



Vejdirektoratet

VIDEN OG DOKUMENTATION –
KOLDBLANDET ASFALTBÆRELAG



TEKNOLOGISK
INSTITUT

TI-PROJEKTNR.: P2007597
Version: 01
20. januar 2020

Titel:

Vejdirektoratet, Viden og dokumentation – Koldblandet asfaltbærelag.

Rekvirent:

Vejdirektoratet
Att. Henrik Majlund
Carsten Niebuhrs Gade 43
1577 København V
Tlf.: 72 44 31 09
e-mail: henm@vd.dk

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Gregersensvej 1
2630 Taastrup
Tlf. 7220 2000
Byggeri og Anlæg

Ole Grann Andersson
Seniorspecialist
Tlf.: 7220 3209
E-mail: olan@teknologisk.dk

Kvalitetssikring:

Sagsansvarlig: Ole Grann Andersson, tlf. 7220 3209, olan@teknologisk.dk
KS godkendt af: Kamilla Mercedes Kuld, tlf. 7220 1510, kku@teknologisk.dk

Projektnr.: P2007597

Dato: 20. januar 2020

Version: 01

Forord

Denne rapport omhandler et gennemført udviklingsprojekt for KOLDBLANDET ASFALTBÆRELAG og er udarbejdet i tilknytning til en vejregel ad-hoc gruppe under vejregelgruppe Asfalt, der i perioden havde følgende sammensætning:

Gert von der Ahé, formand, Vejdirektoratet,
Henrik Majlund, projektleder, Vejdirektoratet
Bjarne Bo Lund-Jensen, NCC,
Jette Bork, Sønderborg Kommune,
Lotte Josephsen, YIT
Ole Grann Andersson, Teknologisk Institut,
Per Kristensen, Aarhus Kommune,
Peter Andersen, Vejdirektoratet,
René Hvidbak Sørensen, Vejdirektoratet,
Vibeke Wegan, Vejdirektoratet

Ad-hoc gruppen havde følgende sammensætning:

Henrik Majlund, projektleder, Vejdirektoratet
Bjarne Bo Lund-Jensen, NCC,
Jette Bork, Sønderborg Kommune,
Morten Toft Hansen, Næstved Kommune,
Morten Larsen, SR-Gruppen,
Morten Wold, Wirtgen
Ole Grann Andersson, Teknologisk Institut

Målet med den beskrevne opgave er at samle viden om anvendelse af knust asfalt og skumbitumen som bærelag, med henblik på at skabe beslutningsgrundlag for en evt. efterfølgende udarbejdelse af en udbudsforskrift for koldblandet asfaltbærelag.

Det skal indledningsvis bemærkes, at opgaven er begrænset til følgende hovedemner:

- Skumbitumen-stabiliseret genbrugsasfalt (BSM-skum)
- Kold recycling in-plant (KMA)

Opgaven er løst i følgende samarbejde:

- Næstved Kommune har stillet forsøgsstrækning og genbrugsmaterialer til rådighed for en fuldskala teststrækning med BSM-KMA i Fuglebjerg.
- SR-Gruppen har varetaget fuldskala produktion og udlægning af omtalt BSM-KMA.
- NCC's geotekniske laboratorium har varetaget de indledende råvareanalyser af genbrugsasfalt og komprimeringskontrol i marken.
- Teknologisk Institut har varetaget alle BSM materialeforsøg og optimeringer, herunder bitumenskumning og mix-design.
- Vejdirektoratet har varetaget projektledelse samt bæreevнемålinger på fuldskala belægning med faldlod.

Indholdsfortegnelse

1.	Baggrund og formål	6
2.	Hvad er BSM?	6
2.1.	Skumning af bitumen	8
2.2.	KMA-anlæg	9
2.3.	In-situ stabilisering	10
2.4.	Udenlandske erfaringer med BSM	10
2.5.	Miljølovgivning	12
2.6.	CO2-besparende bæredygtig teknologi	12
3.	Forsøgsprogram BSM 2019	14
3.1.	Overordnet forsøgsprogram	14
3.2.	Anvendt laboratorieudstyr.....	14
4.	BSM råvarer.....	18
4.1.	Genbrugsasfalt	18
4.1.1.	Konklusion, genbrugsasfalt.....	20
4.2.	Filler	20
4.3.	Bitumen	20
5.	Skumbitumen forsøg	21
5.1.	Konklusion, skumbitumen:	23
6.	Mix-design	24
6.1.	Mix-design program	24
6.2.	Avendte prøvningsmetoder	25
6.2.1.	BSM-specialtests	25
6.2.2.	Spaltetrækstyrke	27
6.2.3.	Stivhedsmodul	27
6.3.	Indledende mix-design (fase 1A)	27
6.4.	Mix-design fase 1B: Sammenligning af vibrations- og Marshall-indstampning ..	29
6.5.	Mix-design fase 2: Cementfillervariationer	29
6.6.	Mix-design fase 3 - Variationer i bitumentype og leverandør	30
7.	Fuldskala teststrækning i Næstved Kommune	32
7.1.	Strækningen	32
7.2.	Anvendte materialer, opbygning og teknik	33

7.3.	Udførelsen	34
7.4.	Laboratorieforsøg BSM-KMA fra Vådagervej	35
7.4.1.	Indledende laboratorieprøvning på basis af skønnet Proctor-reference	35
7.4.2.	Supplerende laboratorieprøvning på basis af korrekt Proctor.....	36
7.4.3.	Testdata, densitet, spaltetrækstyrke og stivhedsmodul	36
7.4.4.	Komprimeringskontrol	37
7.5.	Visuel vurdering af strækningen	38
7.6.	Bæreevnmålinger – udvikling i E-modul med faldlod.....	39
8.	Det videre arbejde	40
9.	BILAG 1: Skumbitumendata.....	42
10.	BILAG 2: Mix-design resultater FASE 1A	43
11.	BILAG 3: Mix-design resultater FASE 1B	44
12.	BILAG 4: Mix-design resultater – FASE 2, cementvariationer.....	45
13.	BILAG 5: Mix-design resultater – FASE 3, Bitumentypevariationer	46

1. Baggrund og formål

Denne rapport omhandler en forsøgsrække iværksat af Vejdirektoratet med henblik på at opnå erfaring omkring en ny produkttype, BitumenStabiliseret Materiale, forkortet BSM.

Opgavens mål er således at samle viden om anvendelse af knust asfalt og skumbitumen som bærelag, med henblik på at skabe et beslutningsgrundlag for en evt. efterfølgende udarbejdelse af en udbudsforskrift for koldblandet asfaltbærelag.

Opgaven er igangsat medio 2019 af Vejdirektoratet, afdelingen for Videnskoordinering og Vejstandarder, med Henrik Majlund som projektleder.

Nærværende rapport beskriver det gennemførte laboratorieprøvningsprogram med henblik på erfarings- og vidensindsamling om det nye produkt, BSM.

Rapporten beskriver de forskellige gennemførte faser, herunder mix-design af BSM samt de første, indledende erfaringer fra en praktisk gennemført forsøgsudlægning i Næstved Kommune.

2. Hvad er BSM?

Betegnelsen "BSM" dækker i nærværende rapport over en teknik, hvor man fremstiller et BitumenStabiliseret Materiale ud fra knust genbrugsasfalt. Der er igennem de seneste år sat øget fokus på anvendelse af genbrugsasfalt i den varme asfaltproduktion, hvilket senest er analyseret og dokumenteret i udviklingsprojektet "Cirkulær Asfaltproduktion i Danmark". Alligevel forefindes fortsat et pænt overskud af knust genbrugsasfalt, som i dag ophobes i lagre eller blot benyttes som erstatning for stabilt grus eller til sekundære formål som f.eks. kantfyld langs veje eller som anden fyld. BSM-teknologien benytter dette overskudsmateriale som grundbestanddel i et nyt bærelagsmateriale. Med BSM reduceres behovet for import af sten, grus og bitumen eller udvinding af knappe materialer fra vores danske grusgrave, der for nogles vedkommende måske vil være udtømte allerede i nær fremtid.



Foto 2.1: Genbrugsasfalt: Et glimrende råstofmateriale til vejbygning, som generelt er til rådighed, trods øget anvendelse i varmblandet asfalt (Kilde: MUDP-rapport "Cirkulær Asfaltproduktion i Danmark").

BSM er et spændende nyt materiale på det danske marked. BSM skal hverken sammenlignes med varmblandet asfalt eller ubundne grusbærelag, men skal ses som en "mellemtning", også bæreevnmæssigt. Fordelen ved konceptet er, at det benytter gammel genbrugsasfalt som tilslag, kun suppleret med et par procent bitumen, ca. 0,5-1,0% cement og lidt vand som smøremiddel. Vandmængden i BSM materialet (procesvandet) tilsættes som smøremiddel ud fra et forudbestemt optimalt Proctor-vandindhold i det ubundne genbrugsasfalt materiale, GMA (på samme vis som for grusmaterialer). Der tilsættes således vand på to måder: Dels som procesvand i miksen, dels i ganske små mængder injiceret i bitumen for at opnå bitumenskumningseffekten.

Slutproduktet bliver ikke umiddelbart lige så sammenhængende, fast og glinsende som varmblandet asfalt, da den begrænsede mængde skumbitumen kun giver materialet "punktbindinger". Ikke desto mindre har BSM en fin kohæsion/sammenhængskraft efter en curing-periode (optørring) i laboratoriet på 3 døgn, hvor vandet fordamper og allerede efter afsluttet komprimering opnås pæn styrke og bæreevne. På fuldskala belægninger "i marken" opnås en pæn stabilitet og sporkøringsmodstand allerede efter afsluttet komprimering.

BSM har miljømæssigt og CO₂-belastningsmæssigt indlysende fordele som følge af, at der ikke anvendes opvarmning af stenmaterialet, samt at hovedindholdet er genbrugsmateriale. Konceptet er derfor i god overensstemmelse med regeringens ønske om mere cirkulær resourceøkonomi samt FNs bæredygtighedsmål og kan måske vise sig at være et ikke ubetydeligt bidrag til opnåelse af regeringens 2030 CO₂-klimamål.

BSM kan principielt fremstilles på to metoder: Enten ved fremstilling af det koldblandede produkt på et mobilt eller stationært blandeanlæg – så kaldes teknikken KMA (da der benyttes et "Kalt Misch Anlage").



Fig 2.2: Eksempel på mobilt KMA-anlæg til fremstilling af BSM-KMA. (Kilde: Wirtgen).

Alternativt kan BSM fremstilles som in-situ stabilisering af eksisterende vejbelægninger med specielle kold-remixere. Sidstnævnte foregår principielt på samme vis som ved f.eks. cementstabilisering, blot med den forskel, at der i stedet for cementen anvendes varm skumbitumen som det primære bindemiddel. Principielt kan bitumenstabilisering både foretages med bitumenemulsion og varm skumbitumen, men skumteknologien synes for både KMA og in-situ løsninger at udvise de bedste egenskaber og er derfor den teknik, som nu er forfulgt i Danmark.

Selve BSM-teknologien er ikke ny, men har været anvendt i udlandet igennem en årrække. Der er specielt indhøstet erfaringer i lande som Sydafrika, USA og Brasilien, men metoden anvendes nu også i Europa, bl.a. i Holland og Norge. Fremstillingen er typisk baseret på ud-

styr fra firmaet Wirtgen, som både producerer KMA-anlæg, in-situ-remixere og laboratorieudstyr til udvikling og prøvning af BSM. Det øgede fokus på CO₂-reduktion gør metoden oplagt at se nærmere på under hjemlige himmelstrøg.



Fig. 2.3: Eksempel på in-situ fremstilling af BSM med recycler: Den gamle asfalt fræses op og stabiliseres med skumbitumen, hvorefter den fødes til en konventionel asfaltudlægger. (Kilde: Wirtgen)

2.1. Skumning af bitumen

Ved fremstilling af traditionel varmblandet asfalt anvendes varm bitumen som bindemiddel og det sikres i fremstillingsprocessen ved samtidig tørring og opvarmning af stenmaterialet, at der sker en fuldstændig omhylning af stenmaterialet med bitumen under blandingen.

BSM fremstilles ud fra genbrugsasfalt (GMA), som efter knusning og sortering typisk fremstår som et 0/16 mm "ubundet" materiale, hvor de enkelte delpartikler i genbrugsasfalten dog oftest er "konglomerater" af sten og filler, sammenbundet af den gamle bitumen. Ved fremstilling af BSM tilsættes kun så meget ny bitumen, at der opnås punktvis bindinger imellem de enkelte GMA-partikler.

For at opnå en maksimal dispergering af den nye bitumen, foretages der en opskumning af bindemidlet ved tilsætning af ganske små mængder vand. Vandtilsætningen forårsager en dampekspllosion som får bitumen til at skumme op. Herved øges bindemidlets volumen voldsomt og der sikres derved en effektiv dispergering af bindemidlet i miksen.

Skumteknologien kendes f.eks. også fra Warm Mix Asfalt (eller LTA, LavTemperatur Asfalt), hvor man benytter skumningens forbedrende dispergering og smøreeffekt til at kunne sænke temperaturen i varmblandet asfalt.

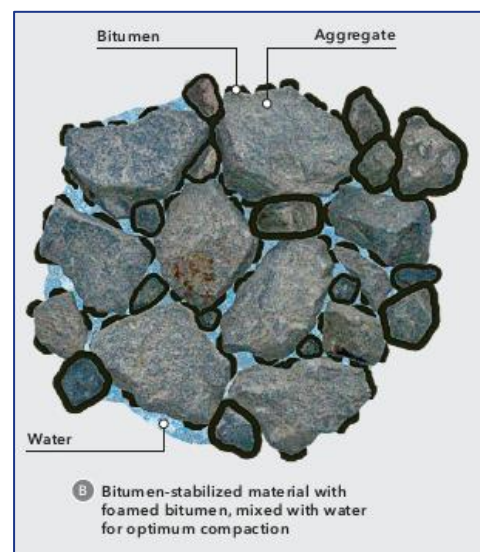
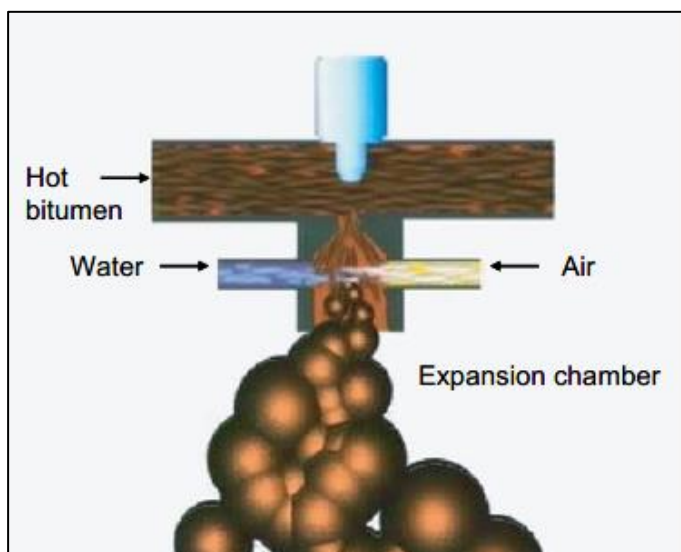


Fig. 2.4 (tv): Princip for fremstilling af skumbitumen ved injicering af små vandmængder i varm bitumen. Fig. 2.5 (th): BSM-materialet er homogent blandet og punktvist sammenbundet af den nye bitumen fra skumbitumendoseringen (Kilde: Wirtgen).

2.2. KMA-anlæg

BSM kan principielt fremstilles på traditionelle asfaltfabrikker, hvis disse udstyres med en bitumenskumningsenhed, men kan også fremstilles på specielle KMA-anlæg, som typisk er mindre og mobile blande-anlæg, da der ikke anvendes opvarmning af stenmaterialet. Et KMA-anlæg består således typisk af en tvangsblender, en doseringskasse til knust genbrugsasfalt en bitumenskumningsenhed, en bitumentank til varm bitumen, en vandtank og en filler-silo til dosering af cement eller anden filler.

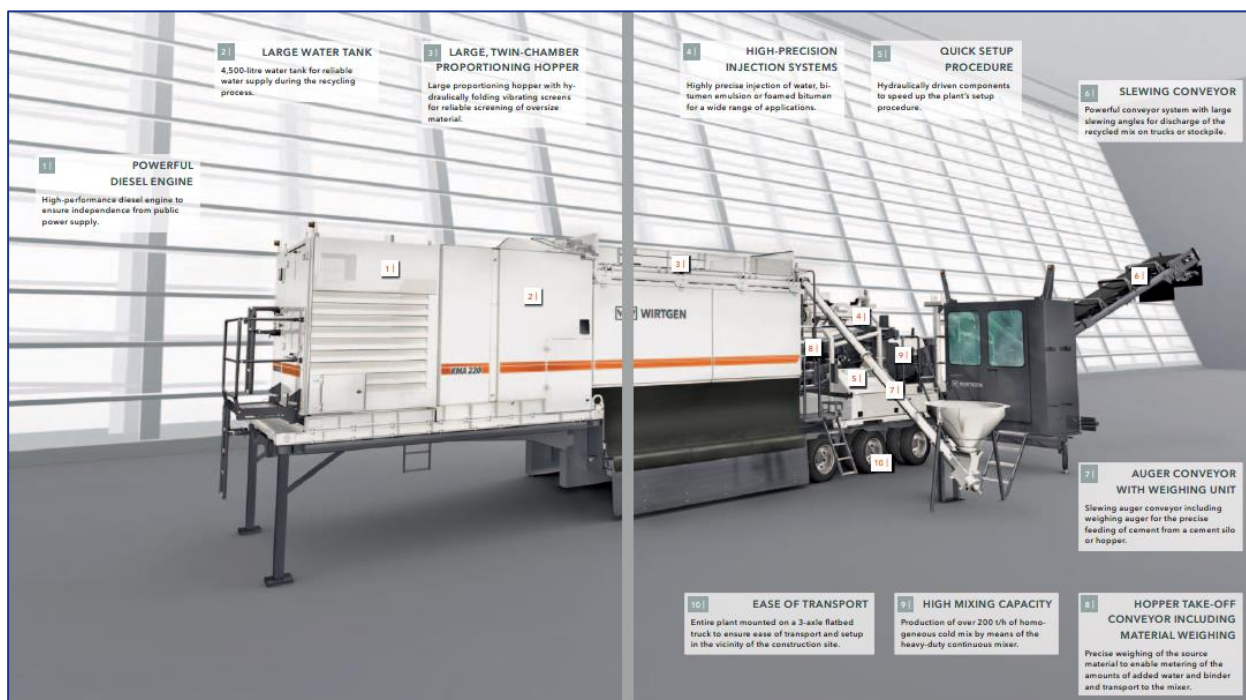


Fig. 2.7: Principskitse for mobilt KMA-anlæg (Kilde: Wirtgen)

2.3. In-situ stabilisering

Ved in-situ stabilisering anvendes recyclingsmaskiner, som opfræser den gamle asfalt og blander med skumbitumen (og cementfiller eller lign.) samt vand for at få den rette konsistens og bearbejdelighed. Det homogent blandede materiale føres via et transportbånd til en bagvedkørende asfaltudlægger, hvor det (bortset fra den kolde temperatur) udlægges på samme vis som varmblandet asfalt: Der anvendes typisk en stabiliseringsdybde på ca. 15 cm. Ønskes den færdige belægning udført i en bredere bane end den oprindelige, kan dette således imødekommes ved at asfaltudlæggeren udlægger i større bredde end den oprindelige belægning. Dette kræver dog, at der også forefindes et tilstrækkeligt bæredygtigt underlag i det udvidede område. Den mest praktiske tilgang er derfor at fjerne jorden i sideudvidelsesområdet og indbygge egnet grusbærelag.



Fig 2.8: In-situ recycling (Kilde: Wirtgen)

Herefter tilføres ekstra knuste genbrugsmaterialer som udlægges ovenpå den eksisterende asfaltbelægning. Recycleren fræser derefter den gamle asfalt, inklusive den tilførte, ekstra genbrugsasfalt, og blander det hele med skumbitumen. Til sidst udlægges blandingen i den ønskede, udvidede bredde med asfaltudlæggeren.

2.4. Udenlandske erfaringer med BSM

BSM er især udbredt i Sydafrika, USA og Brasilien, hvor teknikken har været benyttet og forfinet igennem en årrække. En af årsagerne til metodens ibrugtagning i disse områder har givetvis været, at der var betydeligt længere afstand til et varmtblandings-asfaltværk end på vores breddegrader. Metoden har imidlertid fået stor udbredelse og er som tidligere nævnt også interessant i et CO₂-besparelses-/bæredygtighedsoptimerings perspektiv, når der anvendes genbrugsasfalt som grundmateriale og der ikke anvendes energi til opvarmning og tørring af stenmaterialet, ligesom råvare- og færdigvaretransporter minimeres eller helt udelukkes. Sydafrikanerne har således opnået høje stabiliteter og god holdbarhed med BSM. Endvidere berettes fra Sydafrikanske specialister, at grundet BSM-lagets punktvisse bindinger vil revner fra underliggende CG-lag (cementstabiliseret grus) ikke kunne slå igennem BSM-laget og videre op i den ovenliggende asfalt.

BSM ses for danske himmelstrøg bl.a. velegnet til renovering af mindre landeveje, hvor en tilbundsgående rehabilitering med nye (og bredere) grusbærelag, asfaltbærelag og -slidlag ikke er økonomisk realistiske. Her vil en BSM-løsning kunne sikre et nyt, ensartet fundament for vejen uden umiddelbar revnerisiko.

Fra udlandet meldes dog også om tungt trafikerede motorveje, hvor der er anvendt BSM-teknologi. Her henvises bl.a. til den tungt belastede Brasilianske Ayrton Senna Highway (Sao

Paolo, >200.000 ÅDT), som efter omfattende problemer med CG-gennemslagsrevner i asfalten nu er reetableret med 2x15 cm BSM (bundlag in-situ recycled og top lag BSM-KMA på tilført genbrugsasfalt), blot afsluttet med ca. 5 cm ny varmblendet asfalt i toppen. (Se mere om dette projekt: <https://www.youtube.com/watch?v=6xzFuZ5yXEg>).



Fig. 2.9: Ayrton Senna Highway, Sao Paolo, Brasilien (Kilde YouTube/Wirtgen)

Den Sydafrikanske BSM-teknologi er i hovedtræk beskrevet i "Asphalt Academy"'s Technical Guideline TG2, "Bitumen Stabilised Materials – A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials". Denne guideline angiver udførlige vejledninger omkring materialevalg og anvendelse, mix-design og optimering.

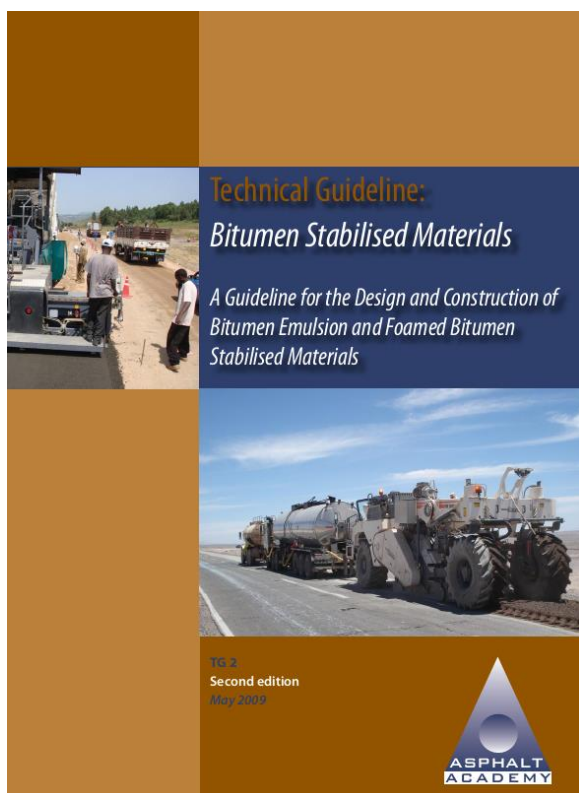


Fig. 2.10: TG2 manualen fra Sydafrikanske Asphalt Academy (t.v.) giver en meget omfattende introduktion og vejledning til BSM. En ny 2020-version skulle være lige på trapperne.

2.5. Miljølovgivning

I forbindelse med introduktion af koldblandet asfaltbærelag baseret på anvendelse af knust genbrugsasfalt er følgende miljølovgivning relevant:

- Cirkulæreskrivelse om anvendelse af opbrudt asfalt til vejbygningsformål m.v., af 15/07/1985 angiver:

"Det er herefter Miljøstyrelsens opfattelse, at anvendelse af opbrudt asfalt til almindelige bygge- og anlægsarbejder ved vejbygning m.v. ikke er omfattet af miljøbeskyttelseslovens § 11. Det vil sige, at det ikke er nødvendigt at indhente tilladelse efter miljøbeskyttelsesloven, når opbrudt asfalt anvendes til bundsikring og befæstelse af veje, stier, pladser og lignende, uanset om disse forsynes med vandtæt bærelag/slidlager eller ikke."

- Bekendtgørelse af lov om miljøbeskyttelse angiver:

"§ 33. Virksomheder, anlæg eller indretninger, der er optaget på den i § 35 nævnte liste (listevirksomhed), må ikke anlægges eller påbegyndes, før der er meddelt godkendelse heraf. Listevirksomhed må heller ikke udvides eller ændres bygningsmæssigt eller driftsmæssigt, herunder med hensyn til affaldsfrembringelsen, på en måde, som indebærer forøget forurening, før udvidelsen eller ændringen er godkendt."

"§ 35. Miljø- og fødevareministeren udfærdiger en liste over særlig forurenende virksomheder, anlæg og indretninger, som er omfattet af godkendelsespligten i § 33."

- Af "Liste over godkendelsespligtig virksomhed, jf. § 2, nr. 3.", (Bilag 2), i Bekendtgørelse om godkendelse af listevirksomhed jf. Bekendtgørelse af lov om miljøbeskyttelse er anført:

"C. Oplagring af og fremstilling på basis af mineralolie, mineralolieprodukter og naturgas

Asfaltfabrikker og anlæg til fremstilling af vejmaterialer med en produktionskapacitet på 10 tons pr. time eller derover, bortset fra kold forarbejdning af rene stenmaterialer. (* jf. bilag 4, punkt 26)"

"Bilag 4 punkt 26. Hvis virksomheden er markeret med * på listen i bilag 2, skal der indsendes en beregning af det samlede støjniveau i de mest støjbelastede punkter i naboområderne, udført som »Miljømåling - ekstern støj« efter Miljøstyrelsens gældende vejledninger om støj."

2.6. CO2-besparende bæredygtig teknologi

Der foreligger ikke umiddelbart nogle officielle, detaljerede beregninger af den opnåede besparelse på CO₂-udledningen ved anvendelse af BSM-teknologien, hvilket også skal ses i lyset af, hvordan BSM-materialet anvendes i vejopbygningen. Hvis man forestiller sig at BSM primært erstatter varmblandet asfalt bærelag, som det f.eks. er tilfældet på førømtalte Ayrton Senna motorvej, vil der være tale om en meget stor CO₂-reduktion. Under alle omstændigheder giver BSM-teknologien en stor CO₂-reduktion fra følgende effekter:

- Stenmaterialet (genbrugsasfalten) anvendes koldt uden opvarmning,
- Der tilføres ikke nye stenmaterialer,
- Genbrugsmaterialet er et overskudsmateriale, som typisk kan findes lokalt – eller opfræses direkte på stedet,

- Omfanget af råvaretransporter minimeres, da lokalt genbrug erstatter importerede klippesten, grusgravsmateriale-sten,
- Der anvendes en ny bitumenmængde, som kun er knap det halve af hvad der tilsættes i varmblandet asfalt.

Endelig mindsker man behovet for nye danske grusgravsudvindinger eller langvejs-importeret knuste klippesten ved genanvendelse af den gamle genbrugsasfalt. Dog bør man samtidigt tilstræbe, at de mest "ædle" genbrugsmaterialer fra gamle asfaltslidlag fortrinsvis anvendes i nye slid- og bindelag af varmblandet asfalt, hvor de har størst økonomisk værdi, hvorimod blandet genbrug eller gamle bærelag fint kan genanvendes i BSM i det omfang de ikke anvendes til varmblandede asfaltbærelag.



Fig. 2.11 a og b: Den opnåede CO₂-reduktion med BSM baseret på genbrugsasfalt er i fin tråd med FN's 2030 verdensmål.

3. Forsøgsprogram BSM 2019

3.1. Overordnet forsøgsprogram

Forsøgsprogrammet beskrevet i nærværende rapport er udarbejdet med henblik på at opnå bredest mulig erfaring med den nye BSM-teknologi indenfor de givne tidsmæssige og økonomiske rammer.

Indledningsvis foretages en omfattende screening af en række typiske danske genbrugsasfalt (GMA) forekomster. Det primære mål med denne del er at iagttage hvor store forskelle der ses, når alle testede genbrugsasfaltmaterialer er 0/16 mm GMA fremstillet ud fra store, homogeniserede stakke af "blandet genbrugsasfalt", som er nedknust med slagknuser.

Baseret på erfaringer fra håndtering af genbrugsstakke til varmblandet asfalt er det projektgruppens opfattelse, at der typisk er meget lille forskel fra stak til stak, når materialestakkene er store og homogeniserede. Det kunne derfor være hensigtsmæssigt, hvis BSM-design fremadrettet kunne baseres på en "standard" GMA og ikke nødvendigvis skulle optimeres til hver enkelt genbrugsforekomst.

Med hensyn til design og optimering af selve BSM-materialet er der i forsøgsprogrammet lagt op til, at der indledningsvis foretages en vurdering af selve bitumenskumningen. Hvordan agerer forskellige bitumenhårdheder og -temperaturer på opskumningen? Hvor meget vand bør typisk tilsættes? Og er der forskel på skumeffekten afhængig af den anvendte bitumenleverandør? (De to største leverandører til det danske asfaltmarked indgår i prøvningsprogrammet).

Herefter er der set på selve BSM-mix-design hvor der foretages sammenhørende blandinger med varieret bindemiddelindhold (skumbitumen). På disse blandinger er der (på basis af TG2-manualen) udført indstampninger og foruden densitetsbestemmelser udført ITSR vandfølsomhed (spaltetrækstyrke før/efter vandlagring). I forlængelse heraf er der deuden på indstampede legemer udført bestemmelse af materialets stivhedsmodul, som udtryk for den opnåede styrke.

I BSM blandinger tilsætte små mængder af klæbeaktiv filler, fortrinsvis cement. Efter de indledende mix-designs er der derfor udført forsøg med varieret cementindhold, ligesom der afslutningsvis er udført varianter med varieret bitumentype og leverandør.

Parellelt med den sidste del af laboratorieblandingerne er der på en strækning i Fuglebjerg i Næstved Kommune udført et fuldskala forsøg med BSM-udlægning. På denne strækning er der foruden test af selve BSM-materialet også foretaget komprimeringskontrol og efterfølgende vurdering af bæreevnen baseret på faldlodsmålinger gentaget flere gange over tid.

Alle ovennævnte faser af forsøgsprogrammet er mere indgående beskrevet i de efterfølgende afsnit.

3.2. Anvendt laboratorieudstyr

Som udgangspunkt anvendes traditionelt laboratorieudstyr til den del af prøvningen, som vedrører selve genbrugsasfalten. Det betyder, at den knuste og sorterede genbrugsasfalt behandles som et ubundet grusmateriale. Der foretages sigtning af genbrugsasfalten som den forefindes – uden at udvaske bitumen fra stenmaterialet. Den herved opnåede kornkurve vil blive grovere og med lavere fillerindhold, end hvis man havde foretaget en sigteanalyse på

samme materiale efter ekstraktion af bindemidlet. En del af partiklerne i kornkurven vil således være "agglomerater", altså en sammenkitning af mindre sten, filler og bitumen.

Sigtning foretages således som for traditionelle grusmaterialer. På tilsvarende vis bestemmes det optimale vandindhold og den maksimale densitet ved modifieret Proctor indstampningsforsøg.

Laboratorieprøvning af skumbitumen og selve BSM-materialet er jf. den sydafrikanske TG2-manual og Wirtgens manualer og anvisninger baseret på anvendelse af specialfremstillet laboratorieudstyr.



Fig. 3.1: Wirtgens specielle BSM-laboratorieudstyr består af en bitumenskumningsenhed, WLB 10S (t.h.), en tilhørende materialeblander, WLM 30 (midt) og en speciel laboratorieindstamper, WLV 1 (t.v.).

Bitumenskumningsenheden er opbygget, så bitumen opvarmes i en beholder og der er opvarmede slanger og rør frem til skumdysen, som er placeret i maskinens øverste venstre side, hen over BSM-blandeenheden (jf billedet). Vandmængde, bitumentemperatur og tryk, doseringsmængder etc. styres via pulten. Det må påregnes, at der skal en del forsøg til hver gang for at ramme den helt rette dosering med den rette temperatur og vandmængde. Tilsvarende er det vigtigt at rengøre skumenheden hyppigt, da flager/rester af varmbitumen uundgåeligt vil forårsage tilstopning af skumenheden/-dysen.

Selve BSM-blanderen er opbygget som en lille to-akslet tvangsblender med "blandecløer" og skrabeplader, som kendt fra asfaltblandere – blot med den forskel, at der ikke er nogen opvarmningsenhed, da blandingen jo foretages "koldt" ved stuetemperatur. Blanderen er indrettet, så der i lågets ene øverste hjørne er monteret en lille åbningslem, som passer til

skumdysen. Herved kan skummes direkte ned i blanderen uden at få store mængder aerosoler fra skumbitumenen ud i lokalet og omgivelserne. Det må dog under alle omstændigheder erfaringsmæssigt påregnes, at der kan/vil forekomme fine aerosoler i luften omkring blanderen under skumningen. Der blandes jf. TG2-manualen typisk i 20-30 sekunder (vådblandetid, efter bitumendoseringen). Det forudsættes, at genbrugsasfalten og filleren samt evt. tilsat procesvand forinden er blandet i tilsvarende ca. 30 sekunder.



Fig 3.2: Åben blander: Blandearme og geometri ses.

Når blandingen er fuldført vendes den runde mikserdel af blanderen 180 grader ved hjælp af det store svinghjul. Blanderens låg kan herefter afmonteres og fungere som transportvogn (bemærk de små hjul i toppen af låget på billedet). TG2-manualen understreger vigtigheden af at benytte en tvangsblander (pugmill-type), idet traditionelle røremaskiner ("bageri-mixere") ikke opnår den rette blandekonsistens, sammenlignet med fabriksproduktionen. Bemærk, jf. bl.a. Wirtgens manual, at indstampning af prøvelegemer bør være afsluttet senest 4 timer efter blandingen er afsluttet.

Indstampning af prøvelegemer foretages med den specielle vibrationsindstamper, som styres ud fra det elektroniske styrepanel. Der vibreres normalt indtil der opnås en densitet svarende til den modificerede Proctor densitet fra referenceprøvning af GMA-materialet og et vandindhold (procesvand) svarende til 80% af det optimale vandindhold fra modificeret Proctor. Der anvendes Ø 150 mm splitforme. Der anvendes normalt en prøvelegemehøjde på 95 mm, som indbygges á 2 lag. Efter indstampning af det nederste lag foretages en opkradsning af overfladen før 2. lag indstemples (specielt opkradsningsværktøj medfølger vibrationsindstamperen). Herved sikres et sammenhængende, homogent prøvelegeme.



Fig. 3.3: Wirtgens omfattende manual for laboratorietests

Til brug for bestemmelse af BSM-materialets stivhedsmodul anvendes dog prøvelegemer som kun har en højde på 60 mm (jf. den anvendte CEN testmetode DS/EN 12697-26:2018 Annex C (IT-CY samt udstyrsrammens fysiske begrænsninger).

4. BSM råvarer

Den i dette projekt omhandlede variant af BSM fremstilles på basis af knust genbrugsasfalt. Der tilsættes en lille mængde aktiv filler, typisk cement. Desuden tilsættes "procesvand" for at sikre materialets bearbejdelighed, på samme vis som det kendes fra indbygning af ubundne eller cement/kalkstabiliserede bærelag. Endelig tilsættes skumbitumen, fremstillet af traditionel umodificeret vejbitumen, tilsat en lille mængde vand for opnåelse af skumeffekten.

4.1. Genbrugsasfalt

I forsøgsrækken er der taget udgangspunkt i de typisk forekommende genbrugsasfaltmaterialer på danske asfaltfabrikkers lagre. Genbrugsasfalten består typisk af en blanding af affræset gammel asfalt, ophugget/opbrudt gammel asfalt, returasfalt og overskudsproduktion. Materialerne opstakkes typisk i en stor lagerbunke, som 1-2 gange årligt knuses og typisk opsigtes i en 0/16 mm fraktion (mindre dele er evt. frasigtet som 0/6 eller 0/8 mm materiale). For at få et indtryk af variationen imellem de enkelte, forekommende genbrugsasfaltlagre, er der i dette projekt indledningsvis indsamlet en række repræsentative prøver af 0/16 mm GMA fra lagre hos forskellige producenter og i forskellige landsdele.

På disse forsøg er efterfølgende udført sigteanalyse (af materialet som det forefindes, inklusive bitumen). Der er desuden foretaget modifieret Proctor-forsøg med bestemmelse af optimal densitet og tilhørende optimalt vandindhold.

Sieve analysis		1	2	3	4	5	6
31,5 mm	[%]	100	100	100	100	100	100
16 mm	[%]	97	99	98	98	94	99
8 mm	[%]	77	86	72	76	67	71
4 mm	[%]	53	52	47	46	42	39
2 mm	[%]	37	30	32	28	29	20
1 mm	[%]	25	19	20	17	19	12
0,5 mm	[%]	14	11	9	9	11	8
0,25 mm	[%]	7	5	4	5	6	6
0,125 mm	[%]	4	3	2	3	3	5
0,063 mm	[%]	3,4	2,5	1,6	2,4	2,4	4,6
Mod.Proct.							
Max. Dry density	[kg/m ³]	2,06	2,13	1,98	1,94	1,93	1,97
Opt. Water	[%]	6,3	6,9	9,3	5,1	8,1	8,3
Bit-%	[%]	3,9	4,9	4,1	4,6	3,9	5,7
Marshall-dens. *)	[kg/m ³]	2,04	2,12	2,04	1,96	1,96	1,92
ITS-dry *)	[kPa]	249	277	434	391	224	456
ITS-wet *)	[kPa]	25	24	180	71	61	87
ITSR *)	[%]	10	9	42	18	27	19

Tabel 4.1: Analyse af en række typiske forekomster af knust genbrugsasfalt 0/16 mm. Prøve nr. 6 er genbrugsasfalten anvendt i Fuglebjerg fuldskalastrækningen (se afsnit 7) som er lidt atypisk (se rød-markeringer), da den hovedsagelig stammer fra affræset SMA-slidlag. Alligevel er ITSR næsten ens.

TG2 manualen angiver i § 4.2.1.3 nogle anbefalinger for "stenmaterialet" anvendt til BSM. Der anbefales bl.a. et fillerindhold på 4-10% gennemfald på 0,075 mm sigten, hvilket formodentligt vil svare til 3-9% for den i Danmark anvendte 0,063 mm fillersigte. De fleste af de testede genbrugsvarianter har et lidt lavere fillerindhold, men skal også sammenholdes med at der efterfølgende tilsættes 0,5 – 1,0 % cement eller anden klæbeaktiv filler (hydratkalk eller flyveaske nævnes som alternativer).

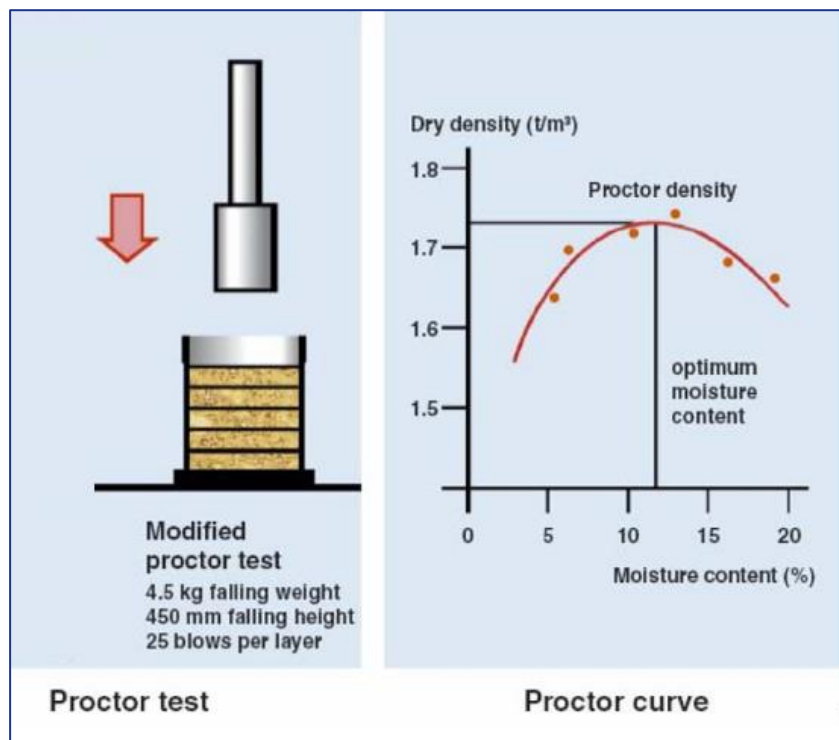


Fig. 4.1: Princip for modificeret Proctorforsøg og tilhørende grafisk afbildning af data: Der optegnes en kurve for opnået densitet ved varierende vandindhold (typisk 5 forskellige vandprocenter). Den maksimale densitet og det tilhørende vandindhold bestemmes (sorte linjer).

I forlængelse af de udførte sigteanalyser og modificerede Proctor-forsøg er der supplerende udført Marshall-indstampning på genbrugsasfalten (Ø 100 mm legemer, som kendt fra varm-blandet asfalt) ved en temperatur på 70°C, hvorefter der er foretaget spaltetrækstyrkeforsøg før/efter vandlagring. Disse forsøg er jf. Wirtgens Laboratory Handbook § 1.1.3 vigtige at udføre for at sikre, at den gamle genbrugsbitumen har tilstrækkelig lav "reaktivitet". Hvis der er tale om helt frisk og blød bitumen, er der risiko for, at den genbrugsasfaltens bitumen ikke blot sammenbinder de gamle partikler, men vil bidrage med nye aktive bindinger, hvilket ikke ønskes i en BSM.

Igen skal det erindres, at BSM er et bitumenstabiliseret materiale med punktvis bindinger imellem de enkelte korn og ikke er et homogent omhyldet og totalt sammenhæftet materiale, som det er tilfældet for varmblandet asfalt. En af de i litteraturen beskrevne fordele ved BSM skulle være, at laget p.g.a. de punktvis bindinger ikke lader revner fra underlaget slå igennem BSM-laget. Hvis den gamle asfalt er for "reaktiv" vil der således dels være risiko for, at der kan opstå gennemslagsrevner igennem BSM-laget, dels er der risiko for, at den gamle "reaktive" bitumen under indbygningen skaber en tæt sammenkitning i toppen af lagets tykkelse, som så danner bro og hindrer en effektiv dybdekomprimering af laget (lagtykkelse typisk ca. 15 cm).

Der foretages derfor, som ovenfor nævnt, Marshall-indstampning af det rene genbrugsmateriale ved 70°C (tilstrækkelig høj temperatur til at aktivere eventuelle bløde bitumener, uden at temperaturen bliver så høj, at den gamle asfalt opvarmes til produktionstemperaturer svarende til varmblandet asfalt). Der foretages efterfølgende spaltetrækstyrketest (25°C) før/efter 24 timers vandlagring ved 25°C. Hvis den gennemsnitlige ITS for de vandlagrede prøver er > 100 kPa bør genbrugsasfalten betragtes som "reaktiv" og det anbefales, at den før fremstilling af BSM blandes med stenmel eller knuste skræver for at mindske reaktiviteten. Betragtes tabel 4.1 ses, at kun genbrugsmateriale nr. 3 har en ITS-våd, som ligger over 100 kPa. Selv den primært SMA-baserede genbrugsvariant nr. 6 ligger pænt under 100 kPa.

4.1.1. Konklusion, genbrugsasfalt

Ovenstående forsøg viser, at det med rimelighed kan antages, at danske 0/16 mm knuste genbrugsasfaltmaterialer i det væsentlige kan betragtes under ét, så det ikke vil være nødvendigt med omfattende BSM mix-designs for hver eneste genbrugsasfaltstak, der tages i brug. Den maksimale modificerede Proctor-densitet ligger typisk omkring 2,0 g/cm³ og med et korresponderende optimalt vandindhold på ca. 7%.

4.2. Filler

Som aktiv filler anbefaler TG2-manualen at tilsætte 0,5 – 1,0% cement. Tilsættes under 0,5% cement opnås ingen reel effekt. Tilsættes over 1,0% cement er der risiko for, at cementen kan begynde at danne stive CG-lignende bindinger, som efterfølgende kan forårsage revner og krakeleringer. TG2-manualen angiver desuden, at der som alternativ til cement kan anvendes hydratkalk eller evt. flyveaske. Ved anvendelse af hydratkalk kan oplagringstiden af blandet BSM før udlægning iflg. Sydafrikanske eksperter øges til flere døgn, såfremt det ved afdækning effektivt sikres, at vandindholdet bibeholdes. Til gengæld vil materialets styrkeudvikling formodetligt forløbe lidt langsommere. Der er i denne forsøgsrække udelukkende anvendt standard (basis) cement som aktiv filler.

4.3. Bitumen

TG2 manualen fra Sydafrika anbefaler som udgangspunkt en bitumen 70/100, men nævner, at andre bitumenhårdheder også kan anvendes. Det nævnes dog, at der måske kan opstå problemer med at opnå tilstrækkelig skumeffekt ved meget hårde bitumener. I forsøgsrækken er der indledningsvis foretaget skumningsforsøg på bitumen 40/60, 70/100 og 100/150 fra to forskellige leverandører, som begge opererer på det danske marked for vejbitumen. Der er i forsøgsrækken anvendt standard vejbitumen jf. DS/EN 12591 uden additiver og uden genbrugsbitumen. Forud fremstillet modificeret bitumen, jf. DS/EN 14023 er ikke egnet til skumning, da den har antiskumningseffekt. Ønskes anvendelse af modificering, kan det evt. alternativt overvejes at benytte in-situ modificering med additiv direkte i blanderen (dette indgår dog ikke i forsøgsrækken).



Fig. 4.2: Til BSM skumbitumen anvendes kun standard vejbitumen.

5. Skumbitumen forsøg

Når vand opvarmes til mere end 100°C overgår det til dampform. Ved trykvis injicering af små mængder vand i varm bitumen opstår en momentan dampekspllosion, som forårsager, at bitumenen koger op som bitumenscum. Hvis man indblender bitumen på skumform i et stenmateriale, opnår man p.g.a. det kraftigt udvidede volumen en betydelig bedre dispergering af bindemidlet, ned hvis det havde været tilsat uden vand. Det er denne teknologi, som anvendes i BSM.

For at opnå et indgående kendskab til, hvordan vejbitumen skummer op og hvilke parametre, som påvirker skumningsprocessen, er der i forsøgsrækken foretaget en større serie af enkeltstående skumforsøg med WLB 10 S laboratorieskumningsenheden. Der er her anvendt forskellige bitumenhårdheder (40/60, 70/100 og 100/150) fra 2 forskellige leverandører, ved 3 forskellige vandtilsætningsprocenter og ved hele 4 forskellige temperaturer. Et samlet overblik fremgår af tabellen i bilag 1.



Fig. 5.1 a og b: Skumningsenhedens dyse (t.v.) sender varm skumbitumen ned i testspanden. Den røde målepind (t.h.) benyttes til bedømmelse af ekspansionsraten og halveringstiden for skummet.

For at kunne vurdere skumningseffekten foretages skumforsøget ned i en speciel prøvespand med tilhørende højdemåler (se fig. 5.1).

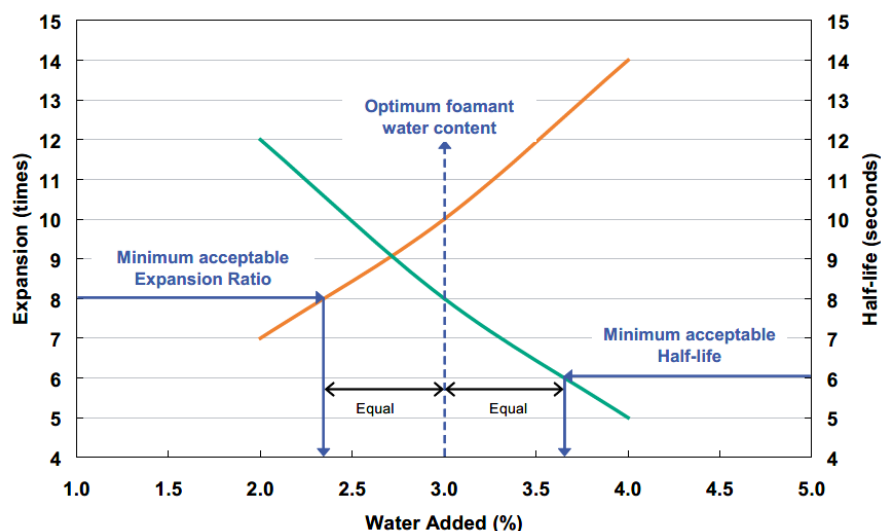


Fig 5.2: Eksempel på grafisk præsentation af skumbitumendata. Det optimale vandindhold i bitumenscummet findes som midtvejspunktet mellem vandindholdet som giver en halveringstid på min. 6 sekunder og en ekspansionsrate på min 10 (i figuren vist som 8, sv.t. klima > 25°C). (Kilde: TG2 manualen fra Asphalt Academy)

Skumudvidelsesgraden (ekspansionsraten) registreres sammen med den tid, der går indtil skummets volumen er halveret (halveringstiden). Disse to parametre benyttes til vurdering af den afprøvede bitumens skumningsegnethed. TG2-manualen anbefaler for BSM anvendt i klima med temperaturer mellem 10 og 25°C at ekspansionsraten (volumenforøgelsen) skal være mindst 10 (gange) og at halveringstiden skal være mindst 6 sekunder (for at sikre tilstrækkeligt stabilt skum til at kunne nå at dispergere og omhulle tilstrækkeligt). I efterfølgende figur 5.3 ses opstillet en grafisk præsentation af skumningsdata for de danske forsøg med bitumen 70/100 (leverandør 1) ved 4 forskellige temperaturer. Figur 5.4 viser tilsvarende data for bitumen 40/60 og figur 5.5 viser sammenhæng mellem forskellige bitumentyper.

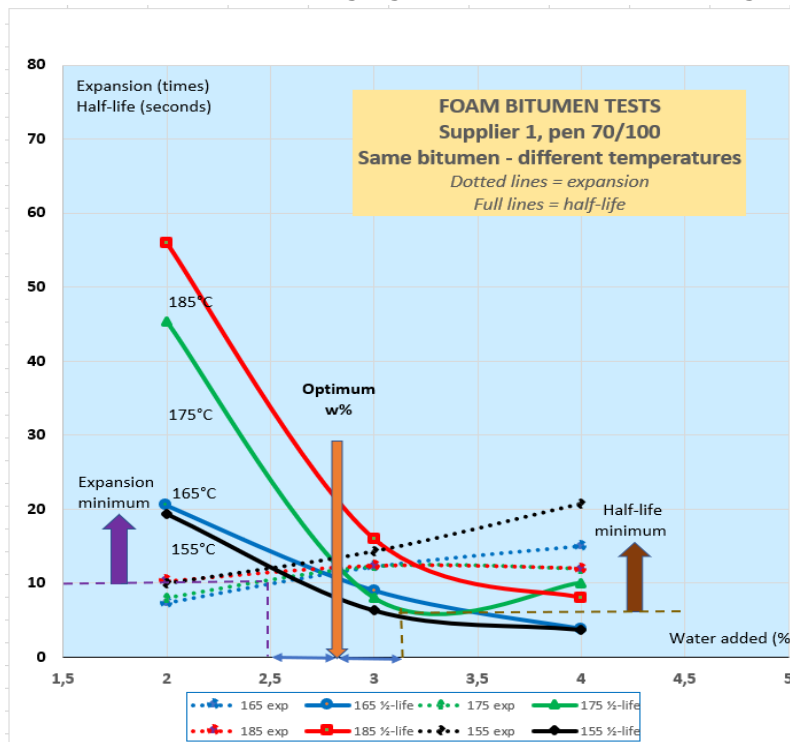


Fig. 5.3: Data fra skumningsforsøg med bitumen 70/100 fra leverandør 1. Det ses, at det optimale vandindhold i skumbitumen er ca. 2,8%, praktisk taget uafhængigt af bitumen-temperaturen.

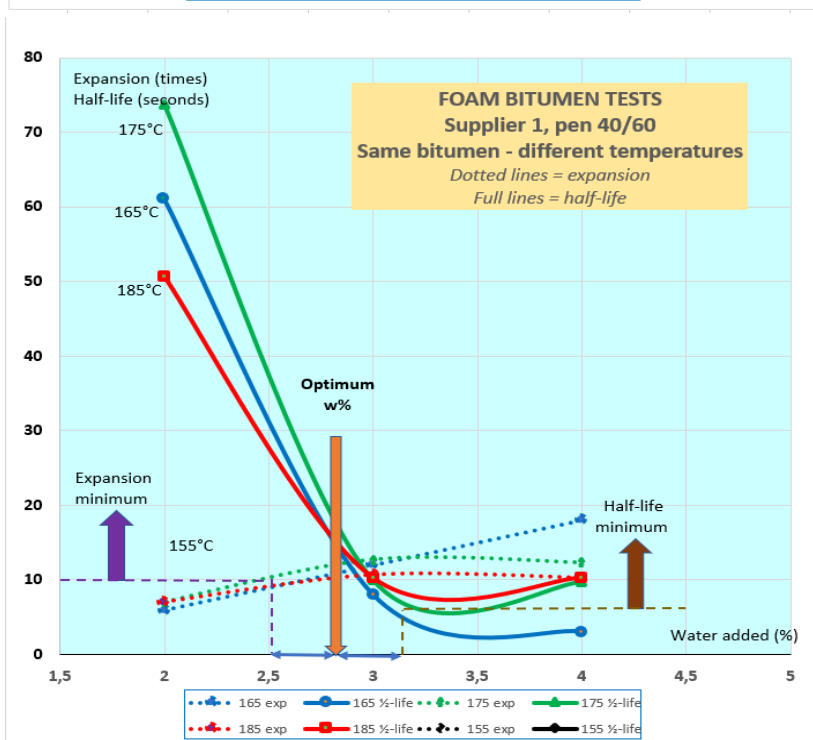


Fig. 5.4: Data fra skumningsforsøg med bitumen 40/60 fra leverandør 1. Det ses, at det optimale vandindhold i skumbitumen ligesom for 70/100 er ca. 2,8%, praktisk taget uafhængigt af bitumen-temperaturen.

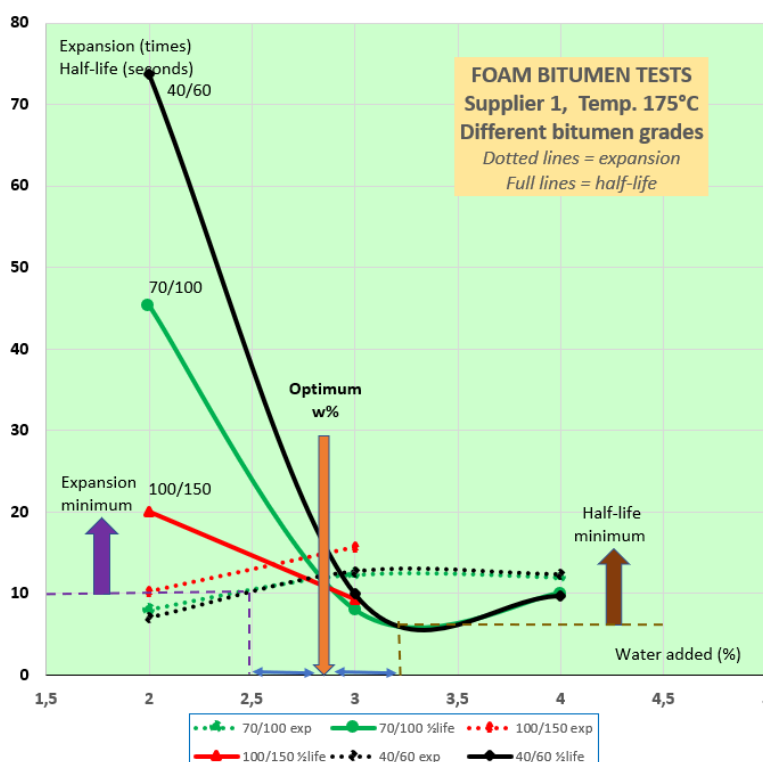


Fig. 5.5: Data fra skumningsforsøg med forskellige bitumentyper fra leverandør 1 og denne gang fastholdt bitumentemperatur 175°C. Det ses igen, at det optimale vandindhold i skumbitumen ligger i området ca. 2,5 – 3,0 %, praktisk taget uafhængigt af bitumenhårdheden.

5.1. Konklusion, skumbitumen:

- Der kan til BSM benyttes standard vejbitumen med hårdhed 40/60, 70/100 eller 100/150, hvor 70/100 så vidt muligt bør foretrækkes (også jf. TG2-manualens anbefalinger).
- Der bør, jf. de gennemførte forsøg, ved skumning tilstræbes tilsat en vandmængde på ca. 2,8% af bitumenmængden for at opnå den optimale skumeffekt.
- Der bør ved skumning tilstræbes en bitumentemperatur på ca. 175°C. Højere temperaturer synes ikke at give forøget effekt og under alle omstændigheder bør bitumen sikres at holdes under ca. 190°C af hensyn til risiko for beskadigelse af bitumen og risiko for koksddannelser i skumsystemet. En lavere temperatur vil være mindre energikrævende, men en sænkning ned til f.eks. 155°C vil med stor sandsynlighed resultere i utilfredsstillende skumdannelse. En tilstræbt bitumentemperatur ved skumningsdysen på 175°C synes derfor at være det mest robuste og hensigtsmæssige valg.
- For den bløde bitumen 100/150 ses til gengæld ingen gevinst ved at gå fra 165 til 175°C, hvilket måske skal ses i lyset af dette bindemiddels lavere viskositet.
- Det er vigtigt for de senere fuldskalaforsøg i marken at notere, at ovennævnte idealtemperaturer er den nødvendige temperatur i selve skumenheden. Der kan i praksis være en del temperaturtab i slanger og rør fra bitumentank til skumenhed, så det gælder ikke blot om at regulere temperaturen i bitumentanken men også om at minimere tabet undervejs, frem til skumdysen.

6. Mix-design

BSM-materialet sammensættes efter danske forhold udelukkende af 0/16 mm genbrugsasfalt, aktiv filler (cement), procesvand, vejbitumen og skumningsvand. Kornkurven for materialet er således som udgangspunkt mere eller mindre givet, hvis det valgte genbrugsasfaltmateriale indledningsvis findes egnet.

For at optimere BSM-materialet foretages mix-design ved at laboratoriefremstille cylindriske prøvelegemer af BSM-materialet med varieret bitumentilsætning.

Det nævnes i TG2-manualen, at der specielt er to funktionelle egenskaber, som er vigtige:

- a) Modstand mod permanent deformation: Stor styrke kan bl.a. opnås ved sikring af:
 - i. God styrke og kornform af stenmaterialet
 - ii. God komprimering
 - iii. Begrænse vandindholdet til den lave side af optimal mod. Proctor
 - iv. Begrænse tilsætningen af ny (skum)bitumen ($< 3,5\%$)
 - v. Tilsætning af aktiv filler ($< 1,0\%$ hvis cement)
- b) Vandfølsomhed: Hvis vandfølsomheden er for stor kan der opstå skader på belægningen som følge af, at BSM udsættes for højt vandindhold i kombination med poretryk frembragt af trafikken. Dette kan resultere i vedhæftningssvigt. En god vandfølsomhedsmodstand kan opnås ved:
 - i. Øget bitumenindhold (skal dog balanceres mod øget deformationsrisiko jf. ovennævnte)
 - ii. Anvendelse af aktiv filler
 - iii. God komprimering
 - iv. Materiale med jævnt kornkurveforløb.

På basis af ovennævnte er der i projektet opstillet et indledende mix-design program, hvor en tilfældigt udvalgt 0/16 mm genbrugsasfalt (nr. 4 fra tabel 4.1) benyttes som basismateriale. Der tilsættes 0,75% cement (midtpunkt i det anbefalede interval 0,5 – 1,0%).

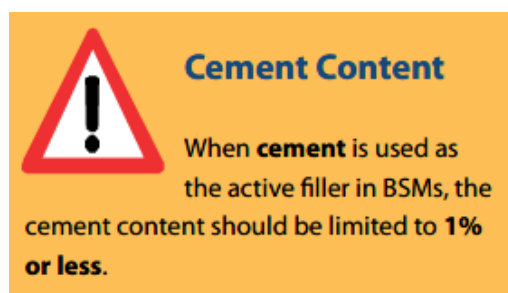


Fig. 6.1: TG2-manualen fra Sydafrika understreger klart, at man ikke bør øge cementindholdet til mere end 1,0 % af hensyn til at sikre fleksibiliteten og at mindske risikoen for at der opstår CG-lignende bindinger, som efterfølgende kan give revner. Anvendes alternativt hydratkalk, kan mængden af aktiv filler øges til 1,5%.

6.1. Mix-design program

På basis af skumforsøgene beskrevet i afsnit 5 anvendes i de gennemførte mix-designs som udgangspunkt en bitumen 70/100 fra leverandør 1 med 2,8% vandindhold i skummet og en temperatur på 175°C. Som reference for densiteten anvendes en Proctor-densitet på 1,94 g/cm³ (jf. tabel 4.1, genbrug nr. 4) og et optimalt vandindhold på ca. 5,0% (svarende til gennemsnit af alle undersøgte genbrugsasfalter, fratrullet 2%-point jf. tidligere anførte anbefalinger). Det skal i denne sammenhæng også bemærkes, at Proctor-kurven for genbrugsasfalt nr. 4 er meget flad og næsten helt vandret ved vandindhold over ca. 5% og derfor meget robust i dette område.

Forud for mix-design blev der udtaget 300 plastspande med tætsluttende låg, hver med ca. 10 kg genbrugsasfalt kilde nr. 4. Desuden blev der leveret bitumenspande fra bitumenleverandør 1 og 2 (som også benyttet til skumforsøgene). For at få et overblik over forskellige parametres indflydelse på BSM-mixens egenskaber er mix-design programmet opdelt i tre faser:

- Fase 1: Indledende mix-design – optimering af bitumenindhold
- Fase 2: Vurdering af effekten af cementfillervariationer (hvis øvrige parametre er fastholdt)
- Fase 3: Vurdering af effekt ved forskellige bitumentyper og leverandører

Resultaterne og forløbet er nærmere beskrevet i de efterfølgende delafsnit.

6.2. Avendte prøvningsmetoder

6.2.1. BSM-specialtests

Bitumenskumning, BSM-blanding og vibrationsindstampning er udført i henhold til anvisningerne i Wirtgens "BSM Cold Recycling Laboratory handbook" og TG2-manualen. Der findes ingen officielle CEN- eller lignende standarder for dette område.

Følgende skal i denne forbindelse bemærkes:

- Ø150 mm legemer vibrationsindstemples jf. Wirtgen manualen ved 20-25 °C. Bemærk beskrivelsen om lagvis indstampning af flere del-lag, med opkradsning af overflade før næste del-lag indstemples. Det skal bemærkes, at TG2-manualen beskriver at indledende mix-design kan foretages på Ø100 mm legemer, efterfulgt af et "forfinet" mix-design med Ø150 mm legemer. Ved den i nærværende rapport omtalte forsøgsrække er der dog udelukkende anvendt Ø150 mm legemer.
- Til brug for densitetsbestemmelse og spaltetrækstyrketest (vandfølsomhed) indstemples legemer med ca. 95 mm højde (anvend splitform med højde 120 mm). Indstampning er foretaget á 2 del-lag. Den nødvendige mængde til at opnå den ønskede densitet ved den fastlagte prøvehøjde bestemmes ud fra den modificerede Proctor-densitet.



Fig. 6-2 A og B: Indstampning med vibrationshammer og legemer i Ø15 cm splitforme



- Til brug for triaxialtest angiver TG2-manualen en legemehøjde på 300 mm (splitform med højde 320 mm). Indstampes i 6 del-lag. Der er dog ikke udført triaxialtest i nærværende rapports prøvningsomfang.
- Til brug for stivhedsmodulbestemmelse vibrationsindstampes prøvelegemer med en højde på 60 mm, så de tilfredsstiller DS/EN 12697-26 Method C (IT-CY). Bemærk at denne test ikke er en del af det oprindelige oplæg i TG2-manualen.
- Ved BSM indstampning anvendes materialer med et vandindhold sv.t. 80% af det optimale vandindhold fra modificeret Proctorindstampning på genbrugsasfalten. Hvis der er tale om en prøve modtaget fra fuldskalaproduktionen justeres vandindholdet ved indblanding før indstampning.
- Efter indstampning skal prøvelegemerne cures (hærdes) inden der foretages prøvning. Prøverne udtages af splitformene efter (min.) 4 timer og skal derefter cures 72 timer ved 40°C i et ventileret varmeskab, så fugten fortrænges. Det skal i denne forbindelse bemærkes, at det ikke er praktisk at anvende en fast curingtid på 72 timer, da dette vil være en væsentlig begrænsning for hvilke ugedage, der kan anvendes i en normal 5-dages arbejdsuge. I denne forsøgsrække er derfor anvendt en curingtid på *minimum* 72 timer, idet det antages at 1-2 efterfølgende dages curing (fx hen over en weekend) ikke influerer reelt på de efterfølgende prøvninger.

TG2 manualen omtaler endda en mere kompliceret curing-metodik til de "forfinede", såkaldte "level 2 og 3" mix-designs, hvor der indledningsvis cures 20 timer ved 30°C hvorefter prøverne placeres i en lukket plastpose og cures 24 timer ved 40°C, hvorefter posen udskiftes og lukkes og der igen cures 24 timer ved 40°C. Denne fremgangsmåde synes unødigt kompliceret at tilrettelægge og anvende og er derfor ikke anvendt i den i nærværende rapport beskrevne forsøgsrække.



Fig. 6-3: Indstampede BSM-KMA kerner. Faste og stabile, men dog lidt løsere og mere grå overflader end for varmblandet asfalt.

- Efter curing lagres 3 af de 6 legemer i vandbad i 24 timer ved 25°C. Herefter foretages spaltetrækstyrketest på de to serier (våd og tør) jf. DS/EN 12697-23 ved 25°C. Spaltetrækstyrken (ITS) bestemmes og forholdet mellem den våde og den tørre (ITSR) beregnes. Bemærk, at det kan være hensigtsmæssigt at vandbadslagring af prøvelegemer foretages i vandfyldte og "rigeligt store" plastposer, så det undgås, at evt. løst/smuldrende materiale tilstopper vandbadets cirkulationspumpe.

6.2.2. Spaltetrækstyrke

Spaltetrækstyrketests udføres jf. DS/EN 12697-23, men ved rumtemperatur. Der anvendes Ø150 mm vibrationsindstampede legemer, som efter curing er lagret ved 25°C.



Fig. 6.4: Spaltetrækstyrketest på Ø150 mm BSM-prøvelegeme.

6.2.3. Stivhedsmodul

Stivhedsmodul er i nærværende forsøgsrække foretaget på færdigcurede legemer og udført i h.t. DS/EN 12697-26 Annex C (IT-CY) ved 20°C. Der anvendes Ø150 mm vibrationsindstampede legemer.



Fig. 6.5: Bestemmelse af stivhedsmodul på BSM-prøvelegeme.

6.3. Indledende mix-design (fase 1A)

Der er i denne fase 1 anvendt en materialesammensætning som angivet i afsnit 6.1. Det oplyses fra litteraturen, at BSM på genbrugsasfalt typisk tilsættes godt 2% bitumen. Der blev

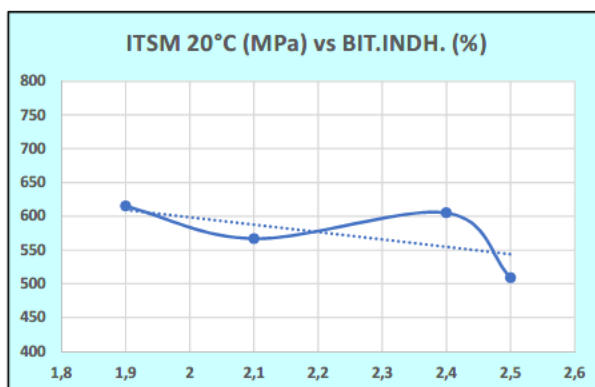
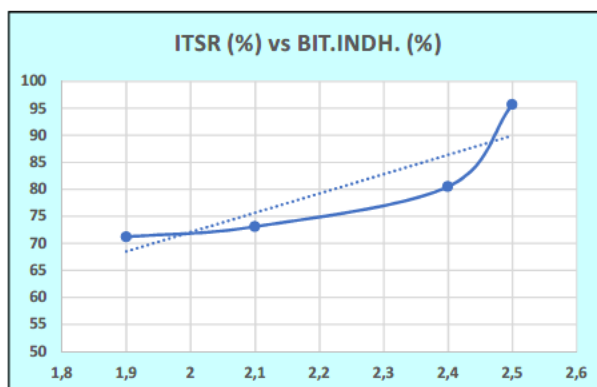
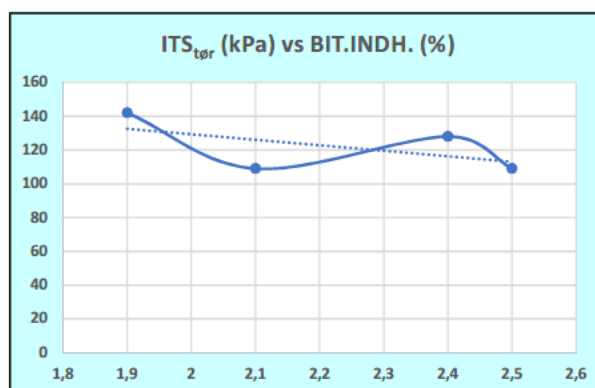
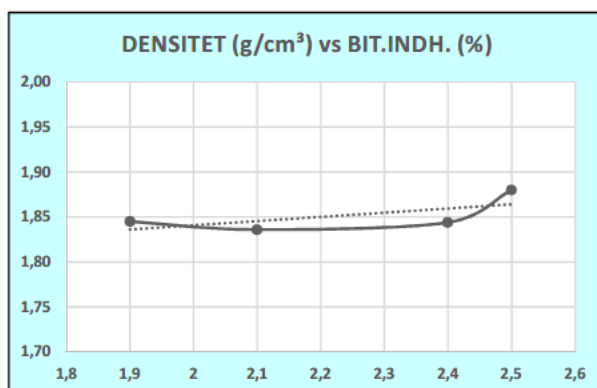
derfor indledningsvis gennemført blanding og indstampning med følgende (skum)bitumenindhold:

1,9% - 2,2% og 2,5%.

Det blev dog allerede ved den indledende datavurdering klart, at blandingen med 2,2% bitumen var afvigende, muligvis p.g.a. en enkeltstående, afvigende genbrugsasfalt-spand. Det blev derfor besluttet, at erstatte blanding 2 (2,2% bitumen) med to nye blandinger med hhv. 2,1 og 2,4 % bitumen. Samtlige delresultater fremgår af bilag 2. Resultaterne er overordnet præsenteret neden for:

Basis materiale: 0/16 mm Genbrugsasfalt, kilde nr. 4
 Bitumen: 70/100, Leverandør 1
 Vandindhold i skumbitumen: 2,8%
 Bitumen temperatur: 175°C
 Cement tilsat: 0,75% af blanding
 Procesvandindhold i mix: 5,1% (fra mod. Proctor)

BITUMEN %	DENSITET g/cm ³	ITStør kPa	ITSR %	ITSM, 20°C MPa
1,9	1,845	142	71,2	615
2,1	1,836	109	73,1	567
2,4	1,844	128	80,5	605
2,5	1,88	109	95,7	509



- Densiteten er kun svagt stigende med det øgede bindemiddelindhold
- Spaltetrækstyrken (tør) er omtrent uafhængig m.h.t. den anvendte bitumenvariation
- Vandfølsomhedsmodstanden (ITSR) stiger med øget bindemiddelindhold
- Stivhedsmodulet varierer kun indenfor normal prøvningsusikkerhed

Konklusion på fase 1 mix-design: Det anvendte design synes at være ret robust overfor mindre bindemiddelvariationer i intervallet 1,9 – 2,5% bitumen (Bemærk dog, at der for alle blandinger er tale om enkeltstående data). Eventuelle mindre variationer i doseret bitumenmængde kan heller ikke umiddelbart efterkontrolleres ved ekstraktionsanalyse pga. de uundgåelige variationer i genbrugsasfaltens bindemiddelindhold. Generelt synes der at være større variationer imellem delresultater af samme tests end hvad der er kendt fra varmblandet asfalt (se bilag 2). Endelig skal det omkring det anvendte bindemiddelinterval bemærkes, at en

tilsat bitumenmængde på 2,5% nok reelt er lidt for højt til praktisk anvendelse for et stabiliseret materiale. Hvis man derfor udelukkende betragter kurvernes forløb mellem 1,9 og 2,4% ses reelt et meget fladt forløb, hvilket indikerer stor robusthed i BSM'ens egenskaber uanset mindre udsving i tilsat bindemiddelmængde.

6.4. Mix-design fase 1B: Sammenligning af vibrations- og Marshall-indstampning

Som et led i at udforske mulighederne for anvendelse af alternative, kendte testmetoder blev der for ovennævnte mix-designs blanding 4 foretaget supplerende indstampning efter Marshall-metoden (2x50 slag), dog ved 25°C, altså samme temperatur som for vibrationsindstampningen.

Resultatet fremgår detaljeret af bilag 3. Følgende konkluderes ved sammenligning af de to metoder:

MARSHALL i forhold til VIBRATION:	
Densitet	105 %
ITS tør	187 %
ITS våd	195 %
ITSR	104 %
ITSM20	155 %

Tabel 6.1: Data for blanding 4 ved Marshall-indstampning kontra vibrationsindstampning

Det konkluderes, at Marshall-indstampning for alle parametre giver højere værdier end ved vibrationsindstampning. Man kan således ikke direkte (1:1) udskifte den specielle vibrationsmetode med den i Danmark alment kendte Marshall-metode. Det ville dog give større fleksibilitet for danske laboratorier, hvis der kunne etableres et alternativt, dansk erfaringsgrundlag for design og kontrol af BSM baseret på Marshall-indstampning.

6.5. Mix-design fase 2: Cementfillervariationer

Det oplyses i TG2-manualen, at cementtilsætningen (aktiv filler) bør ligge mellem 0,5 og 1,0%. Der er derfor i denne testfase foretaget sammenlignende blandinger med 0,5%, 0,75% og 1,0% for at se effekten af cementindholdet. Der anvendes samme genbrugsasfalt (nr. 4), samme bitumen (70/100 lev. 1), samme skumvand-% (2,8%) og samme procesvandmængde (ca. 5%) som ved de foregående forsøg. Bitumenmængden er fastsat til 2,1%.

De opnåede delresultater fremgår af bilag 4. Hovedresultaterne fremgår af efterfølgende oversigt.

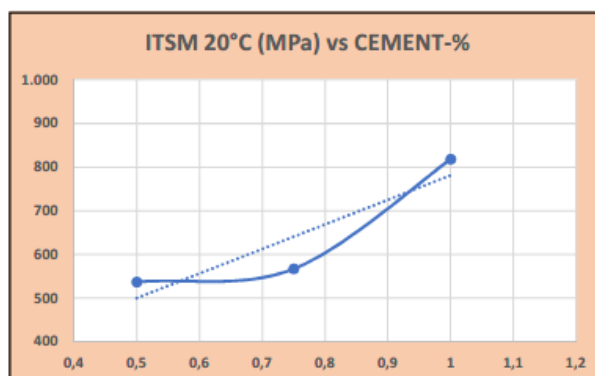
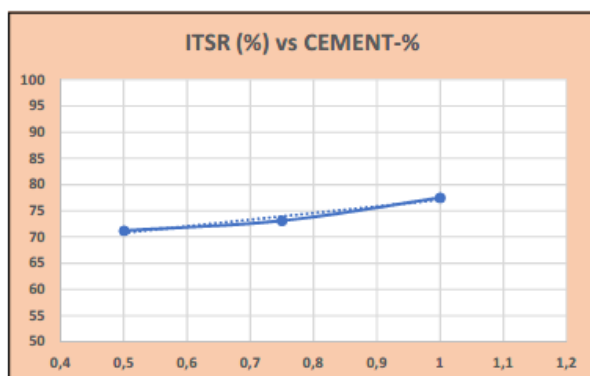
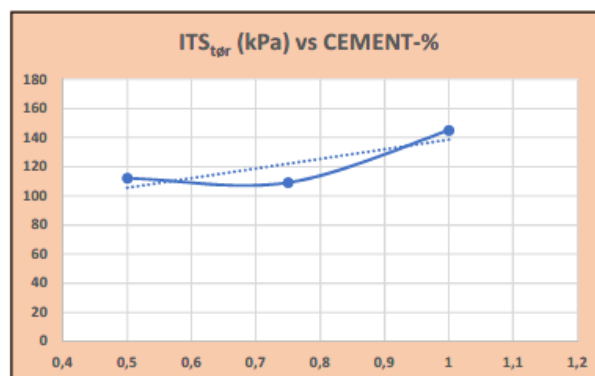
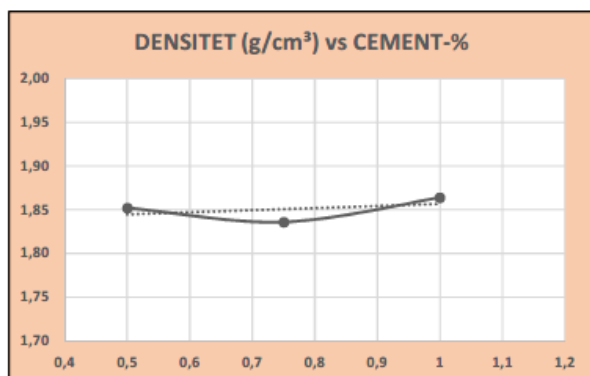
Konklusion:

- Densiteten er praktisk taget upåvirket af cementindholdet indenfor den givne variation
- Spaltetrækstyrken (tør) stiger svagt med øget cementindhold.
- Vandfølsomhedsresistensen stiger med øget cementindhold.
- Stivhedsmodulet stiger markant med øget cementindhold, hvor blandingen med 1,0% cement har markant forhøjet stivhedsmodul.

På baggrund af ovenstående kan konkluderes, at et cementindhold på 1,0% bør tilstræbes. Dette skal desuden ses i sammenhæng med at materialets fillerindhold i øvrigt ligger lidt lavt, sammenlignet med TG2-manualens generelle anbefalinger.

Basis materiale: 0/16 mm Genbrugsasfalt kilde 4
 Bitumen: 70/100 Lev. 1
 Vandindhold i bitumenskum: 2,8%
 Bitumen temperatur: 175°C
 Bitumen tilsat: 2,1%
 Procesvandindhold: Ca. 5%

CEMENT %	DENSITET g/cm ³	ITS _{tør} kPa	ITSR %	ITSM, 20°C Mpa
0,5	1,852	112	71,2	537
0,75	1,836	109	73,1	567
1	1,864	145	77,5	818



Det er i nærværende forsøgsrække ikke afprøvet hvilken effekt det ville få ved anvendelse af hydratkalk eller evt. flyveaske som erstatning for hydratkalken, men disse fillertyper omtales også i TG2 rapporten som mulige at anvende i BSM (endda med op til 1,5%).

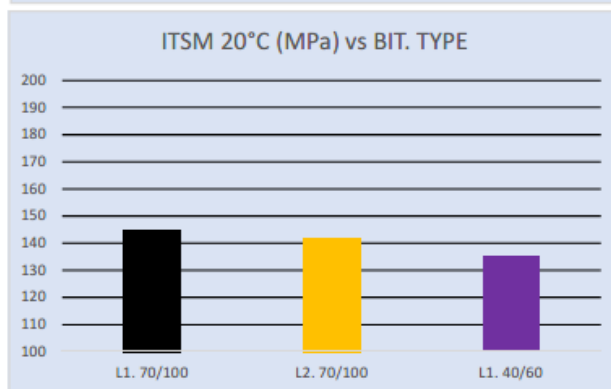
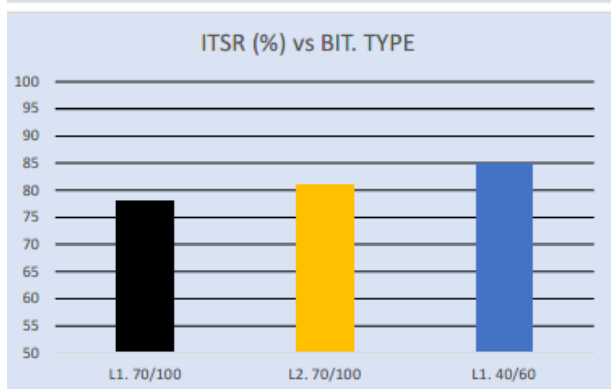
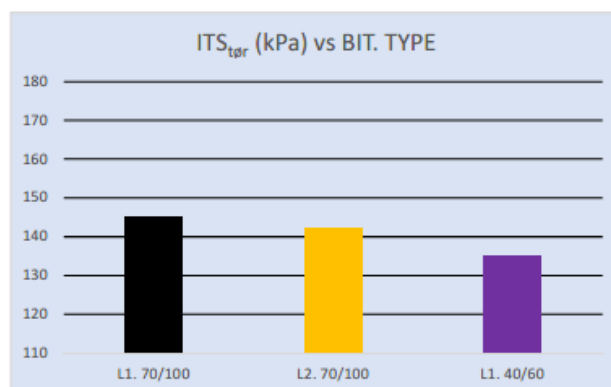
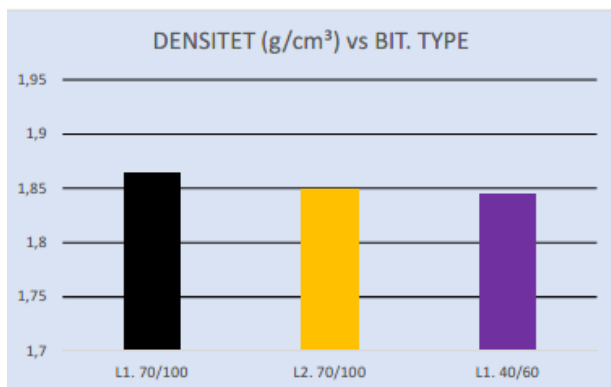
6.6. Mix-design fase 3 - Variationer i bitumentype og leverandør

I denne fase er det afprøvet hvilken effekt det får, når bitumen 70/100 udskiftes med 40/60 fra samme leverandør. Samtidigt er det testet hvilken effekt det får, hvis bitumen 70/100 fra leverandør 1 erstattes af 70/100 fra leverandør 2.

De opnåede delresultater fremgår af bilag 5. Hovedresultaterne fremgår af efterfølgende skematiske oversigt:

Basis materiale: 0/16 mm kn. Genbrugsasfalt kilde nr. 4
 Bitumen: To hårdheder, to leverandører
 Vandindhold i skumbitumen: 2,8%
 Bitumen temperatur: 175°C
 Bitumen tilsat: 2,1%
 Procesvand indhold i mix: 5,1%
 Cement indhold: 1,0%

BITUMEN Lev./Type	Mix no.	DENSITY g/cm ³	ITSdry kPa	ITSR %	ITSM, 20°C Mpa
L1. 70/100	7	1,864	145	78	820
L2. 70/100	8	1,849	142	81	860
L1. 40/60	9	1,845	135	85	820



Konklusion, fase 3:

- Der ses ikke signifikante indbyrdes forskelle på data for bitumen 70/100 fra de to leverandører
- Sammenlignes data for bitumen 70/100 og 40/60 fra samme leverandør ses et lille fald i den tørre spaltetrækstyrkeværdi, men samtidigt en svag stigning i ITSR vandfølsomheds-resistensen ved at skifte 70/100 ud med den hårdere 40/60.

Forskellene er dog fortsat små og da der samtidigt er tale om enkeltstående resultater, bør det nok alene konkluderes, at BSM synes at være relativt ufølsom overfor variationer i bitumentype (hårdhed) og bitumenleverandør.

7. Fuldskala teststrækning i Næstved Kommune

Som en del af det samlede projektforsøg blev det parallelt med mix-design varianterne aftalt, at SR-gruppen skulle udføre en fuldskala teststrækning på en mindre vejstrækning, som Næstved Kommune stillede til rådighed for forsøget.

7.1. Strækningen

SR-gruppen udførte den 18/9-2019 for Næstved Kommune en demonstrationsstrækning med BSM-KMA på Vådagervej i Fuglebjerg. Strækningen er ca. 570 x 3,5 meter, i alt ca. 2.000 m². Vådagervej er adgangsvej for to landbrugsejendomme samt et lokalt biogasanlæg. Der er begrænset trafikintensitet men stor andel tunge (landbrugs)køretøjer.

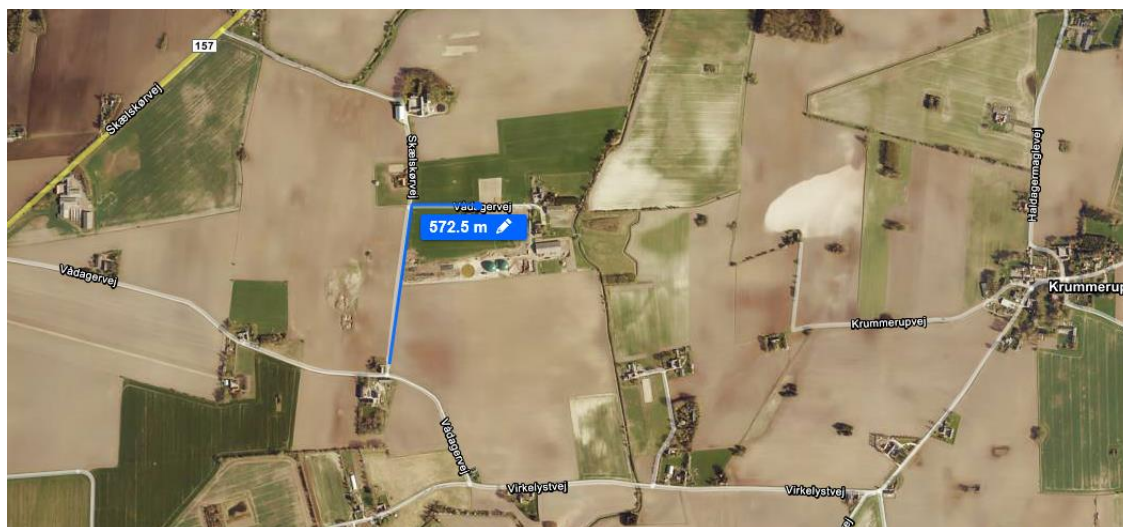


Fig. 7.1: Placeringen af Vådagervej ved Krummerup i Fuglebjerg.

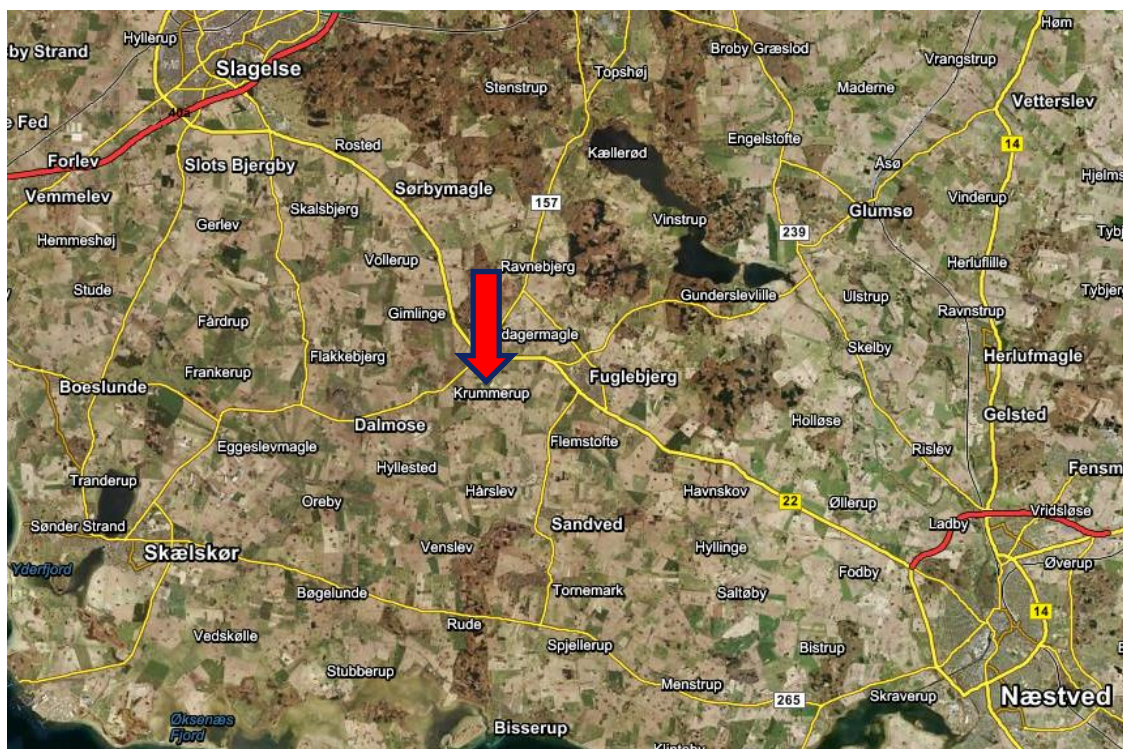


Fig. 7.2: Placeringen af Vådagervej ved Krummerup i Fuglebjerg, set i større perspektiv.



Fig. 7.3 (t.v.): Vådagervej før renoveringen. Gennemrevnet og krakeleret fra tunge landbrugs køretøjer.

Fig. 7.4 (nedenfor): Ved prøveopgravning viste vejbelægningen sig at bestå af ca. 7 cm asfalt ovenpå ca. 25 cm ubundet grus.



7.2. Anvendte materialer, opbygning og teknik

Indledningsvis blev den gamle belægning, bestående af 7 cm asfalt og ca. 25 cm grus, gennemfræset, afrettet og genindbygget (komprimeret) i en samlet dybde på ca. 30 cm. Det blandede bærelag fremstod herefter som et nyt, ubundet bærelag.

Herefter blev der udlagt 15 cm BSM-KMA. Som udgangspunkt blev der anvendt genbrugsasfalt sv.t. kilde nr. 6 i nærværende rapports tabel 4.1. Dette genbrugsmateriale består hovedsageligt af affræset SMA-slidlag hvorfor bindemiddelindholdet og kornkurven, som det fremgår af tabel 4.1, er lidt afvigende fra de mest typiske genbrugsasfalt kilder.



Fig. 7.5: Det anvendte BSM-KMA anlæg i produktion

Der blev ikke forud udført egentligt Mix-design, men (støttet af de parallelle laboratorieforsøg) benyttet en blanding med 0,75% cement, ca. 2% bitumen 70/100 fra leverandør 1 og ca. 175°C bitumentemperatur ved skumningen (opvarmede slanger fra bitumentank til dyser). Det optimale mod.Proctor vandindhold blev bestemt til 8,3% (jf. tabel 4.1), men forelå endnu ikke ved fuldskaforføgets gennemførelse. Bedømt ud fra materialets konsistens og bearbejdelighed blev det af en BSM-specialist vurderet, at der ikke var behov for yderligere vandtilsætning.

Produktionen blev foretaget med SR-gruppens BSM-KMA anlæg, som i dagens anledning var opstillet på Næstveds Kommunes oplagsplads i Fuglebjerg. På samme plads var genbrugsasfalten, affræset fra tidligere job, i forvejen oplagret.

7.3. Udførelsen

Ved produktionen kunne det konstateres, at materialet med det relativt lave, tilsatte bindemiddelindhold på blot ca. 2% ikke er et sammenhængende eller klæbende materiale på samme vis som man kender det fra varmblandet asfalt.

BSM-laget blev udlagt med en traditionel asfaltudlægger og efterfølgende komprimeret med forskellige vejtrømler. Indledningsvis forekommer BSM-materialet lidt løst, grundet den store lagtykkelse på 15 cm. For at undgå at kanterne skrider ud, blev disse indledningsvis komprimeret med en let, glatvalset tromle. Herefter blev benyttet en kombination af en tung gummihjulstrømle og en tandem glatvalset vibrationstrømle. Gummihjulstrømlen er vigtig for at sikre dybdekomprimering i den relativt store lagtykkelse, hvor den glatvalsede tromle skaber overfladejævnheden. Efter afsluttet tromling var BSM-laget så hårdt og fast, at den tunge gummihjulstrømle ikke kunne sætte spor i overfladen, ligesom der heller ikke kunne trædes mærker i overfladen.

Forsøgets produktion og udlægning på Vådagervej kan i øvrigt på god illustrativ vis ses på følgende video: <https://www.youtube.com/watch?v=bWV1uIoWGvc>



Fig. 7.6: Nyfremstillet BSM-materiale.



Fig. 7.7: Udlægning af BSM med asfaltudlægger

Det skal i øvrigt bemærkes, at der ikke kunne ses noget tab af vandindhold fra den nyproducerede asfalt til prøveudtagning ved pålæsning i udlægger samt ved prøveudtagning efter færdig komprimering. Dette antyder således, at BSM også i denne henseende er et ret robust og ukompliceret koncept, som ikke kræver minutiøse, løbende justeringer. Efter afsluttet udlægning og komprimering blev der udlagt kantfyld af knust asfalt.



Fig. 7.8 og 7.9: Komprimering med glatvalset vibrationstromle og tung gummihjulstromle ved udlægning på Vådagervej.

7.4. Laboratorieforsøg BSM-KMA fra Vådagervej

Som opfølgning på BSM-KMA produktionen, blev der udtaget materialeprøver til Teknologisk Instituts (TI) efterfølgende prøvning. Materialerne blev udtaget i plastspande med tætslutende låg, så fugtindholdet kunne bevares. Desuden udtog NCC's geotekniske laboratorium prøver til vandindholdsbestemmelse, modificeret Proctor og udførte efterfølgende komprimeringskontrol af det udlagte BSM-materiale med sandefterfyldning og Troxler isotopsondemåling

7.4.1. Indledende laboratorieprøvning på basis af skønnet Proctor-reference

Som basis-reference for laboratorieindstampning af prøvelegemer anvendes densitet og optimalt vandindhold for Modificeret Proctor-forsøg på genbrugsasfalten. Da disse data på udførelsestidspunktet for belægningsarbejdet ikke forelå for det aktuelle genbrugsmateriale, blev der til laboratorieindstampningerne anvendt gennemsnitsværdier fra de af NCC tidligere bestemte Proctorforsøg på 3 andre genbrugsasfaltprøver (indgår i tabel 4.1).

BSM-KMA materialet blev efter ankomst til TI vandindholdsbestemt, hvorefter der forskriftsmæssigt blev indblandet ekstra vand, svarende til at opnå det optimale vandindhold fra den modificerede Proctor minus 2%-point (batchvis indblandet). Herefter blev der med den specielle Bosch hammer indvibreret i alt 9 cylindriske prøvelegemer med diameter ca. 15 cm og højde ca. 9,5 cm. Indbygning forskriftsmæssigt ad 2 lag med "opkradsning" af første lags top før indbygning af 2. lag.

Specielt for at undgå problemer med at den tilsatte cement begynder at danne hydratiserende bindinger, anbefaler den Sydafrikanske TG2 manual, at al komprimering skal være afsluttet inden for 4 timer fra BSM-produktionen er afsluttet. Alle prøver blev derfor efter 4 timers indledende curing afformet og placeret i et 40°C varmt varmeskab med tvungen ventilation for curing i mindst 72 timer (i praksis weekenden over). Efter temperering til 25°C blev alle prøver densitetsbestemt (volumetrisk) og de 3 af prøverne blev efterfølgende spaltetrækstyrketestet tørt ved 25°C, 3 andre blev placeret i vandfyldte plastposer og placeret i vandbad i 24 timer ved 25°C, hvorefter disse også blev spaltetrækstyrketestet og styrkeforholdet (ITSR) blev beregnet. De sidste 3 prøvelegemer blev opbevaret tørt for efterfølgende stivhedsmodulebestemmelse (IT-CY). Det viste sig dog nødvendigt at reducere kernehøjden til 60 mm ved

tilskæring med asfaltsav, hvilket uproblematisk kunne foretages - uden nævneværdigt materialetab og med tydelige gennemskårne sten i skærefladen! Der er bestemt stivhedsmoduler ved både 10 og 20 °C jf DS/EN12697 -26, IT-CY.



Fig. 7.10 (tv): Overskåret flade med tydeligt gennemskårne sten trods brug af asfaltsav med vand. Fig 7.11 (th): Efter afsluttet spaltetrækforsøg blev én af kernerne brækket op for at vurdere brudfladen (krævede dog en del energi og kræfter, samt hjælp af en skruetrækker!). Der ses adskillige brudte sten i fladen, hvilket indikerer høj styrke og kohæsion i materialet.

7.4.2. Supplerende laboratorieprøvning på basis af korrekt Proctor

Da de aktuelle Proctor-data efter en lille uges tid fra BSM-produktionen forelå, blev der af BSM-materialet opbevaret i lufttætte spande indstampet en ny serie på 3x3 prøvelegemer til samme prøvningsprogram som ovenfor nævnt. De nye Proctor-data viste en maksimal densitet på 1,97 g/cm³ og et vandindhold på 8,3%, hvor der i den oprindelige serie 1 var antaget en maksimal densitet på 2,04 g/cm³ og et optimalt vandindhold på 6,1%. På grund af det sene indstampningstidspunkt (6 døgn mod anbefalet <4 timer) fremstod kernerne dog visuelt ikke helt så stabile som den oprindelige serie.

7.4.3. Testdata, densitet, spaltetrækstyrke og stivhedsmodul

Efterfølgende tabel 7.1 angiver de opnåede testdata for spaltetrækstyrke og vandfølsomhed, samt for stivhedsmodul ved 10 og 20 °C.



Fig. 7.12 (tv): Spaltetrækstyrkeopstilling. Fig. 7.13 (th): Brudt kerne med næsten lineært spalte-brud fra top til bund – men stadigvæk sammenhængende!.

Serie	Anvendt Proctor reference for lab. komprim.	Lagret tid før komprim. (tid)	Densitet (g/cm ³)	Spalte-trækstyrke TØR (kPa)	Spalte-trækstyrke VÅD (kPa)	Vandfølsomhed (ITSR) (%)	Stivhedsmodul 10°C, (MPa)	Stivhedsmodul 25°C, (MPa)
1	Skønnet	4 timer	1,860	165	140	85	1390	800
2	Aktuel	6 døgn	1,781	110	95	86	-	-

Tabel 7.1: Opnåede laboratoriedata BSM-KMA fra Fuglebjerg-udlægningen. Der er udført 6-dobbelt bestemmelse af densiteterne, samt 3-dobbelt bestemmelse af spaltetrækstyrkeværdier og stivhedsmoduler. Tabellen angiver middelværdier.

Som det fremgår af ovenstående tabel er der for serie 1 (indstampet efter 4 timer fra produktion, med en lidt høj skønnet Proctor-referenceværdi) opnået en lidt højere densitet end for serie 2, som først er indstampet efter 6 døgn's opbevaring af BSM-KMA materialet i lufttætte spande. Spaltetrækstyrkeværdierne falder fra serie 1 til serie 2 med ca. 35%, men forholdet mellem våd og tør lagring, ITSR, som er et udtryk for vandfølsomheden, er praktisk taget uændret, med et imponerende højt niveau på 85-86%.

Hvad angår bæreevne og materialestivhed, så er der for serie 1 opnået et stivhedsmodul ved 20°C på ca. 800 N og ved 10°C på ca. 1400 N. Materialet udviser således ikke stivhedsmoduler helt på niveau med traditionel, varmblandet asfalt, men ligger tydeligt højere end for ubundne materialer. Det kan således konkluderes, at selvom BSM-materialet efter produktionen opbevares i lufttætte plastspande, bør man ikke vente flere døgn, før der foretages indstampning af prøvelegemer. Man bør generelt tilstræbe at overholde de anbefalede 4 timers tidsvindue for at undgå cementens begyndende indflydelse og bindingsdannelser. Denne korte tidsfrist er dog ikke optimal set ud fra et produktions-/kontrolmæssigt synspunkt, idet det betyder, at kontrolprøver fra produktionen skal hastes til nærmeste laboratorieindstamper. Emnet bør yderligere forfølges i en efterfølgende testserie.

7.4.4. Komprimeringskontrol

NCC's laboratorium har dagen efter udlægningen af BSM-laget foretaget komprimeringskontrol, dels med sandefterfyldningsmetoden, dels med Troxler isotopsonde:

- Sandefterfyldning: 98- 103 % komprimering (ved naturligt vandindhold 4%)
- Troxler isotopsonde: 101 – 103 % (samtidigt angivet 10% vandindhold, da Troxleren ikke kan skelne mellem bitumen og vand).

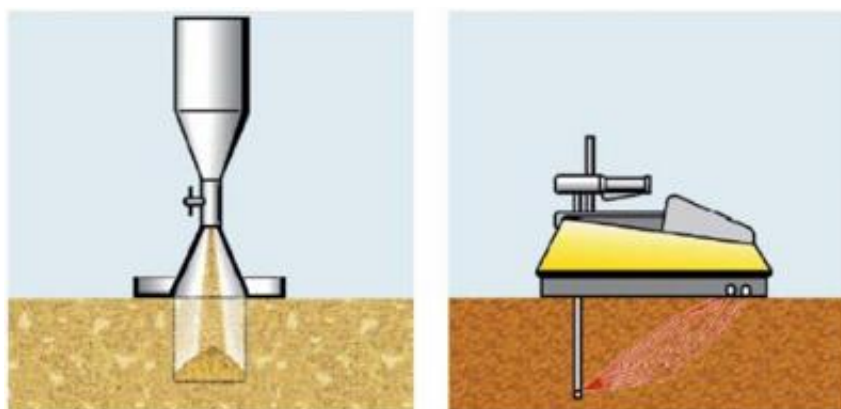


Fig. 7.13: Princip for sandefterfyldning (t.v.) og Troxler isotopmåling (t.h.)

Hvis Troxler-tallene korrigeres ved fratrækning af det "falske" vandindhold (bitumenindhold, ca. 6% i genbrugsasfalten) vil tallene stemme fint overens. Det vurderes således muligt at kunne anvende Troxler isotopmålere til komprimeringskontrol af BSM, hvilket er betydeligt hurtigere og enklere end sandefterfyldning – specielt når materialets hårdhed tages i betragtning. MEN det er en klar forudsætning, at vandindholdet ALTID bestemmes ved ovntørring!

7.5. Visuel vurdering af strækningen

Nedenstående fotos viser den visuelle udvikling i strækningens overflade over den første måneds trafikbelastning:

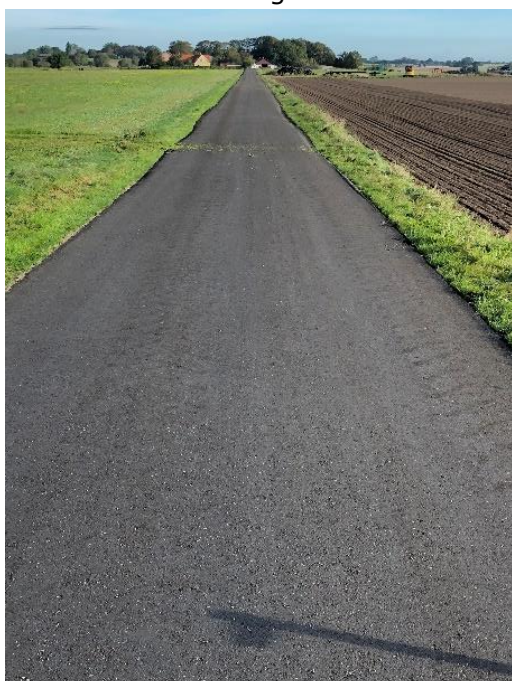


Fig. 7.14: Strækningen på Vådagervej dag 1. Fig. 7.15: Den på vejen straks forekommende trafik.



Fig. 7.16: Efter 7 dages trafik



Fig. 7.17: Efter 30 dages trafik

Som det fremgår af fig. 7.14-7.17 er BSM-belægningens overflade blevet lidt "løs i toppen" på grund af vrid fra de tunge landbrugskøretøjer, men ellers fortsat stabil og uden synlige deformationer, herunder sporkøring. Det anbefales normalt at BSM-belægninger lukkes med et asfaltlag eller som minimum en overfladebehandling, men i dette tilfælde har BSM-materialet bevidst fået lov til at ligge uafdækket for at kunne iagttage udviklingen over tid.

7.6. Bæreevнемålinger – udvikling i E-modul med faldlod

Der er på Vådagervej dagen efter udlægning udført faldlodsmålinger af Vejdirektoratet. Disse målinger er gentaget efter 7 dage og efter 30 dage.



Fig. 7.18: Princip for bæreevнемåling med faldlod, hvor en række geofoner måler nedsynkningsbassinet respons fra faldloddets nedslag.

Den målte styrkeudvikling af BSM-belægningens bæreevne er som følger:

- Dag 1: 300 – 400 MPa
- Dag 7: 400 – 600 MPa
- Dag 30: 500 – 800 MPa

Det er således sandsynligt, at der samlet set vil kunne opnås E-moduler på 800 – 1000 MPa over tid, hvilket svarer til det i litteraturen angivne. Det skal endvidere bemærkes, at målingerne er udført på "ikke-indespændt" belægning (uden afsluttende, overliggende lag af varmblandet asfalt). Det må forventes, at et indespændt BSM-lag med overliggende asfalt sandsynligvis vil opnå endnu højere E-moduler. Konservativt bør man derfor kunne anslå, at BSM skønsmæssigt vil udvise et E-modul på ca. 1.000 MPa. BSM opnår således ikke et E-modul helt på højde med traditionel, varmblandet asfalt, men ligger pænt midt imellem stabiltgrus' ca. 300 MPa og et GAB-lags 3-5.000 Mpa. Benyttes BSM som "mellemlag" vil der således opnås en mere jævn stigning i E-moduler, hvilket prioriteres i mange udenlandske dimensioneringsprincipper og programmer.

8. Det videre arbejde

På baggrund af de i efteråret 2019 gennemførte laboratorieundersøgelser af genbrugsmaterialer, bitumenskumning, mix-designs, ITSr og stivhedsmodulbestemmelser etc. samt de første indhøstede erfaringer fra fuldskala-udlægning af BSM-KMA, herunder bæreevne målinger og holdbarheds-iagttagelser kan følgende konkluderes:

- Vi kan klassificere og identificere vores råvarer til BSM
- Vi har opnået viden om skumbitumen og BSM mix-designs
- Vi skal fremadrettet benytte denne viden til at skabe et endnu bredere fundament
- På sigt er målet at udgive en vejregel for BSM

På baggrund af forsøgsrækken foreslås følgende opfølgningsskridt

A. Udvidet laboratorieprøvning (i ikke-prioriteret rækkefølge):

- Dokumentation: Generel konsolidering af viden om mix-designs og produktoptimering
- Afprøve kombinerede effekter: Lab.blandinger med højt cementindhold + højt bitumenindhold kontra lavt cementindhold + lavt bitumenindhold.
- Eventuel justering på GMA'ens kornkurve ved tilsætning af fx stenmel eller alm. kalkfiller for at øge ITS-værdier (kræver dog i fuldskala ekstra doseringsmulighed)
- Afdække BSM's bearbejdelse: Indstampninger på forskellige tidspunkter efter blanding for at evaluere den til rådighed værende tid til udlægning og komprimering. Også med hensyn til tid fra udtagning til referencekomprimering i laboratoriet. Gyratorindbygning kan også overvejes til vurdering af bearbejdelse.
- Filler: Teste hydratkalk i stedet for cement. Hydratkalk skulle jf. Sydafrikanske erfaringer give KMA'en længere bearbejdelse. Måske også bedre stabilitet? Og ikke mindst antageligvis mindre CO₂-belastning.
- Filler: Alternativ anvendelse af flyveaske (har en vis pozzolan-effekt) en mulighed?
- Afdække temperaturfølsomhed. TG2 manualen anbefaler temperaturer > 10°C, men til danske vejforhold vil en lavere arbejdstemperatur være vigtig. Der foretages lab.blandinger med BSM baseret på nedkølede genbrugsmaterialer for at simulere lavtemperatursæson. Vigtigt hvis arbejdsæsonen kan udvides.
- Lab.forsøg med funktionelle tests, herunder primært triaxialtest (som anvendt i Sydafrika og USA) på udvalgte blandinger. Kan suppleres med sporkørings- og evt. TSRST revnemodstandstest. Ikke kun enkeltstående tests, men flere gentagne tests for at se variationen/usikkerheden
- Forsøg med forskellige lab.komprimeringsmetoder og niveauer. Vibrationsindstampningen synes ikke at give høje referencedensiteter. Der bør også følges op med beregninger af reelt opnåede hulrum. Marshall-metoden er udbredt i danske asfaltlaboratorier. Det ville derfor være hensigtsmæssigt, hvis BSM-konceptet kunne baseres på denne form for referenceindstampning – også

set i lyset af, at der typisk anvendes 0/11 eller 0/16 mm knust genbrugsasfalt i Danmark, som kan håndteres i Ø 10 cm Marshall forme. På komprimeringskontROLSIDEN bør det undersøges, om det er muligt at udtage "fornuftige" borekerner fra BSM-materialet.

B. Videre dokumentation

- Udvikle og beskrive egne testmetoder/prøvningsforskrifter som basis for vejregel-opstilling af materiale-/ kontrolkrav. Bygge videre på Sydafrikanske TG2 manual men ikke nødvendigvis følge slavisk.
- Opsamling af praktiske erfaringer, usikkerhedsmomenter, faldgruber og fejlkilder – Best practice, til brug for vejledning – både om udførelse og anvendelsesmuligheder
- LCA-analyse: Dokumentation af den opnåede CO₂-besparelse ved BSM, samt forbedret massebalance (ej forbrug af danske eller importerede grus-/klippestensråvarer)
- Erfaringsopsamling fra et større antal fuldskala forsøgsstrækninger rundt om i landet. Cases kan indgå i vejledning for nye brugere og kommunale udbydere.
- Erfaringer med fuldskala KMA-strækningers holdbarhed og afdækningsbehov (ingen, forseglings, OB, asfaltslidlag, flere lag asfalt etc. – og evt. opdelt efter trafik?)
- In-situ fremstilling af BSM. Egenskaber, resultater, afgrænsninger/muligheder
- Dimensionering: Kan BSM indgå i MMOPP og i givet fald hvordan? Eller bør der udarbejdes en alternativ dimensioneringsvejledning baseret på udenlandske erfaringer?

C. Samlet mål

- Udgivelse af en vejregel for BSM med tilhørende vejledning og prøvningsmetoder samt andre relevante udbudsdokumenter.

9. BILAG 1: Skumbitumendata

Foam-bitumen testing	40/60				70/100				100/150				
	Supplier 1		Supplier 2		Supplier 1		Supplier 2		Supplier 1		Supplier 2		
Water- content [%]	Temp. [°C]	Expansion ratio [-]		Half- life [sec.]		Expansion ratio [-]		Half- life [sec.]		Expansion ratio [-]		Half- life [sec.]	
		---		---		---		---		---		---	
		6,0		61,0		6,3		16,7		11,0		19,3	
		7,0		73,7		5,7		20,3		10,3		20,0	
		7,0		50,7		---		---		---		---	
2	155	---		---		---		---		---		---	
	165	---		---		---		---		---		---	
	175	---		---		---		---		---		---	
	185	---		---		---		---		---		---	
	---	---		---		---		---		---		---	
3	Temp. [°C]	Expansion ratio [-]		Half- life [sec.]		Expansion ratio [-]		Half- life [sec.]		Expansion ratio [-]		Half- life [sec.]	
		---		---		---		---		---		---	
		12,0		8,0		11,0		7,3		16,0		9,7	
		12,7		10,0		8,0		8,3		15,7		9,3	
		10,7		10,3		---		---		---		---	
4	155	---		---		---		---		---		---	
	165	---		---		---		---		---		---	
	175	---		---		---		---		---		---	
	185	---		---		---		---		---		---	
	---	---		---		---		---		---		---	
Aggregate temperature: 10 °C - 25 °C => optimum foamant water content is determined according to Tabel 4.4. i "TG2-rapport", 2009.	Water- content [%]	Expansion ratio [-]		Half- life [sec.]		Expansion ratio [-]		Half- life [sec.]		Expansion ratio [-]		Half- life [sec.]	
		---		---		---		---		---		---	
		18,0		3,0		15,7		2,3		17,7		6,0	
		12,3		9,7		14,0		3,7		---		---	
		10,3		10,3		---		---		---		---	
Expansion ratio min. 10... and half-life min. 6 sec.													

Aggregate temperature: 10 °C - 25 °C => Expansion ratio min. 10... and half-life min. 6 sec.
Optimum foamant water content is determined according to Tabel 4.4. i "TG2-rapport", 2009.

Tabel B1.1: Resultater af bitumenskunningsforsøg (bestemmelse af ekspansionsgrad og halveringstid for skummet. Grønne felter viser data som tilfredsstiller TG2-manualens anbefalinger ved udførelses-temperaturer på 10-25°C, sv.t. typisk dansk klima i "asfaltsæsonen".

10. BILAG 2: Mix-design resultater FASE 1A

BSM MIX-design data, FASE 1 - Oversigt over resultater inkl. delresultater

GMA: 0/16 mm knust asfalt kilde nr. 4

Wopt = 5,1% Mod.Proctor densitet 1,94 g/cm³

Mix: 0,75% cement

TEKNOLOGISK
INSTITUT

Spaltetrækstyrkedata og vandfølsomhed (DS/EN 12697-23 og -12):

Emne	BL.1: Mix-design 1,9% skumbitumen (Lev.1, 70/100 m/ 2,8% vand)							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,841	1,842	1,839	1,841	1,839	1,861	1,848	1,849
D (mm)	151,8	151,7	151,9	151,8	151,8	151,9	151,5	151,7
h (mm)	94,9	95,2	95,3	95,1	95,4	94,3	85,4	91,7
P (N)	3230	3117	3343	3230	2024	2137	2439	2200
ITS (kPa)	143	137	147	142	89	95	120	101
ITSR (%)								71,2

Emne	BL.4: Mix design 2,1% skumbitumen (Lev.1, 70/100 m/ 2,8% vand)							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,836	1,836	1,828	1,833	1,830	1,842	1,841	1,838
D (mm)	95,1	95,0	95,3	95,1	95,0	95,1	95,2	95,1
h (mm)	151,9	151,9	151,8	151,9	151,7	151,7	151,6	151,7
P (N)	2537	2562	2323	2474	1935	1935	1546	1805
ITS (kPa)*	112	113	102	109	85	85	68	80
ITSR (%)**								73,1

Emne	BL.2: Mix design 2,2% skumbitumen (Lev.1, 70/100 m/ 2,8% vand) - FEJLBlanding							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,759	1,765	1,837	1,787	1,768	1,773	1,773	1,771
D (mm)	151,4	151	151,6	151,3	151,3	151,5	151,6	151,5
h (mm)	94,4	94,3	93,4	94,0	94,3	93,6	93,7	93,9
P (N)	1421	1471	2074	1655	1093	1169	1181	1148
ITS (kPa)*	63	66	93	74	49	52	53	51
ITSR (%)**								69,4

Emne	BL.5: Mix design 2,4% skumbitumen (Lev.1, 70/100 m/ 2,8% vand)							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,84	1,834	1,852	1,842	1,858	1,843	1,837	1,846
D (mm)	152,0	151,8	151,7	151,8	151,8	151,9	151,9	151,9
h (mm)	94,9	95,5	94,8	95,1	94,7	95	95,3	95,0
P (N)	2939	2876	2901	2905	2374	2362	2274	2337
ITS (kPa)*	130	126	128	128	105	104	100	103
ITSR (%)**								80,5

Emne	BL.3: Mix design 2,5% skumbitumen (Lev.1, 70/100 m/ 2,8% vand)							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,884	1,87	1,878	1,877	1,885	1,881		1,883
D (mm)	151,9	151,8	151,8	151,8	151,8	151,8		151,8
h (mm)	94,8	95,4	95,2	95,1	95	95,1		95,1
P (N)	2500	2412	2500	2471	2363	2363		2363
ITS (kPa)*	111	106	110	109	104	104		104
ITSR (%)**								95,7

*) ITS = (2*1000*P)/(h*A*D), kPa

**) ITSR = 100*ITSvdd/ITSter, %

Stivhedsmodulbestemmelse (DS/EN 12697-26, IT-CY)

Ref.indstempel:	Mix design 1,9% bitumen				Mix design 2,1% bitumen			
Prøve nr	7	8	9	GNSN	7	8	9	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,801	1,838	1,846	1,828	1,794	1,8	1,797	1,797
D (mm)	151,8	151,6	151,8	151,7	151,7	151,4	151,8	151,6
h (mm)	61,3	60,4	60,1	61	61,4	61,1	60,9	61,1
ITSM 20°C (Mpa)	570	571	703	615	543	554	604	567

Ref.indstempel:	Mix design 2,2% bitumen - FEJLBlanding				Mix design 2,4% bitumen			
Prøve nr	7	8	9	GNSN	7	8	9	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,857	1,855	1,828	1,847	1,813	1,812	1,82	1,815
D (mm)	152,0	151,8	151,8	151,9	151,5	151,8	151,8	151,7
h (mm)	59,6	59,8	60,4	59,9	61	61,2	60,8	61,0
ITSM 20°C (Mpa)	507	582	439	509	484	696	636	605

Ref.indstempel:	Mix design 2,5% bitumen			
Prøve nr	7	8	9	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,841	1,852	1,853	1,849
D (mm)	151,8	151,9	151,8	151,8
h (mm)	60,7	60,5	60,6	60,6
ITSM 20°C (Mpa)	493	615	418	509

11. BILAG 3: Mix-design resultater FASE 1B

BSM MIX-design data, FASE 1B - Marshall -Oversigt over resultater inkl. delresultater
Vibrationsindstampning kontra Marshall (2x50 slag) ved samme stuetemperaturTEKNOLOGISK
INSTITUT

GMA: 0/16 mm knust asfalt kilde nr. 4

Wopt = 5,1% Mod.Proctor densitet 1,94 g/cm³

Mix: 0,75% cement, 2,1% bitumen 70/100 fra lev. 1, 175°C, med 2,8% vand i skum

Spaltetrækstyrkedata og vandfølsomhed (DS/EN 12697-23 og -12):

Emne	BL.4: Mix design 2,1% skumbitumen (Lev.1, 70/100 m/ 2,8% vand) - VIBRATIONSINDSTAMPNING Ø150 mm							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,836	1,836	1,828	1,833	1,830	1,842	1,841	1,838
D (mm)	95,1	95,0	95,3	95,1	95,0	95,1	95,2	95,1
h (mm)	151,9	151,9	151,8	151,9	151,7	151,7	151,6	151,7
P (N)	2537	2562	2323	2474	1935	1935	1546	1805
ITS (kPa)*	112	113	102	109	85	85	68	80
ITSR (%)**								73,1

Emne	BL.4: Mix design 2,1% skumbitumen (Lev.1, 70/100 m/ 2,8% vand) - MARSHALL 2x50 SLAG Ø100 mm							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,932	1,948	1,934	1,938	1,942	1,921	1,932	1,932
D (mm)	101,4	101,1	101,2	101,2	101,2	100,1	100,7	100,7
h (mm)	59,1	58,7	59,1	59,0	58,7	60,9	59,5	59,7
P (N)	1997	1733	2022	1917	1785	1118	1495	1466
ITS (kPa)*	212	186	215	204	191	117	159	156
ITSR (%)**								76,1

*) ITS = $(2 \cdot 1000 \cdot P) / (\pi \cdot h \cdot D)$, kPa**) ITSr = $100 \cdot ITS_{våd} / ITS_{tør}$, %

Stivhedsmodulbestemmelse (DS/EN 12697-26, IT-CY)

Ref.indstamp.:	BL.4: 2,1% bitumen, Vibrationsindstampning			
Prøve nr	7	8	9	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,794	1,8	1,797	1,797
D (mm)	151,7	151,4	151,8	151,6
h (mm)	61,4	61,1	60,9	61,1
ITSM 20°C (Mpa)	543	554	604	567

Ref.indstamp.:	BL.4: 2,1% bitumen, Marshall 2x50 slag			
Prøve nr	7	8	9	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,946	1,963	1,946	1,952
D (mm)	101,5	101,2	101,0	101,2
h (mm)	58,2	58,2	58,9	58,4
ITSM 20°C (Mpa)	888	755	994	879

MARSHALL i forhold til VIBRATION:	
Densitet	105 %
ITS tør	187 %
ITS våd	195 %
ITSR	104 %
ITSM20	155 %

Konklusion:

Marshall giver for alle parametre højere værdier end vibrationsindstampning

12. BILAG 4: Mix-design resultater – FASE 2, cementvariationer

BSM MIX-design data, FASE 2, varieret cementindhold

- Oversigt over resultater inkl. delresultater

GMA: 0/16 mm knust asfalt Kilde nr. 4 Wopt = 5,1% Mod.Proctor densitet 1,94 g/cm³

Bitumenindhold: 2,1% fast Cementindhold: 0,50 - 0,75 - 1,00%



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Spaltetrækstyrkedata og vandfølsomhed (DS/EN 12697-23 og -12):

Emne	BL.6: Mix design 2,1% skumbitumen (Lev1, 70/100 m/ 2,8% vand), 0,5% cement							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,849	1,845	1,858	1,851	1,849	1,855	1,854	1,853
D (mm)	151,8	151,6	151,7	151,7	151,7	151,7	151,7	151,7
h (mm)	95	95,5	94,7	95,1	95,1	95,1	95,1	95,1
P (N)	2565	2313	2715	2531	2009	1708	1695	1804
ITS (kPa)*	113	102	120	112	89	75	75	80
ITSR (%)**								71,2

Emne	BL.4: Mix design 2,1% skumbitumen (Lev.1, 70/100 m/ 2,8% vand), 0,75% cement							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,836	1,836	1,828	1,833	1,830	1,842	1,841	1,838
D (mm)	95,1	95,0	95,3	95,1	95,0	95,1	95,2	95,1
h (mm)	151,9	151,9	151,8	151,9	151,7	151,7	151,6	151,7
P (N)	2537	2562	2323	2474	1935	1935	1546	1805
ITS (kPa)*	112	113	102	109	85	85	68	80
ITSR (%)**								73,1

Emne	BL.7: Mix design 2,1% skumbitumen (Lev. 1, 70/100 m/ 2,8% vand), 1,0% cement							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,86	1,869	1,869	1,866	1,864	1,862	1,859	1,862
D (mm)	151,9	151,6	151,7	151,7	151,6	151,9	151,8	151,8
h (mm)	95,1	94,8	95	95,0	95,2	94,9	95,3	95,1
P (N)	3217	3217	3381	3272	2311	2637	2675	2541
ITS (kPa)*	142	143	149	145	102	116	118	112
ITSR (%)**								77,5

*) $ITS = (2 \cdot 1000 \cdot P) / (\pi \cdot h \cdot D)$, kPa

**) $ITSR = 100 \cdot ITS_{våd} / ITS_{tør}$, %

Stivhedsmodulbestemmelse (DS/EN 12697-26, IT-CY)

Ref.indstamp.:	BL.6: 2,1% bit, 0,5% cement			
Prøve nr	7	8	9	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,828	1,834	1,829	1,830
D (mm)	151,8	151,5	151,6	151,6
h (mm)	60,7	60,7	60,9	61
ITSM 20°C (Mpa)	540	599	473	537

Ref.indstamp.:	BL.4: 2,1% bit, 0,75% cement			
Prøve nr	7	8	9	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,794	1,8	1,797	1,797
D (mm)	151,7	151,4	151,8	151,6
h (mm)	61,4	61,1	60,9	61,1
ITSM 20°C (Mpa)	543	554	604	567

Ref.indstamp.:	BL.7: 2,1% bit, 1,0% cement			
Prøve nr	7	8	9	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,833	1,833	1,815	1,827
D (mm)	151,9	151,8	151,7	151,8
h (mm)	60,7	60,7	61,4	60,9
ITSM 20°C (Mpa)	850	744	860	818

13. BILAG 5: Mix-design resultater – FASE 3, Bitumentypevariationer

BSM MIX-design data, FASE 3, Forskellige bitumentyper/leverandører - Oversigt over resultater inkl. delresultater

TEKNOLOGISK
INSTITUT

GMA: 0/16 mm knust asfalt kilde nr. 4 Wopt = 5,1% Mod.Proctor densitet 1,94 g/cm³
Bitumenindhold: 2,1% fast Cementindhold: 1,0%

Spaltetrækstyrkedata og vandfølsomhed (DS/EN 12697-23 og -12):

Emne	BL.7: Mix design 2,1% skumbitumen (Lev. 1, 70/100 m/ 2,8% vand), 1,0% cement							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,86	1,869	1,869	1,866	1,864	1,862	1,859	1,862
D (mm)	151,9	151,6	151,7	151,7	151,6	151,9	151,8	151,8
h (mm)	95,1	94,8	95	95,0	95,2	94,9	95,3	95,1
P (N)	3217	3217	3381	3272	2311	2637	2675	2541
ITS (kPa)*	142	143	149	145	102	116	118	112
ITSR (%)**								77,5

Emne	BL.8: Mix design 2,1% skumbitumen (Lev. 2, 70/100 m/ 2,8% vand), 1,0% cement							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,843	1,842	1,852	1,846	1,851	1,845	1,860	1,852
D (mm)	152,1	152	152	152,0	152	151,7	151,8	151,8
h (mm)	95,2	95,4	94,9	95,2	94,8	95,6	95	95,1
P (N)	3266	3216	2299	3241	2637	2637	2587	2620
ITS (kPa)*	144	141	101	142	117	116	114	115
ITSR (%)**								81,1

Emne	BL.9: Mix design 2,1% skumbitumen (Lev. 1, 40/60 m/ 2,8% vand), 1,0% cement							
Konditionering	TØR				VÅD			
Prøve nr	1	2	3	GNSN	4	5	6	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,823	1,844	1,843	1,837	1,856	1,844	1,855	1,852
D (mm)	151,8	151,8	151,9	151,8	151,9	151,6	151,8	151,8
h (mm)	94,6	95,4	94,9	95,0	94,6	95,3	95,2	95,0
P (N)	2788	3127	3240	3052	2575	2386	2776	2579
ITS (kPa)*	124	137	143	135	114	105	122	114
ITSR (%)**								84,5

*) ITS = $(2 \cdot 1000 \cdot P) / (\pi \cdot h \cdot D)$, kPa

**) ITSR = $100 \cdot \text{ITSvåd} / \text{ITSør}$, %

Stivhedsmodulbestemmelse (DS/EN 12697-26, IT-CV)

Ref.indstamp.:	Bl.7: 2,1% bit, Lev 1, 70/100			
Prøve nr	7	8	9	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,833	1,833	1,815	1,827
D (mm)	151,9	151,8	151,7	151,8
h (mm)	60,7	60,7	61,4	60,9
ITSM 20°C (Mpa)	850	744	860	818

Ref.indstamp.:	Bl.8: 2,1% bit, Lev 2, 70/100			
Prøve nr	7	8	9	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,819	1,817	1,823	1,820
D (mm)	151,7	151,8	151,9	151,8
h (mm)	61,2	60,9	60,9	61,0
ITSM 20°C (Mpa)	793	937	851	860

Ref.indstamp.:	Bl.9: 2,1% bit, Lev 1, 40/60			
Prøve nr	7	8	9	GNSN
Densitet (g/cm³)	1,818	1,823	1,835	1,825
D (mm)	151,6	151,6	151,7	151,6
h (mm)	61,2	61,2	60,7	61,0
ITSM 20°C (Mpa)	764	796	900	820