

Polymermodifisert bitumen - Egenskaper og krav

Varige veger 2011-2014

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 489



Wenche Hovin



Tittel

Polymermodifisert bitumen - Egenskaper og krav

Undertittel

Varige veger 2011-2014

Forfatter

Torbjørn Jørgensen, Wenche Hovin, Rabbira Garba Saba

Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

Seksjon

Vegteknologi

Prosjektnummer

603102

Rapportnummer

Nr. 489

Prosjektleder

Leif J. Bakløkk

Godkjent av

Nils S. Uthus

Emneord

PMB, testmetoder, DSR, ytelsesrelatert spesifisering, sporutvikling

Sammendrag

PMB-prøver ble karakterisert med tradisjonelle metoder og med dynamisk skjærreometer (G^* and MSCRT). Prøvingresultatene ble vurdert mot sporutvikling for PMB-asfalt. PMB-asfalten hadde etter 4-6 års brukstid mindre sporutvikling enn det forrige dekket med bitumen. En ytelsesrelatert PMB-spesifisering basert på nye prøvingsmetoder blir foreslått.

Title

Polymer Modified Bitumen - Properties and Specifications

Subtitle

Durable Roads 2011-2014

Author

Torbjørn Jørgensen, Wenche Hovin, Rabbira Garba Saba

Department

Traffic Safety, Environment and Technology Department

Section

Vegteknologi

Project number

603102

Report number

No. 489

Project manager

Leif J. Bakløkk

Approved by

Nils S. Uthus

Key words

PMB, test methods, DSR, performance related specifications, rutting

Summary

PMB-testing with ordinary methods and dynamic shear rheometer (G^* and MSCRT), gave a basis to propose a performance related PMB specification. Rutting performance of corresponding road sections with PMB, showed improved rutting resistance compared to the preceding asphalt with bitumen, after 4-6 years in service.

Forord

De siste åra har det bygd seg opp et stadig sterkere behov for et faglig løft innenfor vegteknologiområdet i Norge. Vi ser at det både er et behov og et potensial for å bedre kvaliteten og øke levetiden på asfaltdekkene. I Nasjonal Transportplan, i Statens vegvesens Handlingsprogram og i mange fylker legges det også opp til sterkere satsing på å ta vare på eksisterende vegnett.

Effektmålet til etatsprogrammet er «**Økt dekkelevetid og reduserte årskostnader for hele vegkonstruksjonen på det norske vegnettet**».

Etatsprogrammet har fokus på følgende tre hovedtema som utgjør hver sin arbeidspakke:

1. **Vegdekker**
2. **Dimensjonering og forsterkning**
3. **Kunnskapsformidling og implementering**

Programmets målsettinger skal nås gjennom tiltak på hele vegkonstruksjonen inkludert undergrunn/underbygning. I tillegg er det viktig at det fokuseres på å heve kompetansen både hos Statens vegvesen og andre byggherrer, entreprenører, konsulenter, undervisnings- og forskningsinstitusjoner.

Arbeidsgruppen for *Bindemidler i Vegdekker* har bestått av:

Wenche Hovin	Statens vegvesen, Sentrallaboratoriet i Trondheim
Rabbira Garba Saba	Statens vegvesen, Vegteknologiseksjonen i Vegdirektoratet
Torbjørn Jørgensen	Statens vegvesen, Vegteknologiseksjonen i Vegdirektoratet

Laboratoriearbeidet har hovedsakelig blitt utført på Sentrallaboratoriet i Region Midt.

Innhold

Forord.....	1
Innhold	2
Sammendrag	2
1 Innledning	3
1.1 Bakgrunn	3
1.2 Hovedmål i aktiviteten	5
2 Erfaringer med PMB etter 2008.....	5
2.1 PMB-grader benyttet.....	5
2.2 Nye PMB-spesifikasjoner i USA.....	6
2.3 Nye prøvingsmetoder med DSR.....	9
3 Oppfølging av utvalgte PMB-dekker	10
3.1 Metodikk for undersøkelsen.....	10
3.2 Bindemiddelprøver og aktuelle strekninger.....	12
3.3 Benyttede prøvingsmetoder for PMB	12
4 Resultater	13
4.1 Bindemiddeltesting	13
4.2 Korrelasjon mellom prøvingsresultater	20
4.3 Dekketilstandsmålinger – sporutvikling	22
4.4 Korrelasjon prøvingsresultater og sporutvikling.....	25
5 Diskusjon og anbefalinger	27
5.1 Bindemiddeltesting	27
5.2 Sammenheng sporutvikling og bindemiddelegenskaper	30
5.3 Ytelsesrelatert PMB-spesifikasjon	32
6 Konklusjoner og videre arbeid	36
6.1 Hva fant vi.....	36
6.2 Videre arbeid – behov for avklaring.....	37
7 Bibliografi.....	38
8 Vedlegg	39

Sammendrag

I Varige vegers delaktivitet *Vegdekker, Bindemidler* var målet forbedrede prøvingsmetoder og spesifikasjoner til hjelp for valg og bedømmelse av kvalitet på bindemidler, med vekt på polymermodifisert bitumen.

Siden 2008 har bruken av PMB i asfalt økt betraktelig. Mindre bruk av piggdekk, og større belastning fra tungtrafikken har gjort at deformasjon av asfalt har fått større betydning. PMB i asfalt bidrar til økt deformasjonsmotstand.

Statens vegvesen sentrallaboratoriet i Trondheim har fulgt opp kvalitet på PMB i flere år, og har etablert nye, moderne prøvingsmetoder til dette. Produktstandarden for PMB, NS-EN

14023 er til revisjon, og i den nye standarden vil også en ytelsesrelatert spesifikasjon (Performance Related Specification), basert på moderne prøvingsmetoder bli beskrevet.

I denne undersøkelsen ble fjorten PMB-prøver fra asfalteringsjobber lagt i 2009–2012 analysert. Vegstrekningene med de aktuelle PMB-prøvene ble fulgt opp på sporutvikling med data fra Vegdatabanken. Etter 4–6 år brukstid viser de fleste PMB-strekningene en klar nedgang i årlig sporutvikling sammenlignet med de forrige dekkene, som var basert på 70/100 bitumen.

I bindemiddelanalysen ble bl.a. kompleksmodul (G^*) og MSCRT-Jnr verdi bestemt. Alle PMB'ene tilfredsstilte det amerikanske PMB-kravet for *Høy trafikk*, 13 tilfredsstilte kravet for *Veldig høy trafikk* og 10 tilfredsstilte kravet for *Ekstremt høy trafikk*. Én PMB tilfredsstilte ikke kravet til spennings-sensitivitet (stress-sensitivitet).

Det var ingen klar rangering av PMB-prøvene i forhold til sporutvikling eller relativ sporutvikling.

Et forslag til ny ytelsesrelatert PMB-spesifikasjon ble utarbeidet. I denne erstatter to DSR-metoder mykningspunkt, og Bending Beam Rheometer erstatter Fraass' bruddpunkt. Nye benevnninger til PMB er også foreslått. Det foreslås fortsatt bruk av noen av de tradisjonelle prøvingsmetodene. Med nye og gamle prøvingsmetoder må det settes opp krav som passer til norske forhold mht. klima, trafikbelastning, vegkonstruksjon, bæreevne mv.

I rapporten foreslås videre arbeid for å avklare og forbedre enkelte prøvingsmetoder for PMB, og skape grunnlag for mer ytelsesrelaterte PMB-spesifikasjoner.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I Varige vegers delaktivitet 1: *Vegdekker, Bindemidler* er målet forbedrede prøvingsmetoder og spesifikasjoner til hjelp for valg og bedømmelse av kvalitet på bindemidler, med vekt på polymermodifisert bitumen. Riktige bindemiddelvalg bidrar til forutsigbar kvalitet og god økonomi til produserte asfaltdekker.

Det finnes mange typer modifisering av bitumen: med ulike polymerer (SBS, EPDM, EVA mv.), vokser og polyfosforsyrer (PPA) mv.

Noen modifiseringer gir stor forandring av bindemiddelegenskapene. Andre gir mindre omfattende endringer. Det kan også være bivirkninger ved en modifisering. Eksempelvis kan tilsetning av voks gi forbedrede høytemperaturogenskaper, men samtidig gi et spenningsfølsomt bindemiddel. Vedheftningsegenskapene kan også påvirkes negativt av enkelte tilsetninger. Under økende belastning (f.eks. tung punktlast) kan bindemiddelet miste kohesjon og deformasjonsmotstand. Tradisjonelle prøvingsmetoder fanger ikke opp slike svakheter, og bør derfor erstattes/suppleres med forbedrede prøvingsmetoder.

Våre bindemiddelspesifikasjoner prøver å beskrive ønskede egenskaper ved:

- *høy* brukstemperatur (for stabilitet)
- *midlere* brukstemperatur (gjennomsnittlige egenskaper, inkludert utmatting)

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

- *lav brukstemperatur (kaldsprøhet, oppsprekking og fleksibilitet).*

I tillegg kommer egenskaper for

- *korttidsaldring (herdning i asfaltverk)*
- *langtidsaldring (aldring i utlagt vegdekke), som foreløpig ikke benyttes i våre spesifikasjoner*
- *lagring og håndtering av bindemiddelet.*

I Norge benyttes europeiske standarder (NS-EN). Bitumenspesifikasjonene (NS-EN 12591) kom i 1999 og PMB-spesifikasjonene (NS-EN 14023) kom i 2005. Standardene er implementert i norske bindemiddelspesifikasjoner gjennom håndbok N200 Vegbygging.

Fagmiljøet i Europa følger nøye med i de amerikanske Superpave-spesifikasjonene som kom i 1994. I Superpave benyttes Performance Grades (PG xx-yy). PG xx-yy står for den lokale eller regionale klimaklassen (bruksklassen) som gjelder for den aktuelle vegstrekningen. I PG xx-yy er xx høytemperaturklassen og yy lavtemperaturklassen.

I PG-spesifikasjonen gjøres det en klimavurdering for området der vegdekket skal legges, med bestemmelse av maksimum forventet sommertemperatur i dekket (xx) og minimum forventet vintertemperatur i dekket (yy). Dette blir utgangspunkt for bindemiddelvalg og bindemiddelprøving. Superpave-spesifikasjonen ble undersøkt og tilpasset for norske forhold i samarbeidsprosjektet *Ny Asfaltteknologi*, som gikk 1994–1998 (Andersen, 1998–12).

I håndbok N200, vedlegg 10 (Statens vegvesen, 2014), beskrives en norsk tilpasning til PG-spesifikasjonen. Høytemperaturklassen (xx) er middelet av høyeste dekketemperatur i den varmeste 7-døgnperioden i en 30-års periode. Lavtemperaturklassen (yy) er den laveste dekketemperaturen i en 30-årsperiode.

Før 2010 skilte ikke Superpave-spesifikasjonen mellom ordinære bitumen og PMB. Flere stater i USA benyttet derfor en «Superpave-pluss» spesifikasjon, med tilleggskrav til elastisk tilbakegang og kraftduktilitet.

I standardiseringskomitéen CEN/TC336 *Bituminøse Bindemidler* arbeides det med å lage en fremtidsrettet PRS: «*Performance Related Specification Framework for Polymer Modified Bitumen*». Dette skal bli en «prøvespesifikasjon» i neste utgave/generasjon av NS-EN 14023. Moderne prøvingsmetoder som Dynamisk skjærreometer (DSR), Bending Beam Rheometer (BBR), kraftduktilitet og rotasjonsviskosimeter vil inngå. I tillegg vil veletablerte, tradisjonelle prøvingsmetoder fortsatt bli benyttet.

I prosjektet tok vi utgangspunkt i kommende PRS-prøvespesifikasjon, og valgte relevante prøvingsmetoder fra denne. Med disse må det spesifiseres krav som passer til norske forhold mht. klima, trafikkbelastning, vegkonstruksjon, bæreevne mv.

For å komme fram til et egnet spesifikasjonsforslag ble det i første omgang sett på prøvingsresultater for PMB-typer benyttet i Norge. Siden 2008 har det vært en markert økning i bruken av PMB-asfalt på høytrafikknett, med en andel på 10–15 % av vegvesenets bestillinger. Vegvesenet oppfatter at PMB med elastomerisk polymer (SBS-type) bidrar til redusert spordannelse, pga. bedre deformasjons-motstand og bedre slitestyrke mot piggedekk, i forhold til umodifisert bitumen.

I håndbok N200 er det spesifisert fem PMB-graden samt en «åpen» PMB-grad, der egenskapene kan dokumenteres. I praksis er det de fem spesifiserte PMB-gradene som brukes.

Etter hvert som vi har fått erfaringer med PMB på levert kvalitet og ytelse på veg, er det behov for å se på om kravene i Håndbok N200 er optimale. I tillegg finnes det andre bindemiddelmodifiseringer vi må kunne vurdere.

Tre norske bindemiddellaboratorier har i dag DSR-utstyr for avanserte prøvinger. De mest aktuelle prøvingene er kompleksmodul (G^*) og «Multiple Stress Creep Recovery Test» (MSCRT). Disse to metodene dekker høytemperaturegenskaper til PMB i den nye amerikanske PG-spesifikasjonen, AASHTO M332-14 (AASHTO, 2015). Disse to metodene vil også inngå i PRS-tillegget i neste utgave av NS-EN 14023.

1.2 Hovedmål i aktiviteten

I Varige veger var målet å foreslå mer rasjonelle og effektive prøvingsmetoder for PMB. De skulle ikke være for tidskrevende, og samtidig være relevante for ytelse i vegdekket. Hver metode må kunne knyttes til en ytelse eller bruksegenskap. Metodene skal inngå i forslag til nye PMB-spesifikasjoner. De to hovedaktivitetene var:

- Etablere DSR-metoder (G^* og MSCRT) og prøve ut disse på ulike PMB-typer. Etablere faglig grunnlag for spesifisering. Vurdere LSV-MP (DSR-mykningspunkt) som et alternativ til mykningspunktsbestemmelse.
- Utarbeide forslag til ytelses-/funksjonsrelatert bindemiddelspesifisering for PMB. Denne kan benyttes som en "skyggespesifisering" og prøves ut i spesialkontrakter

2 Erfaringer med PMB etter 2008

2.1 PMB-graden benyttet

Den nye PMB-graderingen fra NS-EN 14023 ble tatt inn i håndbok 018 første gang i 2008 og er nå videreført i håndbok N200. Fem PMB-graden er spesifisert, sammen med en åpen grad, for alternative PMB, se tabell 1. I 2008 var det lite bruk av PMB-asfalt i Norge, og man hadde lite erfaring med de nye PMB-spesifikasjonene. Sentrallaboratoriet i Trondheim ble samtidig bygd opp for å følge opp PMB-kravene.

Tabell 1. PMB-graden beskrevet i Håndbok N200 (2014), kap.622

40/100-65	65/105-80	65/105-60	75/130-65	75/130-80	Øvrige PMB
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------

Det er noen forskjeller i PMB brukt i Norge og i andre europeiske land:

- I Mellom-Europa brukes stivere basisbitumen (penetrasjon 50–100) og lavere polymermengde og eventuelt andre SBS-typer. Dette synes å gi en noe enklere reologi. I Tyskland er f.eks. PMB 25/55–55 mye brukt.

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

- I Norge brukes basisbitumen med penetrasjon 120–250 og trolig noe høyere polymermengde og/eller annen type SBS. Vanlig benyttede grader er PMB 75/130–65 og PMB 60/105–60.

Mykt basisbitumen skal sikre gode lavtemperaturoegenskaper. Type og mengde polymer (vanligvis SBS) skal bidra både til gode høytemperaturoegenskaper og til elastisitet og fleksibilitet ved lave temperaturer. I noen PMB-produkter tilsettes «cross-linking agents» som skal gi sterkere og mer lagringsstabil polynnnettverk. Bruk av tilsetningsstoffer kan tenkes å påvirke enkelte bindemiddelegenskaper.

Det ser ut som om de norske PMB-typene har noe forskjellig respons på varmelagring og RTFOT-herdning enn de som brukes i Mellom-Europa. I de første årene PMB ble benyttet hadde enkelte produkter problem med separasjon av polymer og bitumenfase i lagringsstabilitetstesten. Produsenten gjorde tiltak for å bedre lagringsstabiliteten og løste problemet.

Det er også en tendens til at mykningspunktet (MP) faller forholdsvis mye under lagringsstabilitetstesten, selv om det ikke er nevneverdig separasjon i prøven.

Leverandøren kan i noen tilfeller ha lagt inn en sikkerhetsmargin på fall i MP. Det har f.eks. blitt levert PMB med MP på 80 °C selv om kravet var minimum 65 °C. Selv om MP skulle falle under transport og lagring, vil den leverte PMB tilfredsstillende bestillerens krav. Det tillates en god del overlapp i PMB-gradene, og noen grader tilfredsstiller kravene til to PMB-grader.

Fram til 2016 har de benyttede prøvingsmetodene i vegvesenets byggherrekontroll vært:

- penetrasjon ved 25 °C
- mykningspunkt
- lagringsstabilitet 3 døgn 180 °C (mykningspunkt topp og bunn)
- elastisk tilbakegang ved 10 °C
- kohesjon ved kraftduktilitet ved 10 °C (kurve og energi)
- Fraass' bruddpunkt

Fraass' bruddpunkt regnes ikke som noen god metode for PMB pga. dårlig reproduserbarhet.

Høytemperaturviskositet er ikke med i kvalitetsoppfølgingen da det ikke er krav til viskositet. Leverandøren oppfordres i PMB-standarden til å oppgi anbefalte temperaturer for håndtering av PMB-produktet (pumping, lagring, blanding mv.). Sentrallaboratoriet har mulighet til å måle viskositet opp til 200 °C.

2.2 Nye PMB-spesifikasjoner i USA

Ideelt sett er en PRS-spesifikasjon «blind for modifiseringstype», slik tanken var for de amerikanske PG-spesifikasjonene: AASHTO M320 og M332 (AASHTO, 2010; AASHTO, 2015). Flere av PG-gradene krever et modifisert bitumen for at både høytemperatur- og lavtemperaturkravet skal oppfylles.

I AASHTO M332 bestemmes kompleks skjærmodul ($G^*/\sin \delta$) ved maksimum design dekketemperatur på originalt bindemiddel, og minimumskravet er 1,0 kPa.

Etter RTFOT-herdning bestemmes Jnr-verdien med MSCRT. Jnr benevnes «non-recoverable creep compliance» som på norsk blir: «ikke-gjenvinnbar krypdeformasjon» eller «uopprettet krypdeformasjon». Jnr-verdien er «ikke-gjenvinnbar deformasjon» delt på påført skjærspenning og har enheten kPa⁻¹.

M332-spesifikasjonen angir krav til Jnr-verdi for ulike trafikkbelastninger, se tabell 2.

Tabell 2. Benevninger og Jnr-verdier etter trafikkbelastning i AASHTO M332

Trafikkbelastning	Trafikkmengde	Hastighet	Jnr (3,2 kPa)
Standard, S-grad	< 3 millioner ESALs	> 70 km/t	≤ 4,5 kPa-1
Heavy, H-grad	> 3 millioner ESALs	20-70 km/t	≤ 2,0 kPa-1
Very heavy, V-grad	> 10 millioner ESALs	<20 km/t	≤ 1,0 kPa-1
Extreme, E-grad	> 30 millioner ESALs	<20 km/t	≤ 0,5 kPa-1

ESALs står for Equivalent Single Axle Loads (80 kN aksellast).

Amerikanerne vurderer å legge inn krav til elastisk tilbakegang fra MSCR-prøvingen. I AASHTO M332 vises en kurve for ønsket verdi (% Recovery vs. Jnr). Kurven skal skille mellom «elastomeriske og ikke-elastomeriske» PMB. Målet er å erstatte elastisk tilbakegang (duktilometer ved 25 °C) med % Recovery i MSCRT.

Utdrag fra de amerikanske spesifikasjonene i AASHTO M332 er vist i figur 1 og 2. Figur 3 viser prinsippet for beregning av Jnr-verdi og % Recovery i en MSCRT-krypmåling.

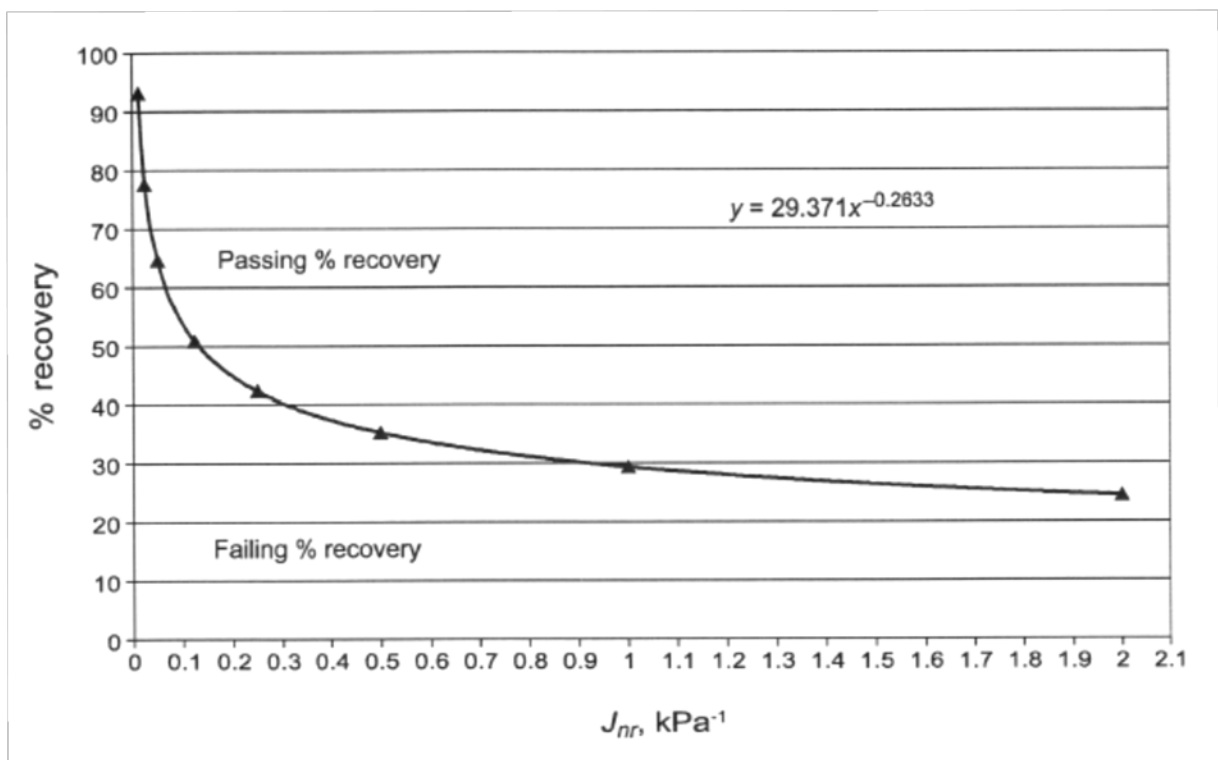
Ved økende spenningsnivå kan bindemiddelet deformeres raskere enn ønskelig. Forholdet mellom Jnr-økningen fra 0,1 kPa til 3,2 kPa belastning og Jnr-verdien ved 0,1 kPa belastning, benevnes Jnr-diff. Prosentvis økning angis. I AASHTO M332 skal Jnr-diff være ≤ 75 %. Det gis ingen begrunnelse for kravet i standarden, men det skal utelukke spenningsfølsomme (stress-sensitive) bindemidler, der deformasjonen øker for mye ved økt spenningsnivå.

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

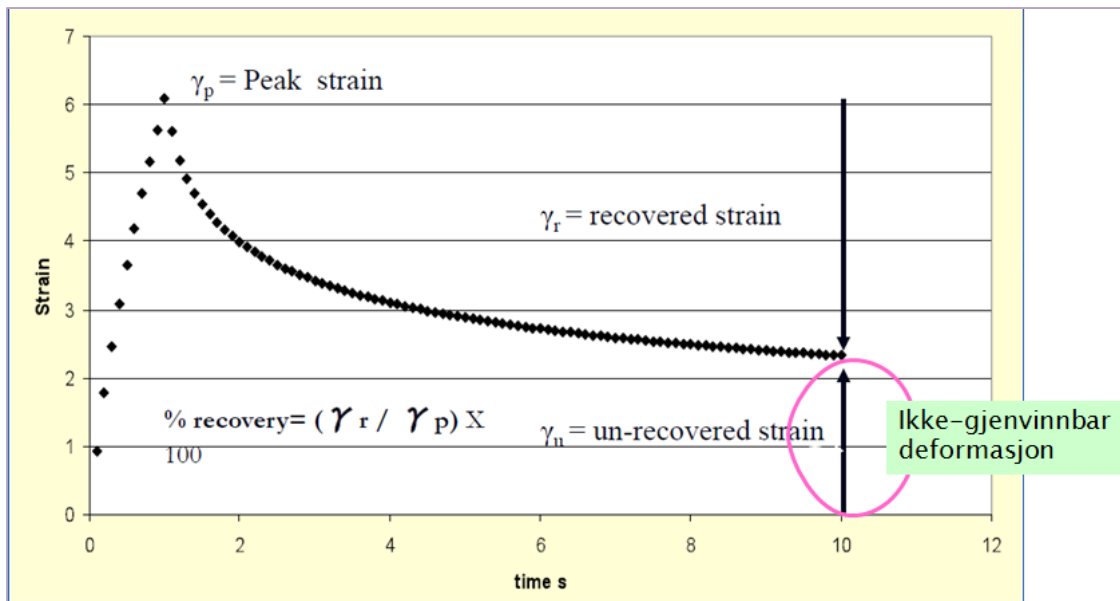
Table 1—Performance-Graded Asphalt Binder Specification^a

Performance Grade	PG 46			PG 52						PG 58					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40
Average 7-day max pavement design temp, °C ^b	<46			<52						<58					
Min pavement design temp, °C ^b	>-34	>-40	>-46	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
Original Binder															
Flash point temp, T 48, min °C	230														
Viscosity, T 316: ^c max 3 Pa*s, test temp, °C	135														
Dynamic shear, T 315: ^d G*/sinδ, min 1.00 kPa ^e test temp @ 10 rad/s, °C	46			52						58					
Rolling Thin-Film Oven Residue (T 240)															
Mass change, max, percent ^f	1.00														
MSCR, T 350: Standard Traffic "S" $J_{nr,3.2}$, max 4.5 kPa ⁻¹ J_{rdiff} , max 75% test temp, °C	46			52						58					
MSCR, T 350: Heavy Traffic "H" $J_{nr,3.2}$, max 2.0 kPa ⁻¹ J_{rdiff} , max 75% test temp, °C	46			52						58					
MSCR, T 350: Very Heavy Traffic "V" $J_{nr,3.2}$, max 1.0 kPa ⁻¹ J_{rdiff} , max 75% test temp, °C	46			52						58					
MSCR, T 350: Extremely Heavy Traffic "E" $J_{nr,3.2}$, max 0.5 kPa ⁻¹ J_{rdiff} , max 75% test temp, °C	46			52						58					

Figur 1. Utdrag fra PG-spesifikasjonen i AASHTO M332-14



Figur 2. Foreslått kravkurve for elastisk respons (% recovery) i forhold til J_{nr} -verdi etter MSCRT-prøving ved 3,2 kPa (AASHTO M332-14)



Figur 3. Eksempel på en kryp-syklus i MSCRT-måling (FHWA, 2011)

Lavtemperaturegenskapene bestemmes som tidligere med Bending Beam Rheometer på prøve etter RTFOT-herdning og PAV-aldring. For norske PMB vil prøvingen trolig utføres ved $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$, hvis man følger AASHTO M332. Kritisk kryptivhetstemperatur, S-verdi på maksimum 300 MPa beregnes, likeledes m-verdien på minimum 0,300 ved 60 s belastningstid.

2.3 Nye prøvingsmetoder med DSR

Et Dynamisk Skjærreometer (DSR) ble anskaffet på Sentrallaboratoriet i 2011 for å karakterisere ulike PMB-typer på en bedre måte. Målet var å sette seg inn i de nye amerikanske og europeiske DSR-metodene for spesifisering av PMB for å bidra til gode PMB-spesifikasjoner for fremtiden.

DSR-apparatet er innkjørt og metodene for bestemmelse av kompleksmodul ($G^*/\sin \delta$) og MSCRT (J_{nr}) er tatt i bruk. I 2014 deltok Sentrallaboratoriet i en europeisk ringanalyse på MSCRT-metoden. Denne ga verdifull erfaring i prøving av forskjellige umodifiserte og modifiserte bitumen.

En metode for bestemmelse av «DSR-mykningspunkt» fra CEN/TS 15324 ble også vurdert (CEN TC 336, 2008). I denne metoden utføres først et temperatursveip ved lav frekvens for å finne et «mykningspunkt» tilsvarende den ekviviskøse temperatur for $2,0\text{ kPa}\cdot\text{s}$. Deretter utføres et frekvenssveip ved denne temperaturen for å bestemme ekviviskøse temperatur ved svært lav skjærhastighet. Metoden var tenkt å erstatte «Zero Shear Viscosity» som skal gi god korrelasjon med spordannelse i wheel track prøving av asfaltmasse. Problemet med de to DSR-metodene er at de er svært tidkrevende, der én bestemmelse i verste fall kan ta flere timer. «DSR-mykningspunkt» kom ikke med i forslaget for Performance Related

Specifications (PRS) fra CEN TC336 i 2014. Vår innledende utprøving bekreftet at tidsforbruket ble svært høyt, og metoden ble derfor lagt bort.

Fordeler med DSR-prøving er at man kan:

- skille mellom PMB med svak polymerstruktur og sterk polymerstruktur
- skille mellom lav- eller høymodifiserte PMB med myke eller stive basisbitumen
- undersøke effekt av lavtemperaturasfalt-tilsetninger på bitumen og PMB
- undersøke gjenbruk i PMB-asfalt (f.eks. effekt av ulike typer asfaltgranulat på bindemiddelet i ny PMB-asfalt)

DSR-prøvingen utføres på en liten prøvemengde (noen få gram). Man trenger mindre mengde bindemiddel, og mindre mengde asfaltmasse til gjenvinning av bindemiddel enn det som brukes til tradisjonelle testmetoder.

De to aktuelle DSR-prøvingene kompleksmodul (G^*) og MSCRT, utfyller hverandre, siden de måler egenskaper ved ulike tøyingsnivåer.

G^* og $G^*/\sin \delta$ måles innenfor det lineære viskoelastiske området (LVE), der verdien er uavhengig av tøyningen. Vanligvis ligger det viskoelastiske området innfor 10 % tøyning ($\leq 0,1$ strain). G^* angir konsistens, og inneholder en viskøs og en elastisk komponent. Ulempen med G^* er at den dekker et snevert tøyingsområde, og at PMBs elastiske egenskaper blir underestimert.

MSCRT utføres langt utenfor det lineære viskoelastiske området, og tøyninger på 20–30 strain ikke er uvanlig. Den permanente tøyningen (un-recovered strain) i kryp-syklusen dividert med påført skjærspenning angir «non-recoverable creep compliance» eller «ikke-gjenvinnbar krypdeformasjon». Når asfaltdekket deformeres av trafikken, er tøyningen utenfor LVE-området, og J_{nr} -verdien synes å være mer berettiget enn $G^*/\sin \delta$ til å dekke deformasjon. I kryp-prøvingen kommer også de elastiske egenskapene til PMB bedre fram.

Siden J_{nr} -verdien i stor grad påvirkes av elastisk tilbakegang, kan svært myk og svært elastomerisk PMB få lav J_{nr} -verdi. For områder med høye statiske laster (bussholdeplasser, industrianlegg, kaier o.l.) er trolig slike myke PMBer ikke så godt egnet.

Med DSR-prøving kan man få mer pålitelige resultater med overkommelig tidsforbruk. Framtidige PMB-spesifikasjoner bør beskrive kvaliteten bedre og gjøre det enklere å velge mellom ulike PMB-produkter.

3 Oppfølging av utvalgte PMB-dekker

3.1 Metodikk for undersøkelsen

Spordannelse på høyt trafikkerte veger i Norge skyldes både deformasjon og piggdekkslitasje. Ved de største byene er det restriksjoner på piggdekkbruk, slik at det er forholdsvis lav andel piggdekk på kjøretøyene. Utenfor byene er piggdekkandelen høyere. Som en tommelfingerregel kan en si at:

- på høyhastighetsveger med liten kødannelse utenfor byene, har piggdekkslitasje stor betydning.

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

- på innfartsveger til de store byene som har kødannelse, bidrar deformasjon i større grad til spordannelse.

Slitasjetesting av finkornede asfaltblandinger med Trøger-metoden viser at SBS-modifisert PMB gir mindre slitasje enn 70/100 bitumen ved tørr slitasjeprøving ved/nær 0 °C (Lerfald, 2007).

Wheel track testing av asfaltblandinger (NS-EN 12697-22) er i dag referansemetoden for bedømmelse av deformasjon. Prøvingen skjer ved 50 °C. Wheel track testing viser som oftest en forbedret deformasjonsmotstand for asfalt med PMB i forhold til asfalt med ordinær bitumen.

I praksis blir resultatet på veg utslagsgivende for valg av dekke. I Statens vegvesens oppfølging av sporutvikling og jevnhet (IRI, International Roughness Index) måles vegnettet hvert år. Hvert felt i parsellen måles kontinuerlig av en mobil laserskanner, og median for hver 20 m rapporteres. Resultatene lagres i Vegdatabanken (NVDB) og brukes i PMS-systemet (Pavement Management System) til å prioritere aktuelle vegstrekninger for dekkefornyelse. Det brukes 90/10-kriterium for spordybde og IRI-verdi for å bedømme strekningen. 90-persentilen (90/10 -verdien) for en parsell/felt angir den verdi som 10 % av målepunktene har «dårligere» verdi enn.

I denne undersøkelsen var det ikke mulig å utføre kontrollerte laboratorieundersøkelser både på bindemidler og asfaltmasser, med oppfølging i forsøksstrekninger. Det ble valgt et alternativt opplegg.

I årene 2009–2012 ble det sendt inn en rekke PMB-prøver til Sentrallaboratoriet fra Statens vegvesens byggherrekontroll. Mange av disse var knyttet til asfaltkontrakter, som gjorde det mulig å finne ut hvor den aktuelle PMB-asfalten var lagt.

Dokumentasjonen på wheel track testing for de spesifikke strekningen var dessverre mangelfull. Wheel track var ikke godt innarbeidet i begynnelsen av prosjektet. I dag har bransjen i større grad erfaring med metoden.

Korttidsaldring med RTFOT var ikke i bruk på vårt laboratorium i denne undersøkelsen. Femten PMB-prøver ble derfor sendt til NTNUs laboratorium for RTFOT-herdning.

Metodikk

- Undersøkelsen baseres på 14 PMB-prøver, som fortsatt var tilgjengelige. Videre bindemiddelprøving ble utført på RTFOT-herdet materiale. I tillegg ble prøveresultater fra kontrollprøvingen benyttet: penetrasjon, mykningspunkt, kraftduktilitet (kohesjon), elastisk tilbakegang og lagringsstabilitet.
- Parseller fra de 14 vegstrekningene der de aktuelle PMB-prøvene ble brukt, ble identifisert. En gjennomgang i NVDB123 og PMS2010 av dekkehistorikk og tilstand på spor og jevnhet ble utført.
- Som referanse ble forrige generasjons dekke på samme parsell benyttet. De forrige dekkene var som regel Ab11 men også noen Ska11, alle med bitumen 70/100. De nye dekkene var stort sett Ab med PMB.

- For å kunne gi en rettferdig sammenligning med hensyn til sporutvikling og bindemiddelegenskaper/prøvingsmetode, ble det gjort et nytt utvalg av 8 egnede strekninger. Strekningene som ble filtrert bort kunne f.eks. ha dårlig bærelag, uvanlige spordata eller være frest/lappet av andre grunner enn deformasjon eller slitasje.

3.2 Bindemiddelprøver og aktuelle strekninger

I undersøkelsen inngikk alle fem PMB-gradene i håndbok N200, samt en spesialgrad for kaldt klima: PMB 90/150-75 – tilsammen 14 PMB-prøver. De undersøkte PMB kom fra fem produsenter.

Tabell 3 gir en oversikt over de utvalgte strekningene og PMB-grad benyttet i disse.

Tabell 3. PMB-grad og vegstrekninger i undersøkelsen

Prøve-ID	PMB-grad	Veg-strekning	Forrige dekke	Leggeår	ÅDT leggeår	Nytt dekke	Leggeår	ÅDT 2015
09-013	75/130-65	A	Ska 11	2001	9365	Ska11	2009	11400
09-021	65/105-80	B	Ska16	2004	34000	Ab16	2009	32000
09-022	70/120-60	C	Ab 11	2004	13370	Ab11	2009	17700
09-023	75/130-65	D	Ska11	2006	7800	Ab11	2009	11000
09-028	75/130-65	E	Ab11	2006	14730	Ab16	2009	16600
10-002	75/130-65	F	Ab16	1999	3800	Ab16	2010	6360
10-005	40/100-75	G	Ab11	2002	4800	Ab11	2010	7100
10-014	65/105-80	H	Ska11	2006	9203	Ab11	2010	9600
10-015	40/100-75	I	Ab11	2002	8351	Ab11	2010	8000
11-007	90/150-75	J	Agb11	1995	2400	Ab11	2011	3000
11-008	70/120-80	K	Ab11	2007	3827	Ab11	2011	4154
11-019	75/130-65	L	Ska11	1999	5350	Ab11	2011	5456
11-028	65/105-80	M	Ska11	2007	16700	Ska11	2011	22000
12-014	65/105-80	N	Ska16	1994	5350	Ab16	2012	7640

3.3 Benyttede prøvingsmetoder for PMB

De benyttede prøvingsmetodene er ført opp i tabell 4. Den europeiske standarden for MSCRT-metoden var under revisjon i 2015. Prosedyren for prøvepreparering vil bli noe endret i revidert standard. I denne undersøkelsen var prøveprepareringen lik for kompleksmodul- og MSCRT-måling.

Tabell 4. Bindemiddelprøving

Metode	Enhet	Standard	Kommentar
Penetrasjon, 25 °C	0,1 mm	NS-EN 1426	
Mykningspunkt	°C	NS-EN 1427	
Kohesjon, kraftduktilitet, 10 °C	J/cm ²	NS-EN 13589	
Elastisk tilbakegang, 10 °C	%	NS-EN 13398	
Lagringsstabilitet, 72 t, 180 °C. Differanse mykningspkt. (topp - bunn)	°C	NS-EN 13399 NS-EN 1427	
Prøving etter RTFOT 163°C: - Mykningspunkt	°C	NS-EN 1427	
Dynamisk Skjærreometer: Kompleksmodul ved 40 °C, 60 °C and 70 °C	kPa	NS-EN 14770	G* og G*/sin δ Beregnet temperatur der G*/sin δ = 2,2 kPa
- MSCRT, 60 °C Jnr (3,2 kPa), Recovery (3,2 kPa) Jnr-diff (spenningsfølsomhet)	1/kPa % %	prEN 16659	Høringsutgave 100 · (Jnr3,2 - Jnr0,1) / Jnr0,1

4 Resultater

4.1 Bindemiddeltesting

Resultater fra bindemiddeltesting etter metoder i håndbok N200 er vist i tabell 5. Resultater utenfor krav er med fet skrift.

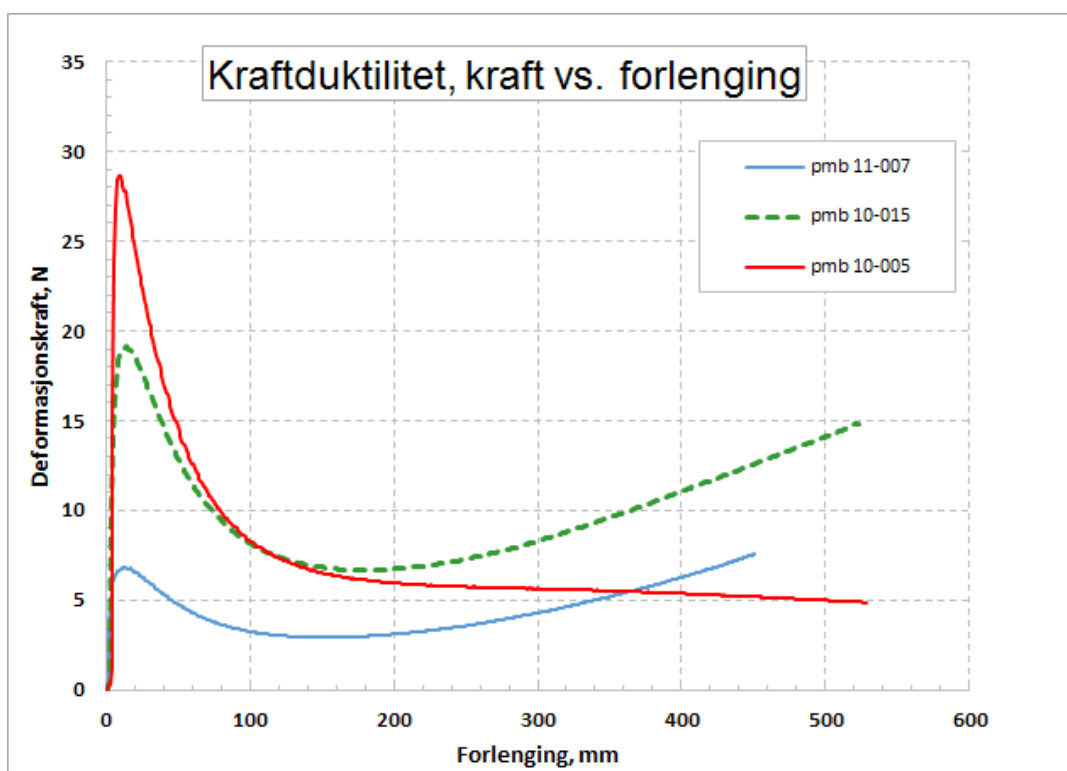
Tre prøver tilfredsstilte ikke kravet til MP på originalt materiale. Alle prøvene tilfredsstilte kravet til penetrasjon, elastisk tilbakegang og lagringsstabilitet.

N200-kravet til endret MP etter RTFOT er maks. 10 °C økning og maks. 2 °C fall. Hele 8 av 14 prøver ligger utenfor kravet til fall i MP.

Kohesjonsverdien fra kraftduktilitet er orienterende i Norge. Kun 4 av 14 ligger innenfor kravet i EN 14023 på minimum 2,0 J/cm² ved 10 °C. Tre ulike kraftduktilitetskurver er vist i figur 4.

Tabell 5. Bindemiddeltesting med metoder fra håndbok N200.

Prøve-ID	PMB- grad	Penetra- sjon 0,1 mm	Mykn. pkt. °C	Elastisk tilbake- gang, %	Kraft- duktilitet J/cm2	Lagringsstabilitet Mykningspkt, °C			Prøving etter RTFOT, °C	
						topp	bunn	differ.	MP	MP-diff
09-013	75/130-65	90	51,8	79	0,76	53,6	53,6	0,0	58,2	6,4
09-021	65/105-80	86	73,4	89	1,41	72,4	74,8	0,0	61,0	-12,4
09-022	70/120-60	112	68,2	97	1,17	69,8	70,8	-2,4	68,5	0,3
09-023	75/130-65	96	62,4	90	0,97	68,8	70,0	-1,0	56,0	-6,4
09-028	75/130-65	87	71,8	89	1,00	55,8	56,8	-1,2	57,2	-14,6
10-002	75/130-65	98	72,2	81	2,81	69,8	69,8	-1,0	72,0	-0,2
10-005	40/100-75	55	> 83,0	66	1,10	81,4	80,8	0,0	83,5	> 0,5
10-014	65/105-80	67	> 97,0	85	2,63	96	95,5	-0,6	80,0	-17,0
10-015	40/100-75	72	94,0	81	1,94	79,5	79,5	-0,5	82,0	-12,0
11-007	90/150-75	120	93,0	90	0,88	88,0	91	0,0	88,0	-5,0
11-008	70/120-80	111	86,0	98	0,95	86	84	3,0	80,0	-6,0
11-019	75/130-65	97	72,6	82	2,77	69,6	69,6	-2,0	70,6	-2,0
11-028	65/105-80	75	62,6	79	1,46	56,2	55,2	0,0	67,0	4,4
12-014	65/105-80	73	94,0	84	1,98	89,5	91	1,5	79,2	-14,8



Figur 4. Kraftduktilitetskurver (kraft/deformasjon) for tre PMB. Prøve 10-005 har utypisk kurve for SBS-modifisert PMB, mens prøve 10-015 har en typisk kurve.

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

Resultater fra bindemiddeltesting med DSR er vist i tabell 6. Resultater utenfor det amerikanske kravet for Jnr-diff (maks. 75 %) er vist med uthevet skrift. Resultater fra DSR-målingene (MSCRT og kompleksmodul) er også vist i vedlegg 1, 2, 3 og 4.

PG-xx temperaturen, dvs. temperaturen der $G^*/\sin \delta = 2,2$ kPa, ble beregnet. Prøvens PG-verdi var en parameter vi ønsket å få med. I AASHTO M332 er det ikke krav til $G^*/\sin \delta$ etter RTFOT, da egenskapen dekkes av krav til Jnr.

MSCRT-prøvingen ble utført ved 60 °C. Denne temperaturen benyttes i forslaget til PRS i høringsutgave til revidert EN 14023. Høyeste målte dekketemperatur i Norge ligger på ca. 60 °C.

MSCRT-målingene ble utført ved tre skjærspenninger: 0,1 kPa, 3,2 kPa og 6,4 kPa (se vedlegg 1). I den amerikanske spesifikasjonen er til Jnr bestemt ved 3,2 kPa skjærspenning.

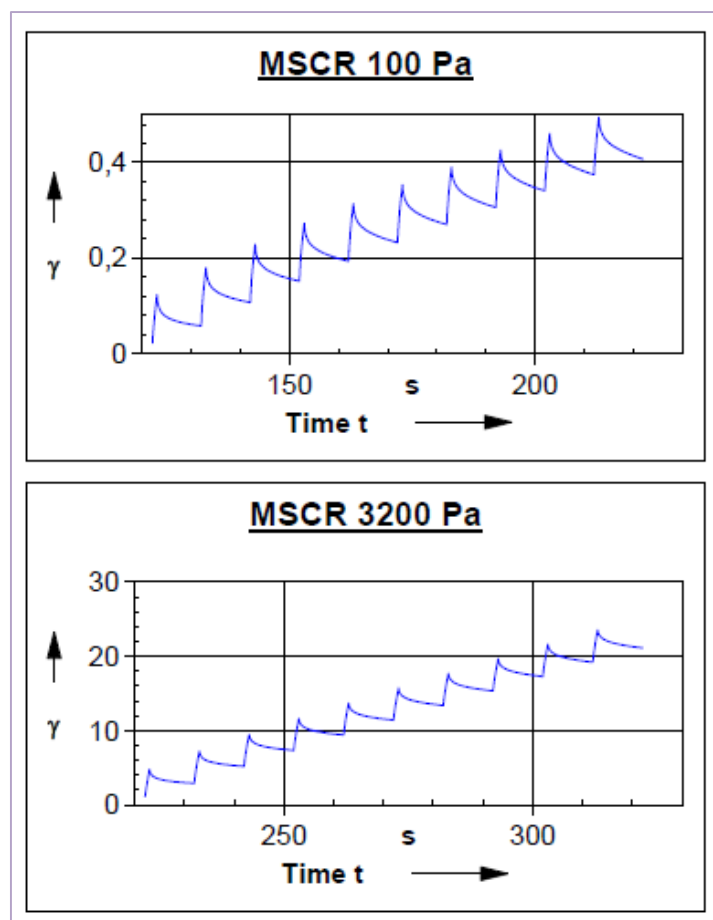
Figur 5 viser eksempel på MSCRT-krypkurver på en elastomerisk PMB. Det utføres ti krypsyklus. I hver syklus påføres prøven en spenning i 1 sekund, og deretter avlastes prøven i 9 sekunder. Deformasjonen (γ) måles kontinuerlig. Middelet av ikke-gjenvinnbar krypdeformasjon og elastisk tilbakegang for de ti kurvene beregnes, og rapporteres som Jnr-verdi og % recovery ved påført spenning (f.eks. 3,2 kPa). Jnr-diff beregnes som den relative differansen mellom Jnr (3,2 kPa) og Jnr (0,1 kPa). Se også eksempler på tre målinger i vedlegg 5.

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

Tabell 6. Bindemiddeltesting med DSR på RTFOT–herdede PMB– prøver.

Prøve-ID	PMB- grad	G*/sin δ			δ 40 °C	δ 60 °C	δ 70 °C	MSCRT (3,2 kPa) @ 60 °C			Temperatur G*/sin δ = 2,2 kPa, °C
		40 °C	60 °C	70 °C				Jnr, 1/kPa	Jnr-diff, %	R, %	
09-013	75/130-65	95	7,6	2,6	66	68	72	0,70	31	30	72
09-021	65/105-80	92	8,8	3,3	63	63	67	0,36	25	53	74
09-022	70/120-60	50	5,3	2,2	61	64	67	0,65	60	52	70
09-023	75/130-65	75	6,2	2,9	66	71	77	1,25	29	13	74
09-028	75/130-65	90	7,4	2,5	66	69	72	0,83	29	23	71
10-002	75/130-65	70	6,9	2,9	62	59	59	0,083	-9	90	73
10-005	40/100-75	239	19,5	8,8	64	67	63	0,28	200	43	87
10-014	65/105-80	298	20	8,6	56	60	55	0,086	31	74	86
10-015	40/100-75	237	16,3	4,9	59	61	66	0,048	12	88	77
11-007	90/150-75	93	7,17	2,4	60	64	68	0,29	74	69	71
11-008	70/120-80	57	5,4	2,0	62	67	70	0,18	42	86	69
11-019	75/130-65	80	7,2	2,9	64	61	61	0,10	-10	88	73
11-028	65/105-80	192	14,0	4,3	58	67	72	0,29	15	44	76
12-014	65/105-80	173	14,5	5,0	53	59	63	0,11	46	75	78

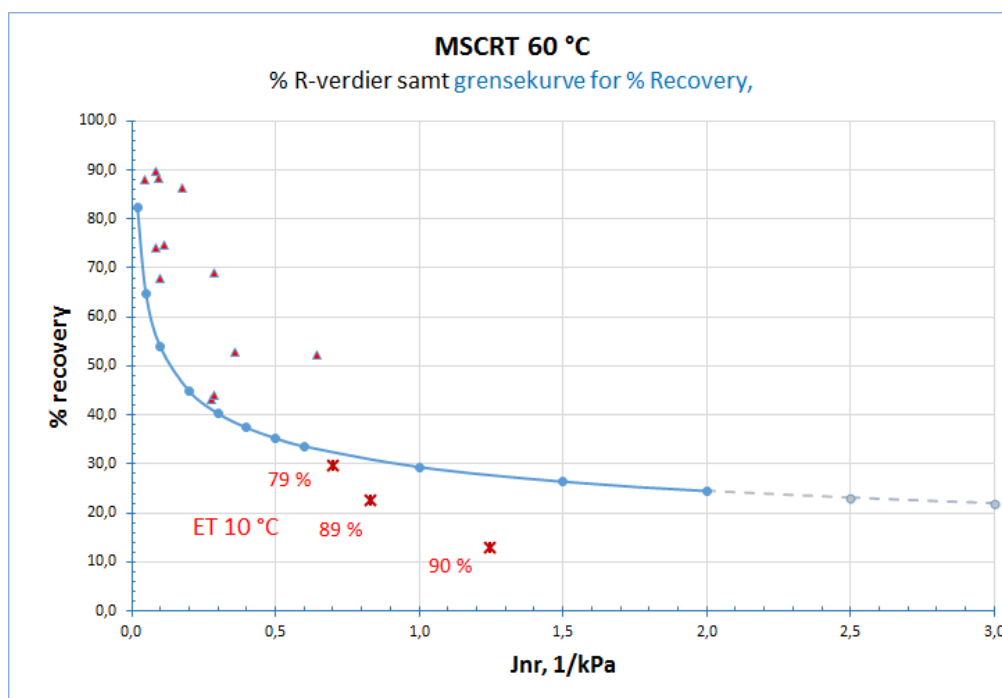
En av PMB–prøvene har høyere verdi for Jnr–diff (fet skrift i tabellen) enn kravet på maks. 75 %. Dette var en PMB som var tilsatt voks. En annen PMB med høy Jnr–diff (74 %), er en myk, høyelastisk PMB.



Figur 5. MSCRT 60 °C. Krypkurver med 0,100 kPa og 3,200 kPa påført skjærspenning

En grensekurve for % recovery er innført i AASHTO M332 for å skille mellom elastomeriske og ikke-elastomeriske PMB. Grensekurven er vist i figur 6. Resultater som ligger under kurven representerer «ikke-elastomeriske» bindemidler.

Figur 6 viser våre resultater på % recovery for PMB-prøvene etter RTFOT. Tre prøver ligger under grensekurven. For elastisk tilbakegang (ET) ved 10 °C på original prøve, hadde disse likevel gode verdier. De norske PMB-kravene vektlegger elastisitet og fleksibilitet ved lave temperaturer som skal sikres med høy ET ved 10 °C.

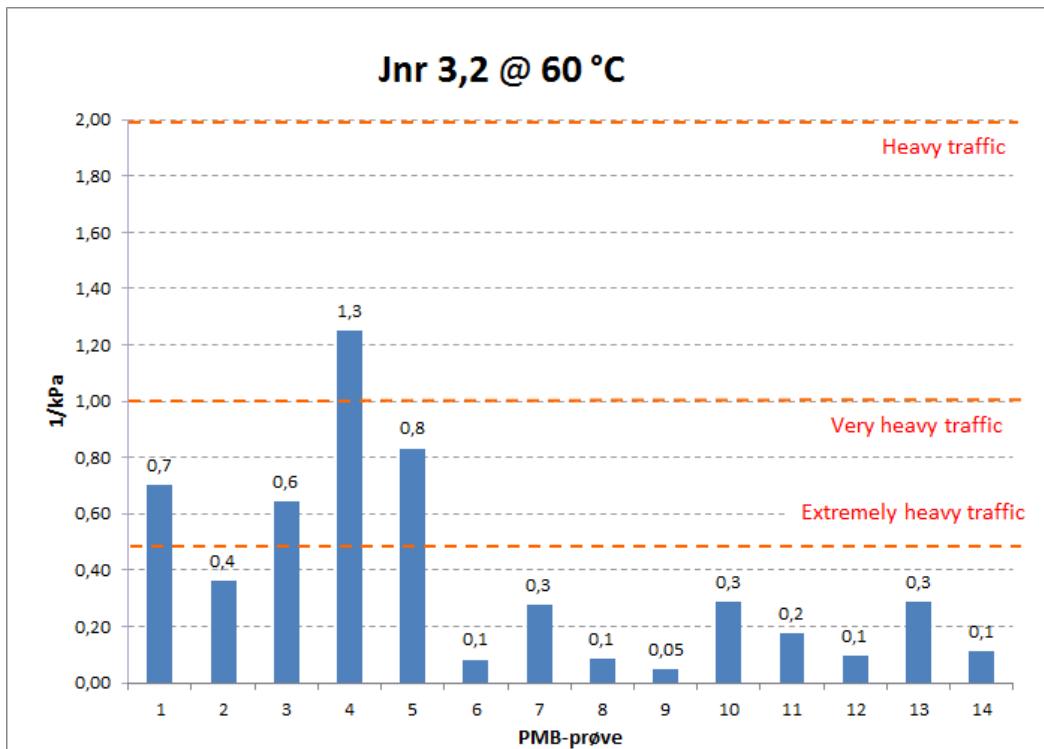


Figur 6. MSCRT 60 °C: resultater på % recovery for 15 PMB. Tre prøver ligger under grensekurven. Deres verdi for % elastisk tilbakegang (ET) ved 10 °C er også vist.

I MSCRT-prøvingene ble % recovery for de 14 PMB-prøvene bestemt ved tøyninger fra 0,3 til 3,0 strain. Det er grunn til å tro at ulik tøyning vil gi ulik % tilbakegang.

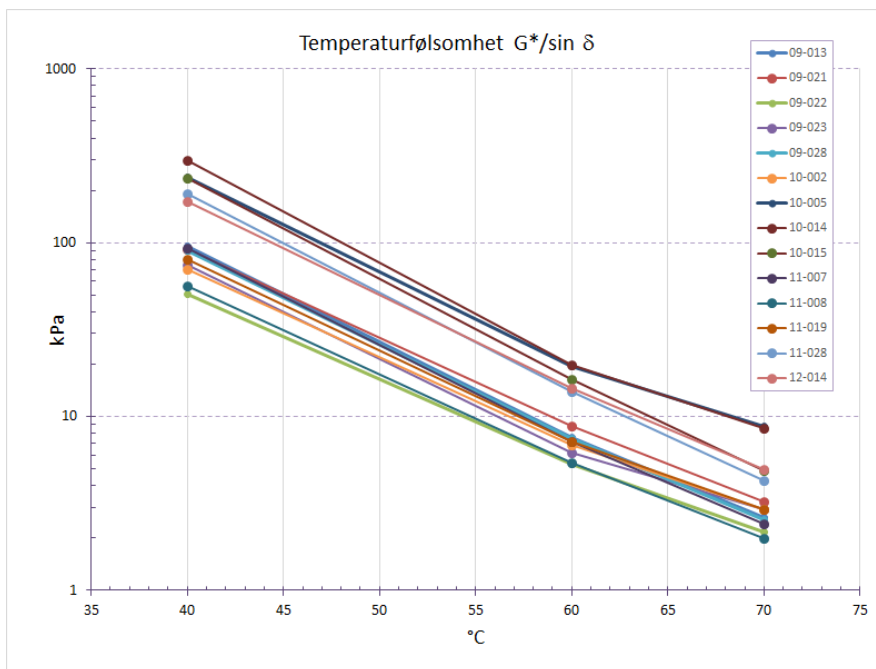
DSR-krypmåling med elastisk tilbakegang, som tidligere ble utført på Veglaboratoriet, viser at ulike PMB kan ha høyest elastisk tilbakegang ved forskjellig temperatur (Schüller S., 1993). Én hadde høyest tilbakegang ved 10 °C, en annen ved 50 °C, en tredje hadde like god elastisk tilbakegang ved begge temperaturer.

Figur 7 viser hvordan PMB-prøvene i undersøkelsen vil graderes i den amerikanske PG-spesifikasjonen. MSCRT-prøvingen ble utført ved 60 °C, som er noen grader over aktuell klimaklasse for prøvestrekningen. Jnr-verdiene ville trolig blitt noe lavere hvis prøvingstemperaturen hadde vært lik den lokale høytemperaturklassen.

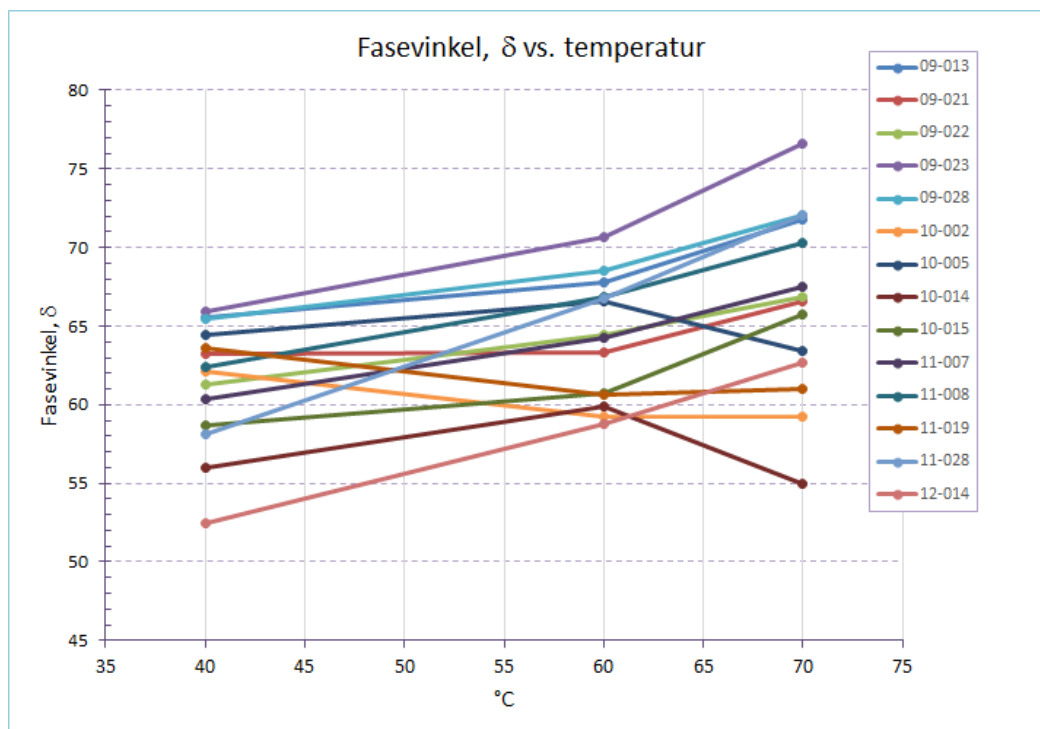


Figur 7. MSCRT Jnr-verdier for PMB-prøvene og trafikklasser i AASHTO M332-14.

Figur 8 og 9 viser temperaturkurver for $G^*/\sin \delta$ og fasevinkelen for de 14 PMBene. Kurvene for kompleksmodul (logaritmisk skala) var noenlunde rettlinjede. Tre av PMB-prøvene hadde et «knekkpunkt» fra 60 til 40 °C (prøve 10-002, 10-005 og 10-014). Kurvene for fasevinkel for disse var også noe forskjellig fra de andre.



Figur 8. Grafisk fremstilling av kompleksmodul mot temperatur for PMB-prøvene.



Figur 9. Grafisk fremstilling av fasevinkel (δ) mot temperatur for PMB-prøvene.

4.2 Korrelasjon mellom prøvingsresultater

Siden denne undersøkelsen legger stor vekt på MSCRT-metoden, ble det gjort en korrelasjonsanalyse av Jnr-verdi mot andre prøvingsresultater. Verdier for korrelasjonen R og R-kvadrat er vist i tabell 7. De høyeste korrelasjonsverdiene er vist med fet skrift.

I statistikken er det vanlig å tolke R-verdi (absoluttverdi) mellom:

- 0 – 0,3 som ingen/svært dårlig korrelasjon
- 0,3 – 0,6 som moderat korrelasjon
- 0,6 – 1,0 som god-utmerket korrelasjon

Høy korrelasjonskoeffisient angir kun at det er samvariasjon mellom to datasett, og er ikke «bevis» for årsakssammenheng. God korrelasjon mellom prøvingsmetode og relevante bruksegenskaper er ønskelig og nødvendig i en ytelsesrelatert spesifikasjon. God korrelasjon mellom prøvingsmetoder i produktspesifikasjonen og de som brukes til produktkontroll er også ønskelig og nødvendig.

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

Tabell 7. Korrelasjon mellom Jnr og de andre prøvingsverdier, basert på 14 PMB-prøver

	PMB original prøve				PMB etter RTFOT										
	Pen	MP	Kohe- sjon, 10 °C	ET, 10°C	MP e/ RTFOT	PG-xx	Jnr, 60°C	Jnr- diff, 60 °C	R %, 60°C	G*/sin δ 40 °C	G*/sin δ 60 °C	G*/sin δ 70 °C	Delta, δ 40 °C	Delta, δ 60 °C	Delta, δ 70 °C
R ²	0,056	0,369	0,400	0,075	0,555	0,109	1,000	0,002	0,790	0,188	0,206	0,135	0,366	0,638	0,568
R	0,237	-0,61	-0,633	0,273	-0,745	-0,330	1,000	0,040	-0,889	-0,433	-0,454	-0,368	0,605	0,799	0,754

De metodene som hadde god korrelasjon med Jnr (3,2 kPa) var: % recovery 60 °C, fasevinkel (δ) ved 40, 60 og 70 °C, MP før og etter RTFOT samt kohesjon (kraftduktilitet) ved 10 °C. Det var bedre korrelasjon for MP etter RTFOT-herdning enn for original prøve. Det er ikke overraskende at det er korrelasjon mellom forskjellige høytemperaturmetoder. Korrelasjon med kraftduktilitet indikerer at polymerstrukturen gir styrke både ved lav (høy kohesjon) og høy temperatur (lav Jnr-verdi).

4.3 Dekketilstandsmålinger – sporutvikling

En oversikt over vegstrekningene som ble valgt ut er vist i tabell 8. I tabellen vises nytt og gammelt dekke, leggear, målte spordybder og klimasone. Ved beregning av årlig sporutvikling på de nye dekkene ble initialsporene trukket fra, da de ellers ville gitt et uforholdsmessig stort bidrag etter så få års brukstid. Initialspor knyttes til utførelse (etterkomprimering) samt tid og dekketemperatur før trafikken settes på det nylagte asfaltdekket. Også trafikkmengder (ÅDT) for 2015 er vist i tabellen

Oversikten over klimasoner viser hvilke dimensjonerende dekketemperaturer man kan forvente i store deler av landet vårt. Maksimum dimensjonerende dekketemperatur ligger i området 47–54 °C. Verdiene er beregnet for 20 mm ned i asfalten på grunnlag av maksimum lufttemperatur for de 7 varmeste sammenhengende dagene. Minimum dimensjonerende dekketemperatur ligger i området –10 °C til –33 °C. Verdiene er beregnet ut fra lokal minimum lufttemperatur.

Figur 10 viser sporutviklingen (mm/år) for PMB–strekningene og deres referansestrekning (det forrige asfaltdekket), produsert med 70/100 bitumen. Det ser ut til å være en betydelig gevinst i å gå over til PMB for flesteparten av strekningene.

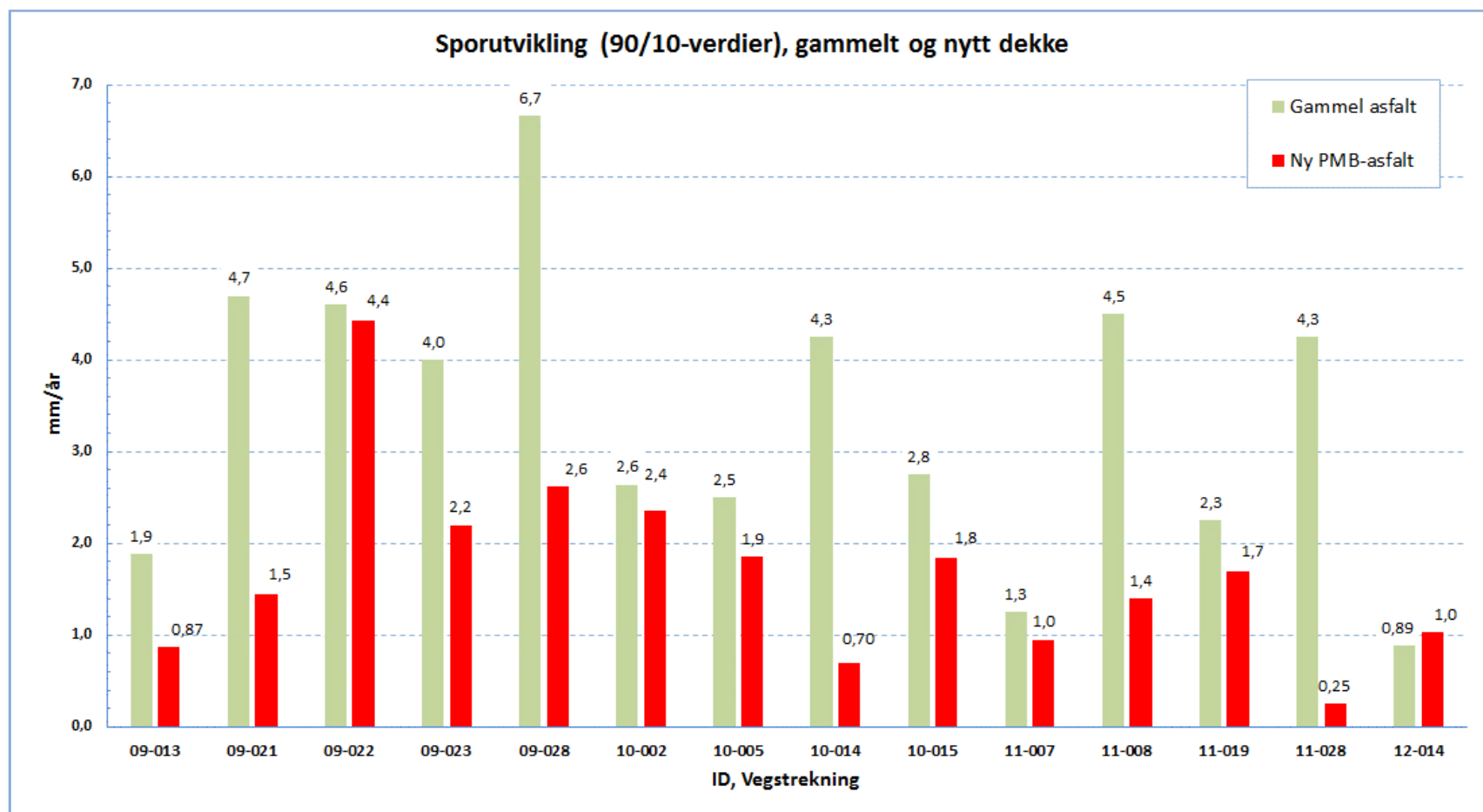
Underveis i undersøkelsen kom det fram at noen strekninger likevel ikke var egnet til å bedømme ytelsen til PMB–asfalten. I korrelasjonsanalysen ble flere strekninger tatt bort pga. dårlig bærelag, liten trafikkmengde, uvanlige spordata og fresing/lapping av andre grunner enn deformasjon eller piggdekkslitasje. Sammenligning av sporutvikling og PMB–egenskaper (prøvmingsmetode) ble til slutt gjort på åtte strekninger.

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

Tabell 8. Oversikt over vegstrekninger der PMB-prøvene ble benyttet

ID	PMB-grad	Veg-strekning	Forrige dekke	Leggeår	Spor siste år	Sporutv. mm/år	Nytt dekke	Leggeår	Spor 2015	Sporutv mm/år	ÅDT 2015	Klima-sone, xx-yy	Kommentar
09-013	75/130-65	A	Ska 11	2001	15	1,88	Ska11	2009	7,7	0,87	11400	52-28	hovedvei utenfor by
09-021	65/105-80	B	Ska16	2004	28	4,70	Ab16	2009	12,7	1,45	32000	54-22	hovedvei i Oslo
09-022	70/120-60	C	Ab 11	2004	27	4,60	Ab11	2009	21,7	4,43	17700	52-28	bygate, frest 2013
09-023	75/130-65	D	Ska11	2006	12	4,00	Ab11	2009	12,3 *	2,20	11000	52-28	hovedvei i mindre by.
09-028	75/130-65	E	Ab11	2006	20	6,67	Ab16	2009	19,7	2,62	16600	52-28	
10-002	75/130-65	F	Ab16	1999	29	2,64	Ab16	2010	15,8	2,36	6360	46-16	
10-005	40/100-75	G	Ab11	2002	20	2,50	Ab11	2010	11,8	1,86	7100	53-10	
10-014	65/105-80	H	Ska11	2006	17	4,25	Ab11	2010	5,5	0,70	9600	54-22	byområde, frest i 2006 og 2010
10-015	40/100-75	I	Ab11	2002	22	2,75	Ab11	2010	11,7	1,84	8000	53-28	
11-007	90/150-75	J	Agb11	1995	20	1,25	Ab11	2011	7,1	0,95	3000	47-33	
11-008	70/120-80	K	Ab11	2007	18	4,50	Ab11	2011	8,6	1,40	4154	52-28	
11-019	75/130-65	L	Ska11	1999	27	2,25	Ab11	2011	10,8	1,70	5456	52-28	Unormal kurve for tilstandsutvikling
11-028	65/105-80	M	Ska11	2007	17	4,25	Ska11	2011	1,49	0,25	22000	53-22	Uegnet strekning, bru med vekt-begrensning, hyppig fresing
12-014	65/105-80	N	Ska16	1994	16	0,89	Ab16	2012	6,6	1,03	7640	52-28	unormal sporutvikling på gammelt dekke

* målt 2013



Figur 10. Sporutvikling på prøvestrekningene etter 3–6 års brukstid (røde stolper). Grønne stolper viser sporutvikling på gammelt dekke.

4.4 Korrelasjon prøvingsresultater og sporutvikling

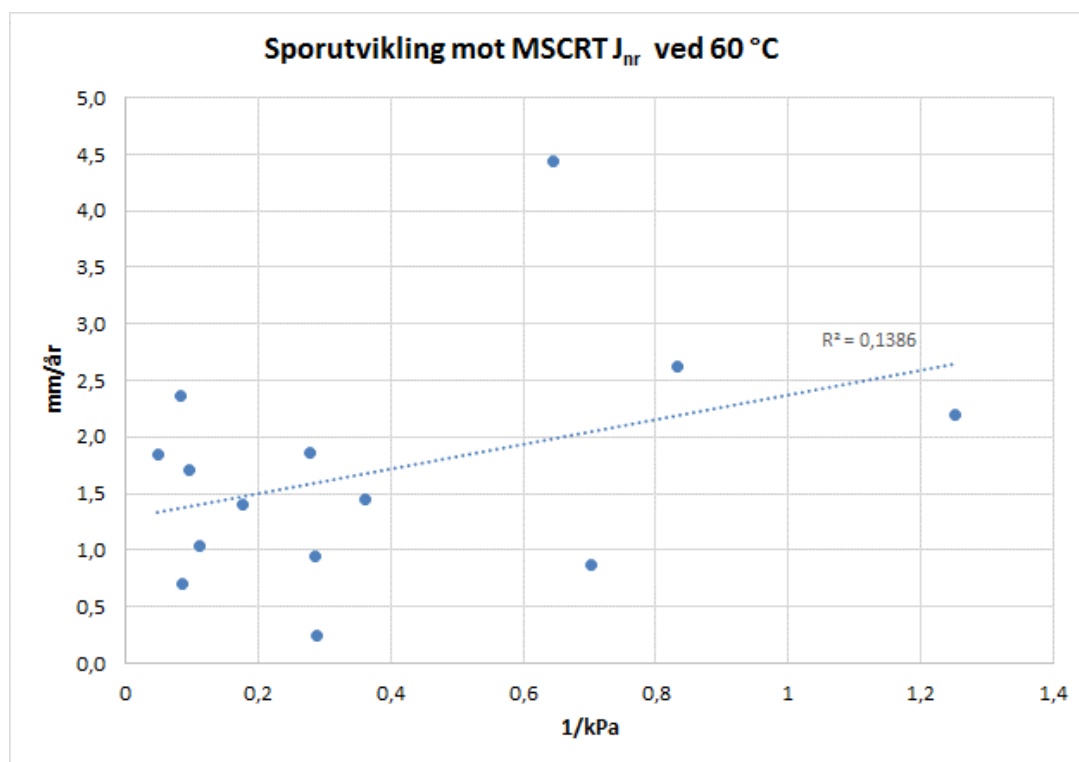
Det ble sett på korrelasjon mellom prøvingsresultater og sporutvikling. God korrelasjon er ønskelig for å sannsynliggjøre en årsakssammenheng. For norske forhold der både piggdekkslitasje og plastisk deformasjon bidrar til spordannelse, kan det noen ganger være vanskelig å korrelere denne med kun én egenskap.

Tabell 9 viser korrelasjon mellom prøvingsresultat og sporutvikling for de 14 PMB-strekningene. Korrelasjonen er svært lav for de fleste prøvingsmetodene.

Tabell 9. Korrelasjon mellom prøvingsresultat og sporutvikling for PMB-strekningene

	PMB original prøve				PMB etter RTFOT							
	Pen	MP	Kohe- sjon, 10 °C	ET, 10°C	MP	PG-xx	Jnr, 60°C	Jnr- diff, 60 °C	Recovery %, 60°C	G*/sinδ 40 °C	G*/sinδ 60 °C	G*/sinδ 70 °C
R ²	0,115	0,013	0,008	0,121	0,054	0,093	0,139	0,007	0,018	0,202	0,176	0,096
R	0,339	-0,115	-0,09	0,349	-0,23	-0,305	0,372	0,082	-0,132	-0,450	-0,419	-0,309

Figur 11 viser grafisk framstilling av årlig sporutvikling mot Jnr-verdi for de 14 strekningene. Korrelasjonskoeffisienten R og R-kvadrat, var hhv. 0,372 og 0,139.



Figur 11. Årlig sporutvikling mot Jnr-verdi for 14 prøvestrekninger

Det ble valgt åtte strekninger til den videre korrelasjonsanalysen. Begrunnelsen for utvalget var: tilstrekkelig stor trafikkmengde, ikke problem med bærelag og at dekket ikke var frest eller lappet.

Tabell 10 viser oversikt over strekningene. Forholdet i sporutvikling mellom gammelt og nytt dekke (den relative sporutviklingen) er også vist. Verdiene ble ikke justert for eventuell trafikkøkning mellom forrige og siste dekkelegging.

Tabell 10. Egnede strekninger for korrelasjonsanalyse

ID	Type	Sporutv. PMB-dekke mm/år	Sporutv. forrige dekke mm/år	Relativ sporutv. forrige/nytt	ÅDT
09-013	75/130-65	0,87	1,88	2,17	11400
09-021	65/105-80	1,45	4,70	3,24	32000
09-022	70/120-60	4,43	4,60	1,04	17700
09-023	75/130-65	2,20	4,00	1,82	11000
09-028	75/130-65	2,62	6,67	2,55	16600
10-014	65/105-80	0,70	4,25	6,07	9600
10-015	40/100-75	1,84	2,75	1,49	8000
11-008	70/120-80	1,40	4,50	3,21	4154

Tabell 11 viser korrelasjon mellom prøvingsresultat og sporutvikling for de åtte utvalgte PMB-strekningene.

Tabell 11. Korrelasjon prøvingsresultat og sporutvikling for åtte PMB-strekninger

	PMB original prøve				PMB etter RTFOT							
	Pen	MP	Kohe- sjon, 10 °C	ET, 10°C	MP	PG-xx	Jnr, 60°C	Jnr- diff, 60 °C	Rec. %, 60°C	G*/sinδ 40 °C	G*/sinδ 60 °C	G*/sinδ 70 °C
R ²	0,309	0,000	0,093	0,313	0,037	0,237	0,152	0,374	0,053	0,226	0,229	0,223
R	0,556	-0,015	-0,30	0,560	-0,19	-0,487	0,389	0,612	-0,23	-0,476	-0,478	-0,473

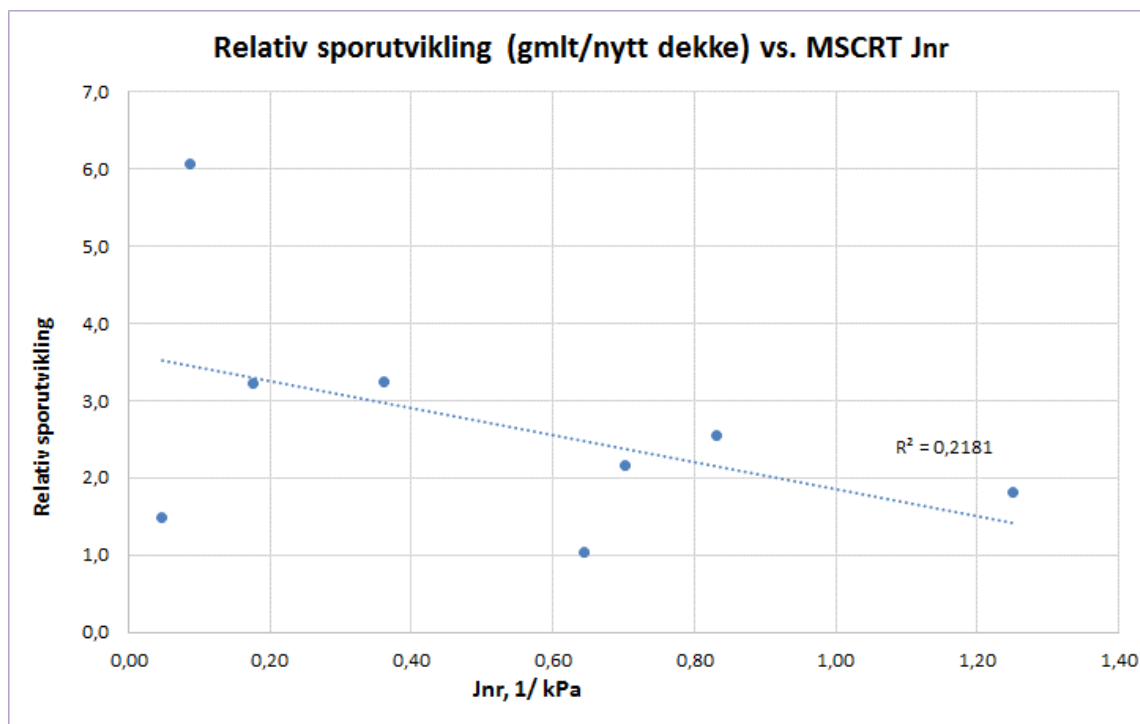
Det ble også sett på korrelasjon mellom relativ sporutvikling og bindemiddelegenskaper.

Tabell 12 viser korrelasjon mellom prøvingsresultater og relativ sporutvikling for de åtte PMB-strekningene.

Tabell 12. Korrelasjon prøvingsresultat og relativ sporutvikling for åtte utvalgte PMB-strekninger

	PMB original prøve				PMB etter RTFOT							
	Pen	MP	Kohe- sjon, 10 °C	ET, 10°C	MP	PG- xx	Jnr, 60°C	Jnr- diff, 60 °C	Rec. %, 60°C	G*/sinδ 40 °C	G*/sinδ 60 °C	G*/sinδ 70 °C
R ²	0,248	0,015	0,407	0,012	0,118	0,539	0,218	0,024	0,098	0,340	0,357	0,552
R	-0,498	0,123	0,638	-0,108	0,344	0,734	-0,467	-0,155	0,314	0,583	0,597	0,743

Korrelasjonen er klart bedre for DSR-metodene (G*/sinδ og Jnr), kohesjon (kraftduktilitet) og penetrasjon enn for mykningspunkt. Best korrelasjon (R = 0,743) hadde G*/sin δ ved 70 °C. Et plott av verdiene for relativ sporutvikling mot Jnr er vist i figur 12.



Figur 12. Relativ sporutvikling mot Jnr-verdi for 8 utvalgte prøvestrekninger

Tabell 12 viser moderat til god korrelasjon for noen av metodene: $G^*/\sin \delta$ og Jnr etter RTFOT, samt for penetrasjon og kohesjon på originalt materiale.

Enkeltverdier som skiller seg ut, gir store utslag på beregnet korrelasjonskoeffisient. Når det er få datapunkter og moderat korrelasjon kan dette skje.

Korrelasjonsanalysen viser at mykningspunkt på original PMB-prøve ikke er velegnet til å karakterisere PMBs høytemperateregenskaper ($R=0,12$). Mykningspunkt på RTFOT-aldret PMB hadde noe bedre korrelasjon mot sporutvikling, men DSR-metodene korrelerte bedre.

5 Diskusjon og anbefalinger

5.1 Bindemiddeltesting

Bindemiddeltestingen viste korrelasjon mellom Jnr-verdier og verdier for: $G^*/\sin \delta$ («moderat»), % Recovery («meget god»), kohesjon («god»), og mykningspunkt («god»).

Det var korrelasjon mellom relativ sporutvikling på veg og verdier for: Jnr («moderat»), $G^*/\sin \delta$ («god»), penetrasjon («moderat») og kohesjon («god»).

Det ble funnet «svært dårlig korrelasjon» mellom relativ sporutvikling og mykningspunkt på originalt materiale, men likevel «moderat korrelasjon» for mykningspunkt etter RTFOT.

Konsistens – midlere brukstemperatur

Penetrasjonsmetoden viste akseptabel korrelasjon mot sporutvikling, og kan fortsatt inngå i PMB-spesifikasjoner og produksjonskontroll. Metoden er ikke en høytemperaturtest, men angir konsistens ved en gjennomsnittstemperatur. Fortsatt bruk av penetrasjon forenkler sammenligninger med ordinær bitumen, eldre PMB-produkter og bindemiddeldata forøvrig.

Høy brukstemperatur

Mykningspunktets svake korrelasjon til sporutvikling gjør at metoden ikke bør brukes til PMB-spesifikasjoner og typeprøving. Korrelasjonen til DSR-metodene gjør at mykningspunkt likevel kan benyttes i produksjonskontroll.

Kompleksmodulbestemmelse ($G^*/\sin \delta$) viste overraskende god korrelasjon mot relativ spordannelse. Prøving ved 60 °C virker fornuftig.

For *MSCRT* finnes det allerede mye dokumentasjon på god sammenheng mellom Jnr-verdi og motstand mot deformasjon. Denne undersøkelsen fant bare moderat korrelasjon mellom Jnr-verdi og relativ sporutvikling. Noen problemstillinger bør avklares:

- 1) «Myke» PMB kan ha lav Jnr-verdi hvis bindemidlet er svært elastisk. I *MSCRT*-prøvingen får slike PMB mye større deformasjon enn «hardere» PMB. Med høy elastisk tilbakegang – f.eks. over 90 %, blir Jnr-verdien likevel lav. Spørsmålet blir da hvordan en asfaltmasse med en slik myk PMB vil tåle belastningen fra sakte- eller stillestående trafikk. Dette bør undersøkes nærmere i laboratorieforsøk på asfaltprøver.
- 2) Hvilke Jnr-krav bør vi foreslå – passer de amerikanske kravene? Bør det innføres en ekstra klasse for $Jnr \leq 0,25 \text{ kPa}^{-1}$ for steder med ekstrem belastning?
- 3) Stress-sensitive bindemidler med høy Jnr-diff. Bør man benytte prøving med 3,2 kPa og 6,4 kPa (eller 12,8 kPa) isteden for 0,1 kPa og 3,2 kPa? Kan stress-sensitive PMB likevel fungere godt i noen anvendelser?
- 4) Det bør avklares hva % R-kravkurven i M332 står for. Kan det etableres sammenheng mellom % R-verdi og elastisk tilbakegang ved 10 °C for norske PMB-typer? Siden tre PMB-prøver med god ET ved 10 °C ikke hadde «godkjent» % R-verdi, synes ikke kravkurven å passe for våre PMB-typer. En kravkurve til % R kan likevel være nyttig for å skille mellom «plastomeriske» og «elastomeriske» bindemidler.

MSCRT-metodens presisjon kan fortsatt bli bedre. Reproduserbarhet og repeterbarhet i NS-EN 16659 angis til hhv. 47 % og 9 %. ASTM D7405 angir ikke presisjon når $Jnr < 0,10 \text{ kPa}^{-1}$ og anbefaler i så fall å øke prøvingstemperaturen.

Prøvepreparering, lagringstid, påføring og trimming kan utføres mer hensiktsmessig og kontrollerbart. Det bør jobbes mere med å utvikle *MSCRT*-utførelsen. Deltakelse i ringanalyser er en viktig aktivitet for å kvalitetssikre prøvingen og bidra til forbedringer.

Kohesjon

Kraftduktilitet – kohesjon viste forholdsvis god korrelasjon mot relativ sporutvikling. Det synes som om høy kohesjon ved 10 °C er gunstig mht. sporutvikling. Det kan også være slik at godt utviklede polymernetverk gir gevinst både ved høye og lave temperaturer.

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

I figur 4 vises tre forskjellige kraftduktilitetskurver. Én er typisk for vanlig benyttede SBS-modifisert bitumen, én er for en «myk» PMB og én er for PMB tilsatt voks. Sistnevnte hadde også høy $J_{nr-diff}$ -verdi, og beskrives som stress-sensitiv (spenningsfølsom) som er en uønsket egenskap i den amerikanske M332-spesifikasjonen.

I kraftduktilitetmetoden er det ikke angitt hvordan kraft-forlengningskurven skal tolkes. Det er stort sett enighet i at man kan skille mellom ordinær bitumen og PMB, mellom PMB med elastomerer og plastomerer, samt se effekt av voks og andre tilsetninger.

I det europeiske standardiseringsarbeidet har det blitt foreslått å beregne energi for en prøve som ryker før 400 mm tøyning. Dette strider mot vår oppfatning av at prøven må være fleksibel nok til å tåle en slik tøyning. Kohesjonsenergien skal samtidig være over en viss verdi. Man kunne ønske seg et tilleggskrav for å beskrive kurveform til «riktig» type SBS-modifisering, f.eks. at kraft-forlengningskurven skal stige fra 200 mm til 400 mm.

Oppherdning ved asfaltproduksjon og utlegging

RTFOT: Fall i mykningspunkt etter RTFOT ble målt for 9 av de 14 PMB-prøvene. Tilsvarende fall har også blitt målt i tidligere undersøkelser, f.eks. i Ny Asfaltteknologi, der 6 av 8 PMB fikk lavere MP etter RTFOT (Andersen, 1998–04). I snitt falt mykningspunktet 5,5 °C for disse. Bare én av disse seks fikk lavere verdi for $G^*/\sin \delta$ etter RTFOT.

Lagringsstabilitet

Verdiene for *lagringsstabilitet* viser at det ikke var problem med separasjon for disse prøvene. Mykningspunktet går beskjedent opp eller ned etter varmelagring.

Elastisk tilbakegang

Elastisk tilbakegang (ET) med duktilometer ved 10 °C benyttes for å sikre at et elastomerisk PMB blir benyttet. Prøving ved såpass lav temperatur skal også sikre at bindemiddelet er fleksibelt ved lave temperaturer. MSCRT prøvingen gir % Recovery ved høy brukstemperatur, og kan påvise elastomeriske PMB. Om krav til % Recovery ved f.eks. 60 °C gjør ET 10 °C overflødig, er ikke avklart. Tre av PMB-prøvene hadde god ET 10 °C, men klarte ikke det foreslåtte kravet til % Recovery ved 60 °C i AASHTO M332.

Det er også betydelige forskjeller i hvordan de to metodene utføres: prøveform, type tøyning og tøyningshastigheter er svært ulike. I tillegg utføres ET 10 °C på originalt materiale, mens % Recovery 60 °C utføres på materiale etter RTFOT. Inntil videre anbefales det å beholde krav til ET ved 10 °C og benytte deklarererte verdier for % Recovery.

Annet

DSR-metodene krever dyrt laboratoriestyr og mer tid til opplæring. Fordelen er at DSR-prøving kan erstatte både mykningspunkt og viskositet. Med velfungerende DSR-reometer og programvare er metodene lette å bruke. Prøving ved 60 °C synes å passe godt med forventet høyeste dekketemperatur i Norge.

Med et moderne DSR har en mulighet til å utføre nye typer prøvinger og alternative undersøkelser av bindemidler, bindemiddel/mørtel-blandinger mv. Hvis DSR-prøving gir

mer relevante resultater, med mindre tidsbruk og prøvingsmateriale, bør de absolutt være konkurransedyktige.

Endringene i PMB-egenskapene etter varmelagring eller RTFOT kan ha sammenheng med produksjons- og lagringsbetingelser for det aktuelle PMB. Er polymernetverket under utvikling eller nedbrytning? Prøvebehandlingen i laboratoriet (temperatur, omrøring og lagringstid) samt metodeusikkerheten kan også ha betydning.

5.2 Sammenheng sporutvikling og bindemiddelegenskaper

Sporutviklingen på høyt trafikkerte veger skyldes både plastisk deformasjon og piggdekkslitasje.

Deformasjon motvirkes ved å benytte en godt proporsjonert asfalt, med «riktig» korngradering, bindemiddeltipe og bindemiddelinhold. Videre må asfalten utføres slik at optimalt hulrominnhold oppnås. Initialspor like etter utlegging bør være minst mulig. Bruk av stivere bindemiddel, som kan være en hardere bitumengrad eller en PMB, bidrar til lavere deformasjon. PMB vil vanligvis gi betydelig mindre deformasjon enn en hardere bitumengrad. Harde bitumengrader har begrensede lavtemperaturoegenskaper, og gir risiko for lavtemperatur- og utmatningssprekker.

Motstand mot piggdekkslitasjen er først og fremst avhengig av steinkvalitet (slitestyrke) og steinstørrelse. Bruk av elastomerisk PMB med gode lavtemperaturoegenskaper vil også bidra til økt slitestyrke. Mørteldelen i asfalten blir mer fleksibel, mer elastisk og mer seig pga. polymermodifiseringen. Kravene til steinkvalitet til slitelag på veger med stor trafikk er svært høye, og det er vanskelig å finne nye tiltak for øke asfaltens slitasjemotstand. Mindre aggressive piggdekk og lavere andel piggdekk i trafikken bidrar til at asfaltslitasjen er avtagende.

Tidligere prøvde man å skille mellom deformasjonsspor og slitasjespor ved å måle spordybde og sporareal om våren og høsten. Differansen i spor mellom vår og fjorårets høst representerer piggdekkslitasje. Differansen i spor mellom høst-vår samme år, representerer deformasjon. Slike målinger er ikke lenger vanlige. I dag utføres en årlig måling av spor og jevnhet for å skaffe datagrunnlag for planlegging av dekkevedlikeholdet.

For de utvalgte strekningene i undersøkelsen var det ikke mulig å skille ut strekninger som domineres av piggdekkslitasje eller av deformasjon. I Oslo, der det er restriksjoner på piggdekkbruk (piggdekkgebyr), er piggdekkandelen på ca. 15 %. Det er rimelig å tro at deformasjonsspor gir mest bidrag til sporutvikling her. I distriktene kan man forvente en piggdekkandel på ca. 50 %.

Det viste seg at noen av de utvalgte strekningene likevel ikke var så godt egnet til å bedømme sporutvikling pga. slitasje og deformasjon. For en som ikke kjenner til lokale forhold og dekkehistorikk utover det som kan leses i PMS, kan det lett bli feilslutninger.

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

Det vil dessuten være en viss usikkerhet i spormålingsdataene. Det kan bli problem med å finne passende referansestrekninger hvis man ikke planlegger for det. Sammenligning mot forrige (umodifiserte) asfaltdekke er en måte å måle eventuell gevinst på. Men det ligger en usikkerhet i at trafikkbelastningen kan ha endret seg, og endringer i asfaltdekket (korngradering, steinkvalitet, dekketykkelse mv.).

Fremstillingen av relativ sporutvikling (spurutvikling gammelt/nytt dekke) får fram gevinsten ved gå over til PMB. Kostnadene er ikke vurdert her, men det synes å ha vært lønnsomt å gå over til PMB.

Noen vegstrekninger kan ha en slags holdbarhetsterskel. Er dekket ikke sterkt nok i forhold til belastningen, får det kort levetid. Eksempler på dette er busslommer, rundkjøringer og sterkt trafikkerte vegkryss med stående trafikk. Et annet eksempel er bruer med vektbegrensning, der man må legge et svært tynt asfaltdekke. I et slikt asfaltdekke vil PMB gi betydelig lengre levetid enn 70/100 bitumen.

En rangering av de utvalgte 8 vegstrekningene etter relativ sporutvikling og prøvingsmetoder er vist i tabell 13. For hver prøvingsmetode er «beste» verdi gitt 1 og «dårligste» verdi er 8. Man ser at PMB-prøven som hadde den beste relative sporutviklingen, også ble rangert som best av et flertall av prøvingsmetodene. Tilsvarende at de PMB-prøvene som ga dårligst relativ sporutvikling, også ble rangert lavt av prøvingsmetodene.

Prøve 10-015 blir etter prøvingsresultatene rangert til å være nest best, men rangeres som nest dårligst i forhold til relativ sporutvikling. Strekingen ligger på ei bru, og det hadde blitt reklamert på for høyt hulrom og dårlig dekkekvalitet pga. høyt hulrom på tilstøtende strekninger. Hvis også prøvestrekningen hadde problem med høyt hulrom, kan det forklare at rangeringen ikke ble som forventet.

Tabell 13. Rangering av prøvingsresultater mot relativ sporutvikling

Prøve	PMB-grad	Relat. spor-utvikl.	Etter RTFOT				Original prøve				Poeng-sum
			Jnr 60 °C	G*/sinδ 40 °C	G*/sinδ 60 °C	G*/sinδ 70 °C	MP	MP	Pen	Kohe-sjon 10°C	
10-014	65/105-80	6,07	2	1	1	1	2	1	1	1	10
09-021	65/105-80	3,24	4	4	3	3	4	4	3	3	28
11-008	70/120-80	3,21	3	3	7	8	2	3	7	7	37
09-028	75/130-65	2,55	7	7	5	6	7	5	4	5	46
09-013	75/130-65	2,17	6	6	4	5	6	8	5	8	48
09-023	75/130-65	1,82	8	8	6	4	8	7	6	6	53
10-015	40/100-75	1,49	1	1	2	2	1	2	2	2	13
09-022	70/120-60	1,04	5	8	8	7	5	6	8	4	51

Man regner med at deformasjonsspor får stadig større betydning pga. økende tungtrafikk, med flere tunge aksler og høyere ringtrykk. På kort sikt forventes ikke noen dramatisk nedgang i piggdekkbruken, men det ventes en fortsatt overgang til mindre aggressive piggdekk.

De norske asfaltlaboratoriene har tatt i bruk wheel track testing til typeprøving og til egne undersøkelser. Statens vegvesen har nå mulighet til å etterprøve asfaltprøver tatt fra veg. Tidsbruk og kostnader ved å ta ut asfaltprøver og utføre wheel track testing, gjør at det ikke er realistisk med veldig mange prøvinger pr. år. Uttak og prøving av PMB i byggherrekontrollen vil derfor være et godt supplement til den ordinære asfaltprøvingen.

5.3 Ytelsesrelatert PMB-spesifikasjon

En viktig målsetning i PMB-undersøkelsen var å utarbeide forslag til en ytelsesrelatert PMB-spesifikasjon (PRS). Forslaget må bygge på prøvingsmetoder fra CEN og tilpasses den foreslåtte prøvespesifikasjonen i kommende NS-EN 14023.

En PRS skal kunne brukes på alle bindemidler, men er først og fremst beregnet på PMB. Ordinære penetrasjonsgrader kan benytte enklere, tradisjonelle metoder, slik som i dag.

Momenter i oppbygging av forslaget til ny PRS-spesifikasjon er:

- Nye benevninger på PMB-gradene i PRS. Dagens benevning med penetrasjonsområde og minimum mykningspunkt er lite egnet
- Penetrasjon beholdes, i benevning eller som deklartert verdi/område
- Mykningspunkt utgår
- DSR-prøving av: G^* (eller $G^*/\sin \delta$) før RTFOT, samt G^* (eller $G^*/\sin \delta$) og MSCRT Jnr etter RTFOT
- Krav til Jnr-diff bør benyttes med forsiktighet. % Recovery regnes som en tilleggsopplysning inntil videre
- Elastisk tilbakegang 10 °C beholdes. DSR-krypmåling ved 10 °C kan være alternativ metode.
- Kraftduktilitet beholdes, med krav til kohesjon ved 5 °C eller 10 °C (tøyning 400 mm). Kurveformen til elastomerisk og ikke-elastomerisk PMB bør beskrives tydeligere
- Krav til økning eller fall (differanse eller relativ) i G^* (eller $G^*/\sin \delta$) etter RTFOT
- Lagringsstabilitet ved 180 °C beholdes, med krav for endret penetrasjon før-etter lagring. Alternativt krav for relativ endring i G^* (eller $G^*/\sin \delta$).
- Lavtemperaturtest: Bending Beam Rheometer (S-verdi og m-verdi) på materiale etter RTFOT foreslås. Prøving etter RTFOT og PAV kan brukes i spesielle undersøkelser. Fraass' bruddpunkt kan brukes inntil BBR-prøving er etablert.

Andre prøvinger som gir informasjon om produktet:

- Viskositet 160 °C med rotasjonsviskosimeter (håndtering og blanding)
- Flammepunkt
- Temperaturfølsomhet for G^* og δ (prøving ved 25, 40, 60 og 70 °C)

Spesifikasjonsforslaget som er vist i tabell 14, bygger på kravene i AASHTO 332-14 og forslaget til PRS-rammespesifikasjon for PMB fra CEN TC336. Spesifikasjonsforslaget dekker først og fremst elastomerisk PMB, som vi har valgt å bruke i Norge.

Det er foreslått å spesifisere egne verdier for G^* framfor $G^*/\sin \delta$. Fasevinkelen (δ) varierer for ulike temperaturer og ulike PMB og bør alltid rapporteres.

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

$G^*/\sin \delta$ verdien blir som regel høyere enn G^* -verdien, og øker med lavere δ . Bruk av G^* ved 60 °C vil gi ca. 10 % lavere verdier enn bruk av $G^*/\sin \delta$.

I MSCRT-metoden og AASHTO M332 er det noe uklart hva kravkurven til *% Recovery* representerer. Er kravkurven en tilpasning av «elastisk tilbakegang ved 25 °C» til «% R» ved MSCRT-temperaturen? I så fall vil tilpasningen bygge på amerikanske PMB-typer som kan være forskjellig fra de vi bruker i Norge. Våre målinger ved 60 °C viste at tre prøver lå under den amerikanske «kravkurven» selv om de hadde god elastisk tilbakegang ved 10 °C, og var elastiske etter våre krav.

I MSCRT-prøvingen kan det være hensiktsmessig å teste ved 3,2 kPa og 6,4 (eventuelt 12,8 kPa) når prøvingstemperaturen er 60 °C. For 0,1 kPa kan Jnr-verdien bli så lav at resultatet blir usikkert, jf. ASTM D7405-10. Lav Jnr-verdi kan også gi usikker verdi for Jnr-diff. I våre målinger hadde 6 av 14 prøver Jnr-verdi (0,1 kPa) lavere enn 0,1 kPa⁻¹.

Det bør avklares om Jnr-klasse skal velges ut fra ÅDT eller ÅDT-T (tunge kjøretøy), og hvilke trafikkmengder som er bestemmende for Jnr-lassen. I *Ny Asfaltteknologi* -prosjektet ble 10 millioner ESALs beregnet til å tilsvare ÅDT 6.550, og 30 millioner ESALs til ÅDT 19.651 på en tofeltsveg. I USA benytter noen stater H-, V- og E- klassene for PMB, mens S-lassen benyttes for ordinær bitumen eller for annen modifisert bitumen.

I vårt forslag er det lagt inn valg av høyere G^* -verdier på original prøve enn gitt i AASHTO M332. Disse kan velges for asfaltdekker med svært høye påkjenninger, f.eks. stillestående punktlaster, busslommer, rundkjøringer, kaier mv. Det bør også undersøkes hvilke verdier for G^* og Jnr som passer best til støpeasfalt og alternative asfalttyper.

Jnr-diff kan benyttes for å påvise stress-sensitive PMB. Stress-sensitivitet regnes som en uønsket egenskap. Vi har foreløpig svært lite eller ingen dokumentasjon på negative effekter av stress-sensitive PMB. Vi har målt at vokstilsetning kan gi stress-sensitive bindemidler og at myke, elastomerisk PMB kan ha høy Jnr-diff.

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

Tabell 14 Forslag til ytelsesrelaterte krav for PMB

	Prøvningsmetode	Enhet	Klasse					
			1	2	3	4	5	6
Penetrasjon, 25 °C	EN 1426	1/10 mm	25-55	40-100	65-105	75-130	90-150	DV ⁴⁾
DSR kompleksmodul G*, 60 °C	EN 14770	kPa	≥ 8,0	≥ 4,0	≥ 2,0	≥ 1,0		DV
RTFOT 163 °C: Massendring	EN 12607-1	%	≤ 0,3	≤ 0,5				
MSCRT 60 °C ¹⁾ Jnr (3,2 kPa)	EN 16659	kPa ⁻¹	E ≤ 0,5	V ≤ 1,0	H ≤ 2,0	S ≤ 4,5		DV
Stress sensitivity, Jnr-diff ²⁾		%	≤ 75					DV
G*, 60 °C, etter/før RTFOT ³⁾	EN 14770	kPa	0,8 - 2,0	0,8 - 4,0				DV
Lavtemperaturstivhet (BBR), temp. der S (60 s) ≤ 300 MPa og m ≥ 0,30	EN 14771	°C	-16	-22	-28			DV
Elastisk tilbakegang 10 °C	EN 13398	%	≥ 75	≥ 50	≥ 30			DV
Kohesjon, kraftduktilitet, 5 °C	EN 13589	J/cm ²	≥ 3,0	≥ 2,0	≥ 1,0			DV
Lagringsstabilitet, 72 t ved 180 °C: - Penetrasjon, 25 °C, forskjell topp/bunn	EN 13399 EN 1426	1/10 mm	≤ 9	≤ 13	≤ 19	≤ 26		DV
- G*, 60 °C, forhold topp/bunn	EN 14770	-	0,8 - 2,0	0,8 - 4,0	-	-		DV
Flammepunkt	EN ISO 2592	°C	≥ 235	≥ 220				
Dynamisk viskositet, 160 °C	EN 13302	mPas	DV					

¹⁾ MSCRT-klasser for trafikkbelastning: *Standard, Høy, Veldig høy, Ekstremt høy og x-Ekstrem høy*

²⁾ Prøvingen utføres med 0,1 kPa og 3,2 kPa spenning (stress)

³⁾ Forhold G*: etter/før RTFOT

⁴⁾ Deklarert verdi

For kortidsaldring foreslås det å angi øvre og nedre grense for G^* -forholdet etter/før RTFOT. Vanligvis faller ikke G^* -verdien for våre PMB etter RTFOT. Relativ økningen etter RTFOT antas å ligge i området 1,2 – 3,0 ganger. I dagens bitumenspesifikasjoner tillates en relativ viskositetsøkning på 4,0 ganger (viskositet og G^* er sammenlignbare parametere). I tabellen foreslås to klasser for relativ økning i G^* . Verdier for oppherdning må avklares i fremtidig arbeid.

For lagringsstabilitet foreslås det å angi en øvre og nedre grense for G^* -forholdet topp/bunn etter varmelagring. Riktige verdier må avklares i fremtidig arbeid.

Lavtemperatuegenskapene omfatter prøving ved svært lave temperaturer (BBR-prøving eller Fraass' bruddpunkt). Kraftduktilitet og elastisk tilbakegang ved 10 °C dekker egenskaper ved moderat lave temperaturer.

Fraass' bruddpunkt er forholdsvis upresis for PMB, og det er ikke ventet at metoden blir bedre. Man får likevel et resultat, og akseptabel presisjon mellom -10 og -20 °C. For bruddpunkt under -20 °C er presisjonen dårlig.

BBR-metoden krever dyrt utstyr og tar mye benkeplass. Hvis man i tillegg skal langtidsaldre bindemiddelet med PAV, så blir dette en svært dyr prøving. Derfor foreslås BBR-prøving på materiale etter RTFOT i spesifikasjonen.

Kraftduktilitet og elastisk tilbakegang ved 10 °C gir informasjon om bindemiddelets kohesjon, fleksibilitet og elastisitet ved forholdsvis lave temperaturer. «Gode» verdier her indikerer gode utmatningsegenskaper og evne til selvheling av telesprekker mv. Det bør vurderes å utføre kraftduktilitet ved 5 °C, alternativt å innføre nye klasser med lavere energi i produktstandarden.

Benevning av PMB-grader

Siden NS-EN 14023 er en rammespesifikasjon, er det opp til hvert land å definere krav som passer til deres bruk. I Norge har vi valgt å spesifisere de fem mest aktuelle PMB-gradene i Håndbok N200. Alle aktuelle krav er angitt. Etter åtte års erfaring kan det være nyttig å ta en gjennomgang av N200-tabellen, for å vurdere benyttede PMB-grader og krav.

Som et supplement og alternativ spesifikasjon, kan den ytelsesrelaterte spesifikasjonen legges inn i håndbok N200 og i et nasjonalt tillegg til NS-EN 14023. Siden det benyttes andre prøvingsmetoder og krav i PRS, bør det lages nye benevninger for PMB i denne. Benevningene vil avhenge av hvilke krav som skal gjelde, og en mulig benevning er derfor foreslått nedenfor:

PMB 40/100-2V der:

40/100 står for penetrasjonsområde

2 står for minimum G^* -verdi ved 60 °C på 2,0 kPa (original prøve)

V står for «Veldig høy trafikk» og at $J_{nr}(3,2 \text{ kPa}) \leq 1,0 \text{ kPa}^{-1}$ (prøve etter RTFOT)

Alle egenskaper kan ikke inngå i benevningen. Det må fortsatt settes opp en spesifikasjonstabell som angir krav til:

- Masseendring etter RTFOT og relativ forskjell G^* (etter/før RTFOT)
- Kohesjon, kraftduktilitet ved 5 eller 10 °C
- Elastisk tilbakegang ved 10 °C
- Lavtemperaturstivhet: Fraass' bruddpunkt eller BBR-temperatur for kritisk stivhet etter RTFOT
- Lagringsstabilitet, relativ forskjell G^* (topp/bunn) eller endring i penetrasjon.

6 Konklusjoner og videre arbeid

6.1 Hva fant vi

Bindemiddelaktiviteten i Varige vegger har bidratt til aktivitet i standardiseringsarbeid samt økt kompetanse i det norske fagmiljøet. Det betyr mye å ha «state of the art» laboratorieutstyr for å gi bedre svar på spørsmål om bindemiddelkvalitet.

Bindemiddelmarkedet tilføres hele tiden nye produkter som må vurderes, både bindemidler og tilsetninger som skal gi forbedrede egenskaper. Som kjøper av asfaltdekker har ikke Statens vegvesen innsyn i hvordan den aktuelle PMB produseres og håndteres. Håndtering og lagring av PMB under og etter framstilling samt under asfaltproduksjonen kan ha betydning for bindemiddelegenskapene. I tillegg kommer problemstillinger ved gjenbruk av PMB i ny asfalt.

Rapporten leverer innspill til standardiserings- og normalarbeidet. Nye prøvingsmetoder er i dag tilgjengelig til evaluering av eksisterende PMB og andre modifiserte bindemidler.

Fjorten PMB-prøver fra asfalteringsjobber lagt i 2009–2012 ble analysert. Bestemmelse av Kompleksmodul (G^*) og MSCRT-Jnr verdi ble utført. Alle de 14 PMB'ene tilfredsstilte amerikanske PMB-krav (dimensjonerende dekketemperatur 60 °C) for *Høy trafikk*; 13 tilfredsstiller kravet for *Veldig høy trafikk* og 10 tilfredsstiller kravet for *Ekstremt høy trafikk*. Én PMB tilfredsstiller ikke kravet til spenningssensitivitet (stress-sensitivitet), men foreløpig synes ikke dette å ha gitt problem med den aktuelle vegstrekningen.

Dekkene ble fulgt opp på sporutvikling, som i hovedsak skyldes deformasjon, men også piggdekkslitasje. Etter 4–6 år brukstid viser de fleste PMB-strekningene en klar nedgang i årlig sporutvikling sammenlignet med forrige dekke, basert på 70/100 bitumen.

Det var ikke mulig å få en klar rangering av PMB-prøvene i forhold til sporutvikling eller relativ sporutvikling. En mulig grunn er at alle undersøkte PMB synes å ha svært gode deformasjonsegenskaper. Egenskaper til asfaltblandingen (korngradering, steinkvalitet og utførelse) kan også ha betydning for sporutviklingen.

Et forslag til ny ytelsesrelatert PMB-spesifikasjon er utarbeidet. DSR-metodene erstatter mykningspunkt, og Bending Beam Rheometer skal erstatte Fraass' bruddpunkt. Ny benevning for PMB er også foreslått.

6.2 Videre arbeid – behov for avklaring

Ved en overgang til ytelsesrelaterte spesifikasjoner bør det avklares hvilke krav som er ønskelige.

For høytemperateregenskaper og deformasjonsmotstand har man kommet forholdsvis langt, med etablerte DSR-metoder for PMB, og wheel track og annen asfalttesting av laboratorieblandinger, masseprøver og borprøver fra veg. Asfalttesting bør valideres mot feltmålinger på utvalgte vegstrekninger, der det legges referansedekker med ordinær 70/100 bitumen eller referanse-PMB.

En del spørsmål ved MSCRT-prøvingen bør undersøkes nærmere:

- Gir høyere skjærspenning bedre korrelasjon mellom Jnr og wheel track verdi?
- Gir stress-sensitive, «myke» PMB mer deformasjon i asfalttesting?
- Gir voksmodifiserte, stress-sensitive PMB mer deformasjon i asfalttesting?
- Hvilken nytte har vi av MSCRT % Recovery? Kan den erstatte elastisk tilbakegang ved 10 °C?
- Utførelsen av prøvingen kan forbedres, med tanke å oppnå bedre reproduserbarhet.

Spesielle krav til PMB bør utredes for spesielt utsatte steder, som busslommer, tungt trafikkerte lyskryss, rundkjøringer mv. Her kan det være interessant å kontrollere DSR-krav mot wheel track og annen typer asfalttesting.

BBR-prøving etter RTFOT på et utvalg bitumen- og PMB-grader bør utføres for å finne normale verdier. Verdiene skal gi grunnlag for temperaturkrav til kritisk stivhet og m-verdi.

Prøving med Prall-metoden kan være aktuell for å sannsynliggjøre forbedring av slitestyrke ved bruk av PMB. Det er trolig slitestyrken til mørteldelen (0–4 mm) som påvirkes mest av ulike bindemiddelvalg.

7 Bibliografi

- AASHTO. (2010). Performance-Graded Asphalt Binder. *AASHTO M320*. Washington D.C., USA: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) .
- AASHTO. (2015). Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. *AASHTO M332-14*. Washington D.C., USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Andersen, E. O. (1998-04). *Ny Asfaltteknologi, prosjektrapport nr. 5: Resultater fra bindemiddelundersøkelser*. Trondheim: Sintef Vegteknikk.
- Andersen, E. O. (1998-12). *Ny Asfaltteknologi – Sluttrapport*. Trondheim: SINTEF Vegteknikk.
- CEN TC 336. (2008, Juli). CEN/TS 15324. *Bitumen and bituminous binders. Determination of equiviscous temperature based on low shear viscosity using a dynamic shear rheometer in low frequency oscillation mode*. Brussels: CEN.
- FHWA. (2011, April). The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure. *Tech Brief FHWA-HIF-11-038*. US Department of Transportation – Federal Highway Administration.
- Lerfald, B. O. (2007). Utvikling av slitesterke tynndekker. Testing av bindemidler og innledende slitasjetesting med Trøger. *SBF IN A07002*. Trondheim: SINTEF Veg- og jernbaneteknikk.
- Schüller S., F. L. (1993). Effect of Binder Properties on Polymer Modified Asphalt Concrete. *5th Eurobitume Congress, Stockholm*. Eurobitume.
- Statens vegvesen. (2014). Håndbok N200 Vegbygging. Oslo: Vegdirektoratet.

8 Vedlegg

Vedlegg 1: Resultater MSCRT 60°C på PMB-prøver etter RTFOT

ID-prøve	R % _{3,2kPa}	R % _{6,4kPa}	Jnr _{0,1kPa}	Jnr _{3,2kPa}	Jnr _{6,4kPa}	% diff Jnr _{3,2kPa} /Jnr _{0,1kPa}	% Ymaks _{0,1kPa}	% Ymaks _{3,2kPa}	% Ymaks _{6,4kPa}
PmB 09-022 RTFOT p1	50,8	43	0,401	0,67	0,87	68	49,0	2435	8189
PmB 09-022 RTFOT p2	52,1	46	0,407	0,65	0,80	59	49,4	2356	7686
PmB 09-022 RTFOT p3	53,6	49	0,401	0,61	0,75	53	48,5	2245	7232
PmB 09-022 RTFOT Snitt	52,2	46	0,403	0,65	0,81	60	49,0	2345	7702
PmB 09-022 RTFOT Std.avv	1,4	3	0,004	0,03	0,06	8	0,5	96	478
PmB 09-023 RTFOT p1	13,1	7,9	0,96	1,24	1,46	29,6	99	4116	13462
PmB 09-023 RTFOT p2	13,3	7,8	0,96	1,24	1,47	28,9	100	4127	13582
PmB 09-023 RTFOT p3	11,9	7,0	0,99	1,27	1,49	28,5	102	4224	13788
PmB 09-023 RTFOT Snitt	12,7	7,6	0,97	1,25	1,47	29,0	100	4156	13611
PmB 09-023 RTFOT Std.avv	0,8	0,5	0,02	0,02	0,02	0,5	2	59	165
PmB 10-002 RTFOT p2	89,7	91,8	0,0924	0,0835	0,0609	-9,6	16,61	515	1112
PmB 10-002 RTFOT p3	89,8	92,0	0,0897	0,0817	0,0593	-8,9	16,25	506	1091
PmB 10-002 RTFOT p4	89,8	91,9	0,0913	0,0832	0,0605	-8,9	16,55	515	1111
PmB 10-002 RTFOT Snitt	89,73	91,92	0,0911	0,0828	0,0602	-9,1	16,5	512	1105
PmB 10-002 RTFOT Std.avv	0,06	0,06	0,0014	0,0010	0,0008	0,4	0,2	5	12
PmB 10-005 RTFOT p5	44,0	23,3	0,0919	0,280	0,649	204	11,80	977	5187
PmB 10-005 RTFOT p6	43,6	23,1	0,0937	0,274	0,636	193	11,87	957	5084
PmB 10-005 RTFOT p7	42,4	22,0	0,0926	0,280	0,644	203	11,73	974	5150
PmB 10-005 RTFOT Snitt	43,3	22,8	0,0927	0,278	0,643	200	11,80	970	5140
PmB 10-005 RTFOT Std.avv	0,9	0,7	0,0009	0,003	0,007	6	0,07	11	52
PmB 10-014 RTFOT p1	74,5	72,3	0,066	0,082	0,092	25	9,2	351	1022
PmB 10-014 RTFOT p2	75,0	72,9	0,063	0,082	0,092	31	9,0	351	1020
PmB 10-014 RTFOT p3	72,8	70,1	0,070	0,094	0,107	35	9,8	393	1159
PmB 10-014 RTFOT Snitt	74,1	71,8	0,066	0,086	0,097	30	9,4	365	1067
PmB 10-014 RTFOT Std.avv	1,1	1,5	0,004	0,007	0,008	5	0,4	24	80
PmB 10-015 RTFOT p1	88,7	91,0	0,042	0,046	0,037	9	7,9	272	634
PmB 10-015 RTFOT p2	87,9	89,0	0,040	0,048	0,045	21	7,6	277	685
PmB 10-015 RTFOT p3	87,6	88,4	0,046	0,049	0,047	7	8,1	279	697
PmB 10-015 RTFOT Snitt	88,1	89,5	0,043	0,048	0,043	12	7,9	276	672
PmB 10-015 RTFOT Std.avv	0,6	1,3	0,003	0,002	0,005	8	0,2	4	34
PmB 11-008 RTFOT p1	86,7	81,1	0,119	0,166	0,23	40	23,4	899	2662
PmB 11-008 RTFOT p3	85,8	79,9	0,124	0,179	0,25	44	24,0	940	2794
PmB 11-008 RTFOT p4	86,9	81,3	0,126	0,168	0,23	34	24,4	918	2689
PmB 11-008 RTFOT p5	85,2	78,4	0,130	0,192	0,27	48	24,8	992	3023
PmB 11-008 RTFOT Snitt	86,2	80,2	0,124	0,176	0,25	41	24,1	937	2792
PmB 11-008 RTFOT Std.avv	0,8	1,4	0,005	0,012	0,02	6	0,6	40	164
PmB 11-019 RTFOT p1	88,15	90,51	0,1073	0,097	0,072	-9,6	18,07	560	1228
PmB 11-019 RTFOT p2	88,14	90,46	0,1075	0,098	0,073	-9,2	18,12	562	1236
PmB 11-019 RTFOT p6	88,44	90,77	0,1051	0,095	0,070	-9,9	17,88	553	1208
PmB 11-019 RTFOT Snitt	88,2	90,6	0,1066	0,096	0,072	-9,6	18,02	558	1224
PmB 11-019 RTFOT Std.avv	0,2	0,2	0,0013	0,002	0,001	0,3	0,12	5	14
PmB 12-014 RTFOT p5	73,9	72,7	0,0770	0,1122	0,1216	45,7	11,19	472	1362
PmB 12-014 RTFOT p6	75,3	73,9	0,0758	0,1112	0,1220	46,7	11,34	477	1376
PmB 12-014 RTFOT Snitt	74,6	73,3	0,0764	0,1117	0,1218	46,2	11,27	475	1369
PmB 12-014 RTFOT Std.avv	1,0	0,8	0,0008	0,0007	0,0003	0,7	0,11	4	10
PmB 09-028 RTFOT p4-run 2	22,9934	14,4	0,641	0,828	1,020	29,1	67,7	2789	9344
PmB 09-028 RTFOT p5-run 2	22,4773	14,1	0,646	0,831	1,024	28,7	68,1	2800	9382
PmB 09-028 RTFOT p6-run 2	22,102	13,9	0,650	0,838	1,024	28,8	68,5	2819	9400
PmB 09-028 RTFOT Snitt	22,5	14,1	0,646	0,832	1,022	28,9	68,1	2802	9376
PmB 09-028 RTFOT Std.avv	0,4	0,3	0,004	0,005	0,002	0,2	0,4	15	29
PmB 09-021 RTFOT p4-run 2	52,4	40,4	0,293	0,366	0,491	25,0	33,8	1327	4550
PmB 09-021 RTFOT p5-run 2	52,8	40,9	0,291	0,361	0,484	24,0	33,6	1313	4495
PmB 09-021 RTFOT p7-run 2	53,1	41,3	0,287	0,357	0,478	24,5	33,2	1300	4443
PmB 09-021 RTFOT Snitt	52,8	40,9	0,290	0,361	0,484	24,5	33,5	1313	4496
PmB 09-021 RTFOT Std.avv	0,4	0,5	0,003	0,004	0,006	0,5	0,3	14	54
PmB 09-014 RTFOT p5-run 2	65,5	64,4	0,0867	0,111	0,118	27,6	11	432	1262
PmB 09-014 RTFOT p6-run 2	67,8	67,4	0,0943	0,099	0,103	5,0	12	396	1129
PmB 09-014 RTFOT p9-run 2	69,9	69,0	0,0575	0,091	0,096	57,4	8	365	1050
PmB 09-014 RTFOT Snitt	67,8	66,9	0,0795	0,100	0,106	30,0	10	398	1147
PmB 09-014 RTFOT Std.avv	2	2	0,02	0,010	0,011	26,3	2	34	107
PmB 11-028 RTFOT p4-run 2	43,4	40,2	0,258	0,295	0,334	14,4	28	1046	3254
PmB 11-028 RTFOT p5-run 2	44,2	40,9	0,251	0,288	0,328	14,7	28	1024	3191
PmB 11-028 RTFOT p6-run 2	44,3	41,0	0,249	0,285	0,324	14,4	27	1014	3157
PmB 11-028 RTFOT Snitt	44,0	40,7	0,253	0,289	0,329	14,5	28	1028	3201
PmB 11-028 RTFOT Std.avv	0,5	0,4	0,004	0,005	0,005	0,2	0	16	49
PmB 09-013 RTFOT p4-run 2	29,7	20,6	0,537	0,700	0,861	30,4	58	2386	7944
PmB 09-013 RTFOT p5-run 2	29,2	20,2	0,542	0,710	0,874	31,0	58	2418	8063
PmB 09-013 RTFOT p6-run 2	29,5	20,4	0,533	0,699	0,857	31,1	57	2382	7917
PmB 09-013 RTFOT Snitt	29,5	20,4	0,537	0,703	0,864	30,8	57,7	2395	7975
PmB 09-013 RTFOT Std.avv	0,3	0,2	0,004	0,006	0,009	0,4	0,4	19	78
PmB 11-007 RTFOT p4-run 2	63,36	62,4	0,200	0,351	0,366	75,5	28	1345	3905
PmB 11-007 RTFOT p5-run 2	67,92	68,1	0,169	0,301	0,301	78,0	25	1195	3342
PmB 11-007 RTFOT p6-run 2	77,20	75,8	0,123	0,206	0,216	68,1	20	905	2505
PmB 11-007 RTFOT Snitt	69	69	0,16	0,29	0,29	74	24	1148	3251
PmB 11-007 RTFOT Std.avv	7	7	0,04	0,07	0,08	5	4	224	704

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

Vedlegg 2: Resultater kompleksmodul (G^*) 40°C på PMB-prøver etter RTFOT

	strain	$ G^* $	$ G^* /\sin(\delta)$	delta
	%	[kPa]	[kPa]	[°]
PmB 09-022 RTFOT p1	1	45,0	50,8	62,3
PmB 09-022 RTFOT p2	1	43,6	50,0	60,8
PmB 09-022 RTFOT p4	1	44,1	50,5	60,7
Gjennomsnitt		44,2	50,4	61,3
PmB 09-023 RTFOT p7 run 2	1	68,2	74,7	65,90
PmB 09-023 RTFOT p10	1	68,7	75,3	65,90
PmB 09-023 RTFOT p11	1	67,0	73,4	65,80
Gjennomsnitt		68,0	74,5	65,87
PmB 10-002 RTFOT p1	1	61,2	69,2	62,2
PmB 10-002 RTFOT p6	10	62,1	70,3	62,1
PmB 10-002 RTFOT p8	1	62,5	70,7	62,1
Gjennomsnitt		61,9	70,1	62,1
PmB 10-005 RTFOT p1	1	217	241	64,4
PmB 10-005 RTFOT p2	1	211	234	64,5
PmB 10-005 RTFOT p4	1	219	243	64,2
Gjennomsnitt		216	239	64,4
PmB 10-014 RTFOT p9	1	254	306	56,0
PmB 10-014 RTFOT p10	1	248	299	55,9
PmB 10-014 RTFOT p11	1	240	288	56,6
Gjennomsnitt		247	298	56
PmB 10-015 RTFOT p4 run 2	1	191	223	59,2
PmB 10-015 RTFOT p5	1	206	242	58,3
PmB 10-015 RTFOT p6	1	209	245	58,5
Gjennomsnitt		202	237	58,7
PmB 11-008 RTFOT p6	1	49,9	56,3	62,50
PmB 11-008 RTFOT p7	1	50,1	56,5	62,30
PmB 11-008 RTFOT p8	1	50,3	56,8	62,40
Gjennomsnitt		50,1	56,5	62,40
PmB 11-019 RTFOT p6	1	70,7	79	63,60
PmB 11-019 RTFOT p7	1	72,2	80,5	63,60
PmB 11-019 RTFOT p8	1	71,2	79,5	63,60
PmB 11-019 RTFOT p9	1	72,5	80,9	63,70
Gjennomsnitt		71,7	80,0	63,63
PmB 12-014 RTFOT p1	1	149	184	53,9
PmB 12-014 RTFOT p2	1	147	182	53,7
PmB 12-014 RTFOT p7	1	126	162	51,0
PmB 12-014 RTFOT p8	1	128	163	51,3
Gjennomsnitt		138	173	52,5
PmB 09-028 RTFOT p1	1	82,0	90,1	65,5
PmB 09-028 RTFOT p2	1	81,1	89,1	65,5
PmB 09-028 RTFOT p3	1	82,0	90,1	65,5
Gjennomsnitt		81,7	89,8	65,5
PmB 09-021 RTFOT p1	1	81,9	91,7	63,2
PmB 09-021 RTFOT p2	1	82,1	92,00	63,2
PmB 09-021 RTFOT p3	1	82,0	91,9	63,1
Gjennomsnitt		82,00	91,9	63,2
PmB 09-014 RTFOT p2	1	160	202	52,2
PmB 09-014 RTFOT p3	1	161	204	52,1
PmB 09-014 RTFOT p4	1	154	197	51,6
Gjennomsnitt		158	201	52,0
PmB 11-028 RTFOT p1	1	166,0	195	58,4
PmB 11-028 RTFOT p2	1	164,0	193,00	58,1
PmB 11-028 RTFOT p3	1	160,0	189	57,8
Gjennomsnitt		163	192	58,1
PmB 09-013 RTFOT p1	1	86,7	95,2	65,6
PmB 09-013 RTFOT p2	1	86,6	95,10	65,5
PmB 09-013 RTFOT p3	1	86,3	94,7	65,6
Gjennomsnitt		86,5	95,0	65,6
PmB 11-007 RTFOT p1	1	80,1	92,1	60,4
PmB 11-007 RTFOT p2	1	81,7	93,00	61,4
PmB 11-007 RTFOT p3	1	79,8	92,6	59,5
Gjennomsnitt		80,5	92,6	60,4

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

Vedlegg 3: Resultater kompleksmodul (G^*) 60°C på PMB-prøver etter RTFOT

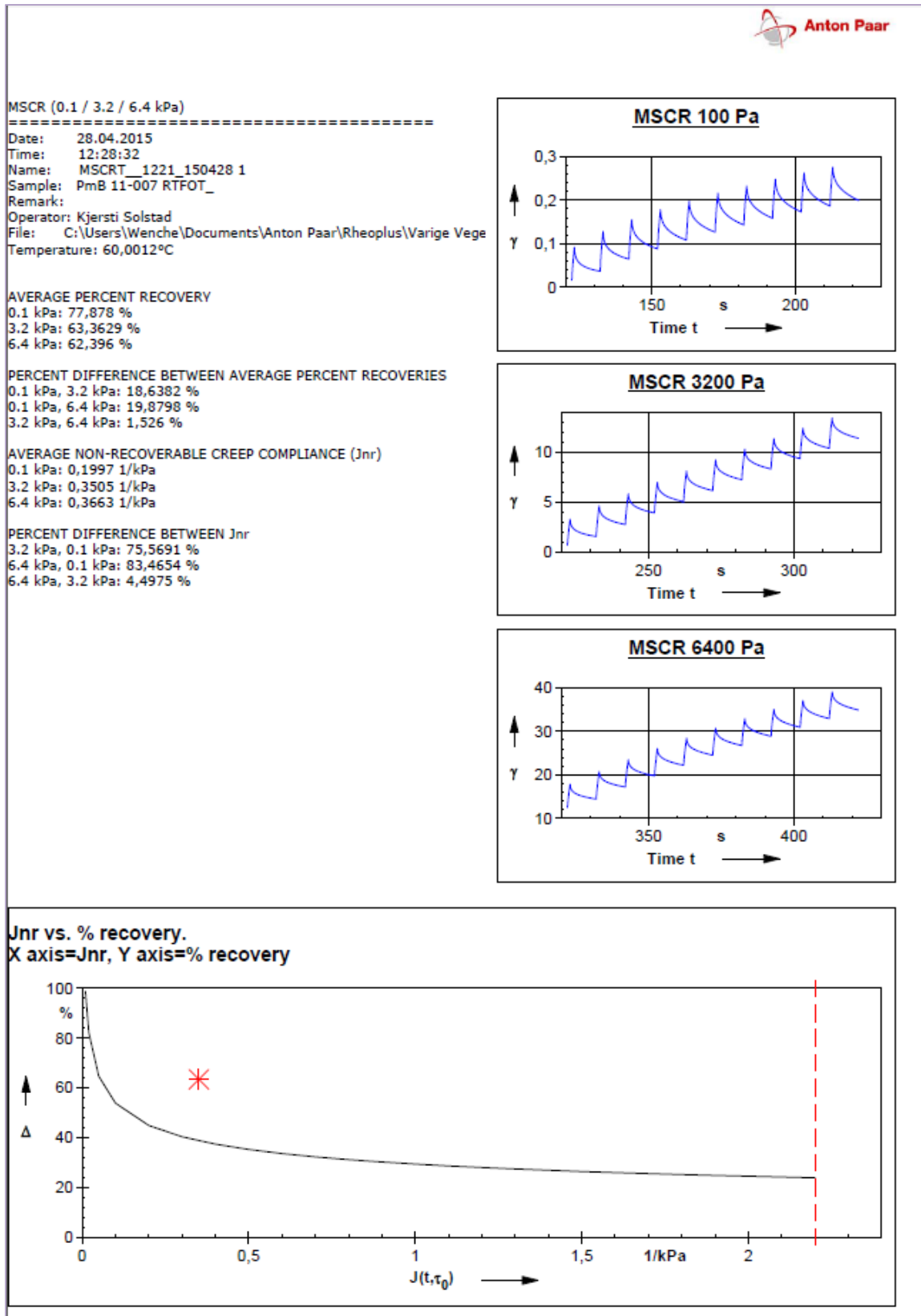
	strain	$ G^* $	$ G^* /\sin(\delta)$	delta
	%	[kPa]	[kPa]	[°]
PmB 09-022 RTFOT p4-run 2	1	4,783	5,3	64,2
PmB 09-022 RTFOT p5	1	4,754	5,3	64,1
PmB 09-022 RTFOT p6	1	4,766	5,3	65,0
Gjennomsnitt		4,768	5,29	64,4
PmB 09-023 RTFOT p7 run 2	1	5,92	6,28	70,6
PmB 09-023 RTFOT p8	1	5,87	6,23	70,4
PmB 09-023 RTFOT p9	1	5,80	6,13	71,1
Gjennomsnitt		5,86	6,21	70,7
PmB 10-002 RTFOT p5	10	5,82	6,78	59,2
PmB 10-002 RTFOT p7	10	5,95	6,93	59,2
Gjennomsnitt		5,89	6,86	59,2
PmB 10-005 RTFOT p3	1	17,7	19,3	66,7
PmB 10-005 RTFOT p6	1	17,9	19,5	66,6
PmB 10-005 RTFOT p7	1	18,0	19,6	66,5
Gjennomsnitt		17,9	19,5	66,6
PmB 10-014 RTFOT p9 run 2	1	18,2	21,5	57,8
PmB 10-014 RTFOT p10 run 2	1	17,8	20,8	59,2
PmB 10-014 RTFOT p11, run 3	1	16,7	19,2	60,7
PmB 10-014 RTFOT p12	1	16,1	18,3	62,0
Gjennomsnitt		17,2	20,0	59,9
PmB 10-015 RTFOT p4 run 3	1	14,20	16,20	61,0
PmB 10-015 RTFOT p5 run 2	1	14,30	16,40	60,4
PmB 10-015 RTFOT p6 run 2	1	14,30	16,40	60,8
Gjennomsnitt		14,27	16,33	60,7
PmB 11-008 RTFOT p9	1	5,12	5,56	67,0
PmB 11-008 RTFOT p10	1	4,79	5,21	66,8
PmB 11-008 RTFOT p11	1	4,92	5,35	66,8
Gjennomsnitt		4,9	5,4	66,9
PmB 11-019 RTFOT p1	1	6,27	7,2	60,6
PmB 11-019 RTFOT p3	1	6,27	7,2	60,6
PmB 11-019 RTFOT p4	1	6,28	7,2	60,7
Gjennomsnitt		6,273	7,2	60,6
PmB 12-014 RTFOT p4	1	12,34	14,3	59,4
PmB 12-014 RTFOT p5	1	12,37	14,5	58,5
PmB 12-014 RTFOT p6	1	12,58	14,8	58,5
Gjennomsnitt		12,43	14,5	58,8
PmB 09-028 RTFOT p4	1	6,91	7,43	68,4
PmB 09-028 RTFOT p5	1	6,93	7,45	68,5
PmB 09-028 RTFOT p6	1	6,92	7,44	68,5
Gjennomsnitt		6,92	7,44	68,5
PmB 09-021 RTFOT p4	1	7,83	8,77	63,3
PmB 09-021 RTFOT p5	1	7,87	8,81	63,3
PmB 09-021 RTFOT p6	1	7,89	8,84	63,2
Gjennomsnitt		7,86	8,81	63,3
PmB 09-014 RTFOT p5	1	15,0	17,7	57,9
PmB 09-014 RTFOT p6	1	14,90	17,9	56,6
PmB 09-014 RTFOT p7	1	15,30	18,3	56,4
Gjennomsnitt		15,1	18,0	57,0
PmB 11-028 RTFOT p4	1	12,80	13,94	66,68
PmB 11-028 RTFOT p5	1	12,89	14,02	66,86
PmB 11-028 RTFOT p6	1	12,96	14,12	66,63
Gjennomsnitt		12,88	14,03	66,7
PmB 09-013 RTFOT p4	1	7,07	7,64	67,8
PmB 09-013 RTFOT p5	1	7,02	7,59	67,8
PmB 09-013 RTFOT p6	1	7,10	7,67	67,8
Gjennomsnitt		7,06	7,63	67,8
PmB 11-007 RTFOT p4	1	6,46	7,15	64,5
PmB 11-007 RTFOT p5	1	6,36	7,08	64,00
PmB 11-007 RTFOT p6	1	6,56	7,27	64,5
Gjennomsnitt		6,46	7,17	64,3

Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

Vedlegg 4: Resultater kompleksmodul (G^*) 70°C på PMB-prøver etter RTFOT

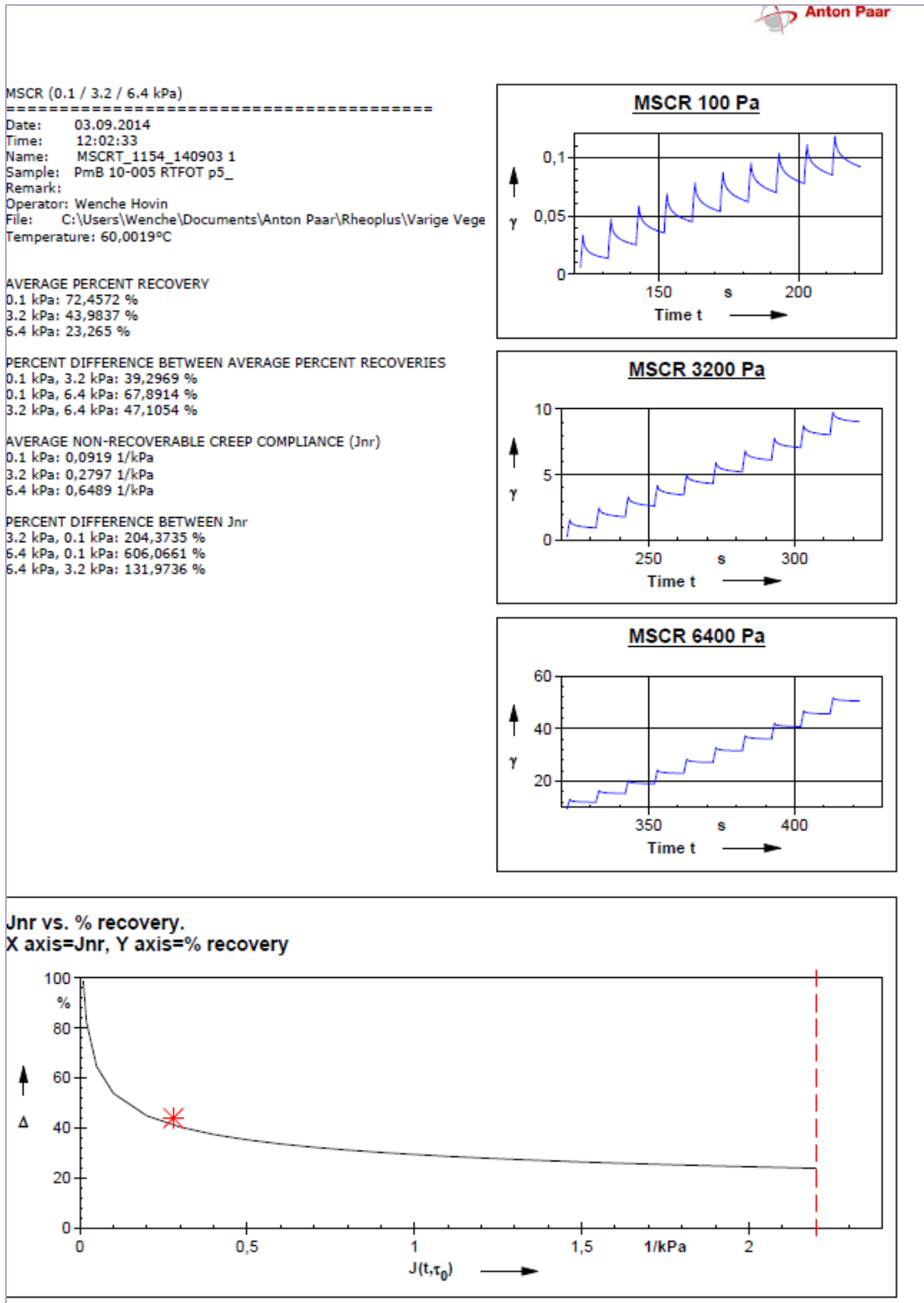
	strain	$ G^* $	$ G^* /\sin(\delta)$	delta
	%	[kPa]	[kPa]	[°]
PmB 09-022 RTFOT p1-run 3	1	1,907	2,063	67,59
PmB 09-022 RTFOT p4-run 3	1	1,910	2,086	66,3
Gjennomsnitt		1,909	2,075	66,9
PmB 09-023 RTFOT p1-run1	1	2,002	2,057	76,78
PmB 09-023 RTFOT p2-run1	1	2,011	2,071	76,14
PmB 09-023 RTFOT p3-run1	1	1,988	2,041	76,89
Gjennomsnitt		2,000	2,06	76,6
PmB 10-002 RTFOT p8 run 3 70 gr	1	2,5	2,91	59,2
Gjennomsnitt		2,500	2,910	59,2
PmB 10-005 RTFOT p1-run1	1	7,736	8,634	63,64
PmB 10-005 RTFOT p2-run1	1	7,671	8,573	63,49
PmB 10-005 RTFOT p2-run1	1	8,083	9,065	63,08
Gjennomsnitt		7,8	8,8	63,4
PmB 10-014 RTFOT p1-run1	1	6,979	8,385	56,34
PmB 10-014 RTFOT p2-run1	1	6,989	8,656	53,84
PmB 10-014 RTFOT p3-run1	1	7,55	9,461	52,94
PmB 10-014 RTFOT p4-run1	1	6,514	7,704	57,73
Gjennomsnitt		7,0	8,6	55
PmB 10-015 RTFOT p1-run1	1	4,455	4,888	65,7
PmB 10-015 RTFOT p2-run1	1	4,436	4,872	65,58
PmB 10-015 RTFOT p3-run1	1	4,44	4,872	65,69
Gjennomsnitt		4,444	4,877	65,66
PmB 11-008 RTFOT p1-run1	1	1,869	1,983	70,51
PmB 11-008 RTFOT p2-run1	1	1,868	1,985	70,23
PmB 11-008 RTFOT p2-run1	1	1,884	2,002	70,19
Gjennomsnitt		1,874	1,990	70,3
PmB 11-019 RTFOT p1-run1	1	2,579	2,95	60,96
PmB 11-019 RTFOT p2-run1	1	2,552	2,919	60,97
PmB 11-019 RTFOT p3-run1	1	2,545	2,91	60,99
Gjennomsnitt		2,56	2,93	60,97
PmB 12-014 RTFOT p1-run 3	1	4,35	4,86	63,5
PmB 12-014 RTFOT p2-run 3	1	4,55	5,15	61,9
Gjennomsnitt		4,45	5,0	62,7
PmB 09-028 RTFOT p2-run 2	1	2,41	2,52	73,3
PmB 09-028 RTFOT p3-run 2	1	2,44	2,54	73,4
Gjennomsnitt		2,43	2,53	73,4
PmB 09-021 RTFOT p2-run 2	1	2,99	3,26	66,6
PmB 09-021 RTFOT p3-run 2	1	3,01	3,28	66,5
Gjennomsnitt		3,00	3,27	66,6
PmB 09-014 RTFOT p2-run 2	1	5,83	6,85	58,3
PmB 09-014 RTFOT p3-run 2	1	5,89	6,91	58,5
Gjennomsnitt		5,86	6,88	58,4
PmB 11-028 RTFOT p2-run 2	1	4,06	4,27	72,1
PmB 11-028 RTFOT p3-run 2	1	4,08	4,28	72,1
Gjennomsnitt		4,07	4,28	72,1
PmB 09-013 RTFOT p2-run 2	1	2,490	2,62	71,7
PmB 09-013 RTFOT p3-run 2	1	2,480	2,62	71,8
Gjennomsnitt		2,485	2,62	71,8
PmB 11-007 RTFOT p2-run 2	1	2,250	2,45	67,1
PmB 11-007 RTFOT p3-run 2	1	2,220	2,39	67,8
Gjennomsnitt		2,24	2,42	67,5

Vedlegg 5-1: Resultater fra MSCRT-måling på PMB-prøve 11-007

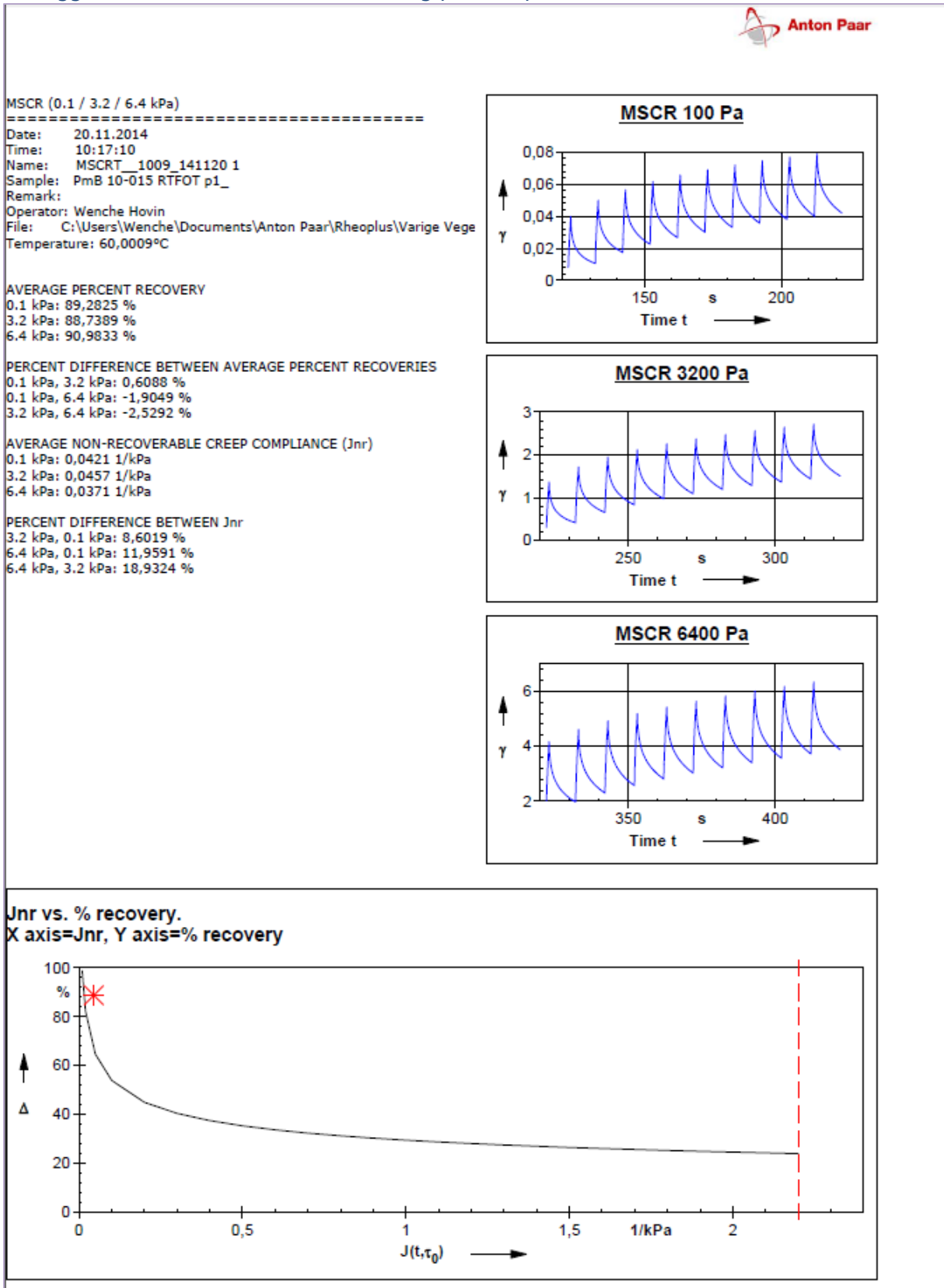


Polymermodifisert bitumen – Egenskaper og krav

Vedlegg 5-2: Resultater fra MSCRT-måling på PMB-prøve 10-005



Vedlegg 5-3: Resultater fra MSCRT-måling på PMB-prøve 10-015





Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Publikasjonsekspedisjonen
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO
Tlf: (+47 915) 02030
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen