

Thesis 2022-380-5347

Utvärdering av bärighetskrav i totalentreprenader

Karl Duvander

Daniel Rittsten

Trafik och Väg
Institutionen för Teknik och Samhälle
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet



Copyright © Karl Duvander, Daniel Rittsten

LTH, Institutionen för Teknik och samhälle
CODEN: LUTVDG/(TVTT-5347)/1-73/2022
ISSN 1653-1922

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet
Lund 2022

Author(s): Karl Duvander
Daniel Rittsten

Title: Utvärdering av bärighetskrav i totalentreprenader>

English title: Evaluation of bearing capacity requirements in turn-key contracts

Language Svenska

Year: 2022

Keywords: Bärförmåga; totalentreprenad; fallviktsmätning; gång- och cykelväg; packning

Citation: Karl Duvander, Daniel Rittsten, *Utvärdering av bärighetskrav i totalentreprenader*. Lund, Lunds universitet, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2022. Thesis. 347

To achieve maximum benefit with both resources and money, the Swedish Transport Administration want to set requirements regarding the bearing capacity in design and construct contracts to ensure a long lifetime of roads. A falling weight deflectometer test is to be carried out for the final inspection of the road and the results will tell the Swedish Transport Administration whether the contractor has met the demands regarding bearing capacity or not. The objective of setting these requirements is to make the contractor more thorough with the compaction work and make them identify and address weaker sections in the subgrade early in the construction process.

This master thesis is about different measurements of bearing capacity that are described by the Swedish Transport Administration. A comparative study between these measurements is carried out, partly based on calculations from falling weight deflection data, and partly based on semi structured interviews with representatives within the field of road engineering. Important aspects regarding FWD, such as temperature, moisture content and time of loading has been discussed during the interviews, both when it comes to performing the tests and to analyze the data.

Measurements of the stress tension at the bottom of the asphalt layer can be corrected for varying temperatures. However, research show that for road constructions with a thinner asphalt layer <75 mm such as cycle paths, different kinds of measurements should be used. The results are to be assessed with care since the Swedish Transport Administration's computing models are not designed for thin asphalt layers. This thesis show that temperature correction for thin asphalt layers is possible to perform, but the accuracy of results will vary greatly depending on what correction methods that are used. More research should be carried out to be able to correct measured deflections or calculated stiffness modulus due to varying moisture content in the unbound granular layers.

The conclusion from this thesis is that different measurements of bearing capacity should be used (surface modulus for cycle paths and bearing capacity class for normal Swedish roads). Depending on the type of road that is constructed (normal road or cycle path) the requirements are to be presented as low percentile values instead of mean values. The reason for this is to avoid that weaker sections are overlooked at the final inspection.

Innehållsförteckning

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Förord | 1 |
| 2 | Sammanfattning | 2 |
| 3 | Begrepp | 3 |
| 4 | Inledning | 4 |
| 4.1 | Bakgrund | 4 |
| 4.2 | Syfte och mål | 4 |
| 4.3 | Frågeställning | 4 |
| 4.4 | Avgränsningar | 5 |
| 5 | Objekts- och projektbeskrivning | 6 |
| 6 | Metodik och metod | 8 |
| 6.1 | Litteraturstudie | 8 |
| 6.2 | Intervjuer | 9 |
| 6.3 | Datainsamling | 10 |
| 6.4 | Databearbetning | 10 |
| 7 | Litteraturstudie | 12 |
| 7.1 | Vägbyggnad | 12 |
| 7.1.1 | Väggroppens uppbyggnad och material | 12 |
| 7.1.2 | Tunna konstruktioner | 14 |
| 7.1.3 | Byggnation av väg | 14 |
| 7.1.4 | Faktorer som påverkar deflektion | 16 |
| 7.1.4.1 | Belastningstid | 16 |
| 7.1.4.2 | Temperatur | 16 |
| 7.1.4.3 | Fukt | 19 |
| 7.1.4.4 | Permanent deformation | 19 |
| 7.2 | Entreprenadformer och kravställning | 20 |
| 7.2.1 | Totalentreprenad | 20 |
| 7.2.2 | Funktionsentreprenad | 20 |
| 7.2.3 | Kravställning | 21 |
| 7.2.4 | När ska kravet vara uppnått? | 21 |
| 7.3 | Fallviktsmätning | 23 |
| 7.3.1 | Elasticitetsmoduler | 24 |
| 7.3.2 | Bärförmågeindex och Bärförmågeklass | 25 |
| 7.3.3 | Passningsräkning och temperaturkorrigering enligt Trafikverkets metod | 27 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7.3.4 | Andra metoder för temperaturkorrigering av fallviktsdata | 29 |
| 7.3.4.1 | Modifierad version av Trafikverkets temperaturkorrigering | 29 |
| 7.3.4.2 | Straube och Jansens metod | 30 |
| 7.3.5 | VTTs metod | 32 |
| 7.3.5.1 | Belastningshistorik | 34 |
| 7.4 | Erfarenheter från tidigare arbeten | 35 |
| 7.4.1 | Examensarbete: Funktionskrav på vägars bärighet | 35 |
| 7.4.2 | Examensarbete: Temperaturkorreksjon av nedböyningsmålinger på vei | 36 |
| 7.4.2.1 | Temperaturkorrigera deflektioner | 36 |
| 7.4.2.2 | Temperaturkorrigera E-moduler | 36 |
| 7.4.3 | Examensarbete: Cykelvägar anlagda på befintlig jord | 37 |
| 7.4.4 | Examensarbete: Utvärdering av kontrollmetoder för obundna granulära material | 37 |
| 8 | Resultat | 39 |
| 8.1 | Elasticitetsmoduler | 39 |
| 8.2 | Representativa punkter | 42 |
| 8.3 | Packning | 45 |
| 8.4 | Linjäritet | 46 |
| 8.5 | Belastningshistorik | 47 |
| 8.6 | Intervjustudie | 51 |
| 8.6.1 | Val av bärighetsmått | 51 |
| 8.6.2 | Statistisk formulering av bärighetskrav | 51 |
| 8.6.3 | Tidpunkt för mätning | 51 |
| 8.6.4 | Bärighet på terrass och obundet material | 52 |
| 9 | Diskussion | 53 |
| 9.1 | GC-väg Rinnebäck Lackalänga | 53 |
| 9.2 | Bärighetsmått | 54 |
| 9.3 | Kravformulering | 55 |
| 9.4 | Konsekvenser av bärighetskrav | 57 |
| 9.5 | Analys av beräkningsmetoder | 58 |
| 10 | Slutsatser | 60 |
| 11 | Rekommendationer | 61 |
| | Referenser | 63 |

1 Förord

Detta examensarbete är genomfört i samverkan med Trafikverket under hösten 2022 och samtliga fältmätningar är utförda av Ramboll RST. Arbetet är utfört på Lunds Tekniska Högskola på institutionen för Teknik och samhälle inom avdelningen Trafik och väg, med tekniskt stöd från Ramboll RST Syd. Det har varit väldigt givande och lärorikt att skriva om vägteknik eftersom det är ett fält där mycket forskning bedrivs och många personer inom branschen har stor teknisk kompetens vilket är inspirerande.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare på Trafikverket samt initiativtagaren till examensarbetet, Per Viktorsson för ditt engagemang och goda råd. Vi vill tacka vår handledare från LTH, Sven Agardh för all hjälp som vi har fått gällande vägteknik och granskningen av arbetet samt Mattias Linde på Trafikverket som tillsammans med våra handledare har gett oss stöd under hela arbetets gång. Vi vill även tacka Ola Aurell på Ramboll som har varit tekniskt stöd och hjälpt oss med värdefulla analyser.

Till slut så vill vi rikta ett tack till Ramboll Syd och medarbetarna på RST-avdelningen för er expertis inom vägteknik samt för möjligheten att sitta på kontoret i Malmö. Ett sista tack riktar vi till alla som ställt upp på intervjuer, era bidrag har varit till stor hjälp för vårt arbete.

2 januari 2023

Karl Duvander & Daniel Rittsten

2 Sammanfattning

För att uppnå maximal nytta med skattebetalarnas pengar eftersträvar Trafikverket att vägar ska byggas med lång livslängd. För att uppnå detta vill Trafikverket i framtiden ha möjlighet att ställa krav på vägars bärighet i totalentreprenader, utöver de funktionskrav (exempelvis spårbildning och jämnhet) som redan ställs på vägens yta idag. Vid slutbesiktning skall fallviktsmätningar utföras som visar om entreprenören har uppfyllt bärighetskravet. Målet med kravställningen är att entreprenören skall vara noggrann med packningsarbetet under byggtiden samt identifiera områden med svagare terrass och åtgärda detta i tidigt skede. Tanken med att upphandla det som en totalentreprenad är att ge entreprenören stor frihet att projektera och bygga som de vill givet att konstruktionen klarar de krav som ställs på den vid slutbesiktning.

Detta arbete går igenom olika typer av bärighetsmått såsom ytmodul, SCI/BCI och bärförmågeklass som kan användas i kravformuleringen. Det görs en jämförelse mellan olika mått, dels utifrån ett beräkningsperspektiv och dels utifrån intervjuer med personer med erfarenhet inom branschen. Tre fallviktsmätningar har utförts på en gång- och cykelväg mellan Rinnebäck och Lackalänga i Kävlinge kommun, vilket var den första entreprenaden för Trafikverkets Region Syd med bärighetskrav. Mätningarna utfördes under en två-årsperiod för att studera hur bärigheten har förändrats över tid och i den senast utförda mätomgången genomförs ytterligare mätningar på vägen för att få en bild av vägens bärighet. Utifrån intervjuer lyfts olika aspekter som är viktiga att analysera och fundera kring då det gäller att både utföra fallviktsmätningar och analysera fallviktsdata där faktorer som påverkar mätresultat är exempelvis temperatur och fukt. Trafikverket vill i framtiden kunna specificera en metod för analys av fallviktsdata där temperaturkorrigering ingår vilket ska vara applicerbart för olika bärighetsmått.

Slutsatsen i detta arbete är att olika bärighetsmått bör användas i kravställning beroende på vilken typ av väg (bil- eller cykelväg) som ska byggas, men en gemensam faktor är att formulera kravnivån som ett percentilvärde för att undvika att svagare partier förbises vid besiktning. För normala vägkonstruktioner bör krav ställas på bärförmågeindex eller bärförmågeklass eftersom Trafikverket har en utarbetad metod för att behandla dragtöjning som uppstår i asfalten samt att det går att temperaturkorrigera detta mått. För tunnare vägkonstruktioner såsom gång- och cykelvägar bör andra mått användas och beräknade resultat bör iaktas med försiktighet då Trafikverkets modeller inte är utformade för vägar med tunna beläggningar (<75 mm). Att korrigera mätvärden på grund av fukt i väggroppen är fortfarande ett område som kräver mer forskning då en tydlig metodbeskrivning saknas.

3 Begrepp

AMA - Allmän material- och arbetsbeskrivning. Referensmaterial avsedd för framtagning av teknisk beskrivning.

E-modul - Elasticitetsmodul, en materialparameter som beskriver sambandet mellan spänning och töjning.

GC-väg - Gång- och cykelväg.

Geofon - Sensor som mäter vibration i marken.

Passningsräkning - Metod som iterativt testar värden till dess att resultaten hamnar tillräckligt nära referensvärden.

PMS-objekt - PMS Objekt är ett windowsbaserat verktyg för analys och design av vägöverbyggnader framtaget av Trafikverket.

Statisk plattbelastning - Metod för att mäta bärighet på obundna lager.

Tvärkontraktionstal - Materialparameter som beskriver förhållandet mellan töjning tvärs och längs kraftriktningen.

VTI - Statens väg- och transportforskningsinstitut.

YPK - Yttäckande Packningskontroll. Avsedd för kontinuerlig registrering och dokumentation av fasthet i obundna jord- eller bergmaterial. Packningskontrollen sker med särskild provningsvält

4 Inledning

4.1 Bakgrund

Trafikverket har i en totalentreprenad valt att införa bärighetskrav på en gång- och cykelväg, där krav ställdes på att ytmodulen längs sträckan skulle vara 200 MPa, baserat på fallviktsmätningar (Trafikverket, 2019a). Normalt sett så har entreprenören ett ansvar för vägen funktion under en viss tid, däremot bör vägens livslängd överstiga denna tidsperiod¹. Förhoppningen med att implementera bärighetskrav i totalentreprenader är att livslängden ska öka ytterligare genom att entreprenören ska vara noggrannare med packningsarbetet och att identifiera och åtgärda sämre partier¹. Detta har testats i projektet GC-väg (gång- och cykelväg) Rinnebäck Lackalänga. Erfarenheter från detta projekt tillsammans med åsikter från branschen samt vidare forskning ska ligga till grund till förslag kring hur bärighetskrav kan formuleras i framtiden. Det finns kunskapsbrister i hur fallviktsmätningar ska utföras och analyseras på vägar med tunn beläggning. Responsen som dessa typer av vägar uppvisar vid belastning är inte lika väl dokumenterad som för normala svenska vägkonstruktioner (Trafikverket, 2020). Genom att utreda hur användningen av bärighetskrav fungerade i projektet GC-väg Rinnebäck- Lackalänga samlas ytterligare kunskap inom detta område.

4.2 Syfte och mål

Syftet är att sammanställa erfarenheter gällande fallviktsmätningar och kravformuleringar som olika personer på olika positioner inom vägbranschen har. Med stöd av litteratur, tidigare utförda arbeten samt resultat från fallviktsmätningar diskuteras hur Trafikverket tillsammans med entreprenörer kan arbeta med bärighetskrav i framtiden och fallviktsdata kan tolkas och analyseras, främst för GC-vägar men även för vanliga vägkonstruktioner. Målet med arbetet är att ge vägledning för hur framtida bärighetskrav i totalentreprenader kan utformas

4.3 Frågeställning

- Vilket eller vilka bärighetsmått bör användas?
- Vilket statistiskt mått bör användas för kravställning (medelvärde, minsta värde, percentil etc.)?
- Vilken nivå skall kravet ligga på?
- Skall mätresultaten temperaturkorrigeras och hur?

¹Per Viktorsson, Specialist vägteknik, möte 2022-08-29

4.4 Avgränsningar

Det aktuella projektet som studeras i detta examensarbete är en GC-väg, analysen fallviktsdata gäller inte för alla typer av vägar utan bara för de med tunnare beläggningar (<75 mm). Rekommendationerna för hur bärighetskrav kan utformas gäller endast för totalentreprenader.

Både hur temperatur och fukttinnehåll i vägen påverkar resultat från fallviktsmätningar undersöks, men endast metoder för temperaturkorrigering utvärderas. Detta då det finns tillvägagångssätt för att temperaturkorrigera och i detta arbete studeras fyra olika metoder. Gällande fukttinnehåll finns det inga metoder för att göra korrigeringar och därmed blir görs endast grundläggande analyser kopplade till energiförluster vilket kan kopplas till fukt.

Arbetet bildar en sammanställning av för- och nackdelar för olika val som kan tas vid kravformuleringen samt för temperaturkorrigeringsmetoder. Målet är inte att exakt formulera hur framtida krav ska vara utformade.

5 Objekts- och projektbeskrivning

Den studerade gång- och cykelvägen löper längs väg 108 mellan Rinnebäck och Lackalänga i Kävlinge kommun, Skåne, se Figur 5.1. Den nybyggda vägen ligger delvis helt fristående från befintlig väg och delvis dikt an mot befintlig väg. På sträckan närmast Kävlinge är gång- och cykelvägen belägen på befintlig bilväg, dels på bron över Kävlineån och dels där väg 108 korsar Kvarngatan. Syftet med att bygga denna GC-väg är att skapa en trygg och gen gång- och cykelvägsförbindelse på hela sträckan mellan Lund och Kävlinge (Trafikverket, 2019a). Denna sträcka ska på ett logiskt sätt ansluta till det befintliga gång- och cykelvägsnätverket för att förenkla möjligheten till cykelpendling mellan orterna.



Figur 5.1: Figuren visar hur den nybyggda gång- och cykelvägen löper längs väg 108 mellan Rinnebäck och Lackalänga i Kävlinge kommun

Detta projekt upphandlades som en totalentreprenad där krav på bärighet ställdes uttryckt som ett medelvärde på ytmodulen (Trafikverket, 2019a). Under byggtiden valde entreprenören att beställa fallviktsmätning på det obundna materialet för att undersöka bärigheten och identifiera partier som krävde förstärkningsåtgärder¹. Förstärkningsåtgärnderna bestod både av geonät på terrassen samt att lägga på ett 40 mm tjockare asfaltlager på två partier. Lagermodellen för partierna utan förstärkningsåtgärder såg ut enligt följande¹:

- slitlager ABT 11, B100/150, tjocklek 45 mm,
- obundet bärlager, krossat bergmaterial 0-32, tjocklek 80 mm,
- förstärkningslager, krossat bergmaterial 0-100, tjocklek 280 mm.

Inför slutbesiktning utfördes fallviktsmätning (2020-12-09) för att validera bärigheten på vägen och mätresultatet visade på att bärigheten var lägre än vad som krävdes.

¹Per Viktorsson, Specialist vägteknik, möte 2022-08-29

6 Metodik och metod

Detta arbete baseras på tidigare utförda examensarbeten, kunskap från läroböcker och vetenskapliga artiklar samt från intervjuer med personer med lång erfarenhet från branschen. Data som har använts i rapporten kommer dels från tidigare utförda fallviktsmätningar (2020-12-09 och 2021-06-01) och dels från en ny fallviktsmätning (2022-10-12), även denna mätning genomfördes av Ramboll.

6.1 Litteraturstudie

En litteraturstudie gjordes för att lägga grunden till den teoretiska bakgrunden. Litteraturstudien bestod dels av material som hanterade mer grundläggande fakta kring ämnet vägbyggnad och vägteknik och dels forskning samt tidigare arbeten kring ämnen som bärförmåga, packning och fallviktsmätning. Arbetet fokuserar delvis på projektet GC-väg Rinneback Lackalänga (Trafikverket, 2019a), därmed har det varit nödvändigt att studera dokumentation gällande detta.

Material har hämtats direkt från kurslitteratur, rapporter och skrifter från aktörer inom anläggningsbranschen eller från databaser för akademiskt material (Google Scholar, Digitala Vetenskapliga Arkivet och LUB Search). I dessa databaser har följande sökord använts:

- Fallviktsmätning
- Falling weight deflectometer (engelska för fallviktsmätning)
- Entreprenadformer
- Bärighet
- Bearing capacity
- Moisture content (engelska för fuktinnehåll)
- Packning
- Vägbyggnad
- Belastningshistorik
- Time history (engelska för belastningshistorik)
- Temperaturkorrigering
- Temperature correction (engelska för temperaturkorrigering)

6.2 Intervjuer

Intervjuerna som har genomförts är av semistrukturerad karaktär vilket innebär att den intervjuade personen har fått frågor i förväg som denne ska besvara, men utläggningar och diskussioner uppmuntrades. Även frågor som inte ingår i frågeformuläret kan ställas för att få en djupare diskussion givet att det berör samma ämne (Bryman, 2016). Ett antal personer inom branschen har intervjuats för ytterligare bakgrund och material till diskussionsdelen. Intervjuerna genomfördes över Microsoft Teams och spelades in, de pågick mellan 30-60 minuter. Varje intervju har transkriberats, men innehållet som publiceras är en sammanställning av intervjuaren. De intervjuade personerna är:

- Klas Hermelin, Trafikverket
- Anders Lenngren, AFRY
- Robert Karlsson, Trafikverket
- Harmannus Meninnga, Sweco
- Mika Niittymäki, Sweco
- Fredrik Schéle, Svevia
- Martin Larsson, VTI

Nedan presenteras de frågor som ställdes till vägtekniker och vägspecialister från både konsultbranschen och beställarsidan:

- Varför valdes ytmodul som bärighetsmått i projektet GC-väg Rinneback - Lackalänga?
- För cykelvägar som är tunna konstruktioner, hur väl hade det fungerat att ha SCI som mått på hela vägens bärighet?
- Bör man även sätta ett krav på bärighet för obundna lager eller se till att mer utförliga kontroller görs på obundna lager innan bundet lager läggs på?
- Skulle man kunna använda sig av bärformågeindex istället? Det finns redan en utarbetad metod för att temperaturkorrigera töjningen.
- Hur bör man arbeta med temperaturkorrigering på fallviktsmätningar för andra bärighetsmått?
- Hur ska kravet på bärighet utformas, dvs. ska Trafikverket använda medelvärde, minsta värde, låg percentil etc.?
- Hur ska Trafikverket bestämma vilket numeriskt värde som ska sättas som krav? Ska det utgå från fallviktsresultat från liknande vägar?
- Ska detta krav (numeriska värde) gälla vid slutbesiktning eller först en viss tid efter (med tanke på att bärigheten ökar med tiden), alternativt ska man kravställa ett lägre värde vid slutbesiktning?

- I Trafikverkets metodbeskrivning finns det ingen metod för att hantera fukt i väggkroppen, hur ska man gå tillväga med det?

I samtal med entreprenör fördes samtal gällande deras upplevelse kring att arbeta med bärighetskrav. Nedan presenteras de frågor som ställdes:

- Hur fungerade det att arbeta med bärighetskrav i detta projekt?
- Vad är styrkorna och svaghetererna med bärighetskrav, vad fungerade bra och vad kan bli bättre?

6.3 Datainsamling

Som bakgrund och underlag studerades resultat från fallviktsmätningar utförda på en GC-väg mellan Lund och Kävlinge. Två tidigare mätningar hade utförts på färdigbyggd väg (2020-12-09 samt 2021-06-01) och en mätning gjordes i ett tidigare skede på de obundna lagren (2020-11-20). En av mätningarna (2020-12-09) utfördes när väggkroppen var kall (medeltemperatur beläggning runt 3.0°C), den andra mätningen utfördes ett halvår senare (2021-06-01) och då var beläggningstemperaturen i snitt 17°C . Det ansågs vara av intresse att ytterligare utvärdera kvaliteten på den byggda vägen och validera tidigare mätresultat. Därför beställde Trafikverket ytterligare en fallviktsmätning som utfördes (2022-10-12) av Ramboll. Resultatet från mätningen möjliggjorde ytterligare analys av metod för temperaturkorrigering och hur väl kravställningen fungerade i det studerade projektet.

För att få ytterligare information och kunskap om hur vägen beter sig under belastning släpptes fallvikten på vägytan nio gånger på en punkt vid den senast utförda mätningen. Detta gjordes för att undersöka och utvärdera mätresultat från fallvikten. För en vanlig bilväg sker en viss efterpackning av trafiklasten, men för en cykelväg är trafiklasten så pass låg att effekten av efterpackning kan antas vara försumbar. Med upprepade fallviktslag undersöks om fallviktsapparaten fortfarande packar vägen och detta görs för att kunna validera tidigare mätresultat.

6.4 Databearbetning

Största delen av beräkningarna av bärighetsmått, baserat på deflektionsdata är hämtat från Trafikverkets metodbeskrivning (Trafikverket, 2020). Den beskriver beräkningsgången för centrala bärighetmått såsom ytmodul, undergrundmodul SCI, BCI, bärförmågeindex och bärförmågeklass. Den innehåller även metodbeskrivning för att temperaturkorrigera dragtöjning i beläggningens underkant samt hur passningsräkning av elasticitetsmodul går till. Innan djupare analys av data påbörjas görs en översiktlig undersökning för att utesluta mätvärden som är felaktiga vilket kan göras genom att rita upp deflektionsbassängen för fallviktsmätningen. Enligt Trafikverkets metodbeskrivning ska mätningar uteslutas om följande uppstår (Trafikverket, 2020):

- deflektionsbassängens djup inte minskar successivt i riktning från belastningscentrum,
- ingen deflektion har uppmätts vid en eller flera av givarna,
- en punkt på deflektionsbassängen avviker markant från närliggande punkter,
- deflektionsbassängen har ett onormalt utseende. Detta förekommer ofta i konstruktioner med väsentligt skiftande egenskaper i längdled eller i tvärled precis vid mätpunkten samt vid kraftigt spruckna, skadade och lappade ytor.

Utöver metoden som Trafikverket presenterar studeras tre andra metoder för att temperaturkorrigera deflektionsdata. Två av metoderna gör direkt en korrigerings av deflektionsdata, den ena är framtagen av Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, VTT, som är en finsk statligt finansierad forskningsorganisation (Spoof och Petäjä, 2000a) och den andra är framtagen vid University of Duisberg-Essen i Tyskland av Straube och Jansen (Straube och Jansen, 2009). Den tredje metoden är en modifierad variant av Trafikverkets metod (Sletten, 2022). Både VTTs och Straube och Jansens metod möjliggör att ytmodul kan presenteras för varje mätpunkt från fallviktsmätningen, men temperaturkorrigering enligt både Trafikverkets och den modifierade versionen av Trafikverkets metod är begränsad av *PMS-objekt* då endast ett fåtal punkter kan studeras i taget. För att presentera och jämföra de fyra temperaturkorrigeringsmetoderna valdes fem representativa punkter utifrån homogena sträckor längs GC-vägen. De valdes genom att visuellt studera ytmodulen och hitta sträckor med relativt lika värde. Medelvärde av uppmätta deflektionerna för vardera geofon längs respektive homogeniserad sträcka beräknades och utifrån denna beräkning skapades fem fiktiva punkter. Detta beräkningssteg utförs dels för att hitta en punkt som ska representera hela den homogeniserade sträckan samt för att minimera avvikande värden.

Utöver att studera temperaturens inverkan på mätresultaten och hur detta kan korrigeras för, studerades belastningsförloppet för att undersöka hur varierande fuktinnehåll påverkar mätdata. Denna analys bestod av att undersöka väggkroppens tröghet (tid-deflektionssamband jämförs med tid-lastsamband) samt att energiförluster under belastningsförloppet studeras. Data för att studera belastningsförlopp samlas från fallviktsmätningar, vilket innebär att samma mätningar som ligger till underlag för temperaturkorrigering används för undersökning av fukthalt.

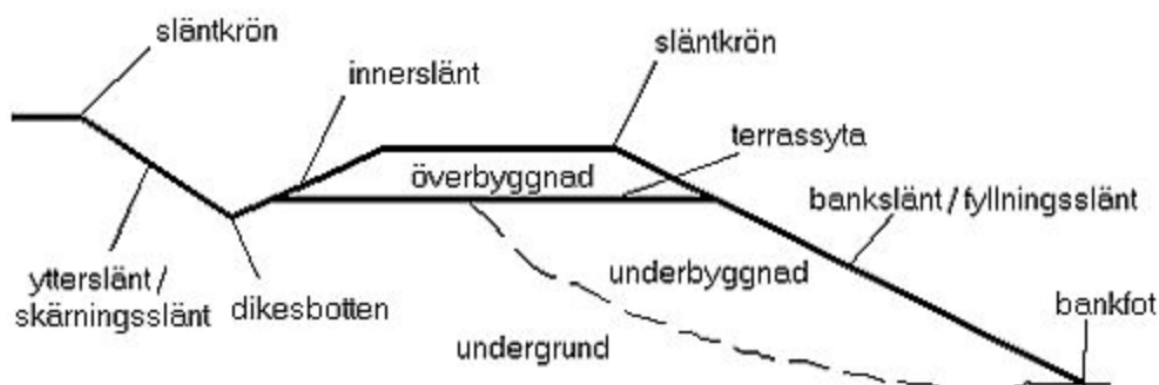
7 Litteraturstudie

7.1 Vägbyggnad

Nedan beskrivs de materiallager som en väg byggs upp med, hur det praktiska arbetet går till samt olika faktorer som påverkar nedbrytningen av en väg.

7.1.1 Vägkroppens uppbyggnad och material

En vägkropp delas in i två delar: överbyggnad och underbyggnad/undergrund, där terrassytan är det som skiljer de två delarna åt (Asfaltskolan, 2022). Gällande benämning av materialet under terrassytan kallas det för undergrund då vägen går i skärning och vid bankfyllnad benämns den underbyggnad. Se Figur 7.1 för en exempelsektion som visar vägkonstruktionens olika delar.



Figur 7.1: Vägkroppens uppbyggnad (Asfaltskolan, 2022)

Överbyggnadens uppgift är att fördela lasterna ner till underbyggnaden på ett sådant sätt att underbyggnadens hållfasthet inte överskrids (Agardh och Parhamifar, 2014). Den skall också säkerställa god komfort och säkerhet för trafikanterna genom att leda bort vatten från vägbanan och tillgodose en jämn yta i både längs- och tvärled.

Ju längre ner i väggkroppen i väggkroppen desto större yta fördelas belastningen över och således krävs det högst bärighet hos materialen längst upp i konstruktionen. Överbyggnaden består av ett antal olika lager. Den vanligaste överbyggnaden i Sverige, grusbitumenöverbyggnad (GBÖ) innehåller:

- Bitumenbundet slitlager
- Bindlager
- Bitumenbundet bärlager
- Obundet bärlager
- Förstärkningslager
- Skyddslager

Slitlager och bindlager är de översta lagren i en väggkonstruktion och deras huvudsakliga uppgift är att ge vägen en jämn yta med god friktion och vattenavrinning (Asfaltskolan, 2022). Under det kommer bitumenbundet bärlager som framför allt ska fördela laster och förhindra deformationer. Det obundna bärlagret ska liksom det bundna framförallt fördela laster. Förstärkningslagret är liksom det obundna bärlagret men skall också vara dränerande och behöver därför bestå av tillräckligt grovt material. Ett skyddslager ingår inte alltid i väggkonstruktioner men används framför allt om underbyggnaden består av tjälfarligt material eller för att förhindra finkornigt material att tränga upp i väggkonstruktionen (Agardh och Parhamifar, 2014).

Bindemedlet som används i de bundna lagren i de flesta svenska vägarna är någon form av bitumen. Bitumen framställs huvudsakligen genom raffinering av petroleum och består till störst del av oljor, kolföreningar och kolväten (Agardh och Parhamifar, 2014). Bindemedlet har ett flertal funktioner (Agardh och Parhamifar, 2014):

- Fungera som smörjmedel vid byggnation av väg
- Fungera som kitt i stenmaterialet
- Skydda väggkonstruktionen från påverkan av klimatet
- Ge beläggningen lastfördelande förmåga
- Ge beläggningen möjlighet att deformera elastiskt

Viskositeten hos bitumen är starkt temperaturberoende där den ökar med ökande temperatur (Agardh och Parhamifar, 2014). Den högsta yttemperatur en väggkonstruktion kan utsättas för i Norden bedöms vara cirka 60°C (Agardh och Parhamifar, 2014). Så pass höga temperaturer kan uppnås på belagda ytor eftersom de absorberar stor del av värmeinstrålningen från solen, en mörk asfaltsyta kan bli upp till 30°C varmare än omgivande lufttemperatur (Di Maria m. fl., 2013). Vid så pass hög temperatur lider

vägkonstruktionen stor risk att deformeras plastiskt. Vid höga temperaturer expanderar bitumenet och om det inte finns tillräckligt med hålrum i konstruktionen kommer bindemedlet pressas upp till ytan, detta fenomen kallas för blödning.

Vid lägre temperaturer blir bindemedlet styvare vilket ökar bärigheten, men det ökar även risken för att skador ska uppstå (Asfaltskolan, 2022). Risken för sprickbildning ökar vid kallare beläggning, dels associerat med upprepade höga belastningar men också s.k. temperatursprickor som bildas när beläggningen krymper och därför utsätts för dragspänningar (Asfaltskolan, 2022).

Bindemedlets egenskaper förändras även över tid vilket påverkar bärigheten på vägen. Studier har visat att ytmodulen ökar med 28-47% från tidpunkten då asfalten läggs ut på vägen till cirka tre till fem år senare och förklaringen till detta är att bitumen härdar över tid och blir styvare, detta benämns som åldring (Vaitkus m. fl., 2021).

7.1.2 Tunna konstruktioner

För att utvärdera bärigheten på en väg och återstående livslängd utförs vanligtvis fallviktsmätningar. Dessa mätningar genererar data som i sin tur ligger till grund för att beräkna olika bärighetsmått där en vanlig parameter som studeras är töjning i underkant av asfaltslagret (Trafikverket, 2021). I kapitlet om belastningshistorik diskuteras inverkan som fukt, temperatur och belastningstid har för inverkan på mätresultaten, men en grundläggande faktor som måste tas i beaktning är lagermodellen som används. Metoderna som presenteras av Trafikverket bygger på bilvägar och lämpar sig för vägar med beläggningar tjockare än 75mm (Trafikverket, 2020). Anledningen till detta är att vägkonstruktioner med tunnare beläggningar beter sig annorlunda. Vid belastning är responsen mer membranliknande och vägytan kan inte betraktas som en styv balk då den inte uppför sig som en sådan. Denna effekt blir ännu tydligare vid varmare temperaturer ($>6^{\circ}\text{C}$), studier visar att då väggroppen belastas kan spänningen minska vilket inte är fallet för en balk som belastas (Papadopoulos och Santamarina, 2016).

7.1.3 Byggnation av väg

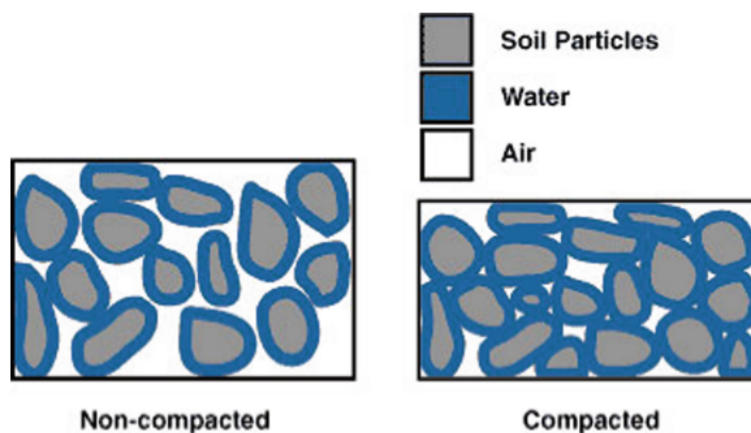
Ytan som beläggningen läggs ut på måste vara förberedd för att uppnå ett acceptabelt slutresultat. De obundna lagrena skall ha en jämn yta, säkerställa fall och tillräcklig stödremsa. Mest avgörande är att de obundna lagren är packade väl (Asfaltskolan, 2022). I en forskningsrapport drogs slutsatsen att ett flertal nybyggda vägars tidiga kvalitetsproblem berodde på otillräcklig packning av de obundna lagren (Hellman, 2011).

Efter att de obundna lagrena i vägen är packade och vägen har rätt profil så kan utläggningen av asfalt börja. Maskinen som gör detta består av en traktordel och en skrid (Asfaltskolan, 2022). Asfaltsmassa från asfaltsbilen töms över till traktordelen som både lagrar det varma materialet och för utläggaren framåt samt transporterar material till skriden. Skriden skall ge vägen en jämn yta med korrekt lutning, korrekt lagertjocklek samt att ge asfaltsmassan en viss packning. Skriden benämns ofta som flytande vilket innebär att nivån som den ligger på är oberoende av traktordelen Syftet

med detta är att skriden arbetar för att jämna ut beläggningsytan genom att fylla ut håligheter och flyta över högre partier (Asfaltskolan, 2022).

När asfalten är utlagd packas den sedan med vält. Tyngden av valserna pressar ihop beläggningen och minskar dess tjocklek. Packningen är det moment under byggprocessen som starkast påverkar slutresultatet, där god utförd packning leder till bättre motstånd mot deformationer och klimat (Asfaltskolan, 2022).

Genom att packa ett material minskar porvolymen vilket i sin tur innebär att skrymdensiteten ökar se Figur 7.2. Med ökad densitet kommer vägen att uppvisa högre bärförmåga (Abdel-Rahman, 2020). Ytterligare positiva effekter av att packa vägen är att hållfastheten ökar samt att vattengenomsläppligheten minskar (Forsblad, 2000).

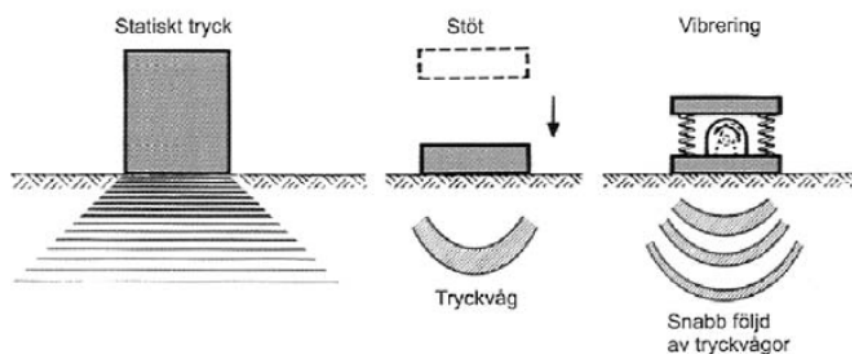


Figur 7.2: Illustrationen visar effekten av att packa ett material med en viss porvolym (Abdel-Rahman, 2020)

. Soil particles: engelska för jordpartiklar, water: engelska för vatten, air: engelska för luft, non-compacted: engelska för icke packat, compacted: engelska för packat.

Studier som har genomförts gällande effekten av packning har visat att packning av ett fyllnadsmaterial bestående av jord eller stenkross kan öka bärigheten med fem till tio gånger jämfört med att samma material är i opackat tillstånd (Forsblad, 2000). Detta är förklaringen till varför det är viktigt att utföra ordentlig packning av de material som ingår i vägkonstruktionen.

Vibrerande packning utförs antingen med vält med vibrerande vals eller vibrationsplatta som med dynamiska belastningar skapar rörelse i fyllnadsmaterialet, vilket ger upphov till en omfördelning av kornmaterialet vilket i sin tur skapar en tätare struktur. Amplituden måste vara tillräckligt låg för att undvika att krossa materialet. Statiskt tryck innebär att packningen utförs av den statiska linjelasten (valsmodulens vikt dividerat med bredden) som uppstår från vältens kontaktyta med vägen (Forsblad, 2000). Faktorerna som främst påverkar packningsresultatet är materialets orten som packas, vattenkvot och packningsmetod, där främst statiskt tryck eller vibrering används vilket illustreras av figur 7.3 (Forsblad, 2000).



Figur 7.3: Illustrationen visar olika metoder för att packa material (Forsblad, 2000)

7.1.4 Faktorer som påverkar deflektion

En vägkonstruktion består av flera olika lager vilket nämnts ovan och dessa påverkas olika av belastningstid, temperatur och fukt. Hur dessa faktorer påverkar responsten vid fallviktsmätningar beskrivs mer i detalj nedan.

7.1.4.1 Belastningstid

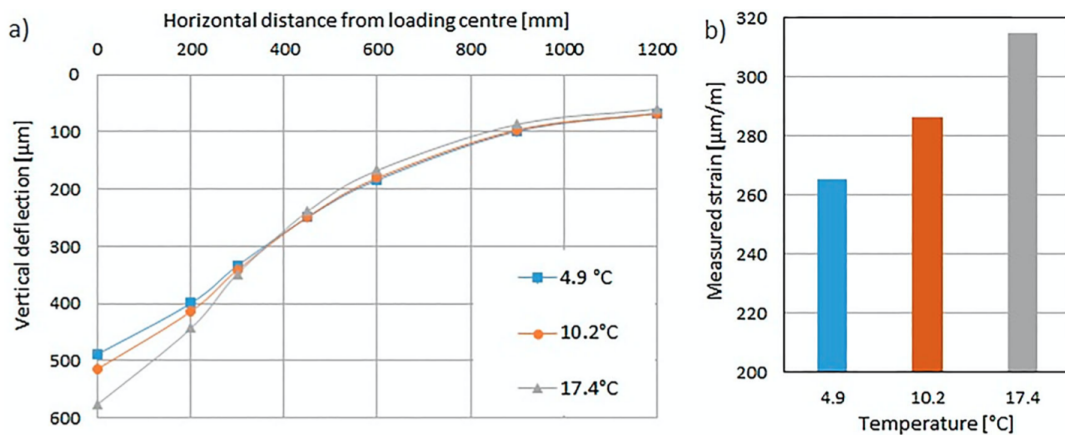
Asfalt är ett trögt material vilket innebär att responsten från en pålagd last inte sker momentant utan den är förskjutet och därmed är deflektionens storlek beroende dels av lasten som läggs på men även den tid då ytan belastas. Belastningstiden för en fallviktsmätning är definierad enligt följande tiden för kraftpuls, räknat från den tidpunkt då kraften stigit till 5% av sitt maxvärde vid pålastning, till den tidpunkt då kraften sjunkit till 10% av maxvärdet vid avlastning (Trafikverket, 2020). Större deformation kommer att registreras i geofonerna vid ökad belastningstid, detta visades redan 1985 av försök gjordes med att låta en lastbil passera en viss punkt vid olika hastigheter och därefter mättes deflektionen i vägbanan (Jansson och Wiman, 1988). Deflektionsbassängen hade samma utseende för bägge överfarterna, men tiden då maximal deformation uppmättes då lastbilen passerade i 26 km/h var 200 ms jämfört med 475 ms då lastbilen körde i 11 km/h, utöver detta uppmättes större deflektioner för den långsammare passagen. Belastningstiden kan styras i fallviktsapparaten, både i val av fjädersystem och last. Pålastningstiden är definierat som den sammanlagda tid under vilken kraften först ökar från 5% av sitt maxvärde till sitt maxvärde och sedan sjunker ned till 95% av sitt maxvärde (Trafikverket, 2020). Enligt Trafikverket ska pålastningstiden vara minst 10 millisekunder och belastningstiden ska ligga mellan 1,8 till 1,5 gånger pålastningstiden (Trafikverket, 2020).

7.1.4.2 Temperatur

Asfaltens temperaturberoende är kopplat till bitumen vilket nämns i kapitlet om vägbyggnad. Bitumen är viskoelastiskt vilket innebär att det har två olika sätt som

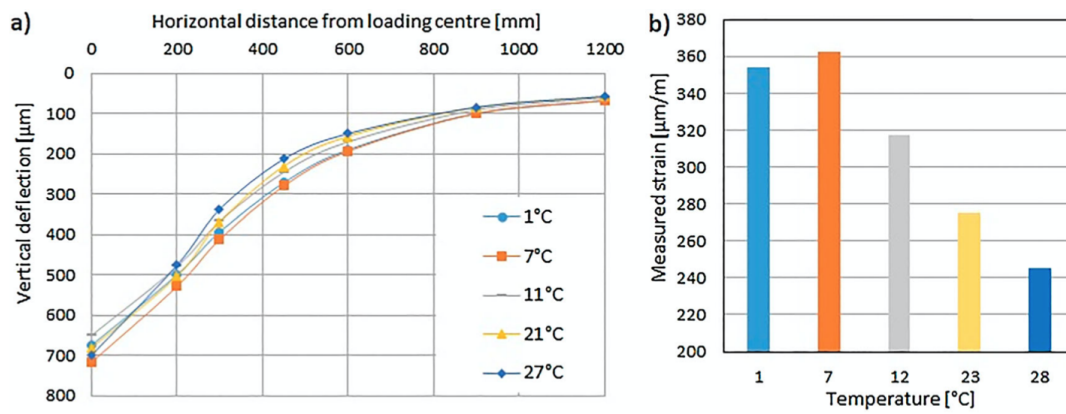
det deformeras på då det utsätts för laster, antingen fjädrar det elastiskt eller flyter det likt en olja (Redelius, 1995). Typen av respons beror på temperaturen samt belastningstiden. Vid låga temperaturer eller vid kort belastning är responsen mer elastisk och tvärtom gäller vid längre belastningstid eller högre temperatur (Redelius, 1995).

Utgångspunkten för att utföra temperaturkorrigering är att mätningar utförs vid olika temperaturer vilket får till följd att olika kraftiga deflektioner erhålles. Figur 7.4a visar korrelationen mellan temperatur och belastning för en normal svensk vägkonstruktion (150 mm beläggning), vid stigande temperatur uppmäts ökad centrumdeflektion. På liknande vis ökar spänningen i asfaltens underkant linjärt med ökande temperatur enligt Figur 7.4b (Sulejmani m. fl., 2021).



Figur 7.4: a) Deflektionsbassäng för fallviktsmätningar gjord på en normal vägkonstruktion vid olika temperaturer. b) Uppmätt horisontal spänning i underkant av asfaltlagret (Sulejmani m. fl., 2021).

För en väg med tunnare beläggning (70 mm bundet material) ser sambanden annorlunda ut (Figur 7.5). Centrumdeflektionen ökar från 676 till 716 µm då temperaturen ökade från 0,1°C till 6,6°C och på liknande vis ökade dragspänningen i asfaltens underkant mellan mätningarna i detta temperaturintervall. Men för mätningar vid högre temperatur uppvisades ett annat mönster, där dragspänningen i asfaltens underkant minskade vid ökande temperatur. De uppmätta centrumdeflektionerna minskade eller var på samma nivå vid ökande temperatur (>6°C) vilket skiljer sig från beteendet i tjockare konstruktioner (Sulejmani m. fl., 2021).



Figur 7.5: a) Deflektionsbassäng för fallviktsmätningar gjord på en tunn vägkonstruktion vid olika temperaturer. b) Uppmätt horisontal spänning i underkant av asfaltslagret (Sulejmani m. fl., 2021).

7.1.4.3 Fukt

Fuktinnehållet i väggroppens obundna lager påverkar vägens bärighet då vattnet förändrar de mekaniska egenskaperna i de obundna materialen (terrass, förstärkningslager samt bärlager). Forskning visar att 80% av de skador och problem som uppstår i beläggningen kan härledas till att vatten finns närvarande i obundna lager och/eller i terrassen (Birgisson och Ruth, 2003). För upprepade belastningar på fuktig väggropp kan porvattentrycket öka i de obundna materialen vilket har följande effekter: den effektiva spänningen minskar i de obundna material vilket i sin tur minskar styvheten och därmed motståndet mot permanenta deformationer (Vaitkus m. fl., 2019).

Studier visar att fuktinnehållet i undergrunden påverkar töjningar och deflektioner som uppstår i asfaltslager vid belastning. I ett försök genomfört på VTI justerades grundvattennivån från att ligga på ett stort djup under terrass, utan någon lateral förflyttning av vatten genom lager till att ligga 30 cm under terrassnivå (Sulejmani m. fl., 2021). Resultatet från detta försök visade att den höjda grundvattennivån hade större påverkan på töjningar och deflektioner i asfaltslagret än då temperaturen ökade från 9°C till 18,5°C.

7.1.4.4 Permanent deformation

Belastning på vägytan resulterar dels i en elastisk respons där deformation endast är tillfällig och dels i en plastisk respons där deformationen är permanent. Faktorer som påverkar den plastiska responsen är bland annat töjningsgraden, antalet belastningar, fuktinnehåll och densitet (Lekarp m. fl., 2000). Tester med triaxialapparat på en provkropp utsatt för upprepade belastningar har visat att större plastiska töjningar inte uppstår förrän materialet närmar sig brottsgränsen för statiskt brott, alltså vid ett högt antal belastningar.

7.2 Entreprenadformer och kravställning

Nedan läggs fokus på de upphandlingsformer som berör arbetet samt hur krav formuleras vilket ligger till grund för hur entreprenören ska dimensionera och bygga.

7.2.1 Totalentreprenad

Organisatoriskt är denna entreprenadform väldigt enkel då beställaren endast ingår ett avtal vilket omfattar både projektering och byggande (Söderberg, 2013). Entreprenören svarar för att genomföra och bygga enligt gällande regler, lagar och krav som har ställts i förfrågningsunderlaget. Totalentreprenader har visat sig ge billigare byggnader/anläggningar jämfört med andra entreprenadformer då ansvaret ligger hos entreprenören att finna de billigaste lösningarna (Söderberg, 2013). Risken är dock att entreprenören endast uppfyller krav som är angivna och inget mer. Förfrågningsunderlagets krav måste därmed vara utformade på ett vis som gör det tydligt att rätt kvalitet kommer att uppnås. Vid slutbesiktning behandlas brister och felaktigheter endast med en part oavsett om det gäller utförande eller projektering. Entreprenören har ett funktionsansvar under både byggnation och garantitid enligt kontrakt som vanligtvis brukar uppgå till tio år (Byggandets kontraktskommitté, 2007).

7.2.2 Funktionsentreprenad

Denna upphandlingsform tar till skillnad från en totalentreprenad hänsyn till brukandeperioden av byggnadsverket, det vill säga drift och underhåll (Söderberg, 2013). I anbudsskedet tävlar entreprenörerna att lämna lägsta pris för att vinna upphandlingen, men i anbudet ska bästa totala funktion tas hänsyn till. Denna upphandlingsform kommer från att beställare ofta har svårt att uppskatta drifts- och underhållskostnader och med denna upphandlingsform läggs ansvar på entreprenören att bygga med hög kvalitet att drift och underhållskostnader hålls nere eftersom entreprenören själv svarar för att utföra detta arbete. Den bakomliggande tanken är dels att byggnader och anläggningar ska uppföras med högre kvalitet, men även att det ska bli enklare för beställare att värdera anbud (Nilsson och Ihs, 2006).

I praktiken innebär det att alla anbud som kommer in från entreprenörer till beställare ska uppfylla samma krav och funktioner som efterfrågas i förfrågningsunderlaget och om något anbud är avvikande lämnas det in som ett sidobud, dvs. egna förslag på lösningar (Nilsson och Ihs, 2006). För att undersöka om det upprättade byggnadsverket uppfyller kraven som är ställda i förfrågningsunderlaget utförs mätningar och besiktningar både vid färdigtällandeskedet och löpande under funktionstiden. Ett bonus- och vitesystem har upprättats där entreprenören får bonus om funktionen på byggnadsverket överträffar kravet och på motsvarande vis får de betala ett vite om funktionen är bristfällig (Nilsson och Ihs, 2006).

En totalt renodlad variant av funktionsentreprenad skulle innehålla projektering, produktion samt drift och underhåll (Söderberg, 2013). Det krävs att beställaren ställer tydliga krav i förfrågningsunderlaget samt att uppföljning görs i form av revision av entreprenörens kvalitetssystem, tillståndskontroller eller besiktningar.

7.2.3 Kravställning

På grund av hur totalentreprenader är utformade där entreprenören tar på sig ansvaret för projekteringen är förfrågningsunderlaget mer begränsat än vid traditionella utförandentreprenader (Ekblad och Lundström, 2020). Två viktiga dokument i förfrågningsunderlaget är administrativa föreskrifter (AF) och teknisk beskrivning (TB).

I AF-delen hanteras ämnen som exempelvis garantitid, bonus, vite och indexreglering (Ekblad och Lundström, 2020). Alla tekniska krav finns i den tekniska beskrivningen tillsammans med förutsättningar för dimensionering som exempelvis trafikbelastning och dess ingående parametrar.

Vid slutbesiktning i samband med öppning av vägen utvärderas totalentreprenaden huvudsakligen baserat på vägens funktion. Funktionskraven utvärderas kontinuerligt under garantitiden vilken typiskt inte sker vid utförandentreprenader. Typiska funktionskrav som ställs och sedan utvärderas är vägens tvärfall och vägytans jämnhet i både längs- och tvärled (Ekblad och Lundström, 2020).

7.2.4 När ska kravet vara uppnått?

Varje projekt är unikt. Förutsättningar, möjligheter och krav skiljer sig åt mellan olika projekt. Detta innebär att krav som formuleras kommer att vara anpassade till just det projektet som de är ämnade för. För kvalitetskontroll av vägen då bärförmåga ska undersökas bör det specificeras när kravet på bärförmåga ska vara uppnått. I Sverige är detta inte styrt i varken AMA eller Trafikverkets dokument, men i Finland har tydliga gränser satts upp (Destia, 2020). Det går att läsa av Tabell 7.1 vilken bärförmåga som ska vara uppnådd samt minimitjocklek på asfaltslagret vid olika tidpunkter och detta relateras till ett visst antal standardaxlar. Denna metod sätter krav på att de obundna lagren ska mätas innan bundna lager läggs ovanpå och om kravet inte är uppnått måste ytterligare förstärkning göras. Tabell 7.1 gör även gällande vad minimitjockleken av bundet material ska vara vid vägöppning, två år senare samt sex år senare. Det adderas alltså på ytterligare bundet material på vägen löpande under från och med att vägen öppnas för trafik.

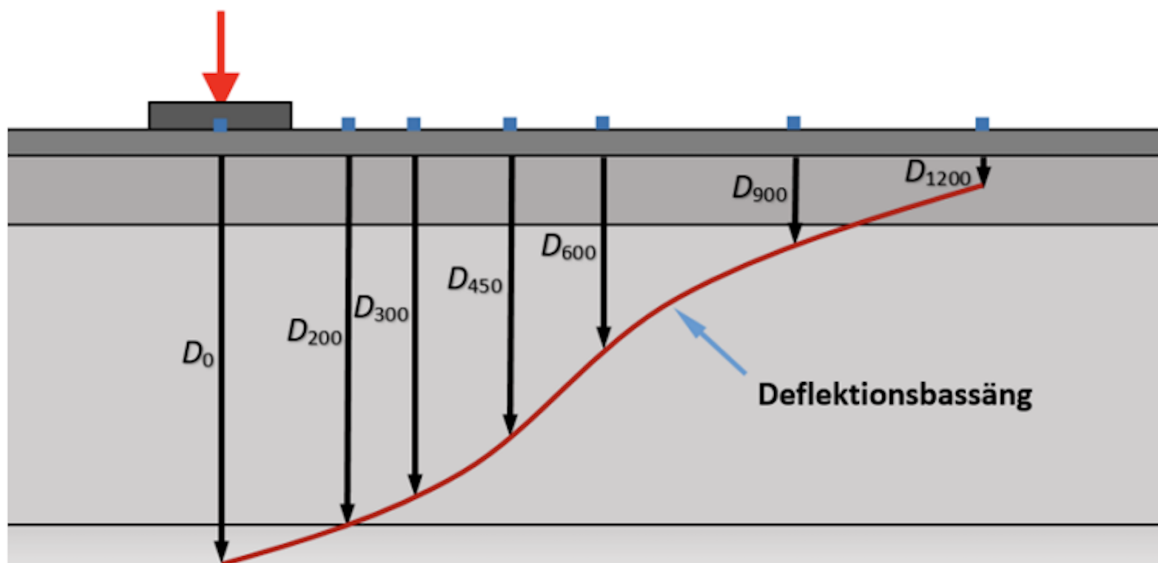
Tabell 7.1: Bärformåga och tjocklek på asfaltlager beroende på trafikmängd (Destia, 2020)

| Bärformågekategori (miljoner standardaxlar /20 år) | 60,0 | 25,0 | 10,0 | 5,0 | 2,0 |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Bärformåga, obundet material | 160 MPa | 160 MPa | 160 MPa | 160 MPa | 160 MPa |
| Minsta asfaltstjocklek vid trafiköppning för vägen. | 160 mm | 120 mm | 90 mm | 60 mm | 60 mm |
| Minsta asfaltstjocklek senast två år senare | 200 mm | 160 mm | 130 mm | 100 mm | - |
| Minsta asfaltstjocklek senast sex år senare. Bärformåga | 240 mm 525 MPa | 200 mm 470 MPa | 170 mm 415 MPa | 140 mm 360 MPa | 100 mm 285 MPa |

7.3 Fallviktsmätning

Fallviktsmätning är en icke-förstörande metod för att undersöka vägkonstruktioners bärighet och därigenom dimensionera underhållsåtgärder och utvärdera tidigare genomförda bärighetsåtgärder. Metoden går ut på att simulera en belastning på vägen motsvarande en överfart med ett lastbilshjul med hjälp av en s.k fallviktsapparat. Belastningen åstadkoms genom att en vikt faller på ett fjädersystem kopplat till en belastningsplatta som överför lasten till väggroppen. Varje mätpunkt ska belastas minst två gånger, där det första slaget avser att säkerställa att kontakt mellan belastningsplatta och vägyta är god. Enligt metodbeskrivningen får inte kvoten mellan centrumdeflektion för två upprepade mätslag i samma mätpunkt överstiga 5% (Trafikverket, 2020). Är detta kriteriet inte uppnått görs ytterligare slag tills kravet är uppnått. För god framdrift längs mätobjektet startar varje mätserie med att dubbla slag utförs efter sättningslaget i de tio första punkterna, därefter utförs två upprepade mätslag i var tionde mätpunkt. Vägytans deflektion mäts sedan precis under belastningsplattans centrum och vid bestämda avstånd med hjälp av ett antal geofoner. I Trafikverkets metodbeskrivning är det specificerat att belastningen skall vara 50 kN och avstånden till givarna skall vara vid belastningsplattan samt 200, 300, 450, 600, 900 och 1200 mm från belastningscentrum om inte annat är beslutat (Trafikverket, 2020). Utöver belastning och deflektion mäts även beläggnings och omgivningens temperatur. Fallviktsmätningar kan även utföras på kraftigare konstruktioner såsom landningsbanor på flygfält, men eftersom en landningsbanas konstruktion är kraftigare än en bilväg samt att trafiklasten är högre utförs mätningarna med tung fallvikt (HWD: Heavy falling Weight Deflectometer). Belastningen ska överstiga 100 kN för att tillräckliga deflektioner ska kunna uppmätas på landningsbanan (Carlsson, 2004).

Belastningen från fallviktsapparaten deformerar väggroppen och genom att analysera deflektionsdata kan en s.k deflektionsbassäng bildas enligt Figur 7.6, där bassängens utseende beror på de underliggande materialens styvhet. Deflektionen under belastningsplattan (centrumdeflektionen) beror på styvheten hos alla underliggande lager i konstruktionen, samt terrassens styvhet. De geofoner som är placerade längst ut från centrum påverkas främst av styvheten i konstruktionens underbyggnad eller terrass. Vanligtvis görs en förenkling utifrån beräkningar och empiriskt framtagna samband som gör gällande att geofonen som är placerad X mm ifrån centrum (horisontellt avstånd) mäter nedsjunkningen på X mm nedåt (vertikalt) i konstruktionen. Korrelationen mellan horisontellt avstånd och vertikalt djup (röd linje i Figur 7.6) innebär att det går att få en uppfattning om hur ett materiallager på ett visst djup beter sig under belastning genom att placera geofoner på bestämda avstånd från belastningscentrum. Med hjälp av att mäta deflektioner vid olika avstånd kan mått på bärighet i olika delar av konstruktionen beräknas.



Figur 7.6: Deflektionsbassäng orsakad av fallvikt (Trafikverket, 2020)

Fallviktsapparaten kommer inte att belasta vägen med exakt 50 kN varje gång utan en avvikelse upp till 5% är tillåtet (Trafikverket, 2020). Därför måste de faktiska lasterna normaliseras till 50 kN. Relationen mellan belastning och deflektion behandlas som om den är helt linjär och normaliseras därför genom att beräknar en korrigeringsfaktor som en kvot mellan 50 kN och aktuell last och multiplicerar med deflektionerna (Vägverket, 2000).

Genom att studera deflektionerna beräknas de enklaste bärighetmått där mindre deflektion är en indikation på högre styvhet. Deflektionen direkt under belastningsplattan, D_0 , kan användas som ett översiktligt mått för styvheten för hela konstruktionen. Surface Curvature Index, SCI , är ett mått på styvheten hos vägkonstruktionens övre lager och beräknas genom att subtrahera deflektionen vid 300 mm från deflektionen under belastningsplattan enligt: $SCI = D_0 - D_{300}$. Likt SCI finns måttet Base Curvature Index, $BCI = D_{300} - D_{600}$ samt Base Damage Index, $BDI = D_{600} - D_{900}$, som beskriver styvheten i konstruktionens mellersta respektive nedersta del (Trafikverket, 2020).

7.3.1 Elasticitetsmoduler

Som bärighetsmått kan elasticitetsmoduler beräknas för olika delar av vägkonstruktionen. Ytmodulen, E_0 , är ett mått där deflektionen under belastningscentrum D_0 används och beräkningen baseras på en förenkling där materialet under vägytan ses som ett homogent lager som sträcker sig oändligt långt nedåt. Ytmodulen beräknas enligt Ekvation 7.1:

$$E_0 = \frac{1000 \cdot f \cdot (1 - v^2) \cdot \sigma_0 \cdot a}{D_0} \quad (7.1)$$

där:

$f = 2$ om belastningsplattan är segmenterad och $f = \frac{\pi}{2}$ om belastningsplattan är styv, v är tvärkontraktionstalet. Normalt satt till 0,35 om inte annat anges,

σ_0 är kontaktrycket under belastningsplattan i MPa,

a är belastningsplattans radie i mm,

D_0 är deflektionen under belastningsplattan i μm .

Med måttet medelmodul, E_r , beskrivs styvheten nedåt från olika djup motsvarande avstånden mellan belastning och givare. Medelmodulen beräknas med Ekvation 7.2:

$$E_r = \frac{1000 \cdot (1 - v^2) \cdot \sigma_0 \cdot a^2}{r \cdot D_r} \quad (7.2)$$

där:

v är tvärkontraktionstalet. Normalt satt till 0,35 om inte annat anges,

σ_0 är kontaktrycket under belastningsplattan i MPa,

a är belastningsplattans radie i mm,

r är avståndet från givaren till belastningspunkt i mm,

D_0 är deflektionen under belastningsplattan i μm .

Sista elasticitetsmodulen som kan beräknas enligt Trafikverkets metodbeskrivning är undergrundsmodulen, E_u . Där används deflektionen, 900 mm från belastningspunkten och det bedöms att endast undergrundens styvhet påverkar på det djupet (Trafikverket, 2020). Undergrundsmodulen beräknas med Ekvation 7.3:

$$E_u = \frac{5,2 \cdot 10^4}{D_{900}^{1,5}} \quad (7.3)$$

där:

D_{900} är deflektionen vid givaren placerad 900 mm från belastningspunkten.

7.3.2 Bärförmågeindex och Bärförmågeklass

Metodbeskrivningen innehåller ytterligare två mått för att klassa vägens bärförmåga. Det första är bärförmågeindex, BI , och det tillsammans med antalet standardaxlar på vägen används för att beräkna vägens bärförmågeklass.

Det första steget vid beräkning av bärförmågeindex är att beräkna dragtöjningen i underkant av vägens beläggning enligt Ekvation 7.4:

$$\varepsilon_{a,T} = 37,4 + 0,998 \cdot D_0 - 0,554 \cdot D_{300} - 0,502 \cdot D_{600} \quad (7.4)$$

där:

D_0 är deflektionen under belastningsplattan i μm ,

D_{300} är deflektionen 300 mm från belastningsplattan i μm ,

D_{600} är deflektionen 600 mm från belastningsplattan i μm .

Den beräknade dragtöjningen skall sedan temperaturkorrigeras till motsvarande vid +10°C enligt Ekvation 7.5:

$$\varepsilon_{a,10} = \frac{\varepsilon_{a,T}}{(T/10)^{3.08 \cdot 10^{-8} \cdot h_1^2 \cdot D_0}} \quad (7.5)$$

där:

$\varepsilon_{a,T}$ är dragtöjningen i beläggningsens underkant vid temperaturen T och anges i μ -strain,

T är beläggningstemperaturen i °C,

h_1 är beläggningstjockleken i mm,

D_0 är deflektionen under belastningsplattan.

Metoden som presenteras gällande temperaturkorrigerade asfaltstövningar kräver alltså deflektionsdata från D0, D300, D600, uppmätt temperatur samt beläggningstjocklek. Det bör noteras att beräkningsmässigt går denna metod inte att använda vid minusgrader för att beräkna töjning (detta kommer att generera negativa värden på töjningen) och därmed bärförmågeindex, samt att mätresultatet blir osäkert då temperaturen närmar sig 0°C. (Trafikverket, 2019b)

Bärförmågeindexet beräknas sedan enligt Ekvation 7.6:

$$BI = \frac{1000}{\varepsilon_{a,10}} \quad (7.6)$$

där:

$\varepsilon_{a,10}$ är den temperaturkorrigerade dragtöjningen.

Bärförmågeklassen bestäms sedan med hjälp av Figur 7.7.

Denna metod baseras på dragtöjningen i underkant vid en viss temperatur. Värt att nämna är att det är typiskt så vägar dimensioneras i Sverige och även i många andra länder (Trafikverket, 2021). Principen baseras på det antal standardaxlar som de bundna lagren klarar av (Trafikverket, 2011), vilket beror på dragtöjningen i de bundna lagrens underkant. Antalet tillåtna standardaxlar för bitumenbundet bärlager under en given klimatperiod, (i), beräknas enligt Ekvation 7.7:

$$N_{bb,i} = f_s \frac{2.37 \cdot 10^{-12} \cdot 1,16^{(1,8 \cdot T_i + 32)}}{\varepsilon_{bb,i}^4} \quad (7.7)$$

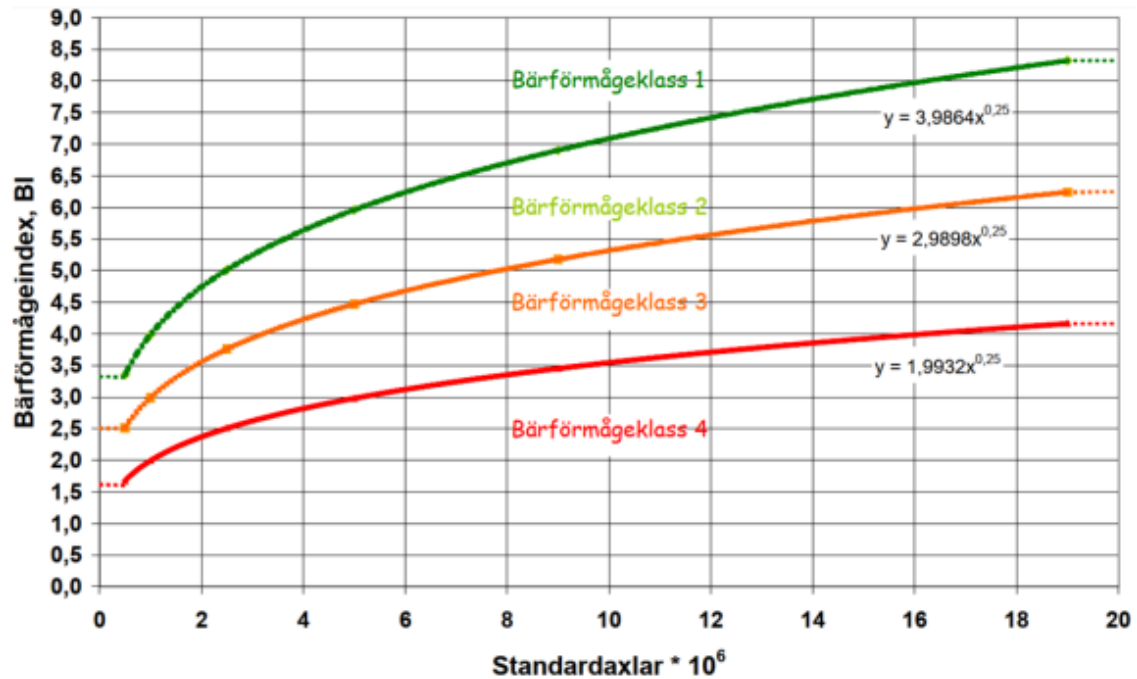
där

f_s är en korrigeringsfaktor med avseende på vägens tillstånd, där $f_s = 1$ vid nybyggnation,

$\varepsilon_{bb,i}$ är största horisontella dragtöjning i bitumenbundet bärlager för en klimatperiod, i vid belastning av en standardaxel,

T_i Beläggningstemperatur i °C i bitumenbundet bärlager.

Anledningen till denna dimensioneringsmetodik är att stor dragtöjning i underkant av de bundna lagren är en bidragande faktor till sprickbildning i vägen (Jansson och Said, 2001).



Figur 7.7: Bärighetsklass beroende på bärformågeindex, BI , och antalet standardaxlar (Trafikverket, 2020)

7.3.3 Passningsräkning och temperaturkorrigering enligt Trafikverkets metod

Om lagermodellen för vägkonstruktionen finns att tillgå kan elasticitetsmoduler för konstruktionens olika lager beräknas med hjälp av passningsräkning. Metoden bygger på att elasticitetsmoduler antas för varje lager baserat på generella värden för de ingående materialen. Från detta beräknas de deflektioner som skulle uppstå vid en fallviktsmätning och jämförs med deflektioner från en riktig fallviktsmätning. Sedan ändras elasticitetsmodulerna iterativt tills att skillnaden mellan beräknade och uppmätta deflektioner är tillräckligt liten (Trafikverket, 2020).

Lagermodellen skall innehålla ingående lagrens tjocklek, antagna elasticitetsmoduler, tvärkontraktionstal samt djup till eventuellt berg. Lagertjocklekar i vägkonstruktionen hämtas från provhål, georadarundersökningar eller relationshandlingar. Metoden har några begränsningar, nämligen att beläggningens tjocklek skall vara minst 75 mm och de obundna lagren (bärlager, förstärkningslager) betraktas beräkningsmässigt som ett homogent lager om inte varje enskilt lager har en tjocklek som överstiger 100 mm, de kan då separeras och modellen får fyra lager (Trafikverket, 2020). Det understa lagret i modellen är undergrunden och detta lager har stor inverkan på vilka elasticitetsmoduler som beräknas. Fast berg är styvt och kommer att ge en hög ytmodul på vägen om det ligger nära vägens yta och motsatt resultat erhålles om exempelvis torv, som har låg styvhet ligger nära ytan. I Trafikverkets metodbeskrivning behandlas undergrunden som ett homogent lager som vilar på styvt skikt cirka 3 meter nedanför vägytan (Trafikverket, 2020). Detta styva skikt används i beräkningsmodellen för att få realistiska värden på elasticitetsmodulen och att skillnaden mellan beräknade och uppmätta värden ska stämma överens bättre. För ytterligare bedömning av det styva skiktets

position kan en beräkning göras där data extrapoleras för att bestämma djupet på det styva skiktet. Fås orealistiska värden på elasticitetsmoduler, dvs mycket högre eller lägre värden än beskrivet i TRVK väg (Trafikverket, 2011) efter passningsräkning eller om beräknade deflektioner stämmer dåligt överens med uppmätta bör antingen en annan lagermodell användas eller övervägas om den insamlade datan kan vara felaktigt uppmätt.

Datorprogrammet PMS Objekt väljer startvärden på E-moduler för modellens olika lager, men Trafikverket har även tagit fram intervall för vad de olika materialen ska ligga inom (Trafikverket, 2011). Dessa värden fungerar som referensintervall för att bedöma rimligheten i de beräknade värdena. Ytterligare kontroll som görs av resultatet är att beräkna ett kvadratisk medelvärde (RMS, Root Mean Square), vilket är en jämförelse mellan uppmätt och beräknad deflektionsbassäng. Detta värde bör ligga runt 1%, och överstiger det 3% anses resultatet inte vara tillförlitligt och detta bör tydligt markeras (Trafikverket, 2020). kvadratisk medelvärde (*RMS*) beräknas enligt Ekvation 7.8:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \times 100 \quad (7.8)$$

där:

d_{ci} är beräknad deflektion vid givare i i μm ,

d_{mi} är uppmätt deflektion vid givare i i μm ,

n är antal använda givare.

Faktorer som påverkar vägens styvhet (E-modul) är både temperatur och frekvens (belastningstid) där Trafikverkets metod hanterar enbart det sistnämnda (Trafikverket, 2020). Ökande temperatur ger lägre E-moduler eftersom bitumen blir mer visköst. Trafikverket presenterar en metod för att justera det beräknade E-modulsvärdet från passningsräkningen så att det gäller vid en standardiserad temperatur, 10°C . För att kunna göra detta skall elasticitetsmodulen vid 10°C först beräknas och därefter beräknas elasticitetsmodulen vid rådande beläggningstemperatur (uppmätt på plats) enligt Ekvation 7.9:

$$E_T = 1.79 \cdot 10^4 \cdot e^{(-0,071 \cdot T)} \quad (7.9)$$

där:

T är beläggningens medeltemperatur i djupled i $^\circ\text{C}$.

När dessa moduler är beräknande kan den beräknade elasticitetsmodulen temperaturkorrigeras enligt Ekvation 7.10:

$$E_{justerad} = E_{10} - (E_T - E_{passnings.}) \quad (7.10)$$

där

E_{10} är elasticitetsmodulen vid 10°C i MPa,

E_T är elasticitetsmodulen vid rådande beläggningstemperatur i MPa,

$E_{passnings.}$ är den beräknade elasticitetsmodulen i MPa.

7.3.4 Andra metoder för temperaturkorrigering av fallviktsdata

Här presenteras andra metoder för temperaturkorrigering utöver de presenterade i Trafikverkets metodbeskrivning för fallviksmätning.

7.3.4.1 Modifierad version av Trafikverkets temperaturkorrigering

Detta är en modifierad variant av temperaturkorrigeringen beskriven Trafikverkets metodbeskrivning, då den teoretiska kurvan baseras på de uppmätta värdena istället för att vara konstant (Sletten, 2022). Detta leder till att den korrigerade E-modulen aldrig kan vara negativ, givet att mätningen utfördes vid temperaturer $>0^{\circ}\text{C}$. Motiveringen till att göra korrigeringen på detta vis är att alla värden får procentuellt lika stor förändring och inte numeriskt lika stor förändring. Därefter beräknas både deflektioner och dragtöjning på samma vis som beskrivet i Trafikverkets metod (Sletten, 2022). Se Ekvation 7.11 och 7.12 för beräkningsgång:

$$E_{justerad} = k \cdot e^{(-0,071 \cdot T_{ref.})} \quad (7.11)$$

$$k = \frac{E_{passnings.}}{e^{-0,071 \cdot T}} \quad (7.12)$$

där:

T_{ref} är referenstemperaturen som elasticitetsmodulen ska korrigeras för,

T är den uppmätta beläggningstemperaturen vid mätningen,

$E_{passnings.}$ är den beräknade elasticitetsmodulen i MPa.

7.3.4.2 Straube och Jansens metod

Följande metod har arbetats fram av Straube och Jansen (Straube och Jansen, 2009) och den är framtagen för klimatförhållanden som råder i Tyskland och vägtyper som används där. Metoden bygger på empiriska samband och mätningar är genomförda under olika årstider och fallviktsmätningarna är utförda då beläggningstemperaturen varierar mellan 5°C till 30°C. Det är främst två sträckor som har undersökts och de ligger 94 km från varandra och de skiljer sig åt främst genom att beläggningstjockleken på den ena vägen är 20 cm och på den andra är den 28 cm. Temperatursensorer har installerats i beläggningen genom att borrhärdar plockades ut och sensorer monterades innan borrhärdarna lades tillbaka i vägen och toppytan tätades för att ge ytan samma struktur som resterande beläggning. Dessa sensorer loggar temperaturen i beläggningen kontinuerligt över tid vilket leder till en mer precis temperaturangivelse då olika bärighetsparametrar ska beräknas samt att det möjliggör enklare planering av när det är lämpligt att genomföra fallviktsmätningar. Fallviktsmätningarna utfördes först med att en 50 kN last släpps tre gånger, följt av att en 90 kN last släpps tre gånger och för varje belastning mäts deflektioner.

Analysen av de utförda fallviktsmätningarna i detta försök visade att beläggningstjockleken i relation till temperatur inte hade stor påverkan på temperaturkorrigeringsfaktorn. Deflektionerna blev större för objektet med tunn beläggning (objekt 1, 22 cm), men den relativa skillnaden visade sig vara liknande.

De olika fallviktsmätningarna utförda vid olika beläggningstemperaturer visar att deflektionerna nära belastningscentrum påverkas av temperatur men att denna påverkan minskar med avstånd från belastningscentrum. Analysen påvisar att det finns en korrelation mellan beläggningstemperatur och deflektion för att dra slutsatsen att all uppmätt data fram till geofon D600 ska temperaturkorrigeras. För resterande geofoner antas effekten av förändrad temperatur vara försumbar

Författarna till rapporten har tagit fram en ekvation (Straube och Jansen, 2009) för att beskriva hur uppmätt deflektion ska korrigeras beroende på temperatur enligt Ekvation 7.13.

$$D_{20,i} = (a - b \cdot T) \cdot D_{T,i} \quad (7.13)$$

där:

$D_{20,i}$ är deflektionen vid geofonens position i vid +20°C,

a, b är faktorer som beror på:

- geofonens position,
- beläggningstemperaturen (<20°C eller >20°C),
- Om det är stora eller små deflektioner, kriterie som beror på geofonens position eller beläggningstemperaturen (om $T < +20^\circ\text{C}$),

T är beläggningstemperaturen (°C) på 5 cm djup,

$D_{T,i}$ är den uppmätta deflektionen vid beläggningstemperaturen T vid geofon i .

Denna ekvation används för att beräkna temperaturkorrigerade deflektioner utifrån given fallviktsdata. För varje korrigerad punkt måste hänsyn tas till geofonens position, beläggningstemperaturen samt om deflektionerna är stora eller små (definierat utifrån respektive geofon). Se Tabell 7.2 nedan för att bestämma faktor a och b .

Tabell 7.2: Tabell för att bestämma faktorerna *a* respektive *b*, vilka beror på geofonens position, om det är stora eller små deflektioner samt temperaturen (Straube och Jansen, 2009)

| Kriterier | Geofonens position | Faktor <i>a</i> | Faktor <i>b</i> | |
|--|---------------------------|------------------------|------------------------|--------|
| Asfaltstemperatur <20°C (stora deflektioner) | om > 140 µm | 1 @ 0 mm | 1,3052 | 0,0152 |
| | om > 130 µm | 2 @ 200 mm | 1,2784 | 0,0139 |
| | om > 120 µm | 3 @ 300 mm | 1,2317 | 0,0115 |
| | om > 110 µm | 4 @ 450 mm | 1,1779 | 0,0089 |
| | om > 100 µm | 5 @ 600 mm | 1,1158 | 0,0058 |
| Asfaltstemperatur <20°C (små deflektioner) | om ≤ 140 µm | 1 @ 0 mm | 1,5183 | 0,0259 |
| | om ≤ 130 µm | 2 @ 200 mm | 1,4308 | 0,0215 |
| | om ≤ 120 µm | 3 @ 300 mm | 1,3102 | 0,0155 |
| | om ≤ 110 µm | 4 @ 450 mm | 1,3131 | 0,0156 |
| | om ≤ 100 µm | 5 @ 600 mm | 1,2392 | 0,0122 |
| Asfaltstemperatur >20°C | | 1 @ 0 mm | 1,3005 | 0,0153 |
| | | 2 @ 200 mm | 1,2713 | 0,0137 |
| | | 3 @ 300 mm | 1,2709 | 0,0133 |
| | | 4 @ 450 mm | 1,2303 | 0,0110 |
| | | 5 @ 600 mm | 1,6000 | 0,0077 |

7.3.5 VTTs metod

Denna metod är utvecklad av Teknologiska forskningscentralen VTT i Finland. Förutsättningarna gällande temperatur som skall råda för att genomföra dessa mätningar och få tillförlitliga resultat är att beläggningstemperaturen ska vara inom intervallet 5°C till 35°C alternativt att yttemperaturen ska vara mellan 0°C till 35°C (Spoof och Petäjä, 2000a). Råder inte dessa förhållande ska mätningar avbrytas och insamlad data ska kastas. Generellt sett ska mätningar utföras under under sommaren då det är torrt och någorlunda varmt (ca. 20°C). Skiljer sig vädret avsevärt från sommarförhållanden exempelvis med längre perioder med regn på hösten eller om delar av konstruktionen är frusen får mätningar inte utföras. Temperaturen mäts både vid vägytan, men även i mitten av beläggningen via borrhåll under mättilfället. Det är även från dessa borrhåll som information om beläggningstjockleken hämtas om detta saknas (Spoof och Petäjä, 2000a).

En forskningsstudie som genomfördes på Uleåborgs universitet har tagit fram ett samband mellan beläggningstemperatur och dess styvhet (Ekvation 7.14) och ekvationen som har arbetats fram liknar den som används av DRI (Danska väg och Infrastrukturinstitutet) (Ekvation 7.15) (Spoof och Petäjä, 2000b).

$$S_s = S_m \cdot 0,96^{(T_s - T_m)} \quad (7.14)$$

$$S_s = S_m \cdot 10^{-0,018 \cdot (T_s - T_m)} \quad (7.15)$$

där:

S_s är beläggningens styvhet vid referenstemperaturen T_s ,

S_m är beläggningens styvhet vid mätningstemperaturen T_m ,

T_s är referenstemperaturen i $^{\circ}\text{C}$,

T_m är temperaturen vid mätningen i $^{\circ}\text{C}$. För att kunna använda denna metod krävs det att en E-modul först beräknas (S_m) för att därefter kunna beräkna den temperaturkorrigerade E-modulen.

Ytterligare en metod som är framtagen av VTT behandlar sambandet mellan deformation och temperatur. Det är enbart deflektioner som mäts upp till 600 mm från belastningscentrum som temperaturkorrigeras och detta görs till referenstemperaturen +20°C (Spoo och Petäjä, 2000a). Nedan visar Ekvation 7.16 hur beräkningsgången ser ut. Den temperaturkorrigerade deflektionen erhålls genom att den uppmätta deflektionen från fallviktsmätningen multipliceras med en korrektionsfaktor k . Beräkning av korrektionsfaktorn k utförs enligt Ekvation 7.17, som beror både på geofonens position i förhållande till belastningscentrum, beläggningsens tjocklek samt temperatur (Spoo och Petäjä, 2000a).

$$d_{x,20} = k \cdot d_T \quad (7.16)$$

där:

$d_{x,20}$ = korrigerad deflektion på avståndet x ifrån belastningscentrum vid referenstemperaturen 20°C,

k_{dx} = korrektionsfaktor för deflektion, se Ekvation 7.17a-e,

d_T = uppmätt deflektion vid mätningstemperaturen T.

$$k_{d0} = 1 - (AB_T - 20) \cdot 0,0000975 \cdot AB_{pak} \quad (7.17a)$$

$$k_{d20} = 1 - (AB_T - 20) \cdot 0,0000598 \cdot AB_{pak} \quad (7.17b)$$

$$k_{d30} = 1 - (AB_T - 20) \cdot 0,0000517 \cdot AB_{pak} \quad (7.17c)$$

$$k_{d45} = 1 - (AB_T - 20) \cdot 0,0000476 \cdot AB_{pak} \quad (7.17d)$$

$$k_{d60} = 1 - (AB_T - 20) \cdot 0,0000408 \cdot AB_{pak} \quad (7.17e)$$

där:

k_{dx} = korrektionsfaktor för deflektion på ett avstånd x i cm,

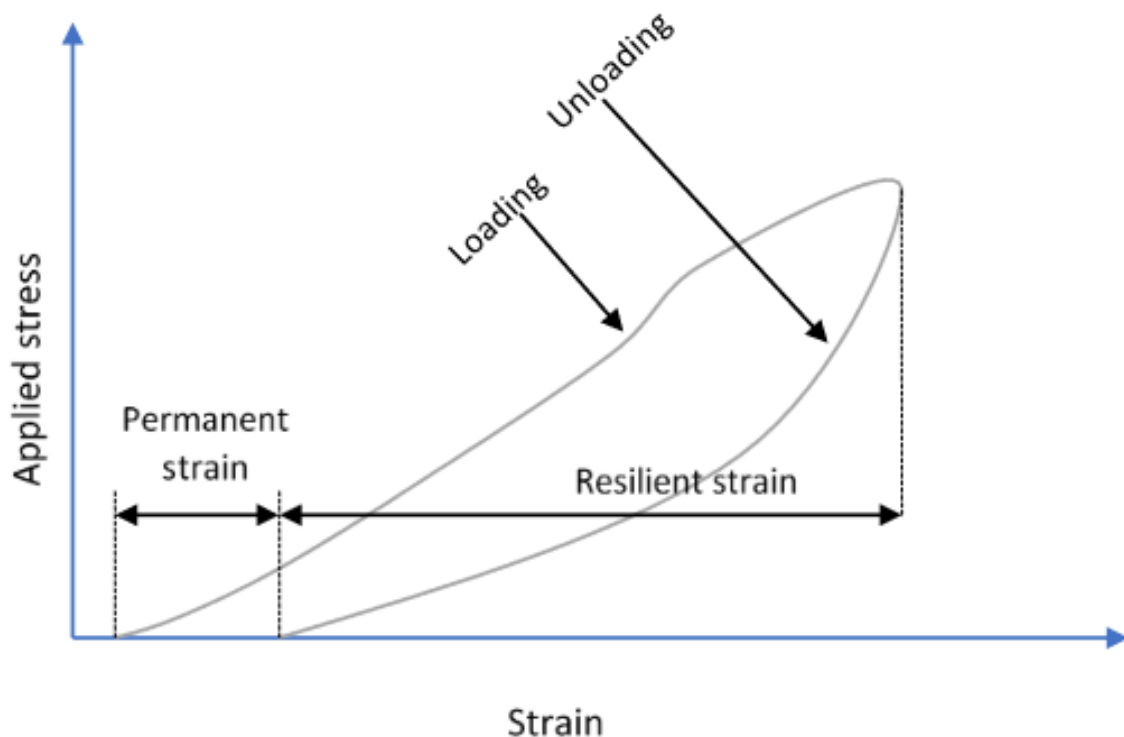
AB_T = beläggningsens temperatur i °C,

AB_{pak} = beläggningsens tjocklek i mm.

7.3.5.1 Belastningshistorik

Ett annat sätt att analysera mätresultat från en fallviktsmätning är att studera belastningsförloppet för individuella slag. Om belastningsförloppet presenteras tillsammans med deflektionsförloppet för de olika givarna över tid i ett diagram kan beläggnings tröghet studeras då maximal belastning och maximal deflektion vid de olika geofonerna inte sker vid samma tidpunkt (Agardh, 2021).

Det är även möjligt att studera permanenta deformationer samt energiåtgången från ett slag genom att presentera belastningsförloppet mot deflektionsförloppet för en geofon i ett diagram. Diagrammet bildar en s.k. hysteres-loop (Agardh, 2021). Se Figur 7.8 för exempel på hysteres-loop och hur permanent deformation avläses.



Figur 7.8: Exempel på hysteres-loop (Kuttah, 2021). Svensk översättning av termer i figuren: Applied stress=Pålagd spänning, Strain=Töjning, Permanent strain=Permanent töjning, Resilient strain=Elastisk töjning, Loading=Pålastning, Unloading=Avlastning.

Arean innanför loopen motsvarar den energi som går åt vid belastningen och kan användas för relativa jämförelser över en sträcka där det ökad area ofta kopplas till ökad fukthalt i väggkroppen (Agardh, 2021).

7.4 Erfarenheter från tidigare arbeten

I punktlistan nedan presenteras fyra examensarbeten som har studerats och lärdomar har dragits från dessa. Titeln på varje underkapitel nedan är en sammanfattning respektive examensarbete och vem som har skrivit arbetet.

- Titel: Funktionskrav på vägars bärighet.
Författare Laila Rashid.
- Titel: Temperaturkorreksjon av nedbøyningsmålinger på vei.
Författare: Jørgen Sletten.
- Titel: Cykelvägar anlagda på befintlig jord.
Författare: Gustaf Holmström, Anton Nordvall.
- Titel: Utvärdering av kontrollmetoder för obundna granulära material.
Författare: Philip Hon.

Laila Rashid har skrivit om funktionskrav på vägars bärighet för LTH (Rashid, 2020), Jørgen Sletten har skrivit ett arbete om temperaturkorrigering relaterat till deflektioner (Sletten, 2022), Gustaf Holmström och Anton Nordvall har skrivit om att bygga GC-vägar på befintliga jordar med högre halt organiskt material än vanligt (Nordvall och Holmström, 2020) och Philip Hon har skrivit om kontrollmetoder på obundna granulära lager (Hon, 2010).

7.4.1 Examensarbete: Funktionskrav på vägars bärighet

Trafikverket upphandlar funktionsentreprenader vilket låter entreprenören att komma med egna tekniska lösningar och ett problem som Trafikverket ställs inför då de ställer krav på bärighet är hur de ska undersöka kvaliteten på bärighet vid slutbesiktning (Rashid, 2020). I arbetet undersöks förutsättningarna och konsekvenserna av att använda bärighet som ett funktionskrav. Vidare undersöks frågan om vilka bärighetsmått som ska användas och om det är rimligt att ställa krav på bärighet i funktionsentreprenader.

I rapporten nämns att bärförmågeindex tillsammans med bärförmågeklass är ett välkänt bärighetsmått i Sverige, men att det internationellt anses vara för grovt (Rashid, 2020). I andra länder används oftare BCI och SCI som bärighetsmått där dessa är tydligare avgränsade i vad de syftar till att beskriva.

Det svåra med att använda töjning som parameter för att bestämma bärförmåga är att den är svår att beräkna eftersom den beror på konstruktionens utformning (Rashid, 2020). Det nämns att en tunn beläggning (<50 mm) inte kommer att utsättas för dragspänning i underkanten och det kommer därmed inte uppstå dragtöjningar i asfaltens undersida. För en beläggning på 50-100 mm uppstår istället skjuvtöjningar. Däremot fungerar det att göra töjningsberäkningar om beläggningen är tjock (>100 mm) för då uppstår dragtöjning i asfaltens undersida.

I rapporten föreslås att både bärighetsmått som ytmodul och töjning är lämpliga att använda, men att bärformågeindex (baseras på töjning) anses vara ett sämre mått än SCI och BCI då töjningarna som presenteras inte är de verkliga utan beräknade (Rashid, 2020). Gällande ytmodul de intervjuade att det är ett mått som enkelt att förstå, men det har sina svagheter eftersom det påverkas av undergrundens styvhet vilket innebär att entreprenören kan ha byggt en bra väg, men att ytmodulen kan vara låg på grund av att vägen är byggd på en svag undergrund. På motsvarande vis kan en väg, byggd på bra undergrund visa en hög ytmodul, men SCI-värdet kan vara lågt, vilket indikerar att det finns brister i konstruktionen (t.ex. på grund av dålig packning). Slutsatsen är att mer än ett bärighetsmått borde användas (Rashid, 2020).

7.4.2 Examensarbete: Temperaturkorreksjon av nedbøyningsmålinger på vei

7.4.2.1 Temperaturkorrigera deflektioner

De flesta undersökta metoderna som temperaturkorrigerar deflektioner använder en justeringsfaktor som multipliceras med den uppmätta deflektionen (Sletten, 2022). Många av metoderna som har undersökts i denna rapport bygger på statistiska analyser av genomförda deflektionsmätningar. En felkälla som nämns är att temperaturkorrigering görs på deflektionsdata som är en respons av hela överbyggnaden, både på bundna och obundna lager. Felet med detta angreppssätt är att i verkligheten är det endast de bundna lagrens styvhet som påverkas av varierande temperatur. Effekten av detta blir att modellerna, som är empiriskt uppbyggda, blir objektsspecifika, de fungerar väl för data från ett visst objekt, men de är svårare att applicera generellt (Sletten, 2022).

7.4.2.2 Temperaturkorrigera E-moduler

I likhet med ovan nämnda angreppssätt bygger många modeller här på att den beräknade elasticitetsmodulen (från uppmätta deflektioner) multipliceras med en justeringsfaktor för att erhålla en temperaturkorrigerad elasticitetsmodul (Sletten, 2022). Ytterligare en likhet som nämns är att många modeller bygger på empiriska samband och regressionsanalys och hittar ett samband mellan temperatur och E-modul. Justeringsfaktorn beräknas genom att teoretisk E-modul vid en referenstemperatur jämförs med E-modulen vid mättillfället.

Slutsatsen i rapporten är att det är teoretiskt mer korrekt att korrigera E-modulen och inte deflektionen eftersom det enbart är responsen från de bundna lagren som korrigeras, det vill säga, de som uppvisar en temperaturberoende respons (Sletten, 2022). Däremot kräver korrigering av E-modulen fler beräkningssteg vilket i sin tur leder till större osäkerhet och resultatet är därmed inte nödvändigtvis bättre. För att kunna korrigera E-modulen krävs även information om lagertjocklekar, material i överbyggnaden och avvikelser vilket i sin tur leder till fler felkällor.

7.4.3 Examensarbete: Cykelvägar anlagda på befintlig jord

Detta examensarbete handlar om nyproduktion av cykelvägar anlagda på befintlig jord och vilken organisk halt som är tillåten i undergrunden (Nordvall och Holmström, 2020). I arbetet studerades fem olika nybyggda cykelvägar i Skåne utifrån både bärighet och komfort. Bärigheten på cykelvägen har undersökts med fallviktsapparat och olika bärighetsmått beräknades.

Från utförda fallviktsanalyser på de fem GC-vägarna beräknades medelytmoduler från respektive GC-väg och resultatet presenteras i Tabell 7.3.

Tabell 7.3: Medelytmodul, medelundergrundsmodul, bärförmågeindex och bärförmågeklass på fem nylagda GC-vägar i Skåne (Nordvall och Holmström, 2020).

| Cykelvägar | Medel ytmodul [MPa] | Medel Undergrunds-modul [MPa] | Medel Bärförmåge-index | Bärförmågeklass* |
|---------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Arrie-Käglinge | 237,3 | 94,1 | 1,92 | 2 |
| Bäckaskog-Gualöv | 192,9 | 34,1 | 1,60 | 3 |
| Hedeskoga-Sövdestad | 160,1 | 65,0 | 1,27 | 3 |
| Förslöv-Fogdarp | 285,0 | 180,1 | 2,41 | 2 |
| Kivik-Ravlunda | 203,5 | 42,7 | 1,83 | 3 |

*Bärförmågeklass 1 är jämförbar med bärförmågan hos nybyggda vägkonstruktioner, dimensionerade efter TRVK Väg.(Trafikverket, 2011). Bärförmågeklass 4 är bara aktuell för mycket svårt skadade vägar.

Tabell 7.3 visar att medelvärdet på ytmodul ligger mellan 160-280 MPa för de fem studerade objekten (Nordvall och Holmström, 2020). Detta resultat ligger till grund för Trafikverkets bärighetskrav gällande ytmodul (200 MPa) i projektet GC-väg Rinneback-Lackalänga.

Författarna nämner i diskussiondelen av rapporten att metoderna som används för att beräkna bärighetsmått är framtagna för vägar och inte cykelvägar som generellt är byggda med tunnare beläggning, detta är en felkälla i beräkningsgången som leder fram till resultatet (Nordvall och Holmström, 2020).

7.4.4 Examensarbete: Utvärdering av kontrollmetoder för obundna granulära material

Författaren lyfter vikten av att utföra kontroller på obundna lager där fallviktsmätning medger en mer avancerad metod för att utvärdera obundna granulära material än statiskt plattbelastning (Hon, 2010). Det är även viktigt att tydliggöra vad för kontroll

som faktiskt efterfrågas. Exempelvis om efterfrågad packningsgrad är uppnådd eller om bärigheten är tillräckligt hög vilket beror på de krav som ställs. Ett resultat från studien utförd i detta examensarbete visar att statisk plattbelastning är en sämre tillämpbar metod för mätning av bärighet jämfört med fallvikt, men statisk plattbelastning fungerar väl för att bestämma packningsgraden (Hon, 2010).

Belastningstiden har en stor inverkan på de resultat som erhålls från fallviktsmätningen (Hon, 2010). En lång belastningstid ska simulera överfarten av en långsamt körande lastbil och en kortare belastningstid representerar en lastbil körandes på motorväg.

Fuktt innehåll i väggkroppen spelar även roll för resultaten som erhålls vid en fallviktsmätning och kan studeras i belastningshistorik-diagram (Hon, 2010). Från analys av belastningshistorik kan deflektion och kraftpuls studeras under belastningstiden. Då tidigare fallviktsmätningar analyserats har en skillnad påvisats mellan mätningar utförda på torr respektive fuktig väggkropp (Hon, 2010). För en fuktig väggkropp uppvisas maximal deformation med en viss fördröjning jämfört med en helt torr väggkropp.

I diskussionen nämner författaren att fallviktsmätningar är att föredra framför statistiskt plattbelastning då mätserierna är större och det ger en bättre bild av hela vägens yta snarare än några få punkter (Hon, 2010). Det nämns även att det är svårt att se en absolut korrelation mellan FWD och PLT eftersom de mäter olika saker. Gällande repeterbarheten för mätningar dras slutsatsen att den blir bättre ju bättre/jämnare packat materialet är och vice versa. Det uppstår större spridning i data om materialet är ojämnt packat, men för att få tillförlitliga resultat krävs det att materialet är välpackat för att minska variationen.

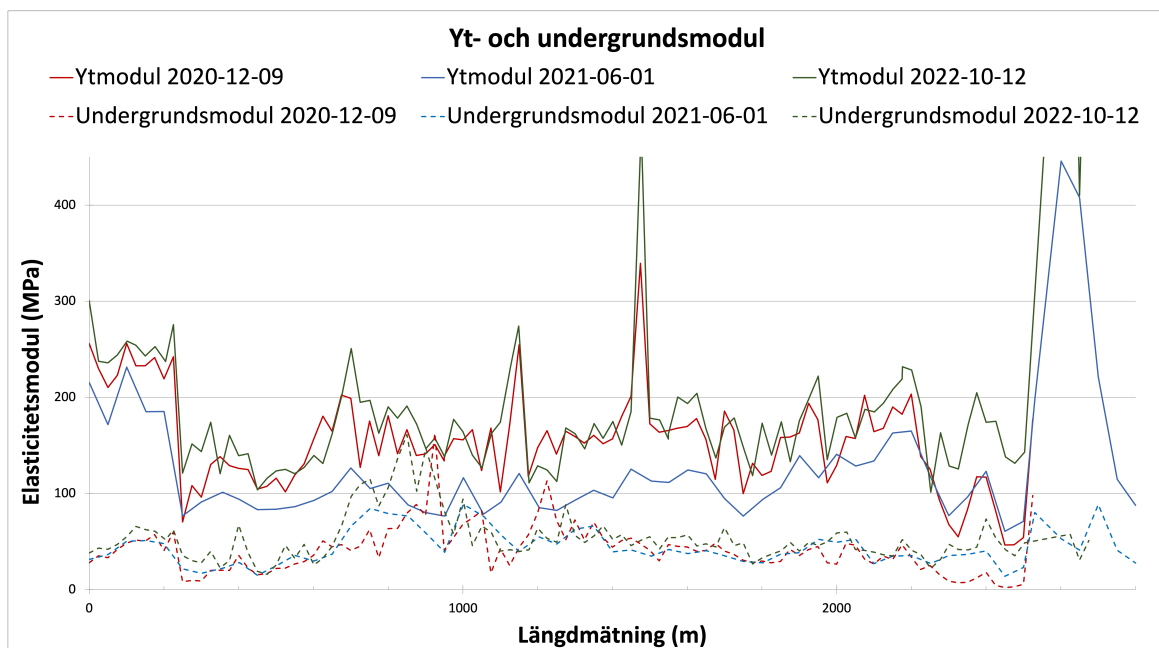
Fallviktsmätning är en metod som lämpar sig för att bedömma bärigheten på en väg, men det krävs välutvecklade analysmetoder för att kunna dra tydliga slutsatser om packningsgraden (Hon, 2010). Det nämns att belastningsförlopp, spänningsberoende parametrar och energiparametrar måste studeras för att slutsatser ska kunna dras gällande packningsgraden. Genom att analysera data uppmätt i de yttre geofonerna från fallviktsmätningen kan information fås gällande svagare partier i undergrunden. Däremot framförs det i slutsatsen att god packningsgrad inte nödvändigtvis måste motsvara hög bärighet.

8 Resultat

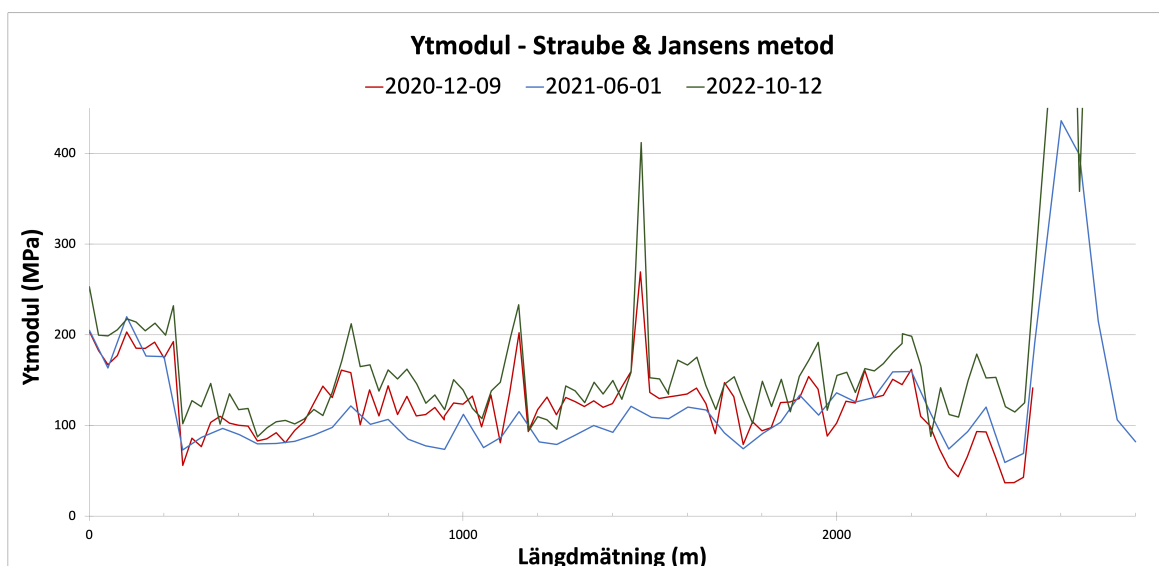
I detta kapitel presenteras resultat som består av analyser av fallviktsdata från tre olika mätningar på GC-väg Rinneback-Lackalanga. Från fallviktsdata beräknades först yt- och undergrundsmodul som temperaturkorrigerades enligt både VTTs och Straube och Jansens metod. Därefter presenteras ett antal mått som är temperaturkorrigerade enligt Trafikverkets egna metod, den modifierade versionen av Trafikverkets metod samt de andra två metoderna som presenteras ovan. Dessa mått presenteras i fem olika punkter, vilka är framtagna från de homogena sträckor som identifierats längs GC-vägen. Sedan analyseras huruvida fallvikten efterpackar vägen samt om vägen beter sig linjärt vid belastning. Till sist analyseras belastningshistorik samt förhållandet mellan belastning och deflektion för ett antal punkter.

8.1 Elasticitetsmoduler

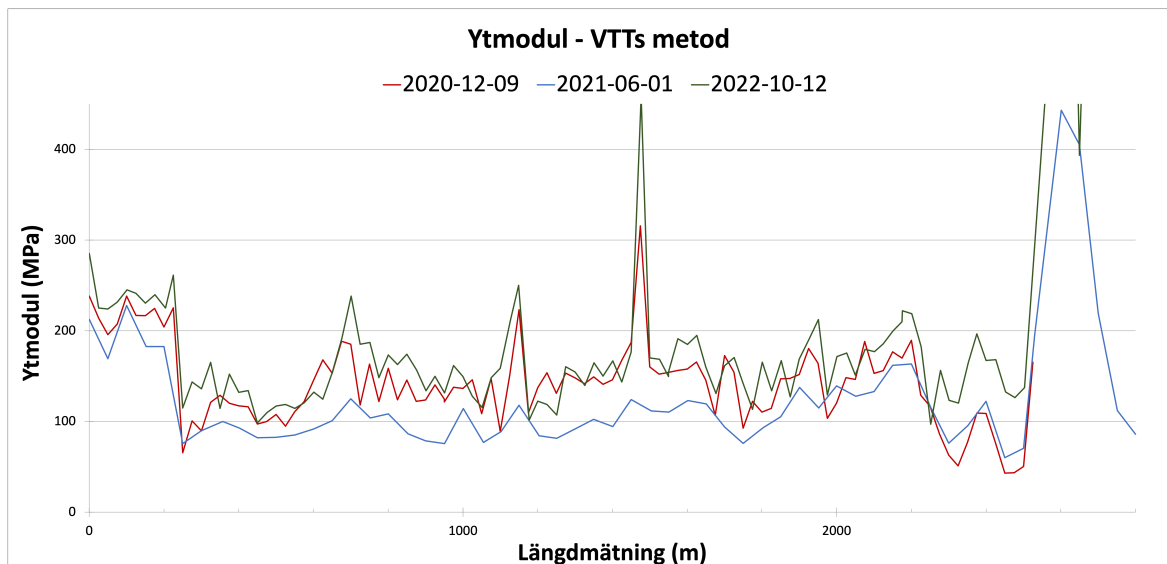
Nedan presenteras bärighetsmått beräknade från fallviktsdata för GC-väg Rinneback-Lackalanga där mätningar har utförts under tre olika tillfällen under en tvåårsperiod. Här presenteras beräknad ytmodul och undergrundsmodul utan korrigering för temperatur samt ytmodul korrigerad med Straube och Jansens samt VTTs metod. Det noteras även att fallviktsmätningen 2021 är utförd var 50e meter vilket skiljer sig från de andra två mätningarna där fallviktsslagen upprepades var 25e meter. I slutet av sträckan från och med längdmätning 2625 m uppmättes ytmoduler över 450 MPa vilket inte syns i graferna. Skalan på y-axeln är vald för att bäst illustrera skillnaden mellan de olika dataserierna.



Figur 8.1: Ytmodul samt undergrundsmodul vid tre olika mätningstillfällen



Figur 8.2: Temperaturkorrigerad ytmodul enligt Straube och Jansens metod



Figur 8.3: Temperaturkorrigerad ytmodul enligt VTTs metod

Figur 8.1 visar både ytmodul och undergrundsmodul för GC-väg Rinneback-Lackalänga på de tre mätningarna som har genomförts på GC-vägen. Ytmodulen varierar från första mätningen (2020) till andra mätningen (2021) då lägre värden erhålls och vid den senast utförda mätningen (2022) är ytmodulen på samma nivå och även lite högre än vid första mättillfället. Mätvärdena för de olika mätserierna följer varandra åt längs hela sträckan, men för mätningen som utfördes i 2020 noteras att ytmodulen är lägre längs stora delar av sträckan. Undergrundsmodulen uppvisar mindre variation mellan mättillfällena, där data ligger samlad längs stora delar av sträckan, men avvikande värden erhålls vid meter 700-1000 samt vid meter 2300-2500. Längs dessa sträckor visar mätningen, utförd 2022 på högre undergrundsmodul. Från diagrammet kan det även avläsas hur väl ytmodulen följer undergrundsmodulens variation.

Figur 8.2 visar ytmodulen för samma dataserier som ovan, men dessa är temperaturkorrigerade enligt Straube och Jansens metod (Straube och Jansen, 2009). Med temperaturkorrigering av ytmodulerna noteras att data är mindre utspridd mellan mätserierna än för den okorrigerade datan. Undergrundsmodulen är inte med i denna graf eftersom det enbart är av intresse att analysera temperaturens påverkan på de bundna materialen.

Figur 8.3 visar ytmodulen för samma dataserier som ovan, men dessa är temperaturkorrigerade enligt VTTs metod. På liknande vis uppvisar data mindre spridning här än för den okorrigerade datan. Utseendet mellan Straube och Jansens och VTTs metoder skiljer sig någorlunda då data är något mer utspridd mellan mättillfällena i Figur 8.3. Även i denna graf visas enbart ytmodulen upp eftersom materialen i undergrunden inte bör ha olika styvhet beroende på temperatur.

För att analysera mätserierna beräknades deras medelvärde och 15-percentiler. Valet av 15-percentil är ett exempel för illustrationssyfte. Dessa presenteras i Tabell 8.1 respektive 8.2.

Tabell 8.1: Medelvärde av ytmodul från tre olika mätningar

| Medelvärde ytmodul (MPa) | | | |
|--------------------------|-------------|----------------|-------|
| Mätning | Okorrigerad | Straube-Jansen | VTT |
| 2020-12-09 | 153,9 | 125,3 | 142,0 |
| 2021-06-01 | 126,7 | 122,2 | 125,3 |
| 2022-10-12 | 190,0 | 162,8 | 180,4 |

Tabell 8.2: 15-percentil av ytmodul från tre olika mätningar

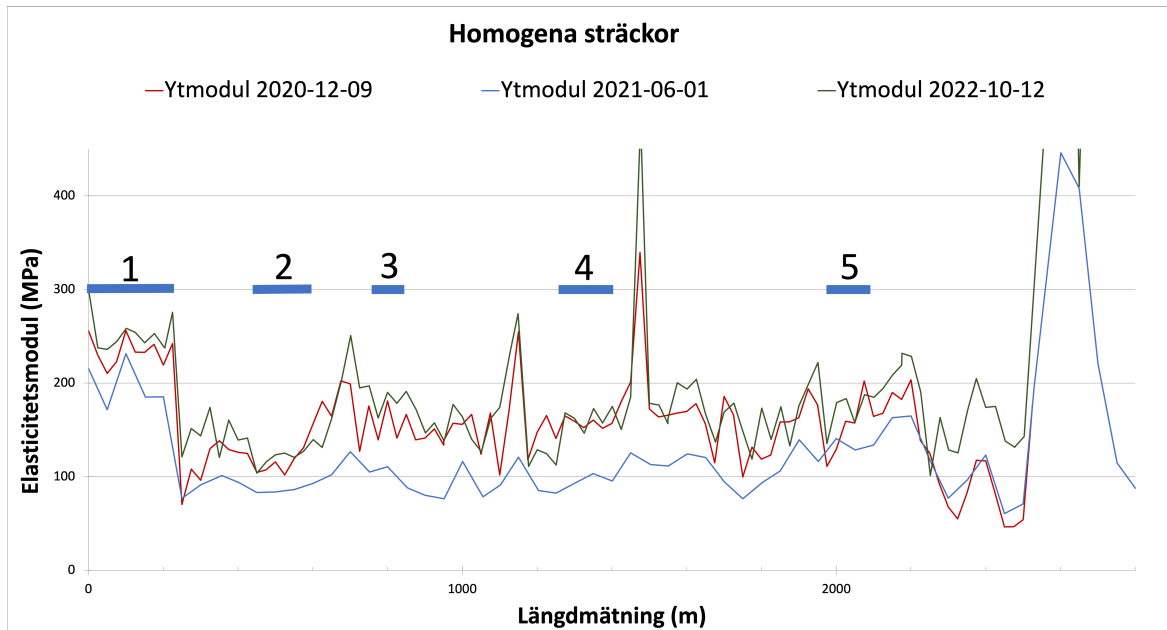
| 15-percentil ytmodul (MPa) | | | |
|----------------------------|-------------|----------------|-------|
| Mätning | Okorrigerad | Straube-Jansen | VTT |
| 2020-12-09 | 109,0 | 86,7 | 101,5 |
| 2021-06-01 | 82,7 | 79,4 | 81,8 |
| 2022-10-12 | 128,6 | 110,6 | 123,6 |

8.2 Representativa punkter

Från att visuellt studera ytmodulen i Figur 8.1 väljs de homogeniserade sträckorna ut och från dessa förs beräkningar för de representativa punkterna, detta presenteras i Tabell 8.3 samt i Figur 8.4.

Tabell 8.3: Representativa punkter

| Representativa punkter | |
|------------------------|-------------|
| Punkt | Sträcka (m) |
| 1 | 0-225 |
| 2 | 475-625 |
| 3 | 750-850 |
| 4 | 1275-1425 |
| 5 | 2000-2125 |



Figur 8.4: Valda homogena sträckor och representativa punkter, baserat på vägens ytmodul

I Tabell 8.4 presenteras SCI baserat på temperaturkorrigerade deflektioner enligt de fyra metoderna. Under dessa förhållanden kompenserar den modifierade versionen av Trafikverkets metod och Straube och Jansens metod mer än andra metoder, medan VTTs och Trafikverkets metod kompenserar relativt lika.

Tabell 8.4: SCI (Surface Curvature Index) för representativa punkter

| Punkt | SCI (μm) | | | | |
|-------|-----------------------|-----------------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| | Okorrigerad | Straube-Jansen ¹ | VTT ² | TRV ³ | TRV mod. ⁴ |
| 1 | 375 | 462 (+23%) | 405 (+8%) | 404 (+8%) | 487 (+30%) |
| 2 | 754 | 926 (+23%) | 813 (+8%) | 947 (+26%) | 1041 (+38%) |
| 3 | 546 | 664 (+22%) | 614 (+12%) | 619 (+13%) | 774 (+42%) |
| 4 | 625 | 752 (+20%) | 667 (+7%) | 712 (+14%) | 838 (+34%) |
| 5 | 557 | 660 (+18%) | 591 (+6%) | 604 (+8%) | 699 (+25%) |

Referenser för respektive metod som ligger till grund för beräkning. 1. Straube och Jansen, 2009, 2. Spoof och Petäjä, 2000a, 3. Trafikverket, 2020 4. Sletten, 2022.

I Tabell 8.5 presenteras BCI baserat på temperaturkorrigerade deflektioner, detta görs för att kunna validera effekten av temperaturkorrigerad deflektion för de olika metoderna. Här noteras ett annat mönster än för SCI. Straube och Jansens metod kompenserar mest och VTTs minst medan Trafikverkets egna metod och den modifierade versionen av Trafikverkets metod producerar relativt lika resultat.

Tabell 8.5: BCI (Base Curvature Index) för representativa punkter

| BCI (μm) | | | | | |
|-----------------------|-------------|-----------------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Punkt | Okorrigerad | Straube-Jansen ¹ | VTT ² | TRV ³ | TRV mod. ⁴ |
| 1 | 198 | 238 (+20%) | 204 (+3%) | 216 (+9%) | 216 (+9%) |
| 2 | 440 | 522 (+19%) | 454 (+3%) | 502 (+14%) | 505 (+15%) |
| 3 | 324 | 374 (+15%) | 340 (+5%) | 363 (+12%) | 375 (+16%) |
| 4 | 345 | 402 (+17%) | 355 (+3%) | 392 (+14%) | 397 (+15%) |
| 5 | 291 | 336 (+15%) | 299 (+3%) | 323 (+11%) | 324 (+11%) |

Referenser för respektive metod som ligger till grund för beräkning. 1. Straube och Jansen, 2009, 2. Spoof och Petäjä, 2000a, 3. Trafikverket, 2020 4. Sletten, 2022.

I Tabell 8.6 redovisas temperaturkorrigerade ytmoduler. Resultterande temperaturkorrigerigering liknar den för SCI. Där VTTs metod samt Trafikverkets metod kompenserar relativt lite medan Straube och Jansens och den modifierade versionen av Trafikverkets metod kompenserar mer.

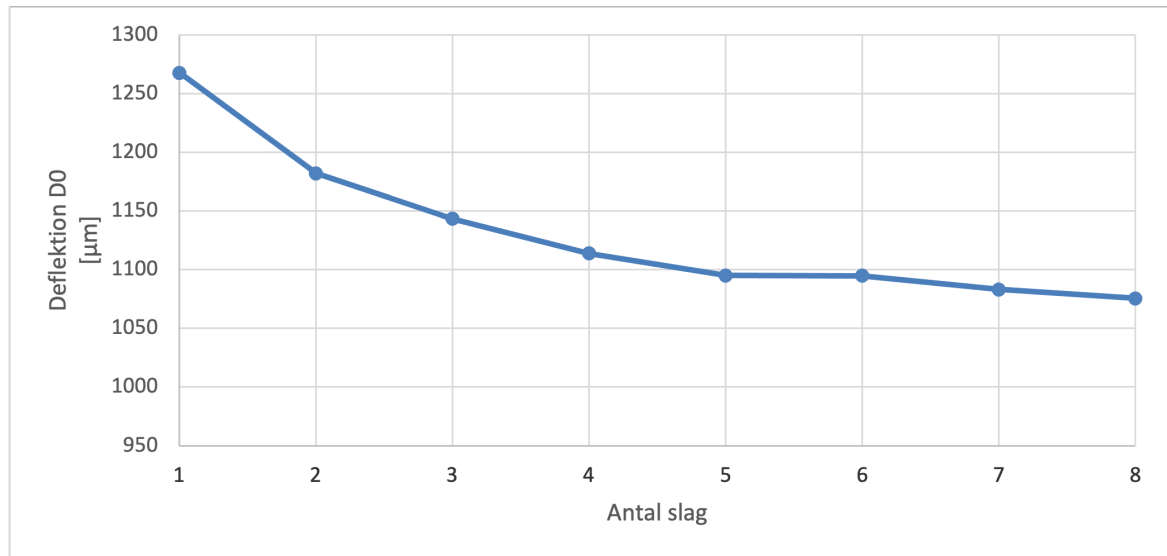
Tabell 8.6: Ytmodul för representativa punkter

| Ytmodul (MPa) | | | | | |
|---------------|-------------|-----------------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Punkt | Okorrigerad | Straube-Jansen ¹ | VTT ² | TRV ³ | TRV mod. ⁴ |
| 1 | 253 | 213 (-16%) | 240 (-5%) | 238 (-6%) | 216 (-14%) |
| 2 | 126 | 106 (-16%) | 119 (-6%) | 108 (-14%) | 103 (-18%) |
| 3 | 183 | 155 (-15%) | 168 (-8%) | 166 (-9%) | 146 (-20%) |
| 4 | 161 | 138 (-14%) | 154 (-4%) | 146 (-9%) | 133 (-17%) |
| 5 | 180 | 156 (-13%) | 173 (-4%) | 168 (-7%) | 155 (-14%) |

Referenser för respektive metod som ligger till grund för beräkning. 1. Straube och Jansen, 2009, 2. Spoof och Petäjä, 2000a, 3. Trafikverket, 2020 4. Sletten, 2022.

8.3 Packning

I Figur 8.5 redovisas 8 slag korrigerade till 50kN på samma mätpunkt. Centrumdeflektionen reduceras från 1268 μm till 1075 μm . Notera att y-axeln ej börjar vid 0, detta för att bättre illustrera packningsförloppet. Diagrammet visar att vägen packas av de fem första fallviktsslagen för att därefter vara någorlunda konstant. Datasystemet i fallviktsutrustningen ska varna mätoperatören om skillnaden i deflektion mellan första och andra slaget överstiger 5% och då ska ytterligare fallviktsslag göras tills skillnaden i deflektion är mindre än 5%.



Figur 8.5: Deflektionsminskning vid repeterade fallviktsmätningar. Y-axeln i diagrammet är en närbild av området där deflektioner mäts och börjar därmed inte i origo

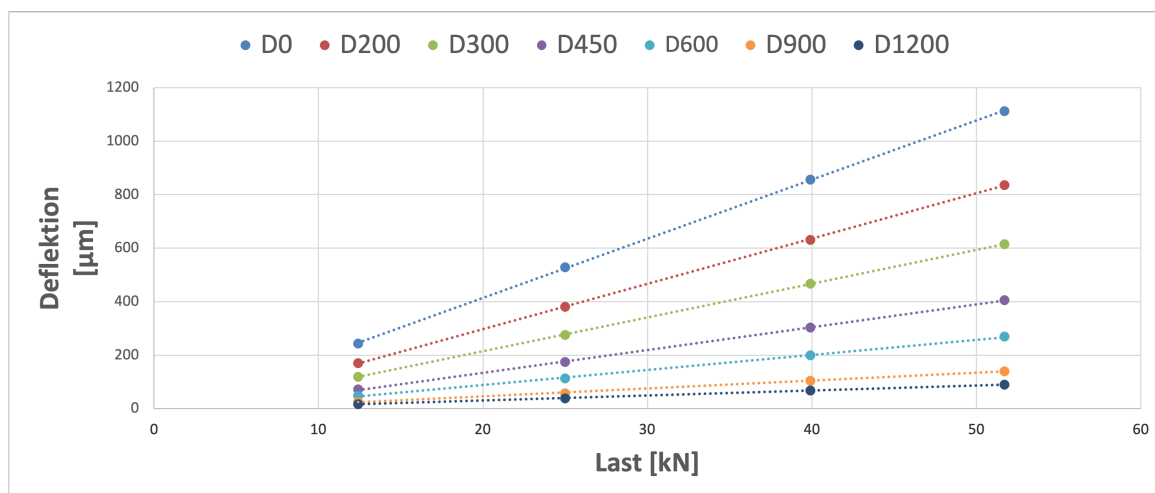
Tabell 8.7 visar att flertalet av mätpunkterna från mätningen i juni (2021) uppvisar centrumdeflektion större än 5% mellan första och andra slaget, vilket enligt Trafikverkets metodbeskrivning (Trafikverket, 2020) innebär att mätresultaten inte är tillförlitliga. Samma kontroll har genomförts för både mätningen i december (2020) och oktober (2022), där är den uppmätta skillnaden i deflektion mellan slagen genomgående är mindre än 5%.

Tabell 8.7: Permanenta deformation, mättillfälle juni 2021

| Permanenta deflektioner | |
|-------------------------|-----------------------|
| Lokal längdmätning (m) | Skillnad i deflektion |
| 0 | 1,32% |
| 50 | 8,95% |
| 100 | 9,33% |
| 100 | 5,82% |
| 152 | 12,04% |
| 200 | 7,36% |
| 250 | 4,40% |
| 300 | 4,40% |
| 357 | 9,72% |
| 402 | 7,44% |
| 450 | 7,11% |
| 500 | 5,52% |
| 1001 | 10,77% |
| 1504 | 8,72% |
| 2000 | 12,13% |
| 2500 | 4,30% |

8.4 Linjäritet

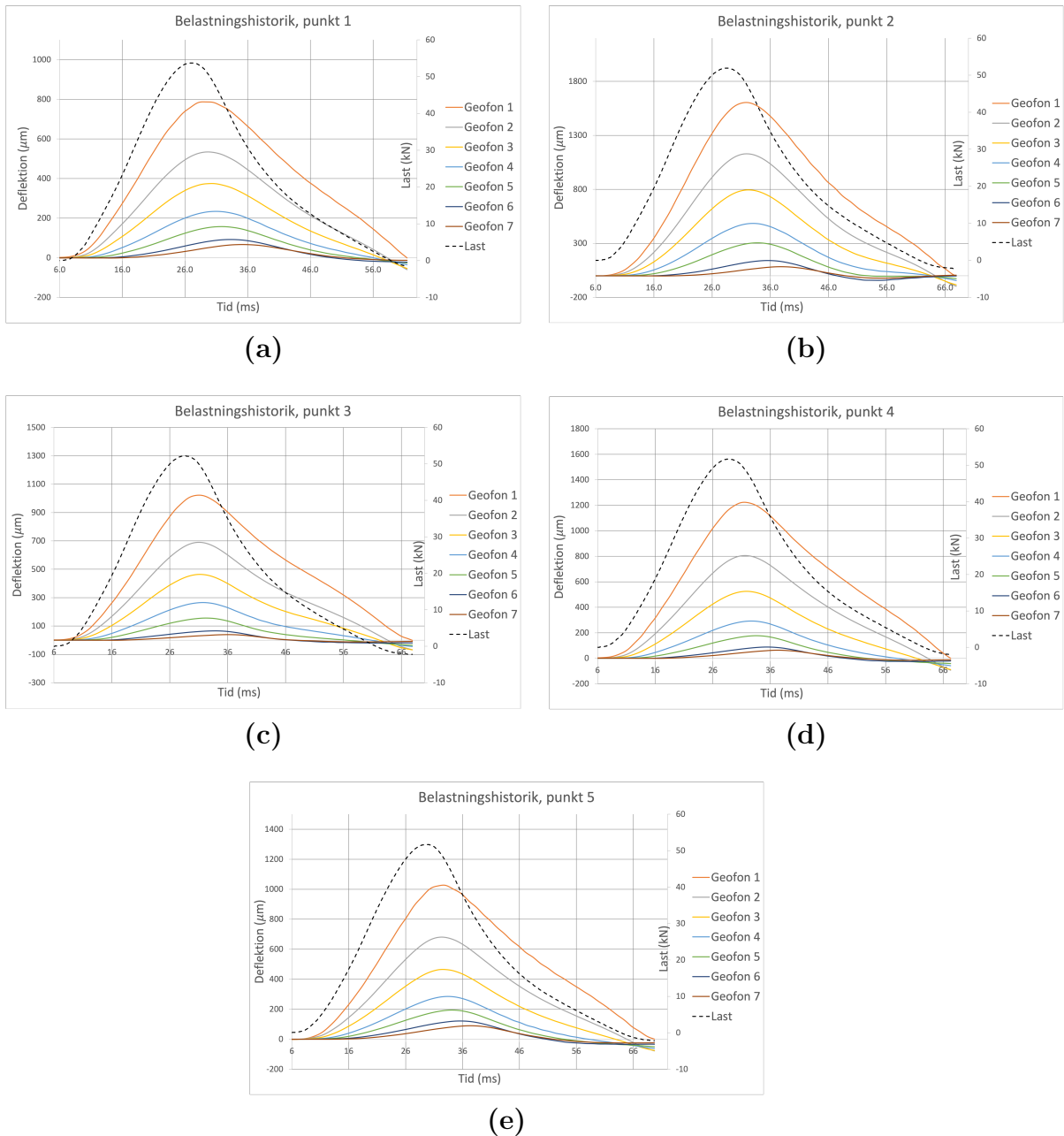
I Figur 8.6 redovisas deflektioner från alla givare vid varierande last i samma punkt. Testet visar att relationen mellan last och deflektion är linjär.



Figur 8.6: Linjäritetstest, korrelations samband mellan last och deflektion.

8.5 Belastningshistorik

Figur 8.7 visar belastningshistorik-diagram för de fem representativa punkterna där både last och uppmätt deflektion i samtliga geofoner är uppritade. Den streckade, svarta linjen i respektive diagram (Figur 8.7a-e) motsvarar belastning i förhållande till tid och de olika färgade linjerna representerar den deflektion som respektive geofon registrerar. I figuren noteras skillnaden mellan tidsåtgången för att maximal last uppnås och maximal deflektion för de olika geofonerna.



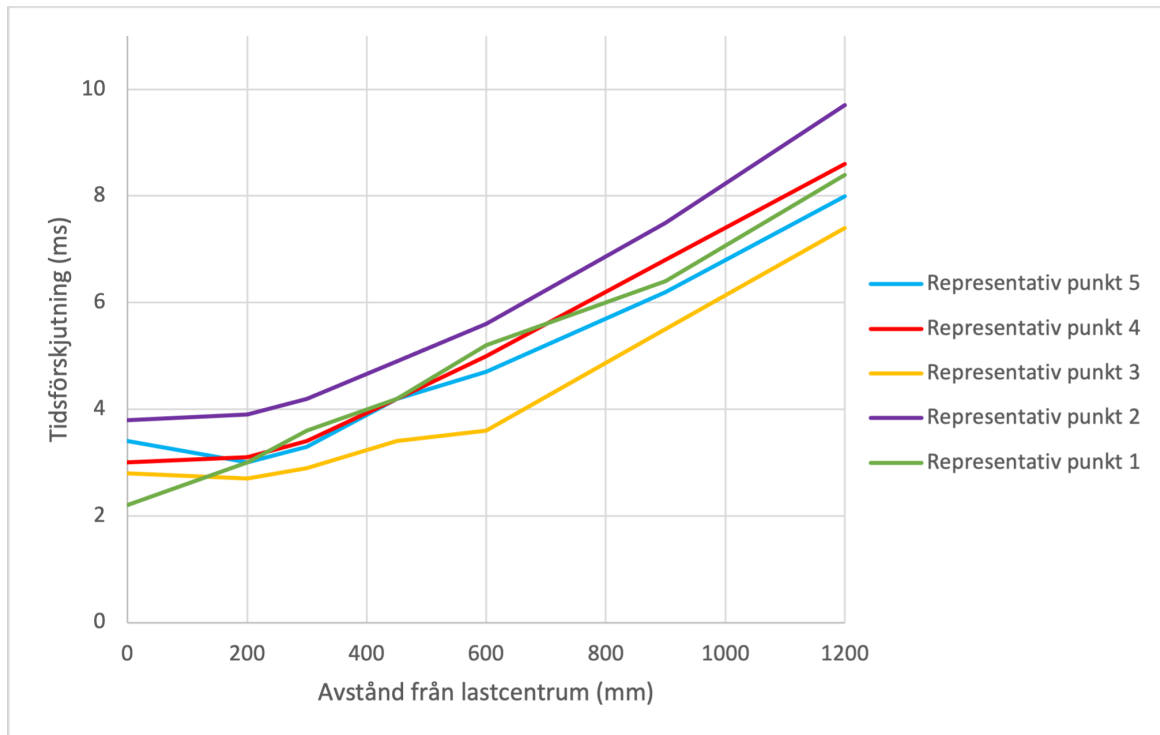
Figur 8.7: Belastningshistorik-diagram för samtliga representativa punkter, deflektioner i alla geofoner är plotade (a) Representativ punkt 1, homogen sträcka 0-225 meter från start. (b) Representativ punkt 2, homogen sträcka 475-625 meter från start. (c) Representativ punkt 3, homogen sträcka 750-850 meter från start. (d) Representativ punkt 4, homogen sträcka 1275-1425 meter från start. (e) Representativ punkt 5, homogen sträcka 2000-2125 meter från start.

Tabell 8.8 visar tiden det tar för att maximal last ska uppnås i respektive mätpunkt samt tiden det tar för att maximal deflektion ska uppnås i respektive geofon i de olika mätpunkterna. Differensen i tid mellan att maximal last och maximal deflektion uppnås är noterad inom parentes i tabellen. Störst tidsdifferenser observeras i representativ punkt 2 för samtliga geofoner och tidsförskjutningen ökar med ökat avstånd från lasten. Detta syns framförallt i Tabell 8.8 där tidsdifferensen mellan de yttre geofonerna är större jämfört med de inre.

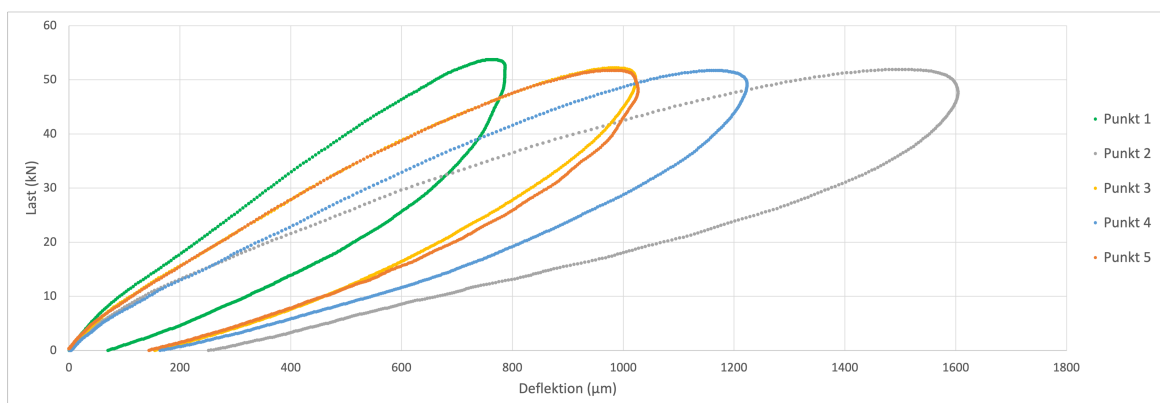
Tabell 8.8: Skillnad i tid, värdet inom parentes mellan att maximal last och maximal deflektion uppnås i de olika geofonerna för samtliga representativa punkter längs de homogeniserade sträckorna.

| | Representativa punkter | | | | |
|----------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 |
| Max last (ms) | 26.6 | 28 | 28.3 | 28.4 | 29.2 |
| Max defl. D0 (ms) | 28.8 (+2.2) | 31.8 (+3.8) | 31.1 (+2.8) | 31.4 (+3) | 32.6 (+3.4) |
| Max defl. D200 (ms) | 29.6 (+3.0) | 31.9 (+3.9) | 31 (+2.7) | 31.5 (+3.1) | 32.2 (+3.0) |
| Max defl. D300 (ms) | 30.2 (+3.6) | 32.2 (+4.2) | 31.2 (+2.9) | 31.8 (+3.4) | 32.5 (+3.3) |
| Max defl. D450 (ms) | 30.8 (+4.2) | 32.9 (+4.9) | 31.7 (+3.4) | 32.6 (+4.2) | 33.4 (+4.2) |
| Max defl. D600 (ms) | 31.8 (+5.2) | 33.6 (+5.6) | 31.9 (+3.6) | 33.4 (+5.0) | 33.9 (+4.7) |
| Max defl. D900 (ms) | 33 (+6.4) | 35.5 (+7.5) | 33.8 (+5.5) | 35.2 (+6.8) | 35.4 (+6.2) |
| Max defl. D1200 (ms) | 35 (+8.4) | 37.7 (+9.7) | 35.7 (+7.4) | 37 (+8.6) | 37.2 (+8.0) |

Figur 8.8 visar grafiskt förhållandet mellan tidsförskjutningen och avstånd från lastcentrum där det noteras ett mer linjärt samband med ökande avstånd från belastningscentrum. Figur 8.9 visar belastningsförloppet av väggkroppen för de fem utvalda mätpunkterna. Den övre delen av kurvan i respektive loop i diagrammet visar pålastningsförloppet (ökande last ger ökande deflektion) och undre delen av kurvan visar responsen vid avlastning. Det noteras att den loop som innesluter störst area är representativ punkt 2, mätpunkten som upptar minst area i hysteresdiagrammet är representativ punkt 1.



Figur 8.8: Grafen visar förhållandet mellan tidsförskjutningen och avstånd från lastcentrum



Figur 8.9: Diagrammet visar deformation i relation till belastning

8.6 Intervjustudie

8.6.1 Val av bärighetsmått

Gällande användning av ytmodul ansåg de som ställdes frågan att styrkan med måttet är att det är ett relativt enkelt mått som beskriver hela konstruktionen men också att det baseras på en förenkling av verkligheten. Ytterligare en svaghet är att Trafikverkets metodbeskrivning inte innehåller någon metod för att temperaturkorrigera ytmodul. Vid tunnare beläggningar spelar detta dock ingen större roll då asfalten tillför relativt lite till den totala bärigheten.

En av de intervjuade svarade att användningen av SCI skulle vara ett mer förlåtande mått på packningen då det delvis skulle undvika terrassens variation. Det skulle däremot inte ge mer information om konstruktionens livslängd.

Att använda bärförmågeklass eller andra mått baserade på dragtöjning i underkant asfalt var de som ställdes frågan positiva till då det beskriver vägens motstånd mot sprickbildning och att det ingår temperaturkorrigering i Trafikverkets metodbeskrivning för det måttet. Det ansågs dock inte relevant för vägkonstruktioner med tunnare beläggning då det inte bildas dragtöjning i underkant asfalt i det fallet.

8.6.2 Statistisk formulering av bärighetskrav

Intervjupersonerna frågades hur de tyckte kravet skulle formuleras, mer specifikt om det skulle vara uttryck som ett lägsta tillåtna värde, medelvärde, percentil etc.

Generellt delades uppfattningen att vikten skall ligga vid att begränsa antalet svaga partier och att kravet bör formuleras därefter. Medelvärde var de generellt mer kritiska till då det kan tillåta väldigt låga värden givet att resterande värden är relativt höga eller kompenseras av extremt höga värden. Samtliga var överens att användningen av en låg percentil var ett lämpligare alternativ.

Angående att formulera kravet som ett lägsta tillåtna värde ansåg en som arbetade med kravställning att det var för hårt och riskerar att leda till att entreprenören överdimensionerar vägen för att uppfylla kravet.

8.6.3 Tidpunkt för mätning

Alla intervjupersoner är överens om att fallviktsmätningen bör utföras inför slutbesiktning. Beställaren bör dock ha i åtanke att bärigheten ökar över tid och den kravsatta nivån bör därför vara lägre än önskad slutgiltig bärighet alternativt att en acceptabel åtgärd är att mäta igen efter ett tag.

I det fall då slutbesiktning infaller under säsonger med ogynnsamma förhållanden t.ex. tjällossning eller hög fukthalt i terrass bör det tas i beaktning att mäta vid en senare tidpunkt.

8.6.4 Bärighet på terrass och obundet material

Om inte kravet uppfylls vid slutbesiktningen är det svårt att utföra några lämpliga åtgärder då vägen är färdigbyggd. Intervjupersonerna frågades därför om det hade varit bättre att istället ha ett bärighetskrav på obundet material då det skulle tillåta entreprenören att lägga till mer obundet material snarare än att åtgärda med tjockare asfaltslager. Sammanfattningsvis tyckte de intervjuade att det teoretiskt sätt är lämpligare att kontrollen utförs på det sättet, men i praktiken lämpar det sig mest att utföra kontrollen på färdig produkt. De tycker att entreprenören själv får utföra kontroller under byggnationen och utföra åtgärder som gör att de uppfyller det slutgiltiga kravet. Med det i åtanke önskar entreprenörer en metodik där de kan bestämma lämpliga åtgärder efter att exempelvis ha utfört statisk plattbelastning på terrass eller gjort fallviktsmätning på obundet material.

9 Diskussion

9.1 GC-väg Rinnebeck Lackalänga

Mätresultaten från GC-väg Rinnebeck Lackalänga visar en ökning av bärighet mellan den första mätningen i december 2020 och den senaste i oktober 2022. Mätningen som utfördes i juni 2021 uppvisade lägre bärighet än både december- och oktobermätningen och en sådan sänkning av bärighet skulle förväntas om mätningen gjordes i samband med tjällossning. Detta anses däremot vara en orimlig förklaring då mätningen gjordes i Skåne under juni månad.

En övergripande hypotes kring varför de uppmätta ytmodulerna var låga (<200 MPa) var att fallviktsens slag skapar permanenta deformationer i vägen. Denna teori lyftes av några av de intervjuade personerna vilket även bekräftades vid sista fallviktsmätningen där flera slag gjordes på samma punkt vilket visade att fallvikten packade vägen avsevärt under de första fem slagen. En anledning till att denna deformation uppstår kan vara att en GC-väg inte utsätts för samma efterpackning som bilvägar gör på grund av den lägre trafiklasten.

Ovan nämnda resonemang svarar däremot inte på frågan om varför de uppmätta ytmodulerna i juni är så pass låga. Mätningen i både december och oktober har genomgående högre ytmodul längs sträckan jämfört med mätningen i juni enligt Figur 8.1. Tabell 8.7 antyder att mätfel kan ha uppstått i junimätningen då resultaten innehåller otillåten hög minskning av deflektion mellan slag i samma punkt. En möjlig förklaring till att mätfelet har uppstått är att mätutrustningen inte har varnat mätoperatören för att skillnaden mellan fallviktslag ett och två är större än 5% och nya fallviktslag har därmed inte utförts. Jämförelse mellan de olika mätningarna visar att individuella fallviktsmätningar kan producera svårförklariga resultat.

Det finns olika tillvägagångssätt för att hantera det faktum att fallvikten efterpackar vägen. Ett alternativ skulle vara att slå många slag med fallviktsapparaten tills vägen upphör att packas och att det sista värdet skall bättre motsvara vägens ”riktiga” bärighet. Samtidigt som fallvikten kan packa vägen avsevärt betyder det att fortfarande finns packningspotential hos konstruktionen som entreprenören skulle kunna hanterat. Det bör nämnas att kvarvarande packningspotential inte nödvändigtvis betyder att entreprenören har utfört packningen inkorrekt utan att de kan ha följt alla krav från Trafikverket och allmän material- och arbetsbeskrivning, AMA men att det inte var tillräckligt för just denna konstruktions förutsättningar. Packningspotentialen leder till lägre uppvisad bärighet och bör därför uppmuntra entreprenören till att vara noggrann med packningen.

För att utveckla bärighetsutredningar av GC-vägar hade det varit av värde att utreda fallviktsmätningar med reducerad last. Vid exempelvis fallviktsmätningar på landningsbanor används en högre last för att bättre motsvara den dimensionerande lasten.

Det kan därför ifrågasättas hur lämpligt 50 kN är för en GC-väg. Det skulle ge extra värde om det också medförde en minskning av de permanenta deformationer likt dem som fallvikten orsakade i GC-väg Rinneback Lackalänga. Tester utförda med triaxialapparat med upprepade tester visar att andelen permanenta deformationer ökar med ökad ackumulerad spänning. Det hade dock endast varit relevant om samma resultat gällde vid enskild belastning men med ökande last.

Från analysen av fallviktsdata i Figur 8.1 är det tydligt att ytmodulen är betydligt högre under de sista 200-300 metrarna. En trolig förklaring till detta är att GC-vägen är belägen på den gamla bilvägen. Skillnaden i bilvägens utseende i dagsläget jämfört med tidigare då GC-vägen inte fanns är att väglinjen har justerats. Vägrenen på båda sidor av bilvägen är avsmalnad samt att det svängande körfältet har förkortats ned för att ge plats åt GC-vägen utan att bredda vägkonstruktionen. Bilvägen är antagligen en kraftigare konstruktion vilket ses som förklaringen till att ytmodulen är så pass hög på denna sträcka. Det bör övervägas om ytmodul längs denna sträcka bör bortses ifrån vid slutbesiktning på grund av att mätvärdena är mycket högre.

9.2 Bärighetsmått

Vid val av bärighetsmått som ska användas vid kravformulering finns det ett antal aspekter som bör tas i beaktning. Till en början, vad säger själva måttet om konstruktionen? Hela vägkonstruktionen samt terrassen påverkar vägens livslängd. Med det i åtanke känns det rimligt att använda ytmodul som mått på bärighet eftersom det beror på responsen från hela överbyggnaden samt styvheten hos terrassen. En risk med ytmodul som mått är att vägar som är byggda på väldigt styv terrass kommer nästan alltid uppvisa väldigt hög ytmodul, oavsett kvaliteten på den vägkonstruktion som byggts vilket kan få följden att svagheter i själva väggroppen missas.

Det finns mått som avser bärigheten i olika delar av konstruktionen, exempelvis SCI och BCI. Med utgångspunkten att det endast är relevant att tillämpa ett bärighetskrav i kravformuleringen av praktiska skäl, medför användningen av sådana mått risker där svagheter i andra delar av konstruktionen missas. Anledningen till att endast ställa ett bärighetskrav är för att minska styrningen av entreprenören sedan är det även tänkbart att ett krav är lättare att acceptera än flera.

Mått baserade på dragtöjning i underkant av asfalten t.ex. bärförmågeindex och bärförmågeklass bör ses som relevanta mått då dragtöjning är ett av de kriterier som vägen dimensioneras efter, samt att detta är orsaken till bärighetssprickor uppstår i vägen. För tunnare beläggningar (<75 mm) uppstår dock inte dragtöjning i underkant asfaltlagret och de mått som baseras på detta bör därmed undvikas som krav för dessa. Bärförmågeklass 1 är bestämt att motsvara bärigheten för en nybyggd väg dimensionerad enligt TRVK med en viss trafiklast och bör därför passa väl som krav på vanliga bilvägar. En svaghet skulle kunna vara att indelningen i fyra nivåer anses vara för grov. Metodbeskrivningen innehåller också en metod för att temperaturkorrigera dragtöjning vilket bör göras när det kommer till beläggningar över 100 mm.

Genom att utnyttja passningsräkning kan styvhetsmoduler för individuella lager

beräknas. Detta kan tänkas ge en mer detaljerad beskrivning av verkligheten än att beräkna exempelvis ytmodul vilket beskriver styvhetsmodulen hos vägen som om det vore ett och samma material. Modellen som passningsräkningen använder lämpar sig dock inte för beläggningar tunnare än 75 mm och kräver mer avancerade beräkningar med exempelvis PMS Objekt. I fallet GC-väg Rinnebäck Lackalänga producerade passningsräkning orimliga styvheter men med acceptabla kvadratiska medelvärden. Att använda sig av mått som kräver passningsräkning medför risken att det inte går att producera rimliga resultat när kravet skall kontrolleras. Antingen att kvadratiska medelvärdena är för höga eller att de producerade styvheterna är orealistiska. Det går att argumentera för att det skulle vara opraktiskt att sätta krav på styvheten i de olika lagrena i konstruktionen. Alternativt ställs endast krav på ett lager i konstruktionen, men då uppstår frågan om vilket lager som ska väljas.

Valet av bärighetsmått för en väg med tunnare beläggning är begränsat till ytmodul, medelmodul, undergrundsmodul eller något av de enklare måtten som exempelvis SCI. Generellt borde intresset ligga i att studera hela väggroppens och terrassens bärighet vilket gör ytmodul till ett lämpligt mått. Metodbeskrivningen innehåller ingen direkt metod för att temperaturkorrigera ytmodulen, men det är möjligt med metoder som exempelvis den framtagen vid VTT. Däremot kan det diskuteras om det dels är värt att göra och dels om resultaten blir pålitliga. Bärigheten som en tunn beläggning tillför till en väggkonstruktion är liten och den variation i styvhet som temperaturen orsakar kan anses vara försumbar. Detta är något som intervjupersoner har påpekat. Sedan finns det även forskning som visar att tunnare beläggningar beter sig annorlunda med avseende på temperatur där det har visats att deflektionen nödvändigtvis inte ökar vid stigande temperatur.

9.3 Kravformulering

För att säkerställa att de krav som ställs har blivit uppnådda utförs kontroller av entreprenaden. I projektet GC-väg Rinnebäck-Lackalänga ställdes ett bärighetskrav av Trafikverket och kontrollmetoden som användes för att mäta bärighet på vägen var fallviktsmätning. Från de intervjuer som har gjorts är alla de intervjuade av åsikten att mätning bör utföras vid slutbesiktning av vägen. Däremot hävdar de att en dialog måste föras mellan entreprenör och beställare gällande vad konsekvensen blir om kravet inte skulle vara uppnått. Ett förslag som har dykt upp vid flera intervjuer är att en ny fallviktsmätning bör göras vid senare tillfälle då styvheten i asfalten har ökat samt att trafiklasten har efterpackat vägen vilket leder till ytterligare ökad bärighet. Åtgärden att utföra en ny mätning en tid senare kan alltså leda till att kraven uppnås.

I intervjustudien har de tillfrågade fått frågan om hur bärighetskravet bör vara formulerat i fallet då ytmodul används, det vill säga om ett medelvärde längs hela sträckan ska användas, ett minsta tillåtna värde eller ett percentilmått. De intervjuade personernas åsikter skiljer sig något åt i denna fråga, men gemensamt för alla är att de anser att kravet borde vara ställt så att svaga partier upptäcks och kan åtgärdas om de uppvisar för låg bärighet. Fallviktsdata från GC-väg Rinnebäck-Lackalänga visar att ytmodulen varierar längs sträckan och att vissa punkter uppvisar en ytmodul på över 800 MPa som är avsevärt mycket högre än de 200 MPa som kravställdes för me-

delvärdet. Denna höga bärighet bidrar till att öka medelvärdet längs sträckan vilket får konsekvensen att de svaga partierna inte uppmärksammas på samma sätt. Skador längs vägen kommer att uppstå där bärigheten är låg och de sträckor med extra hög bärighet kommer inte att täcka de negativa konsekvenserna av skador som uppstår på de svaga partierna. Med detta resonemang är ett krav som är ställt på medelvärde av ytmodul ett mått med brister.

Ett annat mått som skulle kunna användas är ett minsta tillåtna värde vilket innebär att om ett eller flera mätvärden understiger ett visst värde är kravet inte uppnått. Detta mått är bra eftersom det uppmärksammar svaga partier, men från intervjuer har det framkommit att det kan vara ett svårt mått att använda. En person som arbetar med kravställning påpekade att risken är att entreprenörerna överdimensionerar vägen för att de är rädda för att bli underkända vid slutbesiktning. Detta kan innebära ett slöseri av naturresurser eftersom partier antagligen blir kraftigare än nödvändigt.

Det anses vara lämpligt att uttrycka kravnivån som percentil eftersom det är något mer förlåtande än ett absolut minimimått samt att det ändå uppmärksammar svaga partier. Sätts ett mått på att exempelvis 15-percentilen innebär det att beställaren accepterar att 15% av alla mätvärden understiger det satta kravet och resterande mätvärden kommer då att överstiga kravet. Ju lägre percentil som ställs i kravet, desto striktare blir kravet.

Trafikverket presenterar i sin metodbeskrivning för fallviktsmätningar en metod för att temperaturkorrigera fallviktsdata då beräkningar på töjning utförs. I detta arbete studeras en GC-väg som har tunnare beläggning än 75 mm vilket får konsekvensen att Trafikverkets metod inte längre är applicerbar. Detta stärks ytterligare av studier som visar att tunna beläggningar inte uppvisar samma respons vid belastning och ökande temperatur som tjockare beläggningar gör. Analys av mätvärden på GC-vägar saknar en tydlig metod som beskriver hur temperaturkorrigering skall göras på ett tillförlitligt vis. Från intervjustudien lyfts däremot att temperaturkorrigering inte borde vara nödvändig att göra på tunna beläggningar eftersom dess inverkan antas vara försumbar.

Hur fukthalten i vägkonstruktionen ska hanteras är en fråga som har varit svårare att besvara. Utgångspunkten är att ett ökat fukttinnehåll i de obundna lagren leder till lägre bärighet. Det är möjligt att mäta en vägkonstruktions fukttinnehåll men det är tidskrävande och säger endast något om fuktförhållandena vid mätpunkten och mättillfället. Fallviktsmätningar kan utföras över långa sträckor där fukttillståndet i vägen kan variera kraftigt. Analyser av belastningshistorik kan säga något om konstruktionens fukttinnehåll då det antas gå åt energi att pressa ut vatten ur väggkroppen men utan uppmätt fukttinnehåll är det svårt att säga något definitivt. Tabell 8.8 tillsammans med Figur 8.8 visar att den nedre delen av väggkroppen, inklusive undergrunden uppvisar större tröghet än den övre delen, vilket skulle kunna indikera att vatten i konstruktionen påverkar mätresultatet. Faktum att fallvikten efterpackar vägen leder också till en större energiåtgång och det kan därför vara svårt att särskilja mellan fukt och kvarvarande packningspotential.

Med vetskapen om att bärigheten ökar över tid bör kravets nivå sättas med det i åtanke. Kravet som ställs bör vara lägre än bärigheten som önskas under brukandeti-

den. Visar det sig att mätvärden understiger det kravställda värdet bör även analyser göras med avseende på fukt och temperatur för att undersöka om bärigheten skulle vara högre om mätningar hade gjorts under mer gynnsamma förhållanden, innan entreprenaden underkänns.

9.4 Konsekvenser av bärighetskrav

Många av de personer som intervjuades påpekade att kontroll av konstruktionens bärighet gör mer nytta om det utförs innan beläggning lagts, förslagsvis redan på förstärkningslagret. Görs detta kan entreprenören anpassa konstruktionen därefter, vilket inte är möjligt om det endast görs mätningar på översta lagret vid slutbesiktning. Då är det för sent att göra kostnadseffektiva justeringar. Genom att kravet sätts på slutprodukten bör det uppmuntra entreprenörer att vara noggrannare med packningen, men även att kontroller görs på konstruktionen under byggskedet.

I projektet GC-väg Rinnebäck-Lackalänga var detta fallet, då entreprenören beställde fallviktsmätning på det obundna bärlagret och förstärkte de svagaste partierna antingen med geonät eller genom att lägga på extra asfalt. Däremot är det önskvärt att inte åtgärda partier med lägre bärighet med asfalt utan med obundet material som dels är billigare och dels inte har lika stor påverkan på klimatet. Detta underlättas av att förstärkningsbehovet identifieras i ett tidigt skede att byggprocessen som möjligt. Kravet borde därför uppmuntra till ökad noggrannhet redan i dimensioneringsskedet med att undersöka de geologiska förutsättningarna och dimensionera därefter. Redan då terrassen är framskrapad bör bärigheten bedömas. En fallviktsmätning är praktiskt sett komplicerat att utföra i det skedet eftersom terrassen skrapas fram bit för bit, vilket gör det svårt att få en sammanhängande mätserie under samma klimatförutsättningar. Terrassen kan även vara för instabil för att köra på med fallvikt kopplad till en bil. Statisk plattbelastning är däremot enklare att utföra eftersom tunga anläggningsmaskiner redan är på plats och kan ta sig ut på terrassen. YPK bör användas vid packningsarbetet för alla lager i vägkonstruktionen och med hjälp av detta bestämma mätpunkterna där statiskt plattbelastning ska utföras. Från intervjustudien nämndes även att entreprenörerna normalt är duktiga på att avgöra om de har tillräcklig bärighet på terrassen enbart genom ockulär besiktning alternativt att köra ut med en bil och känna hur eftergivlig terrassen d.v.s. se om spår bildas på grund av lätt belastning. Då vägen därefter byggs upp med obundet material och packas är det enklare att utföra fallviktsmätningar. Utifrån data som samlas in från statisk plattbelastning på terrassen och fallviktsmätning på obundet material borde det gå att bedöma vad den slutgiltiga bärigheten borde bli och huruvida justeringar på konstruktionen är nödvändiga.

Det krävs en förståelse för att entreprenörer till en början kommer att vara tveksamma till bärighetskrav i totalentreprenader. Som flera av de intervjuade personerna har påpekat innebär bärighetskrav en ökad risk för entreprenören då de inte säkert kan veta att de i slutändan kommer att uppnå kravet. Som tidigare nämnt är förhoppningen att kravet skall göra entreprenören noggrannare med packning och att de kontrollerar mer under byggtiden. Men beställaren har också ett ansvar att sätta kravet på rätt nivå. Kravet måste vara satt så att det uppfylls om entreprenören har dimensionerat rätt och varit noggrann under byggnationen utan att det leder till att vägkonstruktionen

överdimensioneras. Förhoppningen är att över tid kommer beställare bli bättre på att ställa dess krav på rätt nivå och entreprenörer blir bättre på att hantera dem.

9.5 Analys av beräkningsmetoder

Vid bedömningen av de olika temperaturkorrigeringsmetoderna analyseras både resultaten de producerar samt hur de praktiskt går att använda. Analys av resultaten blir komplexa då det är svårt att avgöra om ett resultat är rätt eller fel. Däremot går det att utgå från vad temperaturkorrigeringen förväntas åstadkomma. Den studerade vägkonstruktionen har en tunn beläggning och temperaturkorrigering bör därför inte påverka den totala bärigheten särskilt mycket. Det är främst deflektioner från de geofoner som är placerade nära belastningscentrum som bör påverkas av temperaturkorrigeringen. Deflektionerna från de yttersta geofonerna bör vara opåverkade eftersom de ska mäta responsen längre ned i konstruktionen eller undergrunden där materialets styvhet bör vara opåverkat av temperaturförändringar.

Resultatmässigt går det att argumentera för att VTTs samt Trafikverkets metod producerar de mest trovärdiga resultaten då de korrigerar minst i detta fall. VTTs metod känns mer trovärdig dock eftersom det syns en tydlig minskning i korrigering mellan SCI och BCI. Det är förväntat då SCI beskriver övre delen av konstruktionen och BCI den undre delen. Denna skillnad i korrigering syns inte i resultaten från Trafikverkets metod.

Straube och Jansens samt den modifierade versionen av Trafikverkets temperaturkorrigeringsmetod producerar relativt lika resultat när det gäller ytmodul men en tydlig skillnad observeras när det kommer till SCI och BCI. Straube och Jansens metod korrigerar SCI nästan lika mycket som BCI medan den modifierade versionen av Trafikverkets temperaturkorrigeringsmetod korrigerar SCI mer än BCI. Med utgångspunkt att en konservativ korrigering är mer realistiskt i detta fall anses dessa metoder vara mindre trovärdiga än VTTs och Trafikverkets eftersom de gör kraftiga temperaturkorrigeringar trots att beläggningen är tunn.

Straube och Jansens metod tar inte beläggningens tjocklek i beaktning till skillnad från andra metoder. Detta kan vara anledningen till att det inte märks någon större skillnad i korrigering mellan SCI och BCI. I beskrivningen för Straube och Jansens metod beskrivs att två olika typer av beläggningar studerats, en tjock och en som är tunnare. Ett problem som uppstår när Straube och Jansens metod ska implementeras på den studerade GC-vägen i detta arbete är att deras ”tunna” beläggning är 220 mm tjock. Straube och Jansens metod är empiriskt framtagen och baseras alltså på hur en tjock beläggning beter sig under varierande temperatur. Detta skapar naturligtvis problem då den ska användas på en tunn vägkonstruktion med 45 mm asfaltslager.

Trafikverkets egna och den modifierade versionen av Trafikverkets metod skiljer sig endast när det gäller temperaturkorrigering av beläggningens elasticitetsmodul. De baseras på passningsräknade styvhetsmoduler för varje mätpunkt. Metoden skall dock egentligen inte användas för beläggningar under 75 mm. Metoder som kräver passningsräkning innebär risker då det kan finnas mätpunkter där det inte går att pass-

ningsräkna fram realistiska resultat. De kräver också mer handpåläggning för den som analyserar datan t.ex. vid bestämning av startmoduler och rimlighetsbedömning av producerade styvhetsmoduler.

Straube och Jansens samt VTTs metoder är enklare att använda då det är grundresultatet från mätningen (deflektionsdata) som temperaturkorrigeras och det går sedan att följa metodbeskrivningen för att beräkna olika bärighetsmått.

Denna bedömning av metoder för temperaturkorrigering görs endast baserat på mätresultat från GC-väg Rinnebäck-Lackalänga och ses därmed inte som en generell analys av GC-vägar. Däremot kan slutsatser dras kring hur de ovan nämnda temperaturkorrigeringsmetoderna fungerar för konstruktioner med tunnare beläggningar. Som tidigare diskuterat, kan det argumenteras att det är inte nödvändigt att temperaturkorrigera fallviktsdata från tunnare konstruktioner då beläggningen bidrar relativt lite till den totala bärigheten. Men om temperaturkorrigering skall genomföras anses VTTs metod vara bäst. Dels för att den korrigerar relativt konservativt och korrigerar deflektionerna direkt och tillåter beräkning av mått som exempelvis ytmodul.

10 Slutsatser

Nedan presenteras slutsatser som skall besvara frågeställningen.

Vilket bärighetsmått bör användas?

- Valet av bärighetsmått beror på vilken konstruktion det avser. Konstruktioner med beläggningar under 100 mm är begränsade till enklare bärighetsmått där ytmodul rekommenderas att användas då det beskriver hela konstruktionen. För konstruktioner med tjockare beläggning rekommenderas bärighetsmått baserade på dragtjörning i underkant beläggning såsom bärförmågeindex eller bärförmågeklass då metodbeskrivningen redan innehåller temperaturkorrigering för dessa och det är ett lämpligt kriterie att kontrollera.

Vilket statistiskt mått bör användas för kravställning (medelvärde, minsta värde, percentil etc.)?

- Kravet bör formuleras som en percentil då fokus bör läggas på att minimera de svagaste partierna i vägkonstruktionen. En annan styrka med percentil är att det inte påverkas avsevärt av avvikande värden som är typiskt för resultat från fallviktsmätningar.

Vilken nivå skall kravet ligga på?

- Kravet skall läggas på en nivå där både entreprenör och beställare accepterar en balans mellan entreprenörens risk och beställarens önskan om en välkonstruerad slutprodukt. Kravet skall vara uppfyllt givet att entreprenören har dimensionerat konstruktionen korrekt och varit noggrann under byggprocessen, i synnerhet med packningen samtidigt som entreprenören inte väljer att överdimensionera konstruktionen.

Skall mätresultaten temperaturkorrigeras och hur?

- För tjockare beläggningar bör mätresultaten temperaturkorrigeras då temperatur har en stor inverkan på vägens bärighet. För mått baserade på dragtjörning och för passningsräknade styvheter innehåller metodbeskrivningen temperaturkorrigering. För temperaturkorrigering av ytmodul och andra enklare mått bör en metod likt den från VTT användas. Det är en enkel metod som tar belägningens tjocklek i beaktning och producerar rimliga resultat, åtminstone för fallviktsdata från GC-väg Rinneback Lackalänga. För konstruktioner med tunnare beläggningar finns det anledningar att inte temperaturkorrigera mätresultat. Dels spelar det mindre roll då belägningen inte tillför mycket till konstruktionens totala styvhet och dels för att tunnare beläggningar inte alltid beter sig likadant som tjockare när det kommer till korrelationen mellan temperatur och styvhet.

11 Rekommendationer

- Det hade varit av värde att utreda huruvida lägre belastning vid fallviktsmätning leder till en minskad proportion permanenta deformationer. Genom att först utföra ett packningstest med en fallvikt på 50 kN likt det utfört i detta arbete och sedan på en närliggande punkt utföra samma test men med en lägre last borde den relativa packningen kunna analyseras.
- Metodbeskrivningen för utförande av fallviktsmätning samt analys av data gäller idag för alla typer av vägar. Dragtöjningsbaserade mått samt passningsräkning gäller dock inte för konstruktioner med en beläggning tunnare än 75 mm. Detta utesluter i praktiken dessa mått för GC-vägar. I framtiden kan det vara tydligare om det införs en separat metodbeskrivning för GC-vägar eller förtydligar detta i nuvarande metodbeskrivning. Särskilt då en framtida rekommendation skulle vara att använda lägre last för fallviktsmätningar utförda på GC-vägar.
- Fukt i väggroppen påverkar styvheten i en väg och därmed även resultat från fallviktsmätning. Forskning visar att analys av belastningshistorik kan säga något om vägens fuktinnehåll. Det hade varit av värde om Trafikverkets metodbeskrivning nämnde hur belastningshistorik kan åtminstone ge en indikator om vägens fuktinnehåll och dess påverkan på resultatet. I framtiden hade det även varit önskvärt att kunna korrigera för fuktens påverkan likt hur det korrigeras för temperatur.

Referenser

- Abdel-Rahman, M. (2020). *Advancements in Geotechnical Engineering*. Springer.
- Agardh, S. (2021). *Föreläsning Fallvikt, VVBN10 - Vägbyggnadsteknik*. [2021-01-26]. Lunds Tekniska Högskola.
- Agardh, S. och E. Parhamifar (2014). *Vägbyggnad*. 1st. Liber.
- Asfaltskolan (2022). *Asfaltboken*. <https://asfaltboken.se/> [2022-09-27].
- Birgisson, B. och B. E. Ruth (2003). "Improving Performance Through Consideration of Terrain Conditions: Soils, Drainage, and Climate". I: *Journal of the Transportation Research Board* 1819(1), 369–377. DOI: 10.3141/1819b-47.
- Bryman, A. (2016). *Social Research Methods*. Oxford University Press.
- Byggandets kontraktskommitté, . (2007). *ABT 06. Allmänna bestämmelser för totalentreprenader avseende byggnads-, anläggnings- och installationsarbeten*.
- Carlsson, H. (2004). *Beskrivning av VTI-metod för bärighetsklassificering av svenska flygfältsbanor*.
- Destia (2020). *Finnish design guidelines: Design of road structures*.
- Di Maria, V., M. Rahman, P. Collins, G. Dondi och C. Sangiorgi (2013). "Urban Heat Island: thermal response from different types of exposed paved surfaces". I: *International Journal of Pavement Research Technology* 6(4), s. 414–422. DOI: 10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(4).414.
- Ekblad, J. och R. Lundström (2020). *Entreprenadform och teknisk kvalitet i vägprojekt*. Kungliga Tekniska Högskolan, KTH.
- Forsblad, L. (2000). *Packning: handbok om packning av jord- och bergmaterial*. Svensk byggtjänst.
- Hellman, F (2011). *Packning av obundet material i vägkonstruktioner*. VTI.
- Hon, P (2010). *Utvärdering av kontrollmetoder för obundna granulära material*.
- Jansson, H. och S. Said (2001). *Töjningskriterier tunna beläggningar*. VTI.
- Jansson, H. och L. Wiman (1988). *Deformation i vägen vid provbelastning*. VTI.
- Kuttah, D. (2021). *Development of a simple field method for measuring permanent deformations in silty sand subgrade*. VTI.
- Lekarp, F., U. Isacson och A. Dawson (2000). "State of the Art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates". I: *Journal of transport engineering* 126. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(76).
- Nilsson, J. och A. Ihs (2006). *Funktionsupphandling: sammanfattning av kunskapsläge och rekommendationer för fortsatt forskning*. VTI.
- Nordvall, A och G. Holmström (2020). *Cykelvägar anlagda på befintlig jord*.
- Papadopoulos, E. och J.C. Santamarina (2016). "Analysis of inverted base pavements with thin-asphalt layers." I: *International Journal of Pavement Engineering* 17:7, s. 590–601. DOI: 10.1080/10298436.2015.1007232.
- Rashid, L (2020). *Funktionskrav på vägars bärighet*.
- Redelius, P. (1995). *FAS Asfaltbok*. Broman-Tryck AB.
- Sletten, J. (2022). *Temperaturkorreksjon av nedbøyningsmålinger på vei*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet Fakultet for ingeniørvitenskap Institutt for bygg- og miljøteknikk.

- Spoof, H. och S. Petäjä (2000a). *Mätning av fallvikt (PPL-mätning)*. VTT:s avdelning för samhällsteknik, Esbo.
- (2000b). *Återberäkning av strukturmodul och beräkning av spänningar och deformationer*. VTT:s avdelning för samhällsteknik, Esbo.
- Straube, E. och D. Jansen (2009). “Temperature correction of falling weight deflectometer measurements”. I: *Proceedings of the 8th International Conference (BCR2A '09)*. University of Illinois at Urbana - Champaign, Illinois, USA 29 juni - 2 juli 2009, s. 789–798.
- Sulejmani, P., S. Said, S. Agardh och A. Abubeker (2021). “Impact of temperature and moisture on the tensile strain of asphalt concrete layers.” I: *International Journal of Pavement Engineering* 22:13, s. 1711–1719. DOI: 10.1080/10298436.2020.1715404.
- Söderberg, J. (2013). *Att Upphandla Byggprojekt*. 6:3. Studentlitteratur.
- Trafikverket (2011). *TRVK Väg - Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion*.
- (2019a). *Förfrågningsunderlag daterad 2019-09-20. Väg 108 Lund-Kävlinge Rinnebäck-Lackalänga*.
- (2019b). *Utvärdering av vägkonstruktioners bärighet med fallviktsapparat*.
- (2020). *Utvärdering av vägkonstruktioners bärighet med fallviktsapparat*.
- (2021). *TRVINFRA-00224: Överbyggnad väg, Dimensionering och utformning*.
- Vaitkus, A., J. Grazulyte, I. Kravcovas och R. Mickevic (2021). “Comparison of the Bearing Capacity of Pavement Structures with Unbound and Cold Central-Plant Recycled Base Courses Based on FWD Data”. I: *Sustainability* 2021 13(11):6310. DOI: 10.3390/su13116310.
- Vaitkus, A., L. Žalimienė, J. Židanavičiūtė och D. Žilionienė (2019). “Influence of Temperature and Moisture Content on Pavement Bearing Capacity with Improved Subgrade”. I: *Materials* 2019 12(23):3826. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12233826>.
- Vägverket (2000). *Bearbetning av deflektionsmätdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat*.