

# UTVÄRDERING AV MEKANISKA EGENSKAPER FÖR STABILISERAT MATERIAL

**Richard Nilsson och Per Lindh**

**2022-11-02**

# FÖRORD

Projektet har initierats av PEAB och finansierats av SBUF, Cementa, Trafikverket samt genom egeninsats. I styr- och referensgrupperna har det funnits representanter från PEAB, Skanska, Cementa/Merox, Trafikverket, VTI och LTH. Författarna riktar ett stort tack till finansiärernas ekonomiska stöd samt stödet från referensgruppen.

Malmö november 2022.

# SAMMANFATTNING

Stabiliseringstekniken har i och med funktionsentreprenader/totalentreprenader fått en ny renässans i Sverige. Tekniken har stor utbredning i övriga Europa. Även i Sverige har stabiliseringstekniken använts, men det har inte funnits något bra verktyg för att bedöma det stabiliserade skiktets mekaniska egenskaper ur ett livslängdsperspektiv. För att utveckla metodens hela potential behövs en modell för bedömning av det stabiliserade skiktets nedbrytning med avseende på utmattning. En sådan modell är mycket viktig för att metodiken ska kunna användas i samband med analytisk dimensionering.

Sedan projektet initierades har fokus i samhällsdebatten till stor del flyttats från de mekaniska egenskaperna hos ingående material till hur klimatbelastningen ser ut. Att ingående material som används har låg initial CO<sub>2</sub>-belastning spelar allt större roll idag då olika konstruktionsval utvärderas. Å andra sidan finns även ett stort fokus på masshantering, bland annat att exempelvis förädla material i linjen eller återanvända material för att minimera transporter och användning av jungfruliga material. Att tillsätta kalk, cement, merit, flygaska etcetera i olika kombinationer är en metodik för att nå dessa mål. Då krävs återigen någon form av nedbrytningsmodell. I dagsläget används LCC och LCA i begränsad omfattning. Detta är nödvändigt för att kunna jämföra olika konstruktioner och materialvals totala klimatbelastning.

Utvecklingen inom bindemedelsområdet innebär nya cementtyper med låga CO<sub>2</sub> utsläpp, till exempel, belite calcium sulfoaluminat cement (BCSA) kan användas även för stabiliseringsprojekt kan detta ge stora fördelar för tekniken.

En mängd mekaniska egenskaper för stabiliserat material har bestämts i projektet. Hållfasthet (drag- och tryckhållfasthet), styvhetsmodul och utmattningsegenskaper har bestämts och jämförts med resultat från litteraturen. En inkrementell-rekursiv beräkningsmetodik, som kan beskriva den gradvisa nedbrytningen av materialet, har applicerats på utmattningsdata för stabiliserat bärlager för att demonstrera möjligheterna med metodiken.

När projektet initierades listades en rad frågeställningar som förhoppningsvis skulle kunna besvaras. Frågeställningarna var följande:

1. Vilken dimensioneringsmetodik ska användas för att dimensionera en vägöverbyggnad där ett stabiliserat material ingår ("*break-down-limit*", utmattningskriterie, inkrementell-rekursiv beräkningsmetodik, annan metodik)?
2. Behöver cyklisk nedbrytning beaktas för ett stabiliserat terrassmaterial?
3. Behöver cyklisk nedbrytning beaktas för ett stabiliserat bärlager, dvs. högre upp i överbyggnaden, där asfaltbeläggningen läggs direkt på det stabiliserade lagret?
4. Hur säkerställs att inga reflektionssprickor uppstår i asfalten (gäller fallet med ett stabiliserat bärlager)?
5. Vilken styvhetsmodul ska ansättas vid dimensioneringen och hur påverkas den under vägens livslängd?

Svar på ovanstående frågeställningar:

1. Utmattningsförsöken som körts i detta projekt visar att en gradvis nedbrytning sker i materialen då de utsätts för en cykliskt återkommande last. En ansats har gjorts att utvärdera om det finns en "*break-down-limit*" för de testade materialen. Resultaten indikerar att tumregeln 40-60 % av skiktets hållfasthet kan vara något för hög. Ett förslag på reviderat intervall kan i stället vara ca 30-40 % av skiktets hållfasthet (drag), vilket

givetvis måste verifieras ytterligare. Vid dimensionering rekommenderas därför att som en första ansats använda någon form av utmattningskriterie. I modern vägdimensioneringsmetodik (ex. MMOPP, CalMe) tillämpas däremot vanligtvis en inkrementell-rekursiv beräkningsmetodik, som kan beskriva den gradvisa nedbrytningen av vägen på samma sätt som sker i fält. Om möjligt bör därför denna metodik användas.

2. Svaret beror på hur stora spänningsnivåerna är i det stabiliserade terrassmaterialet. Används stabilisering i syfte att optimera den ovanliggande obundna lagertjockleken, dvs. tunna ner, kommer det sannolikt att resultera i relativt höga påkänningar i det stabiliserade terrassmaterial och i förlängningen nedbrytning. Används stabilisering enbart i syfte att exempelvis förbättra hanterbarheten för massorna för att sedan använda en konventionell obunden överbyggnadstjocklek borde påkänningarna i det stabiliserade lagret vara förhållandevis små. I detta fall kan eventuellt nedbrytningen försummas. I alla fall bör alltid en noggrann analys av påkänningarna i överbyggnaden göras.
3. Ja, se svar under punkt 1. Lagret ligger direkt under asfaltlagret och kommer därför att utsättas för förhållandevis höga spännings- och töjningsnivåer. Hur stora dessa påkänningar blir beror bl.a. på receptorering, trafiklast, överbyggnadens uppbyggnad osv. och måste därför utvärderas i varje enskilt fall.
4. Problematiken har inte fokuserats på i denna studie. Det finns dock mycket skrivet om ämnesområdet i litteraturen. Risker måste utan tvekan hanteras annars är sannolikheten stor att kostsamma underhållsåtgärder (spricklagning) måste utföras med jämna mellanrum under hela vägens återstående livslängd för att undvika accelererad nedbrytning.
5. Förslagsvis används en styvhetsmodul bestämd på ett oskadat material i kombination med ett utmattningskriterie eller en inkrementell-rekursiv beräkningsmetodik, som kan beskriva den gradvisa nedbrytningen av materialet. Bestämningen av styvhetsmodul bör göras efter en specificerad tid, exempelvis 28 dygn eller då tillväxttakten avstannat. Bestämningarna av styvhetsmodul i denna studie har visat att en mängd metoder och provkroppsgeometrier kan användas och att resultaten i de flesta fall blev relativt samstämmiga. Om enbart en metod ska rekommenderas blir det seismik. Metoden är snabb och robust och ingen speciell provberedning behöver genomföras.

# INNEHÅLL

<b>INLEDNING .....</b>	<b>5</b>
BAKGRUND OCH PROBLEMFORMULERING .....	5
SYFTE OCH MÅL .....	6
HITTILLS UPPNÅDDA RESULTAT .....	6
<b>METOD OCH MATERIAL.....</b>	<b>8</b>
MATERIAL.....	8
ARBETSGÅNG .....	8
SAMMANSÄTTNING, BINDEMEDELSHALT OCH DENSITET .....	9
HÅLLFASTHET .....	9
STYVHETSMODUL, INDIRECT TENSILE MODULUS (PRESSDRAGPROVNING) .....	9
STYVHETSMODUL, ENAXIELLA TRYCKFÖRSÖK .....	10
STYVHET MÄTT MED SEISMISK MÄTMETOD .....	10
UTMATTNING.....	11
<b>RESULTAT OCH DISKUSSION.....</b>	<b>15</b>
HÅLLFASTHET .....	15
STYVHETSMODUL .....	17
UTMATTNING.....	19
<b>SLUTSATSER OCH FORTSATT ARBETE .....</b>	<b>25</b>
SLUTSATSER .....	25
FORTSATT ARBETE.....	26
<b>REFERENSER .....</b>	<b>27</b>

# INLEDNING

## Bakgrund och problemformulering

Stabiliseringstekniken innebär att jordens egenskaper förändras med hjälp av bindemedelsinblandning (kemisk stabilisering) eller inblandning av inerta material (mekanisk stabilisering). Stabilisering med bindemedel kan delas in i underkategorier;

- Djupstabilisering (även kallad KC stabilisering)
- Ytstabilisering
- Masstabilisering (även kallad block- eller cellstabilisering)
- Processtabilisering (stabilisering av muddermassor)

Denna rapport avgränsas till att gälla ytstabilisering. Här kan både kompetent material som bärlager stabiliseras där det finns krav på hög hållfasthet och hög styvhet men också en stor potential att stabilisera otjänliga jordar med låg bärighet kan stabiliseras för att användas i väg- och järnvägsbankar.

I rådande kravdokument SS-EN 16907-4 Schakt och fyllning för anläggningsbyggande - Del 4: Jordbehandling med kalk och/eller hydrauliska bindemedel och tillämpliga delar av SS-EN 13286 finns ingen metodik för att bedöma nedbrytning av stabiliserat material. Stabiliserat material kan i huvudsak brytas ner via frys och tö cykler samt mekanisk påverkan från belastning eller en kombination av dessa två mekanismer. Denna rapport avgränsas till att gälla endast mekanisk nedbrytning.

Stabiliseringstekniken har i och med funktionsentreprenader/totalentreprenader fått en ny renässans i Sverige. Tekniken har en stor utbredning i övriga Europa. Exempelvis driver STRABAG ett konsortium Kliplew Motorway Group (KMG) som bygger 26 km motorväg (PPP) i Danmark där KMG svarar för driften i 26 år. I detta projekt används stabilisering både i terrassen och i överbyggnaden. Anledningen till att KMG valde stabilisering var dels tidsaspekterna och driftskostnader för projektet. STRABAG har en lång erfarenhet med att bygga vägkonstruktioner där stabilisering är en viktig del av överbyggnaden. Liten tillgång till högkvalitativt bergmaterial, som kan krossas ner till överbyggnadsmaterial, kan även ha påverkat vilken konstruktion som valdes.

Även i Sverige har stabiliseringstekniken använts, men det har inte funnits något bra verktyg för att bedöma det stabiliserade skiktets mekaniska egenskaper ur ett livslängdsperspektiv. För att utveckla metodens hela potential behövs en modell för bedömning av det stabiliserade skiktets nedbrytning med avseende på utmattning. En sådan modell är mycket viktig för att metodiken ska kunna användas i samband med analytisk dimensionering. I dagsläget antas att ingen nedbrytning sker om spänningsnivåerna ligger under 50 % av materialets tryckhållfasthet. Dessvärre är detta inte närmare undersökt. I samband med standardiseringsarbeten inom TC396 "Earthworks" har där framkommit att flera av de ledande stabiliseringsentreprenörerna bygger sina modeller på erfarenhet. Denna erfarenhet betraktas som en företagshemlighet och sprids därför inte utanför företaget. Detta medför ingen utveckling av metoden. I samband med byggnationen av MAX IV i Lund användes stabilisering för att säkerställa konstruktionens dynamiska egenskaper. Detta innebar ett mycket bra tillfälle att erhålla material som stabiliseras i fält. Vidare har tre vägetapper på väg E22 stabiliserats och uppföljning av dessa etapper har visat på ett bra resultat vad gäller spårbildning.

Sedan projektet initierades har fokus i samhällsdebatten till stor del flyttats från de mekaniska egenskaperna hos ingående material till hur klimatbelastningen ser ut. Att ingående material som används har låg initial CO<sub>2</sub>-belastning spelar allt större roll idag då olika konstruktionsval utvärderas. Å andra sidan finns även ett stort fokus på masshantering, bland annat att exempelvis förädla material i linjen eller återanvända material för att minimera transporter och användning av jungfruliga material. Att tillsätta kalk, cement, merit, flygaska etcetera i olika kombinationer är en metodik för att nå dessa mål. Då krävs återigen någon form av nedbrytningsmodell. I dagsläget används LCC och LCA i begränsad omfattning. Detta är nödvändigt för att kunna jämföra olika konstruktioner och materialvals totala klimatbelastning. I rapporten HÖGHASTIGHETSJÄRNVÄG - FÖRSTUDIE BANKFYLLNING LCA/LCC-PERSPEKTIV har Tyréns (Anon, 2021a) på uppdrag av Trafikverket jämfört olika alternativ och en stabiliserad bank står sig väl i jämförelse med en traditionell bankuppbyggnad.

Utvecklingen inom bindemedelsområdet innebär nya cementtyper med låga CO<sub>2</sub> utsläpp, till exempel, belite calcium sulfoaluminat cement (BCSA) kan användas även för stabiliseringsprojekt kan detta ge stora fördelar för tekniken.

## Syfte och mål

Syfte med projektet är att bestämma ”*break down limit*” för stabiliserat material. Med detta menas i vilka spänningsintervall kan materialet belastas utan att nedbrytningsprocessen på grund av belastning uppstår. Vidare bestäms materialets nedbrytningsfunktion för olika spänningsnivåer över ”*break down limit*”. Målet är en generell materialekvation som kan beskriva den dynamiska nedbrytningen hos olika typer av stabiliserad jord. Tanken är att denna ekvation skall vara generell för ytstabilisering i hela anläggningsbranschen.

Frågeställningar som skall försöka besvaras:

- Vilken dimensioneringsmetodik ska användas för att dimensionera en vägöverbyggnad där ett stabiliserat material ingår (”*break-down-limit*”, utmattningskriterie, inkrementell-rekursiv beräkningsmetodik, annan metodik)?
- Behöver cyklisk nedbrytning beaktas för ett stabiliserat terrassmaterial?
- Behöver cyklisk nedbrytning beaktas för ett stabiliserat bärlager, dvs. högre upp i överbyggnaden, där asfaltbeläggningen läggs direkt på det stabiliserade lagret?
- Hur säkerställs att inga reflektionssprickor uppstår i asfalten (gäller fallet med ett stabiliserat bärlager)?
- Vilken styvhetsmodul ska ansättas vid dimensioneringen och hur påverkas den under vägens livslängd?

## Hittills uppnådda resultat

I dagsläget anses att ingen nedbrytning av det stabiliserade materialet sker då den cykliska lasten maximalt uppgår till ca 40-60 % av skiktets hållfasthet. Detta antagande är inte verifierat genom provning.

Trots att ytstabilisering har använts i Sverige sedan 60 –talet finns en begränsad erfarenhet av utmattning hos stabiliserade konstruktioner i Sverige. Detta innebär att inga kända provresultat finns för att bestämma utmattningsparametrarna  $k$  och  $n$  för olika inblandningsrecept. Inte heller finns kunskap om den skiftfaktor som skall användas för att representera skillnaden mellan laboratoriet och fältförhållanden. Denna information måste byggas upp via laboratorieförsök och uppföljning av verkliga ytstabiliserade vägar och järnvägar. För järnväg finns behov av stabiliserat material i övergångskonstruktioner för att minska underhållsbehovet.





## METOD OCH MATERIAL

### Material

Tre olika jordar har ingått i studien. Dels ett krossmaterial 0-18 mm, dels två finkorniga moräner. Valet av fraktionen 0-18 på bärlagret beror på att inte få för stora korn i förhållande till provcylindrarnas diameter på ca 100 mm. Totalt åtgår ca 30 provkroppar per materialtyp för att kunna utvärdera de mekaniska egenskaperna på ett statistiskt säkert sätt. Proverna med krossmaterial har tillverkats och packats i laboratorium. För den finkorniga moränen har material som stabiliseras in situ (MAX IV i Lund) transporterats till Peabs fältlab i Lund för inpackning. Inpackningen skedde till samma densitet som erhöles i fält. Proverna lagrades tills sluthållfasthet erhöles. Då bindemedlet bestod av både cement och slagg valdes en längre referensålder än vad som är brukligt för betong. Referensålder för betong väljs oftast till 28 dygn men här användes en referensålder > 60 dygn. Försöken har sedan utförts både på Peabs laboratorium i Helsingborg på Skanskas laboratorium i Malmö (Fosie).

### Arbetsgång

#### **Inpackning av provkroppar**

Provkropparna packades in i laboratoriet enligt vibropackningsmetoden (Lindh, 2004). Metoden innebär att provkropparna behåller de packningsinducerade spänningarna under hela lagringstiden. Metoden finns även beskriven i SBUF Rapport 12141.

#### **Enaxiella tryckförsök för bestämning av styvhetsmodul och tryckhållfasthet**

1. Seismik för att bestämma styvhetsmodulen (oförstörande).
2. Cykliska försök vid låga spänningsnivåer för att bestämma styvhetsmodulen (oförstörande). OBS! Endast utfört i mycket begränsad omfattning.
3. Seismik för att kontrollera att provkroppen inte skadats vid de cykliska försöken (oförstörande).
4. Tryckförsök för att bestämma materialets tryckhållfasthet (förstörande) SS-EN 13286-41.

#### **Indirect Tensile Test (IDT) även kallad pressdragprovning**

1. Bestämning av styvhetsmodulen (oförstörande).
2. Bestämning av materialets indirekta draghållfasthet (förstörande) SS-EN 13286-42. OBS! Endast utfört i mycket begränsad omfattning.

#### **Utmattning**

1. Bestämning av utmattningsegenskaperna med en enaxiell försöksupställning, ett s.k. push-pull-försök där en sinusformad last cyklas genom nollan (förstörande). OBS! Ej genomfört.
2. Bestämning av utmattningsegenskaperna med hjälp av pressdragprovning (förstörande).

I Sverige bestäms vanligtvis utmattningsegenskaperna för en asfaltbeläggning med hjälp av pressdragprovning enligt VTI-notat Nr. 38-1995. Det är även denna metod som står inskriven i Trafikverkets normer (TRVK Väg, kapitel 7.1.8). Metoden finns även beskriven i SS-EN 12697-24:2004, del 24: Utmattningsmotstånd (Annex E). För att vid behov kunna jämföra utmattningsegenskaperna för ett stabiliserat material med utmattningsegenskaperna för en asfaltbeläggning har därför den standardiserade metoden använts i detta projekt.

Som ett komplement till pressdragprovningen föreslås även att enaxiella utmattningsförsök utförs, s.k. push-pull-försök, där en sinusformad last cyklas genom nollan. Metoden är inte en standardiserad EU-metod men används mycket för forskningsändamål eftersom

försöksuppställning samt tolkning av resultaten är relativt enkel och ”ren”. Dessa försök har dock inte genomförts.

## Sammansättning, bindemedelshalt och densitet

I Tabell 1 redovisas materialegenskaper för testade material. Vissa av uppgifterna är osäkra eller saknas. Bindemedlen som användes var cement (anläggningscement, Cementa), kalk samt Merit 5000 från Merox. Inblandningsmängder och blandningsförhållande redovisas i Tabell 1.

**Tabell 1** Materialegenskaper för testade material

Materialtyp	Bindemedelshalt (%)	Skrymdensitet (kg/m <sup>3</sup> )	Vattenkvot (%)
BL, 0-18 mm, 2 % (cement + merit)	2,0	2178	6,4
BL, 0-18 mm, 4 % (cement + merit)	4,0	2229	5,8
Terrass, LeMn, ca 4,5 % (50 % kalk + 50 % merit)	Ca 4,5	1912	Ca 17-19
Terrass, saSi, ca 4,0 % (80% cement + 20% merit)	Ca 4,0	2104	Saknas

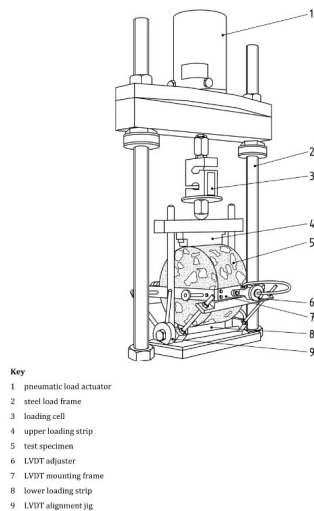
## Hållfasthet

Bestämning av tryckhållfasthet har skett enligt SS-EN 13286-41: ”Provningsmetod för bestämning av tryckhållfastheten för hydrauliskt bundna material”. I internationell litteratur betecknas tryckhållfastheten som unconfined compressive strength (UCS eller  $R_c$ ).

Bestämning av indirekt draghållfasthet har skett enligt SS-EN 13286-42: ”Provningsmetod för bestämning av indirekt draghållfastheten för hydrauliskt bundna material”. I internationell litteratur betecknas den indirekta draghållfastheten ( $R_{it}$ ).

## Styvhetsmodul, Indirect Tensile Modulus (Pressdragprovning)

Styvhetsmodulen har bestämts enligt SS-EN 12697-26 Vägmaterial – Asfaltmassor – Provningsmetoder – Del 26: Styvhet (Annex C). I Figur 1 visas ett exempel på försöksuppställning som används vid bestämning av styvhetsmodul.



**Figur 1 Exempel på försöksupställning (Källa: SS-EN 12697-26)**

## Styvhetsmodul, enaxiella tryckförsök

Som ett alternativ till att bestämma styvhetsmodulen med pressdragprovning har även testats att använda cylindriska provkroppar med dimensionen ca  $\text{Ø}100 \times 200$  mm. Provkropparna har belastats med en haversineformad lastpuls (tryckpåkänning) från 25 Hz till 0,01 Hz. I toppen och botten av provkroppen har ett dubbelt gummimembran innehållande silikonfett applicerats för att säkerställa friktionsfria förhållanden. I Figur 2 visas ett exempel på försöksupställning som användes.



**Figur 2 Exempel på enaxiell försöksupställning (Foto: B.R Nilsson)**

## Styvhet mätt med seismisk mätmetod

Ett utkast till metodbeskrivning för bestämning av dynamisk styvhetsmodul på cylindriska provkroppar genom resonansfrekvensmätning har tagits fram av Nils Rydén, docent på avdelningen Teknisk Geologi på LTH. Kortfattat mäts ljudets gånghastighet i materialet med hjälp

av en accelerometer, se exempel i Figur 3. Om provkropparnas geometri och densitet är känd är det möjligt att bestämma materialets styvhetsmodul. För detaljer hänvisas till Rydén (2004).

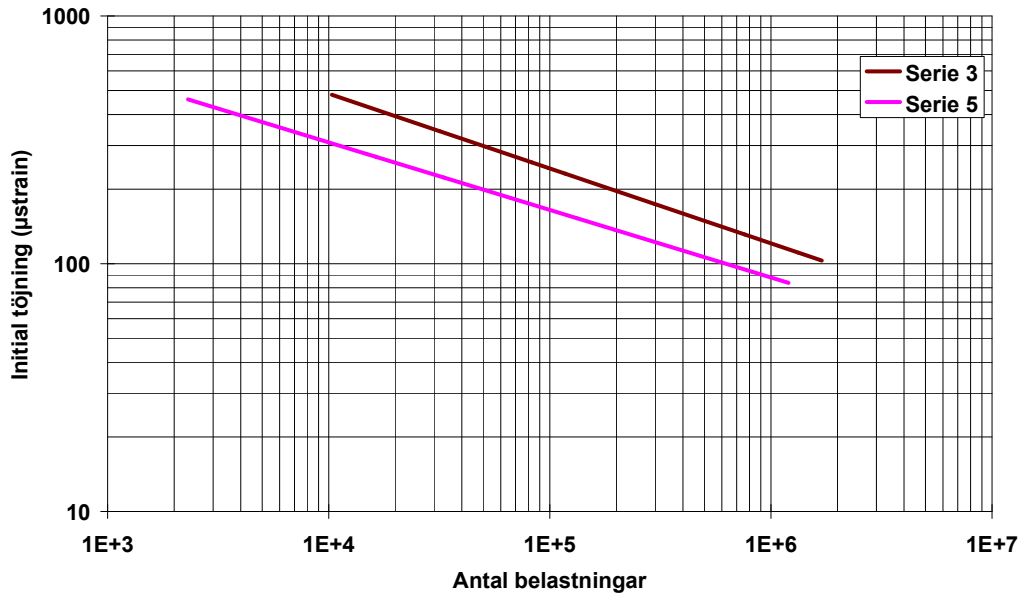


Figur 3 Exempel på försökupställning seismisk mätmetod (Foto: B.R. Nilsson)

## Utmattning

En beläggnings utmattningsegenskaper kan bestämmas med många metoder, exempelvis pressdragprovning, balkar (3- eller 4-punkt), enaxiella försök, prismor etc. I Trafikverkets normer (TRVK VÄG, kapitel 7.1.8.4) anges att VTI-metoden beskriven i VTI-notat Nr. 38-1995 ska användas för att bestämma utmattningsegenskaperna då det finns uppställda funktionskrav. Bestämningen kan ske på bundet bärlager, bindlager samt slitlager. Vanligast är dock att det är det bundna bärlagret som utvärderas med avseende på utmattning eftersom det är utmattningsegenskaperna för detta lager som styr vägens livslängd enligt den dimensioneringsmetodik som används i Sverige. Av denna anledning har därför VTI-metoden använts i detta projekt. Det bör påpekas att SS-EN 12697-24, Annex E bygger på VTI-metoden.

En cylinderformad provkropp utsätts för en vertikal periodisk återkommande last tills ett dragbrott inträffar (spänningskontrollerat försök). Den horisontella deformationen registreras under försökets gång. Töjningen och/eller spänningen beräknas och antalet lastcykler till brott bestäms. Med brott menas i detta fall antalet lastcykler som krävs för att en tydlig spricka ska uppstå på provets ändytor. Resultaten från utmattningsförsöken beskrivs matematiskt enligt ekvation (1). Oftast redovisas resultaten även grafiskt som ett linjärt samband mellan initial töjning och antalet lastcykler till brott i ett log-log-diagram, ett s.k. Wöhler-diagram, se exempeldiagram i Figur 4.



Figur 4 Exempel på Wöhler-diagram

$$N_f = K \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^n \quad (1)$$

där  
 $N_f$  = antal lastcykler till brott  
 $\varepsilon$  = initial töjning (µstrain)  
 $K, n$  = 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), en s.k. "Fatigue Law".

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

där  
 $\varepsilon_k$  = kritisk initial töjning vid en bestämd livslängd,  $N_f$  (µstrain).  
 $N_f$  = livslängd vid den initiala töjningen,  $\varepsilon_k$   
 $K'$  =  $10^{\left[\frac{\log K - 6}{n}\right]}$  (motsvarar den kritiska töjningen vid 1 miljon belastningar)  
 $a$  =  $-1/n$   
 $K, n$  = regressionskonstanter enligt ovan.

Precis som i fallet med styvhetsmodulsbestämningen kan både laborietillverkade provkroppar och borrkärnor från fältet testas. Provkropparna bör ha en tjocklek på minst 40 mm (idealt 60 mm) och en diameter på 100 mm vid 25 mm maximal stenstorlek samt en tjocklek på 76 mm och

diametern 150 mm vid maximal stenstorlek lika med 38 mm. Enligt metoden krävs 12-18 provkroppar för att utvärdera utmattningsegenskaperna för en beläggningstyp.

Vanligtvis testas utmattningsegenskaperna för en asfaltbeläggning vid 10°C med en belastningstid på 0.1 sekunder följt av en viloperiod på 0.4 sekunder. Testerna bör utföras vid töjningsnivåer mellan 100 och 400  $\mu$ strain. Används töjningsnivåer under 100  $\mu$ strain blir livslängden oftast mycket lång, vilket är tidsödande och har inte så stor nytta i praktiken. Om töjningsnivåer över 400  $\mu$ strain används blir livslängden kort och därmed kan utmattningsprocessen ifrågasättas. Livslängden bör inte ligga under 1000 belastningar.

Då ett stabiliserat material inte är temperaturkänsligt på samma sätt som en asfaltbeläggning utfördes utmattningsförsöken vid 20°C, dvs ungefär rumstemperatur för att inte behöva fokusera på temperering av provkropparna.

I moderna vägdimensioneringsprogram, exempelvis MMOPP, *Mathematical Model of Pavement Performance* (Danmark) och CalMe (Kalifornien, USA), tillämpas en modell som beskriver den gradvisa nedbrytningen av vägen. Beräkningsmetodik brukar kallas inkrementell-rekursiv beräkningsmetodik. Utvecklingen av lagrets styvhetsmodul (E-modul) beskrivs över ett antal lastcykler som funktion av lagrets kritiska reaktion på aktuell last, den nuvarande styvhetsmodulen och den initiala styvhetsmodulen, dvs. för ett oskadat material.

I DRI Report 138 (2004) beskrivs de bakomliggande teorierna för den nedbrytningsmodell avseende stabiliserat material som används i MMOPP. I Nilsson, B.R (2003) har samma teorier, dvs. ”*continuum damage mechanics*”, applicerats på asfaltbeläggningar.

I DRI Report 138 (2004) beskrivs den slutliga modellen enligt följande:

$$\omega = \left( \frac{N}{10^6} \right)^\alpha \times \left( \frac{\varepsilon_{horizontal}}{\varepsilon_{ref}} \right)^\beta \times (1 - \omega)^\gamma \quad (3)$$

där

$\omega$  = skadeparameter som beskriver nedbrytning (0 = helt oskadat material)

$N$  = antalet lastrepetitioner

$\varepsilon$  = töjning ( $\mu$ strain)

$\alpha$ ,  $\beta$  och  $\gamma$  = dimensionslösa konstanter.

Följande samband för konstanterna har redovisats:

$$\alpha = 0,280$$

$$\beta = 0,50 + 1,00 \times (E_{initial}/10000 \text{ MPa})$$

$$\gamma = 0,15 + 0,90 \times (E_{initial}/10000 \text{ MPa})$$

$$\varepsilon_0 = 45 \text{ (}\mu\text{strain)}$$

Sammanfattas resultaten som redovisas i MMOPP 2017 resulterar det i dimensioneringskriterierna enligt Tabell 2. I MMOPP 2013 redovisas något annorlunda samband, se Tabell 3 men det bedöms vara endast mindre justeringar som gjorts i den senare utgåvan.

Tabell 2 Dimensioneringskriterier för hydrauliskt bundna material enligt danska normer (MMOPP 2017)

Materiale	Styrkeklasse (MPa)	E <sub>INIT</sub> (MPa)	E <sub>TERM</sub> (MPa)	Dimensioneringskriterier
HBB-A	C <sub>5/6</sub>	7.500	1.500	$\epsilon_h = -0,000048 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,201}$
HBB-A	C <sub>6/8</sub>	9.000	1.500	$\epsilon_h = -0,000060 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,180}$
HBB-A	C <sub>8/10</sub>	12.000	1.500	$\epsilon_h = -0,000086 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,148}$
HBB-B	C <sub>5/6</sub>	11.800	2.000	$\epsilon_h = -0,000066 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,149}$
HBB-B	C <sub>6/8</sub>	13.000	2.000	$\epsilon_h = -0,000075 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,139}$
HBB-B	C <sub>8/10</sub>	15.000	2.000	$\epsilon_h = -0,000090 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,125}$
HBB-B	C <sub>9/12</sub>	15.900	2.000	$\epsilon_h = -0,000098 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,119}$
HBB-B	C <sub>12/16</sub>	18.300	2.000	$\epsilon_h = -0,000118 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,107}$
HBB-B	C <sub>15/20</sub>	20.500	2.000	$\epsilon_h = -0,000137 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,098}$
HBB-B	C <sub>18/24</sub>	22.500	2.000	$\epsilon_h = -0,000156 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,090}$
HBB-B	C <sub>21/28</sub>	24.300	2.000	$\epsilon_h = -0,000173 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,085}$

Tabell 3 Dimensioneringskriterier för hydrauliskt bundna material enligt danska normer (MMOPP 2013)

Mate-riale	Styrkeklasse (MPa)	E <sub>INIT</sub> (MPa)	E <sub>TERM</sub> (MPa)	Kriterieligning
HBB-A	C <sub>5/6</sub>	7.500	1.500	$\epsilon_h = -0,000048 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,201}$
HBB-A	C <sub>6/8</sub>	9.600	1.500	$\epsilon_h = -0,000060 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,180}$
HBB-A	C <sub>8/10</sub>	12.000	1.500	$\epsilon_h = -0,000086 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,148}$
HBB-B	C <sub>5/6</sub>	11.800	2.000	$\epsilon_h = -0,000066 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,149}$
HBB-B	C <sub>6/8</sub>	13.000	2.000	$\epsilon_h = -0,000075 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,139}$
HBB-B	C <sub>8/10</sub>	15.000	2.000	$\epsilon_h = -0,000090 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,125}$
HBB-B	C <sub>12/15</sub>	18.000	2.000	$\epsilon_h = -0,000118 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,107}$
HBB-B	C <sub>16/20</sub>	21.200	2.000	$\epsilon_h = -0,000144 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,095}$
HBB-B	C <sub>20/25</sub>	23.700	2.000	$\epsilon_h = -0,000167 \times (N_{E10}/10^6)^{-0,086}$



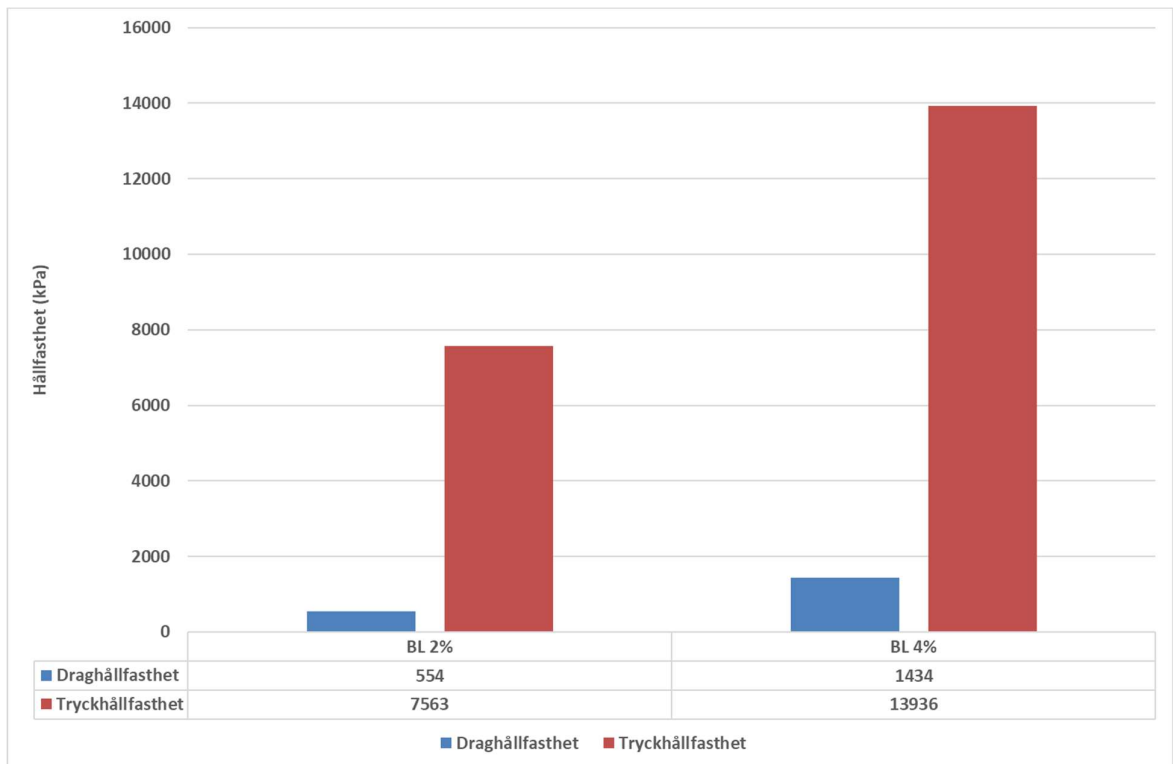
## RESULTAT OCH DISKUSSION

I detta kapitel kommer fokus huvudsakligen att ligga på redovisning av resultat för stabiliserat bärlager. Vid bestämningen av styvhetsmodulen samt utmattningsegenskaperna för LeMn samt siSa konstaterades stora spridningar i resultat mellan olika provkroppar. För det stabiliserade bärlagret var spridningarna betydligt mindre. Det misstänktes därför att de testade provkropparna för LeMn och siSa inte vara representativa för dessa båda material. En sannolik teori som diskuterades var att efter avformning och provberedning (kapning, mätning, limning av givarhållare etc.) fanns en tendens att provkropparna torkade ut och viss yttlig sprickbildning kunde observerades på provkropparnas ytor. Detta fenomen var särskilt uttalat för LeMn där lerfraktionen genererar mer krympsprickor jämfört med siSa. När materialet fanns i inpackningsformen (PVC-rör) med vaxföreglade ändytor uppstod inte detta fenomen och mätresultaten från dessa mätningar borde därför vara mera representativa. På denna typ av provkroppar mättes bl.a. styvhetsmodulen med seismik. Dock bör påpekas att spänningsnivån var högre i dessa prover under testning. Uttorkning misstänks därför påverkar mätresultaten negativt och resulterar i större spridningar. För att erhålla bättre mätdata i framtiden bör en metod utarbetas för att undvika detta, t.ex. med någon form av försegling.

### Hållfasthet

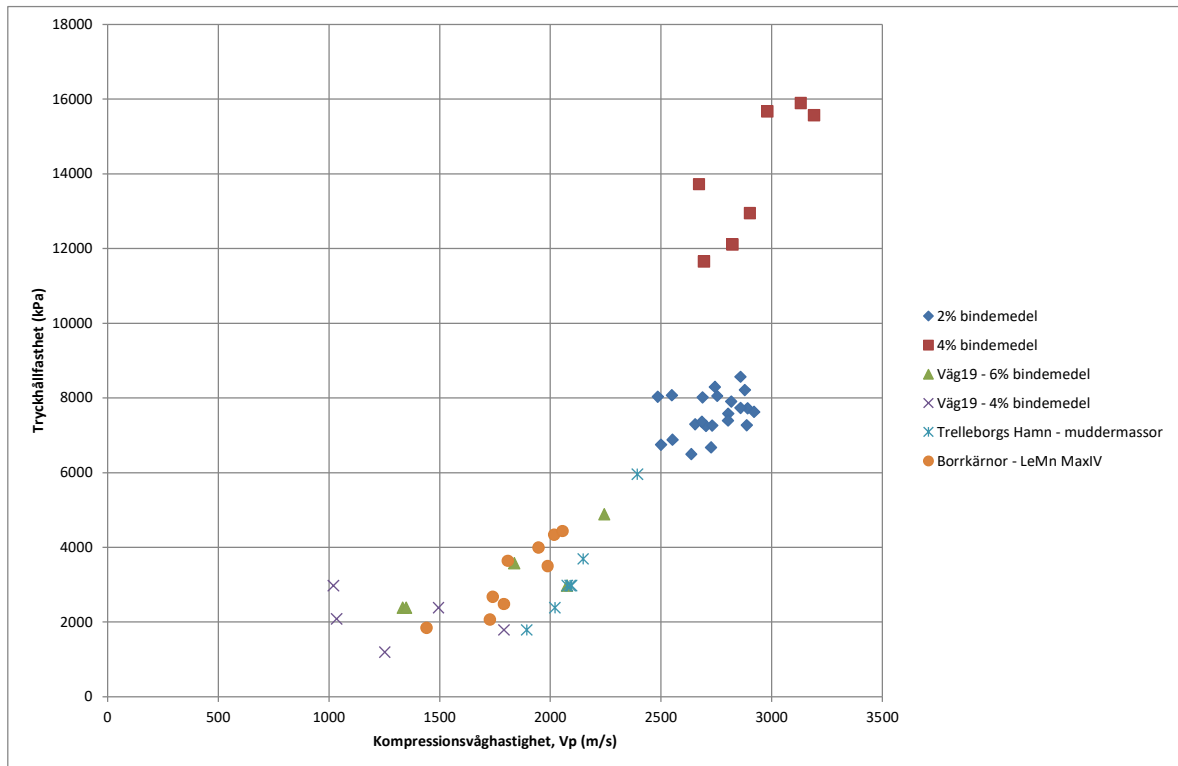
I Figur 5 redovisas medelvärden för tryckhållfasthet och draghållfasthet för stabiliserat bärlager med 2% respektive 4% bindemedelshalt. För LeMn och saSi saknas både tryck- och draghållfasthetsvärden. Tyvärr har draghållfastheterna bestämts på ett mycket begränsat antal provkroppar och resultaten bör därför ses som indikativa. För BL 2% är draghållfastheten ca 7 % av tryckhållfastheten och för BL 4% är draghållfastheten ca 10 % av tryckhållfastheten. Som en jämförelse anges enligt VTI rapport R747 att en tumregel kan vara att uppmätt draghållfasthet är ca 10-20 % av tryckhållfastheten. Värdena i denna studie ligger således i den nedre delen av uppgivet spann, men är i samma storleksordning och bedöms därför inte vara helt orimliga.





Figur 5 Tryck- och draghållfasthet för stabiliserat bärlager (medelvärden)

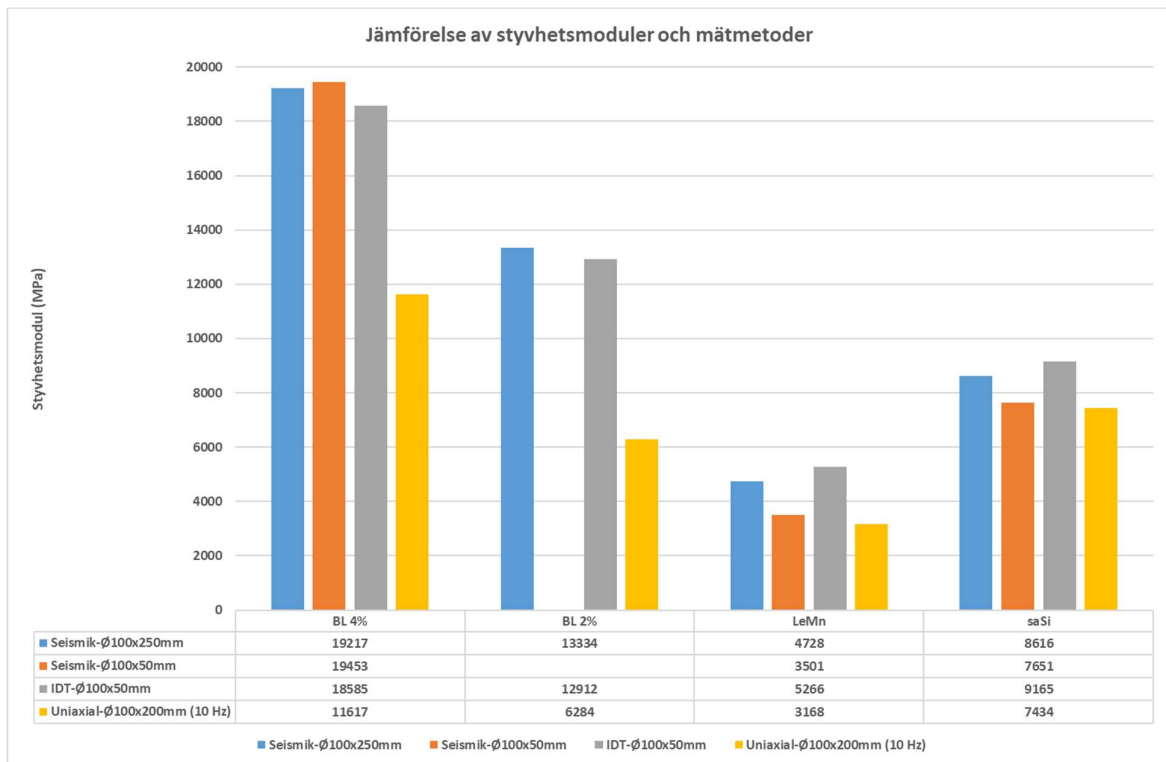
I Figur 6 redovisas tryckhållfasthet som funktion av kompressionsvåghastighet,  $V_p$ , från seismikmätningar. Då det saknas värden för LeMn och saSi lades jämförelsevärden från två tidigare projekt (ej redovisat) in i diagrammet. Dessa mätningar har ingenting med detta projekt att göra utan används enbart för rimlighetsbedömning. Det finns ett tydligt samband mellan kompressionsvåghastighet ( $V_p$ ) och tryckhållfasthet. Ju högre  $V_p$  desto högre tryckhållfasthet. Detta samband har även konstaterats i tidigare studier, exempelvis Lindh (2004). I denna studie är dock spridningen större än förväntat och resultaten för BL 4 % avviker något från den förväntade trenden. Någon rimlig förklaring har inte hittats i detta fall.



Figur 6 Tryckhållfasthet som funktion av kompressionsvåghastighet, Vp, från seismikmätningar

## Styvhetsmodul

I projektet har styvhetsmodulen för materialen bestämts på fyra sätt. Med seismik på enaxiella provkroppar (ca  $\text{Ø}100 \times 250$  mm), med seismik på puckar (ca  $\text{Ø}100 \times 50$  mm), med "Indirect Tensile Test" (IDT/pressdragprovning) också på puckar (ca  $\text{Ø}100 \times 50$  mm) samt med enaxiella tryckförsök på enaxiella provkroppar (ca  $\text{Ø}100 \times 200$  mm). I Figur 7 redovisas resultaten och materialtyperna jämförs. Det bör inledningsvis påpekas att det tyvärr inte har testats lika många provkroppar i de olika serierna. För BL 2% saknas seismikmätningar på "puckar". Detta påverkar givetvis till viss del resultaten och slutsatserna.



**Figur 7 Jämförelse av styvhetsmoduler och mätmetoder**

Värt att notera är att styvhetsmodulerna för de enaxiella försöken, utförda på bärlagermaterial bestående av krossmaterial 0-18 mm med 2 % respektive 4 % bindemedelshalt, avviker kraftigt jämfört med resultaten då seismisk eller IDT använts. Någon rimlig förklaring till detta har inte hittats. Eventuellt skulle den höga styvhetsmodulen i kombination med att materialresponsen är väldigt ”stum” kunna påverka. Dvs. att det i detta fall uppstått ett kapacitetsproblem för den använda testmaskinen. Alternativt i kombination med att upplösningen för givarna varit för låg. För material med lägre styvhetsmodul (LeMn och saSi) korrelerar resultaten för de olika testmetoderna bättre. Å andra sidan är det inte ovanligt med en styvhetsmodul högre än 20000 MPa för en asfaltbeläggning om testet utförs vid låga temperaturer. Det är dock relativt ovanligt att Ø100x200 mm provkroppar används, vilket gör att jämförelsen haltar något.

Jämförs mätmetoderna är det uppmuntrande att både den traditionella metoden (IDT) och den seismiska mätmetoden resulterar i ungefär likvärdiga styvhetsmoduler för de testade materialen. För lägre styvhetsmoduler korrelerar resultaten relativt bra även för de enaxiella testerna. Mätningarna indikerar också att provkropparnas geometri inte verkar påverka resultaten i denna studie.

Som förväntat resulterar en högre bindemedelshalt i en högre styvhetsmodul för ett bärlagermaterial bestående av krossmaterial 0-18 mm med 2 % respektive 4 % bindemedelshalt. I studien resulterar en fördubbling av bindemedelshalten från 2 % till 4 % i en ca 50-procentig ökning av styvhetsmodulen.

Som diskuterats i inledningen av detta kapitel är spridningarna i resultaten störst för materialet bestående av stabiliserad lermorän (LeMn). En förklaring till detta kan vara att efter provberedning (kapning, mätning, limning av givarhållare etc.) fanns en tendens att provkropparna torkade ut och viss ytlig sprickbildning kunde observerades på ytan. Denna uttorkning påverkar mätresultaten

negativt och resulterar i större spridning. För att erhålla bättre mätdata bör en metod utarbetas för att undvika detta.

Även resultaten för materialet bestående av sandig silt (saSi) är rimliga. Styvhetsmodulen är högre jämfört med den stabiliserade lermoränen, men lägre jämfört med det stabiliserade bärlagermaterialet. Den sandiga silten är ett finkornigt friktionsmaterial som stabiliserats med cement och merit, medan lermoränen är ett kohesionsmaterial som stabiliserats med kalk och merit. Kalkstabilisering resulterar vanligtvis i lägre styvhetsmoduler jämfört med cementstabilisering (vid jämförbara inblandningsmängder).

## Utmattning

I Tabell 4 redovisas regressionskonstanterna för de testade materialen. Som jämförelse har även livslängdkriteriet för CG enligt Trafikverkets regelverk (TRVK VÄG alt. TRVINFRA) lagts in i tabellen. Vid testning av asfaltbeläggningar eftersträvas ett  $R^2 > ca 0,85-0,90$  (gärna ännu högre) för att sambandet ska anses vara statistiskt säkert. För LeMn och siSa erhålls i denna studie ett  $R^2$  lika med 0,42 respektive 0,63, dvs. spridningarna är för stora och därmed bör resultaten förkastas alternativt användas med stor försiktighet. Tyvärr har det inte varit möjligt att testa flera provkroppar för att öka dataunderlaget och därmed förhoppningsvis även minska spridningarna. Det är dock tveksamt om det hade hjälpt i detta fall. En rimlig förklaring till varför resultaten ser ut som de gör har lagts fram tidigare i detta kapitel.

Det bör även påpekas att utmattningsförsöken var mycket utmanande att köra av flera anledningar. Som tidigare berörts är materialresponsen mycket ”stum” jämfört med en asfaltbeläggning. Då de testade materialen (främst stab. BL) har en förhållandevis hög styvhetsmodul betyder det att lasten måste vara relativt hög, jämfört med då en asfaltbeläggning testas, vilket ställer höga krav på testmaskinens förmåga att lägga på en korrekt lastpuls. För att inte erhålla extremt korta livslängder krävs att den initiala töjningsnivån hålls förhållandevis låg, vilket är en utmaning att mäta på ett korrekt sätt (risk för brus i data).

**Tabell 4 Regressionskonstanter utmattning**

Materialtyp	n (-)	K (-)	K' ( $\mu$ strain)	$R^2$ (-)	Stress (kPa)
BL, 0-18 mm, 2 % (cement + merit)	-4,3	5,493e+13	65,8	0,88	Ca 360-600
BL, 0-18 mm, 4 % (cement + merit)	-6,3	8,543e+17	77,4	0,85	Ca 720-1380
Terrass, LeMn (80% kalk + 20% merit)	-1,9	6,095e+08	28,8	0,42	Ca 250-480
Terrass, saSi (80% cement + 20% merit)	-4,1	8,670e+13	85,7	0,63	Ca 150-700
CG enligt TRVK VÄG (jämförelse)	-3,9	1,532e+13	72,7	-	-

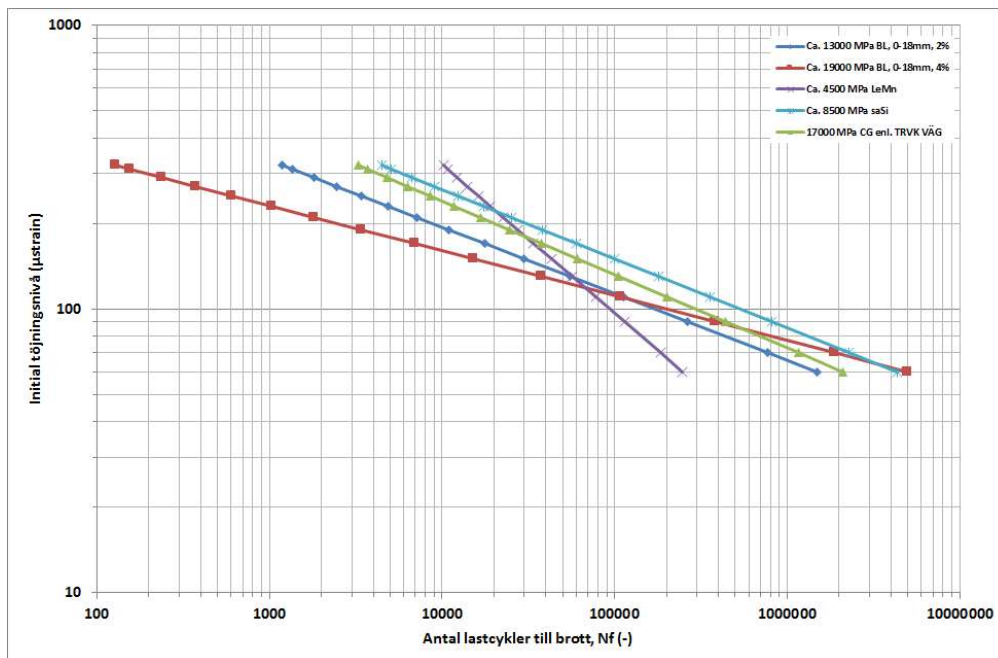
I Tabell 4 redovisas även intervall för spänningsnivåerna som använts vid testerna. Ett av målen med projektet var att bestämma ”*break down limit*” för stabiliserat material. I dagsläget antas att ingen nedbrytning av det stabiliserade materialet sker då den cykliska lasten maximalt uppgår till ca 40-60 % av skiktets hållfasthet. Draghållfastheten för BL 2% har indikativt bestämts till 554 kPa och för BL 4% till 1434 kPa, se Figur 5. Beräknas ett värde som motsvarar 40-60% av dessa värden erhålls ca 220-330 kPa respektive ca 575-860 kPa. Detaljstuderas utmattningsförsöken

erhålls ca 700 000 lastcykler vid 360 kPa för BL 2% (lägsta använda spänningsnivån). För BL 4% erhålls drygt 2 000 000 lastcykler vid 720 kPa (lägsta använda spänningsnivån). K', dvs. spänningsnivå för att erhålla en livslängd motsvarande 1 000 000 lastcykler, har för BL 2% beräknats till ca 272 kPa och för BL 4% ligger motsvarande nivå på ca 775 kPa, dvs. ca 49 % respektive 54 % av materialens indikativa draghållfasthet. Beräknas samma värden för 10 000 000 lastcykler hamnar spänningsnivåerna på ca 180 kPa resp. 630 kPa, dvs. ca 32 % respektive 44 % av materialens indikativa draghållfasthet.

För BL 2% har inte tillräckligt låg spänningsnivå använts för att kunna utvärdera tumregeln. För BL 4% ligger spänningsnivån 720 kPa (dvs. ca 50 % av den indikativa draghållfastheten) inom intervallet och det kan konstateras att nedbrytning fortfarande sker i materialet, även om antalet lastcykler till brott är förhållandevis stort.

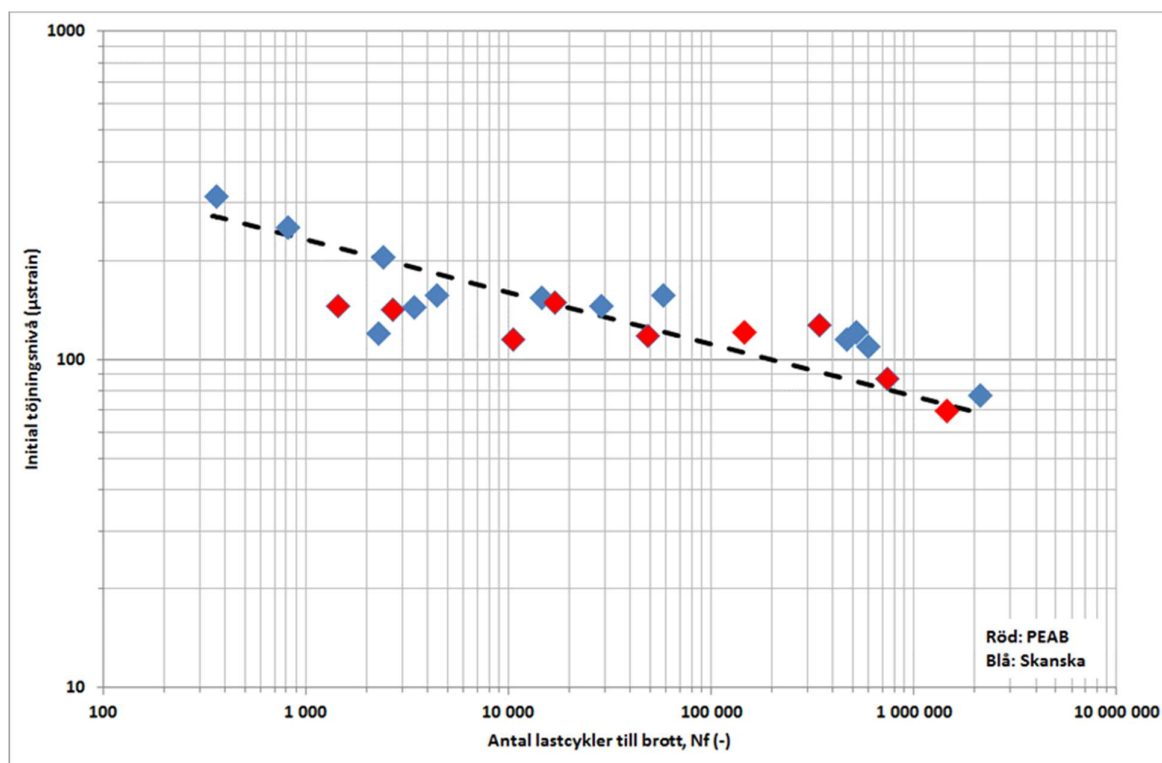
Om en jämförelse görs med asfaltbeläggningar brukar begreppet ”*fatigue endurance limit*” användas. Belastas materialet med töjningar som är lägre än ”*fatigue endurance limit*” erhålls en ”oändlig” utmattninglivslängd, dvs. sambandet i Wöhler-diagrammet övergår till en horisontell linje. Var denna gräns ligger skiljer mellan olika material bl.a. beroende på bindemedelshalt, typ av bindemedel, PMB, gradering osv. men en grov tumregel kan vara att nivån ligger på ca 75-200  $\mu$ strain (NCHRP report 646). Det kan därför vara rimligt att anta att en liknande gräns för spänning (”*break down limit*”) finns för ett stabiliserat material. Exakt var gränsen ligger har dock inte varit möjligt att utvärdera fullt ut i detta projekt. Fler försök vid mycket låga spänningsnivåer måste i så fall köras, vilket inte har varit möjligt i denna studie. Vid spänningsnivån ca 50 % av den indikativa draghållfastheten sker dock fortfarande nedbrytning för ett av materialen som ingått i denna studie. Det kan därför vara ett rimligt antagande att en eventuell ”*break down limit*” i så fall ligger närmare 40% (kanske även lägre) än 60% av draghållfastheten för aktuellt material.

I Figur 8 redovisas samma data som i Tabell 4 i form av ett Wöhler-diagram. Korrelationen med sambandet för ett CG-lager enligt TRVK VÄG alt. TRVINFRA är förhållandevis god. Sambanden har likvärdig lutning, dvs. nedbrytningshastighet, och har ungefär samma storleksordning. Som tidigare nämnts bör sambanden för LeMn och saSi användas med stor försiktighet.



Figur 8 Jämförelse av utmattningsegenskaper för de testade materialen

För att studera reproducerbarheten, dvs. hur stor spridning som kan förväntas mellan olika laboratorier, har vissa av utmattningsförsöken körts vid PEAB:s laboratorium i Helsingborg. Resultaten från dessa körningar redovisas i Figur 9 där PEAB:s resultat redovisas som röda symboler och Skanskas som blå symboler. Ingen statistisk utvärdering av resultaten har gjorts, men okulärt bedöms spridningen vara ungefär vad man normalt kan förvänta sig från utmattningsförsök.

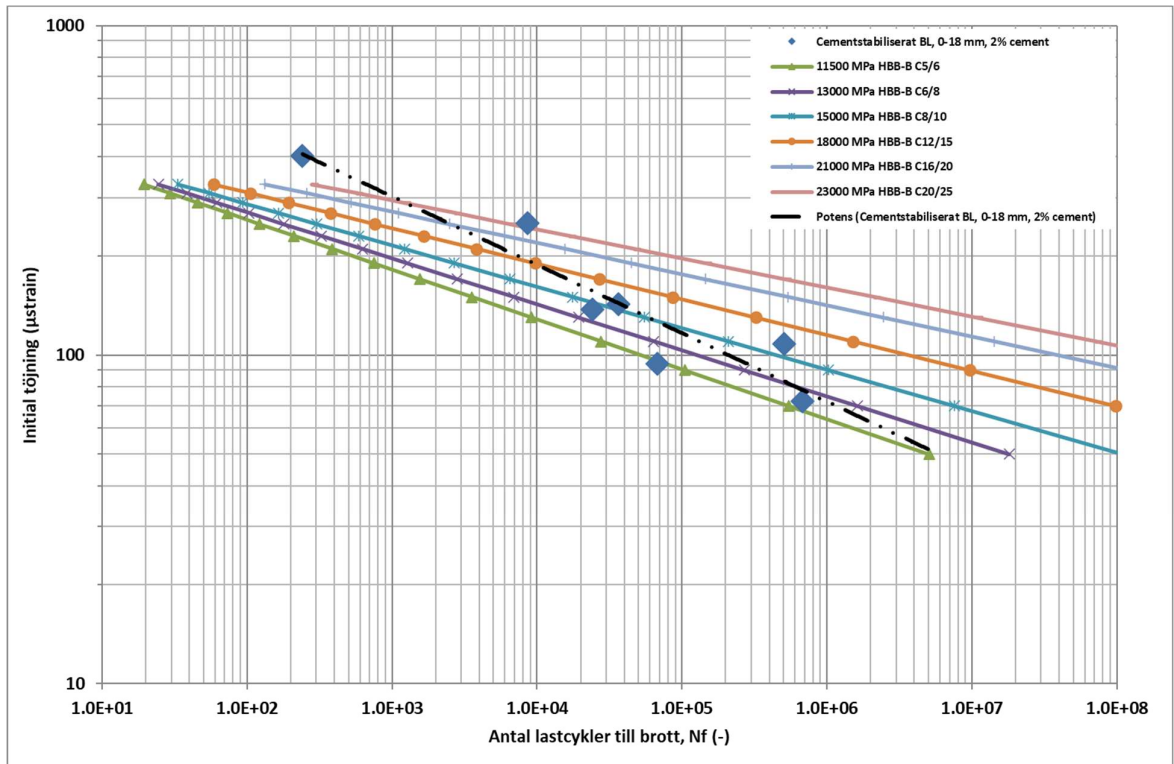


Figur 9 Jämförelse mellan Skanskas och PEAB:s utrustningar med avseende på utmattning

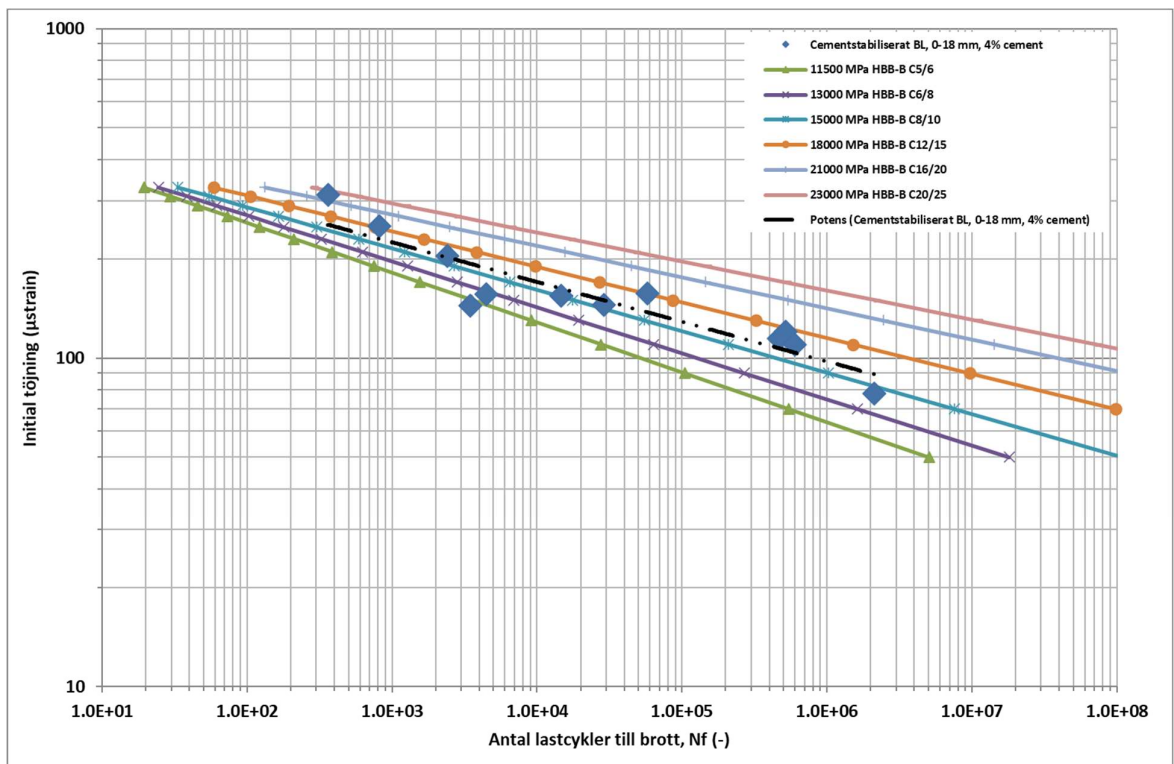
I Figur 10 och Figur 11 har utmattningsdata från denna studie jämförts med de danska dimensioneringskriterierna som finns redovisade i MMOPP 2013 resp. MMOPP 2017. I Danmark brukar vanligtvis 0-32 mm BL stabiliseras, dvs. det som benämns HBB-B. HBB-A motsvarar stabiliserad sand, dvs. ett terrassmaterial. I denna studie har 0-18 mm BL stabiliserats. Det framgår ej heller exakt hur stor bindemedelshalt och typ av bindemedel som använts i de danska materialen för att uppnå aktuella styvhetsmoduler och tryckhållfastheter (28 dygn). Jämförelsen ska i första hand fungera som en rimlighetsbedömning av resultaten som tagits fram i denna studie.

För BL 2% erhålls en snabbare nedbrytning jämfört med de danska kriterierna. Det bör dock noteras att endast sju provkroppar testats i denna serie, normalt bör 12-18 provkroppar testas i en serie. Värdet på  $R^2$  är dock förhållandevis högt (0,88), det är därför tveksamt om ytterligare tester hade ändrat resultatet på ett drastiskt sätt.

För BL 4% är korrelationen mellan testerna i denna studie och de danska kriterierna bättre. Resultaten hamnar mellan HBB-B C8/10 (15000 MPa) och HBB-B C12/15 (18000 MPa), vilket är i samma storleksordning som uppmättes i laboratoriet (dvs. ca 19000 MPa och 14 MPa).



Figur 10 Jämförelse av utmattningskriterie för BL 2% med dimensioneringskriterier för hydrauliskt bundna material (HBB-B) enligt danska normer (MMOPP 2017)



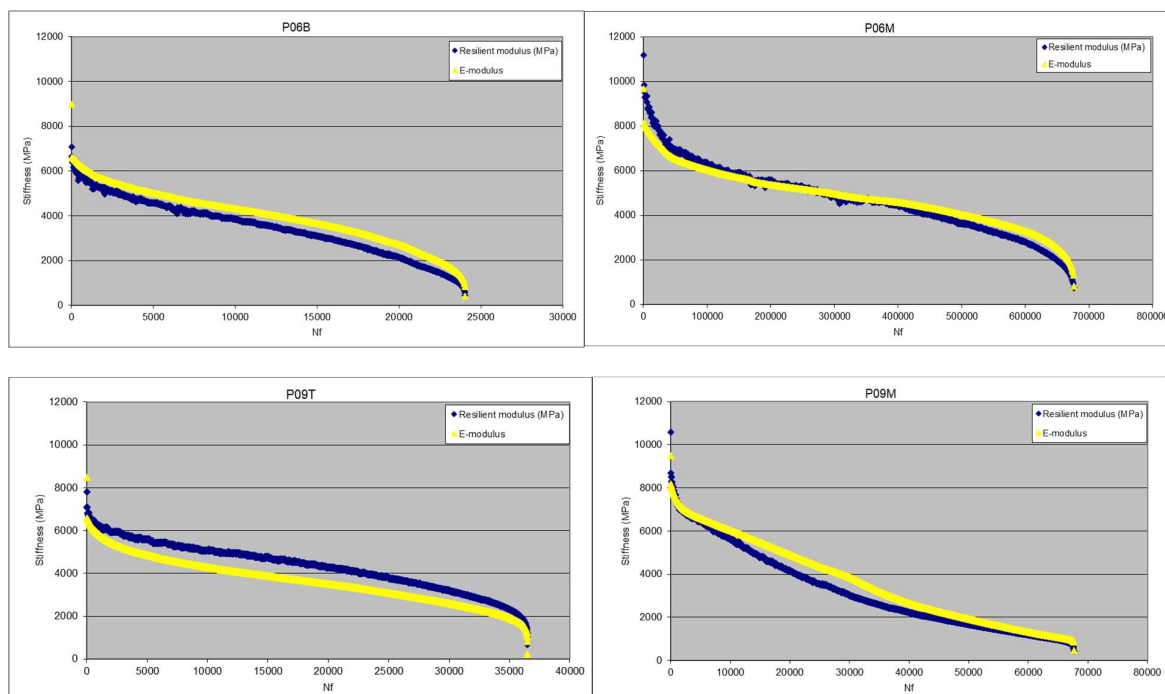
Figur 11 Jämförelse av utmattningskriterie för BL 4% med dimensioneringskriterier för hydrauliskt bundna material (HBB-B) enligt danska normer (MMOPP 2017)



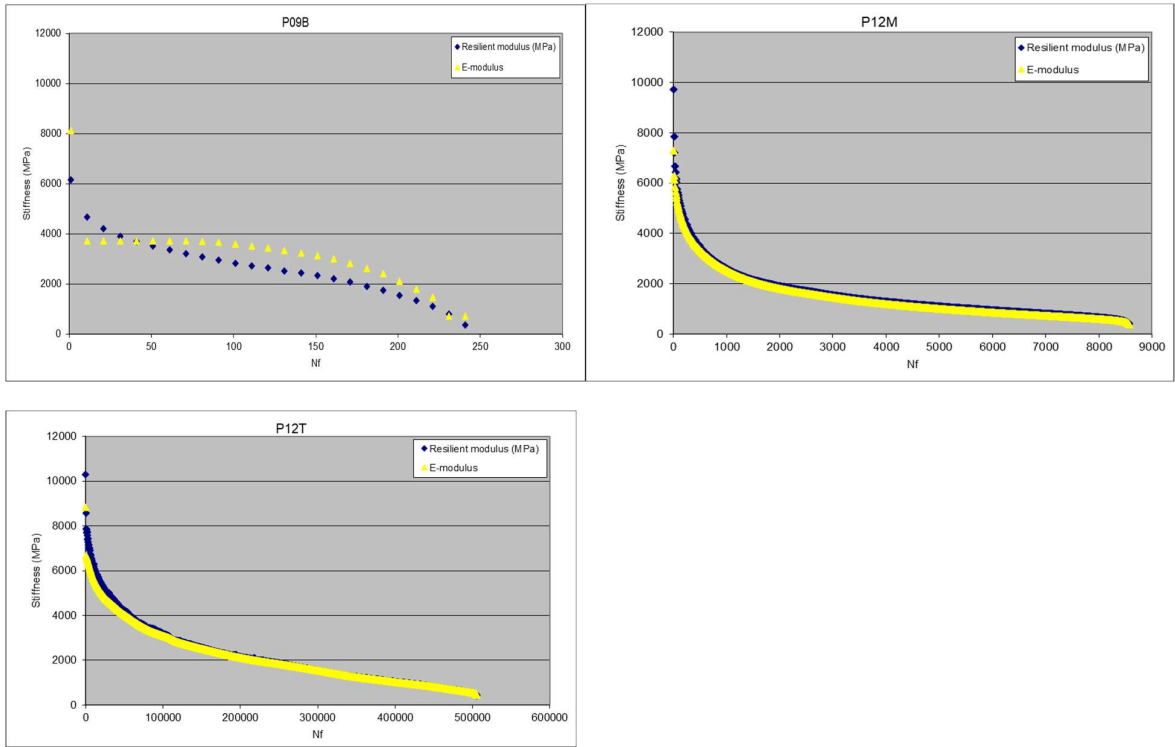
För att belysa hur en inkrementell-rekursiv beräkningsmetodik fungerar har tidigare redovisad danska modell applicerats på utmattningsförsöken utförda på BL 2% och BL 4%. Modellparametrar, som redovisas i Tabell 5, har bestämts genom att minimera felet mellan uppmätt styvhetsmodul och predikerad styvhetsmodul med hjälp av SOLVER-funktionen i EXCEL. Som jämförelse har även modellparametrarna beräknats. För BL 2% erhålls relativt god passning mellan uppmätt styvhetsmodul och beräknad styvhetsmodul, se Figur 12. Regressionskonstanterna korrelerar även relativt väl med beräknade regressionskonstanter enligt samband från tidigare danska studier. För BL 2% lyckas således den inkrementellt-rekursiva beräkningsmetodiken beskriva materialets gradvisa nedbrytning på ett bra sätt. Det bör även noteras att den danska modellen har tagits fram baserat på data från fältförsök (HVS). Vanligtvis finns alltid en skiftfaktor mellan lab./fält. Detta kan möjligtvis påverka resultaten något. För BL 4% erhålls sämre passning, ingen bra förklaring har funnits till varför så är fallet.

**Tabell 5 Regressionskonstanter för inkrementell-rekursiv modell**

	BL 2%	BL 4%	Ber. BL 2% (jfr.)	Ber. BL 4% (jfr.)
$E_{min}$ (MPa)	2000	2000	2000	2000
$\alpha$	0,108	0,526	0,280	0,280
$\beta$	1,943	1,502	1,800	2,400
$\gamma$	1,474	1,160	1,320	1,860
$E_{ref}$ (MPa)	10000	10000	10000	10000
$\epsilon_{ref}$ ( $\mu$ strain)	45	45	45	45







Figur 12 A-G. Grafisk presentation av uppmätt och modellerad reduktion av styvhetsmodulen för BL 2% vid utmattningsförsök. OBS! Samma regressionskonstanter har använts i samtliga fall

## SLUTSATSER OCH FORTSATT ARBETE

### Slutsatser

Provkropparna packades in i laboratoriet enligt vibropackningsmetoden (Lindh, 2004). Metodiken har fungerat bra. För LeMn och siSa var spridningarna i resultaten större jämfört med för stabiliserat BL. Det misstänktes därför att de testade provkropparna för LeMn och siSa inte vara helt representativa. En teori som diskuterades var att efter avformning och provberedning (kapning, mätning, limning av givarhållare etc.) fanns en tendens att provkropparna torkade ut och viss ytlig sprickbildning kunde observerades på provkropparnas ytor (särskilt för LeMn). När materialet fanns i inpackningsformen (PVC-rör) med vaxförsiglade ändytor uppstod inte detta fenomen och mätresultaten från dessa mätningar borde därför vara mera representativa.

Tryckhållfasthet och draghållfasthet har bestämts för stabiliserat bärlager med 2 % respektive 4 % bindemedelshalt. För LeMn och saSi saknas både tryck- och draghållfasthetsvärden. För BL 2 % är draghållfastheten ca 7 % av tryckhållfastheten och för BL 4 % är draghållfastheten ca 10 % av tryckhållfastheten. Som en jämförelse anges enligt VTI rapport R747 att en tumregel kan vara att uppmätt draghållfasthet är ca 10-20 % av tryckhållfastheten. För betong ligger draghållfastheten på strax över 10 % (Anon, 2021b) Värdena i denna studie ligger således i den nedre delen av uppgivet spann, men är i samma storleksordning och bedöms därför inte vara helt orimliga. Mätningar med seismik visar att det finns ett tydligt samband mellan kompressionsvågshastighet ( $V_p$ ) och tryckhållfasthet (UCS). Ju högre  $V_p$  desto högre tryckhållfasthet. Spridningen mellan  $V_p$  och UCS ökar med ökad hållfasthet.

Styvhetsmodulen har bestämts på fyra sätt. Med seismik på enaxiella provkroppar (ca  $\varnothing 100 \times 250$  mm), med seismik på puckar (ca  $\varnothing 100 \times 50$  mm), med ”*Indirect Tensile Test*” (IDT/pressdragprovning) också på puckar (ca  $\varnothing 100 \times 50$  mm) samt med enaxiella tryckförsök på enaxiella provkroppar (ca  $\varnothing 100 \times 200$  mm). Jämförs mätmetoderna är det uppmuntrande att både de traditionella metoderna och den seismiska mätmetoden resulterar i ungefär likvärdiga styvhetsmoduler för de testade materialen. Undantaget är traditionella enaxiella försök för stabiliserat BL. För lägre styvhetsmoduler korrelerar resultaten relativt bra även för de enaxiella testerna. Mätningarna indikerar också att provkropparnas geometri inte verkar påverka resultaten i denna studie.

Utmattningsförsök har utförts med IDT/ pressdragprovning. För LeMn och siSa erhålls i denna studie ett  $R^2$  lika med 0,42 respektive 0,63, dvs. spridningarna är för stora och därmed bör resultaten förkastas alternativt användas med stor försiktighet. Som tidigare nämnts misstänktes att provkropparna för dessa båda material inte är helt representativa. Fortsättningsvis fokuseras därför på resultaten för BL 2 % respektive BL 4%.

Ett av målen med projektet var att bestämma ”*break down limit*” för stabiliserat material. I dagsläget antas att ingen nedbrytning av det stabiliserade materialet sker då den cykliska lasten maximalt uppgår till ca 40-60 % av skiktets hållfasthet. Vid spänningsnivån ca 50 % av den indikativa draghållfastheten sker dock fortfarande nedbrytning för ett av materialen som ingått i studien. Det kan därför vara ett rimligt antagande att en eventuell ”*break down limit*” i så fall ligger närmare 40% än 60% av draghållfastheten för aktuellt material.

Om resultaten redovisas i ett Wöhler-diagram framgår att korrelationen med sambandet för ett CG-lager enligt TRVK VÄG alt. TRVINFRA är förhållandevis god. Sambanden har likvärdig lutning, dvs. nedbrytningshastighet, och har ungefär samma storleksordning.

För att bedöma rimligheten i resultaten har en jämförelse med de danska dimensioneringskriterierna genomförts. För BL 2 % erhålls en snabbare nedbrytning jämfört med de danska kriterierna. Det bör dock noteras att endast sju provkroppar testats i denna serie, normalt

bör 12-18 provkroppar testas i en serie. Värdet på  $R^2$  är dock förhållandevis högt (0,88), det är därför tveksamt om ytterligare tester hade ändrat resultatet på ett drastiskt sätt. För BL 4% är korrelationen mellan testerna i denna studie och de danska kriterierna bättre. Resultaten hamnar mellan HBB-B C8/10 (15000 MPa) och HBB-B C12/15 (18000 MPa), vilket är i samma storleksordning som uppmättes i laboratoriet (dvs. ca 19000 MPa och 14 MPa).

Slutligen har en inkrementell-rekursiv beräkningsmetodik applicerat på utmattningsdata för BL 2 % och BL 4 %. För BL 2 % erhålls relativt god passning mellan uppmätt styvhetsmodul och beräknad styvhetsmodul. Regressionskonstanterna korrelerar även relativt väl med beräknade regressionskonstanter enligt samband från tidigare danska studier. För BL 2% lyckas således den inkrementellt-rekursiva beräkningsmetodiken beskriva materialets gradvisa nedbrytning på ett bra sätt. Det bör även noteras att den danska modellen har tagits fram baserat på data från fältförsök (HVS). Vanligtvis finns alltid en skiftfaktor mellan lab./fält. Detta kan möjligtvis påverka resultaten något. För BL 4% erhålls sämre passning, ingen bra förklaring har funnits till varför så är fallet.

### Fortsatt arbete

För att verifiera resultaten i denna studie bör flera laborieförsök utföras. Vidare studier av var ”*break down limit*” ligger kan också vara intressant. Utmattningsförsöken som utförts på stabiliserat terrassmaterial blev inte lyckade (stor spridning) p.g.a. att provkropparna inte var representativa. En bättre provberedningsmetodik bör därför utarbetas. En koppling till observerad nedbrytning i fält är alltid eftersträvanvärt. Ett steg framåt är om en inkrementell-rekursiv beräkningsmetodik kan implanteras i framtida svenska vägdimensioneringsprogram. I kommande studier bör fokus även ligga på livscykelutvärdering av materialens prestanda, både avseende mekaniska egenskaper och klimatpåverkan.

## REFERENSER

**Anon (2021a)** – ”HÖGHASTIGHETSJÄRNVÄG - FÖRSTUDIE BANKFYLLNING LCA/LCC-PERSPEKTIV”. Tyréns, slutrapport 2021-06-11.

**Anon (2021b)** – Betonghandboken, material del II, ISBN 978-91-7917-088-2, Svensk Byggtjänst, 2021.

**CalMe** - <http://www.ucprc.ucdavis.edu/calme/About.aspx>. Besökt senast 2022-10-04.

**DRI Report 138 (2004)** – ”*Mechanistic Design of Semi-Rigid Pavements – An Incremental Approach*”. ISBN electronic 87-91177-56-1, Finn Thøgersen, Christian Busch, Anders Henriksen.

**Huang (1993)** - Huang, Yang H., ”*Pavement Analysis and Design*”, University of Kentucky, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993, ISBN 0-13-655275-7.

**Lindh (2004)** – ”*Compaction- and strength properties of stabilised and unstabilised fine-grained tills*”, Doctoral thesis, ISBN 91-973723-5-8.

**Lindh (2009)** – ”*Effekter av slagg och askor i bindemedel för stabilisering*”. SBUF-projekt 12141.

**MMOPP 2013** – ”*MMOPP DIMENSIONERINGSPROGRAM FOR VEJBEFÆSTELSER - ANLÆG OG PLANLÆGNING*”. September 2013.

**MMOPP 2017** – ”*MMOPP DIMENSIONERINGSPROGRAM FOR VEJBEFÆSTELSER - ANLÆG OG PLANLÆGNING*”. September 2017.

**NCHRP Report 646** – ”*Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt*”, Transport Research Board 2010.

**Nilsson, B.R (2003)** – ”*Fatigue of Asphalt Mixes – Theory of Viscoelasticity and Continuum Damage Mechanics Applied to Uniaxial Fatigue Data from Laboratory Tests*”, CODEN:LUTVDG/(TVVB-1003) 1-272/2003, ISSN 1404-4331, Lunds Tekniska Högskola.

**Rydén (2004)** – ”*Surface Wave Testing of Pavements*”, ISBN 91-973406-4-2, Lund Institute of Technology, Lund.

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

**SS-EN 12697-24:2004** – ”Vägmateriel – Asfaltmassor – Provningsmetoder för varmblandad asfalt – Del 24: Utmattningsmotstånd”, Utgåva 1, Fastställd 2004-07-30.

**SS-EN 12697-26:2004** – ”Vägmateriel – Asfaltmassor – Provningsmetoder för varmblandad asfalt – Del 26: Styvhet”, Utgåva 1, Fastställd 2004-08-13.

**SS-EN 13286-41:2003** – ”Obundna och hydrauliskt bundna vägmateriäl – Del 41: Provningsmetod för bestämning av tryckhållfastheten för hydrauliskt bundna materiäl”. Utgåva 1, Fastställd 2003-03-21.

**SS-EN 13286-42:2003**. - ”Obundna och hydrauliskt bundna vägmateriäl – Del 42: Provningsmetod för bestämning av indirekt draghållfastheten för hydrauliskt bundna materiäl”. Utgåva 1, Fastställd 2003-03-21.

**SS-EN 16907-4:2018** – ”Schakt och fyllning för anläggningsbyggande - Del 4: Jordbehandling med kalk och/eller hydrauliska bindemedel”. Utgåva 1, Fastställd 2018-12-12.

**Ullidtz (1998)** – “Modelling Flexible Pavement Response and Performance”, Polyteknisk Forlag, Copenhagen, 1998

**VTI rapport R747** – “Terrasstabilisering, kunskapsdokument”. VTI, 2012.