

2004-05-10
Robert Lundström
NCC Roads AB
Bryggerivägen 13
19436 Upplands Väsby
Robert.a.lundstrom@ncc.se

Sammanfattning av doktorandprojekt ID: 11145

Utmattning av asfalt

KTH 2004

Sammanfattning

En av förutsättningarna för ett väl fungerande vägtransportsystem är upprättandet av effektiva dimensioneringsmetoder, inte minst adekvata materialkaraktäriseringsmetoder och materialmodeller. I detta avhandlingsarbete har sex asfaltmaterial undersökts vad gäller reologiska egenskaper. Materialen bestod av både omodifierade och polymermodifierad asfalt och provningen omfattade komplexmodul-, kryp, drag- och utmattningsförsök. Vid analysen har fundamentala reologiska metoder och begrepp använts. Nedbrytningen vid utmattnings- och dragprovning har modellerats med en viskoelastisk skademekanikmodell. I dag används reologiska metoder och begrepp i relativt begränsad omfattning men krävs sannolikt i framtiden då dimensioneringsmetoder kommer att baseras på mer avancerade och fundamentala principer, modeller och beräkningsprogram.

Resultaten från detta doktorandprojekt, som publicerats i ett flertal artiklar, en licentiat- och en doktorsavhandling, pekar på att reologisk materialprovning lämpligen kan genomföras med enaxiell provning. Kommunikation och samarbete med utländska forskare (t.ex. medverkan i RILEM TG3) har visat att denna provningsmetod är robust, har hög precision och ger pålitliga resultat jämfört med konkurrerande provningsmetoder. Från den materialrelaterade delen av undersökningen kan det konstateras att polymermodifiering har avsevärd inverkan på asfalts mekaniska egenskaper, vilket främst yttrar sig i högre styvhet vid höga temperaturer samt väsentligt ökad utmattningstidslängd jämfört med motsvarande omodifierade material. Det främsta syftet med ett doktorandprojekt är att producera en forskare; en person med vetenskaplig och pedagogisk förmåga, färdigheter som är nödvändig för att öka och sprida kunskap inom och utanför branschen.

| | | |
|-------|---|---|
| 1 | Introduktion och bakgrund | 4 |
| 1.1 | <i>Dimensionering av flexibla vägar</i> | 4 |
| 1.1.1 | Empiriska metoder | 4 |
| 1.1.2 | Semi-analytiska metoder | 4 |
| 1.1.3 | Dimensionering baserad på numeriska metoder | 5 |
| 1.2 | <i>Asfaltmaterial</i> | 5 |
| 2 | Syfte, genomförande och publikationer | 5 |
| 3 | Experimentellt arbete | 6 |
| 3.1 | <i>Provningsmetodik</i> | 6 |
| 3.2 | <i>Material</i> | 6 |
| 4 | Resultat | 7 |
| 4.1 | <i>Provningsutrustning</i> | 7 |
| 4.2 | <i>Linjär viskoelastisk karaktärisering</i> | 7 |
| 4.3 | <i>Olinjär viskoelastisk och utmattningskaraktärisering</i> | 7 |
| 5 | Projektets och resultatens övergripande tillämpningsområden | 8 |

1 Introduktion och bakgrund

Ett väl fungerande transportsystem är nödvändigt för ett samhälles utveckling. Under 1900-talet har det svenska vägnätet utsatts för ständigt ökade trafiklaster, både vad gäller vikt som volym. Utöver denna trafikbelastning uppskattar Vägverkets prognoser att bil- och lastbilstrafiken kommer att öka ytterligare under 1997-2010 med 30 respektive 40 %. Denna påtagliga trafikökning kräver både ökad trafikkapacitet, främst i storstadsregionerna, men även ökat behov av drift- och underhållsåtgärder av befintlig infrastruktur. För att kunna täcka nämnda behov är det inte endast finansiella resurser som krävs utan även ökad kunskap rörande dimensionering, materialegenskaper och nedbrytningsmekanismer.

I Sverige anses lågtemperatursprickor, ojämna tjällyft samt trafikrelaterad spår- och sprickbildning tillhöra de viktigaste nedbrytningsmekanismerna vid dimensionering av väganläggningar. Spårbildning uppstår om faktorer som materialkvalitet och lagertjocklekar är undermåliga. Ojämna tjällyft och efterföljande tjällossning kan allvarligt påverka åkkomfort och framkomlighet. Utmattningsskador, d.v.s. sprickbildning i vägbeläggningen orsakad av upprepad trafikbelastning har traditionellt relaterats till maximal dragtöjning i underkant asfaltlager. Om dessa dragtöjningar är tillräckligt stora kommer befintliga mikrosprickor och andra inhomogeniteter att kontinuerligt växa under trafikbelastningen för att slutligen utmyнна i strukturella sprickor. Med tiden kan hela väggroppens bärförmåga äventyras då asfaltlagrens lastfördelande förmåga väsentligt minskat. Sprickbildningen kan även innebära att regnvatten tränger ned i väggroppens obundna lager, vilket ytterligare påskyndar nedbrytningsprocessen.

1.1 Dimensionering av flexibla vägar

1.1.1 Empiriska metoder

Tidiga dimensioneringsmetoder baserades i princip helt på erfarenhet, ofta uppbyggd enbart från fältobservationer. En starkt bidragande orsak till den övervägande empiriska basen var det faktum att vägar är svåra att analysera med ingenjörsmässiga verktyg. Materialegenskaper, miljö- och trafikrelaterade belastningar är var för sig komplexa, men också inbördes beroende, varför omfattande forskning krävs för etablering av tillförlitliga samband. Dock är det mycket svårt att enbart utifrån fältobservationer förstå de komplexa samband som råder mellan olika fysiska mekanismer, t.ex. väggroppens nedbrytning orsakad av lagertjocklek och trafikvolym. Den mest påtagliga begränsningen hos fältobservationer är att resultaten enbart gäller för de objektsspecifika förutsättningarna, vilket innebär att det är omöjligt att dra några generella slutsatser.

1.1.2 Semi-analytiska metoder

Dagens vägdimensioneringsmetoder (bl.a. ATB VÄG) bygger normalt på s.k. semi-analytiska modeller, vilket innebär större tillit till fundamentala ingenjörsprinciper. Moderna dimensioneringsmodeller baseras i regel på s.k. multilagerteori, där olika materiallager idealiseras som linjärt elastiska. Vissa beräkningsprogram kan behandla mer avancerade och realistiska materialegenskaper, t.ex. olinjärt elastiskt eller linjärt viskoelastiskt beteende. En gemensam nämnare för dimensioneringsmetoder som bygger på multilagerteori är att den strukturella responssen från trafikbelastningen är helt separerad från väggroppens nedbrytning. Denna separation innebär att den, under vägens livslängd, kontinuerliga nedbrytningen av vägstrukturens bitumenbundna och obundna material inte uppdateras i strukturmodellen. I stället relateras väggroppens nedbrytning, orsakad av upprepade belastningar bl.a. spår- och sprickbildning, till laboratorieförsök genom s.k. skiffaktorer.

En vägs tekniska livslängd erhålls normalt genom laboratorieförsök, vilka förutsätts representera fältförhållanden. Exempelvis utförs utmattningsprovning genom att asfaltprovkroppar utsätts för cyklisk belastning (last- eller deformationsstyrd) vid olika belastningsamplitudet. Normalt utförs denna provning endast under en given temperatur och belastningsfrekvens. Provningsresultaten relateras därefter till, de enligt multilagermodellen, framräknade maximala påkänningarna.

De semi-analytiska metoderna erbjuder många fördelar framför de äldre erfarenhetsmetoderna men uppvisar ändå ett antal begränsningar. Bland de allvarligaste begränsningarna är svårigheter att realistiskt beskriva materialens successiva nedbrytning, exempelvis betydelsen av belastningshastighet och temperatur.

1.1.3 Dimensionering baserad på numeriska metoder

En tredje grupp av dimensioneringsmetoder har etablerats i takt med utvecklingen av allt effektivare datorer och analysmetoder. Dessa beräkningsmodeller bygger på s.k. numeriska metoder (t.ex. finita elementmetoden) och kan lösa komplexa problem genom att materialens konstitutiva (fundamentala material-) egenskaper direkt behandlas i en strukturmodell. Detta innebär att ett materials nedbrytning till följd av upprepade belastning, kan beräknas och att denna, i sin tur, återspeglas och kontinuerligt uppdateras i strukturmodellen. Numeriska beräkningsmetoder innebär sannolikt även att inverkan av temperatur- och trafikbelastning effektivare kan modelleras. En förutsättning för att effektivare dimensioneringsmetoder för vägar skall kunna utvecklas är dock att det finns användbara materialkaraktäriseringsmetoder och realistiska materialmodeller. Detta gäller inte minst för de bitumenbundna lagren.

1.2 Asfaltmaterial

Asfalt är ett kompositmaterial som i huvudsak består av stenmaterial och bitumen. Asfalts lämplighet som beläggningmaterial i vägsammanhang beror i hög grad på de olika delmaterialens kvalitet och sammansättning men också på massans tillverkningsprocess. I vissa fall kan beläggningsens egenskaper förbättras med tillsatsmedel, t.ex. polymerer eller vidhäftningsmedel. Asfalts mekaniska (reologiska) egenskaper kan beskrivas som viskoelastiska, vilket innebär starkt temperatur- och belastningshastighetsberoende. Andra kännetecken för asfalt är att det med tiden åldras (förstyvas och blir sprött), vilket kan leda till sprickbildning.

2 Syfte, genomförande och publikationer

För att i framtiden kunna dimensionera och bygga bättre vägar är det nödvändigt att ha god kännedom om asfalts mekaniska egenskaper, vilket ställer höga krav på modellering och metoder för materialkaraktärisering. Syftet med detta doktorandprojekt är att erhålla ökad kunskap rörande reologiskt beteende (inklusive utmattningsegenskaper) hos asfalt genom provning och modellering.

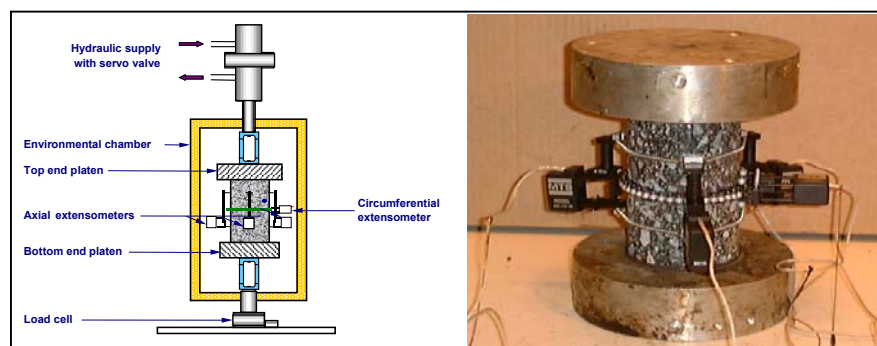
Under projektets första år (1999) utfördes en litteraturstudie som resulterade i en rapport på svenska [1]. Första halvan av det andra året (2000) spenderades hos Professor Hervé Di Benedetto vid ett universitet i Lyon, Frankrike. I april 2002 publicerades en licentiatavhandling [2]. Från arbete utfört i samband med denna licentiatavhandling publicerades under 2003 och 2004 totalt fyra artiklar [3, 4, 5, 6] i internationella tidskrifter med s.k. refereesystem. Den 16 mars 2004 framlades slutligen doktorsavhandlingen "On Rheological Testing and Modelling with Emphasis on Fatigue Characterisation." [7], ur vilken ytterligare tre artiklar publicerats [8, 9, 10]. Till nämnda publikationer kan även en konferensartikel läggas som behandlar utmattningsproblematiken ur ett europeiskt perspektiv [11].

3 Experimentellt arbete

3.1 Provningsmetodik

Runt om i världen finns ett antal laboriemetoder för karaktärisering av asfalts mekaniska egenskaper (t.ex. den svenska standardmetoden: Pressdragprovning). Den experimentella delen av detta doktorandprojekt har genomförts med s.k. direkt drag/tryckprovning (figur 1). Denna metod innebär att en cylindrisk provkropp utsätts för en axiell påkänning, antingen i drag eller i tryck, där belastningens storlek och hastighet i princip kan styras hur som helst.

Under projekt har i huvudsak fyra typer av provning genomförts; komplexmodulförsök, kryppförsök, drag- och utmattningsförsök. De två första oförstörande försöken syftar till att bestämma linjära viskoelastiska egenskaper hos asfaltmassorna (jämförbart med linjärt elastiska egenskaper hos tidsberoende material, t.ex. stål). Komplexmodul- och kryppprovning leder till styvhetsparametrar, t.ex. relaxationsmodul, $E(t)$, som kan användas för strukturell modellering av väggkroppar, men användas även för olinjär konstitutiv modellering (linjära styvhetsparametrar som $E(t)$ ingår normalt i olinjära styvhetsparametrar). Den oförstörande linjära provningen utfördes vid ett flertal temperaturer (-10, 0, 10, 20 och 30°C) och vid olika belastningshastigheter (0,1-40 Hz för komplexmodulförsök). Förstörande drag- och utmattningsprovning utfördes vid 0, 10 och 20°C. Dragprovningen utfördes, vid varje temperatur, med olika draghastigheter medan utmattningsprovningen utfördes med olika töjnings- och spänningssamplituder. Vid all provning mättes och styrdes töjningen utifrån medelvärdet av tre parallella trådtöjningsgivare (figur 1).



Figur 1. Schematisk bild över provningsutrustning.

3.2 Material

Materialen som undersöktes i projektet bestod av en laborietillverkad asfaltbetong (ABT 11) som tillverkades av sex olika bindemedel (totalt sex olika material). Tre av bindemedlen är s.k. penetrationsbitumen av klasserna 50/70, 70/100 och 160/220, alla från en och samma råoljekälla (Laguna, Venezuela). Förutom nämnda material har även tre polymermodifierade massor använts: 70/100M5, 160/220M5 och 160/220M10. Receptur och basbindemedel i de polymermodifierade massorna var desamma som för de omodifierade massorna. M står för modifierad och efterföljande siffror indikerar polymerinnehåll (viktprocent av bindemedel). Polymeren som användes var en linjär SBS (Styren-Butadien-Styren). Materialen packades till plattor med en laboriepackningsutrustning. Ur varje platta kunde 16 provkroppar ut-

vinnas genom borring. Totalt tillverkades fyra plattor av varje omodifierad massa och tre plattor av varje SBS-modifierad massa, d.v.s. totalt 21 plattor.

4 Resultat

4.1 Provningsutrustning

I allmänhet medför enaxiell provning tillförlitliga resultat vid alla belastningssätt och temperaturer som användes i denna studie (se avsnitt 3.1). Den använda utrustningen (MTS 810, Testware II) innebär att många typer av provning kan genomföras. Utrustningen möjliggör även kontinuerligt hög precision av töjnings- och spänningsmätningar under provningen. Av särskild betydelse, vid utmattningsprovning, är användningen av tre parallella trådtöjningsgivare (extensometrar), vilket innebär att utmattningsbrott kan identifieras när de tre givarna börjar visa stora deformationsskillnader (indikation på att en makroskopisk spricka uppstått).

4.2 Linjär viskoelastisk karaktärisering

Resultaten från komplexmodul- och krypförsök indikerar att bindemedelsstyvhet, temperatur- och belastningshastighet har stor inverkan på materialens styvhet, vilket innebär att dessa faktorer bör ingå i realistiska materialmodeller. Även polymerhalt har stor inverkan på asfaltens reologi, vilket främst yttrar sig som förbättrade högttemperaturegenskaper jämfört med motsvarande omodifierad asfalt. Betydelsen av SBS-inblandning indikeras av att asfaltmassan som tillverkats med 10% SBS uppvisar högre styvhet än massan med 5% SBS (jämför figur 2). Analytisk karaktärisering av asfalts linjärt viskoelastiska beteende kan med fördel beskrivas med en 10 elements s.k. Maxwellmodell.

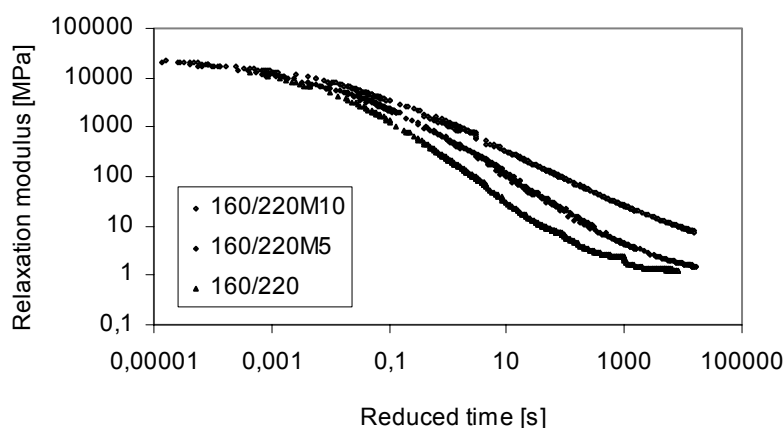
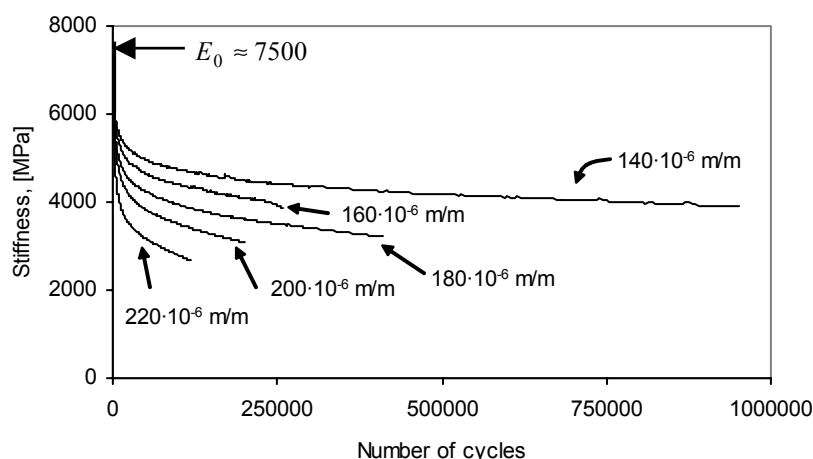


Figure 2. Relaxationsmodul för asfaltmassorna som innehåller bindemedlen: 160/220, 160/220M5 and 160/220M10.

4.3 Olinjär viskoelastisk och utmattningskaraktärisering

Figur 3 indikerar typiska utmattningsresultat vid kontrollerad töjningsprovning. I figuren kan man se att ju högre töjningsamplitud, desto snabbare nedbrytningsförlopp.



Figur 3. Utmattningskurvor för fem töjningsstyrda ($140, 160, 180, 200, 220 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$) försök (massa: 160/220M5 vid 10°C).

Utmattnings- och dragprovningresultaten (jämför avsnitt 3.1) analyserades med en viskoelastisk skademekanikmodell. Denna modell förklarar skadeuppkomst genom att asfaltens styvhet minskar till följd av mikrosprickbildning. Resultaten från utmattningsmodelleringen indikerar att materialnedbrytningen relativt väl kan beskrivas oberoende av provningstemperatur, belastningssätt (styrd töjning eller styrd spänning) och belastningamplitud. Liknande resultat erhöles för dragprovresultaten där effekter av töjningshastighet och provningstemperatur kan elimineras från skadeuppkomst under belastningen. Simuleringar av utmattningsförsök indikerar att utmattningsresultat kan predikteras med relativt hög precision. Däremot kunde det inte påvisas att utmattningsförsök kan predikteras enbart baserat på dragförsök, något som inte direkt är förvånande, då provningssätten ger upphov till stora skillnader i nedbrytningsprocessen. Ett exempel på skillnader mellan cyklisk utmattningsprovning och dragprovning är att den förra ger upphov till avsevärda termiska laster till följd av materialets viskoelastiska egenskaper. En annan väsentlig skillnad ligger i faktumet att cykliska försök sker både i drag och tryck till skillnad från rena dragförsök.

5 Projektets och resultatens övergripande tillämpningsområden

Resultaten från detta doktorandprojekt har visat att reologisk materialprovning lämpligen kan genomföras med enaxiell provning. Kommunikation och samarbete med utländska forskare (t.ex. medverkan i RILEM TG3) har visat att denna provningsmetod är robust, har hög precision och ger pålitliga resultat jämfört med konkurrerande provningsmetoder.

I avhandlingsarbetet har s.k. reologiska metoder och begrepp använts vid analysen av provningsresultaten (jämför avsnitt 3 och 4). Sådana metoder och begrepp används idag inte i någon större omfattning inom asfaltbranschen. Fundamental reologisk provning krävs i framtiden för att öka kunskapen om, och för att adekvat beskriva, asfalts viskoelastiska egenskaper. Framtidens dimensioneringsmetoder kommer sannolikt att baseras på mer avancerade och fundamentala principer, modeller och program. Det är därför av stor vikt att kunskapen om avancerad materialkaraktärisering ökas och sprids inom branschen.

Det främsta syftet med ett doktorandprojekt är att producera en forskare; en person med vetenskaplig och pedagogisk förmåga. Sådan kunskap är nödvändig för att öka och sprida kunskap inom och utanför branschen. Kunskapen också användas när nya forsknings- och utveck-

lingsprojekt skall genomföras. I sådana fall är det viktigt att utförande och resultat verkställs och publiceras på ett sådant sätt att både hög vetenskaplighet och kvalitet uppnås.

-
- [1] Lundström, R. "Utmattning av Asfalt – en Litteraturstudie." Kungl. Tekniska Högskolan, Avd. För Vägteknik, TRITA-IP AR 01-92. (2001).
 - [2] Lundstrom, R. "Rheological and Fatigue Characterisation of Asphalt Concrete Mixtures using Uniaxial Testing." Licentiatavhandling, Kungl. Tekniska Högskolan, Avd. för Vägteknik, TRITA.VT FR02:02, (2002).
 - [3] Lundstrom R, Isacsson, U. Ekblad, J. "Investigations of Stiffness and Fatigue Properties of Asphalt Mixtures." *Journal of Material Science* 38, pp 4941-4949 (2003).
 - [4] Lundstrom, R., Isacsson, U. (2003) "Asphalt Fatigue Modelling using Viscoelastic Continuum Damage Theory" *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 4 1/2003, pp 51-75 (2003).
 - [5] Lundstrom, R., Di Benedetto, H., Isacsson, U. "Influence of Asphalt Mixture Stiffness on Fatigue Failure." *In print: Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, (2003).
 - [6] Lundström, R. Isacsson, U. "Characterization of Asphalt Concrete Deterioration using Monotonic and Cyclic Tests." *The International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp 143-154. (2003).
 - [7] Lundstrom, R. "On Rheological Testing and Modelling with Emphasis on Fatigue Characterisation." Doktorsavhandling, Kungl. Tekniska Högskolan, Avd. för Vägteknik, TRITA-VT 04:02, (2004).
 - [8] Lundstrom, R. Isacsson, U. "Linear Viscoelastic and Fatigue Characteristics of SBS Modified Asphalt Mixtures" *In print: Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, (2004).
 - [9] Lundstrom, R. Isacsson, U. "An Investigation of the Applicability of Schapery's Work Potential Model for Characterization of Asphalt Fatigue Behavior." Presented at the annual AAPT meeting Baton Rouge, USA 7-10 Mars, (2004).
 - [10] Lundstrom, R., Ekblad, J. Isacsson, U. "An Investigation of the Influence of Hysteretic Heating on Asphalt Fatigue Characterisation." *In print: Journal of Testing and Evaluation (ASTM)*, (2004).
 - [11] Di Benedetto, H., de La Roche, C., Baaj, H. Pronk, A., Lundstrom, R. "Fatigue of Bituminous Mixtures: Different Approaches and RILEM Group Contribution." *Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Proceedings of the PTEBM'03 conference in Zurich (ed. M. Partl)*, (2003).