

07015

Fatigue of Asphalt Mixes - Theory of Viscoelasticity and Continuum Damage Mechanics Applied to Uniaxial Fatigue Data from Laboratory Tests

Richard Nilsson

*Department of Technology and Society
Lund University*



TABLE OF CONTENTS

SUMMARY.....	I
SAMMANFATTNING.....	XI
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 BACKGROUND.....	1
1.2 OBJECTIVES, GOALS AND SCOPE.....	4
1.3 ORGANIZATION OF THE THESIS.....	5
2 SUMMARY OF EARLIER WORK.....	7
3 MATERIAL MODELS.....	13
3.1 THE WÖHLER CHART.....	13
3.2 THE ASPHALT INSTITUTE CRITERION.....	14
3.3 THE SHELL CRITERION.....	15
3.4 KACHANOV'S CONTINUUM DAMAGE MECHANICS THEORY.....	16
3.4.1 Damage Based on Actual Stress.....	17
3.4.2 Damage Based on Energy.....	19
3.5 MODIFIED GRIFFITH MODEL BASED ON SHEAR STRESS.....	20
3.6 THE ULLIDTZ MODEL BASED ON ENERGY DENSITY	22
3.7 THEORY OF VISCOELASTICITY.....	23
3.7.1 Correspondence Principle.....	25
3.7.2 Uniaxial Constitutive Model Using Work Potential Theory.....	26
3.7.3 Calculation of Pseudostrain.....	30
3.7.4 Time-Temperature Superposition Principle for LVE Behaviour.....	32
3.7.5 Dynamic Modulus and Phase Angle.....	34
3.7.6 Prediction of Relaxation Modulus from Dynamic Modulus.....	37
3.7.7 Prediction of Creep Compliance from Dynamic Modulus.....	38
3.8 A MECHANISTIC FATIGUE PREDICTION MODEL.....	39
3.9 DESIGN CRITERIA USED IN SWEDEN (ATB VÄG).....	40
3.9.1 Climate.....	42
3.9.2 Specifications for the material.....	44
4 MATERIALS AND METHODS.....	49
4.1 MATERIALS.....	49
4.2 TEST PROGRAM.....	56
4.2.1 Universal Testing Machine, UTM-25.....	56
4.2.2 Frequency Sweep Test.....	59
4.2.3 Constant Strain Rate Monotonic Test.....	61
4.2.4 Cyclic Fatigue.....	62
5 RESULTS AND DISCUSSION.....	65

5.1	LABORATORY TESTING.....	65
5.1.1	Void content.....	65
5.1.2	Dynamic Modulus & Phase Angle.....	72
5.2	THE WÖHLER CHART.....	81
5.3	THE ASPHALT INSTITUTE CRITERION.....	84
5.4	THE SHELL CRITERION.....	85
5.5	KACHANOV'S CONTINUUM DAMAGE MECHANICS THEORY.....	87
5.5.1	Damage Based on Energy Density.....	90
5.5.2	Damage Based on Actual Stress.....	92
5.6	MODIFIED GRIFFITH MODEL BASED ON SHEAR STRESS.....	96
5.7	ULLIDTZ MODEL BASED ON ENERGY DENSITY.....	100
5.8	UNIAXIAL CONSTITUTIVE MODELING USING VISCOELASTICITY AND CONTINUUM DAMAGE MECHANICS.....	104
5.8.1	Constant Strain Rate Monotonic Tests.....	104
5.8.2	Cyclic Fatigue Test.....	115
5.8.3	Predicting Response Using Damage Function and Regression Constants.....	126
5.8.4	Predicting Response Using the Simplified Mechanistic Fatigue Prediction Model.....	130
6	CONCLUSIONS.....	135
6.1	MATERIALS.....	135
6.2	FREQUENCY SWEEP TESTS.....	135
6.3	THE WÖHLER CHART.....	136
6.4	THE ASPHALT INSTITUTE CRITERION.....	136
6.5	THE SHELL CRITERION.....	137
6.6	KACHANOV'S CONTINUUM DAMAGE MECHANICS THEORY.....	137
6.7	THE MODIFIED GRIFFITH MODEL BASED ON SHEAR STRESS.....	138
6.8	ULLIDTZ MODEL BASED ON ENERGY DENSITY.....	138
6.9	UNIAXIAL CONSTITUTIVE MODELING USING VISCOELASTICITY AND CONTINUUM DAMAGE MECHANICS.....	139
6.10	RECOMMENDATIONS AND FURTHER WORK.....	141

REFERENCES

NOTATIONS

APPENDIX 1..... Predicted C_1 vs. time.

APPENDIX 2..... Calculation of pseudostrain for the permanent strain
in a controlled-stress test.

APPENDIX 3..... Calculation of pseudostrain for cycle #1.

APPENDIX 4..... Data for all of the tested specimens.

SAMMANFATTNING

Bakgrund

I takt med att analytiska dimensioneringsmetoder utvecklas ökar även behovet av att kunna bestämma mekaniska egenskaper hos materialen i överbyggnaden och terrassen. Utmattningsprickor orsakade av tung trafik, permanenta deformationer (spårbildning), termisk sprickbildning, ojämnheter, tjäle och reflektionssprickor är några av de dimensioneringskriterier som kan användas då en väg dimensioneras.

En analytisk (mekanistisk) dimensioneringsmodell består av två huvudmodeller; materialmodeller för materialen i överbyggnaden och terrassen samt en strukturell responsmodell. Den strukturella responsmodellens uppgift är att beräkna spänningar och töjningar i överbyggnaden, som sedan används för att prediktera nedbrytningen av vägen, dvs. hur exempelvis utmattningsprickor, spår, ojämnheter etc. utvecklas över tiden. Det föreslås av COST 333¹ att en inkremental beräkningsprocedur bör användas då det framtida tillståndet för vägen beräknas vilket betyder att den strukturella responsmodellen måste kunna beskriva den gradvisa nedbrytningen i varje lager för varje lastcykel. Materialmodellerna behövs för att indata (spänningar och töjningar) till den strukturella modellen ska kunna beräknas på ett korrekt sätt. För att kunna bedöma det framtida tillståndet för vägen på ett realistiskt sätt är det därför viktigt att använda avancerade och korrekta materialmodeller.

När skador i material studeras används i huvudsak två angreppssätt; en mikromekanisk ansats eller så behandlas materialet som ett continuum. När en mikromekanisk ansats används beskrivs skadorna av geometriska parametrar, t.ex. sprickvidd för mikrosprickorna, orientering eller densitet. När materialet betraktas som ett continuum, även kallat continuum damage mechanics, representeras det skadade materialet av ett continuum som har en avsevärt större skala jämfört med exempelvis sprickvidd för mikrosprickor.

De flesta utmattningskriterier som används idag är empiriska relationer baserade på laboratorieförsök och/eller fältförsök. Oftast relaterar modellerna enbart till en initial respons (t.ex. initial dragtöjning i underkant beläggning) vilket betyder att de inte beskriver de komplexa belastningsfall som uppkommer i en väg under dess livslängd.

Det stora antalet olika typer av laboratorieutrustningar som har utvecklats under åren är också ett problem. Varje försöksupställningen ger oftast en unik beskrivning av det testade materialets utmattningsegenskaper. Om en konstant töjningsnivå används uppstår inte alltid brott i materialet men om i

¹ Development of New Bituminous Pavement Design Methods

stället en konstant spänningsnivå används uppstår nästan alltid brott. I det första fallet måste därför definieras. Definitionen som brukar användas idag är att brott i materialet anses ha uppkommit då den initiala styvheten har reducerats till 50 % av ursprungsvärdet. Brott i fält brukar oftast definieras som en viss mängd sprickor på ytan.

Denna doktorsavhandling är den sista delen av ett doktorandprojekt kallat "Materialtekniska betingelser för utmattning av asfaltbeläggningar". Syftet med doktorsavhandlingen är att utvärdera existerande modeller, som används för att beskriva utmattning av asfaltbeläggningar. Exempelvis ATB VÄG, Asphalt Institutes kriterium, Shells kriterium etc. och eventuellt också hitta en förbättrad modell som skulle kunna användas i en strukturell responsmodell i framtiden. Olika Continuum Damage Mechanics (CDM) modeller kommer också att utvärderas. Erhållna resultat med dessa modeller kommer att jämföras med resultat erhållna med mera traditionella metoder. I projektet har också enaxiella laboratorieförsök utvärderats.

Modeller som använts för att utvärdera utmattningsdata

Några olika modeller som används för att beskriva utmattningsegenskaperna hos en asfaltbeläggning har utvärderats i detta arbete. Resultat erhållna med de traditionella metoderna har jämförts med de beräknade med Continuum Damage Mechanics modellerna. Följande traditionella modeller har använts:

- Wöhler-diagram
- Svenskt dimensioneringskriterium (ATB VÄG)
- Asphalt Institutes (AI) kriterium
- Shells kriterium

Samt följande Continuum Damage Mechanics modeller:

- Kachanov's Continuum Damage Mechanics teori
- Modifierad Griffith-modell baserad på skjuvspänning
- Ullidtz modell baserad på energitäthet
- Enaxiell konstitutiv modellering av asfalt baserad på viskoelasticitet och Continuum Damage Mechanics teori.

Material och Metod

I projektet har tre typer av massor använts, en standard bärlagermassa AG16, 4.8 %, 160/220 tillsammans med två alternativa massor kallade Inorbind16™, 5.3 %, 70/100 + fiber och Durabind16™, 4.3 %, 70/100 + polymer.

Stenmaterialet består huvudsakligen av gnejs med inslag av diabas. Bindemedlet har levererats av Nynäs och är av typen 160/220 och 70/100 och har tillverkats av råolja från Venezuela. I Inorbind16™-massan har fiber

tillsatts och bindemedlet ingående i Durabind16™-massan modifierades med en polymer kallad Vestoplast™.

Arbetsgången har varit följande:

- Packning av plattor
- Utborrning av provkroppar
- Parallelsågning av ändytor
- Torkning
- Bestämning av hålrumshalt
- Fastlimning av ändplattor på provkropparna
- Fastlimning av LVDT-hållare på provkropparna
- Testning

Plattor, 600 x 400 x 150 mm, packades med en "Rolling Wheel Compactor". Från varje platta borrades 10 provkroppar (\varnothing 75 mm) ut med en portabel borrarutrustning. Efter borrningen kapades provkropparna till en höjd av 150 mm (2:1 förhållande).

Provkropparna placerades i ett torkskåp över natten (20-25 °C). Därefter mättes skrymdensiteten enligt vattenmetoden. När provkropparna hade torkat limmades ändplattor och LVDT-hållare fast.

Försöken utfördes med en servohydraulisk utrustning, UTM-25 (Universal Testing Machine-25 kN) levererad av Industrial Process Controls Ltd (IPC), Australien. Utrustningen består av en ram, kolv, lastcell, hydraulisk oljepump, kontroll- och datainsamlingssystem (CDAS) och en klimatkammare.

Följande testprogram användes:

- Frekvenssvep
- Hållfasthetsförsök med konstant belastningshastighet
- Utmattningsförsök

Frekvenssvep utfördes vid temperaturerna 10, 0, -10, 20, 30, 40 samt ett extra försök vid 10 °C för att bestämma materialets komplexmodul (E^*) och fasvinkel (ϕ) samt för att få ett utgångsvärde på provkroppens egenskaper innan förstörande testning utfördes. Extraförsöket vid 10 °C utfördes för att kontrollera om provkroppen blivit skadad vid de tidigare frekvenssvepen. För att minimera de permanenta deformationerna användes en sinusformad last. Sex frekvenser användes i varje svep, 0,1, 0,5, 1, 5, 10 och 20 Hz och svepet startade alltid med den högsta frekvensen. Data användes också för att konstruera "masterkurvor" för materialet.

Vid en serie hållfasthetsförsök med konstant belastningshastighet studerades materialets hastighetsberoende egenskaper samt brotthållfasthet. Försöken utfördes vid 0 och 10 °C och samtliga provkroppar testades till brott. Olika belastningshastigheter användes.

Utmattningsförsök med både konstant spännings- och töjningsnivå utfördes vid 0 och 10 °C. Vid samtliga försök användes en sinusformad lastpuls (1 och 10 Hz) utan viloperioder. Provkropparna testades till brott och antalet lastcykler till brott varierade mellan 5 000 och 200 000 cykler.

Resultat och diskussion

Material: De testade massorna var relativt grova vilket gjorde det svårt att packa materialet och risken för separationer ökade jämfört med om finare massor hade använts. Det är därför mycket viktigt hur materialet hanteras för att kunna undvika separationer. Det är också viktigt att samma operatör packar plattorna. En klar trend var att hålrumshalten i plattorna var högre i kanterna, dvs. där hjulet ändrar riktning, och lägre i mitten.

Frekvenssväp: Som förväntat var den dynamiska modulen lägst för AG16-massan och högst för Durabind16™-massan. Särskilt vid höga temperaturer uppvisar den polymermodifierade massan överlägsna egenskaper jämfört med en icke modifierad massa. Det finns även skillnader i fasvinkeln mellan massorna, massan innehållande det mjukaste bindemedlet har en högre fasvinkel jämfört med massorna med det hårdare bindemedlet om jämförelsen görs vid samma temperatur.

Wöhler-diagram: Den brantaste lutningen (n) erhöles för AG16-massan och den flackaste lutningen för Durabind16™-massan. Inorbind16™-massan placerade sig mellan de båda andra massorna. Det var också intressant att se att resultaten som framräknats med VTI:s programvara stämde relativt väl överens med testresultaten från de spänningskontrollerade försöken utförda på AG16-massan.

Asphalt Institutes (AI) kriterium: Asphalt Institutes kriterium användes för alla tre massatyperna (töjningskontrollerade försök) för att beräkna den initialt tillåtna töjningsnivån. Beräknade töjningsnivåer jämfördes med uppmätta nivåer och korrelationen mellan värdena var relativt god. Bäst korrelation erhöles för testerna utförda på Inorbind16™ och Durabind16™ massorna. Det genomsnittliga förhållandet mellan beräknade och uppmätta värden var 0.83 för AG16-massan och 1.00 och 1.03 för Inorbind16™- och Durabind16™-massorna.

Shells kriterium: Genom att med hjälp av SOLVER-funktionen i EXCEL variera C-värdet i Shells kriterium kunde felen mellan beräknade och uppmätta töjningar minimeras. För AG16-massan erhöles bäst korrelation

mellan uppmätta och beräknade värde med ett C-värde på 14.4, för Inorbind16TM- och Durabind16TM-massorna användes i stället C-värdena 13.8 och 12.0 för att uppnå bäst korrelation mellan uppmätta och beräknade värden. Tidigare försök indikerar att för töjningskontrollerade försök ger ett C-värde lika med 10.5 $\mu\text{strain}/\%$ bitumen resultat som är korrekta inom $\pm 10\%$ (Nielsen, 1989).

Kachanov's Continuum Damage Mechanics teori: Den största fördelen med att använda en Continuum Damage Mechanics modell är att den gradvisa nedbrytningen av materialet kan beskrivas. När Kachanov's CDM-modeller används är det inte möjligt att beskriva den S-formade kurva som är så typisk för ett utmattningsförsök utfört på asfaltmaterial. På grund av detta måste den första delen av försöken utelämnas när modellkonstanterna beräknades.

En stor nackdel med att använda denna metod är att ett oändligt antal kombinationer av regressionskonstanterna m , c (nedbrytning baserad på energi) och n , k (nedbrytning baserad på spänning) kan användas för att uppnå god korrelation mellan uppmätta och beräknade värden. Det visade sig också att det finns en relation mellan styvhet och regressionskonstanterna c och k .

Varken när nedbrytningen baserades på energi eller spänning var det några problem att uppnå en relativt god korrelation mellan uppmätta och beräknade värden för en enskild provkropp. Bästa korrelation uppnåddes för spänningskontrollerade försök. Ett problem är dock att skillnaderna mellan de enskilda regressionskonstanterna (c -värdena och k -värdena) är stora. Det är också en stor skillnad om regressionskonstanterna för spännings- respektive töjningskontrollerade försök jämförs, vilket betyder att det inte går att använda ett konstant c - eller k -värde för att beskriva ett godtyckligt försök.

Modifierad Griffith-modell baserad på skjuvspänning: En fördel med denna modell är att sprickor som uppkommer både från ytan och från botten av beläggningen kan beskrivas, vilket inte är fallet då Kachanov's CDM-modell används. Även när den modifierade Griffith-modellen används är det inte möjligt att beskriva den S-formade kurva som är så typisk för ett utmattningsförsök utfört på asfaltmaterial. På grund av detta måste den första delen av försöken utelämnas när modellkonstanterna beräknades.

En mycket bra korrelation mellan uppmätta och beräknade värden erhöles för de spänningskontrollerade försöken men för de töjningskontrollerade försöken var resultaten genomgående dåliga. När den modifierade Griffith-modellen användes för töjningskontrollerade försök var det inte möjligt att erhålla en böj i slutet av försöken på samma sätt som för de spänningskontrollerade försöken.

Det fanns indikationer på ett samband mellan dynamisk modul och regressionskonstanten k_{kk} på liknande sätt som för Kachanov's CDM-modell, dvs. en högre dynamisk modul leder till ett lägre k_{kk} -värde. Detta samband är dock inte lika starkt för denna modell som det är för Kachanov's modell. Det fanns även indikationer på att spänningsnivån kunde påverka k_{kk} -värdet, inga entydiga samband kunde dock fastslås. De genomsnittliga k_{kk} -värdena varierar mellan 0.0018 och 0.0030. Om variationerna mellan enskilda provkroppar studeras blir skillnaderna större.

Ullidtz modell baserad på energitäthet: En fördel med Ullidtz modell är att det är möjligt att beskriva den S-formade kurva som är så typisk för ett utmattningsförsök utfört på asfaltmaterial. Det är därför möjligt att uppnå nästan perfekt korrelation mellan beräknade och uppmätta värden för både spännings- och töjningskontrollerade försök. Studeras regressionskonstanterna för enskilda provkroppar upptäcks att variationerna är relativt stora och det är inte heller möjligt att finna någon klar trend som kan användas för vidare analys. Variationerna mellan regressionskonstanterna var störst för de töjningskontrollerade försöken och något mindre för de spänningskontrollerade försöken. Det var därför inte möjligt att dra några långtgående slutsatser från försöken.

Enaxiell konstitutiv modellering av asfalt baserad på viskoelasticitet och Continuum Damage Mechanics teori: De första monotona försöken som utfördes i detta projekt var på provkroppar från AG16-massan. Försöken utfördes vid 10 °C och resultaten blev inte alls de förväntade. Om pseudotöjning används i stället för verklig töjning vid utvärderingen av försöken ska enligt teorin materialets hastighetsberoende egenskaper kunna elimineras, så var dock inte fallet för dessa inledande försök. Det antogs därför att plastiska och/eller viskoplastiska töjningar eventuellt skulle kunna påverka resultaten vid 10 °C eftersom bindemedlet som användes i AG16-massan var relativt mjukt (160/220). I detta projekt har endast viskoelastiska töjningar analyserats med hjälp av Schapery's tidiga modeller. Eftersom data inte kollapsade till en karakteristisk materialfunktion som förväntat, antogs att den använda modellen inte kunde användas för att fullt ut analysera det aktuella datamaterialet. Det bestämdes därför att temperaturen skulle sänkas och ett begränsat antal nya monotona försök skulle köras. Temperaturen sänktes till 0 °C och en korresponderande belastningshastighet till den snabbaste belastningshastigheten vid 10 °C beräknades. Nya monotona försök utfördes sedan vid 0 °C där den nya belastningshastigheten användes. Som ett tillägg utfördes även försök vid 0 °C med den dubbla belastningshastigheten och nu visade det sig att det var inte några problem att eliminera materialets hastighetsberoende egenskaper. En slutsats som kan dras från dessa inledande försök är att det är viktigt att välja rätt belastningshastighet om bindemedlet i den testade massan är mjukt. Om en för låg belastningshastighet alternativt för hög temperatur används kan det bli problem vid analysen av data om den beskrivna metoden används.

Både styvhet (spänning dividerat med töjning) och normaliserad pseudostyvhet (C_1) beskriver en S-formad kurva över tiden och med ett skarpt fall nära brott. Fasvinkeln ökar upp till brott, men när brottet har inträffat börjar den minska igen. Denna teckenändring för lutningen, dvs. när lutningen för fasvinkeln plottat mot tid ändrar tecken från positiv till negativ, gör fasvinkeln till en relativt bra indikator för när brott inträffar. Observationerna ovan är relativt klara för de spänningskontrollerade försöken men inte alltid observerade för de töjningskontrollerade försöken. De töjningskontrollerade försöken hade oftast inte det distinkt S-formade utseendet som nästan alltid observerades för de spänningskontrollerade försöken. Som ett resultat av detta är det därför oftast mycket svårt att definiera när brott inträffar för ett töjningskontrollerat försök.

När C_1 -värdet har minskat till ca. 0.35-0.40 (särskilt för cykliska försök), dvs. nära brott, börja kurvorna i diagrammet som beskriver C_1 som en funktion av S_1 att vidgas något. En förklaring till detta skulle kunna vara att makrosprickor börjar utvecklas i provkroppen vilket betyder att styvhet definierad som spänning dividerat med töjning inte längre gäller. Detta kan vara en rimlig förklaring eftersom nedbrytning av asfalt (och andra material) oftast beskrivs som en process i tre faser. I fas ett bildas mikrosprickor i materialet, i fas två propagerar några av dessa mikrosprickor och bildar makrosprickor och slutligen i fas tre fortsätter makrosprickorna att utvidgas tills brott uppstår i materialet.

De cykliska försöken som utfördes på Inorbind16TM-massan vid 1 Hz korresponderar inte så bra som förväntat med de monotoniska försöken utförda på samma massa. I diagrammet som beskriver C_1 som en funktion av S_1 framgår det att de cykliska försöken är lokaliserade något under motsvarande monotoniska försök. En bra förklaring har inte hittats men om försöken utförda vid 1 Hz på Inorbind16TM-massan jämförs med försöken utförda vid 1 Hz på Durabind16TM-massan framgår det att de senare ser bättre ut, dvs. korrelationen mellan monotoniska och cykliska försök är bättre. Eftersom försöken utförda vid 1 Hz har en mycket långsammare belastningshastighet jämfört med försök utförda vid 10 Hz kan det antas att testtemperaturen 10 °C är på gränsen av vad materialet klarar av innan plastiska och/eller viskoplastiska töjningar börjar påverka resultaten. Om temperaturen hade sänkts till 0 °C hade troligtvis korrelationen mellan monotoniska och cykliska utförda på Inorbind16TM-massan blivit betydligt bättre för försöken utförda vid 1 Hz.

Generellt sett har prediktioner som gjorts med utgångspunkt från data från spänningskontrollerade försök bättre korrelation mellan beräknade och uppmätta värden än om resultaten jämförs med prediktioner från töjningskontrollerade försök. Provkroppar från Inorbind16TM-massan hade

minst variationen i hålrums halt och som ett resultat blev prediktionerna som gjordes för denna massatyp relativt bra. Durabind16™-massan hade något högre variation i hålrums halt mellan provkropparna och därför blev också prediktionerna inte alltid så bra för denna massatyp, särskilt inte för de töjningskontrollerade försöken. De töjningskontrollerade försöken har också en något annorlunda form (brantare) i diagrammet som beskriver C_1 som en funktion av S_1 om de jämförs med de spänningskontrollerade försöken utförda på de övriga massorna. Detta påverkar resultaten när cykliskt beteende predikteras från monotona försök.

Bidrag till forskningen

I detta forskningsprojekt är det första gången som svenska asfaltmassor (en standardmassa samt två modifierade massor) har blivit grundligt utvärderade med hjälp av Schapery's teorier. Eftersom vi fortfarande använder oss av linjärlogaritmiska samband mellan initial töjning och antalet lastcykler till brott i de svenska normerna (ATB VÄG) kan det vara en stor förbättring att använda den beskrivna metodiken som ett alternativ till de nuvarande metoderna. I framtiden är det inte längre nödvändigt att utföra tidskrävande utmattningsförsök eftersom det går att erhålla samma information från enkla och snabba monotona försök. Antalet provkroppar, som krävs för att karakterisera ett materials egenskaper, kan också minskas kraftigt. Som demonstrerats i detta forskningsprojekt var det möjligt att använda olika frekvenser och belastningshastigheter och trots detta kunde materialets nedbrytning beskrivas med en karakteristisk materialfunktion. När den karakteristiska materialfunktionen väl har etablerats för det aktuella materialet är det möjligt att prediktera materiellbeteendet för vilken töjningshistoria som helst vid vilken temperatur som helst. Givetvis inom rimliga gränser eftersom vi vet att spårbildning är mera uttalad vid höga temperaturer medan utmattningssprickor är mera representativt för lägre temperaturer.

Det är författarens starka övertygelse att det är möjligt att använda en materialmodell baserad på Schapery's teorier i en inkremental strukturell responsmodell i framtiden. Detta skulle kunna betyda att utvecklingen av utmattningssprickor på ytan över tiden kan predikteras mera korrekt jämfört med dagens system.

Slutsatser

De traditionella modellerna, dvs. Wöhler-diagram, Asphalt Institutes (AI) kriterium och Shells kriterium, fungerar tillfredsställande och kan användas då ett ungefärligt värde på utmattningstidsintervallet behövs. Problemet med modellerna är att de är för enkla om en mera grundlig beskrivning av materiellbeteende eftersträvas. Modellerna kan inte heller beskriva den gradvisa nedbrytningen av materialet som krävs i en inkremental strukturell responsmodell.

De enklare Continuum Damage Mechanics modellerna som använts i detta arbete, dvs. Kachanov's, Griffith's och Ullidtz' modeller, är inte heller optimala då en beskrivning av den gradvisa nedbrytningen av materialet behövs. Nedbrytningen av en enskild provkropp kan beskrivas relativt bra men det är inte möjligt att beskriva nedbrytningen för ett godtyckligt antal provkroppar testade vid olika spännings- och/eller töjningsnivåer och samtidigt använda samma uppsättning regressionskonstanter för samtliga provkroppar. Det finns också en stor skillnad mellan regressionskonstanterna för spännings- och töjningskontrollerade försök.

Den modell som har den största potentialen i framtiden är modellen som utvecklats av Schapery och baseras på viskoelasticitet och continuum damage mechanics. Modellkonstanterna har en fundamental mekaniska betydelse, dvs. värden som kan mätas i ett laboratorium kan sedan användas i modellen.

Genom att använda pseudotöjningskonceptet var det möjligt att separera de viskoelastiska effekterna från skadeackumuleringen i provkroppen och materialets hastighetsberoende egenskaper kunde elimineras. Massor som innehöll både ickemodifierade och modifierade bindemedel användes med goda resultat.

Genom att använda tid-temperatursuperpositioneringsprincipen och samma skiftfaktorer som användes för att skapa masterkurvorna var det möjligt att skifta de karakteristiska materialfunktionerna mellan olika temperaturer. Denna observation gör det möjligt att minska antalet testade provkroppar och ändå erhålla information om materialets beteende vid flera temperaturer.

Det var även möjligt att beskriva olika typer av försök, monotoniska samt spänningsstyrda och töjningsstyrda cykliska försök, med en karakteristisk materialfunktion. Försöken utfördes med olika belastningshastighet för de monotoniska försöken och med olika spännings- och töjningsnivåer samt frekvenser för de cykliska försöken. Denna observation gör det möjligt att minska antalet testade provkroppar eftersom cykliskt beteende kan predikteras från enkla och snabba monotoniska tester vilket är en stor förbättring jämfört med konventionella metoder.

Lee (1996) definierade brott som en 50-procentig reduktion av pseudostyvheten, vilket också korresponderar med ett C_1 -värde lika med 0.5. Testerna utförda i detta projekt visar att denna gräns kanske är något för konservativ. Ett bättre alternativ kan vara att använda ett C_1 -värde lika med 0.35-0.40 om en definition av brott erfordras.

Fortsatt arbete

I framtiden måste även materialets åldrade medtagas i modellen. I detta arbete har endast nytt material använts vid testerna. En annan faktor, som också måste studeras, är hur viloperioder (healing) påverkar materialets egenskaper.

Dessutom måste flera olika typer av graderingar, stenmaterial, filler, bindemedelstyper etc. studeras för att undersöka om metodiken kan appliceras på alla typer av förekommande asfaltbeläggningar.

Eftersom enaxiella försök inte är optimala för kvalitetskontroll och för att snabbt kontrollera materialets egenskaper kan det kanske även vara intressant att undersöka om metodiken även går att applicera på Indirect Tensile Tests (pressdragprovning). Slutligen, för att bättre kunna simulera de spänningar och töjningar som uppstår i en väg kanske triaxialförsök kan vara en lämplig försöksuppställning.