved at skulle dosere et ekstra tilslag i form af kalkfiller eller stenmel, samt den deraf forventeligt følgende forøgede CO₂-belastning og omkostning. Resultaterne synes dog at indikere, at genbrugsasfaltmaterialer med et lidt højere "naturligt" fillerindhold end den i forsøgsrækken (ref.1 og 3 samt bl. a og b) indgående muligvis vil kunne vise sig fordelagtige, hvis forhøjede BSM-styrker måtte ønskes, f.eks. ved særlig tung/intensiv trafik.

Resultaterne indikerer under alle omstændigheder hvilket niveau for de forskellige funktionsegenskaber, som teoretisk vil kunne opnås, såfremt der måtte blive anvendt et tilslagsmateriale med højere fillerindhold end typisk set for traditionel dansk genbrugsasfalt.

Som en del af forsøgsserien er der foretaget funktionsafprøvning af prøvelegemer, som er hærdet (curet) både 72 timer ved 40°C (standard procedure) samt ved langtidslagring i 8 uger – dette for at simulere effekt af hærkning på vejen over tid. Det ses af de opnåede data, at BSM-materialets stivhedsmodul øges markant – op til 45% - ved langtidslagring. Dette svarer godt til den almindelige forventning om, at BSM-belægninger øger bæreevnen over nogle måneder efter udlægning.

En anden væsentlig observation er, at alle de afprøvede BSM-blandinger udviser et reduceret stivhedsmodul ved 40°C, som kun udgør ca. 45% af det tilsvarende bestemte stivhedsmodul ved 20°C – og antyder således, at BSM er en form for bundet materiale med temperaturafhængige egenskaber – som det også er kendt fra asfalt.