

UTVÄRDERING AV INITIAL STYVHETSFÖRÄNDRING OCH DEFORMATIONSSTABILITET

*I ASFALT MED RETURASFALT, REJUVENATORER OCH
POLYMERER*

Anders Gudmarsson & Abubeker Ahmed

2020-05-15

FÖRORD

Detta projekt har utförts av Peab Asfalt AB i samarbete med VTI. Stort tack till SBUF och BVFF för den huvudsakliga finansieringen av detta projekt. Resultatet från detta projekt rapporteras via en SBUF rapport samt via en VTI rapport.

Projektet har bestått av följande arbetsgrupp och referensgrupp.

Arbetsgrupp:

Anders Gudmarsson (Projektledare)	Peab Asfalt AB
Martin Rydh	Peab Asfalt AB
Tove Kristensen	Peab Asfalt AB
Abubeker Ahmed	VTI
Andreas Waldemarsson	VTI

Referensgrupp:

Lars Jansson	Peab Asfalt AB
Henrik Arnerdal	Trafikverket
Jonas Ekblad	NCC
Kenneth Olsson	Skanska
Mats Jonsson	Svevia
Hans Lundkvist	Nynas
Nils Rydén	LTH
Denis Jelagin	KTH

Ett stort tack riktas till samtliga deltagare!

Anders Gudmarsson
Stockholm, Maj 2020

SAMMANFATTNING

Returasfalt (RA) bidrar till att reducera miljöpåverkan från beläggningsarbeten. Med en ökande andel RA i nytillverkad asfalt är det samtidigt viktigt att bibehålla eller förbättra kvaliteten i beläggningsmassorna för att inte skapa ett ökat underhållsbehov. För att reducera returafaltens hårda bindemedel används därför rejuvenatorer alternativt mjukare bitumen för att reducera risken för sprickbildning.

Syftet med detta projekt är att utvärdera om rejuvenatorers mjukgörande effekt utgör en risk för tidig spårbildning genom förändrade styvhets- och deformationsegenskaper. Utöver att mäta styvhetsutveckling och deformationsegenskaper av asfaltmassa med rejuvenatorer utvärderas även asfaltmassa med returafalt som kompenseras med mjukare bitumen samt polymermodifierade massor utan returafalt.

Provning har utförts vid flera tillfällen på provkroppar och asfaltplattor genom modalanalys, indirekt pressdragprovning (IDT), Wheeltracking och skjuvtestning. För att utvärdera förändringar i asfaltmassornas initiala egenskaper utfördes modalanalys från dag 1 efter tillverkning till dag 14. En längre uppföljning upp till 1 år utfördes genom både IDT provning och modalanalys. Provnigen genom Wheeltracking utfördes vid 1, 14 och 30 dagar efter tillverkning av asfaltplattorna.

Resultaten från modalanalys visar att den initiala styvhetstillväxten är oberoende av det ingående material som används för att erhålla en ABT 11 70/100. Dessutom visar resultat från Wheeltracking att 50 % RA blandat med rejuvenatorer eller mjukare bitumen förbättrar beläggnings deformationsmotstånd i jämförelse mot en beläggning utan RA med 70/100 bitumen.

Resultaten från modalanalys visar även att asfaltmassor med polymermodifierade bindemedel förändrar den initiala styvhetstillväxten i jämförelse mot de konventionella bindemedlen. Styvhetstillväxten av PMB massorna startade först efter ca 14 dagar vid 20 °C till skillnad mot övriga massor där styvheten ökade som snabbast de första dagarna efter tillverkning. Wheeltracking provningen resulterade även i förbättrade deformationsegenskaper dag 14 och dag 30 i jämförelse mot dag 1 för PMB massan.

Sammanfattningsvis så visar detta projekt att RA i kombination med rejuvenatorer eller mjukare bitumen inte försämrar en beläggnings initiala egenskaper i jämförelse mot referensbeläggnigen. PMB massan visade även förbättrade deformationsegenskaper i jämförelse mot ABT 11 70/100 utan RA.

INNEHÅLL

1 BAKGRUND	4
2 SYFTE OCH MÅL	5
3 METODIK	5
3.1 PROVBEREDNING	6
3.2 LABORATORIEPROVNING	8
3.2.1 Modalanalys	8
3.2.2 Indirekt pressdragprovning (IDT).....	9
3.2.3 Wheeltracking.....	9
4 RESULTAT	11
4.1 ANALYS AV ASFALTMASSA OCH PROVKROPPAR	11
4.2 MODALANALYS	11
4.2.1 Massa 1 – ABT 11 70/100	12
4.2.2 Massa 2 – ABT 11 70/100 (50 % RA + 160/220).....	14
4.2.3 Massa 3 – ABT 11 70/100 (50 % RA + rejuvenator)	15
4.2.4 Massa 4 – ABT 11 70/100 (50 % RA + rejuvenator + vax).....	16
4.2.5 Massa 5 – ABT 11 40/100-75	17
4.2.6 Sammanställning av styvhetsförändring.....	18
4.3 IDT	22
4.4 WHEELTRACKING	26
5 SLUTSATS	28
REFERENSER	29

1 BAKGRUND

Returasfalt (RA) bidrar till att reducera miljöpåverkan från beläggningsarbeten. Med en ökande andel RA i nytillverkad asfalt är det samtidigt viktigt att bibehålla eller förbättra kvaliteten i beläggningsmassorna för att inte skapa ett ökat underhållsbehov. Nationella och internationella studier har påvisat att rejuvenatorer kan användas för att bearbeta åldrat bitumen i RA så att det återgår mot dess ursprungliga egenskaper (Zaumanis et al. 2014; Olsson 2018). Rejuvenatorer reducerar styvheten och sprödheten i bitumen vilket förbättrar motståndet mot sprickbildning. Användningen av rejuvenatorer förväntas öka i takt med att andelen RA ökar.

Rejuvenatorers förmåga att förbättra prestandan i bitumen och asfaltmassor har även påvisats i tidigare SBUF projekt (Tyllgren 2010; Gudmarsson 2015; Gudmarsson 2018). Genom att rejuvenatorer reducerar bindemedlets hårdhet reduceras risken för sprickbildning i beläggningsmassor med RA. Det saknas dock kunskap om beläggningar med rejuvenatorer ökar risken för initiala deformationer efter avslutad packning. Frågetecken finns om rejuvenatorer reducerar styvheten och styvhetsutvecklingen på ett sätt som leder till försämrade deformationsstabilitet och därmed initial spårbildning.

Att blanda in ett mjukare bitumen är också ett alternativ för att kompensera mot det hårdare åldrade bindemedlet i RA massor. Liksom för massor med rejuvenatorer är det inte påvisat hur detta påverkar den nytillverkade massans styvhet och deformationsstabilitet. Det kan även finnas skillnader i hur inblandningen av mjukare bitumen eller rejuvenatorer påverkar beläggningsens initiala styvhet.

Polymermodifierade asfaltmassor är ytterligare ett exempel på där det inte är klarlagt om den initiala styvhetsförändringen skiljer sig mot konventionella asfaltmassor. Däremot visar bindemedelsanalyser på den långsiktigt fördelaktiga egenskapen att polymermodifierade bitumen härdar långsammare än konventionella bindemedel över tid (Lu et al. 2014). En utvärdering av polymermodifierade asfaltmassors initiala styvhetsförändring, i jämförelse mot asfaltmassor med konventionella bindemedel, kan indikera om ett långsammare härdningsförlopp bör beaktas initialt för att reducera risker med tidig spårbildning.

På grund av dessa skäl är det viktigt att utvärdera egenskaperna i asfaltmassor med tillsatsmedel som rejuvenatorer och polymerer i direkt anslutning till dess tillverkning och efterföljande packning. Genom att i tidigt skede kontinuerligt karakterisera styvheten och deformationsstabiliteten i asfaltmassor med olika typer av tillsatsmedel kan risken för initial spårbildning i nytillverkade beläggningar reduceras. Denna karakterisering kan utföras noggrant genom att kontinuerligt utföra repeterande oförstörande mätningar på samma provkroppar under en avgränsad tidsperiod direkt efter packning.

För att utvärdera en eventuell förändring i materialen är det av stor vikt att kunna genomföra en precis och kontrollerad provning som karakteriserar fundamentala materialegenskaper i respektive asfaltmassa. Denna jämförande studie kommer därför att utföras i laboratoriemiljö på både verk- och laboratorietillverkad asfaltmassa.

2 SYFTE OCH MÅL

Detta projekt syftar till att utvärdera styvhet och styvhetsutvecklingen i beläggningar när rejuvenatorer eller mjukare bitumen används för att möjliggöra en ökad halt återvunnen asfalt. Projektet fokuserar på potentiella risker med initial spårbildning och skillnader mellan olika massatyper. Projektet avser även utvärdera om liknande risker finns i polymermodifierade asfaltmassor (PMB).

Detta projekt kompletterar och utökar kunskapen från relaterade SBUF projekt om åldringssamband (Waldemarson et al. 2018) samt ökad återvinning (Olsson 2018) genom att fokusera på initial prestanda i asfaltmassor med återvinning och rejuvenatorer/mjukare bitumen samt PMB. Oförstörande provning möjliggör dessutom en noggrann uppföljande provning av samma provkroppar över tid. Detta gör att tidens påverkan på materialegenskaperna kan isoleras från variationer som kan bero på provning av olika provkroppar och mätuppställning. Detta är aspekter som annars ofta bidrar till en ökad varians och osäkerhet i provning av asfalt.

3 METODIK

Utförandet av detta projekt har genomförts av Peab Asfalt och VTI. Peab tillverkade samtliga asfaltmassor och utförde provning genom modalanalys och Wheeltracking. VTI utförde styvhetsprovning genom indirekt pressdragprovning enligt gällande SS-EN standard samt modalanalys för att möjliggöra en längre tids uppföljning av styvhetsutvecklingen. VTI har dessutom som komplement till Wheeltracking utfört skjuvprovning för att utvärdera deformationsegenskaperna i respektive asfaltmassa (Said et al. 2013).

I detta projekt utvärderas huvudsakligen fem olika varianter av laborietillverkade ABT 11 asfaltmassor. Massa 1 till 4 har utifrån olika ingående material tillverkats för att det slutliga bindemedlet ska motsvara ett bitumen enligt penetrationsklass 70/100. Massa 5 avviker från övriga massor då denna har tillverkats med ett polymermodifierat bitumen enligt klassificeringen 40/100-75. Utvärderingen består av att jämföra massa 1 till 4 samt att jämföra massa 1 och massa 5.

1. ABT 11 70/100 – utan RA
2. ABT 11 70/100 – 50 % RA och 160/220
3. ABT 11 70/100 – 50 % RA och rejuvenator
4. ABT 11 70/100 – 50 % RA och rejuvenator + vax
5. ABT 11 40/100-75 – PMB utan RA

Konditioneringen av provkropparna och samtliga mätningar utfördes i laboriemiljö vilket avgränsar resultaten till att endast representera styvhetsförändringen som sker utan yttre påverkan från klimat och trafik. Detta innebär att resultaten är avgränsade till materialets inneboende mognadsprocess. Utvärderingen av styvhetsförändring i en kontrollerad laboriemiljö är en förutsättning för att olika materials åldringsegenskaper skall kunna jämföras mot varandra.

Utöver laborietillverkning av asfaltmassorna 1 till 5, utfördes även provning på följande verkstillverkade asfaltmassor:

- ABTs 16 PG 76-28 (motsvarar 40/100-75) – PMB utan RA

- ABT 11 70/100 – 35 % RA och rejuvenator
- ABT 11 70/100 – 35 % RA och rejuvenator + vax

De verkstillverkade asfaltmassorna begränsades till 35 % RA på grund av förutsättningarna i asfaltverket vid tidpunkten för detta projekt. Den huvudsakliga laboratorieprovningen utfördes genom följande provmetoder:

- Modalanalys – Oförstörande provning av provkropparnas styvhet utfördes dagligen vid 20 och -20 °C. Utfördes av Peab och VTI
- Indirekt pressdragprovning (IDT) – Cyklisk belastning av provkroppar utfördes vid 8 frekvenser (0,05, 0,1, 0,5, 1, 2, 5, 10, 16 Hz) och 3 temperaturer (-5, 10 och 20 °C). Utfördes av VTI.
- Wheeltracking – Asfaltsplattor belastades av ett rullande hjul genom 20 000 överfarter. Provnings utfördes torrt i luft vid 50 °C. Utfördes av Peab.
- Skjuvtest – Provmotod som utvecklats av VTI för att mäta den komplexa skjuvmodulen. Testet utfördes efter avslutad modalanalys på samma provkroppar för att utvärdera deformationsegenskaper. Provnings utfördes av VTI och resultaten rapporteras i VTI rapporten för detta projekt.

3.1 Provberedning

Asfaltmassorna 1-5 tillverkades genom två blandningsomgångar där massan från en omgång användes till att packa plattor för provning genom Wheeltracking. Från den andra blandningsomgången tillverkades provkroppar genom gyratorisk packning och Marshallstampning till provning genom modalanalys och IDT.

Returasfalt från ett provtagningstillfälle, med en genomsnittlig bindemedelshalt på 4.6 % och mjukpunkt på 60.2 °C, användes till samtliga blandningar av asfaltmassorna med RA (massa 2-4). Mängden nytt bitumen och rejuvenator i dessa massor beräknades baserat på den ingående returafaltens egenskaper med mål att uppnå ett bindemedel med penetrationsklass 70/100. Ingående material och halter för respektive laborietillverkad asfaltmassa presenteras i Tabell 1.

Tabell 1. Specifikation av mängder för asfaltmassa till provning genom Wheeltracking

Asfaltmassa ABT 11	Tillsatt bitumen	Mängd bitumen (vikt-%)	RA (%)	RA bit. (vikt-%)	Rej. (vikt-%)	Vax (vikt-%)	Total mängd bitumen (vikt-%)
1	70/100	6.3	-	-	-	-	6.3
2	160/220	3.94	51.4	2.36	-	-	6.3
3	70/100	3.70	51.4	2.36	0.24	-	6.3
4	70/100	3.51	51.4	2.36	0.24	0.19	6.3
5	40/100- 75	6.3	-	-	-	-	6.3

Eftersom stenmaterialet till de olika blandningsomgångarna kom från olika bergtäkter justerades bindemedelshalten efter en genomsnittlig stendensitet. Tabell 2 presenterar respektive halt av ingående material till blandningarna som använde till modalanalys och IDT

Tabell 2. Specifikation av mängder för asfaltmassa till provning genom modalanalys och IDT

Asfaltmassa ABT 11	Tillsatt bitumen	Mängd bitumen (vikt-%)	RA (%)	RA bit. (vikt-%)	Rej. (vikt-%)	Vax (vikt-%)	Total mängd bitumen (vikt-%)
1	70/100	6.1	-	-	-	-	6.1
2	160/220	3.93	49.4	2.27	-	-	6.2
3	70/100	3.70	49.4	2.27	0.23	-	6.2
4	70/100	3.514	49.4	2.27	0.23	0.186	6.2
5	40/100- 75	6.1	-	-	-	-	6.1

Tre packningsmetoder användes för att tillverka provkroppar till respektive provmetod:

- Modalanalys (samt skjuvtest): Gyrotorisk packning av provkroppar med diameter 150 mm.
- IDT: Marshallpackning för provkroppar med diameter 100 mm.
- Wheeltracking: Packning av plattor via en Plate Compactor.

Samtliga provkroppar packades i direkt samband med utförandet av blandningarna och utan att asfaltmassan läts svalna av. Att undvika en avsvalnings- och uppvärmningsprocess var viktig för att inte påverka asfaltens härdningsprocess. Asfaltmassa 1-4 packades vid en temperatur på 145 °C medan asfaltmassa 5 packades vid 180 °C. Dessa temperaturer användes oberoende av packningsmetod. Efter packning och avsvälning av provkropparna, sågades provkropparna till modalanalys med dubbelsidig klinga till en tjocklek på 30 mm. Samtliga plattor till provning genom Wheeltracking packades till en tjocklek på 40 mm. För respektive massa tillverkades och testades två plattor. Provning på verkstillverkad asfaltmassa utfördes både på laboratoriepackade

plattor och på uppborrade provkroppar från en nylagd slitlagerbeläggning. Tabell 3 redovisar specifikationerna för de verkstillverkade asfaltmassorna.

Tabell 3. Specifikation av verkstillverkad asfaltmassa till provning genom modalanalys (ABTs 16) och Wheeltracking (ABT 11)

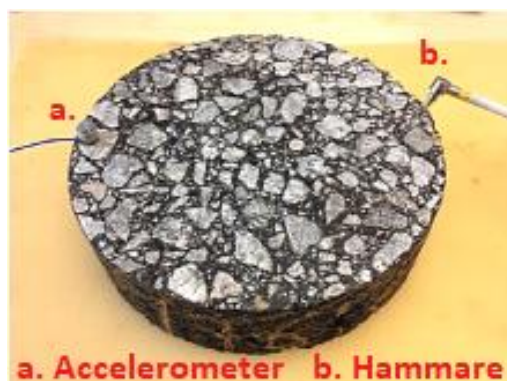
Verkstillverkad asfaltmassa	Bitumen	Mängd bitumen (vikt-%)	RA (%)	RA bit. (vikt-%)	Rej. (vikt-%)	Vax (vikt-%)	Total mängd bitumen (vikt-%)
ABTs 16	PG 76-28	5.5	-	-	-	-	5.5
ABT 11	70/100	4.53	35	1.61	0.16	-	6.3
ABT 11	70/100	4.34	35	1.61	0.16	0.19	6.3

3.2 Laborieprovning

För att verifiera att asfaltmassornas kvalitet uppnådde önskat resultat efter proportionering och blandning genomfördes analyser av bindemedelshalt, bitumenkvalitet samt kornkurva. Dessa analyser gjordes i enlighet med SS-EN 12697-1/SS-EN 12697-2, SS-EN 1427 samt SS-EN 1426. Bitumenkvalitet genom penetration och mjukpunkt kontrollerades på massa som låtits svalna och sedan värmts upp en gång till. Provkropparnas hålrum bestämdes genom att analysera skrym- och kompaktensitet i enlighet med standardmetoderna SS-EN 12697-6B respektive 12697-5.

3.2.1 Modalanalys

Massornas styvhetsförändring karakteriserades genom modalanalys. Metoden innebär att en provkropp utsätts för en kortvarig belastning via ett hammarslag och en accelerometer mäter de resulterande vibrationerna, se Figur 1. Provkroppens komplexa styvhet kan beräknas utifrån provkroppens resonansfrekvenser och frekvensresponsfunktioner (Gudmarsson 2014). Den komplexa styvheten beror på provkroppens massa, resonansfrekvenser, geometri och randvillkor. Genom att mäta resonansfrekvensernas förändring över tid där övriga parametrar är konstanta kan därmed styvhetsförändringen bestämmas. Modalanalys är en helt oförstörande provning, vilket innebär att samma provkropp kan genomgå upprepade provningar utan påverkan.



Figur 1a. Uppställning modalanalys Peab

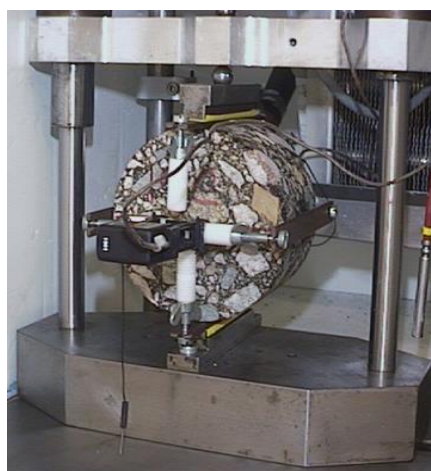


Figur 1b. Uppställning modalanalys VTI

Den initiala styvhetsförändringen utvärderades genom provning som startade dagen efter tillverkningen av provkropparna (dag 1) och som fortsatte systematiskt upp till dag 14 på tre provkroppar per asfaltmassa. För att möjliggöra att styvhetsförändringen av dessa provkroppar även utvärderades över längre tid så fortsatte provningen efter dag 14 på två av provkropparna vid VTI. Peab fortsatte även med en periodvis provning upp till ca 400 dagar på en av provkropparna per asfaltmassatyp. Provkropparna konditionerades i ett klimatskåp och testades vid 20 °C och -20 °C. Provning genomfördes först vid 20 °C på morgonen och efter att provkropparna tempererats under minst fem timmar vid -20 °C. Provkropparna förvarades i klimatskåpet i 20 °C över natten samt även över helgdagar och mellan mättillfällena. VTI nyttjade två olika klimatskåp, ett för 20 °C och ett för -20 °C, och mellan mätningarna förvarades provkropparna i 20 °C. Figur 1a visar mätuppställningen som användes av Peab där hammarslagen applicerades manuellt på provkroppen. Figur 1b visar uppställningen som användes av VTI där en piezoelektrisk motor användes för att applicera hammarslagen.

3.2.2 Indirekt pressdragprovning (IDT)

Provning av styvhetsmodulen utfördes även genom indirektpressdragprovning (SS-EN 12697–26:2018 Annex F). Testet utförs genom att mäta spänning och töjning i provkroppen som utsätts för en sinusformad belastning (se Figur 2). Den cykliska provningen genomförs över ett spann av frekvenser och temperaturer för bestämning av masterkurvor av den dynamiska styvhetsmodulen och fasvinkeln. Frekvenssvep utfördes vid 8 frekvenser (0,05, 0,1, 0,5, 1, 2, 5, 10, 16 Hz) och 3 temperaturer (-5, 10 och 20 °C).



Figur 2. Mätuppställning för indirekt pressdragprovning

3.2.3 Wheeltracking

Asfaltmassornas deformationsmotstånd utvärderades genom Wheeltracking som utfördes vid 1, 14 och 30 dagar efter blandning och packning. Wheeltracking innebär att ett hjul med konstant tryck belastar asfaltsplattor under 20 000 överfarter. Spårjupet som skapas i plattorna av hjulets överfarter mäts kontinuerligt. Provning utfördes på två laboratorietillverkade plattor av varje massatyp vid 50 °C och i enlighet med metoden SS-EN 12697-22. Wheeltracking kan påvisa eventuella skillnader i deformationsmotstånd mellan de olika massatyperna samt om en eventuell

styhetsökning från dag 1 till dag 30 förbättrar deformationsmotståndet. Genom Wheeltracking utsätts asfalten för betydlig högre belastningsnivå än vad som är fallet vid provning genom modalanalys eller IDT. Eftersom asfaltens förhållande mellan spänningar och töjningar är olinjärt vid högre belastningsnivåer skiljer sig dock provkropparnas materialegenskaper (styhetsmodul) mellan testmetoderna. Detta påverkar möjligheterna att karakterisera en koppling mellan styhetsmodul, som mäts vid låga töjningsnivåer (linjärt område), och deformationsegenskaper som mäts vid höga töjningsnivåer (olinjärt område).

4 RESULTAT

4.1 Analys av asfaltmassa och provkroppar

Tabell 4 redovisar egenskaper i den färdigblandade asfalten där hålrums halten avser Marshallstampade provkroppar. För ett 70/100 bitumen i varmblandad asfaltmassa finns det krav på att mjukpunkten av det återvunna bindemedlet ska vara mellan 43-54 °C (TDOK 2013:0529). Mjukpunkten på återvunnet bitumen från massa 1 till 3 hamnar inom dessa krav. Den variation som finns i mjukpunkt mellan massa 1 till 3 beror troligtvis till största del på att det ofta finns variationer i returafaltens bitumenstyvhet då nuvarande praxis är att blanda samtliga typer av återvunna beläggningar i samma hög. Mjukpunkten för massa 4 och 5 avviker eftersom dessa asfaltmassor är modifierade med vax respektive SBS-polymerer och därmed bör resultera i högre mjukpunkter. Däremot är resultatet av penetrationsvärdet för massa 4 och 5 i samma magnitud som medelvärdet av de övriga asfaltmassorna.

Tabell 4. Analyserad bindemedelshalt, mjukpunkt, penetration och hålrum i färdigblandade asfaltmassor.

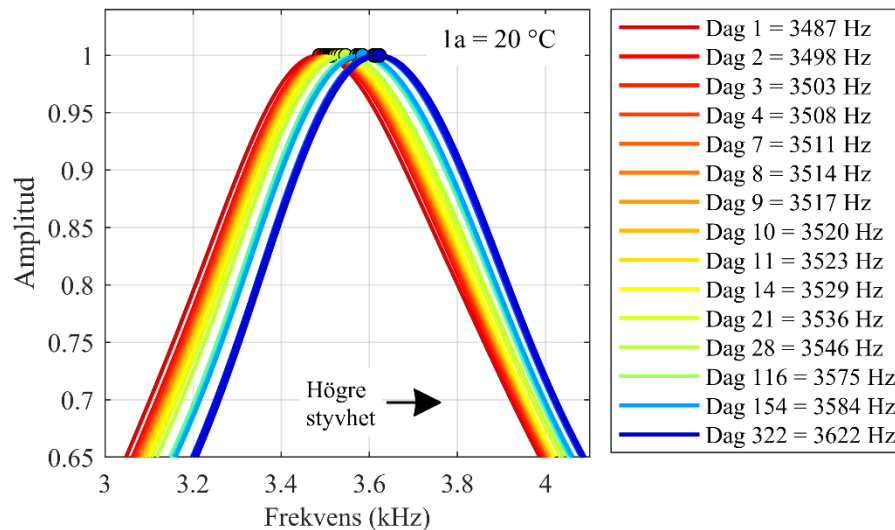
Asfaltmassa ABT 11	Tillsatt bitumen	RA (%)	Bmh (%)	Mjukpunkt (°C)	Penetration (1/10 mm)	Hålrums- halt (%)
1	70/100	0	5.9	47.8	62	1.5
2	160/220	50	5.8	53	46	2.0
3	70/100	50	5.9	50.4	55	1.4
4	70/100	50	6.1	64.2	54	1.2
5	40/100-75	0	5.8	71.6	58	2.2

4.2 Modalanalys

En förändring i en provkroppens resonansfrekvens är ett direkt resultat av en förändring av styvheten. Därför presenteras den uppmätta fundamentala resonansfrekvensen och dess förändring för samtliga massatyper och provkroppar nedan. Under sammanställningen (kap. 4.2.6) redovisas den beräknade styvhetsmodulen och förändringen för respektive massatyp. Temperaturavvikelser mellan mättillfällena och placering av sensorerna (hammare och accelerometer) på provkroppen är faktorer som påverkar resonansfrekvenserna och därmed noggrannheten av mätningarna. Dessa två faktorer gäller särskilt för provning som utförs vid olika laboratorier då olika klimatskåp används och nya sensorer limmas på provkropparna. För att reducera avvikelser i utvärderingen som beror på temperaturskillnader mellan klimatskåpen korrigeras därför första mätningen av VTI (dag 21) mot mätningen dag 21 utförd av Peab. Uppmätt styvhetsutveckling efter dag 21 från respektive laboratorium kan därefter jämföras utan påverkan från eventuell temperaturskillnad mellan klimatskåp eller placering av accelerometer.

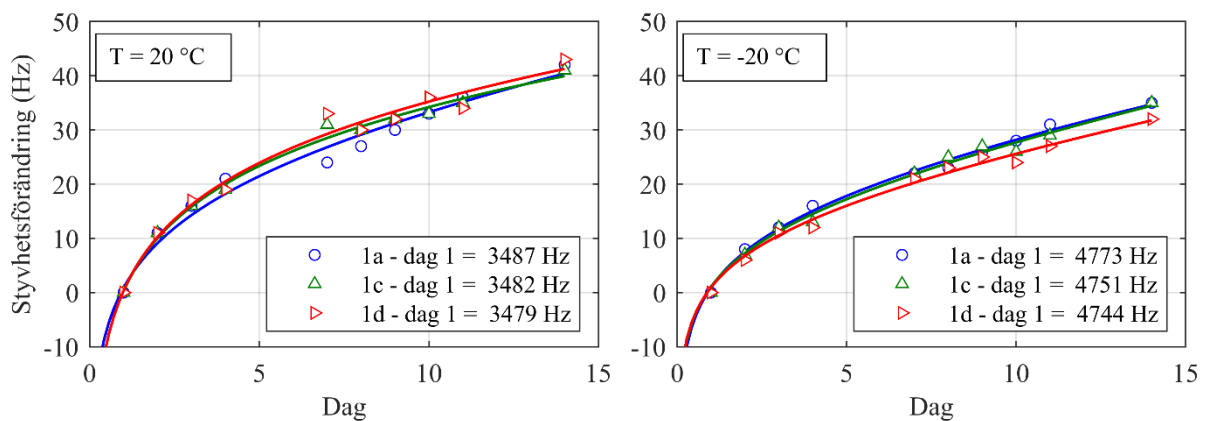
4.2.1 Massa 1 – ABT 11 70/100

Figur 3 visar den fundamentala resonansfrekvensen för provkropp 1a vid 20 °C som har testats vid ett och samma laboratorium upp till 322 dagar. Amplituden av resonansfrekvensen har normaliserats för att tydligare jämföra och påvisa förändringen i resonansfrekvens från dag 1 till dag 322. Resonansfrekvensen ökar konsekvent från dag till dag vilket är ett resultat av styvhetstillväxten i provkroppen.



Figur 3. Resonansfrekvens dag för dag för provkropp 1a vid 20 °C.

Förändringen i resonansfrekvens från dag 1 till dag 14 för samtliga tre provkroppar av massatyp 1 visas i Figur 4. De tre provkropparna som testades vid samma laboratorium visar en samstämmig utveckling av styvheten vid 20 °C och -20 °C. Värdet av resonansfrekvensen vid dag 1 för respektive provkropp och temperatur redovisas även i Figur 4.

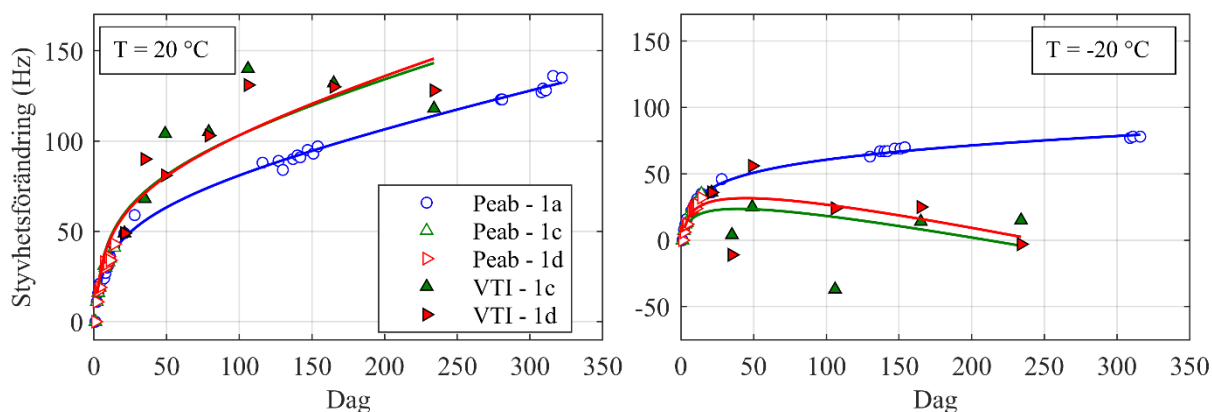


Figur 4. Förändring av provkropparnas resonansfrekvens från dag 1 till dag 14 för Massa 1

Vid den fortsatta mätningen dag 21 testades provkropp 1a av Peab och provkropparna 1c och 1d av VTI. Detta innebär att eventuella skillnader i de olika klimatskåpens temperaturegenskaper får en direkt inverkan på resultaten vid dag 21. Med utgångspunkten av att styvhetsökningen är närmast identisk för de tre provkropparna upp till 14 dagar så är det rimligt att anta att även dag 21 bör ge liknande resultat för de tre provkropparna. Avvikelser mellan provkropparnas utveckling

vid dag 21 kan därför indikera temperaturskillnader mellan klimatskåpen. Därför baseras den fortsatta utvärderingen av styvhetsförändringen utifrån samma nivå vid dag 21. Genom detta förfarande reduceras påverkan på resultaten av klimatskåpens olika egenskaper och utvecklingen av de olika provkropparna från dag 21 kan följas och jämföras.

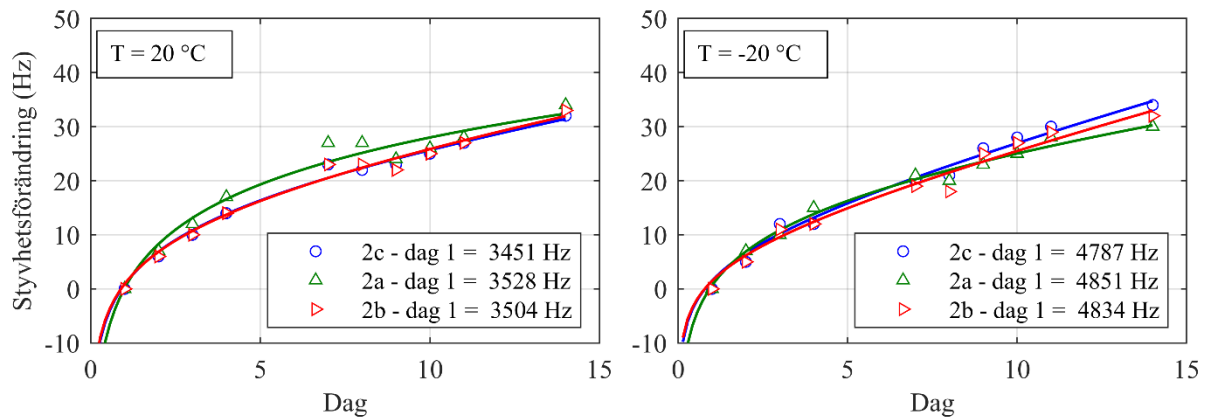
Figur 5 visar förändringen upp till 322 dagar där både Peab (provkropp 1a) och VTI (provkropp 1c och 1d) har utfört provningen. Resultaten av de tre provkropparna från denna långtidsuppföljning visar på en likvärdig förändring (ca 140 Hz) efter de sista mätningarna vid 20 °C. Det finns dock en spridning mellan laboratorierna vid ett antal mätpunkter. Denna spridning i resultaten mellan mättillfällena av provkropp 1c och 1d kan vara ett resultat av temperaturskillnader och klimatskåpens noggrannhet. Detta blir tydligt för resultaten vid -20 °C där små förändringar i temperatur har en relativt stor påverkan på uppmätt resonansfrekvens. Vid -20 °C avviker resultaten av provkropp 1a från provkropparna 1c och 1d. Spridningen i resultaten av provkropparna 1c och 1d antyder att temperaturen inte varit konstant vid respektive mättillfälle till skillnad mot den konsekventa utvecklingen i resonansfrekvens som påvisats genom mätningarna av provkropp 1a. Dessutom medförde hammarens mätuppställning som användes av VTI att höjdnivån av hammare mot provkropp i vissa fall behövde justeras för att uppnå en god lastimpuls (se Figur 1b). Olika tidsåtgång för att korrigera detta bidrog troligen till temperaturskillnader i provet, framförallt vid -20 °C. Denna typ av spridning mellan provkropparna testade av de två laboratorierna vid -20 °C visar sig i mätningarna av samtliga massatyper (1-5). Styvhetsutvecklingen vid -20 °C av samtliga massatyper baseras därför endast på mätningar som utförts av Peab.



Figur 5. Förändring av provkropparnas resonansfrekvens från dag 1 upp till dag 322 för Massa 1

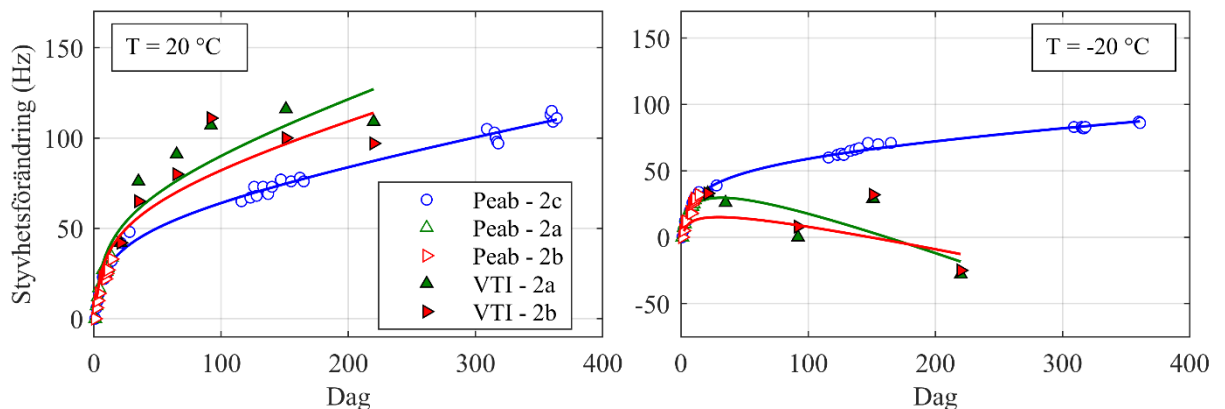
4.2.2 Massa 2 – ABT 11 70/100 (50 % RA + 160/220)

Den initiala styvhetsförändringen av massatyp 2 redovisas i Figur 6. De tre provkropparna av massatyp 2 resulterade i likvärdig styvhetsförändring från dag 1 till dag 14 både vid 20 °C och -20 °C.



Figur 6. Förändring av provkropparnas resonansfrekvens från dag 1 till dag 14 för Massa 2

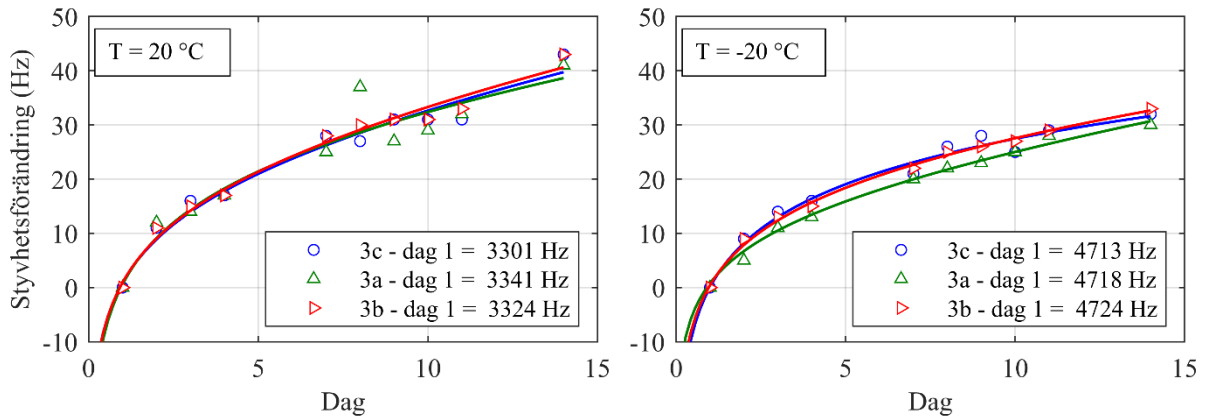
Liksom för massatyp 1, resulterade mätningarna av massatyp 2 vid de två laboratorierna i tydliga skillnader vid -20 °C. Variationen i mätresultat från dag till dag för provkropp 2a och 2b tyder på att störningar i form av temperaturskillnader påverkar resultaten vid -20 °C. Då samtliga mätningar vid 20 °C och resultaten från dag 1 till dag 14 visar ökande styvhet så är den reducerade styvheten för provkropp 2a och 2b som påvisas vid -20 °C i Figur 7 därmed missvisande och inte ett resultat av förändrade materialegenskaper. Den till synes reducerade styvheten över tid beror troligtvis på att temperaturen i provkropparna har varit högre än -20 °C vid tidpunkten för mätningarna.



Figur 7. Förändring av provkropparnas resonansfrekvens från dag 1 till dag 364 för Massa 2

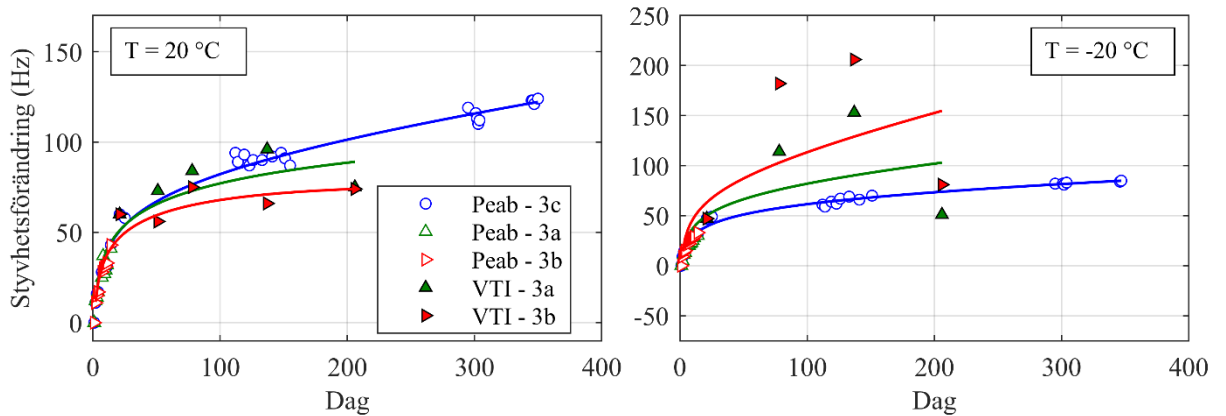
4.2.3 Massa 3 – ABT 11 70/100 (50 % RA + rejuvenator)

Även mätningarna av massa 3 och massa 4 gav lika resultat för de tre provkropparna från dag 1 till dag 14 (se Figur 8 respektive Figur 10).



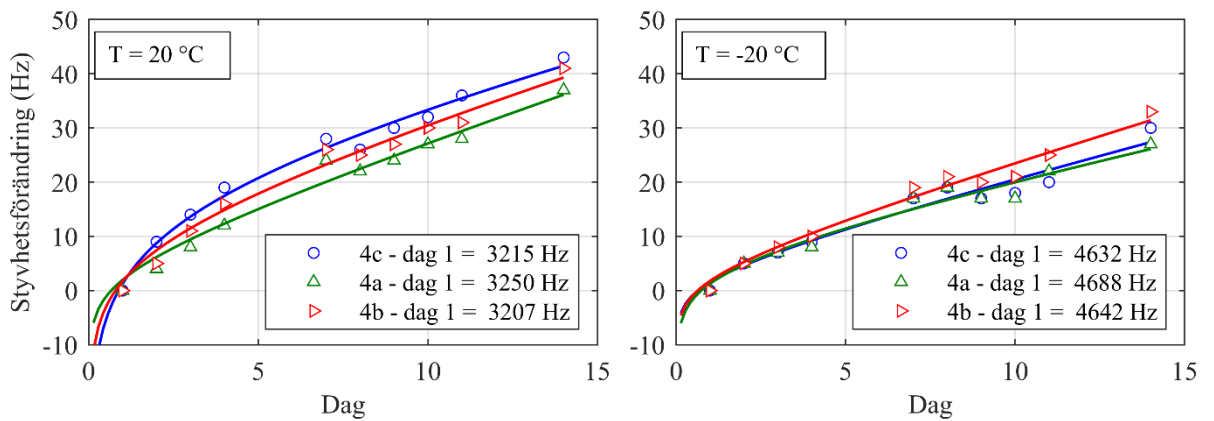
Figur 8. Förändring av provkropparnas resonansfrekvens från dag 1 till dag 14 för Massa 3

Figur 9 samt Figur 11 visar utvecklingen upp till 347 respektive 227 dagar vid 20 och -20 °C för provkropparna av massa 3 och massa 4. Resultaten från de två laboratorierna är relativt samstämmiga vid 20 °C men vid -20 °C sprider resultaten från de olika testtillfällena för provkropparna 3a och 3b (se Figur 8) samt 4a och 4b (se Figur 10). Även dessa resultat pekar på en för stor variation i provkropparnas temperatur från test till test. En konsekvent utveckling har dock uppmätts för provkropparna 3c samt 4c.

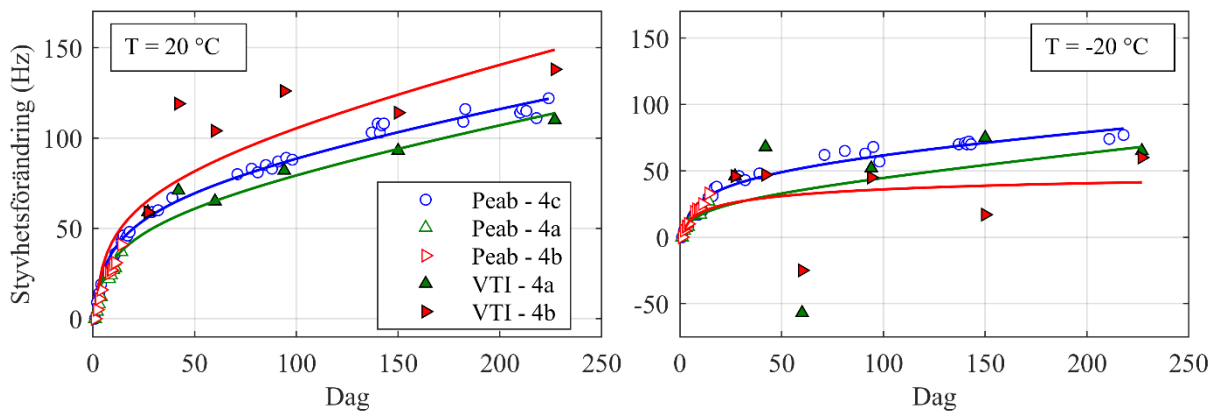


Figur 9. Förändring av provkropparnas resonansfrekvens från dag 1 till dag 347 för Massa 3

4.2.4 Massa 4 – ABT 11 70/100 (50 % RA + rejuvenator + vax)



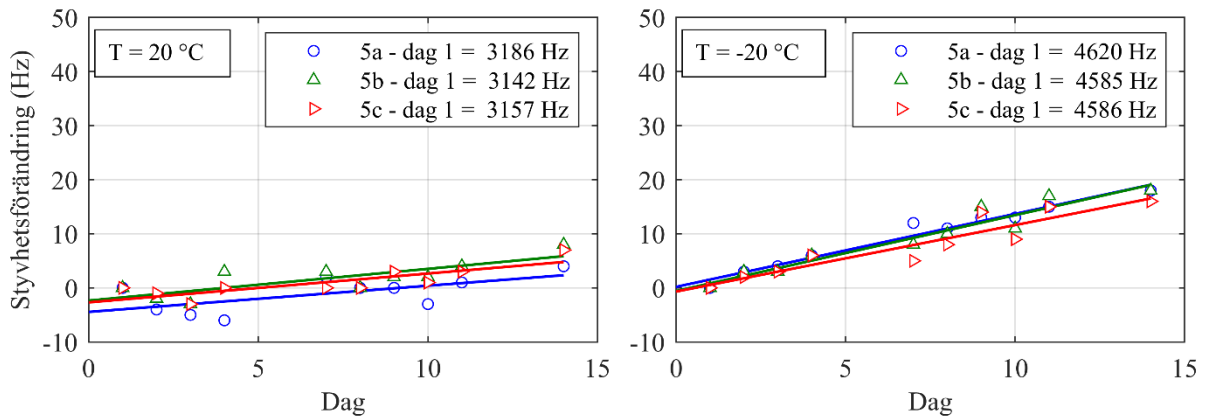
Figur 10. Förändring av provkropparnas resonansfrekvens från dag 1 till dag 14 för Massa 4



Figur 11. Förändring av provkropparnas resonansfrekvens från dag 1 till dag 227 för Massa 4

4.2.5 Massa 5 – ABT 11 40/100-75

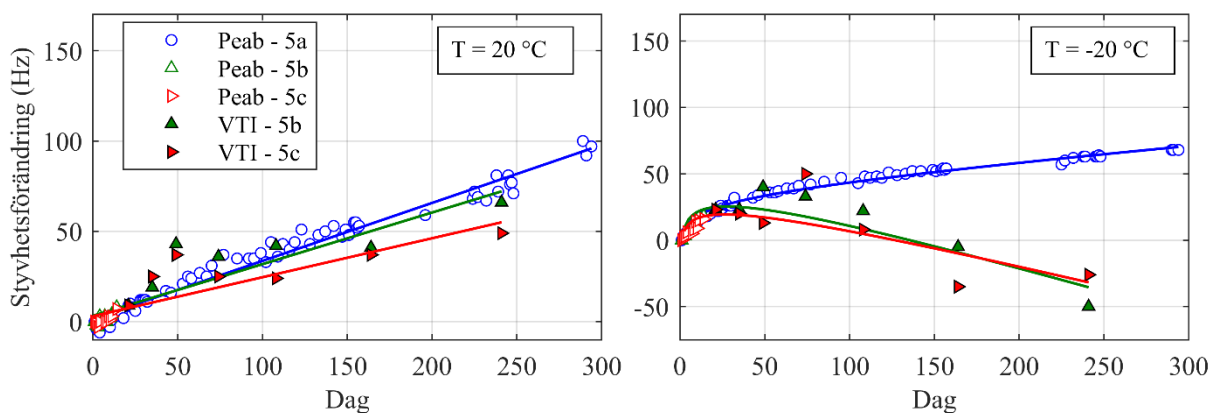
Mätningarna av provkropparna av massa 5 skiljer sig från övriga massatyper genom att den initiala styvheten inte ökar nämnvärt vid 20 °C (se Figur 12). Styvhetstillväxten är något högre vid -20 °C i jämförelse mot vid 20 °C men i båda fall ses snarast ett linjärt samband för de första 14 dagarna vilket inte var fallet för övriga massatyper. Dessa resultat indikerar att det polymermodifierade bindemedlet i massa 5 förändrar den initiala styvhetstillväxten i jämförelse mot de konventionella bindemedlen.



Figur 12. Förändring av provkropparnas resonansfrekvens från dag 1 till dag 14 för Massa 5

I Figur 13 redovisas den fortsatta provningen upp till 294 dagar efter tillverkning. Denna provning har med undantag för två uppehåll utförts närmast dagligen på provkropp 5a. Vid jämförelsen av provkropparna 5a, 5b och 5c vid 20 °C framgår en likvärdig styvhetsutveckling oberoende av vilket laboratorium som utfört mätningarna. Figur 13 visar även att styvheten av massa 5 vid 20 °C startar att öka efter de första 14 dagarna.

Vid -20 °C avviker dock mätningarna av provkropp 5b och 5c där styvheten visar en negativ utveckling. Med utgångspunkt av de omfattande provningarna av provkropp 5a som visar en tydlig utveckling och tidigare resultat vid -20 °C av övriga massatyper, så härleds även detta till att vara ett resultat av en ökad testtemperatur vid provningen.

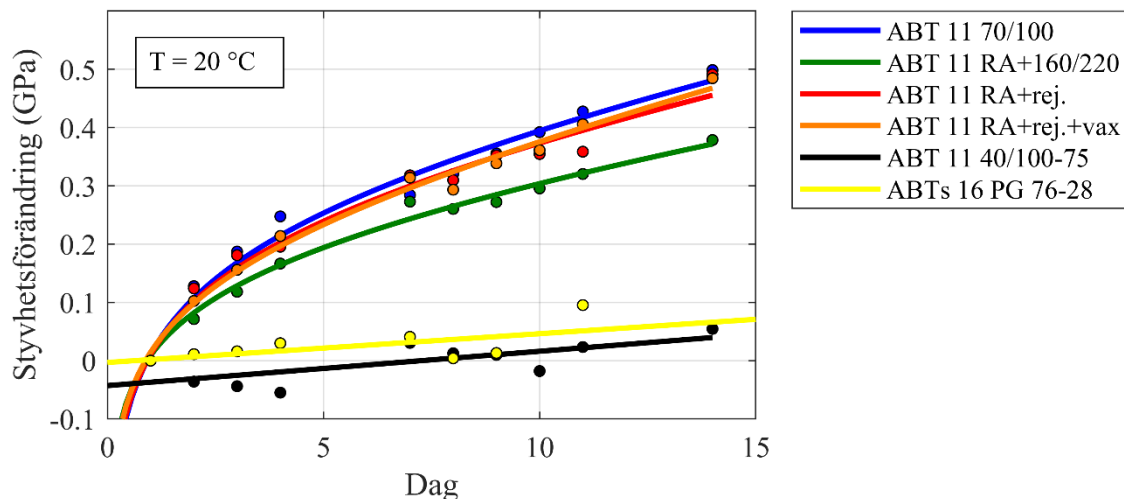


Figur 13. Förändring av provkropparnas resonansfrekvens från dag 1 till dag 294 för Massa 5

4.2.6 Sammanställning av styvhetsförändring

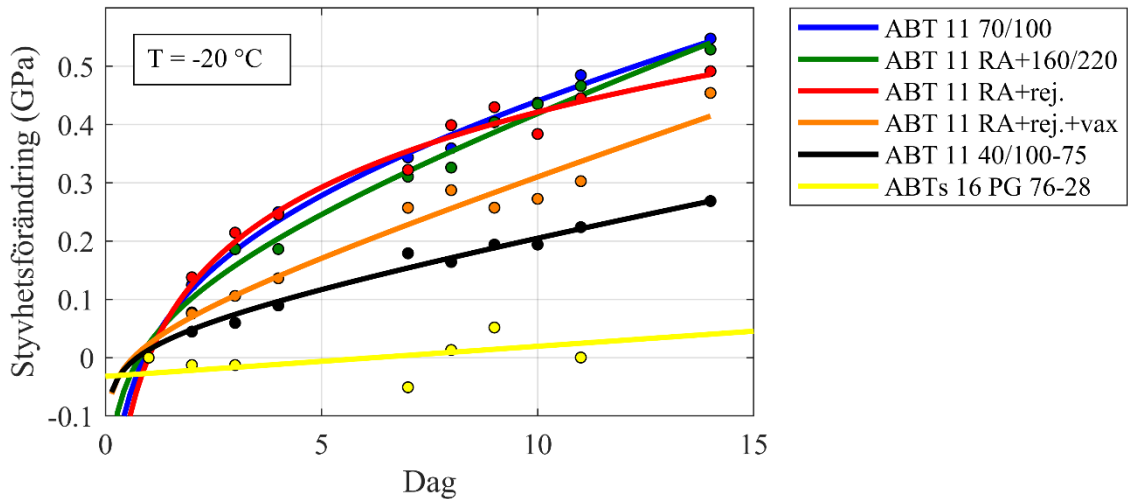
I sammanställningen av de respektive massatypernas styvhetsutveckling från dag 1 till dag 14 framgår det att massatyp 1 till 4 visar samma nivå av styvhetsförändring. Den initiala styvhetsstillväxten är alltså oberoende av det ingående material som används för att erhålla en ABT 11 70/100 enligt resultaten från modalanalys. Figur 14 visar styvhetsstillväxten från dag 1 till dag 14 för samtliga asfaltmassor vid 20 °C. Styvheten för mass typerna 1 till 4 ökar med mellan 400-500 MPa till dag 14.

Massatyp 5 som består av polymermodifierat bitumen står ut från de övriga massatyperna genom att inte uppvisa en styvhetsökning under den första 14 dagarna. I Figur 14 redovisas även resultat från en ABTs PG 76-28 som tillverkats i ett asfaltverk och där provkropparna borrats från den nylagda beläggningen. Provningsen på massan med PG 76-28 bindemedlet utfördes för att validera resultaten på den laboratorietillverkade massan 40/100-75 då dessa bitumen är likvärdiga. Oberoende av laboratorie- eller verkstillverkningen så resulterar de polymermodifierade asfaltmassorna i avvikande styvhetsutveckling de första 14 dagarna i jämförelse mot massatyperna 1 till 4.



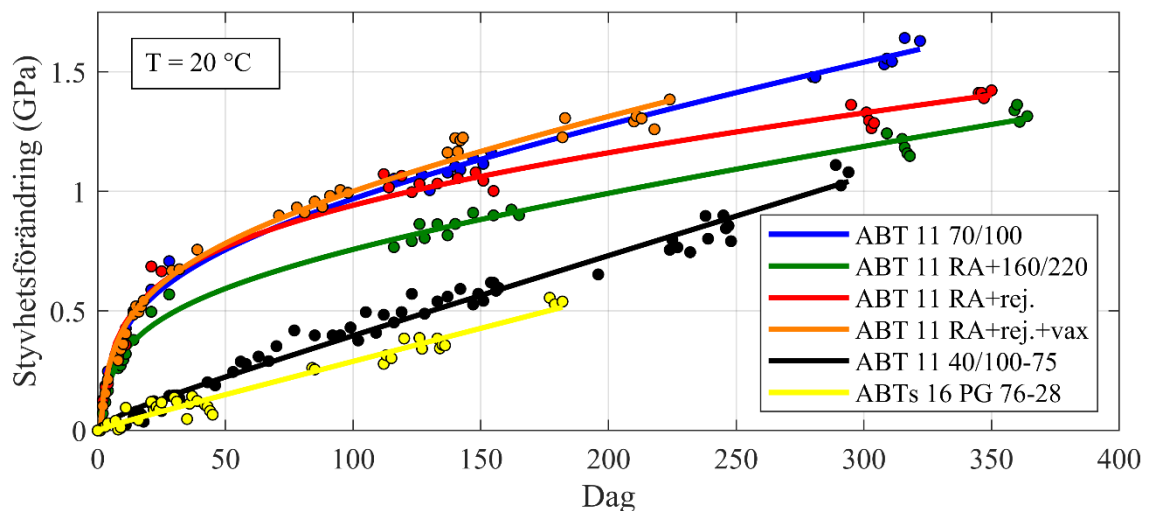
Figur 14. Styvhetsförändring vid 20 °C för samtliga massatyper från dag 1 till dag 14

Även vid -20 °C ökar styvheten för massatyperna 1 till 4 med ca 500 MPa från dag 1 till dag 14 (se Figur 15). En lägre styvhetsutveckling syns även för PMB massorna vid -20 °C i jämförelse mot massorna 1 - 4. En skillnad är dock att 40/100-75 uppvisar en styvhetsökning från dag 1 till dag 14 med nästan 300 MPa. Den verkstillverkade massan med PG 76-28 bindemedel resulterade, liksom vid 20 °C, inte i en ökning av styvheten. Även vid -20 °C avviker de polymermodifierade asfaltmassornas styvhetsutveckling från övriga massatyper.



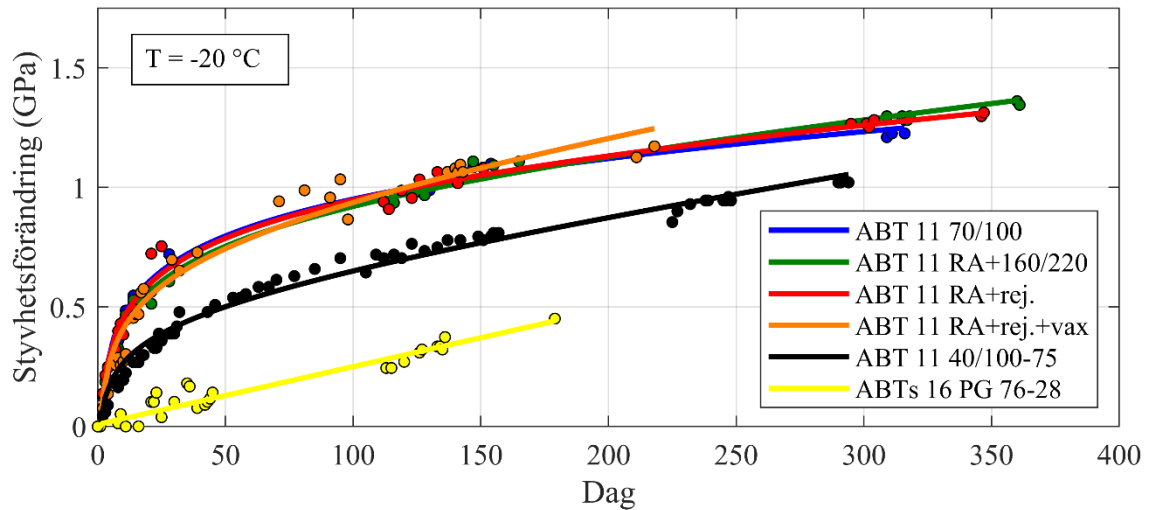
Figur 15. Styvhetsförändring vid $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ för samtliga massatyper från dag 1 till dag 14

Figur 16 visar styvhetsutvecklingen av samtliga massor upp till 364 dagar efter tillverkning. Efter ca 1 års tid har styvheten vid $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ökat med omkring 1500 MPa för mass typerna 1-4 som motsvarar en ABT 11 70/100. Styvhetsutvecklingen av PMB massorna som initialt ökar långsammare har efter nästan 300 dagar ökat med ca 1000 MPa. Trenden indikerar dock att även PMB massornas styvhet närmar sig samma nivå som övriga massor med tiden.



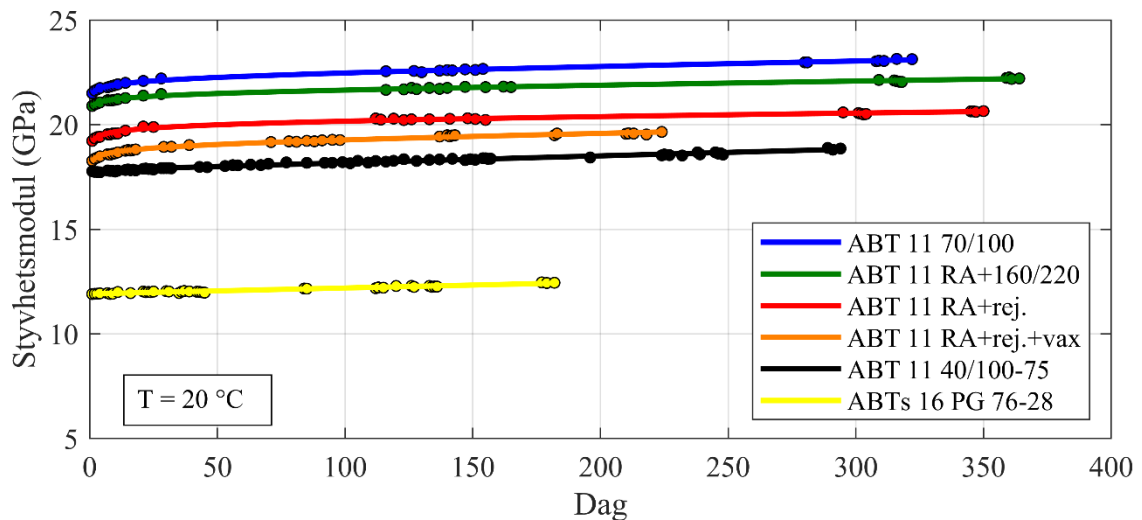
Figur 16. Styvhetsförändring vid $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ för samtliga massatyper från dag 1 till dag 364

Figur 17 visar styvhetsutvecklingen vid $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ baserat på mätningarna som utfördes av Peab upp till 364 dagar. Vid denna temperatur är styvhetsutvecklingen av mass typerna 1 till 4 närmast identisk. Utvecklingen av PMB massorna skiljer sig dock där 40/100-75 uppvisar en långsammare utveckling medan PG 76-28 har en betydligt lägre styvhetsutveckling än övriga massatyper.

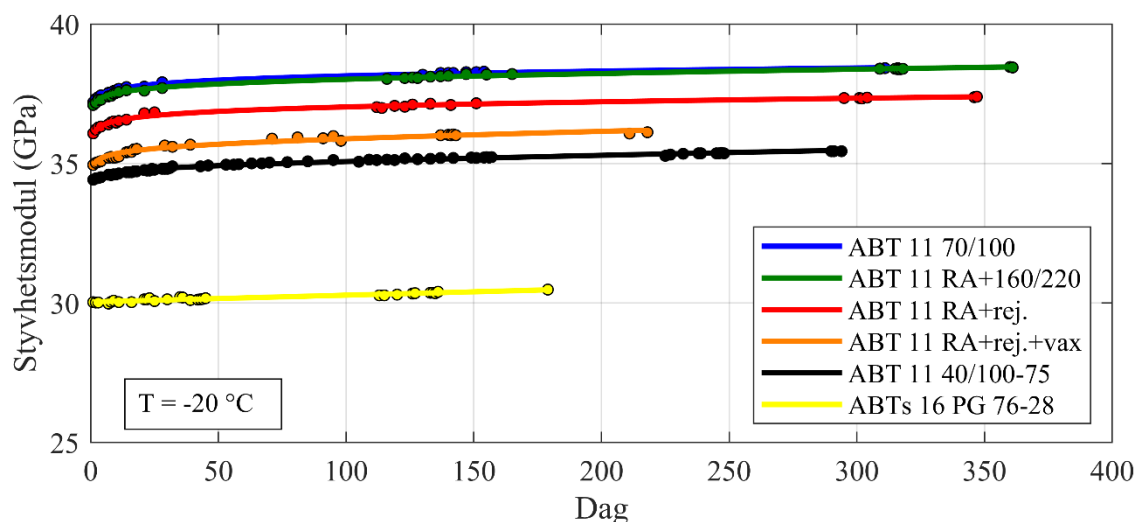


Figur 17. Styvhetsförändring vid -20 °C för samtliga massatyper från dag 1 till dag 364

Figur 18 och Figur 19 visar styvhetsmodulen vid 20 °C och -20 °C för samtliga massatyper. Resultaten visar en tydlig skillnad i styvhet mellan de laborierpackade provkropparna och fältpackade provkroppen. Detta beror till stor del på packningsmetodikerna men även till viss del på variationer i styvhet på basbitumen som använts till massorna. Basbitumenet till PG 76-28 hade en penetration i det högre spannet av 70/100 medan basbitumenet till 40/100-75 hade en penetration i det nedre spannet av 70/100.



Figur 18. Dynamisk styvhetsmodul vid 20 °C för samtliga massatyper från dag 1 till dag 364



Figur 19. Dynamisk styvhetsmodul vid -20 °C för samtliga massatyper från dag 1 till dag 364

Tabell 5 och 6 redovisar konstanterna (A, b och c) som har bestämts genom kurvanpassning mot mätdata från modalanalys vid 20 och -20 °C. Ekvation 1 har använts för att uttrycka styvhetsens utveckling över tid där E är den dynamiska styvhetsmodulen och x är antal dagar.

$$E = A + b * \log(x) + c * x \quad (1)$$

Tabell 5. Konstanter vid 20 °C och belastningsfrekvens mellan ca 3100-3200 Hz

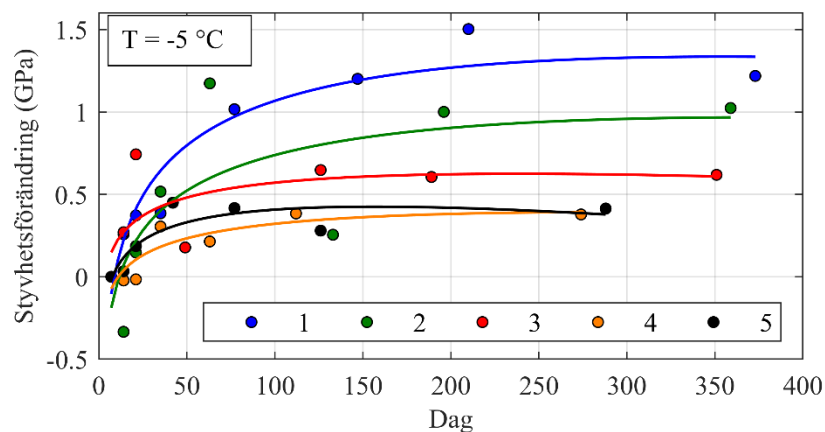
Asfaltmassa ABT 11	Tillsatt bitumen	RA (%)	Bmh (%)	A (GPa)	b	c
1	70/100	0	5.9	21.626	0.3969	0.0019
2	160/220	50	5.8	21.004	0.3249	0.0014
3	70/100	50	5.9	19.283	0.4735	0.0007
4	70/100	50	6.1	18.313	0.4665	0.0016
5	40/100-75	0	5.8	17.789	0.1101	0.0029

Tabell 6. Konstanter vid -20 °C och belastningsfrekvens mellan ca 4600-4800 Hz

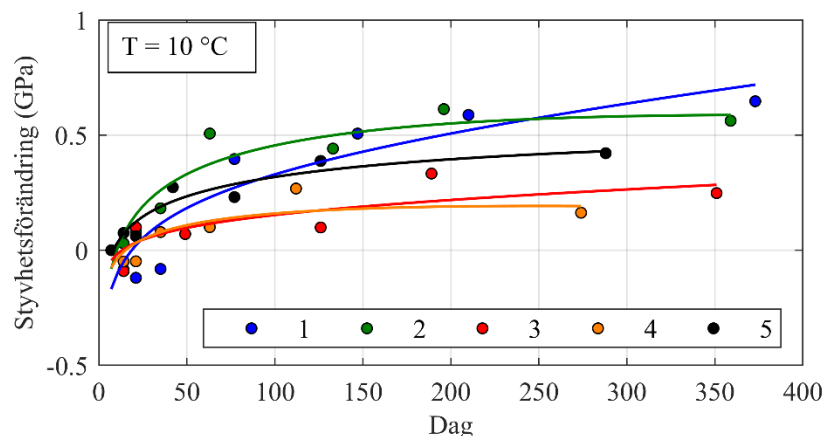
Asfaltmassa ABT 11	Tillsatt bitumen	RA (%)	Bmh (%)	A (GPa)	b	c
1	70/100	0	5.9	37.897	0.5098	0.0001
2	160/220	50	5.8	37.799	0.4666	0.0007
3	70/100	50	5.9	36.794	0.4703	0.0004
4	70/100	50	6.1	35.513	0.5292	0.0006
5	40/100-75	0	5.8	35.011	0.3351	0.0011

4.3 IDT

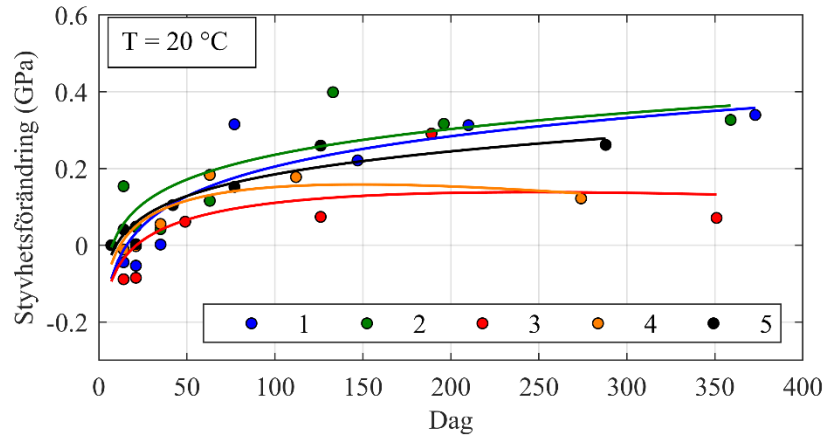
Figur 20 till 22 visar styvhetsförändringen för samtliga massor vid -5, 10 och 20 °C som karakteriserats genom IDT mätningar från dag 7 upp till ungefär 360 dagar. IDT provningen resulterade inte i samma konsekventa styvhetsutveckling som resultaten ifrån modalanalys (jämför mot Figur 16 och Figur 17). Resultaten visar en styvhetsökning för samtliga massor, men för massatyperna 2, 3, 4 och 5 vid -5 °C har styvhetsen uppmätts till nära sin högsta nivå redan efter omkring 50 dagar. Därefter går det inte att utläsa en stigande trend av styvhetsutveckling som karakteriserats genom IDT. Detta skiljer sig mot resultaten från modalanalys där en tydligt stigande trend karakteriserades för samtliga asfaltmassor. Ringanalyser av modalanalys har visat på bättre precision i jämförelse mot konventionella metoder som baseras på cyklisk belastning (Gudmarsson et al. 2019). Ytterligare skillnader mellan metoderna är att IDT provningen av massa 3 och 4 resulterade i något lägre styvhetsökning i jämförelse mot massa 1 och 2 vid samtliga temperaturer. Spridningen i uppmätt styvhetsförändring från dag till dag av respektive asfaltmassa gör det dock svårt att dra slutsatser om skillnader i styvhetsutveckling mellan massatyperna utifrån IDT provningen.



Figur 20. Styvhetsförändring från dag 7 vid -5 °C för samtliga massatyper

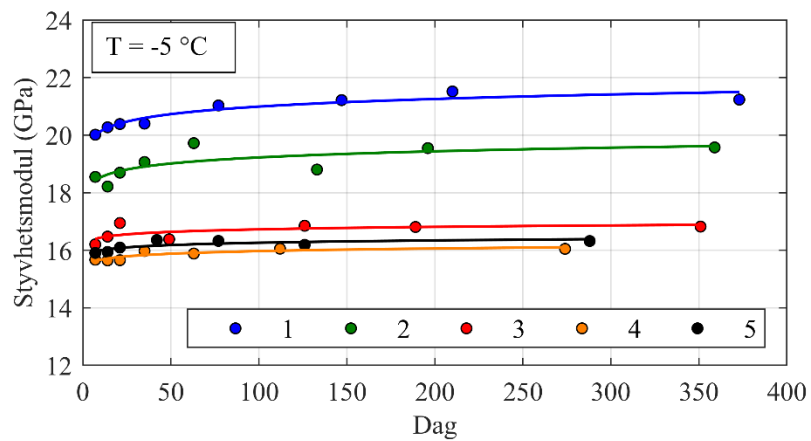


Figur 21. Styvhetsförändring från dag 7 vid 10 °C för samtliga massatyper

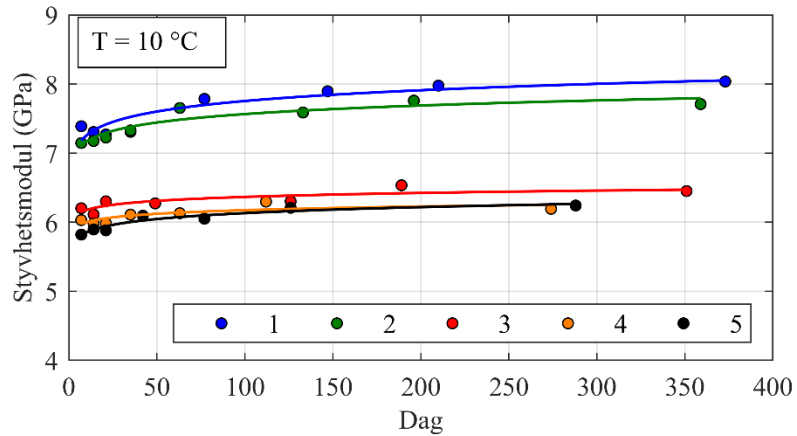


Figur 22. Styvhetsförändring från dag 7 vid 20 °C för samtliga massatyper

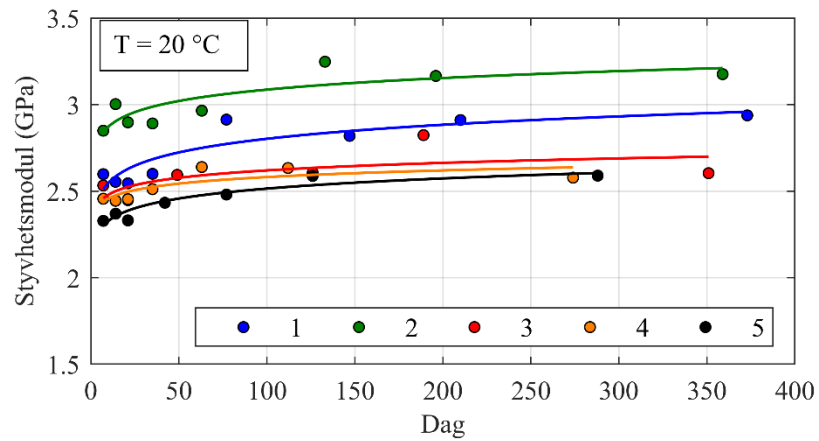
Figur 23 till Figur 25 visar styvhetsmodulerna som bestämts från IDT provning vid -5, 10 och 20 °C och en belastningsfrekvens av 2 Hz. I likhet med styvheten som bestämts från modalanalys resulterade massa 1 och 2 i den högsta styvheten från IDT provningen.



Figur 23. Dynamisk styvhetsmodul vid -5 °C för samtliga massatyper från dag 7 till ca dag 360



Figur 24. Dynamisk styvhetsmodul vid 10 °C för samtliga massatyper från dag 7 till ca dag 360



Figur 25. Dynamisk styvhetsmodul vid 20 °C för samtliga massatyper från dag 7 till ca dag 360

Tabell 7 till 10 redovisar konstanterna (A, b och c) i Ekvation 1 som har bestämts genom kurvanpassning mot mätdata från IDT vid -5, 10 och 20 °C.

Tabell 7. Konstanter från IDT bestämd styvhet vid -5 °C och 2 Hz

Asfaltmassa ABT 11	Tillsatt bitumen	RA (%)	Bmh (%)	A (GPa)	b	c
1	70/100	0	5.9	18.967	1.1259	-0.0014
2	160/220	50	5.8	17.619	0.8839	-0.0010
3	70/100	50	5.9	15.993	0.4290	-0.0008
4	70/100	50	6.1	15.273	0.3871	-0.0006
5	40/100-75	0	5.8	15.500	0.4722	-0.0013

Tabell 8. Konstanter från IDT bestämd styvhet vid 10 °C och 2 Hz

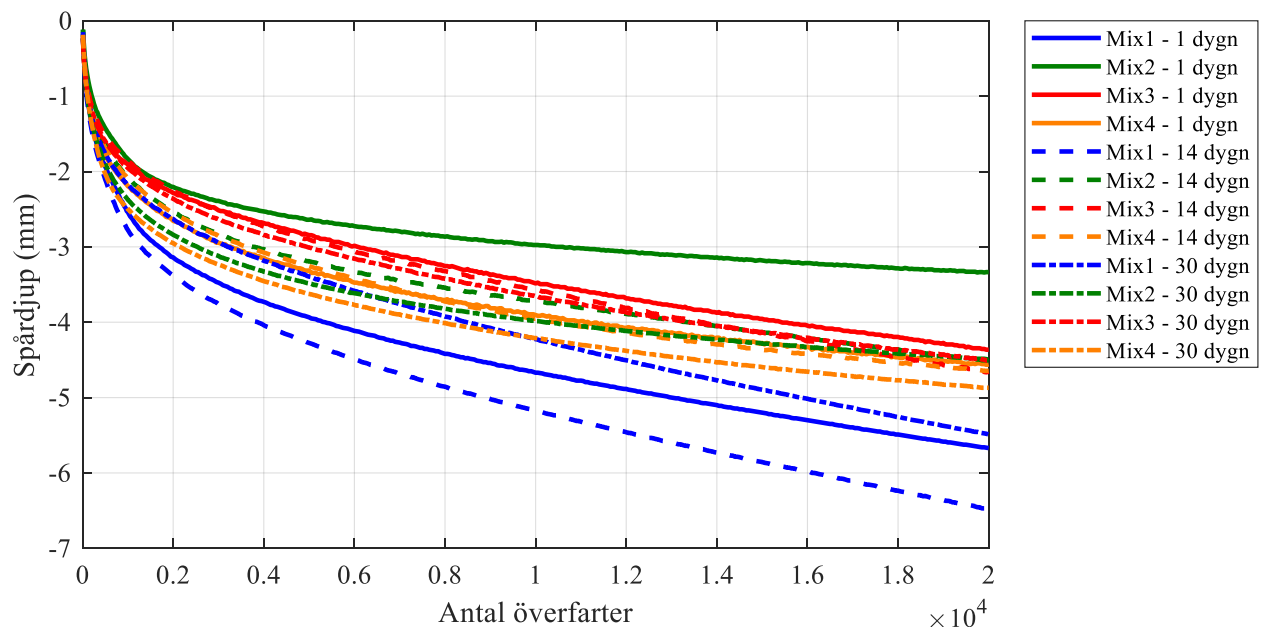
Asfaltmassa ABT 11	Tillsatt bitumen	RA (%)	Bmh (%)	A (GPa)	b	c
1	70/100	0	5.9	6.894	0.3807	0.0006
2	160/220	50	5.8	6.639	0.5108	-0.0006
3	70/100	50	5.9	6.026	0.1556	0.0002
4	70/100	50	6.1	5.758	0.2364	-0.0004
5	40/100-75	0	5.8	5.544	0.3037	-0.0002

Tabell 9. Konstanter från IDT bestämd styvhet vid 20 °C och 2 Hz

Asfaltmassa ABT 11	Tillsatt bitumen	RA (%)	Bmh (%)	A (GPa)	b	c
1	70/100	0	5.9	2.298	0.2507	0.0000
2	160/220	50	5.8	2.670	0.2045	0.0001
3	70/100	50	5.9	2.267	0.2066	-0.0004
4	70/100	50	6.1	2.217	0.2286	-0.0007
5	40/100-75	0	5.8	2.152	0.1768	0.0001

4.4 Wheeltracking

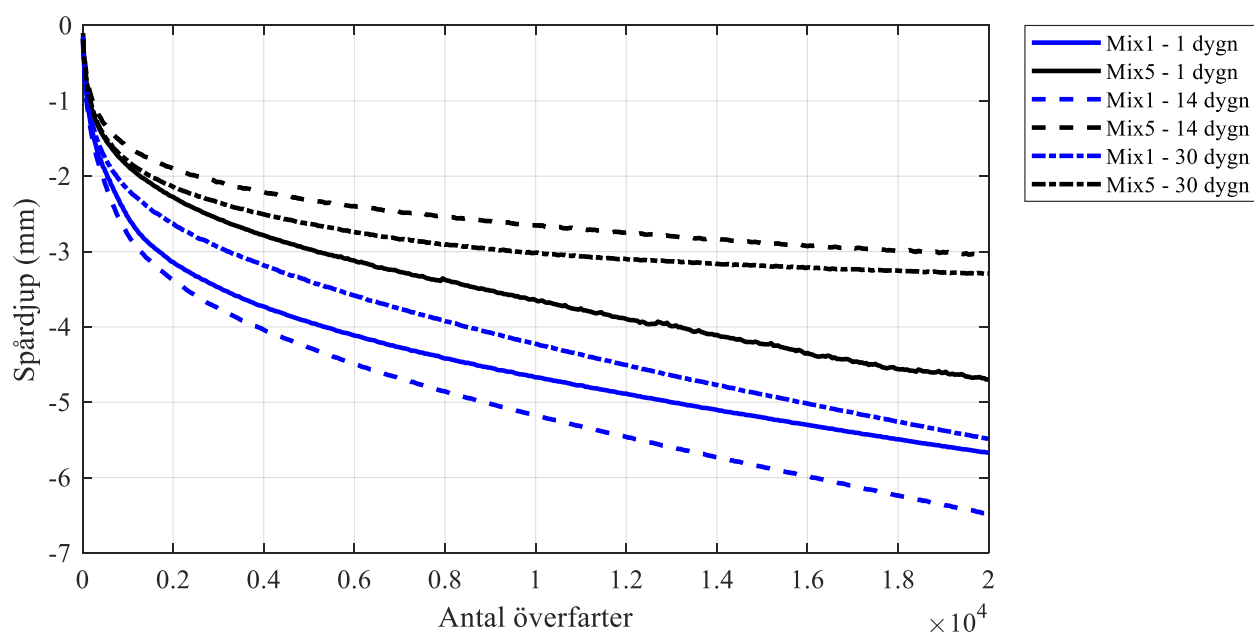
Wheeltracking vid dag 1 efter packning resulterade inte i större spårdjup i jämförelse mot dag 14 eller dag 30 för asfaltmassorna 1 till 4 (se Figur 26). Eftersom den snabbaste styvhetsutvecklingen för massorna 1 till 4 skedde under denna tid, så tyder detta på att spridningen i resultaten från Wheeltracking är större än effekten av styvhetsförändringen som karakteriserats genom modalanalys och IDT. Jämförelsen mellan massatyp 1 till 4 visar dock att massorna med returafalt leder till mindre spårdjup i jämförelse mot massa 1 som inte innehöll någon returafalt. Utvärderingen av permanenta deformationer genom wheeltracking indikerar därmed att massor som kompenserar styvare returafalt med rejuvenatorer eller mjukare bitumen inte tillför någon utökad risk för initiala deformationer. Resultaten indikerar däremot att 50 % returafalt blandat med rejuvenatorer eller mjukare bitumen förbättrar beläggningens deformationsmotstånd i jämförelse mot en beläggning med 70/100 bitumen och utan returafalt.



Figur 26. Spårdjup genom Wheeltracking för massatyp 1 till 4 efter 1, 14 och 30 dagar

Asfaltmassan med bindemedlet 40/100-75 (massa 5) är den enda massatyp som resulterar i lägre spårdjup vid dag 14 och dag 30 i jämförelse mot dag 1 (se Figur 27). Dessa resultat är intressanta med tanke på att styvhetsökningen startade först efter 14 dagar och ingen tydlig styvhetsökning karakteriserades för massa 5 vid 20 °C under de första 14 dagarna genom modalanalys.

I jämförelsen mot massa 1 så ger den polymermodifierade massan med 40/100-75 bitumen lägre spårdjup och därmed bättre deformationsegenskaper utifrån Wheeltracking testet. Detta indikerar att det inte finns en ökad risk för initiala deformationer i beläggningar med PMB trots att det inte sker någon tydlig styvhetsökning under de första 14 dagarna. Trots att massa 5 har lägre styvhet vid uppmätta temperaturer och belastningsfrekvenser i jämförelse mot massa 1, så ger massa 5 bättre deformationsegenskaper. Dessa resultat påvisar polymermodifierade asfaltmassors fördelar vid större belastningar och belyser vikten av att beakta egenskaper under många olika klimat- och trafikförhållanden.



Figur 27. Spårdjup genom Wheeltracking för massatyp 1 och 5 efter 1, 14 och 30 dagar

En sammanställning av samtliga Wheeltracking resultat redovisas i Tabell 10. Medelvärdena vid respektive dag visar att styvhetsökningen som påvisats genom modalanalys inte ger utslag i provning genom wheeltracking. Massa 5 står dock ut från övriga massor med förbättrade värden vid 14 och 30 dagar jämfört mot resultatet dag 1. Modifieringen med vax i asfaltmassan med 50 % RA och rejuvenator påverkar inte spårdjupet i de labbtillverkade asfaltmassorna. För de verkstillverkade asfaltmassorna ses dock en förbättring genom lägre spårdjup i massan modifierad med vax. Fortsatta studier med ytterligare provmetoder rekommenderas för att utreda om dessa resultat beror på tillverkningsmetodiken eller på noggrannheten i testmetoden.

Tabell 10. Sammanställning av Wheeltracking, spårdjup (mm) efter 20 000 överfarter.

Asfaltmassa	Blandning	Dag 1	Dag 2	Dag 14	Dag 30	Medel
1 - ABT 11 70/100 0 % RA	Labb	5.7		6.5	5.5	5.9
2 - ABT 11 70/100 50 % RA + 160/220	Labb	3.3		4.5	4.5	4.1
3 - ABT 11 70/100 50 % RA + rej.	Labb	4.4		4.7	4.5	4.5
4 - ABT 11 70/100 50 % RA + rej. + vax	Labb	4.6		4.6	4.9	4.7
5 - ABT 11 40/100-75 0 % RA	Labb	4.7		3.0	3.3	3.7
Medel		4.5		4.7	4.5	4.6
ABT 11 70/100 35 % RA + rej.	Verk	3.6	3.7			3.7
ABT 11 70/100 35 % RA + rej. + vax	Verk	2.3	2.2			2.3
Medel		3.0	3.0			3.0

5 SLUTSATS

Följande slutsatser kan dras av resultaten som presenterats i detta projekt:

- Styvhetsutvecklingen från dag 1 till dag 14 som karakteriserats genom modalanalys visar samma nivå av styvhetsförändring för massatyp 1 till 4. Detta visar att den initiala styvhetsstillväxten är oberoende av det ingående material som används för att erhålla en ABT 11 70/100 enligt resultaten från modalanalys.
- Resultaten från modalanalys visar att det polymermodifierade bindemedlet i massa 5 förändrar den initiala styvhetsstillväxten i jämförelse mot de konventionella bindemedlen. Styvhetsstillväxten av PMB massorna startade först efter ca 14 dagar vid 20 °C till skillnad mot övriga massor där styvheten ökade som snabbast de första dagarna efter tillverkning.
- Provning genom modalanalys upp till ett år visar skillnader i styvhetsutvecklingen mellan massa 5 och övriga asfaltmassor, men indikerar även att samtliga massor på sikt når en likvärdig styvhetsökning.
- IDT provningen av styvhetsmodul från dag 7 upp till 1 år visade en styvhetsökning av samtliga massor, men inga säkra samband om skillnader i styvhetsutvecklingen kunde utvärderas.
- Provning genom Wheeltracking visar att 50 % returafalt blandat med rejuvenatorer eller mjukare bitumen förbättrar beläggnings deformationsmotstånd i jämförelse mot en beläggning med 70/100 bitumen och utan returafalt. Detta indikerar därmed att varken rejuvenatorer eller mjukare bitumen som kompensation för styvare returafalt tillför någon utökad risk för initiala deformationer.
- Sammanfattningsvis så visar detta projekt att returafalt i kombination med rejuvenatorer eller mjukare bitumen inte försämrar en beläggnings initiala egenskaper i jämförelse mot en referensbeläggning. För PMB massan förbättrades dock deformationsegenskaperna 14 dagar efter tillverkning vilket även var tidpunkten då styvhetsstillväxten startade.

REFERENSER

- Gudmarsson, A. (2014). Resonance Testing of Asphalt Concrete, PhD Thesis, ISBN 978-91-87353-50-5, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm
- Gudmarsson, A. (2015) ”Utveckling av SBS-emulsioner med rejuvenatorer, Etapp 1”, SBUF rapport 12866.
- Gudmarsson, A., 2018. Utveckling av emulsioner med rejuvenatorer, SBUF Rapport 13276.
- Gudmarsson, A., 2019. Utvärdering av precision för styvhetsbestämning av asfalt genom modalanalys, SBUF rapport 13382.
- Lu, X., Said, S., Carlsson, H., Soenen, H., Heyrman, S., och Redelius, P., 2014. Performance evaluation of polymer modified bitumens on a heavily trafficked test road. International Journal of Pavement Research and Technology Vol. 7(No. 6): p381-388
- Olsson, K. 2018., Försökssträckor med ökad asfaltåtervinning - E20 Hova, SBUF Rapport 13459.
- Said, S.F., Hakim, H. & Eriksson, O., 2013. Rheological Characterization of Asphalt Concrete Using a Shear Box, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 41, No. 4.
- SS-EN 12697-26:2018. Vägmateriäl – Asfaltmassor – Provningsmetoder – Del 26: Styvhet.
- SS-EN 12697-1:2020. Vägmateriäl – Asfaltmassor – Provningsmetoder – Del 1: Lösliq bindemedelshalt
- SS-EN 12697-2:2019. Vägmateriäl – Asfaltmassor – Provningsmetoder – Del 2: Bestämning av kornstorleksfördelning
- SS-EN 1426:2015. Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av penetration.
- SS-EN 1427:2015. Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av mjukpunkt – Kula och Ringmetoden.
- SS-EN 12697-6:2020. Vägmateriäl – Asfaltmassor – Provningsmetoder – Del 6: Bestämning av skrymdensitet hos asfaltprovkroppar
- SS-EN 12697-5:2019. Vägmateriäl – Asfaltmassor – Provningsmetoder – Del 5: Bestämning av kompaktdensitet
- SS-EN 12697-22:2020. Vägmateriäl – Asfaltmassor – Provningsmetoder – Del 22: Bestämning av deformationskänslighet hos asfaltbeläggningar under rullande hjul
- TDOK 2013:0529, Krav, Bitumenbundna lager, Kenneth Lind, 2017-11-08, Trafikverket
- Tyllgren, P., 2010. Föryngring av returafalt med miljöanpassade tillsatsmedel, Skanska ra100215a, SBUF Rapport 12230.
- Waldemarson, A., Eriksson, O. & Ahmed A., 2018. Validering av ålderssamband för asfaltbeläggningar, SBUF Rapport 13132.
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., Frank, R. (2014). ”100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis”, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 92, 230-245