

UTVÄRDERING AV VOLYMBASERAD PROPORTIONERING AV SLAGGASFALT

Tove Kristensen & Anders Gudmarsson

2018-11-06

FÖRORD

Detta projekt har bedrivits i samarbete mellan Peab Asfalt AB och VTI. Jernkontoret och Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond har bidragit med den huvudsakliga finansieringen av detta projekt.

Nedanstående arbetsgrupp genomförde det huvudsakliga praktiska arbetet:

Anders Gudmarsson (projektledare)	Peab Asfalt AB
Tove Kristensen	Peab Asfalt AB
Andreas Waldermarsson	VTI
Abubeker Ahmed	VTI

Projektet har drivits framåt med värdefull styrning- och ledning från följande referensgrupp (inklusive ovanstående arbetsgrupp):

Robert Eriksson	Jernkontoret
Lotta Lind	Sweco
Gunnar Ruist	Outokumpu
Kjell Pålsson	Ovako Hofors
Torbjörn Sörhuus	Ovako Smedjebacken
Jeanette Stemne	Merox
Anita Wedholm	Merox
Olle Sundqvist	Sandvik MT
Björn Haase	Höganäs
Annelie Papadopoulos	Vargön
Kenneth Lind	Trafikverket
Henrik Sjöholm	Skanska
Leif Viman	VTI
Roger Lundberg	NCC
Daniel Gustafsson	NCC
Lars Jansson	Peab Asfalt AB

Ett stort tack till samtliga inblandade för värdefull vägledning, kunskap, och engagemang samt för möjliggörandet av detta projekt.

Tove Kristensen

Stockholm, November 2018

SAMMANFATTNING

Tillvaratagandet av biprodukter från tillverkningsprocesser med syfte att vidareanvända dessa i andra applikationer bidrar till resurseffektivitet. Ett maximalt nyttjande av jordens resurser genom hela dess livscykel främjar ett miljömässigt hållbart samhälle.

Slagg, som är en biprodukt vid ståltillverkning, har ur ett vägkonstruktionsmässigt perspektiv goda egenskaper. Slagg är slittåligt och har en god bärighet samt bindande förmåga. Inom tidigare projekt har det påvisats att slagg som alternativt ballastmaterial i bitumenbundna beläggningar har stor potential. Däremot har det även visats ett behov av att optimera proportionering av slaggbaserade asfaltmassor då dessa generellt har höga hålrumshalter jämfört med konventionell massa (ABb 16).

Syftet med detta projekt var att undersöka om en proportioneringsmetodik där ingående materials densitetskillnader tas i beaktande i kombination med att bitumenhalten baseras på volymprocent är mer fördelaktigt för slaggasfaltmassor. Förhoppningen var att kunna öka packbarheten samt förbättra deformationsmotståndet för slaggasfaltmassor.

Inom ramarna för projektet undersöktes fyra slaggtyper från fyra olika producenter. Förhållandet mellan definierade fina och grova fraktioner optimerades, utifrån vilka kornkurvor proportionerades. För utvärdering av proportioneringsmetodiken gjordes även slaggasfaltmassor proportionerade utifrån en kornkurva avsedd för en konventionell AG-massa. En konventionell AG-massa baserad på stenballast utvärderades också med syfte att vara referens i jämförelse med slaggasfaltmassorna.

De olika massornas packbarhet, kohesion, viskoelastiska egenskaper, deformationsstabilitet samt dess skjuvhållfasthet utvärderades genom hålrumsanalys, cantabro test, modalanalys, dynamiskt kryp- och skjuvningstest.

Den optimerade proportioneringsmetodiken resulterade i att hålrumshalterna reducerades för samtliga slaggasfaltmassorna jämfört med de konventionellt proportionerade slaggasfaltmassorna. Hålrumshalterna var för samtliga optimerade massor under högsta tillåtna värde enligt Trafikverkens krav för en AG-massa, till skillnad från de konventionella slaggmassorna. I korrelation med hålrumshalten var kohesionen för de optimerade slaggmassorna bättre jämfört med de konventionella slaggmassorna. De viskoelastiska egenskaperna samt skjuvningsmotståndet indikerade på en förbättring för de optimerade slaggmassorna jämfört med de konventionella massorna.

Resultaten för de optimerade slaggmassorna med avseende på hålrumshalt och kohesion är i nivå med den konventionella AG-massan baserad på stenballast. Det är däremot utmärkande att dessa resultat uppnås med betydligt mindre tillsatt mängd bitumen. Detta är i sig en vinst ur både ett ekonomiskt och miljömässigt perspektiv.

INNEHÅLL

1 INLEDNING	4
2 BAKGRUND	4
3 SYFTE OCH MÅL	5
4 AVGRÄNSNINGAR	5
5 METODIK	5
5.1 VOLYMBASERAD PROPORTIONERINGSMETODIK	6
5.1.1 <i>Volymbaserad proportionering av kornkurvor</i>	6
5.1.2 <i>Proportionering av bitumen</i>	10
5.2 TILLVERKNING AV MASSOR	10
5.2.1 <i>Blandning av asfaltmassor</i>	10
5.2.2 <i>Gyratorisk packning</i>	10
5.3 LABORATORIEPROVNING	10
5.3.1 <i>Hålrum och packningsgrad</i>	11
5.3.2 <i>Cantabro</i>	11
5.3.3 <i>Modalanalys</i>	11
5.3.4 <i>Skjuvtest</i>	12
5.3.5 <i>Dynamiskt kryptest</i>	12
6 RESULTAT OCH DISKUSSION	13
6.1. KORNKURVOR	13
6.2 PROPORTIONERING AV BITUMENHALT	17
6.3 HÅLRUM OCH PACKNINGSGRAD	18
6.4 CANTABRO	19
6.5 MODALANALYS OCH SKJUVTEST	19
6.5.1 <i>EAF C</i>	20
6.5.2 <i>BOS</i>	21
6.5.3 <i>Ferrokrom</i>	23
6.6 DYNAMISKT KRYPTEST	24
7 SLUTSATS	25
8 FRAMTIDA ARBETE	25
REFERENSER	26

1 INLEDNING

Ett miljömedvetet nyttjande av jordens resurser krävs för att skapa en hållbar utveckling av samhällets levnadssätt. Detta innebär att använda och tillvarata biprodukter från olika tillverkningsprocesser så att råvaror nyttjas maximalt genom hela dess livscykel. Att använda stålslagg som alternativt ballastmaterial i bitumenbundna beläggningar är därför av mycket stort intresse. Återanvändandet av råvaror är i linje med de globala och nationella miljömål som finns för att minska miljöpåverkan och främja ett hållbart samhälle [1].

Slagg har i användning som ballast i asfaltmassor ofta bidragit till mycket goda beläggningsegenskaper i form av beständighet och deformationsstabilitet. Detta trots hålrumshalter som kan vara högre än konventionella beläggningssmassor och i vissa fall utanför kraven i gällande regelverk. Då nyttjandet av slagg hittills har byggt på samma proportionering som de typiska konventionella beläggningssmassorna finns troligtvis en stor potential att förbättra sammansättningen av slaggasfaltmassor. En optimerad proportionering av slaggasfalt som leder till lägre hålrumshalter och bättre beständighet kan således bidra till en ökad användning av slagg i beläggningar.

2 BAKGRUND

Slagg är en biprodukt från stålindustrin. Det är en kvalitetshöjande och egenskapsstyrande aktiv komponent inom de metallurgiska processerna. Beroende på bland annat stål- och järntillverkningsprocess, råvaror och efterföljande hantering, kylning och metallutvinning får man olika typer av slagg där funktion, sammansättning och mängd påverkas. Den totala mängden producerad slagg i Sverige, från både järn- och stålverk, uppgick till mellan 1 – 1,5 miljoner ton år 2010. Av denna mängd producerad slagg återanvänds drygt 80 procent till olika interna och externa ändamål, varav knappt en fjärdedel används till vägbyggnation som både bundna och obundna lager. [2]

Slagg har ur ett vägkonstruktionsperspektiv goda egenskaper vad gäller slitstyrka, bärighet och bindande förmåga. Detta tillsammans med slaggens högre friktion, bullerreducerande effekt samt basiska egenskaper (förhöjd vidhäftning till bitumen) i jämförelse med bergmaterial gör att slagg har en mycket god potential att ersätta eller komplettera stenmaterial i konventionell asfalt. [2]

Inom ramen av Vinnovaprojektet, Slagphalt 55016 (Viman, 2015), belystes olika slaggtypers potential som alternativt ballastmaterial i bitumenbundna beläggningar. Resultaten visade på att slaggens ballastegenskaper är i nivå med mycket bra bergmaterial och att dess nötningsresistens enligt prallmetoden är mycket god. [3] Efterföljande undersökningar inom samma Vinnova-projekt (Viman och Said, 2015), med inriktning på bitumenbundna bindlagers stabilitet- och skjuvegenskaper, visade på att slagg som alternativt ballastmaterial i asfalt förbättrar dessa egenskaper och att det därmed lämpar sig mycket väl för särskilt utsatta ytor. Inom nämnt projekt påvisades det däremot, genom relativt höga hålrum, ett behov av en optimerad proportionering av slaggasfaltmassor. Massorna proportionerades enligt kornkurvor för en konventionell asfaltmassa (ABb 16). Bindemedelshalten i viktprocent justerades med hänseende till ballastmaterialets totala densitet i enlighet med Trafikverkets kalkylvärde. Dessutom togs hänsyn till slaggens högre porositet genom att anta en bindemedelskompensation baserad på vattenabsorption. Denna proportionering resulterade i något reducerad packbarhet och högre hålrumshalter i jämförelse mot den konventionella asfaltmassan. [4]

I dessa tidigare försök har slagg utgjort den grövre delen av ballasten och kompletterats med en finandel från stenmaterial för att uppnå önskad kornkurva. Relativt stora skillnader i densitet mellan sten- och slaggfraktionerna försvårar dock en korrekt proportionering med avseende på

bindemedelshalt och kornkurva. Även den högre porositeten i slagg, i jämförelse mot stenmaterial, påverkar proportionering av bindemedelshalten.

Då asfalt till ca 95% består utav ballastmaterial är det viktigt att kontrollera och förstå packningsegenskaperna av det bärande skelettet. Kornstorleksfördelning, form och ytstruktur av ballasten är parametrar som har avgörande inverkan på interaktionerna och den indirekta styrkan på ballastnätverket. Eftersom dessa parametrar skiljer sig avsevärt mellan slagg och stenmaterial bör proportioneringsmetoder som beaktar unika ballastegenskaper utvärderas.

Volymbaserad proportionering som bygger på att utvärdera packningen av respektive fraktion och optimera sammansättningen av dessa för ökad lastbärande förmåga har visat sig fungera mycket väl för stenmaterial [5]. Det finns en stor potential i att denna proportioneringsmetod även kan bidra till en förbättrad sammansättning för slagg som leder till lägre hålrumshalt och bättre packningsgrad. I detta projekt jämförs slaggasfalt som proportionerats enligt den volymbaserade metodiken mot vanlig asfaltmassa med stenmaterial samt mot konventionell proportionerad slaggasfalt.

Genom en förbättrad proportioneringsmetodik för slaggasfaltmassor kan användandet av denna biprodukt bli mer attraktivt och slagkraftigt i jämförelse med konventionellt stenmaterial och därmed bidra i arbetet mot ett miljömässigt hållbart samhälle.

3 SYFTE OCH MÅL

Syftet med detta projekt är att utvärdera om egenskaperna i slaggasfalt kan förbättras genom volymbaserad proportionering där andelen av respektive fraktion optimeras utifrån parametrar såsom densitet, kornform och ytstruktur. Volymbaserad optimerad slaggasfalt förväntas bidra till bättre packningsbarhet, lägre hålrumshalt och ökat deformationsmotstånd.

Det övergripande målet är att bidra till ett ökat användande av slagg i vägkonstruktioner. Detta kan leda till förbättrad beläggningskvalitet och komplettera dagens användande av stenmaterial, vilket bidrar positivt till en hållbar samhällsutveckling.

4 AVGRÄNSNINGAR

Detta projekt avgränsades till att huvudsakligen undersöka och jämföra om en proportioneringsmetodik som bland annat tar hänsyn till densitetskillnader mellan de ingående materialen är mer fördelaktigt än konventionella proportioneringsmetoder för slaggasfalt. Samma jämförelse har dock i projektet inte utförts på asfaltmassa med stenmaterial eftersom detta har påvisats i ett flertal studier [5], [6]. En konventionellt proportionerad asfaltmassa med sten som ballast inkluderades däremot som referens med avsikt att kunna undersöka effekten av slagg i massan och dess inverkan på packningsbarhet och deformationsmotstånd.

5 METODIK

Detta projekt genomfördes huvudsakligen i tre delmoment, där det första momentet bestod i att utvärdera lämplig volymbaserad proportioneringsteknik och att proportionera kornkurvor för respektive produkt enligt vald metodik. Det andra delmomentet bestod i att tillverka asfaltmassor och provkroppar. Det sista momentet bestod i att utvärdera effekten av vald optimeringsmetodik genom att utföra laboratorieanalyser på de framtagna asfaltmassorna samt undersöka och jämföra de tillverkade provkropparnas egenskaper. Proportionering, tillverkning och provning har utförts i samarbete mellan Peab Asfalt och VTI.

För att minska antalet varianter i projektet valdes ett antal typslaggar ut som ansågs representera samtliga deltagande företags slaggar. Initialt identifierades sex stycken slaggtypen som aktuella för studien. Två av dessa utgick då de inte ansågs som lämpliga i tillverkning av asfalt. Inom ramarna för detta projekt utvärderades följande slaggtypen:

- BOS (Basic oxygen furnace slag), SSAB Merox AB, Oxelösund
- EAF S (Electric arc furnace slag, stainless steel), Outokumpu Stainless AB, Avesta
- EAF C (Electric arc furnace slag, carbon steel), Ovako Bar AB, Smedjebacken
- Ferrokrom, Vargön Alloys AB, Vargön

Samtliga slaggtypen användes för att tillverka konventionella AG asfaltmassor samt nya optimerade asfaltmassor. AG-massorna med sten och slagg proportionerades i enlighet med TRVKB 10 Bitumenbundna lager [7] utifrån recept framtagna av Peab Asfalt AB.

Följande huvudsakliga beläggningstypen jämfördes i detta projekt:

- AG 16 70/100 med sten från Gladö Kvarn Bergtäkt (Swerock).
- AG 16 70/100 med respektive slaggtyp
- Optimerad massa 70/100 med respektive slaggtyp

5.1 Volymbaserad proportioneringsmetodik

Den proportioneringsteknik som utvärderades som mest lämplig för detta projekt baseras på en metodik som ursprungligen utvecklats för att ta fram högpresterande betong och som tillämpats framgångsrikt på asfaltmassor med sten som ballast. [5]

5.1.1 Volymbaserad proportionering av kornkurvor

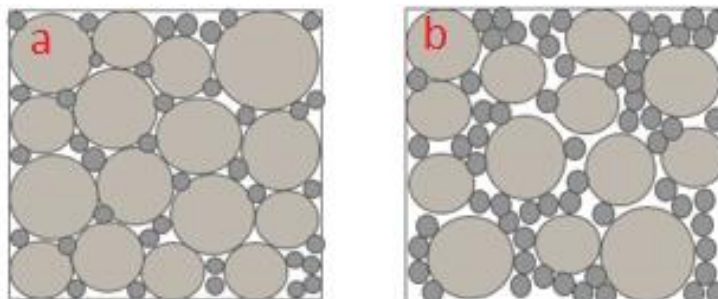
Metodiken bygger på att optimera kornstorleksfördelningen så att samtliga fraktioner bidrar till att den grövre fraktionens fördelaktiga lastbärande egenskaper utnyttjas maximalt. Detta utförs genom att utvärdera hålrumsindex av ingående fraktioner med hjälp av gyrotorisk packningsutrustning (se Figur 1) där ballasten packas i torrt tillstånd.



Figur 1. Gyrotorisk packningsutrustning med tillhörande packningsform.

Hålrumsindex definieras som volym av hålrum dividerat med volym av ballast. Genom att metoden är baserad på volym tas variationer i densitet mellan respektive fraktion i beaktande. Detta är av stor fördel i proportionering av slaggasfaltmassor där densiteten kan variera markant mellan olika

fraktioner. Principen i metodiken är att fördela en definierad fin och grov fraktion så att de tillsammans med mellanliggande fraktion samverkar för att optimera ballastens lastbärande förmåga. En optimal fördelning innebär att den fina och mellanliggande fraktionen fördelar sig i det grövre lastbärande skelettet och bidrar till ett bärande starkt interaktivt ballastskelett. En upplösande effekt och reducerad bärighet av skelettet riskeras om en för stor del finfraktion används, se schematisk förklaring i Figur 2.



Figur 2. Schematisk bild av ett interaktivt ballastskelett med optimerad fördelning av fin och grov fraktion (a) respektive ett ballastskelett med upplösande effekt på grund av för stor andel fin fraktion (b).

För att bibehålla en fördelning utan upplösande effekt rekommenderas de respektive fraktionernas faktiska medeldiameter förhålla sig till 20 % av den övre definierade fraktionens medeldiameter, d , enligt ekvation [1] och [2] nedan:

$$0.20 * d_{\text{grov}} \geq d_{\text{mellanliggande}} \quad [1]$$

$$0.20 * d_{\text{mellanliggande}} \geq d_{\text{fin}} \quad [2]$$

Den optimala fördelningen av massans ingående fraktioner bestäms systematiskt genom att stegvis upprepa den gyratoriska packningen för två definierade fraktioner. I varje steg packas en definierad fin och grov fraktion enligt en volymandel av grova fraktionen på 100 %, 40 % och 0 % (se Tabell 1). Antalet steg är beroende av antalet fraktioner enligt $n-1$, varav n är antalet fraktioner. Sista steget som utförs är då den fina fraktionen utgörs av filler. Ett exempel för fyra definierade fraktioner och tre steg visas nedan där packningen utförs enligt Tabell 1 i samtliga steg:

Steg 1: Bestämning av optimal fördelning mellan grov (11/16) och fin (0/4) fraktion

Steg 2: Bestämning av optimal fördelning mellan förgående optimerad blandning (11/16 och 0/4) och nästföljande finare fraktion (0/2)

Steg n-1: Bestämning av optimal fördelning mellan förgående optimerad blandning (11/16, 0/4 och 0/2) och den finaste fraktionen (filler)

Tabell 1. Matris av packningar som utförs i varje steg

Packning	Volymprocent [%]	
	Fin fraktion	Grov fraktion
1	0	100
2	60	40
3	100	0

Notera att varje blandning definieras av att endast innehålla en "grov" respektive en "fin" fraktion. Detta innebär t.ex. att den definierade "grova" fraktionen i enlighet med steg 2 innehåller den

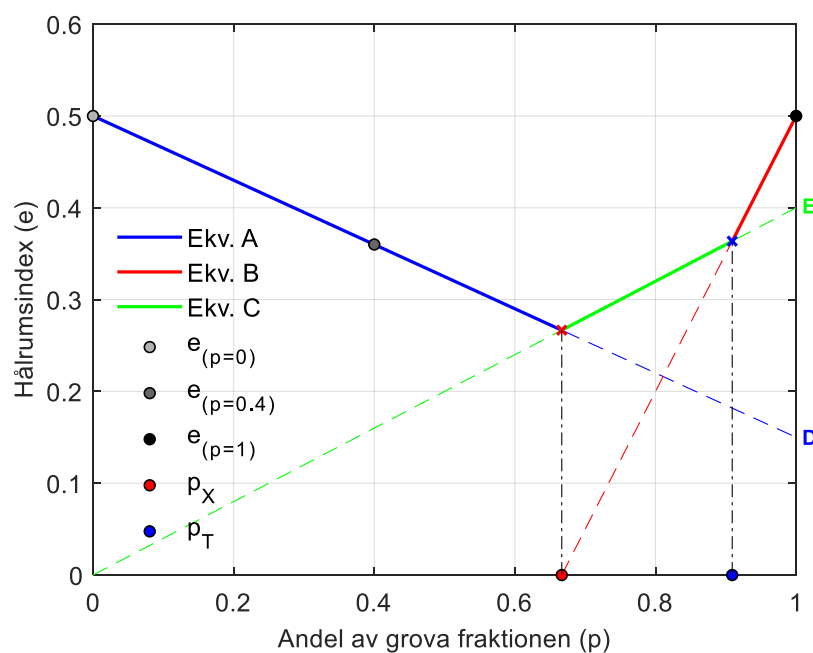
optimerade fördelningen mellan de två fraktionerna (11/16 och 0/4) som utvärderats genom gyrotorisk packning i steg 1.

Utifrån densiteten av respektive fraktion och den resulterande höjden av det obundna materialet efter den gyrotoriska packningen bestäms hålrumsindex, e , för den specifika blandningen (se ekvation [3]). Volymen för hålrum respektive ballast kan beräknas då massan av det obundna materialet samt packningsformens volym är kända.

$$e = \frac{\text{volym hålrum}}{\text{volym ballast}} \quad [3]$$

där, e – hålrumsindex

Utifrån hålrumsindex, e , för samtliga blandningar beräknas ekvation [4]-[6] för att bestämma p_X och p_T som är gränsvärden för maximal andel grov fraktion utan att negativt påverka de fina fraktionernas strukturella nätverk, respektive maximal andel fin fraktion utan att negativt påverka det grövre lastbärande skelettet. Resultande hålrumsindex för respektive andel grov fraktion, ekvation [4]-[6] (A–C) samt bestämning av gränsvärdena p_X och p_T visas schematiskt i Figur 3.



Figur 3. Schematisk bild av hålrumsindex som funktion av andel grov fraktion

Ekvationerna för hålrumsindex, e , är linjärt beroende av andel grov fraktion, p , i ballastblandningen. Däremot är det linjära sambandet olika definierat beroende på fördelningen av fin och grov fraktion. Sambanden är definierade enligt nedan:

Inom intervall $p \leq p_X$ (hög andel finfraktion) gäller Ekv. A i Figur 3 enligt:

$$e = e_{(p=0)} * (1 - p) + D * p \quad [4]$$

Inom intervall $p_T \leq p$ (hög andel grovfraktion) gäller Ekv. B i Figur 3 enligt:

$$e = p * (e_{(p=1)} + 1) - 1 \quad [5]$$

Inom intervall $p_X \leq p \leq p_T$ gäller Ekv. C i Figur 3 enligt:

$$e = E * p \quad [6]$$

där, p_X – gränsvärde, max andel av största fraktion som kan kombineras med findelen

p_T – gränsvärde, max finandel som kan kombineras med grova fraktionen

D – koefficient som bestäms från packning vid $p = 0 \%$ och 40%

E – koefficient som bestäms utifrån ekvation 4 och 6

Koefficienten D kan beräknas då hålrumsindex, e , är bestämt via packning av två olika andelar av grov fraktion enligt $p = 0 \%$ och 40% (se ekvation [7]).

$$D = \frac{e_{(p=0.4)} - e_{(p=0)} * (1 - 0.40)}{0.40} \quad [7]$$

Värdet på p_X bestäms efter packning av 100% grov fraktion och ekvation [5] som ger $p = p_X$ när hålrumsindex, $e = 0$.

$$p_X = \frac{1}{e_{(p=1)} + 1} \quad [8]$$

Koefficienten E beräknas utifrån ekvation [4] och [6] då $p = p_X$ (se ekvation [9])

$$E = \frac{e_{(p=0)} * (1 - p_X) + D * p_X}{p_X} \quad [9]$$

Gränsvärdet p_T bestäms via ekvation [5] och [6] och $p = p_T$ (se ekvation [10])

$$p_T = \frac{1}{e_{(p=1)} + 1 - E} \quad [10]$$

Då detta projekt avsåg massasorter med grövsta fraktion 11-16 användes även fraktionerna 0-4 och 0-2 samt filler för att uppfylla rekommendationerna enligt ekvation [1] och [2]. Tabell 2 presenterar den stegvisa packnings- och optimeringsprocessen som utfördes för respektive slaggtyp. Den gyratoriska packningen utfördes enligt inställningarna som presenteras i Tabell 3.

Tabell 2. Fraktionerna definierade som fin respektive grov fraktion med avseende på steg i optimeringsprocessen.

Steg	Grov fraktion	Fin fraktion
1	11-16	0-4
2	11-16 + 0-4	0-2
3	11-16 + 0-4 + 0-2	Filler

Tabell 3. Inställningar för gyratorisk packning av det obundna ballastmaterialet i optimeringsprocessen.

Diameter av form:	150 mm
Antal gyrationer:	20 st
Packningsvinkel:	1.5 °
Tryck:	0.6 MPa

5.1.2 Proportionering av bitumen

Proportioneringen av bitumenhalt för slaggmassorna baserades på volymprocent istället för den konventionella proportioneringsmetoden som baserar på viktprocent. Genom att proportionera med volymprocent kunde de olika ingående materialens densitetsskillnader tas i beaktande. Justering av halten togs även på individuell basis gällande skillnader i porositet av ingående material och dess kornkurva. Slagg från de olika leverantörerna har vid tidigare undersökningar visat att justering av bindemedelshalt bör göras på grund av variationer av porositet och indirekt absorption av bitumen [4]. Däremot innebar vald proportioneringsmetodik av kornkurvorna för de olika slaggmassorna att fraktioner som annars absorberar mycket bitumen saknas, vilket i sig ansågs kunna motverka behovet av justering med hänsyn till porositet. På grund av detta korrigerades inte bindemedelshalten med avseende på porositet för de optimerade asfaltmassorna. Slaggmassorna som utgick från en konventionell AG-kornkurva justerades däremot mot porositet utefter tidigare undersökning. I samtliga fall utfördes även en visuell bedömning av behov av bitumenhalt vid blandning.

5.2 Tillverkning av massor

För att minimera risk för eventuell påverkan på resultaten från faktorer som skillnader i porositet i stenmaterial och absorption av bitumen, utfördes tillverkningen med ett flöde som ansågs ha störst potential för ett konsekvent genomförande. Samtliga massor blandades, delades ner samt svalnade innan de värmdes upp och packades med gyrotorisk packningsutrustning. Parametrar som temperatur på material samt tid i värmeskåp kunde därmed lättare hanteras och skillnader i behandling av material och massor kunde undvikas. Samtliga massor blandades och packades på VTI.

5.2.1 Blandning av asfaltmassor

Ballastmaterial fraktionerades och vägdes upp enligt proportioneringsrecept framtaget och beräknat för 50 kg asfalt för respektive massasort. Ballastmaterialet värmdes upp till en konstant temperatur på ca 160 °C. Uppvärmtd 70/100 bitumen vägdes upp, samt hölls ner under pågående blandning av det varma stenmaterialet. Temperaturen av bitumen kontrollerades och uppgick till en temperatur på omkring 155 °C vid blandningstart.

5.2.2 Gyrotorisk packning

Packning av provkroppar, 150 mm i diameter, gjordes gyrotoriskt enligt inställningarna som visas i Tabell 4. Varje massasort delades ner och låts svalna innan de återigen värmdes upp till en packningstemperatur på ca 150 °C. Mängden asfaltmassa för varje provkropp baserades utefter en eftersträvd provkroppstjocklek på 80 mm.

Tabell 4. Visar de inställningar som användes när de olika bitumenbundna massasorterna packades gyrotoriskt.

Diameter av form:	150 mm
Antal gyrotationer:	30 st
Vinkel:	1,5 °
Tryck:	0,6 MPa

5.3 Laboratorieprovning

Bindemedelshalt och kornkurva analyserades inför vidare provning för att säkerhetsställa och verifiera att massablandningarna uppnådde önskat resultat. Bindemedelshalt samt kornkurva för respektive massa togs fram i enlighet med SS-EN 12697-1/SS-EN 12697-2 [8], [9].

Utvärderingen av den valda optimeringsmetodiken bestod i att analysera provkropparnas packningsbarhet, kohesion, viskoelastiska egenskaper, deformationsstabilitet samt skjuvhållfasthet. Dessa egenskaper utvärderas genom nedanstående analyser.

- Hålrums och packningsgrad
- Cantabro
- Modalanalys
- Dynamiskt kryptest
- Skjuvtest

De gyratoriskt packade provkropparna härdades en månad innan provningen påbörjades. Avsikten med detta var att försöka möjliggöra en så pass representativ jämförelse, mellan de olika massatyperna, som möjligt. Syftet var att tillåta en eventuell korttidsåldring av provkropparna och därmed minimera risken för påverkan av denna parameter på resultaten då samma undersökningstidpunkt hade varit svår att garantera.

5.3.1 Hålrums och packningsgrad

Proportioneringsmetodikens effekt på massornas packningsbarhet undersöktes genom att tillverka Marshallinstampade provkroppar samt utvärdera dess hålrums för respektive massasort.

Instampningen av provkropparna gjordes i enlighet med Marshallmetoden, SS-EN 12697-30 [10], men för att kompensera för slaggens högre densitet i förhållande till konventionell ballast användes 1300 g för respektive slaggmassa istället för 1200 g som annars är standard. För den konventionella referens AG-massan användes 1200 g.

Hålrums för respektive massasort bestämdes genom att analysera kompakt- och skrymdensitet, vilket gjordes i enlighet med metod SS-EN 12697-5 respektive SS-EN 12697-6B [11], [12]. Även skrymdensiteten för de gyratoriskt tillverkade provkropparna bestämdes, varav packningsgraden kunde utvärderas.

5.3.2 Cantabro

För att undersöka kohesionen av de olika massasorterna genomfördes Cantabro-test. Två Marshallinstampade provkroppar (se stycket ”5.3.1 Hålrums och packningsgrad”) för respektive massasort testades, varav ett medel av den procentuella viktförlusten kunde beräknas. Varje enskild provkropp lades ner i en Los Angeles trumma (se Figur 4) som låts rotera 300±1 varv [13]. Respektive provkropp vägdes innan och efter testet för att bestämma viktförlusten.



Figur 4. Los Angeles trumma.

5.3.3 Modalanalys

De olika massasorterna undersöktes med Modalanalys för att analysera de viskoelastiska egenskaperna med avseende på dess temperatur- och frekvensberoende [14]. Genom att undersöka de

olika materialens komplexa modul vid olika temperaturer kan en masterkurva tas fram som beskriver de viskoelastiska egenskaperna över ett brett temperatur- och frekvensintervall.

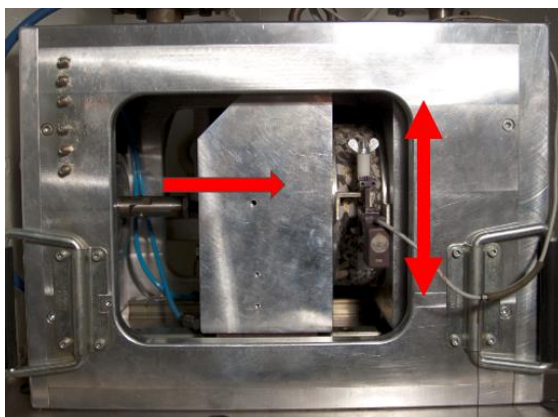
Metoden innebär att en provkropp exciteras genom en transient belastning via en hammare och att resulterande vibrationer mäts med hjälp av en accelerometer (se Figur 5). Provkroppens resonansfrekvenser och frekvensresponsens amplitud ger den komplexa styvheten eftersom detta beror på styvhet, massa, geometri och randvillkor. Tre provkroppar av respektive asfaltmassa undersöktes vid fyra olika temperaturer; -20°C , 0°C , 15°C och 35°C . Samtliga provkroppar tempererades i fem timmar innan varje analys.



Figur 5. Modalanalys.

5.3.4 Skjuvtest

De olika massasorternas komplexa skjuvmodul bestämdes enligt VTI:s utvecklade skjuvtest [15]. Provkroppar utsätts för en statisk kraft i riktningen av provkroppens tjocklek samtidigt som en dynamisk kraft belastar provkroppen i diameterns riktning (se Figur 6). Provkroppens komplexa skjuvmodul bestäms som funktion av frekvens och temperatur genom att utföra provningen vid flera frekvenser och temperaturer. Provningsen utfördes vid -5 , 10 , 30 och 50°C mellan 0.01 till 16 Hz.



Figur 6. Utrustning och uppställning för skjuvtest.

5.3.5 Dynamiskt kryptest

Inverkan av den optimerade proportioneringsmetodikerna på deformationsstabilitet undersöktes med hjälp av pulserande kryptest. Testet innebär att provkroppen utsätts för en dynamiskt pulserande kraft om 3600 cykler samtidigt som deformation uttryckt i microstrain [-] avläses. Tre provkroppar tillverkade från respektive massa analyserades. Utförandet gjordes i enlighet med SS-EN 12697-25 och Figur 7 visar mätuppställningen [16].



Figur 7. Mätuppställning för pulserande krypytest

6 RESULTAT OCH DISKUSSION

Nedan presenteras och diskuteras resultat för genomförda proportioneringar samt laboratorieprovningar.

6.1. Kornkurvor

Baserat på de optimerade procentuella volymfördelningarna av de ingående fraktionerna 11-16, 0-4, 0-2 och filler samt resultaten från kornstorleksfördelningarna av använt sten- och slaggmaterial kunde tio olika proportionerade kornkurvor tas fram. Den gyratoriska packningen visade att de mindre slaggfraktionerna i vissa fall var något mer svårpackade i torrt tillstånd i jämförelse mot mer kubiskt stenmaterial. Detta innebar att i fallet för EAF C och BOS slagg behövdes den dominerande 11-16 slaggfraktionen kombineras med stenmaterial i de mindre fraktionerna för att genomföra samtliga steg i packningsprocessen. Kornkurvor bestämdes därför genom att kombinera 11-16 slagg med mindre stenfraktioner (0-4 och 0-2) för samtliga slaggtyper. I fallet för BOS tillverkades den optimerade asfaltmassan med slagg i samtliga fraktioner utifrån dessa kornkurvor. För Ferrokrom kunde hela packningsutvärderingen genomföras även med slagg i samtliga fraktioner (11-16, 0-4 och 0-2). Detta resulterade i två kategorier av optimerade asfaltmassor, nämligen slagg i samtliga fraktioner och slagg i 11-16 fraktionen. Benämning och beskrivning av de olika typerna av framtagna kornkurvor presenteras i Tabell 5 nedan. Samtliga tio framtagna kornkurvorna presenteras i efterföljande Tabell 6.

Tabell 5. Benämningar för de olika typerna av masssorter samt beskrivning av dessa.

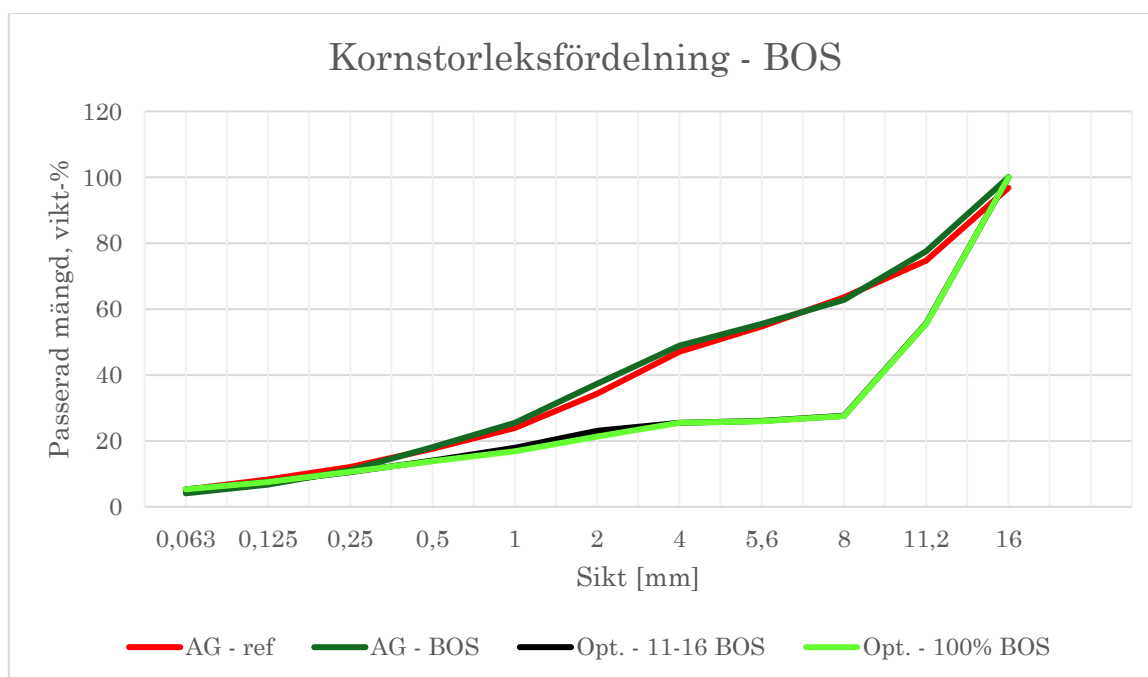
Benämning	Beskrivning
AG	Proportionerad utefter en konventionell AG-kornkurva med samtliga fraktioner. Baserad på stenballast eller respektive slaggsprodukt.
Optimerad - 11-16 slagg	Proportionerad utefter optimeringsmetodiken. Fraktionen 11-16 är slagg, medan 0-4, 0-2 och filler är stenballast.
Optimerad - 100% slagg	Proportionerad utefter optimeringsmetodiken. Samtliga fraktioner (11-16, 0-4, 0-2 och filler) är slagg.

Tabell 6. Massasorter inom detta projekt.

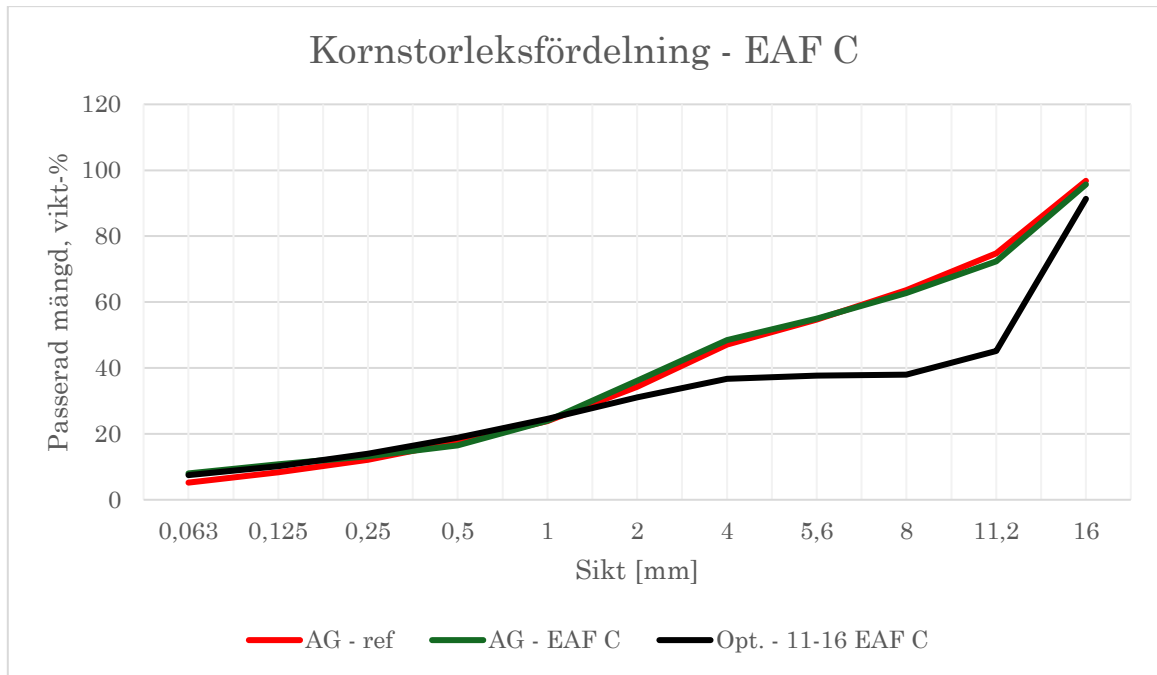
Massasort
AG – Referens
AG – BOS
AG – EAF C
AG – Ferrochrom
Optimerad – 11-16 BOS
Optimerad – 11-16 EAF S
Optimerad – 11-16 EAF C
Optimerad – 11-16 Ferrochrom
Optimerad – 100% BOS
Optimerad – 100% Ferrochrom

Vid utvärderingen av EAF S slaggen visade det sig att det levererade materialet var täckt av hårt fastsittande damm vilket begränsade möjligheterna till att tillverka en sammanhållande asfaltmassa. Då nytt dammfritt material inte kunde levereras inom tidplan för projektet beslutades det att EAF S utgick från vidare provning. EAF S har tidigare använts i verkstillverkad asfaltmassa där utlagda ytor i ett flertal fall (exempelvis ytor inne på Outokumpus område) har uppvisat en mycket god beständighet.

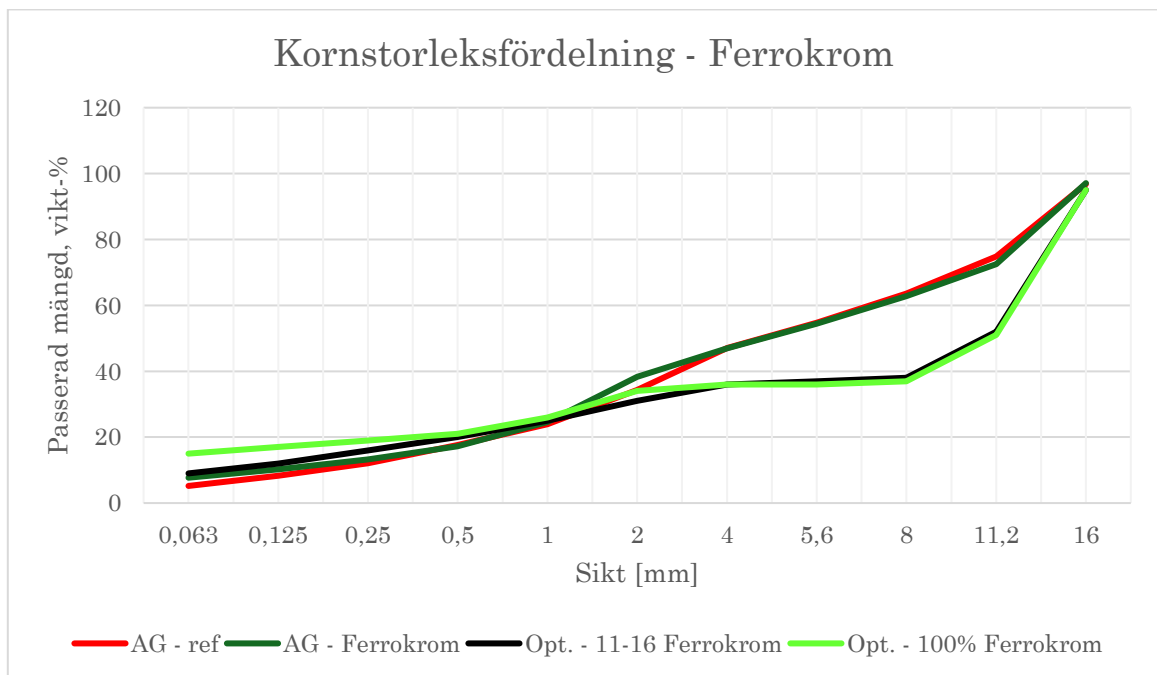
Kornkurvorna som togs fram presenteras i Figur 8 - Figur 12. Kornstorleksfördelningarna för respektive slaggtyp och massasort presenteras i Figur 8 - Figur 10, varav efterföljande figurer presenterar kornstorleksfördelningen för de optimerade kornkurvorna med slagg i fraktionen 11-16 respektive optimerade kurvor med 100% slagg.



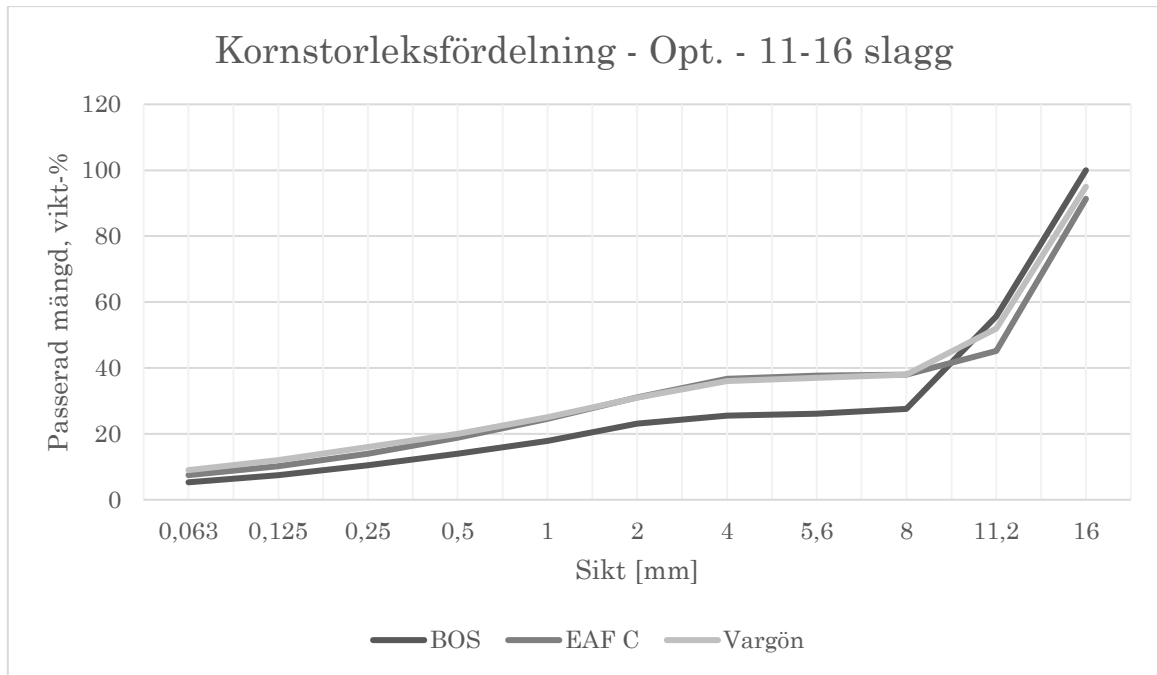
Figur 8. Kornstorleksfördelningen av massasorterna framtagna med BOS-slagg samt kornstorleksfördelningen för den konventionella referens AG-massan.



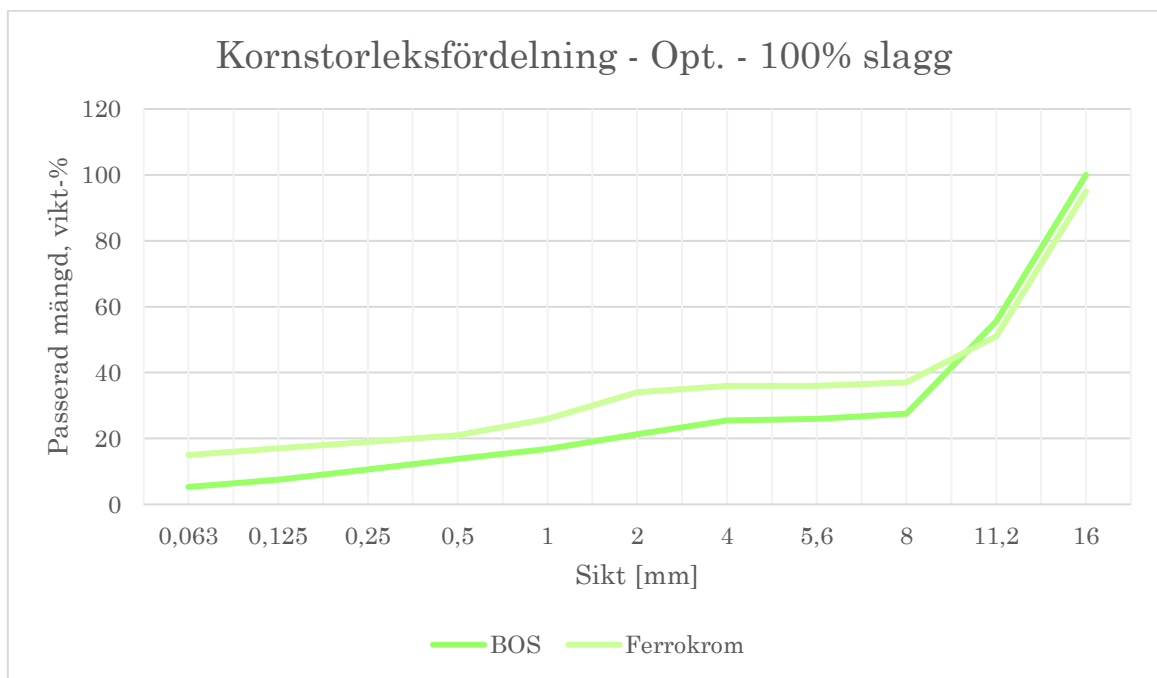
Figur 9. Kornstorleksfördelning av massasorterna framtagna med EAF C -slag. Kornstorleksfördelningen för den konventionella referens AG-massan visas också.



Figur 10. Kornstorleksfördelningen av massasorterna framtagna med Ferrochrom-slag. Kornstorleksfördelningen för den konventionella referens AG-massan visas också.



Figur 11. Kornstorleksfördelning för samtliga slagmassor optimerade med slagfraktionen 11-16.



Figur 12. Kornstorleksfördelning för de slagmassor optimerade med 100% slag.

En sammanställning av passerad viktprocent vid respektive sikt presenteras nedan i Tabell 7 för samtliga AG massor och i Tabell 8 för de optimerade slagmassorna.

Tabell 7. Målvärden för passerad mängd för respektive sikt för samtliga AG-massor.

Massa	Sikt [mm]										
	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16
	Passerad mängd, vikt-%										
AG - Ref	5,2	8,3	12,1	17,6	23,9	34,3	47,1	54,7	63,6	74,8	96,8
AG - BOS	4,1	6,7	11,1	18,1	25,5	37,3	48,9	55,5	62,8	77,6	100
AG – EAF C	8,0	10,8	13,2	16,5	24,0	36,1	48,5	55,0	62,7	72,4	95,7
AG – Ferrokrom	7,7	10,2	13,2	17,2	24,6	38,3	47,0	54,4	62,8	72,5	97,1

Tabell 8. Målvärden för passerad mängd för respektive sikt för samtliga optimerade slaggmassor.

Massa	Sikt [mm]										
	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16
	Passerad mängd, vikt-%										
Opt. – 11-16 BOS	5,3	7,5	10,5	14	17,9	23,1	25,5	26,1	27,6	55,7	100
Opt. – 100% BOS	5,3	7,5	10,6	13,8	16,8	21,3	25,5	26,0	27,5	55,6	100
Opt. – 11-16 EAF S	7,3	10,3	13,2	17,0	20,2	24,7	26,8	27,3	27,3	28,8	99,3
Opt. – 11-16 EAF C	7,48	10,16	13,99	18,85	24,6	31,12	36,67	37,7	37,96	45,18	91,33
Opt. – 11-16 Ferrokrom	9,0	12,0	16,0	20,0	25,0	31,0	36,0	37,0	38,0	52,0	95,0
Opt – 100% Ferrokrom	15,0	17,0	19,0	21,0	26,0	34,0	36,0	36,0	37,0	51,0	95,0

6.2 Proportionering av bitumenhalt

Den totala mängd bitumen som vägdes in vid tillverkning för respektive massasort presenteras i Tabell 9 samt den beräknade mängd i viktprocent som baserats på att samtliga massasorter består av ca 12,5 volymprocent bitumen. Antagen korrigering baserat på slaggens porositet och kornkurva samt bedömd korrigering som utfördes vid blandningstillfället visas även i Tabell 9.

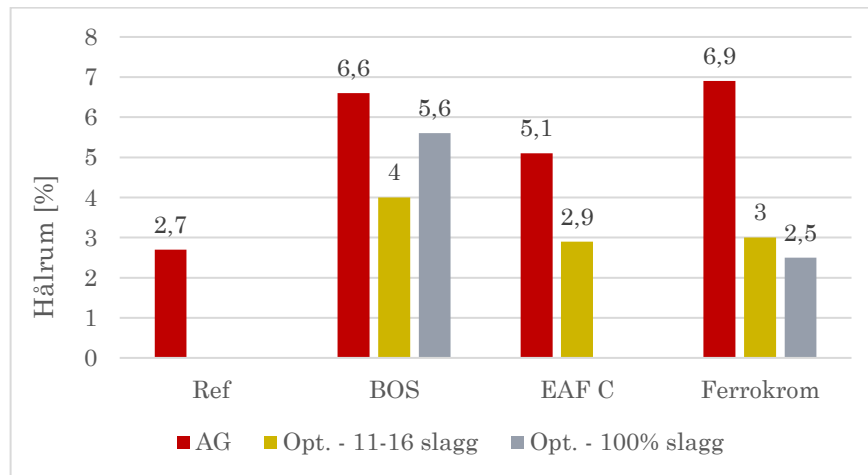
Samtliga massablandningar ansågs representativa för vidare utvärderingar. Analyser av bindemedelshalt och kornkurvor visade på att inga direkta avvikelser från proportioneringsreceptet fanns. Inga bindemedelshalter avvek mer än 0.5 procentenheter från tillsatt bitumenmängd.

Tabell 9. Beräknad och bedömd korrigering av bitumenhalt

Massasort	Teoretiskt beräknad mängd [vikt-%]	Korrigering (porositet och kornkurva) [vikt-%]	Korrigering (visuellt), [vikt-%]	Total mängd [vikt-%]
AG – Ref	5,2	-	-	5,2
AG – BOS	4	+0,3	+0,6	4,9
Opt. – 11-16 BOS	4,2	-	-	4,2
Opt. – 100% BOS	4,2	-	-	4,2
AG – EAF C	3,8	+0,3	-	4,1
Opt. 11-16 EAF C	4,1	-	-	4,1
AG – Ferrokrom	4,2	+0,3	-	4,2
Opt. 11-16 Ferrokrom	4,5	-	-	4,5
Opt. 100% Ferrokrom	4,3	-	+0,1	4,4

6.3 Hålrums och packningsgrad

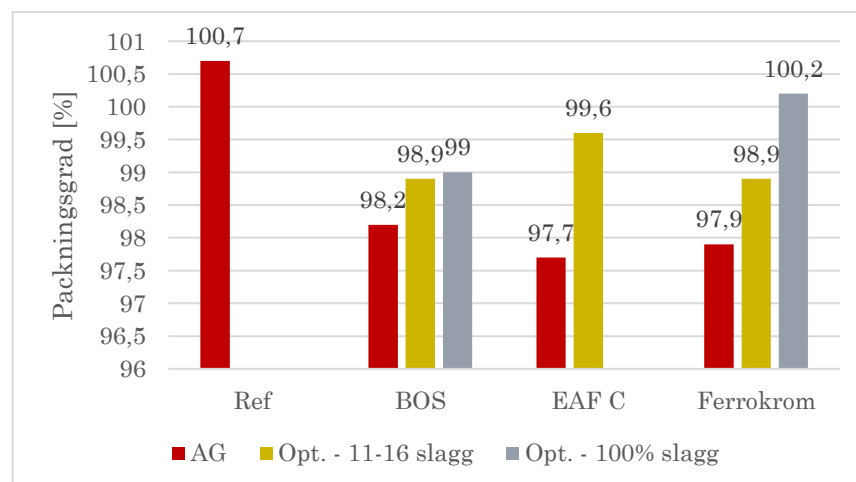
Utmärkande för hålrumsalternativen är att en AG asfaltmassa med slagg ger ett betydligt högre hålrums än en AG asfaltmassa med stenmaterial trots samma kornkurva (se Figur 13). Detta stämmer överens med tidigare erfarenheter av proportionering av slaggasfaltmassor där till exempel Viman och Said [5] påvisat samma problem för ABb 16 asfaltmassa. Figur 13 visar att den volymbaserade proportioneringen svarar mot denna problematik genom att en lägre hålrums halt har uppnåtts för de optimerade slaggmassorna i förhållande till motsvarande slaggmassor proportionerad utefter en konventionell AG-kornkurva. Hålrums halten har bestämts på marshallinstampade provkroppar.



Figur 13. Hålrums halt för samtliga massasorter.

I samtliga fall visar hålrumsanalysen på att det blir en bättre packningsbarhet av slaggasfaltmassorna när de är optimerade. Utmärkande är också att hålrums halten för de optimerade massorna med EAF C och Ferrokrom slagg, är i nivå med AG-referensen. Däremot påvisas ingen tydlig skillnad i hålrums halt och packningsbarhet mellan optimerade massor med 100% slagg respektive med slagg endast i 11-16 fraktionen.

Skrymdensiteten för de marshallinstampade provkropparna jämfördes mot skrymdensiteten uppmätt för de gyratoriskt packade provkropparna och packningsgraden för de olika massatyperna beräknades. Figur 14 visar att samtliga optimerade slaggmassor har en bättre packningsbarhet än motsvarande AG-slaggmassa.

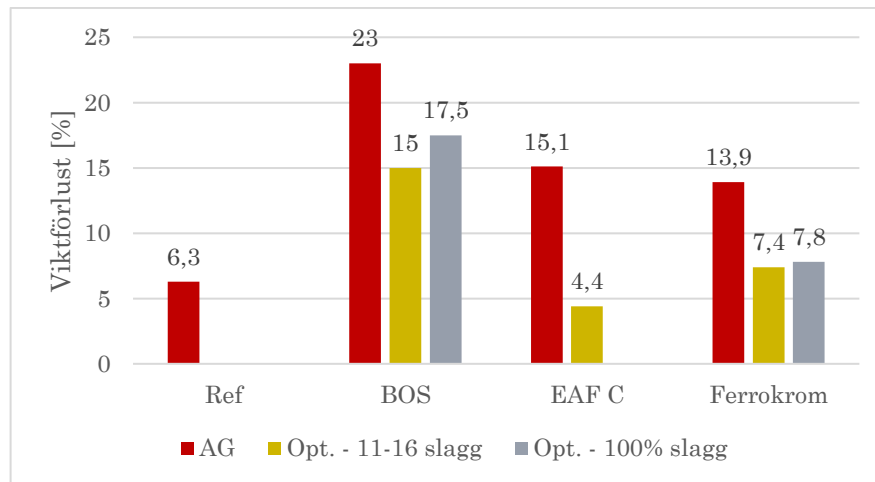


Figur 14. Presenterar den uppnådda packningsgraden, dvs skrymdensitet av de gyratoriskt packade provkropparna i förhållande till skrymdensiteten för de marshallinstampade provkropparna.

6.4 Cantabro

Viktförlusterna erhållna från Cantabro-testet presenteras i Figur 15. Resultatet visar på att de optimerade slaggmassorna bättre motstår de stötar som provkropparna utsätts för i den roterande LA-trumman än slaggmassorna proportionerade utefter en konventionell AG-kornkurva.

Det bör nämnas att det i detta test fanns skillnader i provkropparnas vikt som kan påverka resultaten. Då referensprovkroppen stampades in med en vikt på cirka 1200 g och slaggmassorna med en vikt på cirka 1300 g är de procentuella viktförlusterna sinsemellan möjligen inte likvärdiga i betydelse. Provkroppar med högre vikt utsätts för en större kraft vid varje rotation i trumman. Det betyder att resultatet för slaggmassorna indirekt kan vara bättre i förhållande mot referensen än vad som vid först anblick kan utläsas grafiskt. Däremot kan en rättvis jämförelse mellan samtliga slaggmassor göras.



Figur 15. Viktförlusten för respektive massasort efter Cantabrotest av marshallinstampade provkroppar.

Viktförlusten är i samtliga fall lägre för de optimerade slaggmassorna än de konventionellt proportionerade AG-slaggmassorna. Detta tyder på att kohesionen för slaggmassorna blir bättre när vald optimerings proportioneringsmetodik används.

Att AG-slaggmassorna har störst viktförlust och lägst kohesion stämmer överens med de tidigare presenterade högre hålrumsalterna för dessa massor. Möjligen kräver AG-slaggasfaltmassorna en något högre bindemedelshalt för att förbättra prestandan.

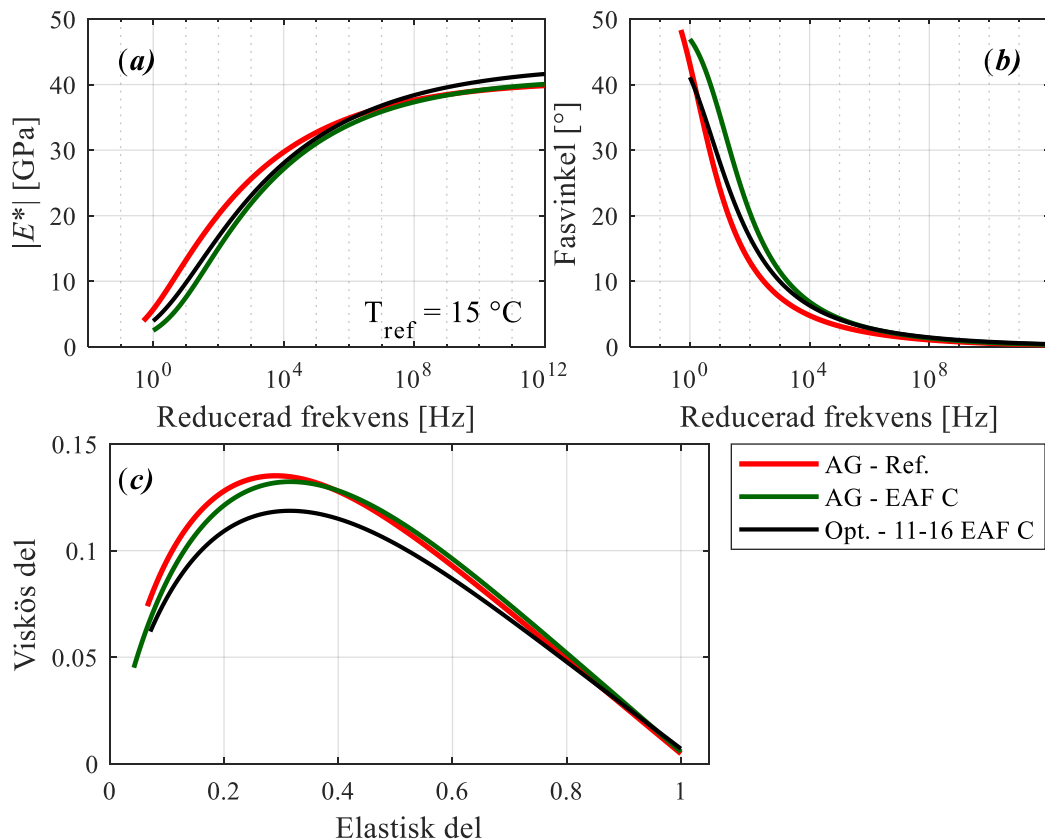
6.5 Modalanalys och skjuvtest

Modalanalys och skjuvtest är metoder som utvärderar asfaltens viskoelastiska egenskaper. Dessa egenskaper kan uttryckas via en komplex styvhetsmodul (E^*) eller via en komplex skjuvmodul (G^*) som funktion av temperatur och frekvens. Modalanalys presenterar komplexa styvhetsmodulen och skjuvtestet presenterar komplexa skjuvmodulen. Dessa metoder bör därför påvisa liknande tendenser gällande de viskoelastiska egenskaperna. Det ska dock betonas att mätningarna utförs vid skilda förutsättningar gällande belastningsfrekvens och töjningsnivåer. Resultaten för respektive metod återspeglar därför viskoelastiska egenskaper för olika frekvensintervall, där modalanalys ger egenskaper vid höga frekvenser och skjuvtest vid låga frekvenser. Figur 16 till Figur 21 nedan presenterar komplexa styvhets- och skjuvmoduler för respektive massatyp med slagg samt för referensmassan AG med stenmaterial. Respektive figur består av tre delfigurer där a) visar den dynamiska styvhetsmodulen, b) visar fasvinkeln, som är ett mått på den viskösa dämpningen, och i c) visas den viskösa komponenten i relation till den elastiska. I delfigur c) presenteras resultaten från modalanalys genom en normaliserad imaginär (viskösa) och real (elastisk) modul (Cole-Cole diagram),

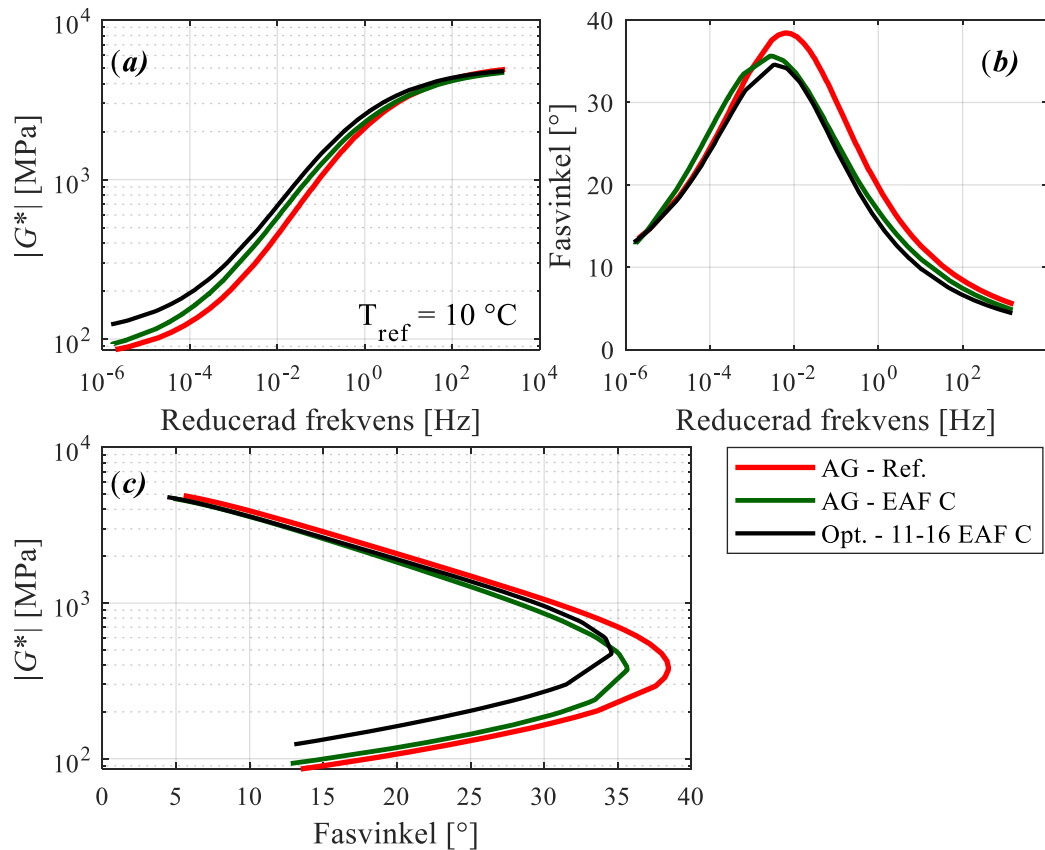
medan resultaten från skjuvtestet presenteras genom fasvinkel och dynamisk skjuvmodul (Black diagram). Detta är olika sätt att presentera förhållandet mellan viskösa och elastiska egenskaper och lämpligt sätt för tydlighet beror ofta på frekvensområdet i mätningarna [17].

6.5.1 EAF C

Figur 16 visar de modalanalys bestämda komplexa styvhetsmodulerna vid 15 °C för massatyperna med EAF C slagg samt för referensmassan AG med stenmaterial. Resultaten visar på relativt små skillnader mellan de olika massatyperna och från delfigur a och b är det vanskligt att dra direkta slutsatser om eventuella skillnader inom det studerade frekvensområdet. I delfigur c påvisas dock en något lägre viskös andel för den optimerade massan med EAF C slagg i 11-16 fraktionen. Detta indikerar förbättrade egenskaper med avseende på ett bättre deformationsmotstånd då en större elastisk respons vid belastning möjliggör en återgång av deflektionen istället för plastiska deformationer som kan uppstå pga. av större andel viskös respons. Den bestämda komplexa skjuvmodulen som presenteras över ett lägre frekvensområde styrker denna indikation genom att vid mycket låga frekvenser påvisa högre moduler för den optimerade 11-16 slaggasfaltmassan i jämförelse mot AG massorna (se Figur 17a). En asfaltbeläggnings risk för att deformeras är som störst vid höga temperaturer och långsamma belastningsfrekvenser som t.ex. en långsamtgående buss på en varm beläggning. En högre styvhet vid dessa förhållanden ger därför bättre deformationsmotstånd. I Figur 16 b och c visas även att slaggasfaltmassorna resulterar i en lägre viskös andel (fasvinkel) i relation till den dynamiska styvheten i jämförelse mot sten AG massan.



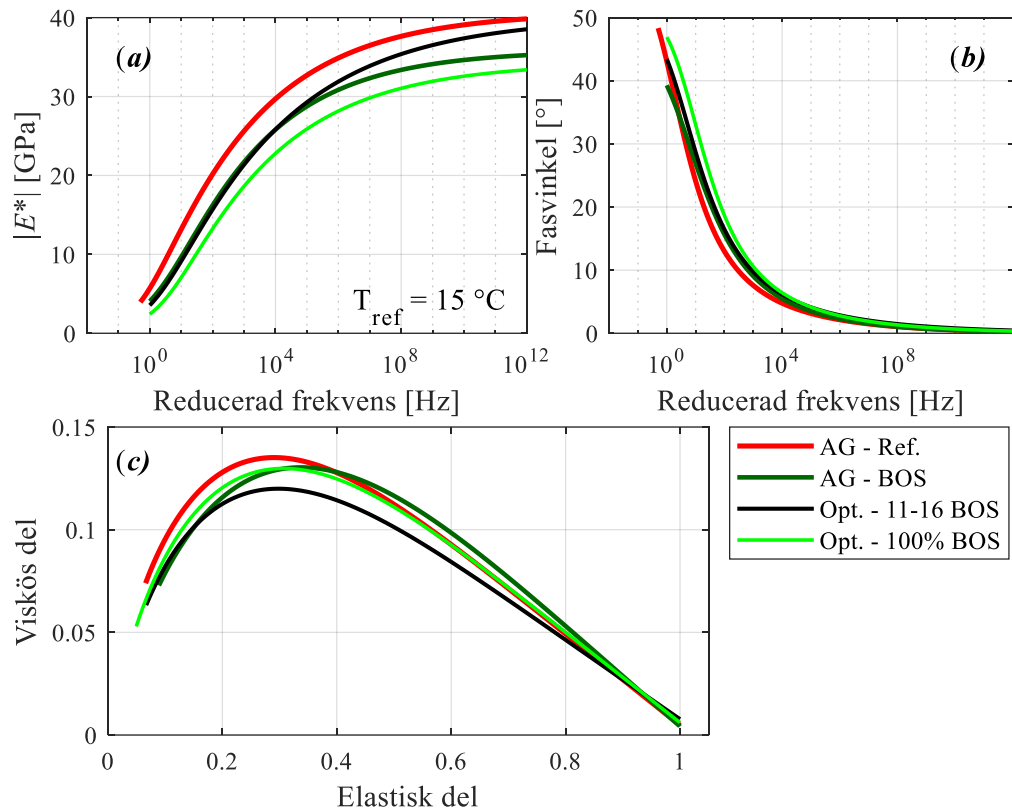
Figur 16. Komplex styvhetsmodul bestämd via modalanalys.



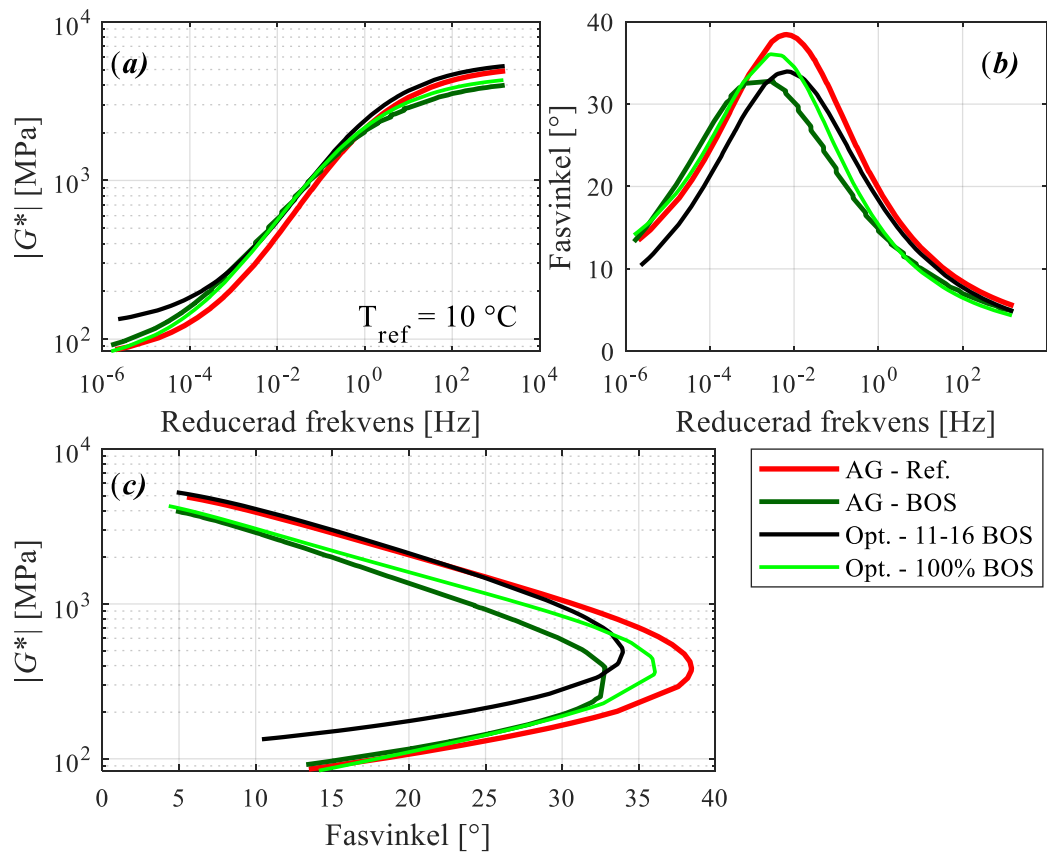
Figur 17. Komplex skjuvmodul bestämd via skjuvtest.

6.5.2 BOS

Även för BOS slaggen syns en liknande skillnad som för EAF C slaggen mellan den optimerade massan med slagg i 11-16 fraktionen och övriga massor. Figur 18c visar något lägre viskös andel för den modalanalys bestämda komplexa modulen och resultatet från skjuvtestet i Figur 19a visar en högre modul vid de låga frekvenserna för den optimerade 11-16 slaggasfaltmassan. Det skall påpekas att den dynamiska styvhetsmodulen från modalanalys som visas i Figur 18a inte har samma relevans i utvärderingen av deformationsmotstånd som den dynamiska skjuvmodulen från skjuvtestet som visas i Figur 19a. Detta beror framförallt på att moduler från låga frekvenser saknas eftersom modulerna bestäms vid högre belastningsfrekvenser i modalanalys. De båda testmetoderna ger även i fallet för BOS slaggen samstämmiga resultat med avseende på att slaggasfaltmassorna ger en lägre viskös andel än AG massan med sten (se Figur 18 och Figur 19c). Som helhet indikerar resultaten från skjuvtestet och modalanalys förbättrade egenskaper med avseende på ökat deformationsmotstånd för den optimerade asfaltmassan med BOS slagg i 11-16 fraktionen.



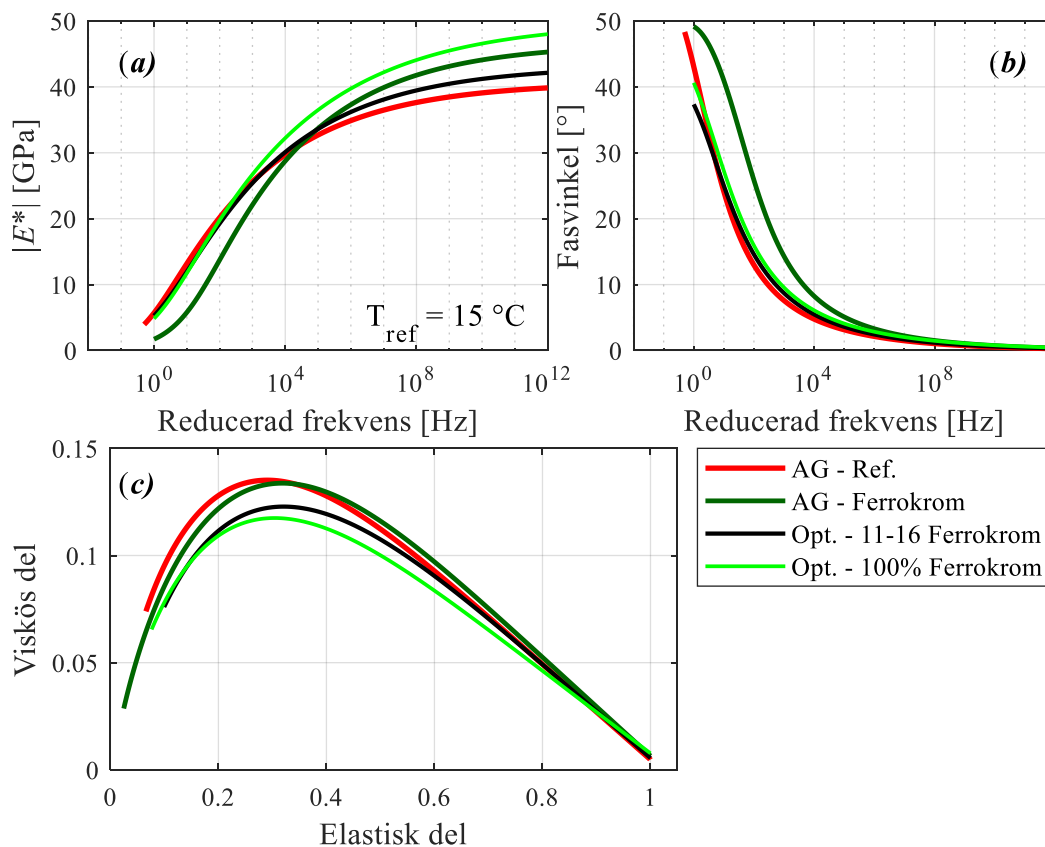
Figur 18. Komplex styvhetsmodul bestämd via modalanalys.



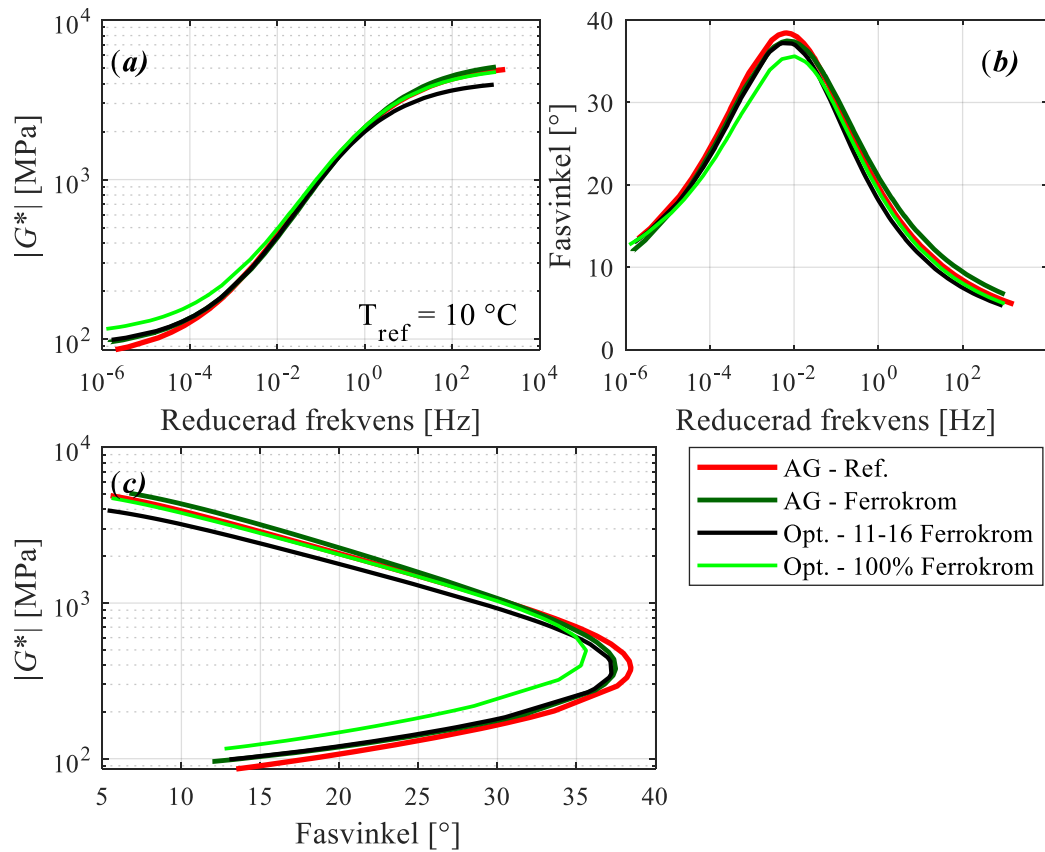
Figur 19. Komplex skjuvmodul bestämd via skjuvtest.

6.5.3 Ferrokrom

I fallet för Ferrokrom slagg visas också genom Figur 20c att de optimerade slaggmassorna indikerar förbättrade deformationsegenskaper genom lägre viskös andel. Skillnaden mot de övriga slaggtyperna är att i detta fall är det den optimerade asfaltmassan med slagg i samtliga fraktioner som uppvisar de bästa egenskaperna i helhetsbedömningen från de två testmetoderna. I Figur 20c är de två optimerade slaggasfaltmassorna i nivå med varandra medan Figur 21 visar i delfigur a en högre skjuvmodul för den optimerade 100 % slaggmassan vid låga frekvenser samt i delfigur b och c visas en lägre fasvinkel i jämförelse mot övriga asfaltmassor. Skillnaden mellan den optimerade massan med Ferrokrom slagg i samtliga fraktioner och samma massa med BOS slagg var att packningsprocessen kunde utföras i samtliga steg för Ferrokrom slaggen.



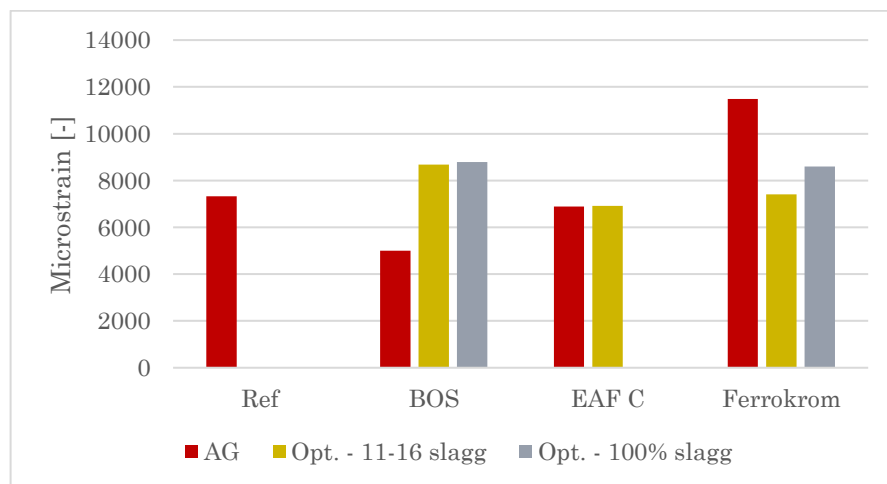
Figur 20. Komplex styvhetsmodul bestämd via modalanalys.



Figur 21. Komplex skjuvmodul bestämd via skjuvtest.

6.6 Dynamiskt kryptest

Deformationsstabiliteten av de olika massatyperna utvärderat genom dynamiskt kryptest presenteras i Figur 22 nedan.



Figur 22. Deformationen för respektive massasort efter dynamiskt kryptest.

Samtliga massasorter ger generellt bra deformationsstabilitet och ingen av slagmassorna uppvisar försämrade egenskaper i jämförelse med referensen. Däremot kan inga direkta tendenser utläsas från de framtagna resultaten. Inga tydliga förbättrade deformationsegenskaper kan ses för de optimerade slagmassorna, varken i förhållande till motsvarande konventionella AG-slagmassan eller den konventionella referens AG-massan.

7 SLUTSATS

I jämförelse mot slaggasfaltmassor proportionerade enligt konventionella metoder visar resultaten i detta projekt att kvalitetshöjande egenskaper uppnås från volymbaserad proportionering av slagg där grova fraktionens lastbärande egenskaper optimeras genom en packningsprocess av torr ballast.

Den volymbaserade proportioneringsmetodikerna resulterade i bättre packningsbarhet för samtliga slaggasfaltmassor i förhållande till de slaggasfaltmassor som proportionerades med konventionell metodik. Hålrums halten för samtliga optimerade slaggasfaltmassor ligger under högsta tillåtna hålrums halt enligt Trafikverkets krav för bitumenbundna bärlager [7]. Samtliga optimerade slaggasfaltmassor uppvisade även bättre kohesion jämfört med de konventionellt proportionerade slaggasfaltmassorna.

De optimerade slaggasfaltmassornas komplexa styvhets- och skjuvmodul som karakteriserades genom modalanalys och skjuvtest indikerade på förbättrade deformationsegenskaper i förhållande till motsvarande konventionellt proportionerade slaggmassorna samt referens AG-massan med stenballast. I samtliga fall för de olika slaggtyperna visade resultaten från skjuvtestet att de optimerade slaggasfaltmassorna har en relativt högre skjuvmodul vid kritiska belastningsfrekvenser och temperaturer. Däremot visar inte resultaten från dynamisk kryptest på tydliga skillnader i deformationsstabilitet mellan de olika proportioneringsmetodikerna. Istället visar samtliga massor goda resultat från dynamisk kryptest.

Tydligt är att proportioneringsmetodikerna förbättrar packbarheten och kohesionen i förhållande till motsvarande respektive slaggmassa proportionerad med konventionell metod. Dessutom är de uppnådda resultaten för de optimerade slaggmassorna med avseende på hålrum och kohesion i nivå med AG-massan med stenmaterial som använts som referens. Detta i kombination med den reducerade bitumenhalten i slaggasfaltmassorna jämfört med den konventionella AG-massan påvisar en god potential i att öka användningen av slagg i bitumenbundna lager med goda resultat. Att med slagg som ballast uppnå likvärdiga resultat som konventionell AG-massa trots en reducerad mängd bitumen möjliggör både ekonomiska och miljömässiga vinster.

8 FRAMTIDA ARBETE

Inom ramarna för detta projekt undersöktes det om packbarhet och deformationsmotstånd kunde förbättras för slaggasfalt genom volymbaserad proportionering. I framtiden bör det även undersökas om man med olika typer av efterbearbetning som t.ex. krossning, siktning och magnetavskiljning kan kontrollera slagballastens kvalitet. Proportioneringsmetodikerna bör även utvärderas genom fältförsök med verkstillverkad slaggasfaltmassa.

REFERENSER

- [1] 2018. *Begränsad klimatpåverkan – saker företag kan göra*. Sveriges miljömål. <http://www.sverigesmiljomal.se/stod-och-rad-i-miljoarbetet/begransad-klimatpaverkan---saker-foretag-kan-gora/> (hämtad 2018-07-17)
- [2] Blixt, Eva. 2016. *Slagg, en mycket användbar restprodukt*. Jernkontoret. <https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/restprodukter/slagg/> (hämtad 2018-07-17)
- [3] Viman, Leif. 2015. Slaggasfalt, delrapport A, Ballastegenskaper och slitegenskaper enligt Prall. VTI
- [4] Viman, Leif och Said, Safwat. 2015. Slaggasfalt, delrapport B, Stabilitet och skjuvegenskaper hos slaggasfalt. VTI
- [5] Olard, Francois och Perraton, Daniel. 2010. On the Optimization of the Aggregate Packing Characteristics for the Design of High-Performance Asphalt Concrets. *Road Materials and Pavement Design*. EATA 2010, 145-169. DOI: 10.1080/14680629.2010.9690330
- [6] Pouget, Simon m.fl. 2016. Relationship between the aggregate structure and mechanical properties of GB5 road base mix. *53rd Annual Petersen Asphalt Research conference - International Society for Asphalt Pavements*, At Jackson Hole (USA).
- [7] Trafikverkets regelverk. TRVKB 10 Bitumenbundna lager. TDOK 2013:0529. Vers. 3. 2017-11-08
- [8] Produktstandard, SS-EN 12697-1:2012. Vägmaterial – Asfaltmassor – Provningsmetoder för varmblandad asfalt – Del 1: Löslig bindemedelshalt. Ver. 3. 2012-06-11
- [9] Produktstandard, SS-EN 12697-2:2015- Vägmaterial – Asfaltmassor – Provningsmetoder för varmblandad asfalt – Del 2: Bestämning av kornstorleksfördelning. Ver. 2. 2015-05-05
- [10] Produktstandard, SS-EN 12697-30. Vägmaterial – Asfaltmassor – Provningsmetoder för varmblandad asfalt – Del 30: Framställning av provkroppar genom slagpackning (enligt Marshall). Vers. 2. 2012-04-13
- [11] Produktstandard, SS-EN 12697-5. Vägmaterial – Asfaltmassor – Provningsmetoder för varmblandad asfalt – Del 5: Bestämning av kompakt densitet. Ver. 2. 2009-12-09
- [12] Produktstandard, SS-EN 12697-6B. Vägmaterial – Asfaltmassor – Provningsmetoder för varmblandad asfalt – Del 6: Bestämning av skrymdensitet hos asfaltprovkroppar. Ver. 2. 2012-04-27
- [13] FAS 479-03. Asfaltbeläggning och massa. Bestämning av resistens mot flygbränsle enligt Cantabro test
- [14] Gudmarsson, Anders. 2014. Resonance Testing of Asphalt Concrete. PhD Thesis. ISBN 978-91-87353-50-5. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm
- [15] Said, Safwat F., Hakim, Hassan, och Eriksson, Olle, "Rheological Characterization of Asphalt Concrete Using a Shear Box", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.41, No. 4, 2013, pp. 602-610, doi:10.1520/JTE20120177.ISSN 0090-3973
- [16] Produktstandard, SS-EN 12697-25. Vägmaterial – Asfaltmassor – Provningsmetoder för varmblandad asfalt – Del 25: Pulserande kryptest. Ver. 2. 2016-08-17
- [17] Levenberg, Eyal. 2011. Smoothing Asphalt Concrete Complex Modulus Test Data. *Journal of Materials in Civil Engineering* 23(5):606-611. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000217