



Dokumentation af BSM in-situ på  
motorvej M80, Hjallerup, km 316-318 S  
Prøvning udført for Vejdirektoratet

22. oktober 2020



TEKNOLOGISK  
INSTITUT



**TEKNOLOGISK  
INSTITUT**

# Dokumentation af BSM in-situ på motorvej M80, Hjallerup, km 316-318 S

## Prøvning udført for Vejdirektoratet

---

### Rekvirent:

Vejdirektoratet  
Carsten Niebuhrs Gade 43  
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 Felsing-Hansen, tlf. 7220 1326, mafe@teknologisk.dk

Opgavenr.: 943250

Versionsnr.: 01

22. oktober 2020

Resultater af Institutets 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. Institutets 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 og formål .....	4
3.	Resultater, "standard" prøvning .....	6
3.1.	Sammensætningskontrol.....	6
3.2.	Referencedensitet .....	6
3.3.	Stendensitet og hulrumsberegning.....	7
3.4.	Vandfølsomhed .....	7
3.5.	Stivhedsmodul.....	9
4.	Komprimering .....	10
5.	Resultater, udvidet prøvning.....	11
5.1.	Sporkøringstest .....	11
5.2.	Ældningsresistens.....	15
5.3.	Bearbejdelighed, forskellige laboratorieindbygningsmetoder .....	17
5.3.1.	Vibrationsindstampingning på tid .....	17
5.3.2.	Marshall-indstampingning med forskellig slagenergi .....	18
5.3.3.	Gyratorkomprimering.....	19



## 1. Indledning

Efter aftale med Finn Thøgersen, Vejdirektoratet, har Teknologisk Institut, Byggeri og Anlæg den 22-23. september 2020 udtaget laboratorieprøver af BSM-in-situ materialet udlagt på motorvej M80, Frederikshavnsmotorvejen, ved Hjallerup, i den sydlige side, km. 316-318. Prøverne er udtaget som entrepriseopfølgning og erfaringsopsamling. Teknologisk Instituts asfaltlaboratorium har efterfølgende gennemført et prøvningsprogram som nærmere forud aftalt. Prøvningerne omfatter som udgangspunkt de "normale" tests af materialesammensætning, vandfølsomhed, stivhedsmodul etc. Da det er den første BSM-strækning på en dansk motorvej, er der desuden udført udvidet prøvning med bl.a. sporkøringstest, triaxialtest og vurdering af bearbejdelighed, samt ældningsresistens.

BSM-strækningen er udført på en ca. 2 km lang delstrækning af motorvejen i sydgående side, hvor der har været observeret revneproblemer i den eksisterende belægning. Efter affræsning af SMA-slidlaget og ABB-bindelaget, er GAB-bærelaget (ca. 15 cm) blevet affræset og i samme operation BSM-stabiliseret in-situ med Arkil's specielle CRi-maskine. Prøvningen omtalt i denne rapport vedrører alene BSM-laget, som efterfølgende er afdækket med ny varmblandet asfalt (ABB og SMA). I rapporten er desuden medtaget resultatet fra komprimeringskontrol af det indbyggede BSM-lag. Denne komprimeringskontrol er udført med Troxler isotopsonde af Eurofins' laboratorium.

## 2. Baggrund og formål

Det afprøvede BSM-lag er fremstillet af affræset GAB-bærelag, som in-situ er tilsat skumbitumen (opskummet bitumen 70/100), procesvand og ca. 0,8% cement.

Denne rapport beskriver den udførte laboratoriekontrol af BSM-laget. Ifølge aftale med rekvirenten havde undersøgelsen følgende omfang:

- Udtagning af BSM-prøve fra 2 dagsproduktioner af Arkil's BSM in-situ produktion på udlægningsstedet og hastetransport til Teknologisk Institut i Taastrup.
- Fremstilling af prøvelegemer inden for 8 timer fra prøveudtagning af "frisk" BSM.  
*Grundet den lange transportafstand mellem Hjallerup og Taastrup har det ikke været muligt at overholde den "normale", vejledende deadline på max. 4 timer, men det vurderes, at hvis BSM straks efter prøveudtagningen opbevares i plastspande med tætsluttende låg, kan lagring op til 24 timer før indstampning/vibrering/indtromling af prøvelegemer accepteres uden nævneværdig forringelse af efterfølgende prøvningsdata.*
- Bestemmelse af vandindhold i prøven, efterfulgt af bitumenindhold (ekstraktion, DS/EN 12697-1) og sigteanalyse (DS/EN 12697-2) før/efter ekstraktion, samt stendensitet (til hulrumsberegning, jf. DS/EN 12697-8).
- Indstampning af prøvelegemer både med vibration i Ø150 mm forme (3 lag til vandfølsomhed, 2 lag til stivhedsmodul) ved 20°C, samt Marshall 2x50 og Marshall 2x75 slag ved 20°C i Ø100 mm forme (i alt 3x9 legemer).



Vibrationsindstampning er foretaget iht. Wirtgens manual for BSM-prøvning<sup>1</sup>. Vibrering i tidsinterval indtil tilstræbt densitetsværdi fra Modifieret Proctor er opnået (eller time-out 40 sekunder), Ved in-situ BSM benyttes en estimeret Proctor-værdi.

- Prøvelegemer cures min 72 timer ved 40°C hvorefter prøvning gennemføres.
- Bestemmelse af prøvelegemernes dimensioner og densitet (geometrisk), samt beregning af hulrum (geometrisk).
- Spaltetrækstyrkebestemmelse tør/våd (25°C, våde 24 timer i vandbad) og bestemmelse af vandfølsomhed jf. DS/EN 12697-12 ved alle tre komprimeringsformer.
- Bestemmelse af stivhedsmodul ved 20°C jf. DS/EN 12697-26, IT-CY, ved alle tre komprimeringsformer.
- Efterfølgende er der foretaget beregning af komprimeringsgrad af indbygget BSM på basis af de udførte Troxler-målinger.

Den udvidede prøvning (kun af første dagsproduktion 22/9-2020) omfatter:

- Bestemmelse af sporkøringsmodstand ved 45°C jf. DS/EN 12697-22:2020, Small-size, Procedure B in air: Pladetykkelse 10 cm, dobbeltbestemmelse, 10.000 load cycles.
- Bestemmelse af deformationsresistens ved triaxialtest på Ø100 mm Marshall-indstampede prøvelegemer. Ved fastlæggelse af testbetingelser er der taget udgangspunkt i kravsat D.2.8, jf. DS/EN 13108-20: Testtemperatur 40°C, 50 kPa confining stress, 200 kPa axial load amplitude, Frequency 1 Hz, Haversine pulse).
- Bestemmelse af ældningsresistens ved bestemmelse af stivhedsmodul før/efter kunstig langtidsældning i PAV-ovn, jf. DS/EN 12697-52. Testbetingelser ved PAV-ældning er valgt som lagring ved 90°C i 20 timer (sv.t. "RILEM-ageing"). Prøvelegemer: 3 stk. Marshall-legemer, indstampet 2x50 slag ved 20°C. Stivhedsmodul bestemt ved 20°C jf. DS/EN 12697-26, IT-CY.
- Bestemmelse af BSM-materialets bearbejdelighed, opstillet som kurveforløb ud fra forskellige komprimeringsniveauer ved vibration hhv. Marshall-indstampning, suppleret med gyrationindbygning, hvor prøvelegemets højde løbende monitoreres under gyrationerne.

---

<sup>1</sup> BSM Cold Recycling, Laboratory Handbook, Wirtgen, 2017.

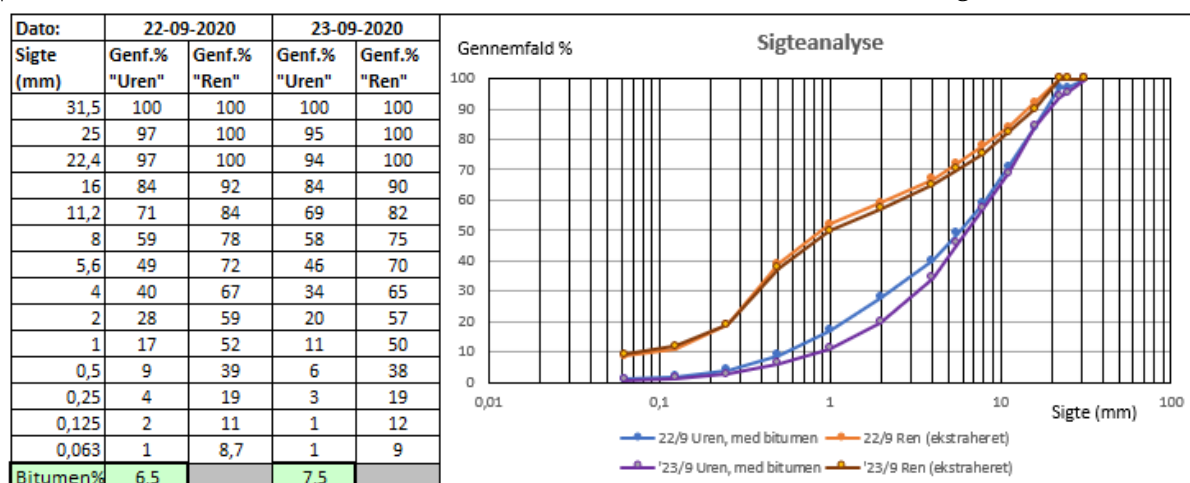


### 3. Resultater, "standard" prøvning

De opnåede resultater fra prøvningen fremgår af de efterfølgende delafsnit.

#### 3.1. Sammensætningskontrol

Der er på prøverne ved ovntørring indledningsvis bestemt et vandindhold på 4,2% den 22/9 og 4,9% den 23/9. Følgende data er opnået for sigteanalyse henholdsvis før og efter ekstraktion, samt bestemmelse af prøvens samlede bindemiddelindhold (bitumenindhold fra gammelt, affræset materiale plus indhold fra tilsat skumbitumen i BSM). Testmetoder: DS/EN 12697-1:2020 og 12697-2:2019.



Der ses ikke væsentlige forskelle imellem de to dagsproduktioner, hverken på "urent", bitumenholdigt materiale, eller på ekstraheret stenmateriale efter udvaskning af bitumen. Derimod ses (som forventet) stor forskel imellem "rene" og "urene" sigtekurver, idet filler-andelen i de "urene" prøver er bundet i bitumenmørtelen. Til orientering kan i øvrigt oplyses, at det "rå", bitumenholdige BSM-materiales kornkurver overholder kravgrænserne angivet i AAB for ubundne bærelag af knust asfalt og beton, kategori 0/16 KAS, 0/31,5 KAS og KAB kategori I og II.

#### 3.2. Referencedensitet

Der er på materialet dels foretaget vibrationsindstampning af Ø150 mm prøvelegemer efter Wirtgens metode, dels fremstillet Ø100 mm Marshall-legemer ved 2x50 og 2x75 slag (DS/EN 12697-30:2018). Alle indbygningsformer er foretaget ved 20°C jf. Wirtgens retningslinjer og TG2-manualen<sup>2</sup>.

De opnåede densiteter (alle i Mg/m<sup>3</sup>) er følgende (geometrisk bestemt, DS/EN 12697-6:2020):

Indbygning	Vibration	Marshall 2x50 slag	Marshall 2x75 slag
22/9-2020	1,835	1,869	1,891
23/9-2020	1,858	1,874	1,899
Gennemsnit	1,847	1,872	1,895

<sup>2</sup> Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, TG2, 3<sup>rd</sup> ed., Sabita, June 2020



### 3.3. Stendensitet og hulrumsberegning

Der er på det ekstraherede stenmateriale foretaget bestemmelse af stendensitet, efterfulgt af hulrumsberegning på basis af DS/EN 12697-8:2018. Resultatet fra produktionen 22/9 fremgår af efterfølgende tabel:

#### **Volumetrisk beregning, laboratoriefremstillede legemer**

Hulrumsberegning ved forskellige komprimeringsenergi-/metoder (baseret på stendensitet), geometrisk densitet

Kontroldata		Vibration		Marshall 2x50		Marshall 2x75	
Bitumen %	Stendens Mg/m <sup>3</sup>	Densitet Mg/m <sup>3</sup>	Hulrum %	Densitet Mg/m <sup>3</sup>	Hulrum %	Densitet Mg/m <sup>3</sup>	Hulrum %
6,5	2,636	1,835	23,2	1,869	21,8	1,891	20,9

Som det fremgår af ovenstående, har BSM-materialet et ret stort hulrum, hvilket dog ikke er overraskende eller unormalt for det punktvis bundne materiale.

Tilsvarende fremgår hulrumsberegningen fra produktionen 23/9 af efterfølgende tabel:

#### **Volumetrisk beregning, laboratoriefremstillede legemer**

Hulrumsberegning ved forskellige komprimeringsenergi-/metoder (baseret på stendensitet), geometrisk densitet

Kontroldata		Vibration		Marshall 2x50		Marshall 2x75	
Bitumen %	Stendens Mg/m <sup>3</sup>	Densitet Mg/m <sup>3</sup>	Hulrum %	Densitet Mg/m <sup>3</sup>	Hulrum %	Densitet Mg/m <sup>3</sup>	Hulrum %
7,5	2,65	1,858	21,5	1,874	20,8	1,899	19,8

Grundet det højere fundne bitumenindhold i dagsproduktionen fra 23/9 er hulrumsniveauet ca. 1% lavere end første dagsproduktion, men ligger dog i samme størrelsesorden på ca. 20%.

### 3.4. Vandfølsomhed

Vandfølsomheden af det testede BSM-materiale er testet på både vibrationsindstampede (Wirtgen vibrationshammer) og Marshall-indstampede (DS/EN 12697-30:2018) prøvelegemer. Vandfølsomhedstesten er gennemført jf. DS/EN 12697-12:2018, idet der dog jf. Wirtgens anvisninger er anvendt en testtemperatur på 25°C og de våde legemer er vandlagret 24 timer i vandbad ved 25°C

Følgende data er opnået for produktionen 22/9:

Indbygningsmetode	Vibration	Marshall 2x50 slag	Marshall 2x75 slag
Spaltettrækstyrke, tør (kPa)	135	190	234
Spaltettrækstyrke, våd (kPa)	102	179	208
Vandfølsomhed (%)	75,6	94,3	88,9

Som det fremgår af tabellen, er der opnået fine værdier for (modstand mod) vandfølsomhed.



Foto 3.4.2: Spaltetrækstyrkebestemmelse til vurdering af vandfølsomhed.



Foto 3.4.3: Close-up af spaltetrækbrud. Den lodretgående brudlinje ses tydeligt.

For dagsproduktionen 23/9 er tilsvarende opnået følgende data:

Indbygningsmetode	Vibration	Marshall 2x50 slag	Marshall 2x75 slag
Spaltetrækstyrke, tør (kPa)	214	218	275
Spaltetrækstyrke, våd (kPa)	221	183	257
Vandfølsomhed (%)	103,2	83,9	93,4

Igen ses meget fine, høje værdier for (modstand mod) vandfølsomhed (idet værdien over 100 % dog må tilskrives metodens generelle usikkerhed).





### 3.5. Stivhedsmodul

Der er for såvel de vibrations- som Marshall-indstampede prøvelegemer bestemt stivhedsmodul ved 20°C i henhold til DS/EN 12697-26:2018, IT-CY.

Følgende data er opnået for stivhedsmodul ved 20°C, MPa:

Indbygningsmetode	Vibration	Marshall 2x50 slag	Marshall 2x75 slag
22/9-2020	619	772	948
23/9-2020	1.460	937	1.367
Gennemsnit	1.040	855	1.158

Det ses, at materialet udviser pæne værdier for materialestivheden, hvilket umiddelbart indikerer god bæreevne. At de vibrationsindstampede kerner fra 22/9 ligger på et lavere niveau skyldes formodentligt primært, at der ved prøvelegemefremstillingen ikke er opnået samme høje densitet som for de højere (tykkere) kerner til vandfølsomhedsbestemmelse. Generelt ligger den anden dagsproduktion dog lidt højere end for den første dag.



Foto 3.5.1: Opstilling til stivhedsmodul-bestemmelse med hydraulisk DTS-30 testudstyr fra Pavetest.



## 4. Komprimering

Eurofins' laboratorium har udført komprimeringskontrol efter isotop-metoden. De opnåede tørdensiteter er korrigeret for vandindholdet, bestemt i en samtidigt udtaget prøve. Der henvises til Eurofins' prøvningsrapport nr. R-20-4492A af 9/10-2020.

### Komprimeringskontrol, højre vognbane (tunge spor)

Komprimeringsgrad opnået (Referencedensitet er gennemsnit af begge dage, 22-23/9-2020) i fht forskellige referencer

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Referencemetode	Densitet	1,860	1,870	1,906	1,893	1,763	1,888	1,847	1,833	1,877	1,845
Ø150 mm vibration	1,847	100,7	101,2	103,2	102,5	95,5	102,2	100,0	99,2	101,6	99,9
Ø100 Marshall 2x50	1,872	99,4	99,9	101,8	101,1	94,2	100,9	98,7	97,9	100,3	98,6
Ø100 Marshall 2x75	1,895	98,2	98,7	100,6	99,9	93,0	99,6	97,5	96,7	99,1	97,4

		Middel	Std.afv.	Tol.: g-kxs
Referencemetode	Ref.dens	1,858		
Ø150 mm vibration	1,847	100,6	2,20	96,9
Ø100 Marshall 2x50	1,872	99,3	2,17	95,6
Ø100 Marshall 2x75	1,895	98,1	2,15	94,5

Densitetsmålinger i komprimeringskontrollen er tørdensiteter baseret på Troxler isotopsondemålinger udført af Eurofins (VBM Laboratoriet), korrigeret for w%.

### Komprimeringskontrol, venstre vognbane (lette spor)

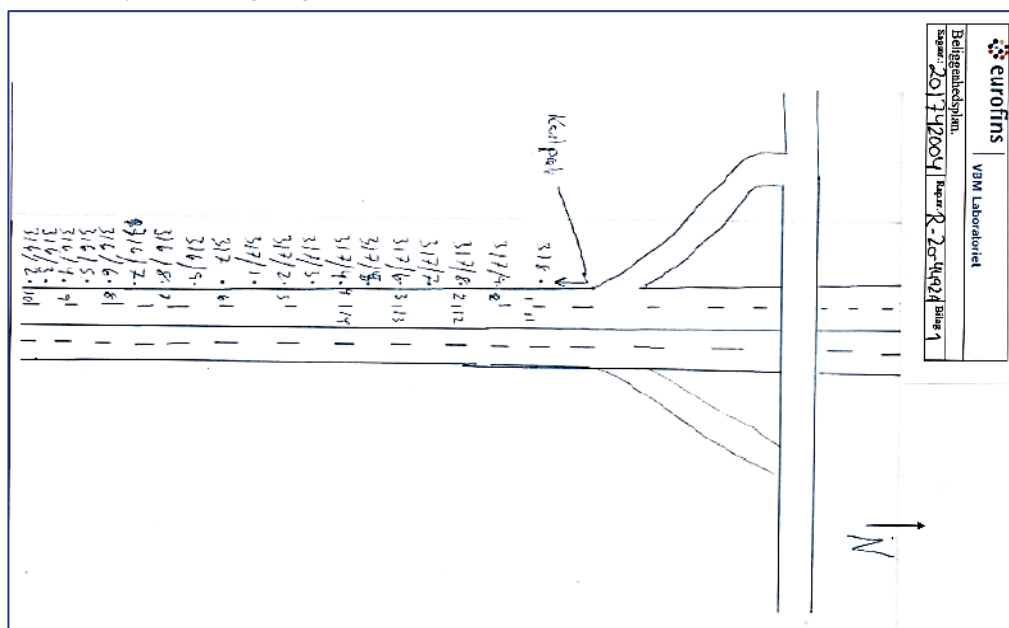
Komprimeringsgrad opnået (Referencedensitet er gennemsnit af begge dage, 22-23/9-2020) i fht forskellige referencer

		11	12	13	14	Middel	Std.afv.	Tol.: g-kxs
Referencemetode	Ref.dens	1,930	1,862	1,825	1,844	1,865		
Ø150 mm vibration	1,847	104,5	100,8	98,8	99,8	101,0	2,14	96,5
Ø100 Marshall 2x50	1,872	103,1	99,5	97,5	98,5	99,6	2,12	95,2
Ø100 Marshall 2x75	1,895	101,8	98,3	96,3	97,3	98,4	2,09	94,1

Densitetsmålinger i komprimeringskontrollen er tørdensiteter baseret på Troxler isotopsondemålinger udført af Eurofins (VBM Laboratoriet), korrigeret for w%. Alle densiteter i Mg/m<sup>3</sup>.

Referencedensiteter er gennemsnit af lab.komprimerede kerner med den pågældende fremstillingsmetode (jf. afsnit 3.2)

Skitse for prøveudtagning (Kilde: Eurofins):





## 5. Resultater, udvidet prøvning

### 5.1. Sporkøringstest

Der er udført sporkøringstest efter gældende CEN-standard for asfalt med testtemperatur 45°C. Der er anvendt en pladetykkelse på 10 cm, som er det maksimale, som apparaturet kan anvende.

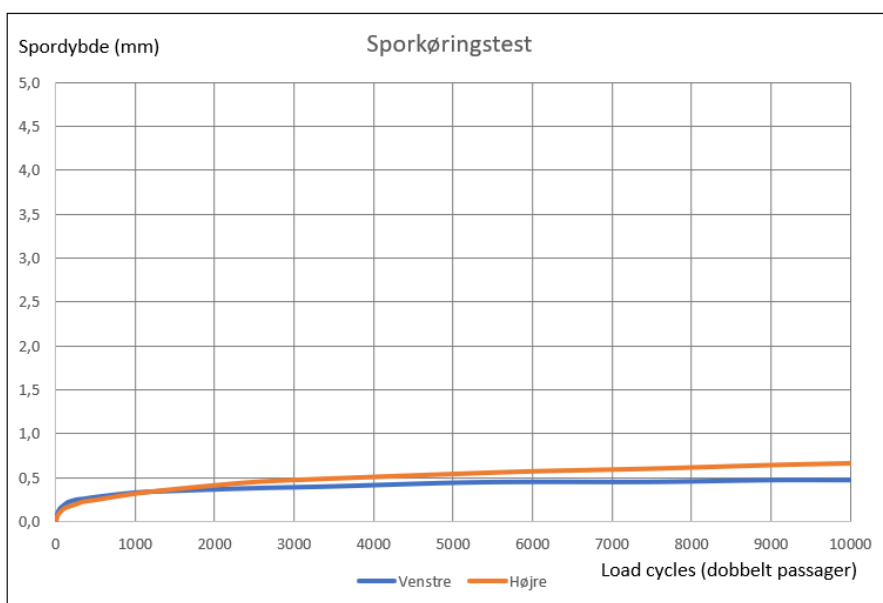
Testmetode:

Wheel Tracking Test jf. DS/EN 12697-22, small-size, procedure B, air

LAB.NR: 943250-53

Materiale:		
Tilstræbt lagtykkelse: 10 cm	Målt lagtykkelse (H/V): 100,8/101,4	Pladedimension: 304x304 mm
Referencedensitet (vibr.): 1,835 Mg/m <sup>3</sup>	Komprimeringsgrad : 105,4/105,3 % i fht. vibr.indst.	Testtemperatur: 45°C

Dobb.pass. (Antal)	Spordybde (mm)	
	Venstre	Højre
0	0,00	0,00
5	0,05	0,03
10	0,07	0,05
25	0,11	0,08
50	0,15	0,11
100	0,19	0,15
150	0,22	0,17
250	0,25	0,20
350	0,26	0,23
500	0,28	0,25
1000	0,33	0,32
1500	0,35	0,37
2500	0,38	0,45
3500	0,40	0,49
5000	0,44	0,54
6000	0,45	0,57
7500	0,45	0,60
9000	0,47	0,64
10000	0,47	0,66



Resultat:	Total spordybde:	0,57 mm
	WTSair:	0,015 mm/1000 load cycles
	PRDair:	0,6 %

#### Bemærkninger:

Ekstremt lav sporkøringsværdi på blot 0,57 mm trods en lagtykkelse på 10 cm  
Bemærk her,, at da indtromling af sporkøringsplader skal foretages på helt "frisk" BSM, er referencedensiteten på dette tidspunkt ukendt. Der tilstræbes derfor en densitet svarende til 97-100% af en estimeret referencedensitet. I det konkrete tilfælde var vibrationsdensiteten lavere end estimeret, hvorfor pladernes komprimeringsgrad er over 100%. Trods dette alligevel et imponerende resultat.

Det efterfølgende foto viser overfladen af BSM-prøvepladen efter afsluttet test. Den opnåede sporkøring på blot 0,6 mm efter 10.000 dobbeltpassager ved 45°C er knap nok synlig.

Den opnåede sporkøringsmodstand må karakteriseres som værende usædvanlig god – bedre end typisk set for selv meget stabile typer af varmblandet asfalt.



Foto 5.1.1: Sporkøringsforsøget udføres med fastgummihjul og 10.000 dobbeltpassager ved 45°C, som antages at være den højeste temperatur, som et asfaltbærelag under danske klimaforhold udsættes for. Belastningstrykket svarer omtrentligt til en lastbils.



Foto 5.1.2 Sporkøringsplade efter endt test. Sporet er knapt nok synligt, trods 10 cm lagtykkelse.



## 5.2 Deformationsmodstand ved triaxialtest

BSM-materialets deformationsresistens er foruden udførelse af sporkøringstesten også afprøvet ved triaxialtest på Ø100 mm Marshall-indstampede (20 °C) prøvelegemer, som udgangspunkt i overensstemmelse med DS/EN 12697-25:2016, metode B, med enkelte undtagelser/ændringer. Triaxialtest kan på asfalt udføres under en række forskellige testbetingelser (temperatur, belastningsstørrelse og -form). Der er ved de aktuelle forsøg anvendt testkonditioner sv.t. kategori D.2.8, (jf. 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 belastningsoverførsel af den pulserende belastning). Prøvningen afviger som omtalt en smule fra CEN-standarden, da der er tale om BSM, hvorfor prøvelegemernes top ikke kan poleres for planhedsoptimering (ikke muligt for det grove, punkt-bundne BSM-materiale). Der er mellem BSM-prøvelegeme og belastningsplader anvendt en tynd papskive, som er overfladecoatet for at reducere friktionen (som foreskrevet). De tre anvendte Marshall-legemer har en gennemsnitlig densitet på 1,849 Mg/m<sup>3</sup> svarende til netop 100% af vibrationskomprimerings-referenceværdien. Prøvelegemernes højde er 76,2 ± 0,2 mm.

Testen udføres i en speciel triaxialcelle. Prøvelegemet placeres med en tætsluttende membran 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 trafikens trykpåvirkning. I det konkrete tilfælde er anvendt en "haversine pulse" (halv-sinus puls), hvilket er den typisk foretrukne. Testmetoden tillader dog også alternativ anvendelse af "block-pulse", hvis udstyret ikke kan frembringe en korrekt haversine puls-belastning.

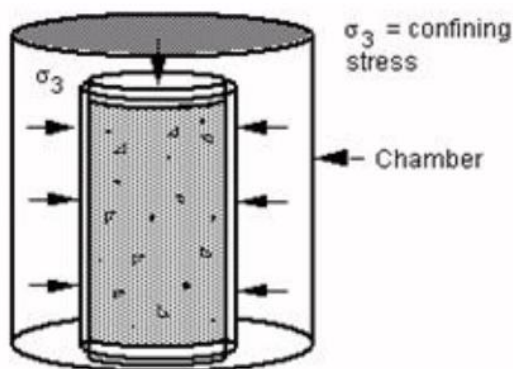


Fig. 5.2.1: Triaxialcelle, princip

Resultat af triaxialtest:

Permanent deformation efter 10.000 cycles I fht højde (%)	Permanent deformation efter 10.000 cycles, abs. (mm)	Creep rate * (2.000-10.000 cycles) (µm/cycle)
1,83	1,44	0,098

\*) Creep rate beregnes som hældningen af kurvens sekundære, praktisk taget lineære forløb (se eksempel figur 5.2.4). I det konkrete tilfælde beregnet ud fra krybningsværdier (deformation) ved hhv. 2.000 og 10.000 belastningscykler. Data er gennemsnit af tre enkeltbestemmelser.



Fig. 5.2.2: Montering af BSM-legeme i triaxial-celle

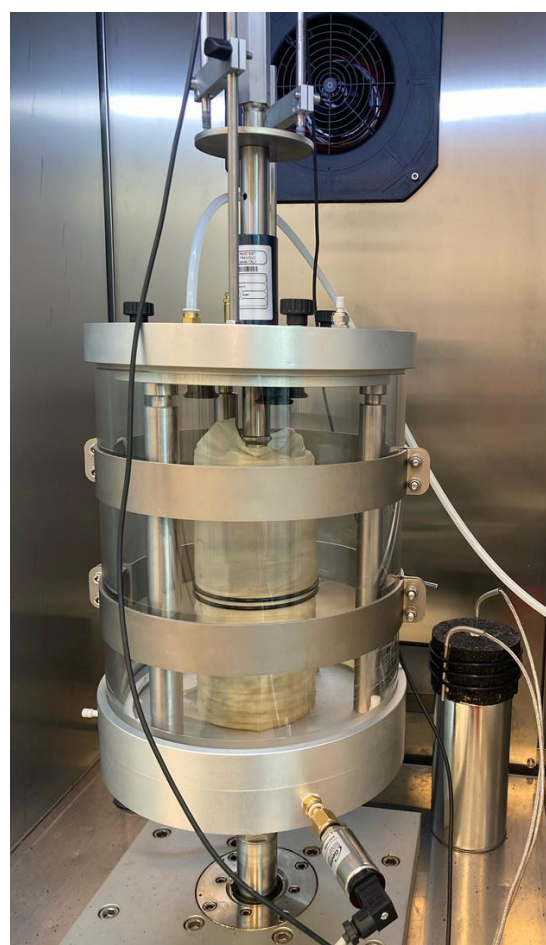


Fig. 5.2.3: Triaxial-celle klar til test

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-produktstandard 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 microstrain (1/1000-del mm) per belastningscyklus. Med en aktuelt opnået creep rate på blot 0,098  $\mu$ /cycle ligger det testede BSM-materiale således indenfor den bedste krav-kategori, under de valgte testbetingelser.

Efterfølgende fig. 5.2.4 viser som eksempel det opnåede deformationsforløb fra et af de tre testede prøvelegemer. Det ses, at deformationen opnået mellem ca. 2.000 og 10.000 belastningscykler er næsten lineær. Det er denne linjes hældning som er angivet som creep rate, altså udtryk for materialets tendens til fortsat deformation.

Den meget lave deformation fra alle tre triaxialtest-delbestemmelser (3 individuelle prøvelegemer) – og tilsvarende lave tendens til fortsat deformation – hænger i øvrigt fint sammen med samme BSM-materiales meget lave sporkøringsdeformation (se forrige afsnit).

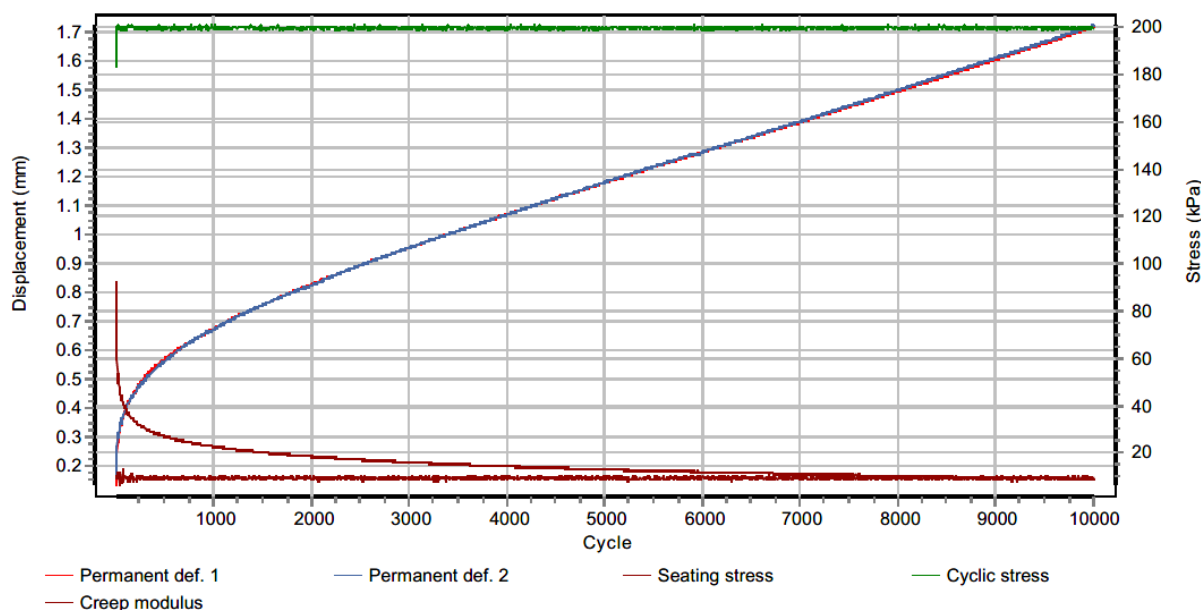


Fig. 5.2.4: Eksempel på deformationsforløbet ved triaxialtesten på det aktuelle BSM-materiale.

Den blå kurve, og den næsten fuldstændigt sammenfaldende røde kurve, viser de to parallelle deformationsføleres registrering af deformationsudviklingen som funktion af antallet af belastningscykler.

## 5.2. Ældningsresistens

BSM-materialet er på grund af det relativt lave nye skumbitumenindhold ikke et komplet ny-omhyllt materiale, som det er tilfældet for varmblandet asfalt. Den sydafrikanske TG2-manual fra Sabita forklarer det 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



Foto 5.2.1: De 3 Marshall-legemer monteret i rack. Foto 5.2.2: Rack'en placeres under låg i PAV-ovn.



Foto 5.2.3: 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 (sammen-synkning) 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 langtidsældningen. 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 nytilsatte bitumen (som danner punktbindingerne) fra den gamle bitumen i den affræsedede asfalt.





### 5.3. Bearbejdelighed, forskellige laboratorieindbygningsmetoder

For at kunne vurdere BSM-materialets bearbejdelighed er der udført følgende forsøg:

- Vibrationsindstampingning på tid over forskellige niveauer
- Marshall-indstampingning ved forskellige slagantal (forskellig energi)
- Gyratorindbygning

#### 5.3.1. Vibrationsindstampingning på tid

Standardmæssigt vibreres BSM-prøvelegemer indtil en densitet sv.t. den modificerede Proctor-værdi (tilnærmelsesvis) opnås, eller alternativt at time-out opnås efter 20-40 sek. Dette virker dog ikke optimalt, idet man dels anvender en forud tilstræbt densitet i stedet for en forud fastlagt komprimeringsenergi. Dels kender man ikke altid den aktuelle Proctor-værdi på forhånd, når en frisk BSM hurtigt efter fremstilling skal komprimeres i laboratoriet. Det vil derfor være mere hensigtsmæssigt at anvende et fast komprimeringsenergi-niveau, ligesom man fx gør det for varmblandet asfalt.

Denne testserie har derfor to formål, dels at bedømme BSM-materialers bearbejdelighed ved forskellige komprimeringsenergier, så man kan vurdere hvor "strid" den pågældende mix er. Dels ønskes at fastlægge sammenhængen mellem komprimeringsenergi og opnået densitet til brug for fastlæggelse af en fremtidig BSM-prøvningsmetode, hvor vibration indtil en fast densitet er opnået, kan erstattes af vibration (eller slagantal) indtil et fornuftigt og realistisk reference-komprimeringsniveau opnås. Nedenstående grafiske afbildning (fig. 5.3.1) viser den indbyggede densitet som funktion af antal sekunders vibration med Wirtgen-hammeren.

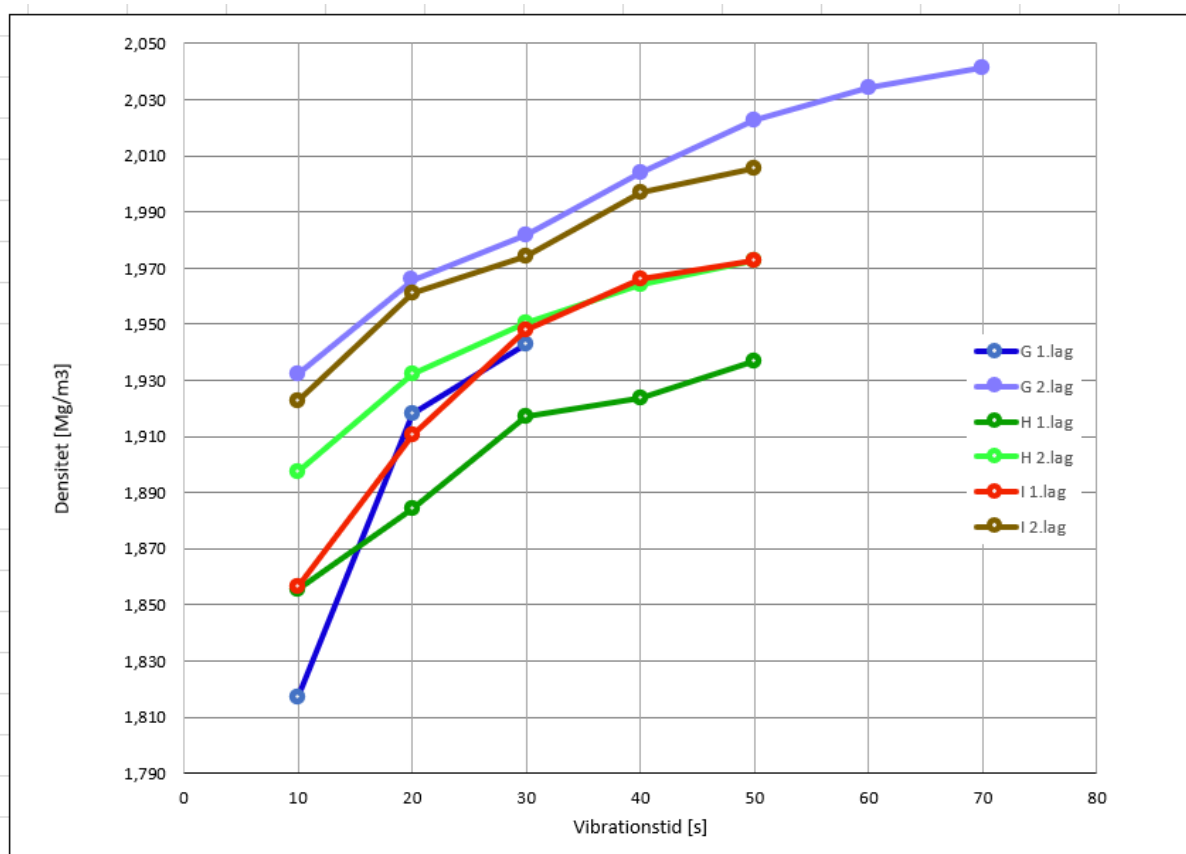


Fig. 5.3.1: Densitet som funktion af vibrationstid for BSM, indstampet i 2 lag, kerne G, H og I.



Målingerne i denne serie er foretaget ved at vibrere 10 sekunder ad gangen, hvorefter prøvelegemets højde er bestemt og densitet derefter beregnet. Densiteten er våd-densiteten, inkl. procesvandet i BSM-materialet. Der er taget udgangspunkt i fremstilling af Ø150 mm BSM prøvelegemer indbygget i to lag, sv.t. normale legemer til stivhedsmodulbestemmelse. For kerne G er første lag vibreret i alt 30 sekunder og andet lag 70 sekunder. For kerne H og I er begge lag vibreret 50 sekunder.

Der er tale om enkeltstående data, men alligevel konkluderes følgende tendenser:

- Kerne G og I antyder, at der opnås omtrent samme densitet ved samme samlede slagenergi, uanset om første lag kun er vibreret 30 sekunder i stedet for 50 sekunder.
- Kerne G viser, at selv efter 50 sekunders komprimering af øverste lag kan der ved yderligere vibrering i 20 sekunder opnås yderligere densitetsforøgelse.
- Den gængse BSM-vibrationsindstampningsmetode med vibration på typisk 10-30 sekunder, indtil modificeret Proctor densitet teoretisk nås, er ikke ideel som reference.

### 5.3.2. Marshall-indstampning med forskellig slagenergi

BSM-materialets bearbejdelighed er på "traditionel" vis vurderet på basis af densitetsbestemmelse efter Marshall-indstampning (v/ 20°C) med forskelligt antal slag, svarende til forskellige slagenergier.



Fig. 5.3.2: BSM-materialet fra 22/9 er indstampet ved forskellige slagenergier.

Resultatet fremgår af nedenstående diagram, hvor de opnåede Marshall-densiteter ved hhv. 2x35, 2x50 og 2x75 slag er sammenlignet med densiteter fra vibrationsindstampning, hhv. 22/9 og 23/9.

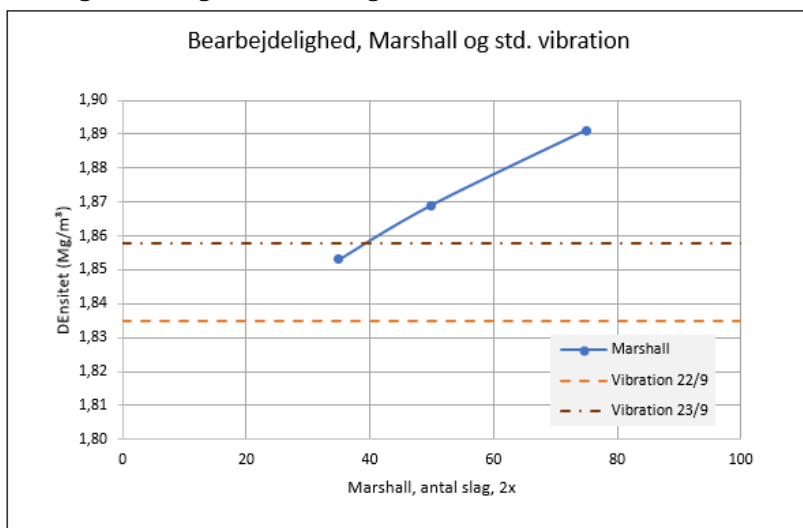


Fig. 5.3.3: Bearbejdelighed, varieret Marshall-indstampning, sammenlignet med std. Vibration.



Som det fremgår af fig. 5.3.3 er metoden med standard vibrationsindstampingning (indtil tilstræbt Proctor-densitet er opnået) en "svag" reference, sammenlignet med Marshall-densiteterne ved forskellige slagantal. Marshall-densiteten ligger som udgangspunkt mindst på niveau med vibrationsindstampingningen allerede ved 2x35 slag. Marshall-densiteten giver yderligere en densitetsforøgelse på ca. 2% ved at øge slagantallet fra 2x35 til 2x75 slag.

Dette bekræfter, at der – i hvert fald under danske forhold – er brug for en ny referencemetode, baseret på fast komprimeringsenergi i stedet for fast slutdensitet. Det kunne derfor være fristende at forkaste vibrationsmetoden og udelukkende benytte Marshall. Problemet er blot, at Marshall-testen ikke er velegnet til materialer med stenindhold større end 22 mm, grundet prøvelegemediameteren på 10 cm.

Vibrationsindstampingningen anvender derimod en prøvelegemediameter på 15 cm og er derfor mere all-round velegnet til BSM, som ofte vil være noget, som ligner et 0/32 mm materiale. Sammenholdt med de opnåede data fra afsnit 5.3.1 kunne et bud på fremtidig referencekomprimering derfor være vibrationsindstampingning i Ø150 mm legemer med 50 sekunders vibration per lag.

### 5.3.3. Gyratorkomprimering

En tredje mulighed for referencekomprimering er at foretage indbygning med en gyrator, som foretager en kombination af "æltende" og pressende komprimering. Komprimeringen styres af vinklen  $\alpha$ , kraften  $F$  og omdrejningstallet  $n$  (antal gyrationer). Gyratorkomprimeringen er foretaget i henhold til DS/EN 12697-31 med Ø100 mm kerner.

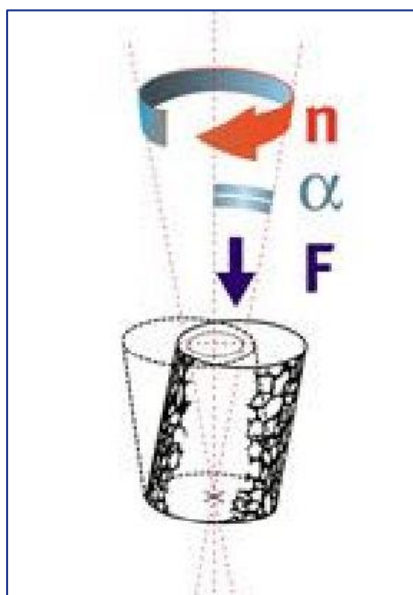


Fig 5.3.4: Princip for gyratorkomprimering



Fig. 5.3.5: Gyrator, klar til montering af prøvelegeme

Resultatet af gyratorkomprimeringsforsøgene fremgår af efterfølgende figur 5.3.6, som giver en grafisk afbildning af densitetsforsøgelsen som funktion af antal gyrationer. Til sammenligning er indsat densitetsværdien for "standard" vibrationsforsøg (mod fast densitetsværdi). Det ses, at allerede efter ganske få gyrationer opnår gyratorkomprimeringen højere densitet. Gyrator-densiteten aftager med stigende gyrationantal og stiger mest markant op til ca. 200 gyrationer, som måske i givet fald kunne



benyttes som en alternativ referencedensitet. Der er dog fortsat tale om Ø100 mm legemer, med den begrænsning dette giver i fht. BSM-materialets maksimale stenstørrelse.

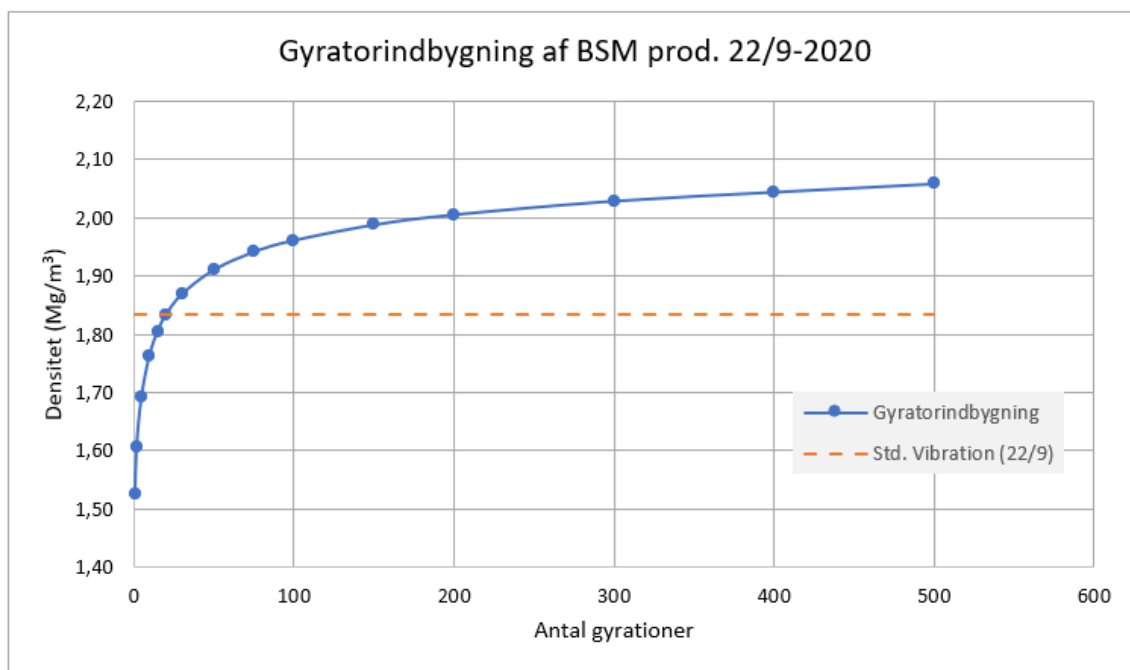


Fig. 5.3.6: Densitetsudvikling ved gyratorindbygning af BSM, sammenholdt med standard vibrationsindbygning. Data er gennemsnit af tre delprøver med meget lille indbyrdes spredning.

Baseret på erfaringerne med standard vibrationsindstamping sammenholdt med alternativ vibrationsindstamping på fast tid (= fast energi i stedet for fast densitet), alternativ Marshall-indstamping og alternativ gyrator-indbygning – og under samtidig erindring om behov for anvendelse af Ø150 mm prøvelegemer – kunne en optimeret indbygningsform være enten at anvende Wirtgens vibrationsudstyr på fast tid, eller alternativt at anvende gyratorindbygning, men med Ø150 mm prøvelegemer (sidstnævnte indgår dog ikke i den omhandlede testserie).