

Ett **SBUF**-projekt

Datum

2005-02-28

Författare

Richard Nilsson

Skanska Sverige AB

Teknik Väg & Asfalt

234 22 Lomma

Tel.: 040-14 49 87

Fax: 040-41 16 30

Safwat Said

Hassan Hakim

Åke Hermansson

VTI

581 95 Linköping

Tel: 031-20 40 00

Fax: 031-14 14 36

Beteckning

ID: 11432

LÄKNINGSINVERKAN PÅ UTMATTNINGSEGENSKAPER HOS ASFALTBELÄGGNINGAR

Projekt ID: 11432

Skanska Sverige AB
Teknik Väg & Asphalt
Box 112
234 22 Lomma

Väg- och Transportforskningsinstitutet, VTI
581 95 Linköping

Läkningsinverkan på utmattningsegenskaper hos asfaltbeläggningar

Ett SBUF- och Vägverksprojekt

Richard Nilsson
Safwat Said
Hassan Hakim
Åke Hermansson

Förord

Projektet är ett samarbete mellan Väg- och Transportforskningsinstitutet (VTI) och Skanska Sverige AB, Teknik Väg och Asphalt och har finansierats av SBUF och Vägverket. Projektet kan även relateras till Vägverkets virtuella FUD-centra nr 4, Varaktigt hållbar, säker och tillgänglig infrastruktur. Författarna är tacksamma för finansiärernas ekonomiska stöd, utan detta hade projektet inte kunnat genomföras.

Syftet med projektet var att undersöka hur effekten av vilotiden mellan trafikens överfarter påverkar utmattningsmotståndet hos asfaltbeläggningar. Genom att studera läkningseffekternas inverkan på utmattningsegenskaperna är det författarnas förhoppning att noggrannheten i dagens prognostiseringsmodeller eventuellt kan förbättras i framtiden.

Laboratorieförsöken har utförts vid Skanskas Vägtekniska Centrum – VTC Syd i Lomma samt vid VTI:s väglaboratorium i Linköping. Författarna riktar ett stort tack till personalen vid dessa laboratorier, som har genomfört försöken på ett förtjänstfullt sätt.

Lomma / Linköping februari 2005

Richard Nilsson
Safwat Said
Hassan Hakim
Åke Hermansson

Innehållsförteckning

| | |
|--|-----------|
| SAMMANFATTNING..... | I |
| 1 INLEDNING..... | 1 |
| 1.1 BAKGRUND..... | 1 |
| 1.2 SYFTE OCH MÅL..... | 2 |
| 2 METOD OCH MATERIAL..... | 3 |
| 2.1 ARBETSGÅNG OCH MATERIAL..... | 3 |
| 2.2 EFFEKT AV VILOTID..... | 4 |
| 2.3 FREKVENSSVEP FÖR BESTÄMNING AV MASTERKURVA..... | 5 |
| 2.4 PREDIKTION AV RELAXATIONSMODUL, E(T), FRÅN FREKVENSSVEP..... | 8 |
| 2.5 VISKOELASTICITETSTEORI..... | 9 |
| 2.5.1 Korrespondansprincipen..... | 10 |
| 2.5.2 Enaxiell konstitutionell modellering baserad på "Work Potential Theory"..... | 11 |
| 2.6 HEALING INDEX, HI (LÄKNINGSINDEX)..... | 15 |
| 2.7 UTMATTNINGSFÖRSÖK ENLIGT VTI-NOTAT NR. 38-1995..... | 15 |
| 3 RESULTAT OCH DISKUSSION..... | 17 |
| 3.1 HÅLRUMSHALTER..... | 17 |
| 3.2 ENAXIELLA UTMATTNINGSFÖRSÖK MED VILOPERIODER..... | 18 |
| 3.2.1 Dynamisk modul och fasvinkel..... | 18 |
| 3.2.2 Masterkurva..... | 19 |
| 3.2.3 Cykliska försök..... | 22 |
| 3.3 UTMATTNINGSFÖRSÖK MED VILOPERIODER UTFÖRDA ENLIGT VTI-NOTAT..... | 25 |
| 4 SLUTSATSER..... | 31 |

Referenser

Sammanfattning

Utmattningskriterier baserade på laboratorieförsök underskattar asfaltbeläggningsars livslängd i fält, varför skiffkatorer är nödvändiga för att överföra laboratorieresultat till fältförhållanden. Kalibreringsfaktorn, en så kallad skiffkator, är empiriskt framtagen. Det krävs många års erfarenheter och uppföljningar av beläggningar och konstruktioner för bestämning av faktorns storlek. Variabler som påverkar skiffkatorns storlek är i huvudsak viloperioders längd mellan belastningspulser (NVF utskott 33, 1992). Viloperioder har en stor effekt på återläkningsförmågan hos asfaltbeläggningar. Det har rapporterats bl.a. av Bazin et al 1967, Van Dijk 1972, Raithby et al. (1972), Verstraeten 1982. Det antas även finnas stora variationer i återläkningsförmågan mellan olika bindemedelstyper. Speciellt stor skillnad kan förväntas vid användning av polymermodifierade bitumen.

Det övergripandet målet med det här arbetet är att studera inverkan av vilotider på beläggningars livslängd på ett analytiskt sätt. Det bör leda till ökad noggrannhet i prognostiseringsmodeller samt belysning av skillnader i återläkningsegenskaper mellan olika beläggningar. Ett begränsat antal laboratorieförsök planeras för studier av olika modeller och för undersökning av möjligheterna för användning i praktiken.

Vid försöken har två försöksuppställningar använts, enaxiella försök samt pressdragprovning (Indirect Tensile Test). De enaxiella försöken har utförts vid Skanskas Vägtekniska Centrum i Lomma (VTC-Syd) medan pressdragprovningen har utförts vid VTI:s laboratorium i Linköping. I projektet har en standardbeläggning av typen AG16, 160/220, 4.8% använts.

Samtliga utmattningsförsök har utförts vid 10°C med en sinusformad last och en frekvens lika med 10 Hz (0.1 s belastningstid). Med pressdragprovning har även ett begränsat antal försök utförts enligt VTI Notat Nr. 38-1995 som en jämförelse. Från start har 5000 lastcykler körts, därefter har en viloperiod på 2 minuter lagts in. Efter dessa två minuter har ytterligare 1000 cykler körts, därefter har en viloperiod på 5 minuter lagts in osv. Efter den sista viloperioden på 30 minuter kördes provkroppen till brott. För de enaxiella försöken har både spänningskontrollerade och töjningskontrollerade försök utförts.

Försöken utförda i detta projekt bekräftar att läkningsfenomenet, som uppstår under viloperioderna, verkligen existerar. Efter en viloperiod observeras en ökning av styvhetsmodulen, ökningen blir större ju längre viloperioden är. Detta fenomen har observerats både för de enaxiella försöken och för pressdragprovningen. För att beskriva vad som händer i materialet under viloperioderna har ett Healing Index, HI (Läkningsindex), utvecklat av Si, Zhiming et. al. (2001), använts i detta arbete.

Vid de enaxiella försöken har relativt stora skador uppstått i materialet då den första viloperioden lades in. Detta betyder att läkningspotentialen är större (många mikrosprickor som kan läkas ihop) jämfört med om försöket hade stoppats efter kortare tid. Det bör dock påpekas att om försöket körs till brott (eller i närheten av brott), dvs. om det finns makrosprickor i materialet, betyder det att mycket små eller obefintliga läkningseffekter kommer att kunna observeras eftersom läkningen främst sker av mikrosprickorna.

Med hjälp av pseudostrainkonceptet är det möjligt att skapa ett karakteristisk Healing Index för den aktuella beläggningen. Den största fördelen med att använda pseudostrainkonceptet är att materialets hastighetsberoende egenskaper kan elimineras. I detta arbete har även den

”vanliga” styvhetsmodulen (dvs. spänning dividerat med töjning) använts för att försöka skapa ett läkningsindex. Resultaten blev inte lyckade då denna analysmetod användes för de enaxiella försöken. Det var inte möjligt att skapa ett karakteristiskt Healing Index (HI) på samma sätt som när pseudostrainkonceptet användes.

Vid de enaxiella försöken är provet stående och provets egenvikt bidrar till snabbare läkning av sprickor. Vid pressdragprovet är provkroppen liggande på mantelytan och provkroppens egenvikt bidrar till ökad dragpåkänning på det vertikala diameterplanet. Alltså provkroppens egenvikt fortsätter under vilotiden att utsätta provet för dragpåkänningar. Trots de små påkänningarna orsakade av provets vikt kan detta förhindra en snabb läkning av sprickor.

En vidareutveckling av testproceduren är nödvändig för pressdragprovet. Test måste utföras vid låga töjningsnivåer. Möjlighet att lagra provet stående eller vrida provet 90 grader under vilotiden bör förbättra resultaten, men det är opraktiskt vid utförandet. Tillämpning av pseudostrainkonceptet på pressdragprovet behöver utvecklas. Litteraturstudien indikerar att återläkningsförsök är beroende av belastningen under vilotiden, vilken är odefinierad. De små spänningarna orsakade av provets vikt bör beaktas vid återläkningsförsök.

Vidare undersökningar av återläkningsförsök är nödvändiga. Undersökning av olika beläggningstyper, även polymermodifierade, vid olika temperaturer bör belysa fenomenet mera grundligt. I framtiden är det troligt att ett Healing Index (HI), eventuellt baserat på pseudostrainkonceptet, skulle kunna användas för att jämföra läkningsegenskaperna hos olika beläggningstyper. Klarläggning av återläkningens betydelse för utmattningsegenskaperna bör minska skiftfaktorns storlek och därmed minska risken för låg precision (stor spridning) vid prediktering av livslängden hos asfaltbeläggningar. Om beläggningar med goda läkningsegenskaper används i första hand borde livslängden för vägen påverkas positivt jämfört med om standardbeläggningar används. Alternativt kan tunnare konstruktioner med samma livslängd som tidigare byggas om läkningseffekterna beaktas vid dimensioneringen.

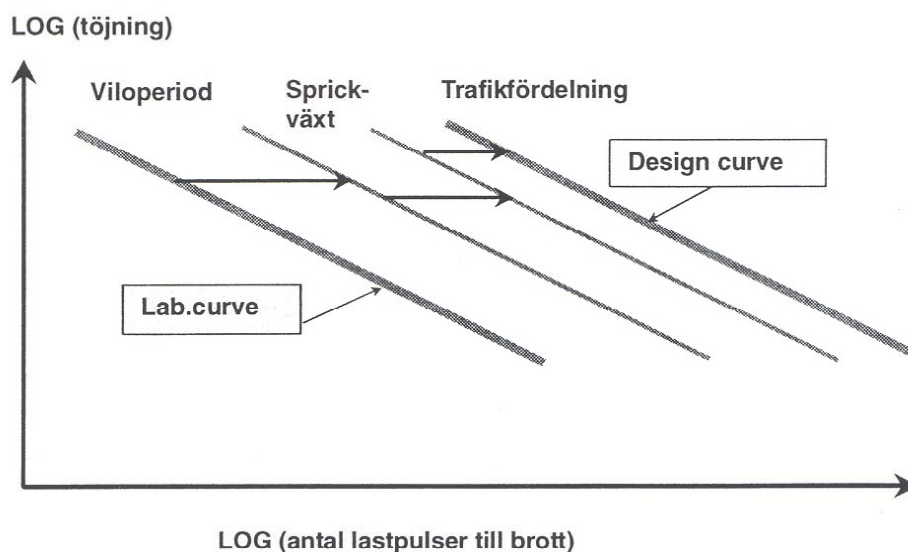
1 Inledning

1.1 Bakgrund

Utmattning av asfaltbeläggningar har studerats av ett stort antal forskare världen över. Vid utmattningsprovning i laboratoriet belastas ett prov med upprepad konstant kraft eller deformation vid en specifik temperatur. Varierande belastningsformer med och utan vilotider mellan belastningspulserna har använts av forskare. Belastningsrelaterade sprickor i asfaltbeläggningar är beroende av antalet tunga överfarer och deras fördelning över tiden.

Utmattningskriterier baserade på laboratorieförsök underskattar asfaltbeläggnings livslängd i fält, varför skiftfaktorer är nödvändiga för att överföra laboratorieresultat till fältförhållanden. Kalibreringsfaktorn, en så kallad skiftfaktor, är empiriskt framtagen. Det krävs många års erfarenheter och uppföljningar av beläggningar och konstruktioner för bestämning av faktorns storlek. Utmattningsprovning i labbet är en accelererad provning med relativt stora påkänningar, även om vilotider läggs in mellan belastningspulserna vid en del försök. I verkligheten utsätts asfaltbeläggningar för en sammansättning av trafikrelaterade och termiska påkänningar under varierande förhållanden. Vilotider är en parameter som har betydelse vid bestämning av skiftfaktorn.

Variabler som påverkar skiftfaktorns storlek är i huvudsak viloperioders längd mellan belastningspulser (NVF utskott 33, 1992). Se också principskiss i Figur 1-1. Viloperioder har en stor effekt på återläkningsförmågan hos asfaltbeläggningar. Det har rapporterats bl.a. av Bazin et al 1967, Van Dijk 1972, Raithby et al. (1972), Verstraeten 1982. Det antas även finnas stora variationer i återläkningsförmågan mellan olika bindemedelstyper. Speciellt stor skillnad kan förväntas vid användning av polymermodifierade bitumen. Under 90-talet studerades återläkningseffekten på nedbrytning av asfaltbeläggning på ett analytiskt sätt, Si, Z. et al, 2002. Klarläggning av vilotidens effekt och därmed återläkningsinverkan leder till noggrannare bestämning av livslängden hos beläggningar. Beräkning av vilotidens effekt på ett analytiskt sätt är också nödvändig för att kunna utvärdera nya beläggningstyper på ett korrekt sätt.



Figur 1-1 Principskiss vid kalibrering av utmattningskriterium (NVF rapport nr 7, 1992)

1.2 Syfte och mål

Det övergripande målet med det här arbetet är att studera inverkan av vilotider på beläggnings livslängd på ett analytiskt sätt. Det bör leda till ökad noggrannhet i prognostiseringsmodeller samt belysning av skillnader i återläkningsegenskaper mellan olika beläggningar. Ett begränsat antal laboratorieförsök planeras för studier av olika modeller och för undersökning av möjligheterna för användning i praktiken.

I initialskedet kommer teorierna beskrivna ovan att tillämpas på resultat från indirekta dragprov (pressdragprovning) samt direkt dragförsök (enaxiella försök). Det förväntade resultatet från projektet är en vetenskaplig rapport samt ökad förståelse av läkningsfenomenet, som kan ligga till grund för framtida mera omfattande studier. Resultaten kommer att implementeras genom publicering av materialet samt föredrag vid lämpliga konferenser/seminarier.

2 Metod och material

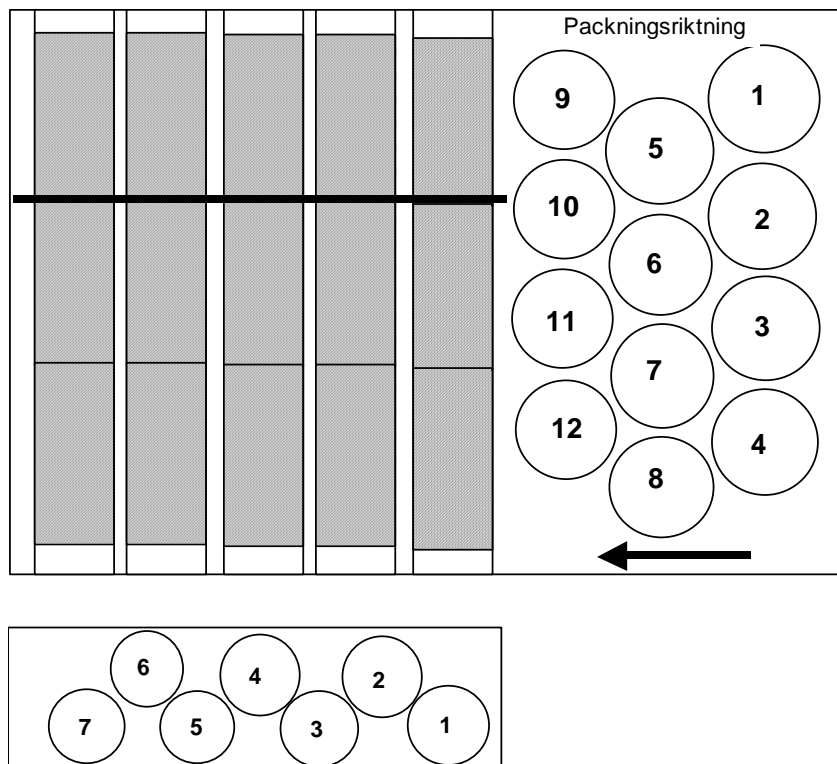
2.1 Arbetsgång och material

Syftet med projektet var bland annat att undersöka om metodiken att utvärdera läkningsegenskaper hos asfaltbeläggningar fungerade även på svenska materialtyper. Av denna anledning användes endast en beläggningstyp i detta skede. Visar det sig att metodiken går att tillämpa även i Sverige är det önskvärt att en större serie med olika typer av beläggningar utvärderas för att se om det går att finna några skillnader mellan materialen.

Vid försöken har två försöksupställningar använts, enaxiella försök samt pressdragprovning (Indirect Tensile Test). De enaxiella försöken har utförts vid Skanskas Vägtekniska Centrum i Lomma (VTC-Syd) medan pressdragprovningen har utförts vid VTI:s laboratorium i Linköping.

I projektet har en standardbeläggning av typen AG16, 160/220, 4.8% använts. Vid försöken har laboratorietillverkade provkroppar från samma platta använts, se Figur 2-1. Plattans dimensioner var 800 mm x 600 mm x 200 mm (LxBxD). För att kunna bestämma mängden asfaltmassa som åtgår vid platttillverkningen bestämdes kompaktdensiteten för materialet enligt FAS 425-98 innan plattan tillverkades. Med utgångspunkt från målhållrumshalten (ca 4 %) kunde sedan mängden asfaltmassa beräknas.

Från den högra delen av plattan borrades vertikala borrhävar ut för användning vid pressdragprovningen. Totalt tre provkroppar erhöles från varje borrhävar. Från plattans vänstra del borrades horisontella borrhävar ut för användning vid de enaxiella försöken. Från varje horisontell borrhävar erhöles tre provkroppar.



Figur 2-1 Packnings- och borrhävarsriktningar

Efter borrningen kapades provkropparna. De enaxiella provkropparna hade en diameter lika med 75 mm och en höjd på 150 mm (2:1-förhållande mellan höjd och diameter). Provkropparna som användes vid pressdragprovningen var 50 mm höga och hade en diameter lika med 100 mm.

Efter kapningen bestämdes skrymdensiteterna enligt FAS 427-98, därefter kunde hålrumsalterna beräknas enligt FAS 413-97. Provkroppar som avvek kraftigt från målhålrumsalten (uppåt eller neråt) sorterades bort och användes inte vid testerna. Dessutom mättes diameter och höjd med ett skjutmått försett med klackar.

Efter torkning försågs provkropparna som skulle användas vid de enaxiella försöken med ändplattor så att båda drag- och tryckpåkänningar skulle kunna appliceras under försökets gång. Ändplattorna limmades fast på provkropparna med ett starkt epoxilim. På mantelytan limmades LVDT-hållare fast så att deformationerna skulle kunna mätas.

Innan någon förstörande provning utfördes kördes en serie frekvenssvep (enaxiella försök) vid temperaturer från -10°C till 30°C för att kunna skapa en masterkurva för materialet. Denna behövs i ett senare skede då pseudostrainkonceptet används. Observera att pseudostrainkonceptet kan i nuläget endast tillämpas på data från enaxiella försök.

Samtliga utmattningsförsök har utförts vid 10°C med en sinusformad last och en frekvens lika med 10 Hz (0.1 s belastningstid). Med pressdragprovning har även ett begränsat antal försök utförts enligt VTI Notat Nr. 38-1995 som en jämförelse. Från start har 5000 lastcykler körts, därefter har en viloperiod på 2 minuter lagts in. Efter dessa två minuter har ytterligare 1000 cykler körts, därefter har en viloperiod på 5 minuter lagts in osv. Efter den sista viloperioden på 30 minuter kördes provkroppen till brott. För de enaxiella försöken har både spänningskontrollerade och töjningskontrollerade försök utförts.

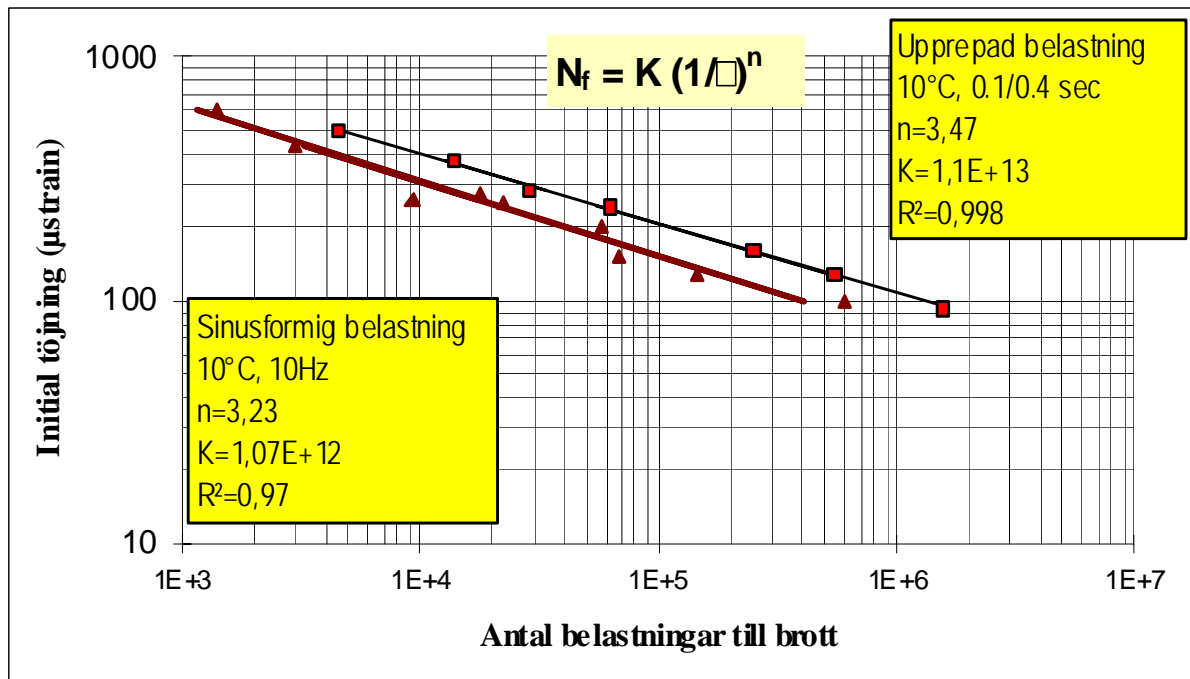
2.2 Effekt av vilotid

Effekten av viloperioder för livslängden vid utmattningsförsök av asfaltbeläggning illustreras i Figur 2-2. Asfaltprov har undersökts genom utmattningsförsök med och utan viloperioder mellan belastningspulserna. Det framgår tydligt att provning utan viloperioder förkortar livslängden signifikant. Det ser ut som att viloperioden i huvudsak förändrar utmattningskurvans position medan lutningarna är nästan lika. Vid bestämning av skiftfaktorn antas vanligen att labbkriteriet är parallellt med fältkriteriet. Figur 2-2 indikerar också att viloperioden har stor betydelse för storleken på skiftfaktorn.

Enligt Kim et al. (1997a) är det främst tre saker som sker i materialet under viloperioden:

1. Materialet återfjädrar (relaxar) på grund av de viskoelastiska egenskaperna
2. Det sker en kemiske läkningsprocess av mikrosprickorna i bindemedlet, något som varit känt inom polymerindustrin sedan länge, och
3. Det sker en härdning av bindemedlet på grund av att molekylerna omstruktureras under viloperioderna.

Klarläggning av viloperiodens betydelse för livslängden bör leda till säkrare prediktering av livslängden hos asfaltbeläggningar i fält.



Figur 2-2 Vilotidens inverkan på utmattningskurvor. Den övre kurvan är från test med vilotid

2.3 Frekvenssvep för bestämning av masterkurva

Komplexmodulen (E^*) består av storage modulus och loss modulus enligt ekvation (2-1) nedan.

$$E^* = E' + iE'' = |E^*| \cdot e^{i\phi} \quad (2-1)$$

där

E^* = komplexmodulen

E' = storage modulus

E'' = loss modulus

i = $(-1)^{1/2}$

Om komplexmodulen beskrivs i polär form definieras $|E^*|$, eller den s.k. dynamiska modulen enligt ekvation (2-2).

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} \quad (2-2)$$

och fasvinkeln ϕ beskrivs enligt följande ekvation:

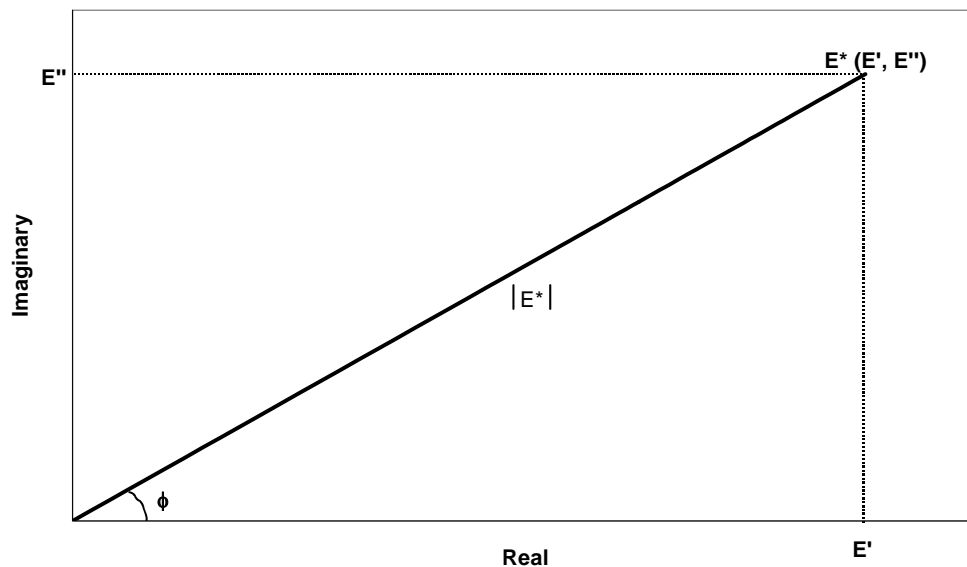
$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{E''}{E'}\right) \quad (2-3)$$

Värdena på storage och loss modulerna är relaterade till den dynamiska modulen och fasvinkeln enligt ekvationerna (2-4) och (2-5).

$$E' = |E^*| \cos \phi \quad (2-4)$$

$$E'' = |E^*| \sin \phi \quad (2-5)$$

Ekvationerna (2-4) och (2-5) kan även uttryckas grafiskt enligt Figur 2-3 nedan.



Figur 2-3 Grafisk beskrivning av komplexmodul och fasvinkel

Ett typiskt utseende hos ett frekvenssvop visas i Figur 2-4. Den dynamiska modulen beräknas genom att dividera spänningsamplituden (σ_0) med töjningsamplituden (ε_0) från ett cykliskt försök enligt ekvation (2-6).

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2-6)$$

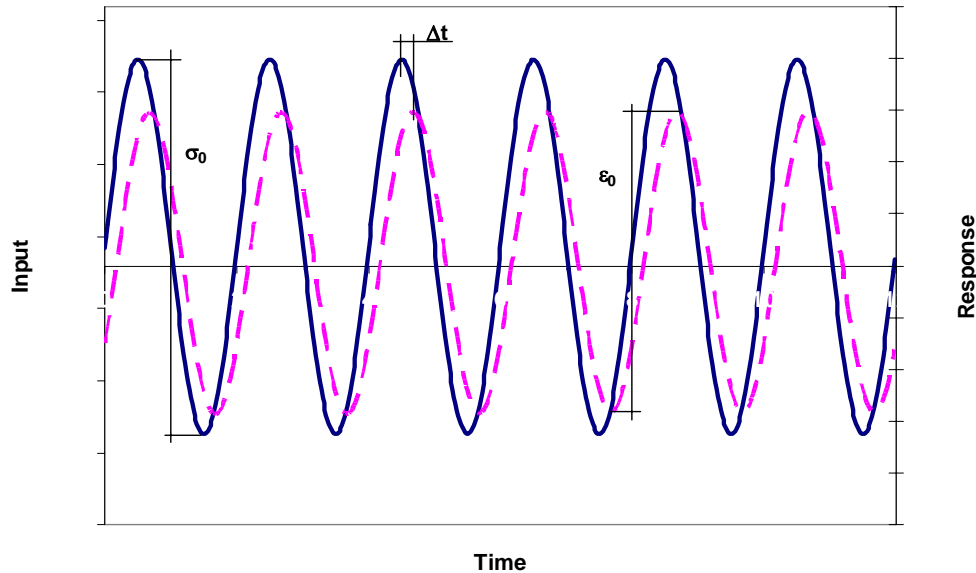
Fasvinkeln beskrivs som den vinkel med vilken töjningsresponsen (deformationen) släpar efter den pålagda spänningsnivån (lasten) och beräknas med ekvation (2-7). Fasvinkeln beskriver även graden av viskoelasticitet hos ett viskoelastiskt material, en fasvinkel lika med noll grader (0°) betyder att materialet är helt elastiskt medan en fasvinkel lika med nittio grader (90°) är helt visköst.

$$\phi = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t \quad (2-7)$$

där

f = frekvensen
 Δt = fasförskjutningen mellan spänning och töjning

Ibland skrivs även $2 \pi f$ som ω .



Figur 2-4 Typiskt utseende för input (spänning) och respons (töjning) hos ett frekvenssvav

Asfaltmaterial är ett viskoelastiskt material som uppvisar både tids- och temperaturberoende deformationer då det belastas. Vid höga temperaturer och/eller långa belastningstider uppstår även viskoplastiska och plastiska deformationer som inte är återgående. Det är även känt att materialet är ett termoreologiskt enkelt material då det befinner sig i sitt linjärt viskoelastiska område, dvs. effekterna av en förändring av tid eller frekvens och temperatur kan beskrivas med en gemensam parameter, den s.k. skiftfaktorn. Effekten av detta blir att samma materialegenskaper uppvisas antingen vid låga temperaturer och långsamma belastningstider eller vid höga temperaturer och snabba belastningstider. Materialets viskoelastiska egenskaper, exempelvis relaxationsmodul eller krypmodul, som en funktion av tid (eller frekvens) vid olika temperaturer kan skiftas horisontellt längs tidsaxeln (log-skala) så att en karakteristisk masterkurva bildas. Masterkurvan är en funktion av den aktuella materialegenskapen och reducerad tid vid en godtyckligt vald referenstemperatur.

Därför kan relaxationsmodulen för en vald tid och temperatur beskrivas enligt ekvation(2-8) nedan.

$$E(t, T) = E(\xi) \quad (2-8)$$

där $\xi = \frac{t}{a_T}$ (2-9)

t = tid innan skiftning till en given temperatur T ,
 ξ = reducerad tid vid en referenstemperatur T_0 , och
 a_T = skiftfaktorn för temperaturen T .

Skiftfaktorerna, a_T , används för att skifta den dynamiska modulen, $|E^*|$, och fasvinkeln, ϕ , längs frekvensaxeln tills en jämn masterkurva vid en godtyckligt vald referenstemperatur uppnås. Skiftningen definieras enligt ekvation (2-10) nedan:

$$\text{Log}(f_R) = \log(f \times a_T) \quad (2-10)$$

där

f_R = reducerad frekvens vid referenstemperaturen,
 f = frekvens vid en given temperatur innan skiftning, och
 a_T = skiftfaktor för temperatur T.

I detta projekt bestämdes skiftfaktorerna genom att grafiskt skifta de individuella kurvorna längs tidsaxeln tills en enda kontinuerlig $|E^*|$ masterkurva erhöles.

2.4 Prediktion av relaxationsmodul, $E(t)$, från frekvenssvep

Relaxationsmodulen, $E(t)$, för de testade beläggningarna predikterades med utgångspunkt från den dynamiska modulen ($|E^*|$) och fasvinkeln (ϕ) genom att använda en approximativ metod utvecklad av Schapery and Park (1999), se ekvationerna (2-11), (2-12) och (2-13) nedan.

$$E(t) \cong \frac{1}{\lambda'} E'(\omega) \Big|_{\omega=(1/t)} \quad (2-11)$$

$$\lambda' = \Gamma(1-n) \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \quad (2-12)$$

$$n \cong \frac{d \log E'(\omega)}{d \log \omega} \quad (2-13)$$

där $E(t)$ är relaxationsmodulen, $E'(\omega)$ är storagemodulen, ω (omega) är vinkelfrekvensen och Γ är gammafunktionen. Storagemodulen kan beräknas med ekvation (2-14). För ytterligare information om frekvenssvepen hänvisas till kapitel 3.

$$E' = |E^*| \cos \phi \quad (2-14)$$

När värdena för relaxationsmodulen hade bestämts anpassades en Prony-serie enligt ekvation (2-15) till mätdata för att få fram en matematisk beskrivning av materialfunktionen.

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^N E_i \exp\left(-\frac{t}{\rho_i}\right) \quad (2-15)$$

där E_∞ är jämviktsmodulen för oändligt långa belastningstider, E_i är regressionskonstanter och ρ_i är relaxationstiderna.

Det finns flera sätt att bestämma modellkonstanterna då en Prony-serie används. Ett angreppssätt är att minimera felen mellan mätta och beräknade värden. En annan metod, som har använts i detta arbete, är att jämföra mätta och beräknade värden i flera punkter. Denna metod kallas kollokationsmetoden (collocation method) och finns beskriven i detalj i Huang (1993). Vanligtvis eftersträvas endast positiva konstanter för att undvika matematisk instabilitet men uppstår inga problem vid beräkningarna fungerar det lika bra med en blandning av positiva och negativa konstanter.

2.5 Viskoelasticitetsteori

Teorierna som presenteras i detta kapitel baseras på arbete utfört av Kim and Little (1990). De applicerade Schapery's (1981) icke-linjära viskoelastiska konstitutiva teorier för kompositmaterial med skador på sandasfalt och vid sina försök använde de en cyklisk belastning. I det arbetet transformerades ett viskoelastiskt problem till ett elastiskt problem genom att ersätta verkliga töjningar med fiktiva töjningar, s.k. pseudotöjningar, baserade på den elastiska-viskoelastiska korrespondansprincipen (Schapery 1984). En skadeparameter, baserad på hur mikrosprickor utbreder sig, användes för att beskriva skadeutvecklingen i materialet.

Schapery (1990) utvecklade en "work potential theory" för elastiska material med växande skador baserad på termodynamik av irreversibla processer. I denna teori används en variable för att beskriva det inre tillståndet i materialet (ISV, Internal State Variable) och för att beskriva de strukturella förändringarna i materialet orsakade av växande skador. Teorin utvecklades även för att gälla viskoelastiska material. Park et al. (1996) applicerade teorin på asfaltmaterial genom att använda monotoniska försök. Lee (1996), Kim et al. (1997), Lee och Kim (1998a) and Sias Daniels (2001) använde samma teori i sin forskning men i stället för monotoniska försök använde de sig av en cyklisk belastning.

I detta kapitel beskrivs de grundläggande teorierna som har använts i denna forskning. Huvuddelen av materialet och presentationsstrukturen har hämtats från Sias Daniels (2001) and Chehab (2002).

Asfaltbeläggningar är ett viskoelastiskt material som uppvisar tids- och/eller hastighetsberoende egenskaper då det belastas, vilket betyder att materialegenskaperna inte bara är en funktion av nuvarande belastning utan även påverkas av den tidigare belastningen som materialet varit utsatt för. Responserna för ett viskoelastiskt material beskrivas av faltningsekvationen (convolution integral) och för att ett system ska anses vara linjärt måste följande villkor vara uppfyllda, se ekvationerna (2-16) och (2-17).

$$\text{Homogenitet: } R\{AI\} = AR\{I\} \quad (2-16)$$

$$\text{Superposition: } R\{I_1 + I_2\} = R\{I_1\} + R\{I_2\} \quad (2-17)$$

där I , I_1 , och I_2 är input, R är responserna och A är en godtycklig konstant.

Förhållandet mellan input-respons beskrivs av hereditary integralen för ett viskoelastiskt material, se ekv. (2-18).

$$R = \int_{-\infty}^t R_H(t, \tau) \frac{dI}{d\tau} d\tau \quad (2-18)$$

där R_H är en responsfunktion. Om responsfunktionen (R_H) är känd kan responsen för en godtyckligt vald input beräknas. Om både input och respons är lika med noll vid tiden $t < 0$ (noll) kan den nedre integrationsgränsen reduceras till noll minus (precis före tiden noll). Värdet noll minus används i stället för noll för att ta hänsyn till att input kan ha ett diskontinuerligt utseende vid tiden $t = 0$ (noll). I följande ekvationer används 0 (noll) som nedre integrationsgräns (för att förenkla notationen) och ska tolkas som noll minus om inget annat anges. Ekvation (2-18) avser ett system där åldring av materialet ingår, dvs. responsmätning vid en godtycklig tid är en funktion av både belastningstid och tiden som förflutit sedan provkroppen tillverkades.

Om det antas att ingen åldring föreligger betyder det att ekvation (2-18) reduceras till ekvation (2-19):

$$R = \int_0^t R_H(t - \tau) \frac{dI}{d\tau} d\tau \quad (2-19)$$

Ekvation (2-19) kallas även faltningsekvationen (convolution integral) för ett icke-åldrat material. I detta projekt användes bland annat enaxiella försök, vilket betyder att de linjärt viskoelastiska förhållandena mellan spänningar och töjningar för ett icke-åldrat material kan beskrivas enligt ekvationerna (2-20) och (2-21) medan.

$$\sigma = \int_0^t E(t - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (2-20)$$

$$\varepsilon = \int_0^t D(t - \tau) \frac{d\sigma}{d\tau} d\tau \quad (2-21)$$

där $E(t)$ är relaxationsmodulen och $D(t)$ är krypmodulen. Båda responsfunktionerna har predikterats från frekvenssvetsdata (komplexmodulen).

2.5.1 Korrespondansprincipen

I början av 1980-talet lade Schapery (1984) fram sin utökade elastiska-viskoelastiska korrespondensprincip, som kan användas både för linjära och icke-linjära material. Han föreslog att de konstitutiva ekvationer som gäller för vissa viskoelastiska material är identiska för det elastiska fallet men spänningar och töjningar är inte nödvändigtvis fysikaliska storheter i det viskoelastiska fallet. I stället är de fiktiva variabler, s.k. pseudovariabler, beskrivna av faltningsekvationer (convolution integrals). Schapery definierade den enaxiella pseudotöjningen (ε^R) enligt ekvation (2-22) nedan.

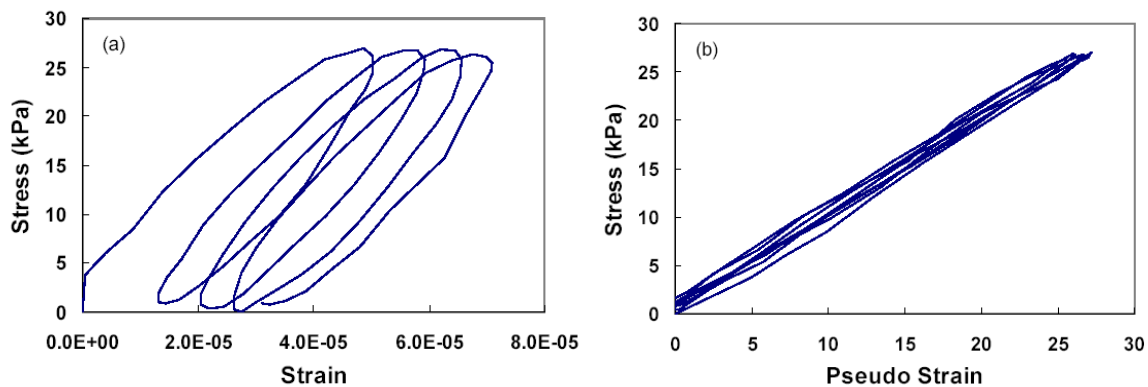
$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t-\tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (2-22)$$

där ε är den enaxiella töjningen, E_R är en godtycklig konstant (vanligtvis lika med ett), $E(t)$ är den enaxiella relaxationsmodulen, t är den tid som förflutit från den första belastningen till den aktuella tiden och slutligen τ , som är en integrationsvariabel som varierar från 0 till t .

Om definitionen av pseudotöjning i ekvation (2-22) används betyder det att ekvation (2-20) kan skrivas om till ekvation (2-23):

$$\sigma = E_R \varepsilon^R \quad (2-23)$$

Det går att hitta en korrespondens mellan ekvation (2-23) och ett linjärelastiskt spänning-töjningsförhållande, dvs. Hooke's lag, se ett exempel i Figur 2-1.



Figur 2-1 (a) Spänning-töjning för en asfaltbeläggning som utsätts för en LVE cyklisk belastning (haversine); (b) Spänning-pseudotöjning för samma data (Sias Daniel 2001)

2.5.2 Enaxiell konstitutionell modellering baserad på "Work Potential Theory"

Den konstitutionella modell som använts i detta arbete utvecklades av Kim och Lee (Lee 1996, Kim et al. 1997, Lee and Kim 1998a). Modellen använder sig av den elastiska-viskoelastiska korrespondensprincipen för att eliminera materialets tidsberoende egenskaper. "Work potential theory", utvecklad av Schapery (1990), används sedan för att modellera växande skador i materialet. En skada definieras som alla strukturella förändringar i materialet, förutom linjär viskoelasticitet, som resulterar i reducerad styvhet eller hållfasthet när materialet belastas.

"Work potential"-teorin använder sig av tre fundamentala element som beskrivs av ekvationerna (2-24), (2-25) och (2-26) nedan:

1. Energitäthetsfunktion baserad på töjning

$$W = W(\varepsilon_{ij}, S_m) \quad (2-24)$$

2. Förhållandet mellan spänningar och töjningar

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (2-25)$$

3. Skadeutvecklingslag

$$-\frac{\partial W}{\partial S_m} = \frac{\partial W_s}{\partial S_m} \quad (2-26)$$

där σ_{ij} och ε_{ij} är spännings- respektive töjningstensorer. S_m representerar interna tillståndsvariabler och $W_s = W_s(S_m)$ är energin orsakad av strukturella förändringar i materialet. Genom att använda Schapery's elastiska-viskoelastiska korrespondensprincip (CP) och en skadeutvecklingslag (Schapery 1984 and 1990, Park et al. 1996) ersätts de verkliga töjningarna, ε_{ij} , med pseudotöjningar, ε_{ij}^R , för att inkludera effekterna av viskoelasticitet. Således blir energitäthetsfunktion baserad på töjning $W = W(\varepsilon_{ij}, S_m)$ följande energitäthetsfunktion baserad på pseudotöjning i stället, se ekvation (2-27):

$$W^R = W^R(\varepsilon_{ij}^R, S_m) \quad (2-27)$$

Schapery's korrespondensprincip (CP) kan inte användas för att transformera den elastiska skadeutvecklingslagen så att den kan användas för viskoelastiska material. Därför används en typ av potensfunktion enligt ekvation (2-28) att beskriva skadeutvecklingen i ett viskoelastiskt material.

$$\dot{S}_m = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial S_m} \right)^{\alpha_m} \quad (2-28)$$

där \dot{S}_m är skadeutvecklingshastigheten, W^R är energitäthetsfunktion baserad på pseudotöjning och α_m är en materialkonstant.

Genom att använda Schapery's "work potential theory" och korrespondensprincip utvecklade Lee och Kim (1998b) en konstitutionell modell som gjorde det möjligt att beskriva utmattningsegenskaperna och läkningsegenskaperna hos en asfaltbeläggning som utsattes för en cyklisk belastning. När Lee och Kim (1998b) använde enaxiella cykliska belastningar med varierande belastningsamplituder (förstörande provning) för att studera de mekaniska egenskaperna hos asfaltbeläggningar upptäckte de att lutningen hos spännings-pseudotöjningskurvan minskade under försökets gång. Förändringen av kurvans lutning representerar reduktionen i styvhet orsakad av skadetillväxten i materialet under försökets gång. För att beskriva lutningsförändringen definierade de sekantpseudostyvheten, S^R , enligt ekvation (2-29).

$$S^R = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m^R} \quad (2-29)$$

där ε_m^R är den maximala pseudotöjningen i varje spännings-pseudotöjningscykel och σ_m är den tillhörande spänningen. För att ta hänsyn till variationen mellan olika provkroppar ansåg Lee (1996) att det var nödvändigt att normalisera pseudostyvheten med den initiala

pseudostyvheten, I. Den normaliserade pseudostyvheten beskrivs enligt ekvation (2-30) nedan.

$$C = \frac{S^R}{I} \quad (2-30)$$

För att visa hur komplexa modeller utvecklas från enklare modeller visas fyra konstitutionella ekvationer för linjärt elastiska och linjärt viskoelastiska material (med eller utan skador) i ekvationerna (2-31), (2-32), (2-33) och (2-34) nedan.

$$\text{Elastiskt fall utan skada:} \quad \sigma = E_R \varepsilon \quad (2-31)$$

$$\text{Elastiskt fall med skada:} \quad \sigma = C(S_m) \varepsilon \quad (2-32)$$

$$\text{Viskoelastiskt fall utan skada:} \quad \sigma = E_R \varepsilon^R \quad (2-33)$$

$$\text{Viskoelastiskt fall med skada:} \quad \sigma = C(S_m) \varepsilon^R \quad (2-34)$$

Där E_R är en konstant och $C(S_m)$ är en funktion av interna tillståndsvariabler S_m , som representerar förändringen i styvhet orsakad av exempelvis skadeackumulering i materialet. I ekvation (2-31) är E_R lika med Young's modul. En korrespondens mellan de elastiska och viskoelastiska konstitutionella ekvationerna kan upptäckas, de har samma form, men i det viskoelastiska fallet har töjningarna ersatts av pseudotöjningar.

Funktion C i ekvation (2-34) används för att karakterisera växande skador i materialet. De konstitutionella ekvationerna blir då ekvation (2-35) och (2-36)

$$W_m^R = \frac{I}{2} C_1(S_1) (\varepsilon_m^R)^2 \quad (2-35)$$

$$\sigma_m = I C_1(S_1) \varepsilon_m^R \quad (2-36)$$

Enligt ekvationerna (2-30) och (2-36) framgår det att funktion C_1 representerar S_R . Skadeutvecklingshastigheten kan då beskrivas enligt ekvation (2-37) nedan.

$$\dot{S}_m = \left(- \frac{\partial W_m^R}{\partial S_m} \right)^{\alpha_m} \quad (2-37)$$

För att karakterisera funktionen C_1 i ekvation (2-36) används skadeutvecklingshastigheten och experimentella data. Genom att använda ekvation (2-30), tillsammans med uppmätta töjningar och beräknade pseudotöjningar, kan C_1 -värden bestämmas. S_1 bestäms med hjälp av ekvation (2-37). Problemet är att det inte är möjligt att bestämma S_1 utan tidigare vetskap om förhållandet mellan $C_1(S_1)$ genom ekvation (2-35). Lee (1996) använde sig av kedjeregeln för att eliminera S_1 från högersidan i ekvation (2-35) och erhöll därefter ekvationerna (2-38) och (2-39).

$$\frac{dC}{dS} = \frac{dC}{dt} \frac{dt}{dS} \quad (2-38)$$

$$S_1 = \int_0^t \left[\frac{I}{2} \frac{dC_1}{dt} (\varepsilon_m^R)^2 \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} dt \quad (2-39)$$

Eftersom både C_1 och ε_m^R är beroende av tid, t , kan en numerisk approximationsmetod användas tillsammans med uppmätta data för att erhålla S_1 som en funktion av tid enligt ekvationerna (2-40) och (2-41) nedan.

$$S_1(t) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{I}{2} (\varepsilon_{mi}^R)^2 (C_{i-1} - C_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (2-40)$$

$$S_1(t) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{I}{2} (\varepsilon_{mi}^R)^2 (C_{i-1} - C_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \left(\frac{t_i - t_{i-1}}{4} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (2-41)$$

Ekvation (2-40) används för att utvärdera monotoniska data samt för den första delen av första lastcykeln vid cykliska försök. Ekvation (2-41) används för att utvärdera cykliska data eftersom det endast är belastningsdelen av en lastcykel som bidrar till nedbrytningen av provkroppen.

Beroende på brottzonens utseende vid sprickans spets kan antingen ekvation (2-42) eller (2-43) användas för att beskriva materialparametern α .

$$\alpha = \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (2-42)$$

$$\alpha = \frac{1}{m} \quad (2-43)$$

där m är lutningen för den linjära delen i ett log $E(t)$ -log(t) diagram. Om materialets brottenergi och spänningen vid brott är konstanta betyder det att ekvation (2-42) gäller. Men, om storleken på brottzonen och energin som åtgår för att skapa ett brott i materialet är konstanta fungerar ekvation (2-43) bättre. Detta har observerats vid försök på gummimaterial av Schapery och vid tester på asfaltmaterial av Lee och Kim (1998a, 1998b), Lee (1996) och Sias Daniel (2001).

Genom att utföra en regressionsanalys på testdata kan förhållandet mellan C_1 och S_1 (dvs. pseudostyvhet plottat mot skadorna i materialet) bestämmas. Lee (1996) observerade att formen på kurvan kan beskrivas med ekvation (2-44) nedan.

$$C_1(S_1) = C_{10} - C_{11}(S_1)^{C_{12}} \quad (2-44)$$

Regressionskoefficienten C_{10} bör vara i närheten av 1.0 eftersom skadorna är försumbara (S_1 går mot noll) då pseudostyvheten är lika med 1 ($S^R=1$).

2.6 Healing Index, HI (Läkningsindex)

För att beskriva vad som händer i materialet under viloperioderna har ett Healing Index, HI (Läkningsindex), utvecklat av Si, Zhiming et. al. (2001), använts i detta arbete. Styvheten och således även pseudostyvheten minskar kontinuerligt i takt med att antalet lastcykler ökar. Efter en viloperiod återhämtar sig materialet, dvs. styvheten och pseudostyvheten ökar. Den procentuella ökningen kan beskrivas med ett Healing Index (HI), eller läkningsindex enligt ekvation (2-45) nedan.

$$HI = \frac{\phi_{\text{efter}} - \phi_{\text{före}}}{\phi_{\text{före}}} \quad (2-45)$$

där

HI = healing index, HI (Läkningsindex)

$\phi_{\text{före}}$ = pseudostyvhet innan viloperioden

ϕ_{efter} = pseudostyvhet efter viloperioden

2.7 Utmattningsförsök enligt VTI-notat Nr. 38-1995

Vid provningen utsätts ett cylinderformat prov på det vertikala diameterplanet för en upprepad belastning (spänningskontrollerat försök). Försöken utförs vid 10°C. Deformationen på det horisontella diameterplanet mäts kontinuerligt på mantelytan under provningen.

Enligt VTI Notat Nr. 38-1995 beskrivs utmattningsegenskaperna enligt ekvation (2-46) nedan. Oftast redovisas resultaten även grafiskt i ett linjärlogaritmiskt diagram där initial töjning plottas mot antalet lastcykler till brott, även kallat Wöhler-diagram.

$$Nf = K \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^n \quad (2-46)$$

där

Nf = antal lastcykler till brott

ε = initial töjning (μ strains)

K, n = regressionskonstanter

För att beräkna den kritiska töjningsnivån vid en bestämd livslängd (exempelvis 1 miljon lastcykler) används för enkelhetens skull det omskrivna sambandet enligt ekvation (2-47), en s.k. "Fatigue Law".

$$\varepsilon_k = K' \cdot \left(\frac{N_f}{10^6} \right)^{-a} \quad (2-47)$$

där

ε_k = kritisk initial töjning vid en bestämd livslängd, N_f (μ strain).

N_f = livslängd vid den initiala töjningen, ε_k

K' = $10^{\left[\frac{\log K - 6}{n}\right]}$ (motsvarar den kritiska töjningen vid 1 miljon belastningar)

a = $-1/n$

K, n = regressionskonstanter enligt ovan.

I detta projekt har metodiken i VTI Notat Nr. 38-1995 modifierats något för att passa syftet med projektet, dvs. att studera läkningsegenskaperna. Utmattningsförsöken har därför utförts med en kontinuerlig sinusformad belastning i block med vilotider mellan blocken. Belastningstiden var 0.1 sekunder och ingen vilotid mellan belastningspulserna användes. Från start har provet utsatts för 5000 belastningscyklar, därefter har en viloperiod på 2 minuter lagts in. Efter dessa två minuter har provet utsatts för ytterligare 1000 belastningscyklar och därefter har en viloperiod på 5 minuter lagts in. Efter nästa block av 1000 belastningscyklar har viloperioden på 10 minuter lagts in osv. Den längsta viloperioden mellan två block har varit 60 minuter. Provkropparna testades vid spänningsnivåerna ca 0.21, 0.24, 0.36 och 0.60 MPa.

Som jämförelse har den vanliga utmattningsproceduren enligt VTI Notat Nr. 38-1995 använts för några få provkroppar. Provet utsätts för ett visst antal pulser, därefter har en vilotid lagts in (2 minuter) och så vidare.

3 Resultat och diskussion

3.1 Hålrumsalter

I Tabell 3-1 redovisas hålrumsalterna för de provkroppar som har använts vid de enaxiella försöken och i Tabell 3-2 för provkropparna som använts vid pressdragprovet. Målhålrumsalten var, som nämnts i tidigare kapitel, 4,0% men av okänd anledning lyckades inte packningen full ut vid tillverkningen av plattan. Hålrumsalterna ligger dock inom ATB:s tillåtna intervall (3-8%, borrhärnor) för beläggningstypen. I detta fall bör dock inte de förhöjda hålrumsalterna spela så stor roll då de är en jämförande undersökning som utförs.

För att underlätta jämförelsen mellan de enaxiella försöken och pressdragprovet eftersträvades så lika hålrumsalter som möjligt för de båda serierna. I detta fall var medelhålrumsalten 5,5% för båda serierna, vilket får anses vara godkänt. Kompaktdensiteten som användes vid beräkningarna bestämdes till 2.502 g/cm³.

Tabell 3-1 Skrymdensiteter och hålrumsalter för de enaxiella provkropparna

| Nummer | Diameter (mm) | Höjd (mm) | Skrymdensitet (g/cm ³) | Hålrumsalter (%) |
|--------------------------|---------------|-----------|------------------------------------|------------------|
| 11 | 75 | 150 | 2.371 | 5.2 |
| 12 | 75 | 150 | 2.355 | 5.9 |
| 13 | 75 | 150 | 2.356 | 5.8 |
| 21 | 75 | 150 | 2.341 | 6.4 |
| 22 | 75 | 150 | 2.343 | 6.4 |
| 23 | 75 | 150 | 2.359 | 5.7 |
| 31 | 75 | 150 | 2.368 | 5.4 |
| 32 | 75 | 150 | 2.373 | 5.2 |
| 33 | 75 | 150 | 2.363 | 5.6 |
| 41 | 75 | 150 | 2.337 | 6.6 |
| 42 | 75 | 150 | 2.350 | 6.1 |
| 43 | 75 | 150 | 2.366 | 5.4 |
| 51 | 75 | 150 | 2.360 | 5.7 |
| 52 | 75 | 150 | 2.387 | 4.6 |
| 53 | 75 | 150 | 2.371 | 5.2 |
| 61 | 75 | 150 | 2.334 | 6.7 |
| 62 | 75 | 150 | 2.344 | 6.3 |
| 63 | 75 | 150 | 2.355 | 5.9 |
| Medelhålrumsalter | | | | 5.5 |
| Standardavvikelse | | | | 0.37 |

Tabell 3-2 Skrymdensiteter och hålrumsalter för de provkroppar som testats med pressdragprovning

| Nummer | Diameter (mm) | Höjd (mm) | Skrymdensitet (g/cm ³) | Hålrumsalter (%) |
|--------------------------|---------------|-----------|------------------------------------|------------------|
| 12 | 100 | 50 | 2.352 | 6.0 |
| 22 | 100 | 50 | 2.368 | 5.3 |
| 31 | 100 | 50 | 2.340 | 6.5 |
| 32 | 100 | 50 | 2.382 | 4.8 |
| 42 | 100 | 50 | 2.363 | 5.5 |
| 52 | 100 | 50 | 2.374 | 5.1 |
| 61 | 100 | 50 | 2.365 | 5.5 |
| 62 | 100 | 50 | 2.362 | 5.6 |
| 71 | 100 | 50 | 2.357 | 5.8 |
| 72 | 100 | 50 | 2.382 | 4.8 |
| 81 | 100 | 50 | 2.359 | 5.7 |
| 82 | 100 | 50 | 2.371 | 5.2 |
| 83 | 100 | 50 | 2.341 | 6.4 |
| 91 | 100 | 50 | 2.375 | 5.1 |
| 92 | 100 | 50 | 2.377 | 5.0 |
| 93 | 100 | 50 | 2.345 | 6.3 |
| 101 | 100 | 50 | 2.356 | 5.8 |
| 102 | 100 | 50 | 2.366 | 5.4 |
| 111 | 100 | 50 | 2.367 | 5.4 |
| 112 | 100 | 50 | 2.380 | 4.9 |
| 121 | 100 | 50 | 2.377 | 5.0 |
| 122 | 100 | 50 | 2.378 | 4.9 |
| Medelhålrumsalter | | | | 5.5 |
| Standardavvikelse | | | | 0.51 |

3.2 Enaxiella utmattningsförsök med viloperioder

De enaxiella försöken utfördes vid Skanskas Vägtekniska Centrum (VTC-Syd) i Lomma. Den största fördelen med denna typ av försök är att spänningar och töjningar är väldefinierade, vilket gör det relativt lätt att utvärdera och tolka resultaten. Detta är också en anledning till att metoden är populär att använda för forskningsändamål. De största nackdelarna är att specialiserad utrustning måste användas och att provkropparna vanligtvis inte kan borrhäls ut direkt från en befintlig beläggning.

3.2.1 Dynamisk modul och fasvinkel

För att kunna bestämma masterkurvan för materialet mättes den dynamiska modulen och fasvinkeln vid flera frekvenser och temperaturer (frekvenssvep). Utöver dessa data erhöles även en slags ”fingeravtryck” för den testade provkroppen, som gjorde det möjligt att kontrollera provkroppen innan några förstörande tester utfördes. Denna kontroll är mycket viktigt för att undvika att försök utförs på skadade provkroppar. Om tester utförs på en skadad provkropp ökar spridningen och det är mycket svårt att tolka resultaten på ett korrekt sätt.

I Tabell 3-3 redovisas dynamisk modul och fasvinkel för de testtemperaturer och frekvenser som använts vid försöken. Vid bestämningen har minst tre provkroppar använts och

medelvärdena anses representera materialegenskaperna vid den aktuella temperaturen och frekvensen.

Tabell 3-3 Dynamisk modul och fasvinkel för AG16, 160/220, 4.8% vid -10, 0, 10, 20 och 30°C

| Temperatur (°C) | Frekvens (Hz) | Dynamisk modul, E* (MPa) | | Fasvinkel, ϕ (grader) | |
|-----------------|---------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| | | Medelvärde | Standardavvikelse | Medelvärde | Standardavvikelse |
| -10 | 20 | 20381 | 827 | 6.1 | 0.50 |
| | 10 | 19336 | 785 | 7.2 | 0.96 |
| | 5 | 18291 | 732 | 8.7 | 0.59 |
| | 1 | 15672 | 716 | 10.8 | 0.62 |
| | 0.5 | 14472 | 722 | 12.4 | 0.59 |
| | 0.1 | 11609 | 730 | 15.2 | 1.04 |
| 0 | 20 | 14670 | 1262 | 12.1 | 1.39 |
| | 10 | 13394 | 1202 | 13.8 | 0.84 |
| | 5 | 12094 | 1221 | 16.1 | 1.25 |
| | 1 | 9159 | 1139 | 20.5 | 2.23 |
| | 0.5 | 7976 | 1092 | 22.8 | 1.94 |
| | 0.1 | 5403 | 907 | 28.2 | 2.46 |
| 10 | 20 | 8926 | 760 | 21.9 | 0.53 |
| | 10 | 7653 | 702 | 23.9 | 1.29 |
| | 5 | 6490 | 646 | 26.1 | 1.77 |
| | 1 | 4044 | 422 | 33.6 | 1.24 |
| | 0.5 | 3225 | 368 | 36.4 | 1.71 |
| | 0.1 | 1779 | 241 | 40.4 | 2.05 |
| 20 | 20 | 3373 | 268 | 33.3 | 1.79 |
| | 10 | 2615 | 233 | 37.6 | 1.12 |
| | 5 | 1997 | 185 | 41.2 | 1.26 |
| | 1 | 999 | 110 | 42.8 | 2.58 |
| | 0.5 | 753 | 91 | 42.6 | 1.23 |
| | 0.1 | 428 | 47 | 38.1 | 2.87 |
| 30 | 20 | 1358 | 199 | 42.5 | 3.29 |
| | 10 | 1039 | 153 | 39.6 | 0.80 |
| | 5 | 758 | 119 | 40.1 | 2.20 |
| | 1 | 454 | 67 | 35.8 | 2.28 |
| | 0.5 | 379 | 48 | 34.4 | 1.36 |
| | 0.1 | 292 | 37 | 31.4 | 2.60 |

3.2.2 Masterkurva

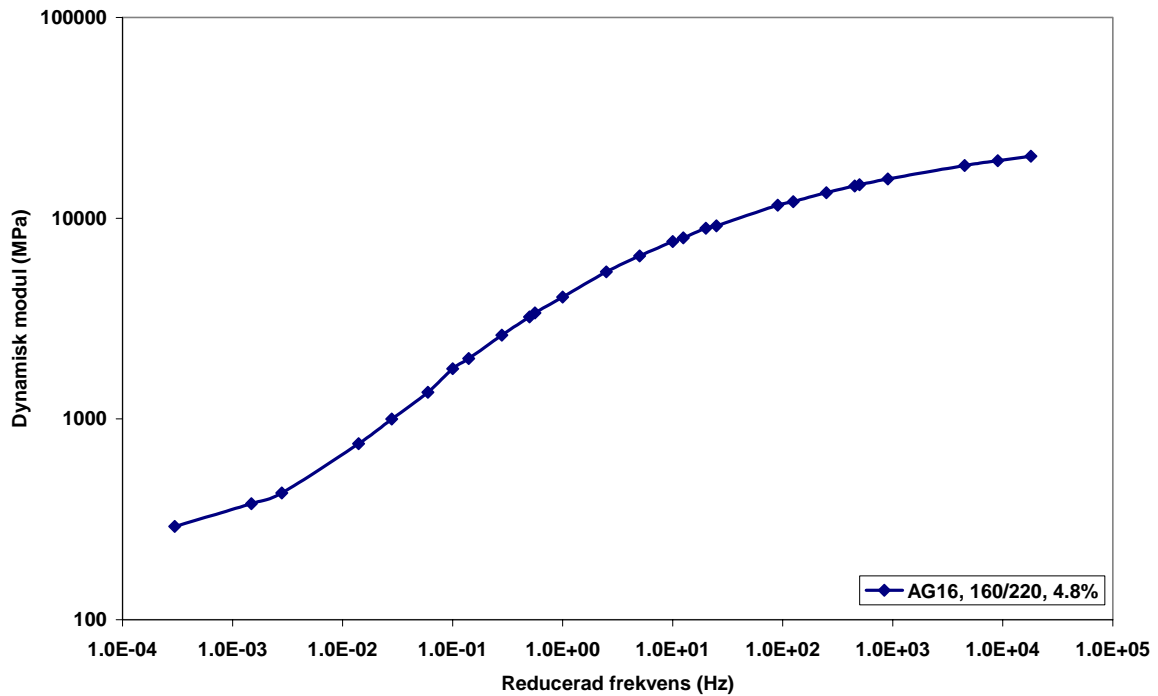
Genom att använda reducerad frekvens och skifta kurvorna för de olika temperaturerna i horisontalld kan en masterkurva för materialet skapas. Förhållandet mellan temperaturen och skiftfaktorn kan beskrivas enligt ekvation (3-1) nedan.

$$\text{Log}(a_T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c \quad (3-1)$$

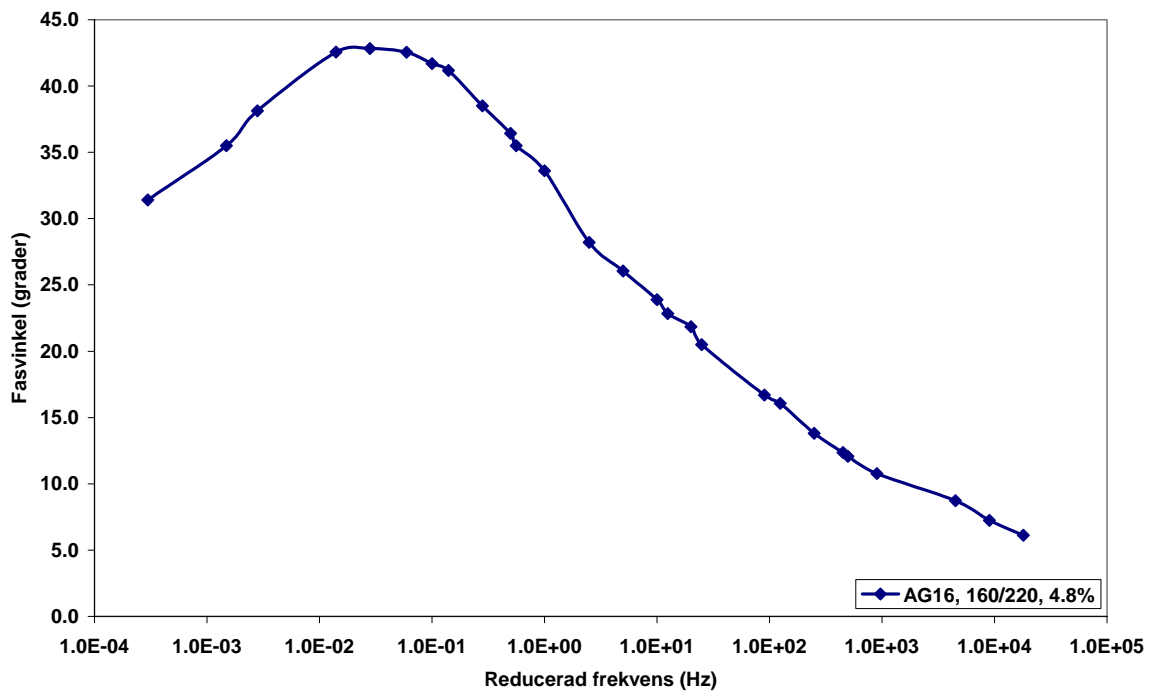
Regressionskonstanterna för den testade beläggningen redovisas i Tabell 3-4.

Tabell 3-4 Regressionsfaktorer för skiftfunktionen

| Beläggningstyp | a | b | c |
|---------------------|--------|---------|--------|
| AG16, 160/220, 4.8% | 0.0009 | -0.1576 | 1.3251 |



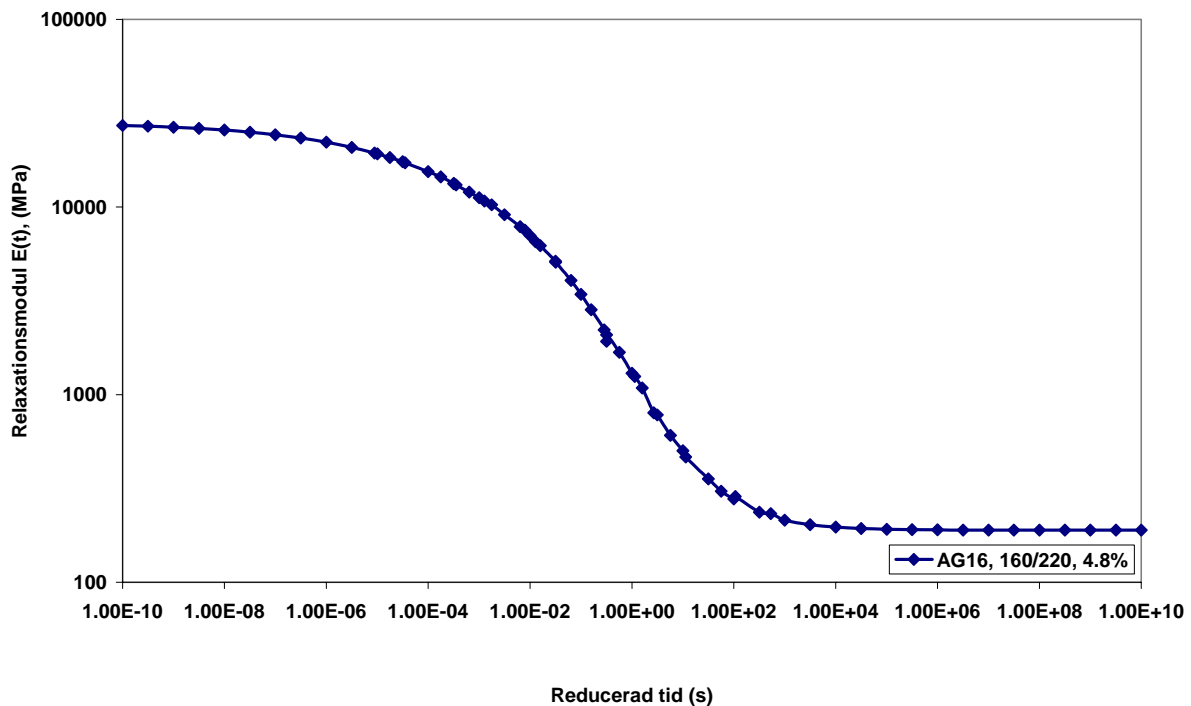
Figur 3-1 Masterkurva (dynamisk modul) för AG16, 160/220, 4.8% (referenstemperatur 10°C)



Figur 3-2 Masterkurva (fasvinkel) för AG16, 160/220, 4.8% (referenstemperatur 10°C)

I Figur 3-1 och Figur 3-2 ovan redovisas en grafisk presentation av masterkurvorna för dynamisk modul och fasvinkel. Utseendet är typiskt för ett viskoelastiskt material där styvheten är beroende av belastningstid och/eller temperatur. Vid låga temperaturer och/eller snabba belastningstider erhålls en hög dynamisk modul jämfört med det omvända fallet.

Också masterkurvan för fasvinkeln uppvisas ett typiskt beteende. En hög belastningshastighet och/eller låg temperatur resulterar i en lägre fasvinkel jämfört med det omvända fallet. En låg fasvinkel indikerar att materialet är relativt elastiskt, vilket är fallet vid höga belastningshastigheter och/eller låg temperatur. Om temperaturen blir tillräckligt hög och/eller belastningstiden tillräckligt långsam sker en reducering av värdet för fasvinkeln och en typisk topp bildas. Orsaken till toppen är att bindemedlet inte längre har någon lastbärande förmåga och därför måste stenskelettet bära hela lasten.



Figur 3-3 Relaxationsmodul, $E(t)$, för AG16, 160/220, 4.8% (referenstemperatur 10°C)

Eftersom relaxationsmodulen, $E(t)$, behövs i de kommande beräkningarna måste denna också bestämmas, se Figur 3-3. I detta projekt har bestämningen gjorts genom att utgå från data från frekvenssvepen (dynamisk modul och fasvinkel) och därefter har sambanden beskrivna i kapitel 2.3 använts vid bestämningen av $E(t)$.

Prony-koefficienter som beskriver relaxationsmodulen, $E(t)$, för den testade beläggningen redovisas i Tabell 3-5. För detaljer om prony-serierna hänvisas till kapitel 2.3. Vid bestämningen av prony-koefficienterna eftersträvades enbart positiva konstanter för att få matematisk stabila beräkningar vilket är anledningen till att det finns nollor i tabellerna. Värdena för E_∞ och E_0 , beskriver långtids- resp. korttidsasymptoten för relaxationsmodulen och m -värdet beskriver lutningen för den linjära delen av kurvan. Dessa värden är nödvändiga för att kunna beräkna bl.a. pseudostrain och skadorna i materialen.

Tabell 3-5 Prony-koefficienter som beskriver relaxationsmodulen, $E(t)$, för den testade beläggningen

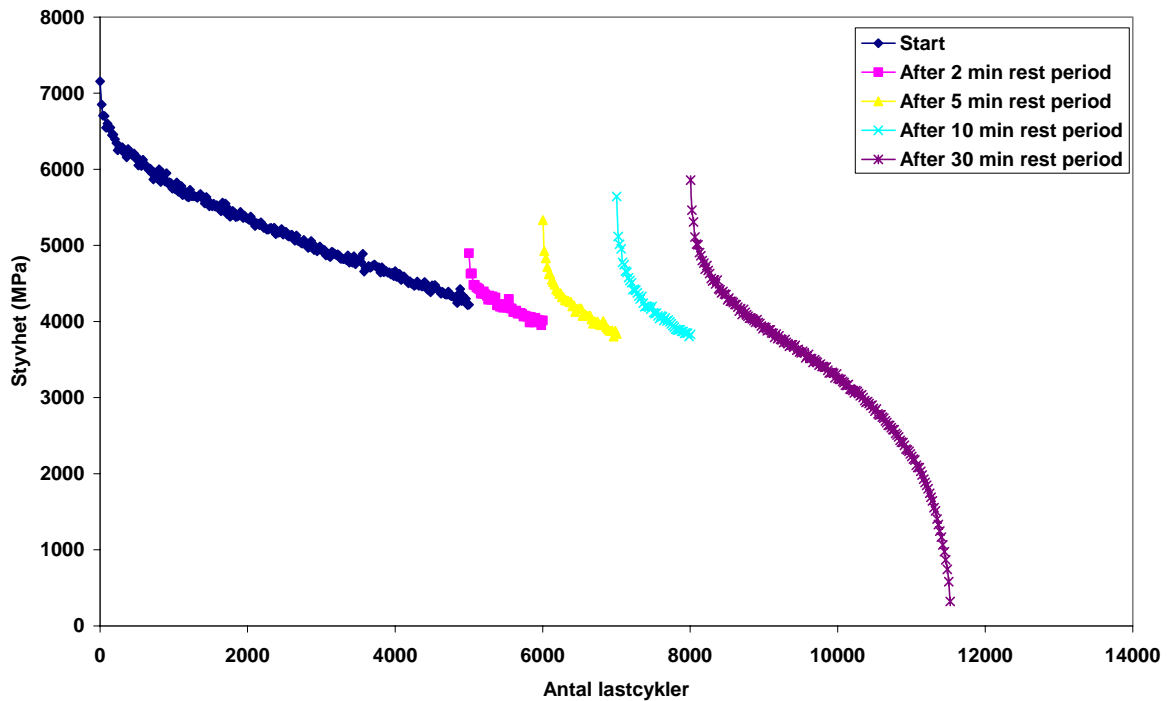
| AG22, 160/220, 4,8% | | |
|---------------------|----------|-------------|
| i | τ_i | E_i (MPa) |
| 1 | 2.00E-08 | 9.11E+02 |
| 2 | 6.32E-08 | 4.72E+02 |
| 3 | 2.00E-07 | 1.03E+03 |
| 4 | 6.32E-07 | 9.82E+02 |
| 5 | 2.00E-06 | 1.32E+03 |
| 6 | 6.32E-06 | 1.53E+03 |
| 7 | 2.00E-05 | 1.66E+03 |
| 8 | 6.32E-05 | 2.07E+03 |
| 9 | 2.00E-04 | 1.88E+03 |
| 10 | 6.32E-04 | 2.49E+03 |
| 11 | 2.00E-03 | 1.75E+03 |
| 12 | 6.32E-03 | 2.72E+03 |
| 13 | 2.00E-02 | 1.28E+03 |
| 14 | 6.32E-02 | 2.33E+03 |
| 15 | 2.00E-01 | 2.14E+03 |
| 16 | 6.32E-01 | 0.00E+00 |
| 17 | 2.00E+00 | 1.01E+03 |
| 18 | 6.32E+00 | 7.34E+01 |
| 19 | 2.00E+01 | 2.67E+02 |
| 20 | 6.32E+01 | 1.18E+01 |
| 21 | 2.00E+02 | 8.39E+01 |
| 22 | 6.32E+02 | 0.00E+00 |
| 23 | 2.00E+03 | 2.42E+01 |
| 24 | 6.32E+03 | 0.00E+00 |
| 25 | 2.00E+04 | 6.87E+00 |
| 26 | 6.32E+04 | 0.00E+00 |
| 27 | 2.00E+05 | 1.91E+00 |
| 28 | 6.32E+05 | 0.00E+00 |
| 29 | 2.00E+06 | 5.53E-01 |
| 30 | 6.32E+06 | 0.00E+00 |
| 31 | 2.00E+07 | 1.42E-01 |
| 32 | 6.32E+07 | 0.00E+00 |
| 33 | 2.00E+08 | 6.81E-02 |
| E_∞ | | 189.6 |
| E_0 | | 32883.6 |
| Lutning, m | | 0.427 |

3.2.3 Cykliska försök

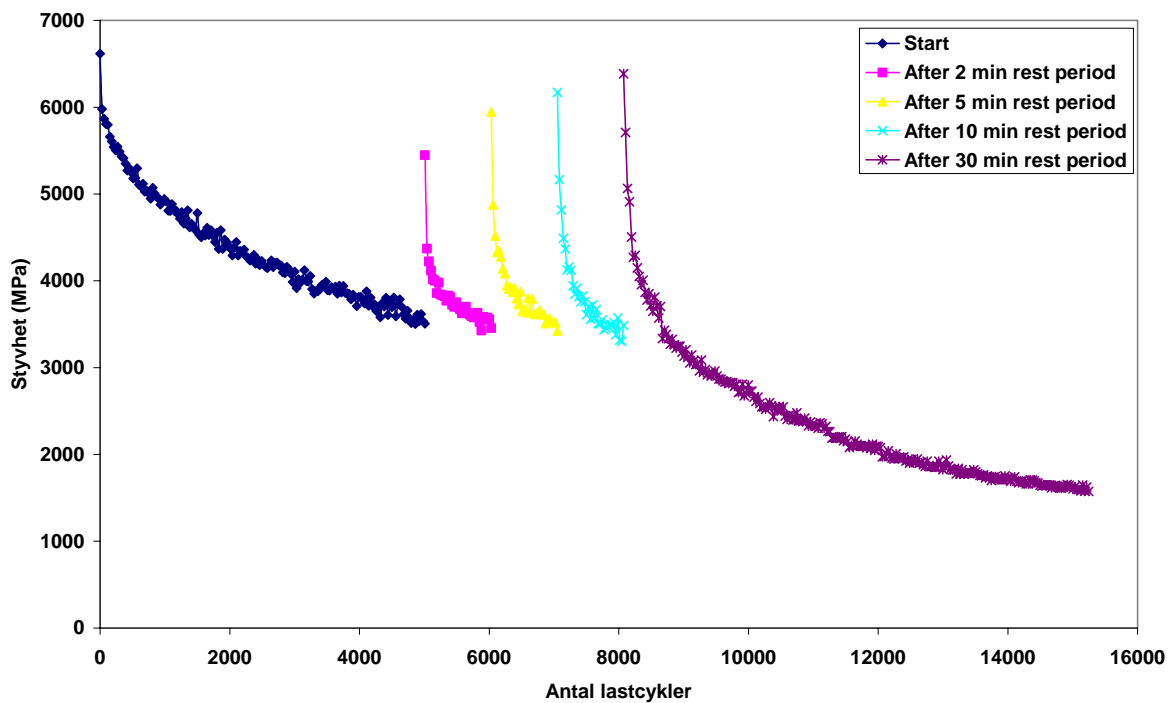
I Figur 3-4 och Figur 3-5 redovisas två typiska utmattningsförsök med inlagda viloperioder, den första figuren visar ett spänningskontrollerat försök (controlled-stress) och den andra figuren ett töjningskontrollerat försök (controlled-strain). Dessa figurer är typiska för samtliga försök som körts i detta projekt och därför redovisas inga fler figurer.

Från start kördes 5000 lastcykler och därefter lades en viloperiod på 2 minuter in. När försöket startades på nytt efter viloperioden kunde en kraftig ökning av styvhetsmodulen observeras. Detta är en indikation på att materialet har läkt ihop under viloperioden (i kombination med relaxation i materialet). Efter ytterligare 1000 lastcykler lades en ny viloperiod in, denna gång på 5 minuter. När försöket startades på nytt kunde återigen en ökning av styvhetsmodulen observeras. I detta fall var ökningen större jämfört med då en viloperiod på 2 minuter användes. Försöket startades på nytt och viloperioder på 10 respektive 30 minuter användes vid de efterföljande stoppen. En tydlig trend, både för spännings- och

töjningskontrollerade försök, kunde observeras. Ju längre viloperiod som användes desto högre blev styvhetsmodulen efter viloperioden när försöket startades på nytt.



Figur 3-4 Enaxiellt utmattningsförsök, spänningskontrollerat, 10°C, 1600 kPa, sinusformad last (exempel)

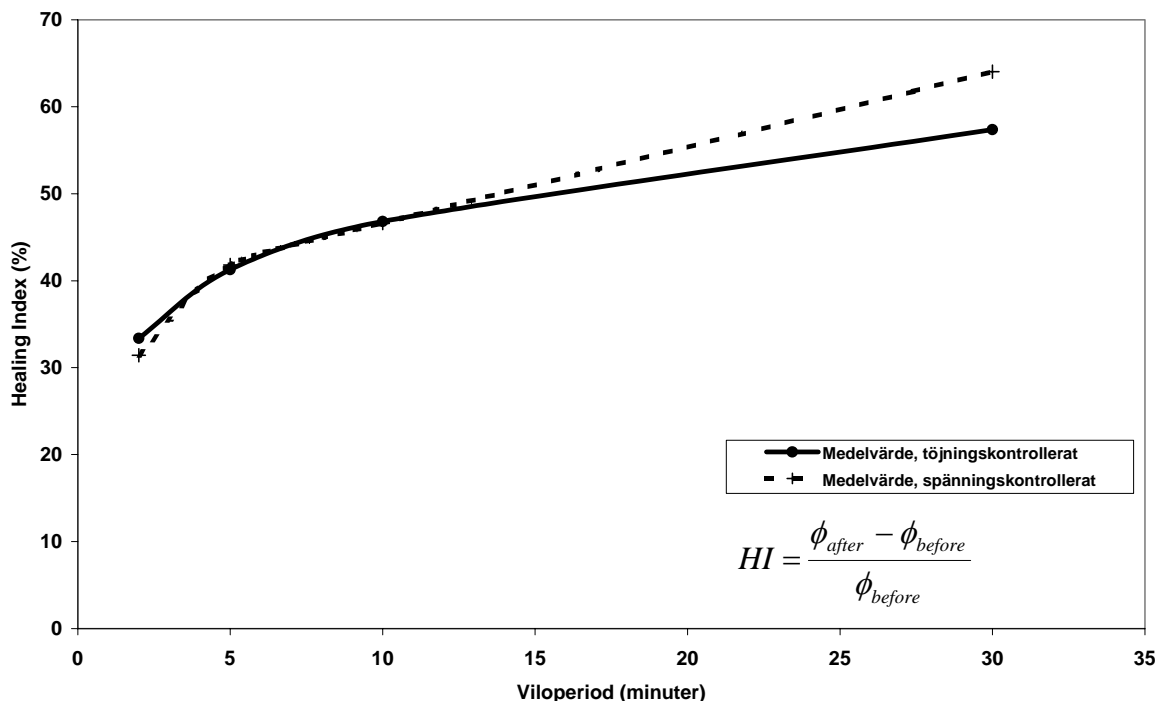


Figur 3-5 Enaxiellt utmattningsförsök, töjningskontrollerat, 10°C, 400 μ strain, sinusformad last (exempel)

I de redovisade försöken (Figur 3-4 och Figur 3-5) har en relativt stor skada uppstått i materialet när den första viloperioden läggs in. Detta betyder att läkningspotentialen är större (många mikrosprickor som kan läkas ihop) jämfört med om försöket hade stoppats efter exempelvis 1000 lastcykler. Det bör dock påpekas att om försöket körs till brott (eller i närheten av brott), dvs. om det finns makrosprickor i materialet, betyder det att mycket små eller obefintliga läkningseffekter kommer att kunna observeras eftersom läkningen främst sker av mikrosprickorna.

För att undersöka saken utfördes några enstaka försök med mycket låga laster och ett färre antal lastcykler innan den första viloperioden lades in (och därmed även få skador i materialet). Resultatet blev att ökningen av styvhetsmodulen efter en viloperiod blev i det närmaste obefintlig, dvs. inga eller mycket små läkningseffekter kunde observeras i materialet. Detta är helt logiskt, finns det inga eller försumbara skador i materialet finns det heller inga skador som kan läkas.

I Figur 3-6 redovisas Healing Index, HI, för den testade beläggningen (AG16, 160/220, 4.8%). Healing Index för både spännings- och töjningskontrollerade försök har tagits fram och varje kurva består av medelvärden från ca 5 provkroppar. Vid framtagningen av HI har Schapery's pseudostrainkoncept, som beskrivits i detalj i kapitel 2, använts. Den största fördelen med att använda pseudostrainkonceptet är att materialets hastighetsberoende egenskaper kan elimineras. I teorin betyder detta att olika typer av försök, exempelvis spännings- eller töjningskontrollerade försök, kan beskrivas med en karakteristisk kurva. Även effekterna som uppstår då olika spännings- respektive töjningsnivåer används kan elimineras. Resultaten redovisade i Figur 3-6 är ett bra bevis på att Schapery's teorier stämmer även i praktiken.



Figur 3-6 Healing Index, HI, för spännings- och töjningskontrollerade enaxiella försök

Med hjälp av pseudostrainkonceptet är det möjligt att skapa ett karakteristisk Healing Index för den aktuella beläggningen. Som framgår av Figur 3-6 överlappar de båda kurvorna

varandra på ett fint sätt, undantaget är när en viloperiod på 30 minuter används. En trolig förklaring till avvikelserna vid en viloperiod på 30 min är att det är mycket svårt att hålla en nollbelastning under en så låg tid som det är frågan om i detta fall. En konsekvens av detta blir att osäkerheten i försöken ökar vilket i sin tur ger utslag när resultaten analyseras. En bidragande orsak till svårigheterna med att hålla en nollbelastning är att ändplattorna, som gör det möjligt att applicera både drag- och tryckkrafter, är fastlimmade på provkroppen. Vid ett vanligt tryckförsök uppstår inte detta problem eftersom belastningen enkelt kan tas bort genom att helt enkelt hissa upp belastningskolven under viloperioden, något som inte är möjligt om plattan är fastlimmad i provkroppen.

I framtiden är det troligt att ett Healing Index, baserat på pseudostrainkonceptet, skulle kunna användas för att jämföra läkningsegenskaperna hos olika beläggnings typer. Det som eftersträvas är beläggningar som har ett högt HI direkt från början och sedan har en brant lutning på kurvan, dvs. har en hög och snabb återläkningsförmåga. Om beläggningar med goda läkningsegenskaper används i första hand borde livslängden för vägen påverkas positivt jämfört med om standardbeläggningar används. Alternativt kan tunnare konstruktioner med samma livslängd som tidigare byggas om läkningseffekterna beaktas vid dimensioneringen. För att så ska kunna ske behövs dock mycket grundforskning inom området, dessutom måste ett korrekt sätt att ta hänsyn till läkningseffekterna vid dimensioneringen utvecklas.

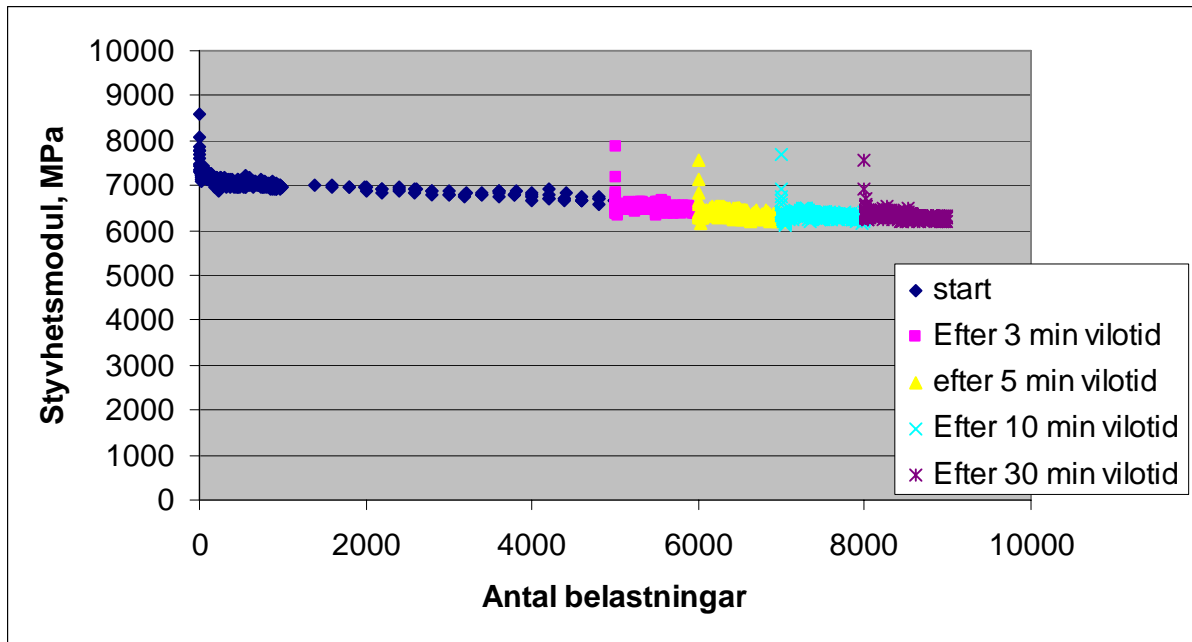
I detta arbete har även den ”vanliga” styvhetsmodulen (dvs. spänning dividerat med töjning) använts för att försöka skapa ett läkningsindex. Resultaten blev inte lyckade då denna analysmetod användes. Det var inte möjligt att skapa ett karakteristiskt Healing Index (HI) på samma sätt som när pseudostrainkonceptet användes. Variationer mellan provkropparna, skillnader i försöksupställning (spännings- eller töjningskontrollerat försök), skillnader i spännings- respektive töjningsnivåer etc. ledde till att det i detta projekt var omöjligt att dra några långtgående slutsatser och därför övergavs denna analysmetod till förmån för pseudostrainkonceptet.

3.3 Utmattningsförsök med viloperioder utförda enligt VTI-notat

Pressdragprovet utfördes vid Väg- och Transportforskningsinstitutet (VTI) i Linköping. Den största fördelen med denna typ av försök är att både laborietillverkade provkroppar (gyratorisk packning, platta etc.) samt uppborrade provkroppar från vägen kan användas vid försöken utan att någon mera omfattande provberedning behöver göras. De största nackdelarna är att spännings- och töjningsförhållandena i provkroppen är relativt komplicerade samt att det ännu inte är möjligt att beräkna pseudostyvheten för denna typ av försöksupställning vilket kan försvåra analysen av testresultaten.

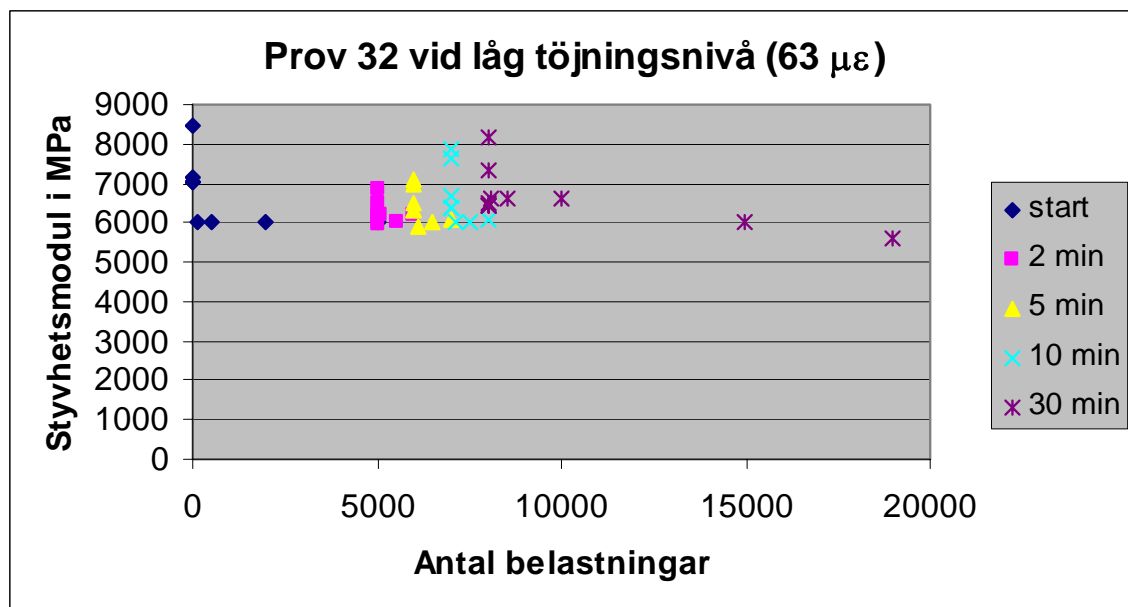
Figur 3-7 visar att styvheten sjunker med ökat antal belastningar. Efter varje block av ett antal belastningar och efterföljande vilotid ökar styvheten signifikant vid början av nästa block efter vilotiden. Detta tyder på att provet återhämtar sig och blir starkare efter viloperioden. Detta kan tolkas som att hårfina sprickor går ihop.

Från försök med enaxiell belastning (cylindriskt prov), se kapitel 3.2, framgår det också att ökningen av styvhetsmodulen efter en viloperiod är en funktion av vilotidens längd, dvs. styvheten ökar med ökad vilotid. Denna korrelation framgår inte lika tydligt vid försök med pressdragprovet.

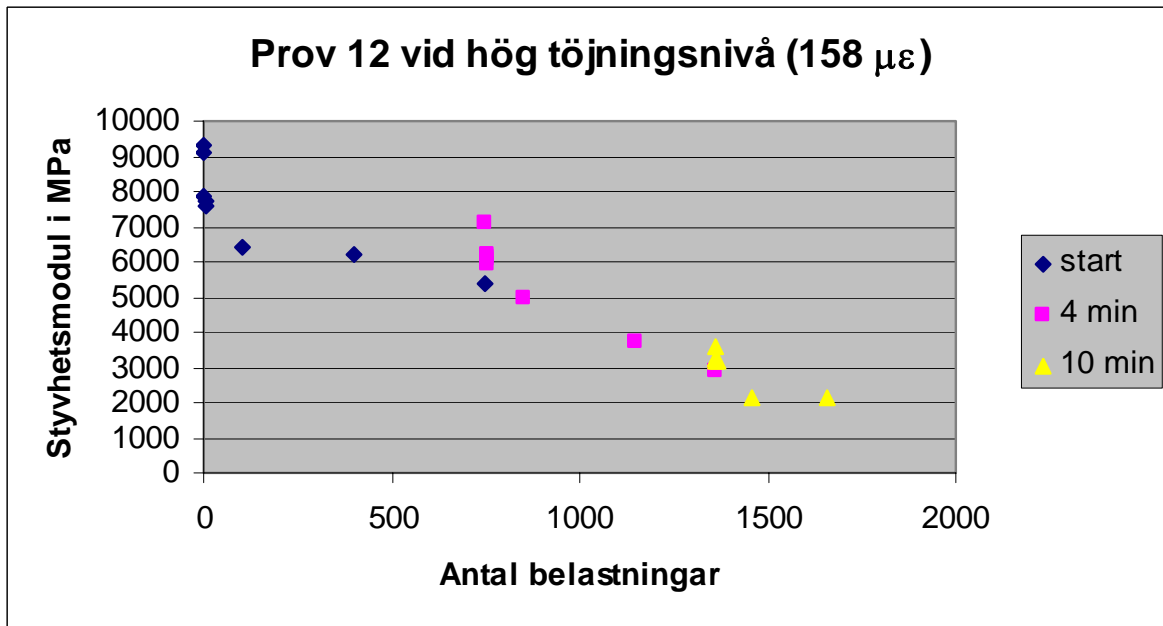


Figur 3-7 Samband mellan styvhetsmodul och antal belastningar med vilotider mellan belastningsblocken för AG16 160/220 vid 10°C och en spänning på 0.24 MPa med en initial töjning på 65 μ strain.

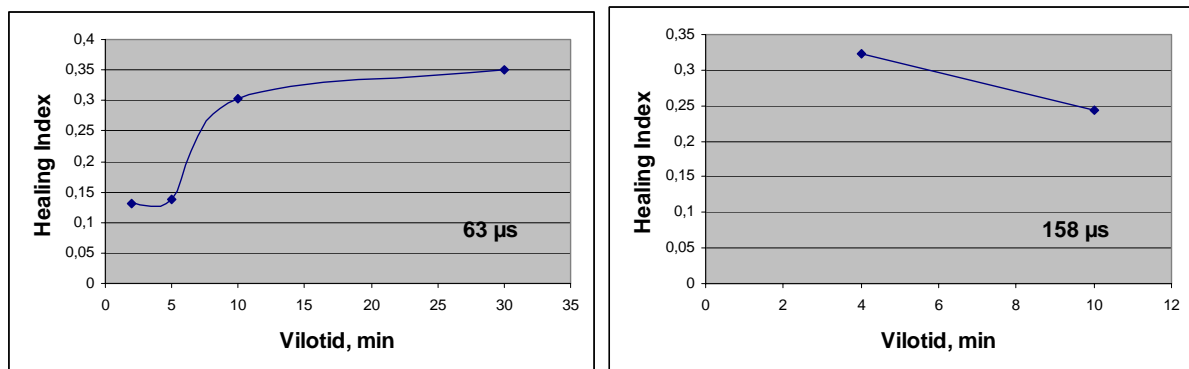
Figur 3-8 visas ett prov med låg initial töjningsnivå (63 μ strain) och i Figur 3-9 ett prov med hög initial töjningsnivå (158 μ strain). Sambandet mellan styvhetsmodul och vilotidens längd är mycket tydligare vid låg töjning. Det kan innebära att provet har fått relativt stora sprickor vid 158 μ strain jämfört med provet vid 63 μ strain. Provet vid 158 μ strain kan inte återhämta sig helt under viloperioderna och uppvisar av den anledningen lägre styvhetsmoduler trots de längre viloperioderna. Styvhetsmodulsökning i procent, kallad Healing Index, enligt Si et al (2002) visar att provning vid 63 μ strain resulterar i ökad styvhet ju längre vilotiden är, medan vid 158 μ strain försvagas provet trots förlängning av vilotiden. Se Figur 3-10 för Healing Index (HI) baserat på den ”vanliga” styvhetsmodulen (ej pseudostyvhet).



Figur 3-8 Samband mellan styvhetsmodul och antal belastningar med vilotider mellan belastningsblocken för AG16 160/220 vid 10°C, låg initial töjningsnivå (65 μ strain).

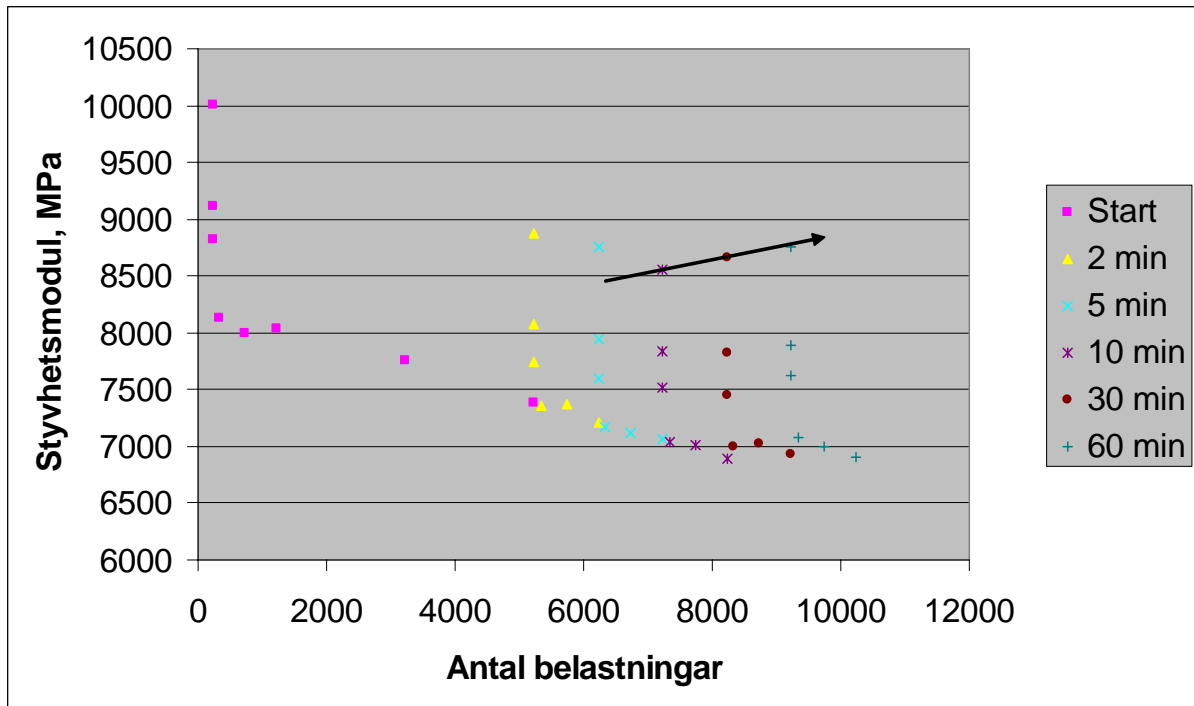


Figur 3-9 Samband mellan styvhetsmodul och antal belastningar med vilotider mellan belastningsblocken för AG16 160/220 vid 10°C, hög initial töjningsnivå (158 μstrain).

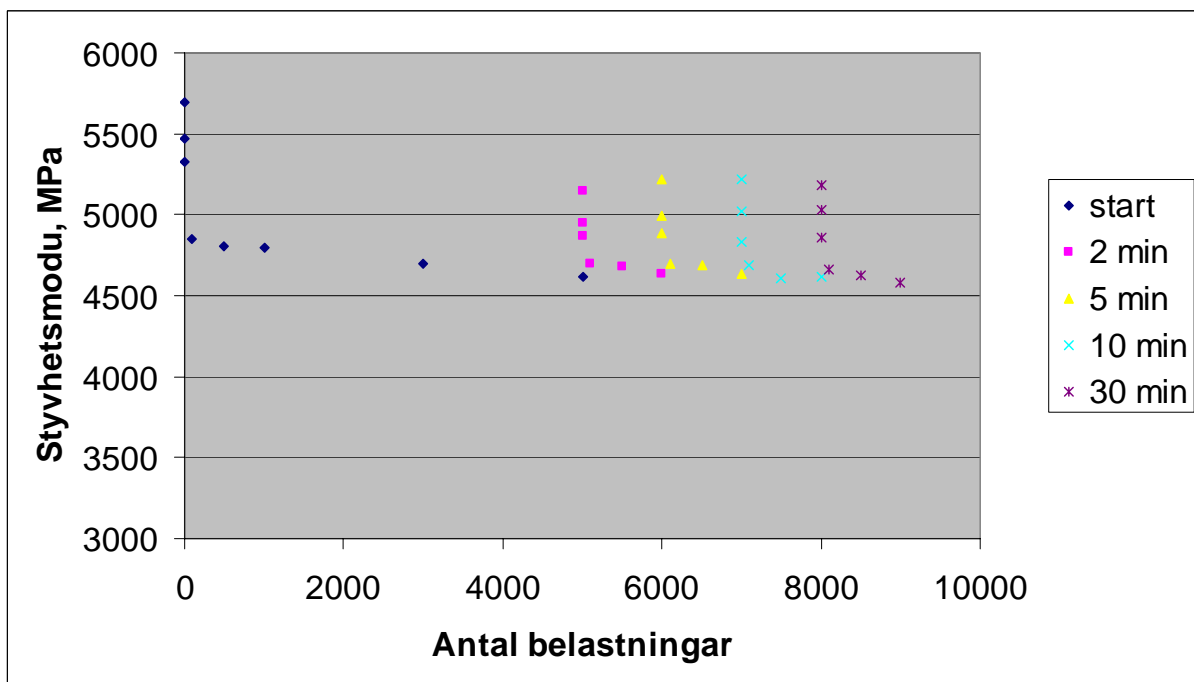


Figur 3-10 a och b Healing Index för AG16 160/220 vid olika initiala töjningar baserad på "vanliga" styvhetsmodulsvärden (ej pseudostyvheter).

Ytterligare ett prov har testats vid låg töjningsnivå. Vilotiden före sista blocket av belastningar har ökat till 60 minuter. Figur 3-11 visar tydligare tendens för återläkning ju längre vilotiden är. Figur 3-12 visar återläkningsförsök vid upprepade belastningar med 0.1 sekund belastningstid följt av en vilotid på 0.4 sekund samt vilotider mellan belastningsblocken. Resultaten liknar de från de kontinuerliga testerna.



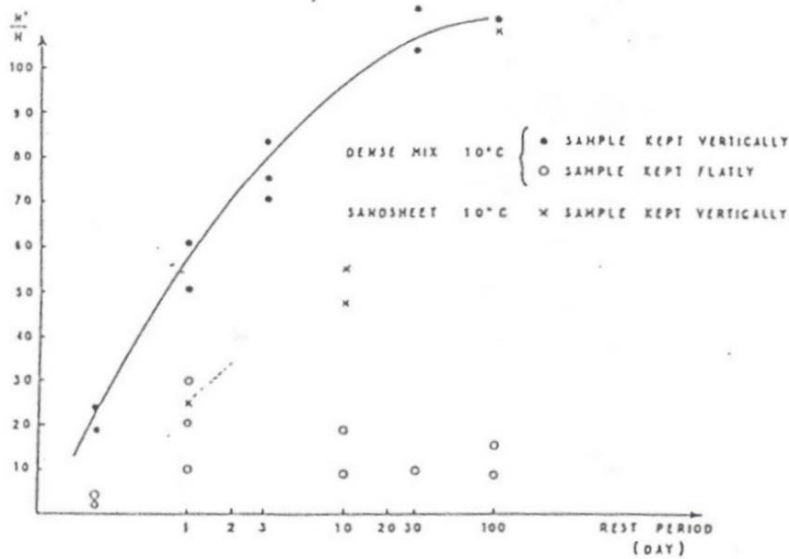
Figur 3-11 Återläkningseffekt hos AG16 160/220 vid initial töjning på 53 μ strain



Figur 3-12 Återläkningseffekt vid upprepade belastningspulser med 0.1 sek belastningstid och 0.4 sek vilotid samt vilotider mellan belastningsblocken.

Det konstateras att återläkningen vid provning med pressdragprovet är svag i jämförelse med det enaxiella testet, se kapitel 3.2 för mera information om de enaxiella testerna. Bazin och Saunier (1967) konstaterade tydliga skillnader i återläkning mellan liggande och stående asfaltbalkar. I Figur 3-13 redovisas effekten av egenviktens betydelse för läkning av sprickor. Utmattningskadade prov visade en signifikant återläkning efter lagring i vertikalposition, upp till 100 procentig läkning beroende av lagringstiden, som motsvarar vilotiden i det här arbetet.

Balkar som lagrades liggande vid motsvarande temperatur visade så gott som ingen återläkning. Bazin konstaterar att små spänningar har stor effekt på återläkningen av asfaltmaterial i samband med lagringstiden.



Figur 3-13 Återläkningseffekt på utmattningsmotstånd vid lagring av prov stående och liggande (Bazin and Saunier 1967)

4 Slutsatser

Försöken utförda i detta projekt bekräftar att läkningsfenomenet, som uppstår under viloperioderna, verkligen existerar. Efter en viloperiod observeras en ökning av styvhetsmodulen, ökningen blir större ju längre viloperioden är. Detta fenomen har observerats både för de enaxiella försöken och för pressdragprovet.

Vid de enaxiella försöken har relativt stora skador uppstått i materialet då den första viloperioden lades in. Detta betyder att läkningspotentialen är större (många mikrosprickor som kan läkas ihop) jämfört med om försöket hade stoppats efter kortare tid. Det bör dock påpekas att om försöket körs till brott (eller i närheten av brott), dvs. om det finns makrosprickor i materialet, betyder det att mycket små eller obefintliga läkningseffekter kommer att kunna observeras eftersom läkningen främst sker av mikrosprickorna. För att undersöka saken utfördes några enstaka försök med mycket låga laster och ett färre antal lastcykler innan den första viloperioden lades in (och därmed även få skador i materialet). Resultatet blev att ökningen av styvhetsmodulen efter en viloperiod blev i det närmaste obefintlig, dvs. inga eller mycket små läkningseffekter kunde observeras i materialet. Detta är helt logiskt, finns det inga eller försumbara skador i materialet finns det heller inga skador som kan läkas.

Med hjälp av pseudostrainkonceptet är det möjligt att skapa ett karakteristisk Healing Index för den aktuella beläggningen. Den största fördelen med att använda pseudostrainkonceptet är att materialets hastighetsberoende egenskaper kan elimineras. Även effekterna som uppstår då olika spännings- respektive töjningsnivåer används kan elimineras. Detta betyder att olika typer av försök, exempelvis spännings- eller töjningskontrollerade försök, kan beskrivas med en karakteristisk kurva.

I detta arbete har även den ”vanliga” styvhetsmodulen (dvs. spänning dividerat med töjning) använts för att försöka skapa ett läkningsindex. Resultaten blev inte lyckade då denna analysmetod användes för de enaxiella försöken. Det var inte möjligt att skapa ett karakteristiskt Healing Index (HI) på samma sätt som när pseudostrainkonceptet användes. Variationer mellan provkropparna, skillnader i försöksuppställning (spännings- eller töjningskontrollerat försök), skillnader i spännings- respektive töjningsnivåer etc. ledde till att det i detta projekt var omöjligt att dra några långtgående slutsatser och därför övergavs denna analysmetod till förmån för pseudostrainkonceptet.

Vid de enaxiella försöken är provet stående och provets egenvikt bidrar till snabbare läkning av sprickor. Vid pressdragprovet är provkroppen liggande på mantelytan och provkroppens egenvikt bidrar till ökad dragpåkänning på det vertikala diameterplanet. Alltså provkroppens egenvikt fortsätter under vilotiden att utsätta provet för dragpåkänningar. Trots de små påkänningarna orsakade av provets vikt kan detta förhindra en snabb läkning av sprickor.

En vidareutveckling av testproceduren är nödvändig för pressdragprovet. Test måste utföras vid låga töjningsnivåer. Möjlighet att lagra provet stående eller vrida provet 90 grader under vilotiden bör förbättra resultaten, men det är opraktiskt vid utförandet. Tillämpning av pseudostrainkonceptet på pressdragprovet behöver utvecklas. Litteraturstudien indikerar att återläkningsförsök är beroende av belastningen under vilotiden, vilken är odefinierad. De små spänningarna orsakade av provets vikt bör beaktas vid återläkningsförsök.

Vidare undersökningar av återläkningsförsök är nödvändiga. Undersökning av olika beläggningstyper, även polymermodifierade, vid olika temperaturer bör belysa fenomenet mera grundligt. I framtiden är det troligt att ett Healing Index (HI), eventuellt baserat på pseudostrainkonceptet, skulle kunna användas för att jämföra läkningsegenskaperna hos olika beläggningstyper. Det som eftersträvas är beläggningar som har ett högt HI direkt från början och sedan har en brant lutning på kurvan, dvs. har en hög och snabb återläkningsförmåga.

Klarläggning av återläkningens betydelse för utmattningsegenskaperna bör minska skiftfaktorns storlek och därmed minska risken för låg precision (stor spridning) vid prediktering av livslängden hos asfaltbeläggningar. Om beläggningar med goda läkningsegenskaper används i första hand borde livslängden för vägen påverkas positivt jämfört med om standardbeläggningar används. Alternativt kan tunnare konstruktioner med samma livslängd som tidigare byggas om läkningseffekterna beaktas vid dimensioneringen.

Referenser

- AMADEUS, 2000** – ”Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structures”, Final report RO-97-SC.2137, European Commission, 2000.
- ATB-VÄG 2004**– “Allmän teknisk beskrivning för vägkonstruktion – ATB VÄG 2004”, Vägverkets publikation 2004:111
- Bazin P. and Saunier J.B.** ”Deformability, Fatigue and Healing Properties of Asphalt Mixes” Proceedings 2nd Int. Conf. on The Structural Design of Asphalt Pavements, 1967.
- Chehab, Ghassan (2002)**. “Characterization of Asphalt Concrete in Tension Using a Visco-Elasto-Plastic Model”, Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, Department of Civil Engineering, Raleigh, North Carolina, 2002.
- COST 333** – “COST 333, Development of New Bituminous Pavement Design Method”, European Commission Directorate General Transport, 1999, ISBN 92-828-6796-X, (<http://www.cordis.lu/cost-transport/home.html>)
- FAS** - FAS Metoder, - “Metodbeskrivningar för provning av stenmaterial, bituminösa bindemedel, asfaltbeläggningar och massa”, Föreningen för asfaltbeläggningar i Sverige (FAS), 1998.
- Huang (1993)** - Huang, Yang H., “Pavement Analysis and Design”, University of Kentucky, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993, ISBN 0-13-655275-7.
- Kim et al. (1997a)** - Kim, Y., & Kim, Y.R. “In Situ Evaluation of Fatigue Damage Growth and Healing of Asphalt Concrete Pavements Using Stress Wave Method”, Transportation Research Record 1568, Washington, D.C. 1997
- Kim et al. (1997b)** - Kim, Y.R., Lee, H-J., Little, D.N., “Fatigue Characterisation of Asphalt Concrete Using Viscoelasticity and Continuum Damage Mechanics”, Proceeding, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 66, pp 520- 569, 1997.
- Kim, Y.R. & D.N. Little (1990)** - “One-Dimensional Constitutive Modeling of Asphalt Concrete”. ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 116, No. 4, pp. 751-772.
- Lee, H.J. and Y.R. Kim (1998a)**. “A Uniaxial Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading.” ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 124, No. 11, pp. 1224-1232.
- Lee, H.J. and Y.R. Kim (1998b)**. "A Viscoelastic Continuum Damage Model of Asphalt Concrete with Healing," ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 124, No. 11, pp. 1-9.
- Lee, Hyun-Jong. (1996)** – “Uniaxial Constitutive Modelling of Asphalt Concrete Using Viscoelastic and Continuum Damage Theory”, Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, Department of Civil Engineering, Raleigh, North Carolina, 1996.
- Nilsson, B.R. (2001)** – ”Fatigue of Asphalt Mixtures – Continuum Damage Mechanics Applied to Data from Laboratory Tests”, Licentiate Thesis, Department of Technology and Society, Division of Highway Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, 2001.
- Nilsson, B.R. (2003)** – ”Fatigue of Asphalt Mixes – Theory of Viscoelasticity and Continuum Damage Mechanics Applied to Uniaxial Fatigue Data from Laboratory Tests”, Doctoral Thesis, Lund University, Department of Technology and Society, Lund Institute of Technology, Box 112, 222 00 Lund Sweden, 2003.
- NVF utskott 33, (1992)** - “Utmattningskriterier för asfaltbelegningar” NVF Utskott 33 Asfaltbeläggningar, Rapport nr.7, 1992.
- Park, S.W. & Kim, Y.R. (1999)** – “Interconversion between Relaxation Modulus and Creep Compliance for Viscoelastic Solids”, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 76-82.
- Park, S.W, Kim Y.R. & Schapery R.A. (1996)** - “A Viscoelastic Continuum Damage Model and Its Application to Uniaxial Behavior of Asphalt Concrete”. Mechanics of Materials, Vol.

24, No. 4, pp. 241-255.

Raithby et al. (1972) - Raithby, K.D., Sterling, A.B., "Some Effects of Loading History on the Performance of Rolled Asphalt", TRRL-LR 496, Crowthorne, England, 1972.

Said (1998a) - Said, F. Safwat, "Validation of indirect tensile test for fatigue testing of bituminous mixes", VTI-notat 8, Swedish Road and Research Institute, Linköping, 1998.

Said, F. Safwat, "VTI-notat Nr. 38-1995, Bestämning av utmattningshållfasthet hos asfaltbetong genom pulserande pressdragprovning", VTI, Linköping, 1995.

Schapery R.A. & Park. S.W (1999) - "Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part II-an approximate analytical method". International Journal of Solids and Structures, Vol. 36, pp. 1677-1699.

Schapery, R.A. (1981) - "On Viscoelastic Deformation and Failure Behavior of Composite Materials with Distributed Flaws". Advances in Aerospace Structures and Materials, AD-01, ASME, New York, pp. 5-20.

Schapery, R.A. (1984) - "Correspondence principles and a generalized J-integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media". Int. J. Fract., Vol. 25, pp. 195-223.

Schapery, R.A. (1990) - "A Theory of Mechanical Behavior of Elastic Media with Growing Damage and Other Changes in Structure". J. Mech. Phys. Solids, 38, pp. 215-253.

Shell (1990) - Whiteoak, D., "The Shell Bitumen Handbook", Published by Shell Bitumen U.K., Riversdell House, Guildford Street, Chertsey, Surrey, KT16 9AU, England, 1990.

Si Z., Little D.N. and Lytton R.L. "Evaluation of Fatigue Healing Effect of Asphalt Concrete by Pseudo Stiffness", Paper submitted to the TRB at the 2002 Annual Meeting.

Sias Daniel, Jo. (2001). "Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic, Continuum Damage Model and Its Implementation to WesTrack Mixtures", Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, Department of Civil Engineering, Raleigh, North Carolina, 2001.

Ullidtz (1998) - "Modelling Flexible Pavement Response and Performance", Polyteknisk Forlag, Copenhagen, 1998

Van Dijk W., Moreaud H., Quedeveille A. and Uge P. "The Fatigue of Bitumen and Bituminous Mixes" Proceedings 3rd Int. Conf. on The Structural Design of Asphalt Pavements, 1972.

Verstraeten J., Veverka V. and Francken L. "Rational and Practical Design of Asphalt Pavements to Avoid Cracking and Rutting", Proceedings 5th Int. Conf. on The Structural Design of Asphalt Pavements, 1982.

Wiman (1996) - Wiman, Leif G. (red.), "Utmattningskriterier för asfaltbeläggningar", VTI-särtryck Nr. 259, Swedish Road and Research Institute, S-581 01 Linköping, Sweden, 1996.