

Bärighetsutredning av sekundära ballastmaterial

Uppföljning på gator i Malmö stad



LUNDS
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Teknik- och samhälle/trafik- och väg

Examensarbete:
Emin Högic
Axel Johansson

© Copyright Emin Hovic, Axel Johansson

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige
Media-Tryck
Biblioteksdirektionen
Lunds universitet
Lund 2023

Förord

Examensarbetet har genomförts vid Lunds tekniska högskola, institution för väg- och vatten, avdelning trafik och väg. Denna rapport följer upp och redogör för bärigheten på vägar i Malmö som byggts upp med betong- och tegelkross samt asfaltgranulat. Undersökningen har finansierats av Malmö stad som tillhandahållit fallviktsmätningarna samt ingående data.

Vi vill tacka vår handledare, Pajtim Sulejmani, universitetsadjunkt vid trafik och väg, Lunds tekniska högskola.

Sammanfattning

Behovet av krossmaterial ökar och i takt med ökande priser på bitumen samt svårigheten att få tag på krossmaterial i städerna så behöver man komma på nya sätt att bygga vägar. Ett sätt att minska mängden krossmaterial och bindemedel som används vid nybyggnation är att nyttja sig av sekundära ballastmaterial, alltså betong- och tegelkross samt asfaltgranulat. Det finns ingen större tilltro till denna typ av material i vägkonstruktioner. Detta på grund av en brist på uppföljning.

I denna undersökning jämförs vägkonstruktioner i Malmö som byggts med sekundära ballastmaterial i obundna lager med konventionella vägar. Man genomför en bärighetsutredning med hjälp av fallviktmätningar för att kunna säga något om de ingående lagerna i vägen.

En fallviktmätning simulerar en överfart med ett lastbilshjul genom att anbringa en kraftpuls på vägen. Intill lastpulsens mäts vägens rörelser med sensorer på olika avstånd från kraftcentrum. Dessa rörelser kallas deflektioner, och mäts i μm . Med resultatet från fallviktmätningen dras slutsatser om konstruktionen undertill. På några av vederbörande konstruktioner har det även genomförts en vägytemätning. Detta gav underlag för hur spårdjupsutvecklingen på konstruktionerna sett ut.

Det konstaterades att asfaltkross- och asfaltgranulat med tiden härdat och efterpackats i sådan utsträckning att konstruktionen i vissa fall fördubblat sin styvhet. Resultatet av konstruktioner innehållandes betong- och tegelkross frambringade att styvheten nästan förblev oförändrad över tid. Det argumenterades för att konstruktionen i fråga är lämplig på sitt geografiska läge men att det inte bör anläggas sådana vägar på platser där vägen kategoriseras som trafikclass 1 eller större i väg 94.

Nyckelord: Bärighet, fallviktmätning, deflektion, SCI, BDI, BCI, sekundära ballastmaterial, tegelkross, betongkross, asfaltgranulat, deflektionsbassäng, passningsräkning, Excel, spårbildning, ytmodul.

Summary

The need for crushed material is increasing and in line with increasing prices for bitumen and the difficulty of obtaining crushed material in the cities, new ways of building roads need to be found. One way to reduce the amount of crushed material and binders used in new constructions is to use secondary aggregate materials, id est crushed concrete, brick and asphalt granules. This is not a particularly new approach, it has been used in constructions already in the early 90s. Industry experts, however, do not have much faith in this type of material in road constructions. This is due to a lack of follow-up.

In this study, road constructions in Malmö that were built with secondary aggregate materials in unbound layers are compared with conventional roads. A bearing capacity investigation is carried out using fall weight measurements in order to be able to say something about the constituent layers in the road.

A falling weight deflectometer (FWD) simulates a passage of a truck wheel by applying a force pulse on the road. Adjacent to the force pulse, the movements of the road are measured using sensors at various distances from the force center. These movements are called deflections and are measured in micrometers (μm). Conclusions about the underlying construction are drawn based on the results obtained from the FWD test. In some cases, a pavement surface measurement has also been conducted on the relevant constructions. This provided information about the development of rutting on the constructions.

It was found that over time, asphalt aggregates and asphalt granules hardened and densified to such an extent that the construction, in some cases, doubled its stiffness. The results of constructions containing crushed concrete and brick showed that the stiffness remained almost unchanged over time. It was argued that the particular construction is suitable for its geographical location, but such roads should not be built in places where the road is categorized as traffic class 1 or higher in road 94.

Keywords: Buoyancy, falling weight deflectometer, FWD, deflection, SCI, BCI, BDI, secondary aggregates, crushed brick, crushed concrete, asphalt granulate, deflection basin, fit calculation, Excel, rutting, surface modulus.

Benämning	Förklaring
Isotropiskt material	Ett material som har samma egenskaper i alla riktningar.
Deflektionsgivare	Sensor på fallviktsapparaten som mäter nedböjningen av konstruktionen undertill i μm .
Stenmaterialets kornstorleksfördelning	Kornstorlek är partiklars/stenmaterialets diameter. (SGI 2019).
Stenmaterialets slaghållfasthet	Stenmaterialets förmåga att motstå stötar och slag.
Tjäle	Uppstår när jordtemperaturen uppnår fryspunkten för vatten. Det vill säga när vattnet i marken fryser till is.
Kapillärkraften	Är en kraft som kan driva vätskor genom olika kapillärer.
Bitumen	Bitumen består av kolväten och används som bindemedel i asfalt.
Hållfasthet	Beskriver ett materials förmåga att motstå laster.
Varmåtervinning	Inblandning av frästa asfaltmassor (asfaltgranulat) i ny asfalt.
Hydratisera	En kemisk reaktion där vatten reagerar med ett annat ämne.
Segmenterad platta vid fallviktsmätningar	En platta som är uppdelad för att säkerställa att lasten ska fördelas jämnt trots eventuella ojämnheter.
Dragtöjning	En form av töjning som oftast sker i underkant av beläggningen när den utsätts för en tung och lång belastning.

Innehållsförteckning

1 Inledning	2
1.1 Bakgrund	2
1.2 Syfte och mål	3
1.3 Metodbeskrivning	3
1.4 Avgränsningar	3
2 Litteraturstudie	4
2.1 Vägkonstruktion	4
2.1.1 Överbyggnad	4
2.1.1.1 <i>Slitlager</i>	4
2.1.1.2 <i>Bindlager</i>	5
2.1.1.3 <i>Bärlager</i>	5
2.1.1.4 <i>Förstärkningslager</i>	6
2.1.1.5 <i>Skyddslager</i>	6
2.1.2 Underbyggnad	7
2.1.2.1 <i>Schakt</i>	7
2.2 Sekundära ballastmaterial	7
2.2.1 Betongkross	8
2.2.1.1 <i>Krav</i>	8
2.2.1.2 <i>Tidigare projekt</i>	9
2.2.2 Asfaltkross.....	12
2.2.2.1 <i>Asfaltsgrenulat</i>	12
2.2.2.2 <i>Krav</i>	12
2.2.2.3 <i>Tidigare projekt</i>	14
2.2.3 Tegelkross	15
2.2.3.1 <i>Krav</i>	15
2.3 Metoder för bärighetsmätning i fält	16
2.3.1 Fallvikt.....	16
2.3.1.1 <i>Kraftpuls</i>	17
2.3.1.2 <i>Belastningsplatta</i>	17
2.3.1.3 <i>Deflektionsmätutrustning</i>	17
2.3.2 Statisk plattbelastning	18
2.3.3 Traffic speed deflectometer (TSD)	20
2.3.4 Mätning av spår och ojämnheter med mätbil.....	21
2.4 Parametrar för utvärdering av fallviktsmätning	23
2.4.1 Ytmodul.....	23
2.4.2 Asfaltstörning i underkant	25
2.4.3 Bärförmågeindex.....	25
2.5 Passningsräkning	26
2.5.1 Indata.....	26
2.5.1.1 <i>Lagermodell</i>	26

2.5.1.2 Tvärkontraktionstal.....	27
2.5.1.3 Startmoduler	27
2.5.1.4 Kontroll av lösning.....	27
3 Metod	29
3.1 Törringevägen	29
3.1.1 Bakgrund.....	29
3.1.2 Geografiskt läge	30
3.1.3 Beskrivning av konstruktion	30
3.1.4 Materialframställning	31
3.1.4.1 Betong till förstärknings – och bärlager	31
3.1.4.2 Tegel till förstärkningslager	31
3.1.4.3 Slaggrus till förstärkningslager	31
3.1.4.4 Erfarenheter av utläggningen.....	32
3.2 Svågertorp.....	32
3.2.1 Bakgrund.....	32
3.2.2 Geografiskt läge	32
3.2.3 Beskrivning av konstruktion	33
3.2.4 Erfarenheter under byggtiden	35
3.3 Snorkelgatan	35
3.3.1 Bakgrund.....	35
3.3.2 Geografiskt läge	36
3.3.3 Beskrivning av konstruktion.....	36
3.3.4 Erfarenheter från utläggning av massan.....	36
3.4 Insamling av data.....	37
3.4.1 Data från fallviktsmätningar	37
3.4.2 Tidigare data	37
3.5 Arbetsgång vid utförande av fallviktsmätning.....	39
3.5.1 Normalisering	39
3.5.2 Sättningslag och provbelastningar	39
3.5.3 Deflektionsbassäng	40
3.5.4 Analys av bärighetsmått	41
4 Resultat	42
4.1 Ytmodul	42
4.2 Deflektion	44
4.3 BCI	46
4.4 Uppskattad töjning i asfaltens underkant (ϵ_{a10}).....	48
4.5 Spårdjupsutveckling.....	50
4.6 Utveckling av styvheten hos materialen	51
4.6.1 Asfaltskross	52
4.6.2 Betong och tegelkross	53
5 Diskussion	54
5.1 Metoddiskussion.....	54

5.1.1 Sekundärdata.....	54
5.2 Resultatdiskussion.....	55
5.2.1 Överbyggnaders utveckling.....	55
5.2.1.1 <i>Asfaltsgranulat och asfaltskross</i>	55
5.2.1.2 <i>Tegel och betong</i>	57
5.2.1.3 <i>Framtida arbeten</i>	57
6 Slutsats.....	59
6.1 Rekommendationer till Malmö Stad	59
7 Referenser	60

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Världens länder har enats om agenda 2030 som består av 17 globala hållbarhetsmål. Det handlar om ett behov att avskaffa fattigdom, uppnå jämställdhet och bekämpa klimatförändringar. För att kunna möta detta behov krävs det förslag på innovationer som kan möta de globala samhällsutmaningar som man ställs inför idag. Det kräver ett aktivt arbete för hållbar tillväxt, i takt med urbaniseringen (Regeringen 2022). Det byggs om och det byggs nytt. Äldre konstruktioner rivs och det genereras stora mängder rivningsmassor som ofta hamnar på deponi. Därför är det mer relevant idag än någonsin att sträva efter en hållbar utveckling i anläggningsbranschen (Wiman och Tholén 1999, s.6).

Men vad är egentligen en hållbar utveckling, och hur definieras begreppet hållbarhet?

Generellt definieras hållbar utveckling som ”en utveckling som tillfredsställer dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillfredsställa sina behov” (Folkhälsomyndigheten 2022). För att främja detta i anläggningsbranschen krävs det tydliga ramar och principer kring hur man kan dra nytta av avfall och rivningsmaterial. Tydligare regelverk och enklare tillståndspedurer skulle medföra att det skapas starkare ekonomiska incitament för industrin att hantera materialen på ett klimatneutralt sätt. Idag finns det generella principer för ett hållbart tänkande som har utvecklats under en längre tid. En sådan är ”vagga till vagga”-principen vilken grundar sig i att samhälls- och produktutvecklingen har mycket att vinna på att efterlikna ekologiska system. Det innebär i stort sett att energi och material återanvänds i stället för att förbrukas och på så sätt generera avfall (Hållbarhetsguiden 2018).

I Sverige har man byggt några vägar med återvunnet material, inklusive i Malmö och andra delar av landet. Sekundära ballastmaterial har ersatt traditionella lager men det är oklart om de presterar lika bra som konventionella bergkrossmaterial. De ingående material i en vägkonstruktion har i regel en livslängd på 20–50 år. Till följd av detta kan man först efter det här tidsspannet avgöra huruvida sekundära ballastmaterial presterar lika bra som konventionella material.

Bygg- och konstruktionsvägledning saknas idag för denna typ av konstruktion. Det finns flera mindre pilotprojekt men ingen systematisk uppföljning har skett för uthållig och hållbar användning och det saknas anpassade regelverk och metoder för verifiering av produktgenskaper (Trafikverket 2022, s.26).

Inom Malmö stad finns det främst tre vägar/ områden som ägs och underhålls av staden och som är extra intressanta för uppföljning då två av dessa har byggts för nästan två decennier sedan, vilket i normala fall brukar vara livslängden för flexibla beläggningar. Det tredje projektet har byggts under sommaren 2022 vilket är mindre än ett år sedan det här projektet påbörjades.

1.2 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att jämföra sekundära ballastmaterial med konventionella ballastmaterial för att ge svar på hur bärigheten påverkas på lång sikt i vägkonstruktioner där tegel, betongkross, asfaltkross och asfaltgranulat använts. Arbetet ligger i att analysera fallviktsmätningar för tre områden i Malmö där sekundära ballastmaterial använts i vägkonstruktionen.

Målet med undersökningen är att skapa en djupare förståelse för hur särskilda ballastmaterial påverkar bärigheten på en väg under en längre period och således lägga en grund för framtida arbeten inom ämnet.

1.3 Metodbeskrivning

För att kunna göra en värdering av en väg krävs en uppfattning om vägkonstruktionens undergrundsförhållanden. Genom att studera fallviktsdata dras slutsatser om vägkonstruktionens bärighetstillstånd. Således kan man utvärdera effekten av sekundära ballastmaterial som bärlager/förstärkningslager. Ramboll genomförde under 2022 en rad fallviktsmätningar på uppdrag av Malmö stad som används som data i rapporten.

Generellt har arbetet genomförts i följande ordning:

1. Litteraturstudie om fallviktsmätning, vägkonstruktion och bärighetsanalys vilket beskrivs i kapitel 2.
2. Bärighetsanalys av tre förutnämnda konstruktioner vilket beskrivs i kapitel 3.
3. Jämförelse av vägarnas tillstånd med konventionella konstruktioner vilket beskrivs i kapitel 4.
4. Sammanställning av resultat och diskussion vilket beskrivs i kapitel 5 och 6.

1.4 Avgränsningar

Arbetet har i huvudsak fokuserats på de tre ovan nämnda konstruktionerna i Malmö som ägs av och underhålls av Malmö stad. Dessa vägar jämfördes med konventionella vägar med fokus på bärighet. Mätningarna som gjorts är genomförda med hjälp av en fallvikt, således kommer rapporten bara jämföra resultat från fallviktsmätningar.

2 Litteraturstudie

Litteraturstudien grundar sig i tidigare uppsatser, forskningsstudier och rapporter. Den sekundärdata som lägger grund för litteraturstudien är främst insamlad via internet och bibliotek. Syftet med litteraturstudien är att skapa en förståelse för läsaren inom ämnet för att lättare kunna ta del av resultatet och betydelsen av resultatet som rapporten tar fram. Om ytterligare fördjupad kunskap erfordras inom specifika områden hänvisas läsaren till referenslistan.

Den stora fördelen med att använda sig av en litteraturstudie vid insamling av data är att denna metod är resurseffektiv eftersom det går att ta del av stor mängd dokumentation under en kort tid (Paulson 2020, s.62). Nackdelen med denna metod är att vid användning av sekundärdata så är dokumentationen oftast skapad för ett annat syfte, även fast informationen är relevant för denna rapport.

2.1 Vägkonstruktion

Vägkonstruktioner idag består utav olika materialager där alla har specifika funktioner. Deras uppgift är att tillsammans säkerställa att vägen består säker, bärig och beständig under längsta möjliga tid och klarar av inverkan från klimat och trafik. Vägkroppen delas in i två delar, överbyggnad och underbyggnad. Överbyggnaden är den del av konstruktionen som tar emot lasten från trafiken som sedan fördelar den nedåtriktade kraften till underbyggnaden (Agardh & Parhamifar 2014).

2.1.1 Överbyggnad

2.1.1.1 Slitlager

Slitlagret kan även kallas beläggning och är det översta lagret i överbyggnaden. Slitlagret ska fungera som ett tak för vägkonstruktionen och som ett golv för trafiken. För att slitlagret ska uppnå bästa effekt ställs krav på följande (Granhage 2009).

- Friktion
- Deformationsresistens
- Jämnhet
- Hållfasthet

Slitlagret består oftast utav någon sorts asfaltsmassa beroende på vilken typ av väg som ska byggas. Det finns exempelvis asfaltsmassor som är lämpliga att ligga under en lång tid på lågtrafikerade gator eller andra som klarar av mycket

tung trafik. För att beläggningen ska bli så effektiv som möjligt ställs det krav på exempelvis (Granhage 2009, s.9).

- Bindemedelstyp
- Bindemedelslängd
- Stenmaterialets kornform och slaghållfasthet samt stenmaterialets kulkvarnsvärde och kornstoleksfördelning.

Asfaltsbeläggning är den vanligaste beläggningen och används i hela landet, men dess svaghet är tunga fordon och i huvudsak långsamtgående tunga fordon. Den tunga belastningen kan skapa deformationer i beläggningen. För att öka livslängden på asfaltsbeläggningen är det viktigt att rätt arbetsrecept väljs, därav finns det krav. Ska vägen exempelvis beläggas i Norrland som har ett kallt klimat kommer en bindemedelstyp som är mjukare att väljas för att undvika att sprickbildning skapas i vägen på grund av den hårda kylan (Granhage 2009, s.4).

Ett alternativt slitlager är betongbeläggningar. Den vanligaste platsen som denna beläggning förekommer i Sverige är vid busshållplatser. Anledningen är att betongbeläggningar klarar av belastningen bättre än en asfaltsbeläggning men är samtidigt betydligt dyrare (Granhage 2009, s.4). Betongbeläggningar kan dock komma att användas mer till följd av att de nya eldrivna bussarna blir allt vanligare. De eldrivna bussarna kan väga dubbelt så mycket som en dieseldriven buss (Karlström 2014).

2.1.1.2 Bindlager

Bindlager är ett bitumenbundet lager som används vanligen för att ge beläggningens lagret god resistens mot plastiska deformation. Bindlagret kan läggas både på asfalt och cementbundet grus och förebygger sprickbildning vid förekomst av tung trafik (Trafikverket 2014, s.57). Vid vägar där tillåtet antal standardaxlar är $\geq 5 \cdot 10^6$ eller vid beräknat antal tunga fordon per körfält $\text{ÅDT}_{k,tung} > 100$ (Trafikverket 2011, s.62).

Även på bindlagret ställs höga krav på stabilitet och styvhet. Vid användning av AG i bärlagret kan polymermodifierat bindemedel användas. Där bärlagret består av cementbundet grus används ABT eller ABb som bindlager (Trafikverket 2011).

2.1.1.3 Bärlager

Generellt finns det två olika bärlager i en överbyggnad, ett bundet bärlager och ett obundet bärlager. I det bundna bärlaget binds stenmaterialet ihop med bitumen i motsats till det obundna bärlaget, där krossat material enbart läggs ut. Bärlaget har som funktion att motstå de påfrestningar som en väg utsätts för under sin livstid och fördela lasten jämnt i underliggande lager (Asfaltboken 1999).

För att uppnå det givna ändamålet är det viktigt att bärlaget är av material som håller god kvalitet (Asfaltboken 1999). Under en längre period i vissa kommuner har asfaltsgranulat använts som ballast i bärlager. Vid dessa tillfällen byts vanligen det befintliga bärlaget ut mot ett tjockare lager av asfaltgranulat för att kompensera för dess lägre bärighet, i förhållande till konventionella material såsom bergkross (Jacobson 2002, s.10).

2.1.1.4 Förstärkningslager

Förstärkningslagrets och bärlagrets uppgifter är likartade, men eftersom förstärkningslagret ligger längre ner i väggkroppen är belastningen också lägre jämfört med bärlaget. Material som har lägre krav kan därför användas vilket således medför att kostnaden reduceras. Exempelvis så kan naturmaterial med <30 % helt okrossat material eller krossat berg användas i förstärkningslagret (Granhage 2009, s.6).

2.1.1.5 Skyddslager

Skyddslaget används för att överbyggnaden ska få rätt tjocklek. Detta på grund av att undergrundens material måste ligga på ett visst djup för att skydda mot tjäle eller exempelvis för att kapillärkraften ska vara tillräckligt hög. Materialkraven på skyddslaget är lägre än förstärkningslagret vilket också gör det billigare, men vid tunna skyddslager kan samma material som användes i förstärkningslagret användas (Granhage 2009, s.7).



Figur 1 Principiell uppbyggnad av vägöverbyggnad (Asfaltboken 1999).

2.1.2 Underbyggnad

Underbyggnaden är den del som ligger under överbyggnaden och den utgörs av övre delen av undergrunden med en terrass ovan på. Även på underbyggnaden ställs olika krav för att vägen ska kunna uppnå en jämn yta med tanke på belastning av trafik (Granhage 2009, s.35).

2.1.2.1 Schakt

Schakt förekommer ofta i samband med underbyggnad där avsikten är att schaktmassorna ska kunna användas till fyllning i väglinjen för att bygga upp vägens underbyggnad. Det är viktigt att dessa massor inte innehåller organiskt material som senare kan multna ner och skapa hålrum i underbyggnaden (Granhage 2009, s.35).

2.2 Sekundära ballastmaterial

Cirkulärt byggande är en modell som fokuserar på att minska avfallet och maximera återanvändningen av material. Detta kan uppnås genom att utforma byggnader för demontering, återanvändning av befintliga material och användning av återvunnet material (Fastighetsägarna 2021).

På senare år har man i breda drag utvärderat användningen av återvinning av industriavfall vid uppbyggnad och underhåll av hårdgjorda ytor. Flera miljarder ton av avfallsmaterial produceras årligen världen över varvid dessa faktiskt kan återvinnas och används i beläggningar för att uppnå en hållbar utveckling som skyddar miljön. Därtill är mer än sju procent av dessa utsläpp kopplade till beläggningsindustrin (Jahanbakhsh et.alc 2020, s.1).

Sekundära resurser är material som vanligtvis hade hamnat på deponi eller klassificerats som avfall men i stället återanvänds och finner sitt syfte (Naturvårdsverket 2023). Naturvårdsverket beskriver hur gamla avfallsdeponier är intressanta som ett komplement till produktion av mineraler på grund av sina höga metallhalter. På samma sätt är bygg- och rivningsavfall intressant och kan tillämpas som en del av en väggkropp. Med tanke på att avfallet från bygg och rivning är en av de största avfallsströmmarna i Sverige är det av vikt att hitta potentiella användningsområden (RISE 2022, s.6).

2.2.1 Betongkross

Krossad betong kan delas in i två olika ursprungsgrupper, restbetong och rivningsbetong. Rivningsbetong är material från exempelvis ett rivet byggnadsverk, t.ex. betongbeläggning, bro eller hus. Restbetong kommer från fabriksbetong och utgörs av överbliven betong eller betongvaror som kommer från tillverkning (Vägverket 2004).

De tekniska egenskaperna hos krossad betong beror främst på ursprungsbetongens ålder, tryckhållfasthet och förmåga att hydratisera. En annan faktor som visat sig ha en inverkan är renheten. Det vill säga frånvaron från andra material än ballast av krossat berg eller naturgas och cementpasta. Detta betyder att betong som har en hög tryckhållfasthet och en liten föroreningsgrad ger en krossad ballast av hög kvalitet som fungerar bra för vägbyggnad (Vägverket 2004).

2.2.1.1 Krav

Krossad betong delas in i fyra olika kvalitetsklasser utifrån dess egenskaper där kategori 4 är den minst hållfasta och 1 är den mest hållfasta.

Kvalitets- klass				
Krossad betong	Betong, betongvaror, murbruk, betongmurverk (%)	Obundna material, sten, hydrauliskt bundna material (%)	Lättvikts- material (cm^3/kg)	Övrigt material: kohesiva (ex. lera och jord), diverse metaller, trä, plast och papper (%)
Klass	Rc	Rcu	FL	X
1	Rc₉₀	Rcu₉₅	FL₂	X₁
2	Rc₉₀	Rcu₉₅	FL₂	X₁
3	Rc₇₀	Rcu₉₀	FL₅	X₁
4	Rc₅₀	Rcu₇₀	FL₁₀	X₁

Då krossad betong ska användas ska de uppnå ungefärligt samma styvhet och egenskaper som de lager det ersätter. De olika styvhetsmodulerna och dess kvalitetsklass kan avläsas i Tabell 2 (Trafikverket 2013).

Tabell 2 styvhetsmodul för krossad betong (Trafikverket 2013)

Kvalitetsklass	Styvhetsmodul [Mpa]
1-2	450
3	250
4	150

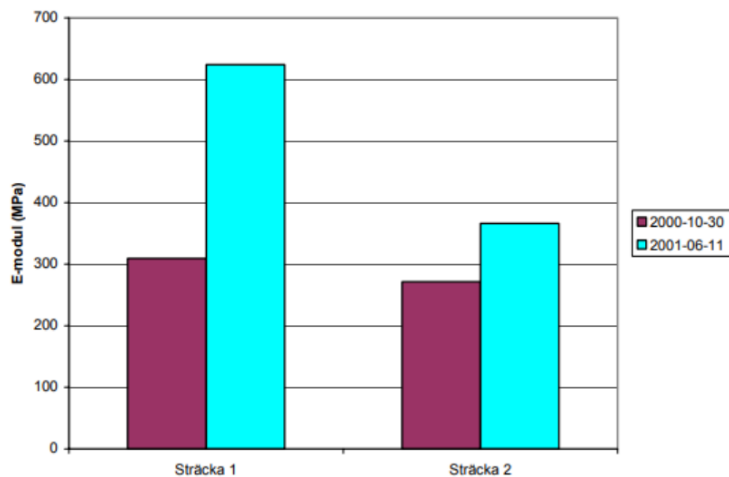
Materialet som levereras till beställare ska vara deklarerat (CE-märkt). För att få användas som skyddslager krävs att materialet har klass 3 och vid användning som underbyggnad och annan fyllning så krävs klass 4. Ifall materialet ska användas till bärlager i cykel- och gångvägar skall kraven för kvalitetsklass 1 eller 2 uppfyllas. Sorteringen för materialet måste även vara deklarerad från leverantör och minst ha kornfördelningen 0/16 (Trafikverket 2013).

2.2.1.2 Tidigare projekt

Stenbyvägen i Göteborg

2001 genomfördes ett projekt där VTI jämförde två olika vägsektioner där den ena är byggd med ett förstärkningslager av krossad betong och den andra med konventionella material. Vägen som undersöktes var Stenbyvägen i Göteborg där 100 meter byggdes med krossad betong som förstärkningslager (Carlsson 2001).

Efter det att vägen färdigställdes genomfördes två fallviktsmätningar, en direkt efter vägen färdigställdes när vägen inte trafikerats av många fordon. Den andra mätningen genomfördes 7 månader efter för att kunna dra slutsatser om hur materialet har påverkats av att vägen trafikerats under en tid. Resultatet av mätningarna kan avläsas i Figur 2 nedan (Carlsson 2001).



Figur 2: Mätningar av de obundna lagerna (Carlsson 2001)

På sträcka 1 består förstärkningslagret av krossad betong medan sträcka 2 består av krossat berg i förstärkningslagret. Sträcka 1 uppvisar en skillnad mellan mätningarna. Dessa värden tolkades dock inte rakt av eftersom det var temperaturskillnad under mätning 1 och 2 och kunde därför ge avvikande resultat (Carlsson 2001).

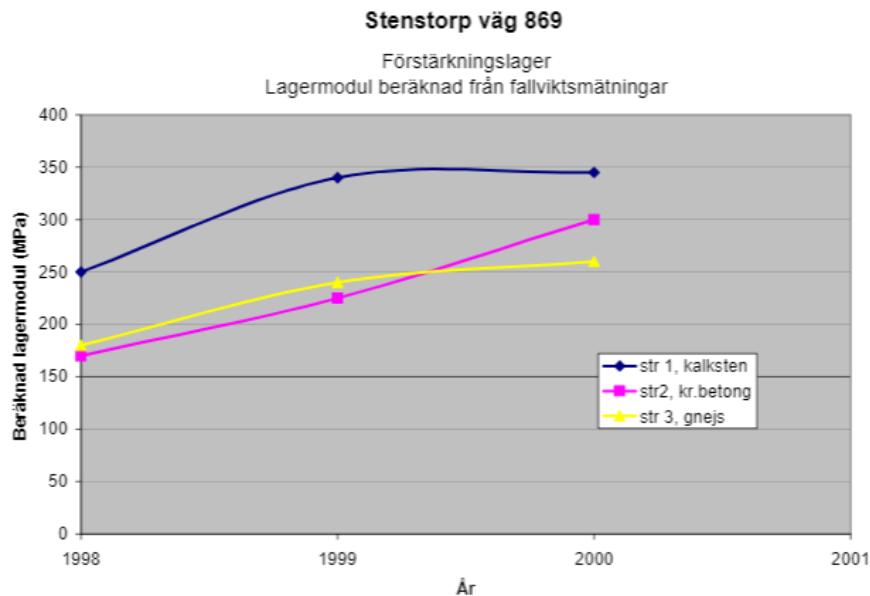
Slutsatsen som Carlsson drog efter testet var att krossad betong vid utläggning hade ungefär samma elasticitetsmodul som bergkross, men elasticitetsmodulen ökar sedan och får efter en tid en betydligt högre styvhet än bergkross. Även de andra testerna som genomfördes på vägen visade att påfrestningarna i asfaltlagerna och undergrunden var lägre för sträcka 1 jämfört med sträcka 2 (Carlsson 2001).

Väg 860 vid Stenstorp

Ytterligare en studie där krossad betong i förstärkningslagret analyserades utifrån bärighet hittas på väg 869 vid Stenstorp som gjordes av VTI 2000. Där undersöktes bärigheten med hjälp av fallviktsmätningar vid olika tillfällen för att kunna dra slutsatser om hur beläggningen fungerar över tid (Ydrevik 2000).

Projektet bestod utav 2 provsträckor och en referenssträcka. Referenssträckan bestod utav 650 mm förstärkningslager av bergkross, 80 mm bärlager av krossad diabas samt 100mm bitumenblandat material. På provsträckorna byttes förstärkningslagret ut mot krossad betong respektive gnejs. Den krossade betongen kom ifrån kasserade järnvägsslipers vilket i en krossad form fick ligga

i ett upplag några år innan användning. Fallviktsförsöken genomfördes vid olika tillfällen och resultatet kan avläsas i Figur 3, där sträcka 1 är referensträckan och sträcka 2 är provsträckan med betong i förstärkningslagret (Ydrevik 2000).



Figur 3: Lagermodul för förstärkningslager beräknade från fallviktsmätningar och utveckling med tid (Ydrevik, 2000)

Vid den andra mätningen i juni år 1999 så ökade styvheten hos de obundna lagren generellt vilket Ydrevik menar förväntades på grund av materialets efterpackning och konsolidering med tiden. Vid mätningen i juni år 2000 har en fortsatt ökning hos den krossade betong skett medan styvheten hos de övriga materialen har stannat upp. Enligt tidigare erfarenheter så påvisar krossad betong en tillväxt på styvheten redan inom 3 månader efter läggning. Denna styvhetstillväxt kunde förklaras med hjälp av att kalk frigörs under korsningsprocessen som sedan i kombination med vatten utvecklar ett kalkbruk som binder ihop partiklarna med varandra (Ydrevik 2000).

Slutsatserna som drogs i projektet var att E-modulen hos betongkross är lite lägre vid utläggning jämfört med bergkross, men att E-modulen hos betongkross sedan ökar och kommer upp i ungefär samma nivå som bergkross. Ydrevik konstaterade även att en styvhetsprocess i betongen pågår men att den är något långsammare än vanligt, vilket förmodligen kunde förklaras på grund av tillkomsten av armering. En potentiell faktor som rapporten tog upp var att betongen låg krossad i flera år på ett upplag, vilket kan medföra att bindningsprocessen går långsammare (Ydrevik 2000).

2.2.2 Asfaltskross

Äldre asfaltsbeläggningar eller beläggingsmaterial kallas ofta för returafalt när de tagits bort från vägen och ska mellanlagras och senare återvinnas. I huvudsak består returafalt av stenmaterial och bituminöst bindemedel. Utöver detta kan det finnas tillsatser som däckgummi, fibrer och vidhäftningsmedel. Om beläggningen är lagd före 1973 kan även stenkolstjära förekomma vilket vid uppvärmning kan utsöndra cancerogena gaser (Jacobsson 2002).

Returafalt består ofta av flera lager asfaltsbeläggningar som har olika ursprung och åldrar. När schaktmassorna sedan flyttas, krossas, siktas och lagras igen blandas material vilket innebär att det inte blir en så stor spridning på materialsammansättningen av de krossade och sorterade massorna.

2.2.2.1 Asfaltsgrenulat

Asfaltsgrenulat som är en form av asfaltskross är en benämning för mald, fräst eller krossad asfaltsbeläggning. Grenulatet består i huvudsak av klumpar och stenmaterial av varierande storlek och bindemedel. Grenulatkornen kan inte likställas med stenmaterial utan är mer sönderfalls och deformationsbenägna, till en början (Jacobsson 2002).

Det finns i huvudsak två typer av asfaltsgrenulat

- *Krossade schaktmassor av asfalt:* Har en låg bindemedelshalt och oftast högre andel obundet stenmaterial och består en del av äldre beläggningar.
- *Fräsmassor av asfalt:* Har en hög andel bindemedelshalt och en lägre andel obundet stenmaterial. Är en typisk massa som fås under beläggningsunderhåll och är vanligare att utvinna av yngre beläggningar.

Ibland kan det vara av stor fördel att använda asfaltgrenulat utan inblandning av nytt bindemedel. Däremot är det viktigt att påpeka att kvaliteten på materialet förbättras om en viss mängd nytt bindemedel tillsätts. Oavsett om borttagning av den gamla asfalten sker genom grävning eller fräsning så rekommenderas krossning och sortering för att få bästa möjliga resultat (Jacobsson 2002).

2.2.2.2 Krav

Vid användning av krossad asfalt i bär- och förstärkningslager ställs det krav på att de ska ha samma egenskaper som de lager de ersätter. I Sverige ska bindemedelshalten ligga mellan 3 och 6%. Krossad asfalt kan även läggas i alla

lagerna i en vägkonstruktion men skall alltid läggas direkt under beläggningslagret. En plats där krossad asfalt ska undvikas är exempelvis på parkeringsplatser där det kan förekomma statiska laster under en längre tid, eftersom det finns risk att materialet är mer deformationsbenäget jämfört med konventionella överbyggnader (Trafikverket 2013).

Det ställs även krav på kornstorleksfördelningen och bestäms via tvättsiktning. Kraven kan avläsas i Tabell 3 nedan.

Tabell 3 Krav på kornstorleksfördelningar för asfaltsgranulat till bärlager för belagda vägar (Trafikverket 2013).

$G_0/31,5$									
Sikt [mm]	0,063	0,5	1	2	4	8	16	31,5	45
Övre %	5	15	22	35	50	75	95	100	-
Undre%	-	4	6	10	20	40	70	90	100

Utläggningen av den krossade asfalten ska ske med en asfaltsläggare, väghyvel eller lastbil. Lager vid utläggningen ska vara mellan 80–150 mm och vid lagertjocklekar som överstiger detta spann ska utläggning i stället ske i flera lager. Andra krav ställs även på vattenkvot, och temperatur (Trafikverket 2013).

När materialet sedan är lagt ställs höga krav på packningen och utförandet av den. Kravet på packningen av asfaltsgranulat för bärlager kan avläsas i Tabell 4 nedan (Trafikverket 2013).

Tabell 4 Krav på packning (Trafikverket 2013).

Trafikklass	Mindre objekt ÅDTk,tung < 50	Större objekt ÅDTk,tung > 50
Medelvärde (\bar{x}_{RD})	> 95%	> 98%
Minivärde (G_f)	\geq 92%	\geq 95%

där

RD = Mätvariabel: Packningsgrad [%]

\bar{x}_{RD} = Kriterievariabel: Artimetiska medelvärdet av mätta packningsgraden

G_f = Grovt fel: Enskilda avvikelser

2.2.2.3 Tidigare projekt

E4 mellan länsgränsen Skåne och Strömnäsbruk

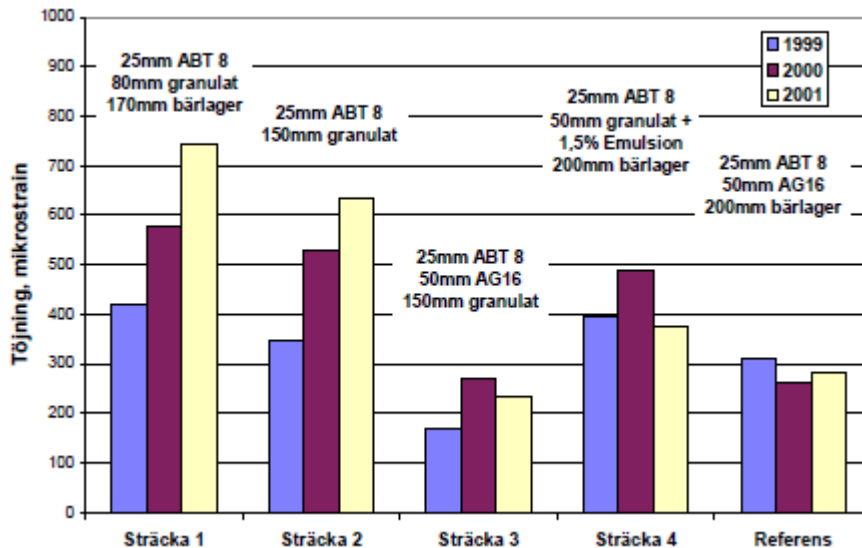
Ett försök att lägga asfaltgranulat som bärlager genomfördes 2007 och utvärderades av VTI. Vägen som berördes var E4 mellan länsgränsen mot Skåne och Strömnäsbruk. Projektet delades in i 2 sträckor där sträcka 1 användes till att undersöka kallåtervinning med skummat bitumen. På delsträcka 2 användes återvunnen krossad asfalt utan tillsättning av obrukad bitumen (Jacobsson 2007).

Kornkurvan hos asfaltgranulatet var jämn och levde upp till de krav som ställdes på krossmaterialet för att få läggas som bärlager. De slutsatser som Jacobsson kunde dra av uppföljningarna som gjordes var att efter efterpackning av trafik har krossad asfalt en bra styvhet som binds ihop till ett asfaltslager. Styvheten ökade för varje uppföljning och under först året ökade styvheten med 80%. Jacobsson kunde även konstatera att ju högre andel bitumen desto högre hållfasthet över tid (Jacobsson 2007).

E-modulen för sträcka 2 i bärlagret är strax under 800 MPa. E-modulen för konventionella material i bärlagret brukar ligga runt 300–450 MPa vid utläggning. Den höga E-modulen som asfaltsgranulatet uppvisade bidrar till en ökad livslängd på vägen enligt Jacobsson (2007).

Försök med asfaltåtervinning i Stockholm

En annan rapport (Jacobsson 2002) visar att användningen av asfaltgranulat som bärlagermaterial är lämpligt för de flesta gång- och cykelbanor i Stockholm. Försök har visat att gång- och cykelbanor med asfaltgranulat som bärlager kan ha samma lastfördelande förmåga som de med konventionella material. Fyra försök har beskrivits i rapporten, där asfaltgranulat har använts som bärlagermaterial i gångbanor. Totalt ingår 14 prov- eller referenssträckor i undersökningarna. Asfaltgranulatet har ersatt bärlagergruset och/eller AG-lagret. Referenserna utgörs av sträckor med konventionell uppbyggnad för GC-vägar i Stockholm, vilket innebär bärlagergrus, AG och ABT eller bärlagergrus, AG, sättsand och betongplattor.



Figur 4: Töjning i underkant asfalt (Jacobsson 2002)

Med hjälp av fallviktsmätningar kunde ett resultat tas fram i Figur 4. Figuren illustrerar hur töjningen i underkant av asfalten ökar med tiden på de beläggningar som innehåller granulat. Referenssträckan håller sig däremot jämn med tiden.

Enligt rapporten indikerar resultaten att användning av asfaltgranulat som obundet lager på de flesta gång- och cykelbanor i Stockholm är lämpligt. De genomförda försöken visar att gång och cykelbanor med bärlager av asfaltgranulat, som är tillverkat av krossade gamla beläggningar, kan uppnå liknande bärighet (förmåga att fördela last) som de som använder konventionella material (Jacobsson 2002, s.5).

2.2.3 Tegelkross

I Sverige rivs årligen 290 000 ton tegel varje år (Hartlén et.al 1999, s.6) och det kan därför vara rimligt att hitta ett sekundärt användningsområde för materialet. Tegel har varierande egenskaper vid återanvändning (Hartlén et.al 1999, s.83) vilket förutsätter att ett krossmaterial av god kvalitet för vederbörande ändamål väljs. I Danmark används tegel i gång- och cykelvägar som ett ingående segment men inte som förstärkningslager i vägar. Detta eftersom goda dräneringsegenskaper inte kan säkerställas men också på grund av risken för nedkrossning av materialet. Tillgången bedöms dessutom vara mer begränsad än tillgången till betong (Hartlén et.al 1999, s.83).

2.2.3.1 Krav

Även på krossat tegel ställs kravet att vid användning som bär och förstärkningslager skall samma egenskaper uppfyllas som på de lager som

ersätts. Kravet på kornstoleksfördelningen på obundet bärlager kan avläsas i Tabell 5 nedan.

Tabell 5 Krav på kornstorleksfördelningar för tegelkross till bärlager för belagda vägar (Trafikverket 2013).

$G_0/31,5$									
Sikt [mm]	0,063	0,5	1	2	4	8	16	31,5	45
Övre %	5	15	22	35	50	75	95	100	-
Undre%	-	4	6	10	20	40	70	90	100

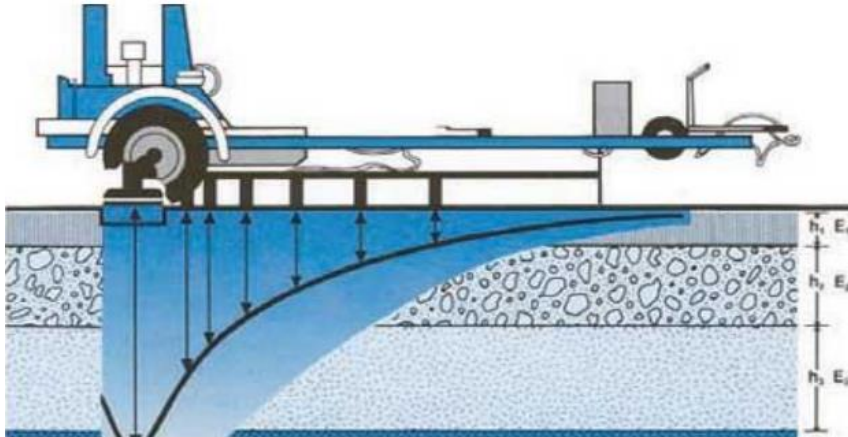
Andelen okrossat material det vill säga stenar större än 16 mm skall vara mindre än 50 % av totala vikten och den största stenstorleken ska inte överstiga halva lagertjockleken (Abrahamsson 1999).

2.3 Metoder för bärighetsmätning i fält

För att säkerställa att vägens kvalitet är god måste flera olika tester genomföras, både under byggtiden, precis efter vägbyggnationen är klar och under hela vägens livslängd. Det finns ett stort urval av mätmetoder som kan genomföras och dessa metoder brukar oftast delas in i två olika grupper: Laborationsmetoder och Fältmetoder (Agardh & Parahamifar 2014). Nedan ges några exempel på mätmetoder som genomförs i fält eftersom det är dessa metoder som berörs och används som grund för denna rapport.

2.3.1 Fallvikt

För att kunna få en uppfattning av vägkroppens bärighet är en fallviktsmätning en bra metod att använda. Mätningen tar fram pålitliga mått som senare kan användas för att räkna ut bärigheten på den uppmätta vägen. Fallviktsapparaten skapar en belastning genom att en vikt faller på fjädersystem som befinner sig ovanpå en belastningsplatta, vilket överför kraften till underliggande konstruktion. Påkänningen som skapas ger upphov till en momentan nedböjning, vilket kan motsvara den deflektion som uppstår av en axellast (Trafikverket 2019, s.8).



Figur 5 Fallviktsapararat (Cornell Local roads Program 2005)

För att mätningarna ska genomföras på bästa sätt och med så lite variation som möjligt finns det i Sverige olika krav på de olika parametrarna.

2.3.1.1 Kraftpuls

För att mätningarna ska bli så trovärdiga som möjligt ställs följande krav på kraftpulsen (Trafikverket 2019, s.8).

- Den totala belastningstiden ska vara mellan 1,8 och 2,5 gånger pålastningstiden.
- Belastningen ska vanligtvis vara $50 \text{ kN} \pm 5\%$ vid mätning på färdig väg. Denna kraft ska motsvara hjullasten från en standardaxel.
- Belastningsnivåer och tider ska vara identiska inom hela projektet.
- Pålastningstiden ska vara i minst 10 millisekunder.

2.3.1.2 Belastningsplatta

För att mätningarna ska bli så trovärdiga som möjligt ställs följande krav på belastningsplattan (Trafikverket 2019, s.8).

- Vid mätning på en trafikerad beläggning ska plattan vara segmenterad, för att säkerställa sig att lasten ska fördelas jämnt trots eventuella ojämnheter.
- Vid mätning på färdig väg ska plattans diameter vara 300mm.

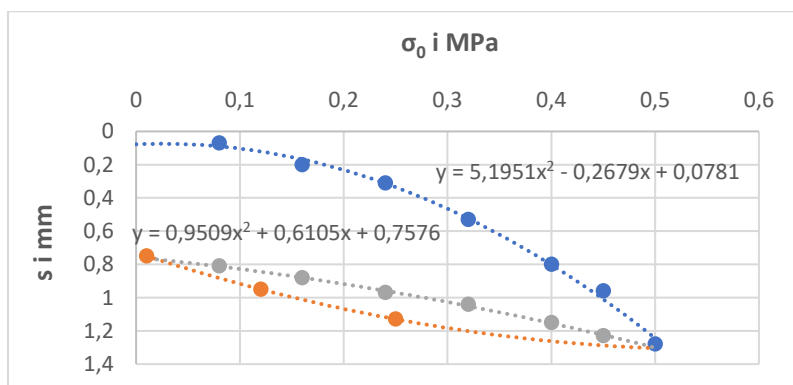
2.3.1.3 Deflektionsmätutrustning

För att mätningarna ska bli så trovärdiga som möjligt ställs följande krav på deflektionsmätutrustningen (Trafikverket 2019, s.8).

- Fallviktsapparaten ska vara försedd med minst 7 stycken givare för att mäta deflektionen.
- Noggrannheten ska vara så att det systematiska felet är mindre än $1 \mu\text{m}$.
- Givare skall alltid placeras på följande avstånd om inget annat anges, (300,450,600,900,1200mm).
- Vid mätning av fogar på betongvägar ska det alltid finnas en givare på vardera sida om fogen.

2.3.2 Statisk plattbelastning

Statisk plattbelastning används för att kunna bestämma bärlighet och packningsgrad på obundna material. Ett tungt mothåll i form av en lastbil eller vält behövs för att kunna ta emot kraften som skapas av en domkraft. Domkraften pumpas upp i olika steg för att kunna bestämma specifika lastnivåer. Den högsta lasten som används är 35 kN (500 kPa). Avlastning görs i 2 steg och därefter görs ännu en pålastning i flera steg (Trafikverket 2014).



Figur 6 Exempel på mätresultat från en plattbelastning. Första mätningen kan avläsas på de blåa prickarna, avlastningen kan avläsas på de gråa prickarna och den andra pålastningen avläses i de orangea prickarna. Ekvationerna är andragradspolynom för den blå och orangea sträckan.

I Figur 6 förekommer det en stor skillnad mellan första belastningen och andra belastningen vilket också är det vanligaste utfallet. Anledningen till detta är främst på grund av att materialet fortfarande komprimeras under första belastningen. Om ett material redan är väl komprimerat så kommer skillnaden mellan belastningarna vara mindre. För att se till att komprimeringen är god ställs därför krav på hur stor skillnaden mellan belastning 1 och 2 får vara (Trafikverket 2014).

Konstruktionens styvhet kan beräknas genom att ta fram lutning på lastdeformationskurvorna. För att bestämma lutningen på de icke konstanta kurvorna används Trafikverkets metod genom att ta fram andragradspolynom vilket kan avläsas i Figur 6 ovan (Trafikverket 2014).

Från figur 6 kan följande ekvation tas fram $s = a_0 + a_1\sigma_0 + a_2\sigma_0^2$. Därefter beräknas styvheten med hjälp av ekvationen $E_v = 1,5r \cdot \frac{1}{a_1 + a_2\sigma_{1max}}$ där r är radien på belastningsplattan, vilket normalt är 150mm. Styvheten eller E_v beräknas för båda belastningarna, det vill säga E_{v1} och E_{v2} . Normalt ställs krav på E_{v2} samt kvoten mellan E_{v2} och E_{v1} . I Figur 7 och 8 nedan visas Trafikverkets kravnivåer (Trafikverket 2014).

Acceptansintervall:	ett av nedanstående krav ska väljas	
Jordterrass		
500 - 550 mm under obunden bärlageryta = underkant f-lagermaterial	n=8	$\bar{x}_{E_{v2}} \geq 40 + 0,96 s$
	n=5	$\bar{x}_{E_{v2}} \geq 40 + 0,83 s$
	G _f om $x_{i E_{v2}} < 32$ MPa	
551 - 650 mm under obunden bärlageryta = underkant f-lagermaterial		
	n=8	$\bar{x}_{E_{v2}} \geq 30 + 0,96 s$
	n=5	$\bar{x}_{E_{v2}} \geq 30 + 0,83 s$
	G _f om $x_{i E_{v2}} < 20$ MPa	
651 - 750 mm under obunden bärlageryta = underkant f-lagermaterial		
	n=8	$\bar{x}_{E_{v2}} \geq 20 + 0,96 s$
	n=5	$\bar{x}_{E_{v2}} \geq 20 + 0,83 s$
	G _f om $x_{i E_{v2}} < 15$ MPa	

Figur 7 Trafikverkets krav på terrass (Trafikverket 2020).

Acceptansintervall för flexibel konstruktion		
Bärlager eller Översta obundna lagret	n = 8	$\bar{x}_{E_{v2}} \geq 140 + 0,96 \cdot s$
	n = 5	$\bar{x}_{E_{v2}} \geq 140 + 0,83 \cdot s$
	<i>I varje enskild kontrollpunkt:</i>	
	Om $E_{v2} \leq 140$ MPa: $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,8$	
	Om $E_{v2} > 140$ MPa: $E_{v2}/E_{v1} \leq 1 + 0,013 \cdot E_{v2}$	
	Antal godkända kontrollpunkter ska vara minst 7 av 8, respektive minst 4 av 5.	
	G _f om $x_i < 125$ MPa	

Figur 8 Trafikverkets krav på terrass (Trafikverket 2020).

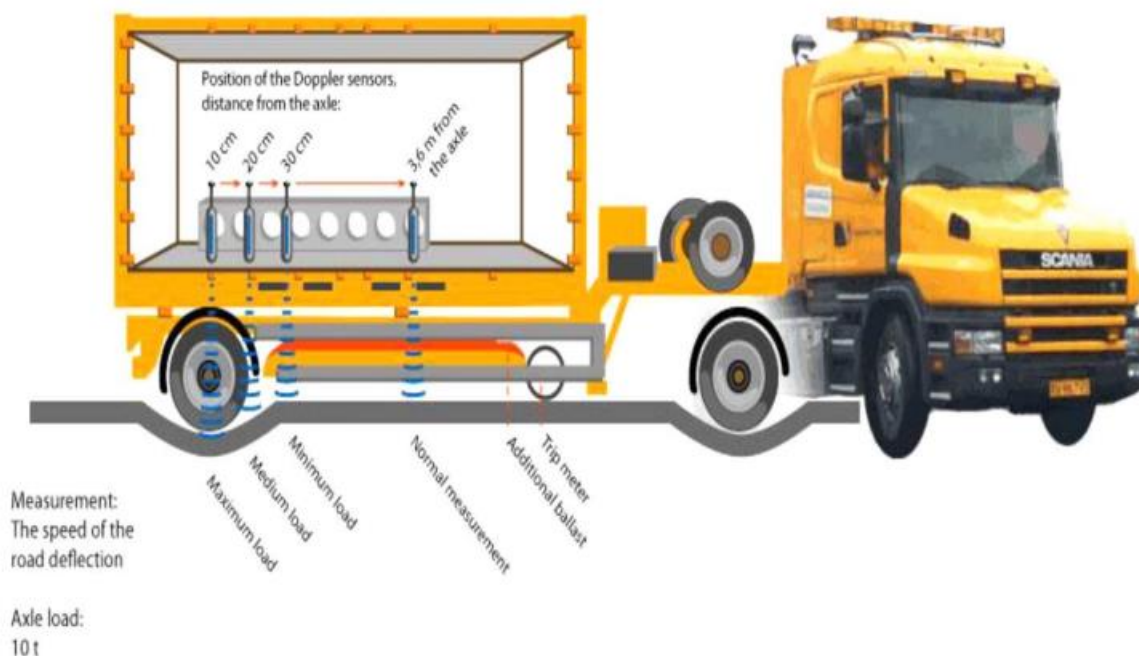
Trafikverket saknar ett uppdaterat krav på bärigheten på förstärkningslagret. I äldre normer finns däremot rekommendationer för förstärkningslagret för att kunna säkerställa att möjligheten finns att uppnå rätt bärighet på förstärkningslagret. Denna rekommendation kan avläsas i Figur 9 nedan (Trafikverket 2005).

Acceptansintervall för flexibel konstruktion	
Krossat förstärkningslager* ¹	$n = 8 \quad \bar{x}_{E_{v2}} \geq 125 + 0,96 \cdot s$
	$n = 5 \quad \bar{x}_{E_{v2}} \geq 125 + 0,83 \cdot s$
I varje enskild kontrollpunkt:	
Om $E_{v2} \leq 125$: $E_{v2}/E_{v1} \leq 3,5$	
Om $E_{v2} > 125$: $E_{v2}/E_{v1} \leq 1 + 0,020 \cdot E_{v2}$	
Totalt: Antal godkända kontrollpunkter skall vara minst 7 av 8, respektive minst 4 av 5.	
G_f om $x_{1E_{v2}} < 110$ MPa	

Figur 9 Rekommendationer för bärlighet på förstärkningslager (ABT Väg 2005, kapitel E).

2.3.3 Traffic speed deflectometer (TSD)

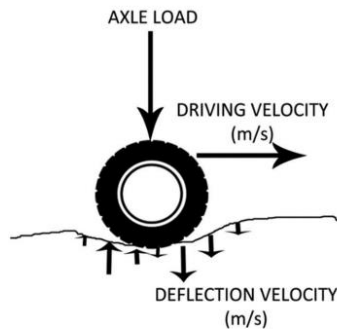
TSD eller ”traffic speed deflectometer” är en dansk uppfinning som även kan användas på det svenska vägnätet. Uppfinningen bygger på en lastbil med en tillhörande trailer som har en axellast på 10 ton. I trailern finns det flera dopplersensorer som används till att mäta deformationen på vägen som uppstår av den 10 ton tunga axellasten. För att lasrarna ska kunna mäta deformationen på bästa sätt är de placerade på olika avstånd i trailern som kan ses på Figur 10 nedan. En TSD kan idag mäta vägdeflektioner i en hastighet upp mot 90km/h vilket är en stor ökning jämfört med en fallviktsmätning (Chai et al 2018).



Figur 10 Traffic speed deflector (Chai et al 2018, 3)

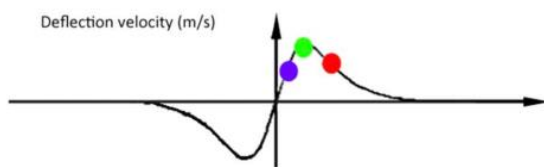
Dopplersensorer mäter direkt under däckets och får då fram ett exakt mått på deflektionshastigheten, processen beskrivs mer djupgående i Figur 11. Resultatet som tas fram är olika lutningar längs vägen som sedan definierar hur

vägytan ser ut. Uppkommer det horisontella lutningar indikerar det på en hård yta. Vertikala lutningar indikerar att vägen är skadad eller sprucken. Genom att ha information kring dessa lutningar och när de uppkommer kan bärigheten bedömas utifrån sprickbildning och deformationer (Chai et al 2018, s.3).

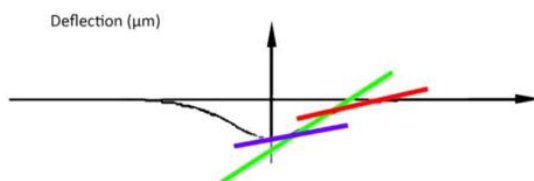


Figur 11 Deflektionshastigheten (Chai et al 2018, 3)

Deflektionshastigheten kan tolkas in i diagram i Figur 11 för att enklare förstå vilken data som tas fram. Deriveras deflektionshastigheten med körhastigheten kan deflektionslutningen bestämmas enligt Figur 12. Lutningen i figur 13 kan även beskrivas som derivatan av förskjutningen vilket i sin tur medför att deflektioner på olika avstånd kan mätas (Chai et al 2018, s.4).



Figur 12 Deflektionshastigheten i diagram (Chai et al 2018, 3)



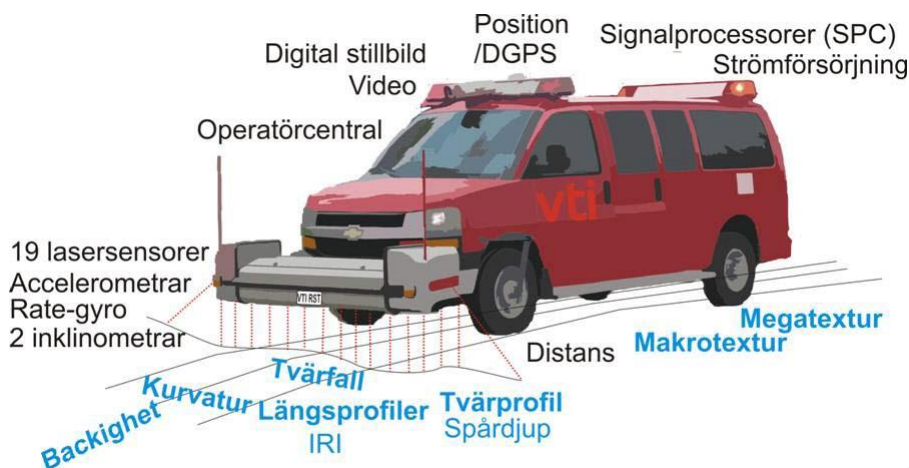
Figur 13 Deflektionen med tangent av lutningen (Chai et a 2018, 3)

Det finns även andra instrument som kan mäta deflektioner i trafikfart. Hoff et.al. beskriver och jämför några metoder i sin rapport (2022). Ett exempel på en annan metod är RDSV som fungerar ungefär som mätbil vilket beskrivs i kapitel 2.3.4 nedan.

2.3.4 Mätning av spår och ojämnheter med mätbil

Genom att mäta vägbanans tvär- och längdprofil kan innmätaren med denna utrustning bestämma vägytans jämnhet och textur. En parameter som denna

mätutrustning kan leverera är spår djup eller IRI (International Roughness Index). Mätssystemet utgörs av ett mätfordon enligt Figur 14, sett med en utrustning som mäter avstånd och form på vägytan. Fordonet innehåller också hårddiskar så att all data som samlas in kan lagras och senare tas fram i exempelvis excel (Agardh & Parhamifar 2018).



Figur 14 Mätfordon för vägytemätning (VTI 2022)

Vid framtagning av vägens profil krävs utrustning för att mäta avstånd emellan fordon och vägyta, fordonets lutning samt fordonets rörelser i vertikalled. Dessa mätningar görs genom att mätbilen kör längs vägen i oftast samma hastighet som övrig trafik (Agardh & Parhamifar 2018).

Vid framtagning av spår djup genomförs ofta 2 mätningar längs vägens kanter, vänster och höger hjulspår. De två mätinstrumenten som krävs för att genomföra spår djupsmätningen placeras 1,5 meter ifrån varandra vilket är avståndet emellan bilens hjul på en vanlig personbil. En utmaning för att ta fram det bästa resultatet ligger på föraren, att hålla rätt kurs och rätt hastighet (Agardh & Parhamifar 2018).

Mätbilen kan samla in stora mängder data på en kort tid utan att störa övrig trafik vilket är en stor fördel. Nackdelen däremot med denna metod är att svårigheten att genomföra exakt samma mätning och körspår igen blir hög (Agardh & Parhamifar 2018).

Spår djup mäts i mm, men för att få en tydligare bild på vad de olika måtten betyder följer Tabell 6 nedan som ger en beskrivning på de olika spår djupen.

Tabell 6 Beskrivning av spårdjup vid olika mått (Ramboll 2014).

Spårdjup [mm]	Beskrivning
<2	Spåren märks inte för ögat
2–5	Spårbildningen kan uppmärksammas till exempel som färg, skiftningar i vägbanan.
5–10	Spåren synliga. Om spårbildningen beror på dubbdäcksslitage finns risk att stensläpp förekommer.
10–17	Tydliga spår. I detta spår genomförs ofta underhållsåtgärder.
17<	Kraftig spårbildning, troligtvis orsakad av dålig bärighet eller avnötning.

2.4 Parametrar för utvärdering av fallviktsmätning

2.4.1 Ytmodul

Ytmodul är ett mått för ytans E-modul där avståndet från lasten är noll vilket gör att det också kan beskrivas som direkt under belastningsytan. Vid beräkningar förutsätts att underliggande material endast består av ett homogent, isotropt och linjärelastiskt lager. E_0 som är beteckningen för ytmodul beskriver hela vägkonstruktionens styvhet. Ytmodulen beräknas enligt (Trafikverket 2012, s.10).

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

där

f = En faktor som varierar med belastningsplattans utformning. För en segmenterad platta är $f = 2$ och för en styv belastningsplatta är $f = \frac{\pi}{2}$

E_0 = ytmodul [MPa]

D_0 = Deflektionen i centrum av belastningen [μm]

ν = Tvärkontraktionstalet

σ_0 = Kontakttrycket under belastningsplattan [MPa]

a = Belastningsplattans radie [mm]

För att få en uppfattning om hur många standardaxlar en specifik ytmodul i regel klarar av kan finska normer användas. Fin Emperical overlay är ett verktyg som beräknar hur tjockt lager av asfalt som vägen behöver förstärkas med för att ytmodulen ska uppnå ett accepterat värde. I Tabell 7 nedan beskrivs olika standardaxlar och vilken ytmodul som efterfrågas i följande fall.

Tabell 7 (KUAB 2014)

Antal standardaxlar	Trafikclass (TKR)	Efterfrågad ytmodul [MPa]
0-300 000	0	175
300 000-800 000	1	190
800 000-2 000 000	2	265
2 000 000-5 000 000	4	365
5 000 000-10 000 000	5	420

Tabell 8 Enkla parametrar beräknade med hjälp av deflektionsbassängens form (Trafikverket 2020).

Parameter	Formel	Beskrivning
Största Deflektion, D_0 [μm]	Deflektionen i belastningscentrum	En indikation på hela väggroppens styvhet, där det största bidraget kommer från undergrunden.
Surface Curvature Index, SCI [μm]	$SCI = D_0 - D_{300}$	Ett mått på styvheten hos den övre delen av väggkonstruktionen. Används för relativ jämförelse. Ju lägre värde på SCI desto styvare konstruktion.
Base Curvature Index, BCI [μm]	$BCI = D_{300} - D_{600}$	Ett mått på styvheten hos den mellersta delen av väggkonstruktionen. Används för relativjämförelse. Ju lägre värde på BCI desto styvare konstruktion.
Base Damage Index, BDI [μm]	$BDI = D_{600} - D_{900}$	Ett mått på styvheten hos den nedre delen av väggkonstruktionen. Används för relativ jämförelse. Ju lägre värde på BDI desto styvare undergrund.
Medelmodul, E_r [MPa]	$E_r = \frac{1000 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sigma_0 \cdot a^2}{r \cdot D_r}$	Beskriver styvheten hos konstruktionen vid en viss deflektionsgivare, det vill säga ytmodulen där avståndet från lasten inte är noll. Ju längre från belastningspunkten mätningen genomförs, desto färre lager i överbyggnaden kommer att uppleva belastningen. Lastutbredningen kan antas breda ut sig med en vinkel på 45° . Medelmodulen beräknas enligt (Trafikverket 2012, 11).
Undergrundsmodul, E_u [MPa]	$E_u = \frac{5,2 \cdot 10^4}{D_{900}^{1,5}}$	Undergrundsmodul är ett mått som beskriver styvheten på undergrunden och kan användas för att dela in väggroppen i homogena sträckor för att kunna jämföra de olika lagerna (Trafikverket 2012, 10). Vid dimensionering av en åtgärd kan den även användas till att bedöma terrasmaterialet E-modul. Undergrundsmodulen beräknas med hjälp av en deflektionsgivare som befinner sig på avståndet 900mm från belastning centrum för att kunna reagera på det som händer djupt ner i väggroppen. Undergrunden beräknas enligt (Trafikverket 2012).

Där E_s = ytmodul [MPa], D_r = Deflektionen på avståndet r från belastningscentrum [μm]
 σ_0 = Kontaktrycket under belastningplattan [MPa], a = Belastningsplattans radie [mm],
 ν = Tvärkontraktionstalet, r = Avståndet från deflektionsgivaren till belastningscentrum [mm]

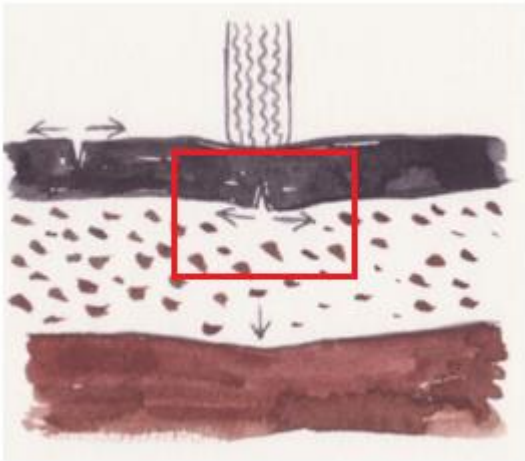
2.4.2 Asfaltstjörning i underkant

Sprickbildning på vägen är ett vanligt förekommande problem som ofta är till följd av att töjningar i underkant av asfalten bildats. När tung trafik belastar vägytan under en lång tid kan det utvecklas horisontella trycktöjningar på ytan och horisontella dragtöjningar i beläggningens underkant. Den horisontella dragtöjningen i beläggningens underkant är ett mått på hur stor risken är för utmattningsprickor. Asfaltstjörningen kan uppskattas med hjälp av formeln nedan (Trafikverket 2012, s.11).

$$\varepsilon_a = 37,4 + 0,988 \cdot D_0 - 0,553 \cdot D_{300} - 0,502 \cdot D_{600}$$

där

$$\varepsilon_a = \text{Töjningen i underkant } [\mu - \text{strain}]$$



Figur 15 Innanför den röda rektangeln illustreras sprickbildning i underkant vid asfaltstjörning (Ritad av Rebecka Svensäter).

2.4.3 Bärförmågeindex

Bärförmågeindex är ett dimensionslöst mått för att bestämma vägens bärighet. Indexet utgår från resultaten från asfaltstjörningen men ger ett enklare resultat att tyda till följd av att ju högre värde desto bättre bärighet. Bärförmågeindex eller BI beskriver hur bra beläggningen kan klara av belastning under tid och kan senare användas till att bedöma beläggningens tillstånd före och efter en åtgärd (Trafikverket 2019).

$$BI = \frac{1000}{\varepsilon_a}$$

där

$\varepsilon_a = \text{asfaltstjörningen } [\mu - \text{strain}]$

Är mätningar gjorda vid olika tillfällen där det kan ha förekommit olika temperaturer krävs det att en temperaturkorrigering görs. Temperaturkorrigering görs sedan om till 10 °C och en ny töjning beräknas enligt nedan (Trafikverket 2019, s.18).

$$\varepsilon_{a,10} = \frac{\varepsilon_{a,T}}{\left(\frac{T}{10}\right)^{0,0308 \cdot h_1 \cdot D_0}}$$

där

$\varepsilon_{a,10} = \text{Dragtöjning vid temperatur } 10^\circ\text{C } [\mu - \text{strain}]$

$\varepsilon_{a,T} = \text{Dragtöjning vid mättemperatur, } T [\mu - \text{strain}]$

$T = \text{Mätt temperatur } [^\circ\text{C}]$

$h_1 = \text{Beläggningstjockleken } [\text{mm}]$

2.5 Passningsräkning

Passningsräkning, även kallad bakåträkning är en metod för att beräkna E-modulerna för undergrunden samt vägens konstruktiva lager med hjälp av deflektionsdata (Trafikverket 2012, s.13). Det första steget är att ansätta startmoduler till de olika lagerna och skapa en lagermodell för vägkonstruktionen. Sedan beräknas deflektionen vid ytan vid belastning samtidigt som en jämförelse görs med den uppmätta belastningen. Därpå ändras E-modulerna iterativt tills de beräknade och uppmätta värdena uppfyller de bestämda kraven (Trafikverket 2019, s.20).

2.5.1 Indata

För att kunna genomföra en passningsräkning behövs följande indata.

- En lagermodell med vägkonstruktions uppbyggnad samt lagertjocklekar
- Tvärkontaktionsstal för lagerna i vägkonstruktionsmodellen
- Startmoduler för lagerna i vägkonstruktionsmodellen
- Belastningskraften, deflektionsgivarnas placering samt belastningsplattans radie.

2.5.1.1 Lagermodell

När beläggnings E-modul beräknas ska tjockleken på lagret minst motsvara halva radien, vilket i normala fall är 75mm. Vid en tunnare beläggning antas en

realistisk modul. För att sedan få rimliga värden så ska de obundna lagerna normalt vara minst 100 mm tjocka. De obundna lagerna kan antingen behandlas som två fristående lager, bär-och förstärkningslager eller slås ihop till ett gemensamt lager (Trafikverket 2019, s.21)

Undergrunden kan variera beroende på grundvattennivån och exempelvis djup till berg, men oftast hanteras den som ett homogent lager som vilar på ett styvt skikt, på cirka 3m under vägytan (Trafikverket 2012, s.14).

2.5.1.2 Tvärkontraktionstal

Tvärkontraktionstalet även kallad Poissons tal varierar ofta mellan 0,15 och 0,5 och hämtas om inget anges ur Tabell 9 nedan.

Tabell 9 Typiska tvärkontraktionstal för några vägmateriäl (Trafikverket 2019)

Material	Tvärkontraktionstal
Bitumenbundet materiäl	0,35
Cementbundet materiäl	0,15–0,20
Obundet bär- och förstärkningslagermateriäl	0,35
Finkorniga jordarter	0,45
Grovkorniga- och blandkorniga jordarter	0,35–0,4
Bergterrass och styvt skikt (fast botten)	0,30 eller mindre

2.5.1.3 Startmoduler

I det flesta fallen när en passningsräkning genomförs behövs ett startvärde för E-modulerna antas. I Tabell 10 nedan anges vanliga modulintervaller för olika vägmateriäl. Tabellen kan även användas för att uppskatta rimligheten på beräknade E-moduler (Trafikverket 2019).

Tabell 10 Typiska E-moduler för intakta bituminösa materiäl vid +10°C (Trafikverket 2019)

Material	E-modulintervall [MPa]
Slitlager- och bärlagermateriäl	4000–12000
Varm återvinningsbeläggning	3000–10000
Kall återvinningsbeläggning	2000–6000

2.5.1.4 Kontroll av lösning

När E-modulerna är beräknade jämförs de med typiska värden och kontrolleras med hjälp av det kvadratiska medelvärdet RMS nedan (Trafikverket 2019).

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

där

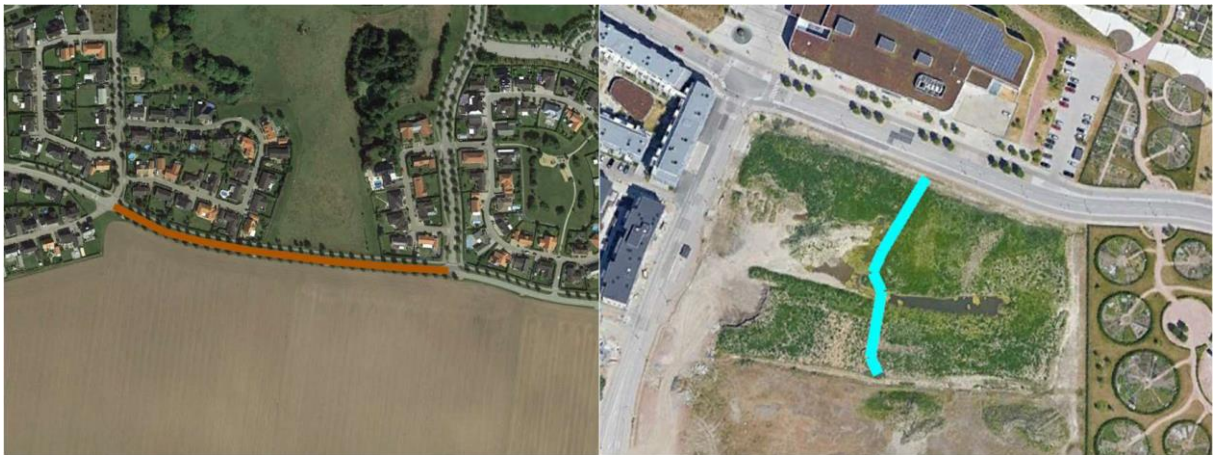
d_{ci} = beräknad deflektion vid sensorn i , [μm]

d_{mi} = uppmätta deflektionen vid sensorn i , [μm]

n = antal sensorer som använts vid passningsräkningen.

3 Metod

Fallviktsmätningar har utförts på sträckor i huvudsakligen tre områden. Svågertorp, Törringevägen i Oxie och Snorkelgatan i Hyllie. Områdena lokaliseras i Figur 16 och 17. För att få en förståelse för hur gatorna är anlagda, det geografiska läget och vägkonstruktionens uppbyggnad beskrivs områdena mer ingående i kapitel 3.1, 3.2, 3.3 nedan.



Figur 16 Översiktsskarta där mätningar är genomförda, till vänster törringevägen, till höger snorkelgatan.



Figur 17 Översiktsskarta över området Svågertorp där mätningar är genomförda

3.1 Törringevägen

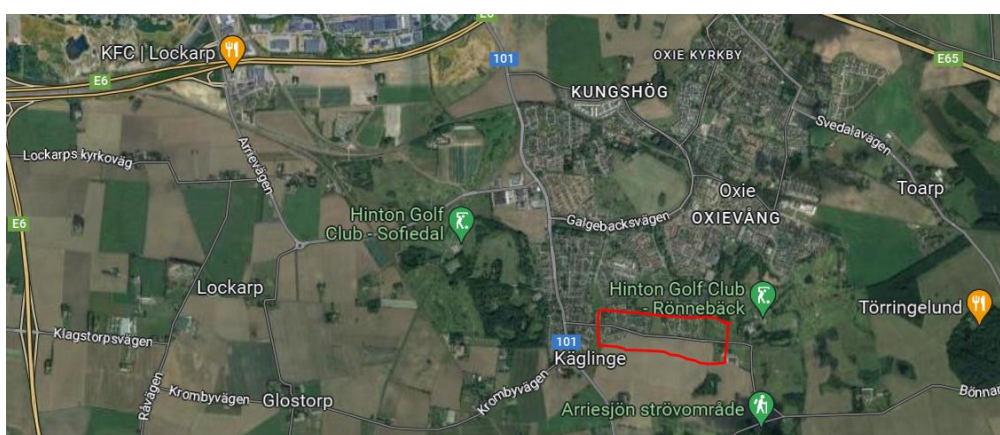
3.1.1 Bakgrund

Törringevägen anlades 1990 och är en del av projektet ”Nya sten och grusmaterial”. Projektet består av teststräckor där sekundära ballasmaterial används för att öppna upp för ett mer cirkulärt byggande. Syftet med projektet var att utvärdera möjligheterna att använda betong, tegel och slaggrus som vägbyggnadsmaterial (Abrahamsson et al 1999, s.5).

Enligt fastighets- och gatukontorets karta över området har Malmö Stad år 2018 anlagt ett nytt slitlager på Törringevägen. Det består idag av ABS 11 70/100 och är 35 mm tjockt.

3.1.2 Geografiskt läge

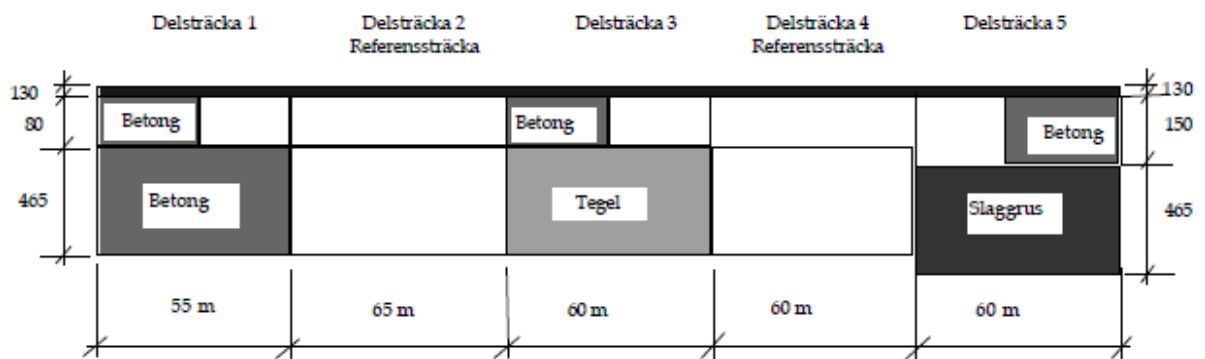
Törringevägen ligger i Skånes sydöstra del cirka 10 km sydost om Malmö i närheten av byn Käglinge vilket kan ses i Figur 18. Törringevägen förvaltas och ägs av Malmö stad. Törringevägen är dimensionerad för en trafik på cirka 400 fordon/dygn med en mycket liten andel tung trafik (Abrahamsson et al 1999). Närområdet består av bostäder i anslutning till mycket åkermark.



Figur 18 Karta över Käglinge och södra Malmö. Törringevägen är utmärkt med den röda rektangeln.

3.1.3 Beskrivning av konstruktion

Under projektet anlades provsträckan och blev 500m lång som bestod av 5 olika delsträckor. Av dessa 5 sträckor bestod en sträcka med krossat betong, en annan av krossat tegel och den tredje av slaggrus som material i förstärkningslägena. Av dessa delsträckors bärlager anlades hälften som krossad betong och den andra hälften med krossat berg. Resterande 2 delsträckorna är referenssträckor och byggdes med helt vanliga konventionella vägbyggnadsmaterial som kan ses i Figur 19. Terrassen bestod av lermorän (Abrahamsson et al 1999, s.8).



Figur 19 Längdsektion av provvägen i törringevägen.

3.1.4 Materialframställning

3.1.4.1 Betong till förstärknings – och bärlager

Den betong som användes vid anläggningen av förstärkningslagret till Törringevägen införskaffades hos Sysavs upplag, betongrester från bygg och rivningsarbeten. Betongresterna kom från flera olika verksamheterna i närheten och blandades sedan om. Betongresterna kvalitet antogs vara varierande eftersom ingen uppdelning eller klassificering gjordes under insamling av resterna på grund av platsbrist (Abrahamsson et al 1999, s.10).

De kvalitetskraven som ställdes på betongen som kom till Sysavs upplag var följande:

- Det får inte förekomma några andra material än betong
- Vid förekomst av armeringsjärn får de inte sticka ut mer än 20cm
- Storleken på betongbitarna måste vara över 200mm

3.1.4.2 Tegel till förstärkningslager

Svedala AB användes som krossanläggning för att krossa tegel till förstärkningslagret. Först avskildes jord och plast från teglet som hade följt med från rivningen för att sedan krossa teglet i en slagkross. Slagkrossen körde med låg hastighet för att undvika att krossa teglet för fint. Därefter siktades tegelbitar bort som var större än 100 mm för att sedan gå tillbaka till slagkrossen (Abrahamsson et al 1997, s.10).

3.1.4.3 Slaggrus till förstärkningslager

Slaggruset som användes vid Törringevägen kom från Sysavs asfaltvärmeverk i Malmö. Vid förbränning uppstår det både flygaska och bottenaska. Slaggruset från Sysav framställdes av bottenaska från avfallsförbränning. Bottenaskan

lagrades i sin tur i 3 månader där PH-värdet sjönk och stabiliserade bottenaskan. Efter lagringen siktades korn som var större än 40mm bort och metallbitar i slagruset avlägsnades med en magnetsavskiljare (Abrahamsson et al 1999, s.12).

3.1.4.4 Erfarenheter av utläggningen

Anläggningsarbetarnas erfarenheter med betong, tegel och slaggrus som ballast var att tidsaspekterna inte förändrades jämfört med att anlägga en väg med konventionella material. Materialen var lättarbetade och lätta att transportera. Tegelkrossen upplevdes däremot svagare och mer rörlig vid överfart med lastbil (Abrahamsson et al 1999, 17). Bygandet av Törringevägen försenades vilket medförde att arbetet utfördes under icke gynsamma förhållanden i form av kallt och regnigt väder (Abrahamsson et al 1999, s.41).

1999 uppmättes cirka 400 fordon passerar vägsträckan varje dag och andelen tung trafik är försumbar. Utifrån trafikberäkning enligt TRVK väg så skulle det motsvara cirka 200 000 standardaxlar. Enligt väg 94 placeras Törringevägen under trafikclass 2.

3.2 Svågertorp

3.2.1 Bakgrund

Svågertorp anlades 2003 för att vara transportnät mellan flera olika butiker i närområdet. På området Svågertorp finns flera gator där varierande mängder asfaltkross som blandats med traditionellt förstärkningslager har anlagts. Därefter gjordes en analys av Ramboll där de olika överbyggnadstyperna med fokus på bärighet undersöktes (Ramboll 2005).

3.2.2 Geografiskt läge

Svågertorp ligger i södra delen av Malmö i närheten av Hyllie strax norr om E20:an. Området har markerats med en röd rektangel i Figur 20. Svågertorp byggdes som ett nytt område vid många större butiker. Ikea byggdes i området vilket kan ha påverkat gatornas ÅDT men i dagsläget saknas data om detta. I området Svågertorp ingår Stolpbodsgatan, Långhusgatan, Grophusgatan och Drakagatan (Ramboll 2005).

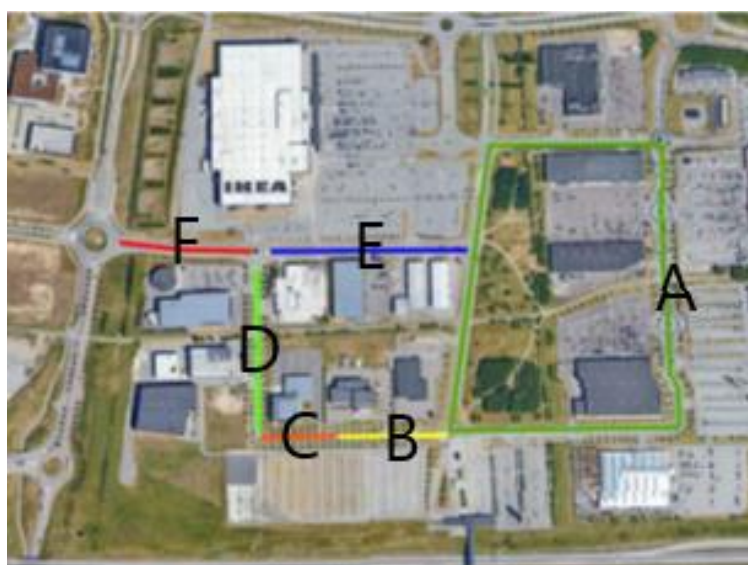


Figur 20 Karta över Södra Malmö och Svågertorp

3.2.3 Beskrivning av konstruktion

Långhusgatan och grophusgatan är uppbyggda med asfaltgranulat i de obundna lagren. Den inledande sträckan på Drakagatan, i anslutning till Pildammsvägen, är en grusbitumenöverbyggnad (GBÖ). På resterande del av Drakagatan har 10% returafalt i de bundna lagren används som tillförts genom värmeåtervinning. I Stolpbodsgatan ingår gatorna Nornegatan, Kulthusgatan Stolphusgatan.

Nedan följer en mer ingående beskrivning av de berörda vägarna inom Svågertorp och kan lokaliseras och tolkas med hjälp av Figur 21 och Tabell 11 och 12.



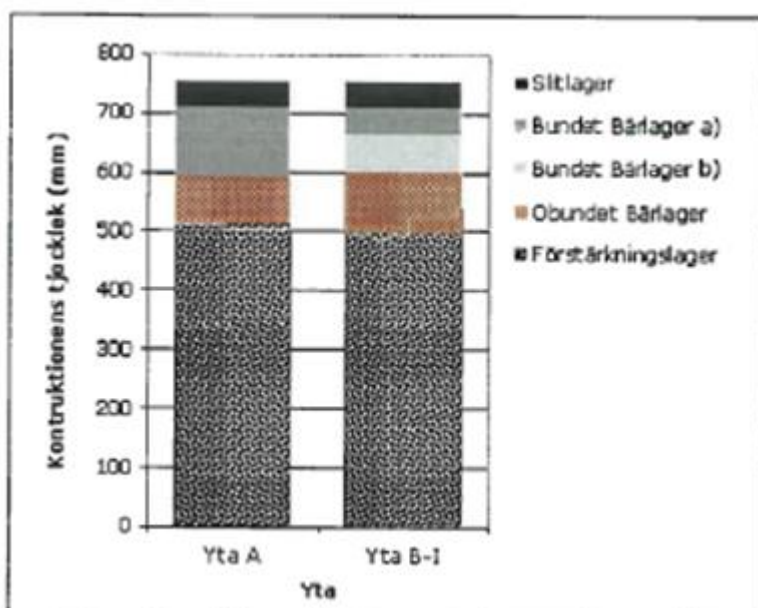
Figur 21 Översiktskarta över Svågertorp.

Tabell 11 Samband mellan inmätningssytor och ytor.

Yta	Vägnamn	Längd (m)
A	Stolpbodsgatan	1425
B	Grophusgatan östra	100
C	Grophusgatan västra	125
D	Långhusgatan	250
E	Drakagatan	275
F	Drakagatan i anslutning till pildammsvägen	200

Tabell 12 Beskrivning av ytornas konstruktion

Yta	Slitlager 40mm	Bundet bärlager (a) 48mm	Bundet bärlager (b) 63 mm	Obundet bärlager 100 mm	Förstärkningslager 499 mm
A	ABS 11 70/100	120mm AG 22 70/100		80 mm 0– 40 kross	510 mm 0–100 kross
B	ABS 11 70/100	AFG 16 70/100	AG 22 160/220	Bergkross 0–45 mm, 66% Asfaltkross 0–25 mm	Bergkross 0–90 mm
C	ABS 11 70/100	AFG 16 70/100	AG 22 160/220	Bergkross 0–45 mm, 33% Asfaltkross 0–25 mm	Bergkross 0–90 mm
D	ABS 11 70/100	AFG 16 70/100	AG 22 160/220	Bergkross 0–45 mm, 66% Asfaltkross 0–25 mm	Bergkross 0–90 mm 90% asfaltkross 0– 40 mm
E	ABS 11 70/100 10% returasfalt	AGF 16 70/100 10% returasfalt	AG22 160/ 220 10% returasfalt	Bergkross 0–45 mm	Bergkross 0–90 mm
F	ABS 11 70/100	AGF 16 70/100	AG22 160/ 220	Bergkross 0–45 mm	Bergkross 0–90 mm



Figur 22 Principskiss över överbyggnader på Svågertorp.

3.2.4 Erfarenheter under byggtiden

Under byggskedet uppstod det ett antal avvikelser från den befintliga planen vilket i längden kan påverka bärigheten. Vid bärighetsbestämningar som utfördes under byggtiden på gatorna så underkändes bärigheten på terrassen på samtliga gator enligt VÄG 94 krav. Beslutets som togs var att inga åtgärder skulle utföras, utan att nästa lager kunde påbörjas med risk för framtida sättningar. Även vid bärighetsbestämningen av bärlagret underkändes vägobjekten B, C, D enligt VÄG 94, där de svagaste punkterna uppmättes till 113,6 Mpa, 89 Mpa, samt 104 Mpa. Även här vidtogs inga direkta åtgärder vilket kan medföra sättningar i framtiden. Ytterligare en avvikelse noterades där entreprenören rapporterat in att bärlagret bitvis upplevts mjukt. Efter samtal med beställaren beslutades att arbetet skulle fortsättas på grund av att området var ett provområde.

3.3 Snorkelgatan

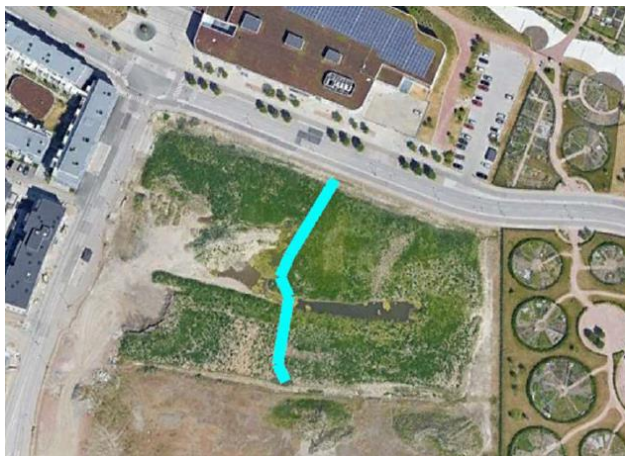
3.3.1 Bakgrund

Snorkelgatan är anlagd i samband med byggnation av flerbostadshus i området. Vägen är en anslutning för de boende på området från Hyllievångsvägen. På området har entreprenören anlagt olika konstruktioner varav just snorkelgatan innehåller sekundära ballastmaterial. I anslutningen till Cyklopattan övergår

konstruktionen till en konventionell överbyggnad, vilket lägger grunden för jämförelserna av konstruktionerna som är anlagda nära i tid.

3.3.2 Geografiskt läge

Snorkelgatan ligger i södra delen av Malmö i Hyllie vilket kan avläsas i Figur 23. Snorkelgatan är en länk till bostäder i området och har därför en låg ÅDT. I området finns det flera skolor och förskolor.



Figur 23 Översiktskarta över Hyllie, Snorkelgatan

3.3.3 Beskrivning av konstruktion

Snorkelgatan är uppbyggd på ett sätt där det obundna bärlagret är ersatt med asfaltsgranulat med kornstorlek 0–16 mm. Snorkelgatan ligger i södra delen av Malmö på området Hyllie och överbyggnaden kan avläsas i Tabell 13 nedan.

Tabell 13 Överbyggnadstabell snorkelgatan, Bygggata A, $t=555\text{mm}$

Benämning	Material	mm	AMA KOD
Bundet bärlager	AFG16 100/150	55	DCC.2111
Justeringslager	Krossmaterial 0-16mm	25	DCB.323
Obundet bärlager	Krossmaterial 0-40mm	80	DCB.312
Förstärkningslager	Krossmaterial 0-90mm	420	DCB.212

3.3.4 Erfarenheter från utläggning av massan

Snorkelgatan är den beläggning som är anlagd senast utav samtliga överbyggnader som undersöks. På anläggningsplatsen fick arbetarna lämna synpunkter på arbetet och hur det är att jobba med asfaltkross:

”Fördelar med asfaltskrossen är att den är lätt att jobba med. Nackdelarna är desto fler. Kräver mängder av vatten för att binda ihop vid packning. Är det varmt ute dunstar vattnet snabbare, så att ytterligare vatten behövs. Packades olika så att hyveln fick köra fler gånger. Var inte lika bra att hyvla som traditionell kross, vet inte om det har att göra med att där är mindre så kallat nollmaterial. Behövs mer arbetare eftersom man måste vattna nästan hela tiden, samt att köra väldigt under tiden man vattnar.”

3.4 Insamling av data

Data som använts i rapporten har främst samlats in på följande två sätt, litteraturstudie och data från fallviktsmätningar.

3.4.1 Data från fallviktsmätningar

Datan från fallviktsmätningarna kommer från Ramboll beställda av Malmö stad. Fallviktsmätningarna är framtagna som grund för denna rapport och är således primärdata (Paulson 2020, s.62), vilket också medför att syftet med mätningarna är att leverera data så att en så bra bärighetsutredning som möjligt kan genomföras på de berörda sträckorna.

3.4.2 Tidigare data

För att bestämma bärigheten på Törringevägen gjordes inledningsvis en statisk plattbelastning under april månad när vägen var fri från tjäle. Ett hål sågades i asfaltgruset för att kunna genomföra ett provtagningsprogram som innebar 5 mätningar på bärlagret av betong, 5 mätningar på bärlagret av bergkross, 5 mätningar på förstärkningslagret. På varje referensträcka gjordes 3 mätningar på både förstärkningslagret och bärlagret (Hartlén et al 1999, s.43).

Data som togs fram från den statiska plattbelastningen jämfördes med de krav på bärigheten för vägöverbyggnaden som anges i VÄG 94. Resultat visade att ingen av delsträckornas förstärkningslager uppfyller kraven för VÄG 94. Bärigheten är även lägst på förstärkningslagret av de krossade teglet vilket kan avläsas i Tabell 14 nedan (Hartlén et al 1999, s.43).

Tabell 14 Bärigheten hos förstärkningslager av betong, tegel, slaggrus och bergkross mätt med statisk plattbelastning.. (Hartlén et.al 1999, 43).

Provsträcka med förstärkningslager av	Medelvärde av bärighet (MPa)	Krav i VÄG 94 på medelvärdet (MPa)
Betong	117	157
Bergkross	67,7	142
Tegel	58,8	135
Bergkross	90,3	140
Slaggrus	93,0	120

Fallviktsmätningar utfördes senare i 8 punkter per respektive provsträcka i början an juni 1999 då materialen var fri från tjäle och frost. Det noterades att lagermodulen för fallviktsmätningarna var låga i förhållande till de förväntade värdena vilket kan avläsas i Tabell 15, där lagermodulen för asfaltsgruset borde ha ett värde på 3500–4500 MPa. En anledning till de låga lagermodulen kan vara att asfaltsgruset lades ut under ogynnsamma förhållanden. Den låga asfaltsmodulem påverkar även lagermodulerna för bär- och förstärkningslager, vilket också innebar att undergrundens lagermodul var låg enligt kraven i Väg 94. Det noterades även att styvhetsmodulen för bär- och förstärkningslager för krossad betong var på samma nivå som bergkross (Hartlén et al 1999, s.44).

Tabell 15 Itererade lagermoduler i Törringevägen beräknade från fallviktsförsök. (Hartlén et.al 1999, 44)

		Asfaltsgrus (AG)	Bär + förstärkningslager	Undergrund
Sträcka	Förstärkningslager av	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)
1A	Betong	2000	150	70
1B	Betong	1000	100	70
2	Bergkross	800	100	70
3A	Tegel	1500	50	70
3B	Tegel	1500	80	70
4	Bergkross	1500	150	70
5A	Slaggrus	1500	80	70
5B	Slaggrus	1500	80	70

Tabell 16 Resultat av passningsräkning

	Asfaltsgrus (AG)	Bär + förstärkningslager	Undergrund
Förstärkningslager av	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)
Tegel	4285	167	100
Betong	3827	149	108
Referenssträcka	4786	701	139

3.5 Arbetsgång vid utförande av fallviktsmätning

På vederbörande vägar i Malmö har Ramboll utfört en rad fallviktsmätningar på uppdrag av Malmö stad. Fallviktsmätningarna är genomförda i slutet av november 2022 och utvärderingen som tillhandahålls av Ramboll utfördes i linje med TDOK 2019:0463 och analyseras i rapporten med samma utgångspunkt (Ramboll 2022). Bärighetsmått som ingår i analysen redovisas i litteraturstudien. Fallviktsmätningarna genomfördes i november månad löpande på de berörda sträckorna ovan med cirka 15 meters avstånd mellan mätpunkterna.

Data levererades i Excel där samtliga bärighetsmått räknas fram för varje enskild punkt. Resultaten av varje mätpunkt kunde sedan transponeras till rader som representerar sträckan. Därefter identifieras homogena sträckor för att kunna avgöra vilka delar av vägen som har sämre respektive bättre bärighet.

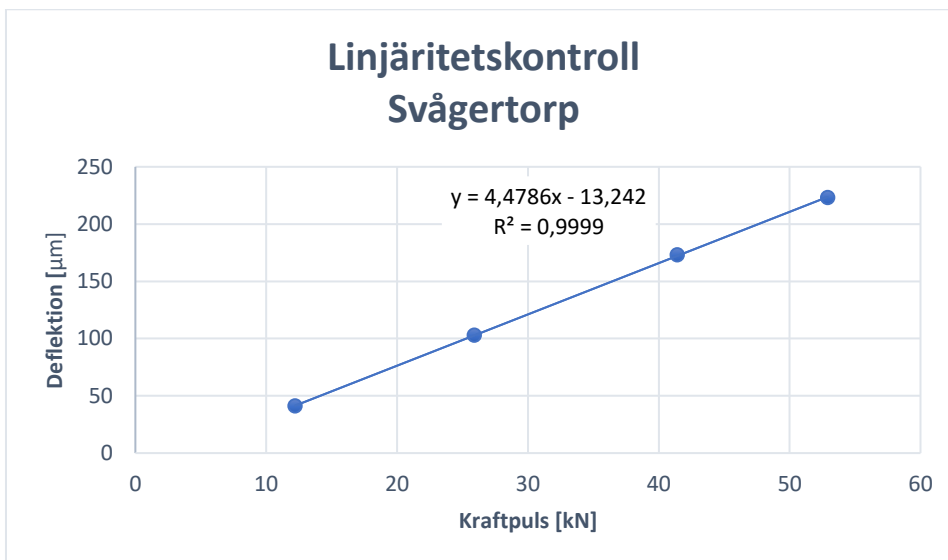
3.5.1 Normalisering

För att kunna jämföra deflektionerna i mätpunkterna krävs en normalisering av värdena. Detta görs för att den inställda lasten är mindre än de uppmätta lasterna. Normalisering sker genom att kvoten tas fram mellan tilltänkt lastnivå och uppmätt last (Trafikverket 2020 16). Därefter multipliceras deflektionerna med kvoten, som är justeringsfaktorn. Genom att göra detta elimineras skillnaden mellan kraftpulserna i olika mätpunkter (Hon 2010, s.43). Därefter kan ett bärighetsmått tas fram som går att jämföra såsom bärighetsindex, SCI, BCI, BDI, ytmoduler och undergrundsmoduler.

Värt att notera är att om justeringsfaktorn tyder på att de uppmätta värdena avviker med mer än 5% från den tilltänkta lasten bör värdena kasseras.

3.5.2 Sättningslag och provbelastningar

För att säkerställa att ytan är mottaglig för belastning av fallvikt görs sättningslag. Denna data lagras generellt inte men sparades i detta fall ihop med andra lastimpulser om 10kN, 25kN, 40kN och den tilltänkta lasten om 50kN för att kunna ingå i undersökningar. Uppmätta i samma punkt visar mätvärdena ett linjäriserat samband mellan lasterna vilket styrker legitimiteten i fallviktsmätningarna och visar att materialet är linjärelastiskt (Hon 2010, s.31).



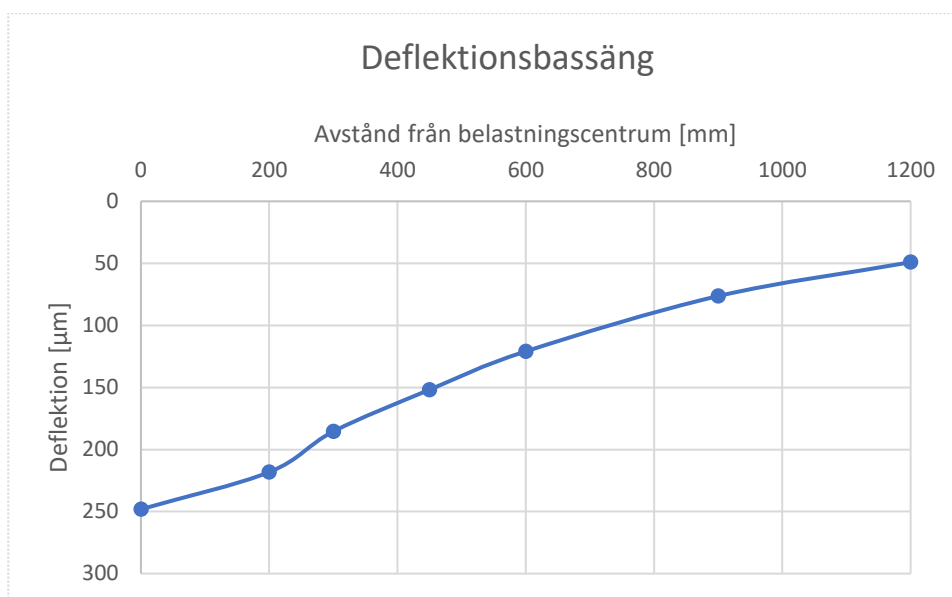
Figur 24 Slagserie på mätpunkt i Svågertorp.

Syftet med upprepade lastimpulser är att packa underliggande material för att öka elasticiteten i materialen och således få en mer exakt mätning (Hon 2010, s.45). Resultaten normeras och ogiltigförklaras enligt TDOK 2019:0463 om de avviker med mer än 5%. I denna undersökning var det flertalet punkter där den nominella lasten avviker med mer än 5% från den tilltänkta. För att ändå kunna använda sig av den uppmätta data så kan man i en slagserie påvisa ett linjäriserat samband mellan impulserna. Detta innebär att även om den verkliga lasten avviker från den tilltänkta lasten så ändras inte materialegenskaperna och därför är de uppmätta deflektionerna inte heller ogiltiga.

I Figur 23 kan det observeras att korrelationsdeterminanten (R^2) ligger nära 1, vilket är fallet för samtliga mätningar.

3.5.3 Deflektionsbassäng

I linje med TRVMB 114 ska mätningar vars deflektionsbassäng inte påvisar en typisk avbildning av responsen såsom i avsnitt 2.4 förkastas. Ett sätt att studera detta på är att skapa egna deflektionsbassänger ur vederbörande mätdata. Genom att ta slumpmässiga punkter på sträckorna och okulärt granska deflektionsdiagram så kan en slutsats kring mätningarna om de följer ett typiskt deflektionsmönster snabbt dras.



Figur 25 Deflektionsbassäng svågertorp, stolpbodsgatan.

I Figur 25 kan en slutsats dras om att deflektionen är som störst i belastningscentrum, precis under plattan. Sedan avtar deflektionen och seismometrarna tar upp mindre värden ju längre bort från belastningen avläsningen sker.

3.5.4 Analys av bärighetsmått

När deflektionerna normaliserats och kontrollerats så beräknades bärighetsmåten. I TDOK 2019:0463 finns redan fördefinierade analyspaket för vilka parametrar som beräknas och analyseras. I detta fall beräknades samtliga bärighetsmått ur analyspaket 2. Parametrarna delades upp för varje mätpunkt och kunde staplas i ordning i beräkningsprogrammet excel. Genom att färgkoda värdena kunde man urskilja homogena sträckor och punkter där måtten avvek från medelvärdet av vederbörande bärighetsmått.

För att med säkerhet kunna påstå att en viss överbyggnad hörde till en specifik mätpunkt så studerades kartor över området. På kartorna går det att urskilja vilken typ av överbyggnad upprättats för varje delsträcka i löpmeter. Således kunde varje mätning kopplas till överbyggnaderna och jämföras.

För att kunna jämföra de olika vägarna så studerades 90-percentilen för samtliga mått. 90-percentilen är det värde som 90% av måtten är lägre än och 10% är högre. Däremot kan spridningen på måtten vara hög och ett medelvärde är av den anledningen inte alltid representativt.

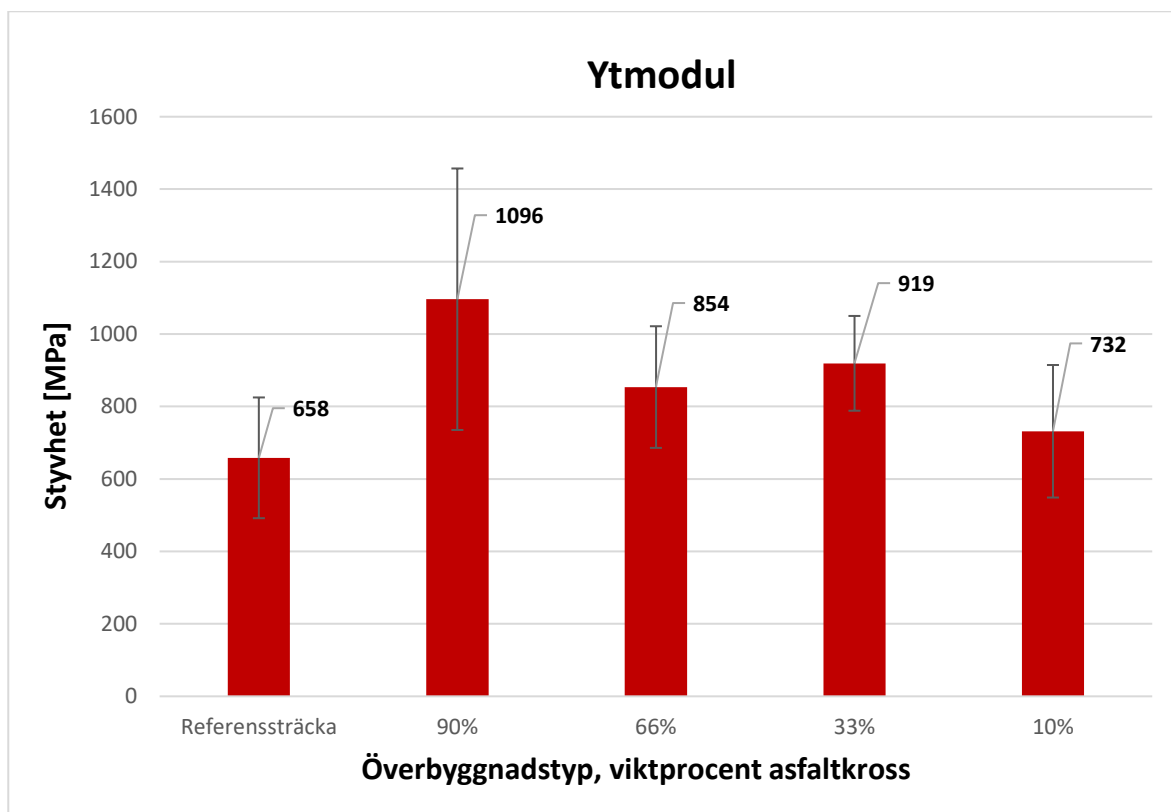
4 Resultat

Mätningar genomfördes i november månad 2022 där temperaturen för mätningarna varierade mellan 4,2 och 7,8 °C. För att kunna jämföra mätningarna inbördes och med resultat från andra studier så har därför till exempel dragtöjning i underkant asfalt omräknats till 10 °C.

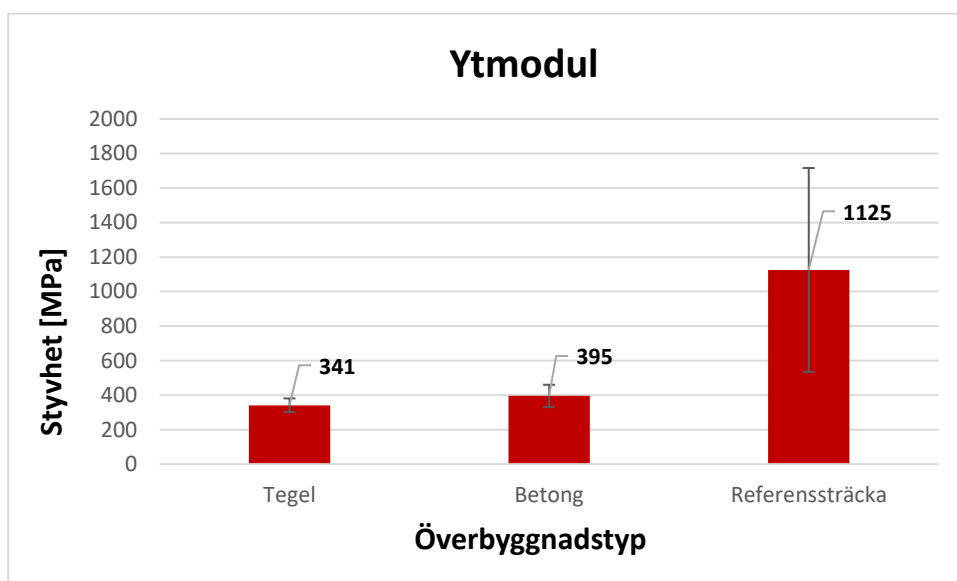
Figurerna 26– 40 visar deflektionsbassäng, ytmodul, base curvature index, töjning, utvecklingen av styvheten hos materialen och spårdjupsutveckling för överbyggnader med asfaltsgranulat, betongkross, tegelkross, asfaltskross och konventionella material. Det svarta sträcket i stapeldiagrammen visar en standardavvikelse över och under medelvärdet. I Figur 30 saknas en standardavvikelse på referensträckan. Detta är på grund av att mätningen endast innehöll en mätpunkt vilket innebär att ingen standardavvikelse kunde tas fram. Påföljden av detta blir således att variationen på resultatet kan bli större jämfört med sträckorna där flera mätpunkter genomförts.

4.1 Ytmodul

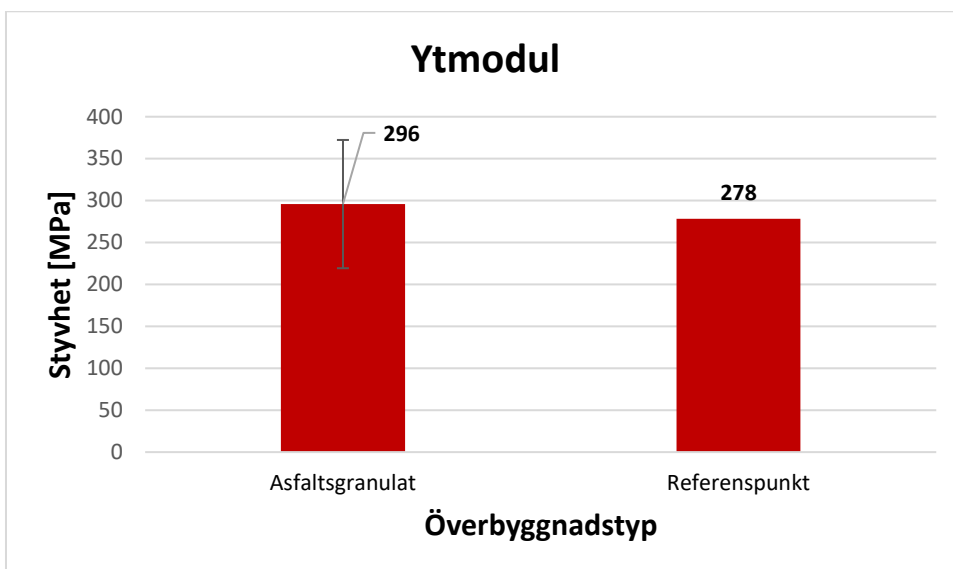
Ytmodul, även kallad E_0 är ett mått på ytans E-modul direkt under belastningen av en fallvikt. Ytmodulen beskriver hela vägkonstruktionens styvhet. Ju högre värde E_0 uppvisar desto styvare är konstruktionen (Trafikverket 2012, s.10). Figur 26–28 visar ytmodulen för överbyggnader med asfaltsgranulat, betongkross, tegelkross, asfaltskross och konventionella material.



Figur 26 E_0 för överbyggnader med olika mängd asfaltkross i de obundna bärlagerna i området Svågetorp.



Figur 27 E_0 för olika överbyggnader på Törringevägen



Figur 28 E_0 för olika överbyggnader på Snorkelgatan

I Figur 26 uppvisar alla de återvunna materialen en högre styvhet jämfört med de konventionella materialen. Vid en inblandning av 90% asfaltkross i det obundna bärlagret ökar styvheten hos beläggningen med 60% i jämförelse med referenssträckan. I Figur 27 observeras att både betong och tegelkross inte kommer upp i samma styvhet som de konventionella materialen. Styvheten hos betong och tegelkross är hela 74 % lägre i jämförelse med de konventionella materialen. Asfaltgranulatet i Figur 28 uppvisar en styvare beläggning jämfört med den konventionella överbyggnaden vilket talar för asfaltgranulat i de obundna lagerna.

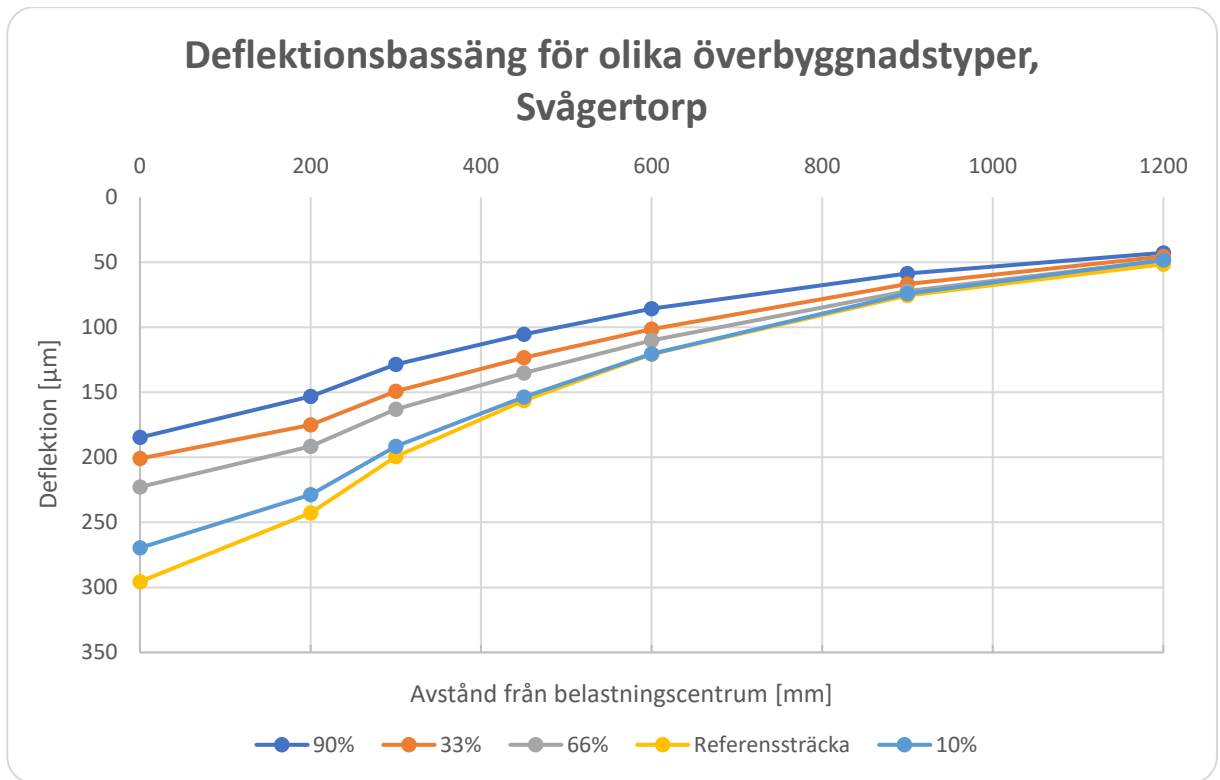
Beroende på trafikmängd och antal standardaxlar för en väg så efterfrågas olika styvhetnivåer. Se tabell 17.

Tabell 17 Riktvärden för ytmoduler till respektive vägtyp (Ramboll 2005).

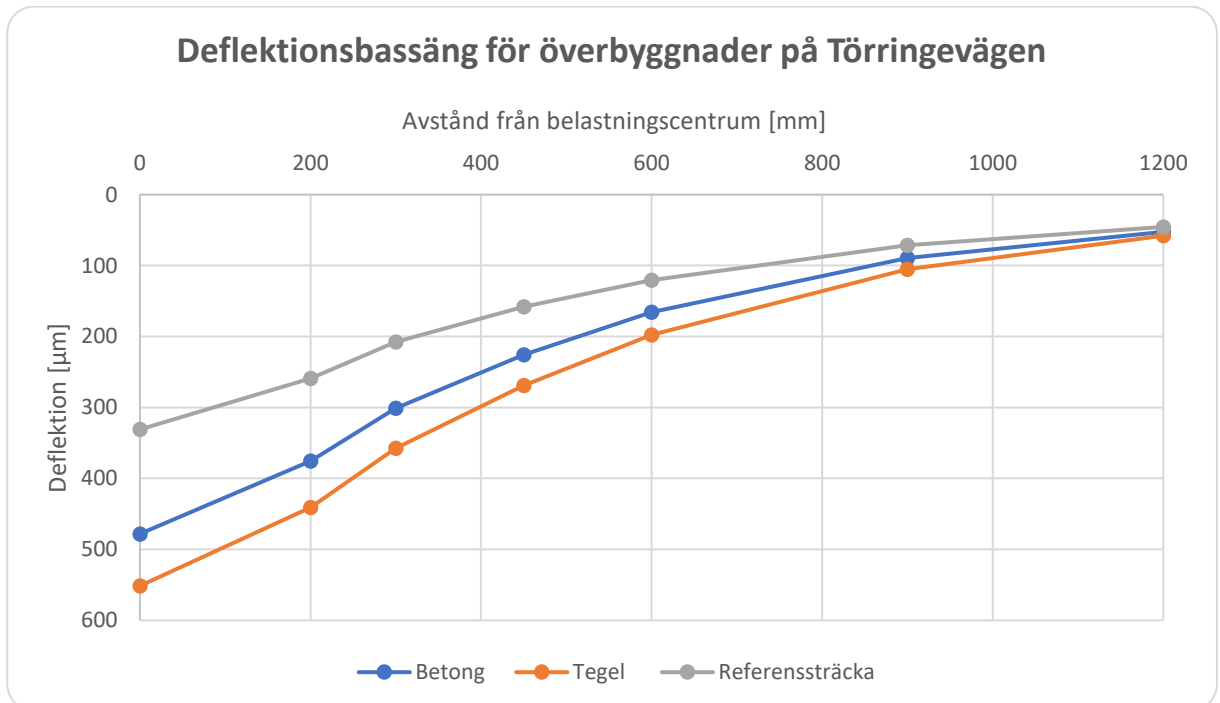
Typ av Väg	Ytmodul [MPa]
Små vägar	220–345
Mellanstora vägar	350–500
Stora vägar	500–600

4.2 Deflektion

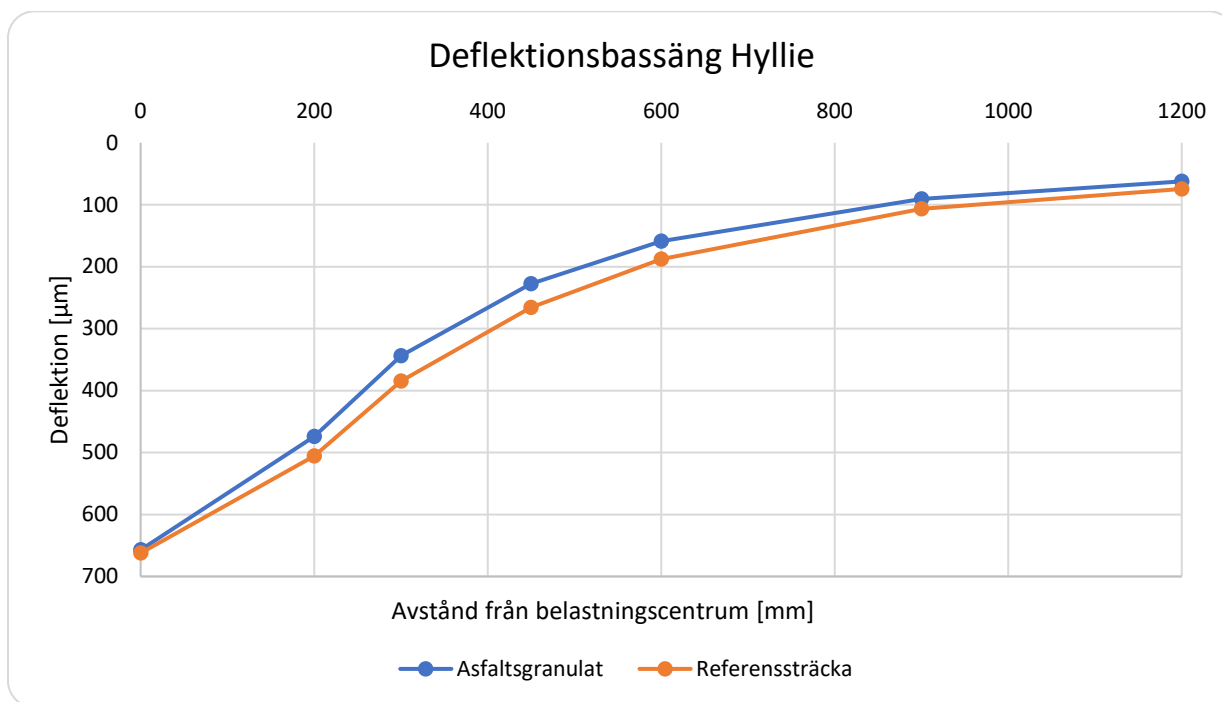
En deflektionsbassäng beskriver deflektionen på olika avstånd vilket gör det enklare att studera deflektionen vid olika mätpunkter. Mätningarnas trovärdighet kan även kontrolleras genom att ta slumpmässiga punkter på sträckorna och okulärt granska deflektionsdiagrammet för att snabbt avgöra om mätningarna följer ett typiskt deflektionsmönster. Figur 29–31 visar deflektionsbassängerna för de studerade områdena.



Figur 29 Deflektionsbassäng för överbyggnader med olika mängd asfaltskross i Svågertorp.



Figur 30 Deflektionsbassäng för olika överbyggnader på Törringevägen



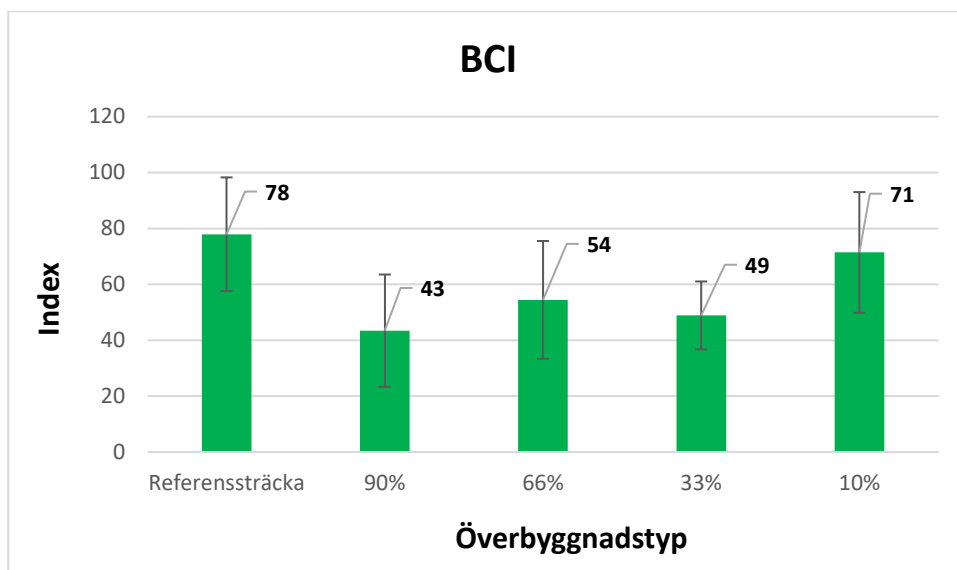
Figur 31 Deflektionsbassäng för olika överbyggnader i Hyllie, snorkelgatan.

I både Figur 29 och 31 uppvisar gator byggda med sekundära ballastmaterial lägre deflektion jämfört med de konventionella materialen vilket gör att de materialen på den platsen klarar av större belastning. I Figur 30 är deflektionen som lägst i sträckan byggd med konventionella material vilket kan tyda på att styvheten är större hos överbyggnaden byggd med konventionella material jämfört med tegel och betongkross.

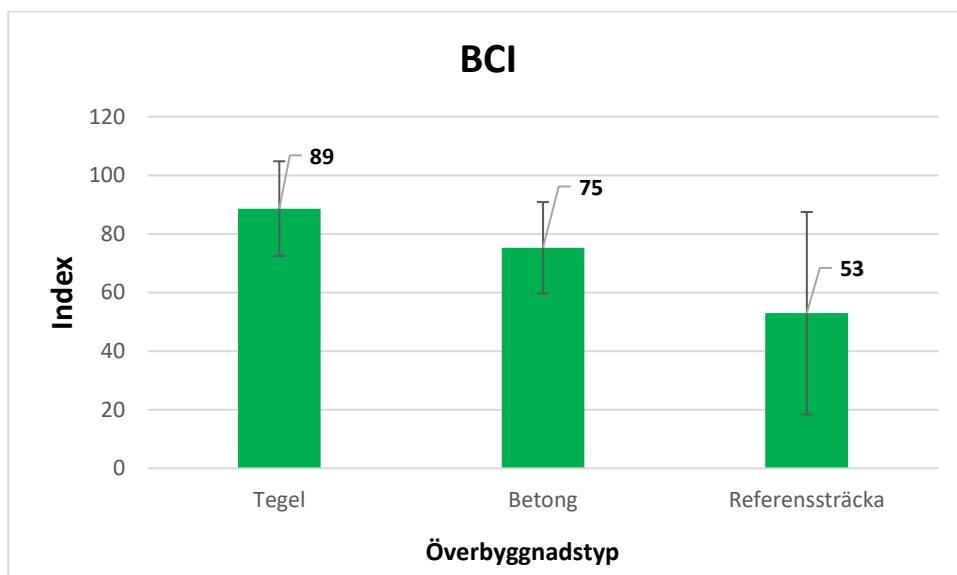
En viktig slutsats som kan dras genom att observera deflektionsbassängerna är att skillnaden mellan de olika överbyggnadernas deflektion vid 1200 mm från belastningscentrum är nästintill 0. Detta innebär att terrasmaterialets egenskaper vid de olika testerna är likartade. Om det går att urskilja stora deflektionsskillnader vid sensorn som ligger 1200mm ifrån deflektionscentrum så skulle det inte med säkerhet kunna påstås att värdena i figurerna nedan endast beror på konstruktionen under belastningen. I stället skulle den dåliga terrassen ha resulterat i ett annorlunda resultat.

4.3 BCI

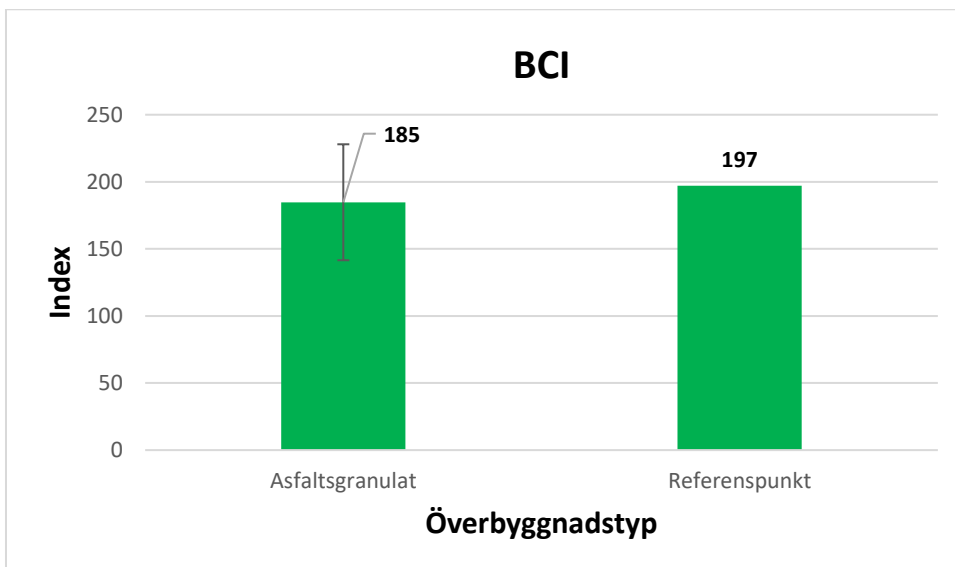
BCI eller base curvature index är ett mått på styvheten hos den mellersta delen av vägkonstruktionen, det vill säga de obundna lagerna. Eftersom det är bär- och förstärkningslagret som undersöks i denna rapport ger BCI en tydlig och viktig indikation på hur styvheten hos materialet i de obundna lagerna varierar. Ju lägre värde på BCI desto styvare är konstruktionen. Figur 32–34 visar BCI för överbyggnader med asfaltsgranulat, betongkross, tegelkross, asfaltskross och konventionella material.



Figur 32 BCI för överbyggnader med olika mängd asfaltskross i de obundna bärlagerna i området Svågetorp.



Figur 33 BCI för olika överbyggnader på Törringevägen

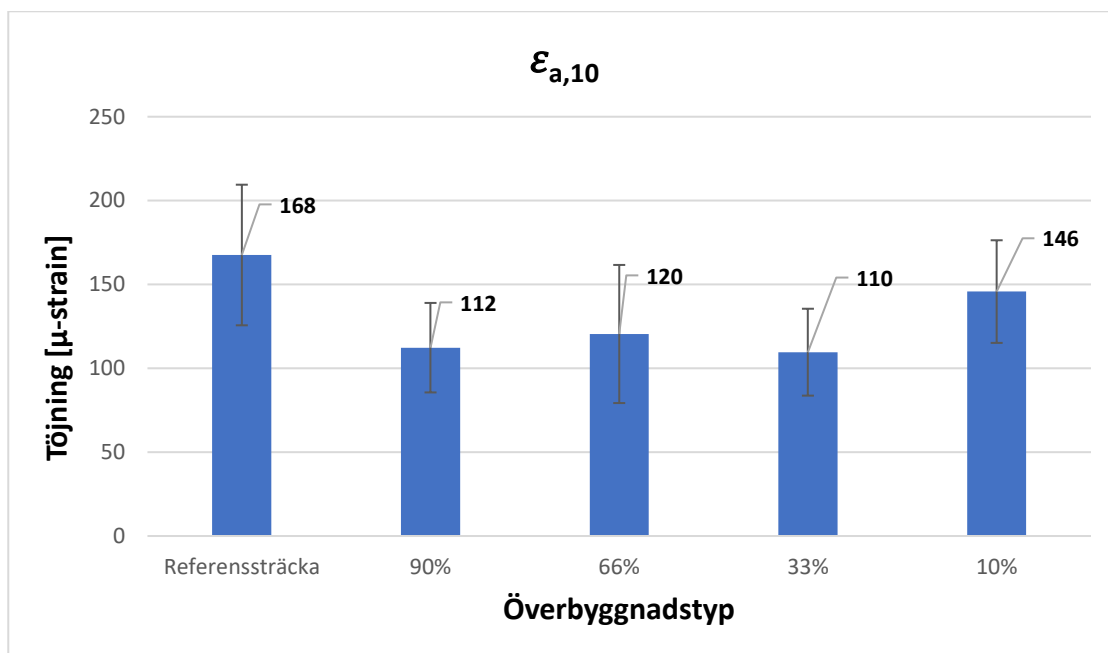


Figur 34 BCI för olika överbyggnader på Snorkelgatan

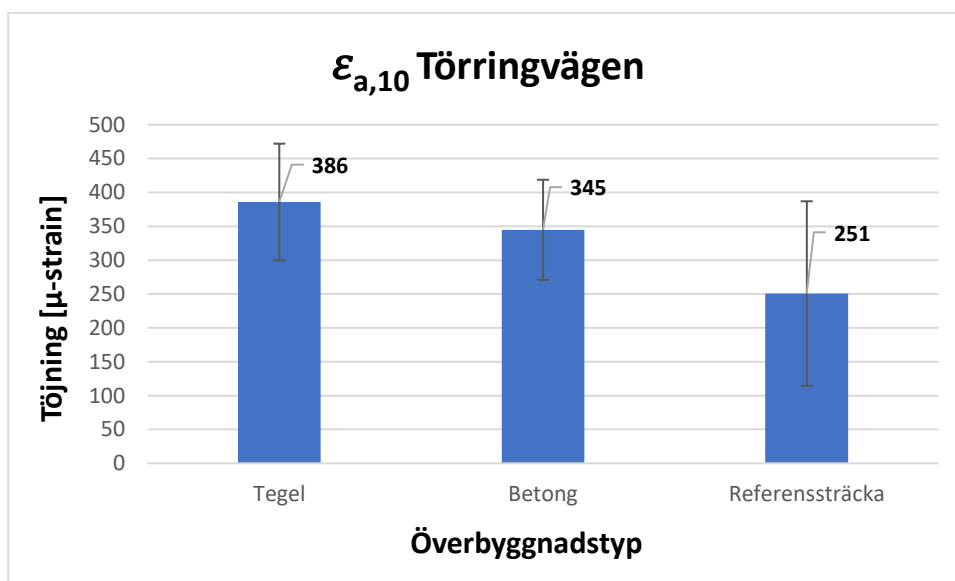
Figur 32 visar att base curvature index är som högst vid användning av de konventionella materialen vilket visar på en styvare konstruktion på de gatorna med inblandning av asfaltkross. Konstruktionen är som styvast vid 90% inblandning av asfaltkross. I Figur 33 avläses en ett högre värde på betong och tegelkross jämfört med konventionella material vilket återigen visar på mjukare beläggning hos tegel och betongkross jämfört med vanliga material. Figur 34 visar återigen att asfaltsgranulat är ett material som ger en styv konstruktion och dessutom styvare än konventionella material.

4.4 Uppskattad töjning i asfaltens underkant (ϵ_{a10})

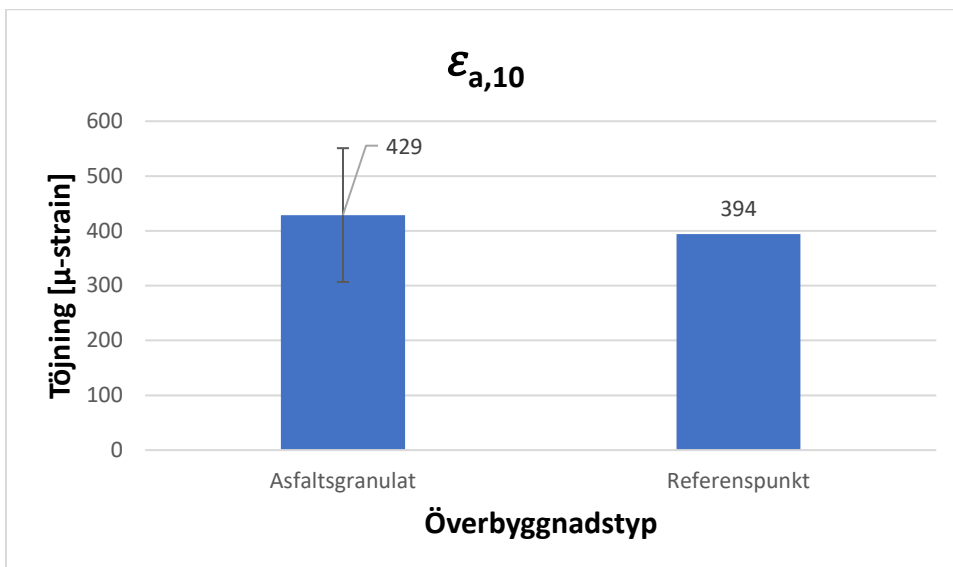
ϵ_{a10} är asfaltstöjningen i underkant mätt vid en temperatur på 10^0 C. Den horisontella dragtöjningen i beläggningens underkant är ett mått på hur stor risken är för utmattningssprickor. Ju större värde ϵ_{a10} uppgår till desto större är töjning i asfalten. Figur 35–37 visar ϵ_{a10} för överbyggnader med asfaltsgranulat, betongkross, tegelkross, asfaltkross och konventionella material.



Figur 35 $\epsilon_{a,10}$ för överbyggnader med olika mängd asfaltskross i de obundna bärlagerna i området Svågetorp.



Figur 36 $\epsilon_{a,10}$ för olika överbyggnader på Törringvägen



Figur 37 $\epsilon_{a,10}$ för olika överbyggnader på Snorkelgatan

Figur 35 visar att de konventionella överbyggnaderna ger upphov till störst töjning i asfalten jämför med olika inblandningar av asfaltkross i bärlagret. 33% inblandning av asfaltkross skapar en beläggning som ger den lägsta töjningen i asfalten i området Svågetorp. Vid dimensionering för vägkonstruktioners livslängd så används i vissa sammanhang fjärdepotensregeln. I detta fall antyder beräkningen att konstruktionen med 90% asfaltkross kommer hålla 5 gånger så länge som den konventionella överbyggnaden.

$$\frac{1}{\left(\frac{112}{168}\right)^4} \approx 5$$

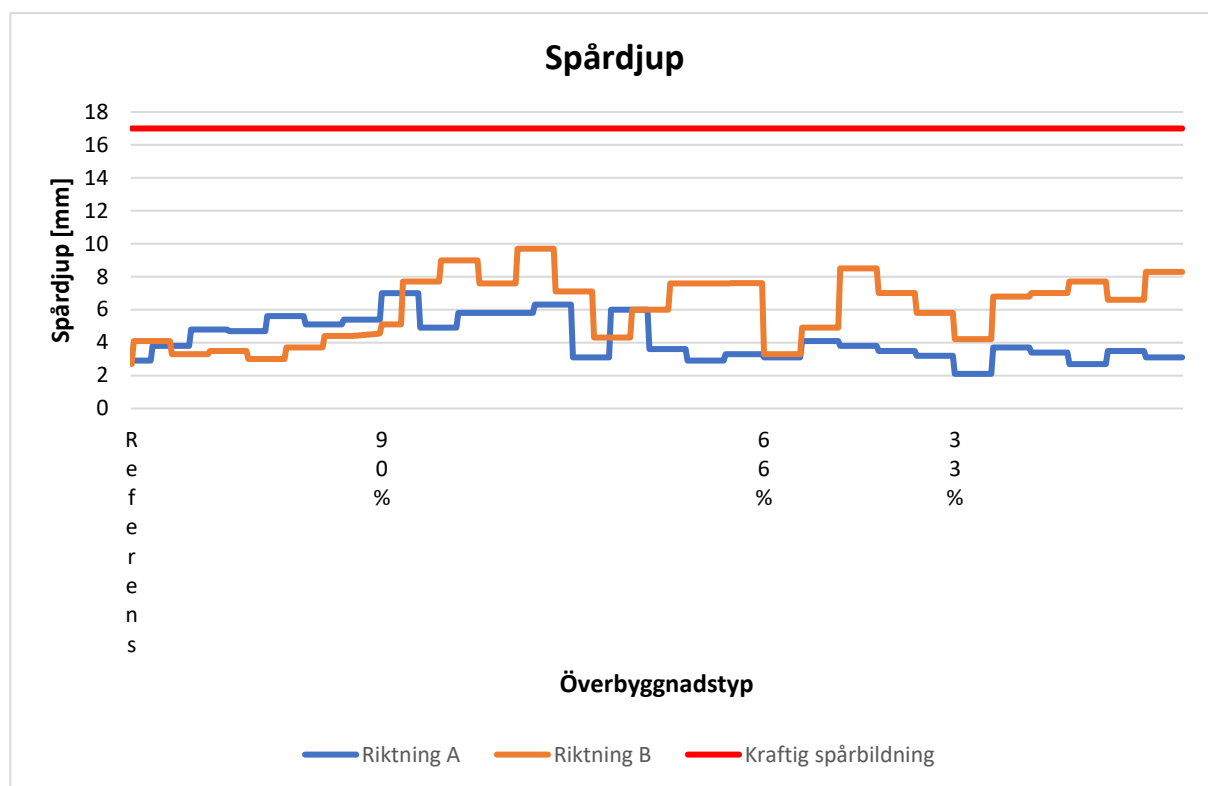
(TRVInfra 2023, 38)

I Figur 36 visar Betong och tegelkross återigen sämre värden än den konventionella överbyggnaden i form av en större töjning i asfalten. Figur 37 uppvisar asfaltgranulatet en liten större töjning jämfört med den konventionella överbyggnaden men skillnaden är näst intill försumbar.

4.5 Spårdjupsutveckling

Spårdjup är ett mått på vägens yt slitage från exempelvis tunga fordon och användningen av dubbdäck. Slitaget mäts i hjulspåren av en mätbil som kan läsas mer om i del 2.3.3 ovan. Som en del av Malmös storstadspaket utfördes spårdjupsmätningarna i några delar av Malmö stad. I samband med denna satsning 2020 utfördes spårdjupsmätningar på området i Svågertorp där resultatet redovisas i Figur 38 nedan. Eftersom mätningarna inte var direkt

riktade till denna rapport saknas därav spårdjupsmätningar till Törringevägen och Snorkelgatan. På området Svågertorp har inga åtgärder genomförts från det att vägen anlagts.



Figur 38 Spårdjup för olika överbyggnader på Svågertorp 2022.

Figur 38 visar spårdjupet som utvecklats på de olika överbyggnaderna på Svågertorp. Den röda linjen i Figur 38 visar var gränsen för kraftig spårbildning går, vilket även beskrivs i Tabell 6 tidigare i rapporten (Ramboll 2014, s.24). Spårdjupen i figuren ovan varierar inte avsevärt mycket och är relativt låga. Vid vissa tillfällen, exempelvis med 33% asfaltskross i bärlagret på Gruphusgatan är skillnaden på spårdjupet hos riktning A och B större än på de andra gatorna.

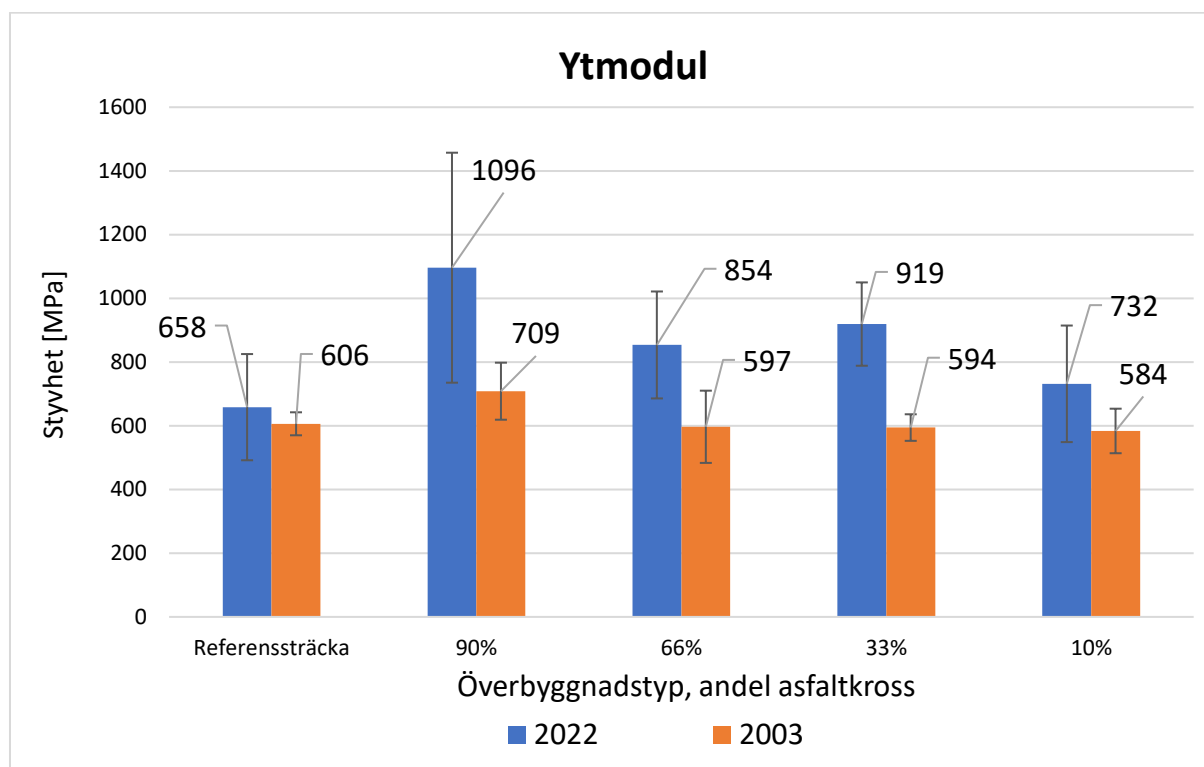
4.6 Utveckling av styvheten hos materialen

Snorkelgatan anlades 2022 och är den gata som anlades senast vilket också gör att den är så pass ny att inga direkta slutsatser om hur beläggningen funkar över tid kan dras.

I området Svågertorp kan data dateras tillbaka till 2003 då det genomfördes fallviktsmätningar på platsen bara några månader efter vägarna satts i bruk. Detta medför att en analys på hur bärigheten har förändrats över tid kan genomföras. Figur 39 och 40 illustrerar hur bärigheten med avseende på ytmodul och töjning på gator med asfaltskross varierar från 2003 jämfört med mätningen som gjordes 2022.

På Törringevägen där betong och tegelkross har anlagts genomfördes inledande lagermodul eller en så kallad passningsräkning 1999. Detta medför att en ny passningsräkning har kunnat genomföras i syfte att utvärdera hur styvheten hos materialet har utvecklats. Utveckling av lagermodulen kan avläsas i Figur 39 nedan. Värt att notera är att mellan 1999 och 2020 anlades ett nytt slitlager på 30mm vilket även kan påverka de obundna lagerna.

4.6.1 Asfaltkross



Figur 39 Ytmodul för överbyggnader med varierande mängd asfaltkross på Svågertorp

I Figur 39 ökar styvheten hos samtliga överbyggnadstyperna över tid. Referenssträckan blir något styvare men i jämförelse med gatorna med asfaltkross är denna ökning liten. Överbyggnaderna med 90% och 33% asfaltkross ökar sin styvhet med mer än 50% under de 20 år som konstruktionen varit i bruk.

4.6.2 Betong och tegelkross



Figur 40 Itererad styvhetsmodul för bär- och förstärkningslager på Törringevägen.

Vid jämförelse av de itererade styvhetsmodulerna observeras att styvheten har ökat från år 1999 till år 2020. Styvheten hos referenssträckan är nästan 5 gånger så hög som styvheten för 20 år sedan. Värt att notera är att information kring vilka startmoduler som är använda vid passningsräkningen 1999 saknas vilket således orsakar större osäkerhet på resultatet. Styvhetsmodulen hos teglet har mer än fördubblats under de 20 år som gatan varit i bruk medan styvheten hos betong mer eller mindre är oförändrad från 1999 fram till 2020.

5 Diskussion

5.1 Metoddiskussion

5.1.1 Sekundärdata

Vissa delar av metoden har utgått ifrån analys av tidigare projekt eller redan befintliga data vilket även kan beskrivas som sekundärdata. Denna metod har medfört att vidare analys och utredning har kunnat påbörjas direkt, vilket har resulterat till ett mer effektivt arbete. En nackdel är däremot att sekundärdatans resultat ofta är skapat för ett specifikt syfte som inte alltid behöver korrelera med syftet på denna rapport. Med detta i åtanke har den insamlade sekundärdatan kontrollerats med avseende på relevans för denna rapport.

Stora delar av sekundärdata som samlats in kommer från Trafikverket vilket är en svensk statlig förvaltningsmyndighet. Detta leder till att entreprenörer behöver anpassa sig efter Trafikverkets kravdokument vilket också gör dem styrande. Genom att använda sig av ett styrande kravdokument tar aktörer del av samma information vilket minskar risken för att missinformation sprids.

Kravnivån för ytmodulen är hämtad från handbok för PVD, vilket är ett vägtekniskt redovisningsprogram. Där har kravnivåer listats på ytmodul utifrån antalet standardaxlar. Egentligen är detta ingen regelrätt källa enligt svensk standard men lämpar sig som en referensnivå i detta arbete. Dessa nivåer har använts för att tolka värden som fås av resultatet och sätta de i ett större perspektiv. Se Tabell 18.

Ytterligare en sekundärdata som ingått i rapporten är data kring spårdjupsmätningar. Spårdjupsmätningen utfördes i Svågertorp i samband med andra mätningar. Därav är det endast den sträckan som har analyserats utifrån spårdjup. Eftersom mätningen enbart utfördes på en sträcka hade denna mätning kunnat exkluderas från resultatet, men eftersom information kring spårdjupsutveckling fortfarande berikar rapporten valdes detta att bibehålla.

En till granskning som var inplanerad att göra var en okulär besiktning via ”bära eller brista”. Denna metod användes ej i denna undersökning främst på grund av brist på tid. Resultatet av att inte göra en okulär besiktning är bland annat de ytliga skadorna på vägen som på sikt kan ha stor betydelse för vägens nedbrytning.

Något som kunde utvecklats vid insamling av information och data till denna rapport är att exempelvis bara använda sig av information som kommer från Trafikverket för att säkerställa sig att informationen är korrekt. Däremot för att

ta del av några tidigare studier behövdes insamlingen av data sträcka sig utanför Trafikverkets gränser. En fördel med detta kan även vara att resultatet blir mer nyanserat eftersom flera synvinklar har tagits med.

5.2 Resultatdiskussion

Genom att studera vägkonstruktionernas uppbyggnad där fallviktsmätningarna utförts kunde homogena sträckor där vägkonstruktionen var identisk tas fram, för att underlätta analysen. Detta är en förutsättning för att kunna göra en inbördes jämförelse mellan vägkonstruktioner innehållandes sekundära material med vägkonstruktioner bestående av konventionella material. Resultaten från jämförelsen kan senare användas för att beskriva i vilken sorts vägkonstruktion dessa material kan tillämpas. Material med hög bärighet är lämpligt att använda på vägar med hög trafikbelastning, exempelvis huvudgator. Medan material med lägre bärighet är begränsade till att användas på gator med mindre trafikbelastning, exempelvis lokalgator.

Målet med resultatet har från början varit att kunna jämföra fallviktsdata från konventionella överbyggnader mot överbyggnader som byggts upp med sekundära ballastmaterial. Detta gjordes för att kunna bedöma lämpligheten i att använda dessa material i vägkonstruktioner.

Resultatet från fallviktsmätningarna där asfaltkross som ballastmaterial använts visar att vägen blivit styvare under tjugo års tid. Hypotesen var från början att materialet med tid och efterpackning från trafik skulle härda och likna ett bundet lager. Där det använts som mest asfaltkross i beläggningen har konstruktionen över tid blivit styvast och uppvisar än idag högre styvhet än referenssträckan.

Tidigare studier från Jacobsson har visat liknande resultat. På cykelbanor i Stockholm har vägarna blivit styvare med bara ett års mellanrum mellan mätningarna.

5.2.1 Överbyggnaders utveckling

5.2.1.1 Asfaltsgranulat och asfaltkross

Bärighetsutredningen visar att asfaltgranulat- och asfaltkross har minst lika bra bärighet som konventionella material. Precis som i det tidigare projekt på E4 i Strömnäsbruk kan det observeras att över tid har materialet blivit styvare och efterpackats av den trafik som gått på vägen under 20 års tid. I det fall där 90% asfaltkross är anlagt i området Svågertorp så har styvheten nästan fördubblats.

Hur lång tid som behöver passera för att efterpackning från trafik och härdning ska ge konstruktionen önskad styvhet är oklart. I projektet på Strömsnäsbruk ökade styvhetsmodul dock med 80% under första året, vilket tyder på att den största ökningen sker redan under första året. Rimligen borde trafikflöde på vägen undersökas för att knyta an till resultatet.

Däremot menar (Jacobsson 2002, s.5) att granulat på vägar med långsamtgående trafik eller där statiska laster kan förekomma såsom parkeringsytor inte bör användas. Även om konstruktionerna i denna undersökning antyder på god bärighet och nästan utklassar andra material så bör det undersökas vilka typer av laster som kan förekomma innan beslutet tas att anlägga denna sorts konstruktion.

Spårdjupsutvecklingen på gatorna med asfaltkross ligger under kravnivån för vad som kräver en åtgärd. Medelvärde på spårdjupet uppgår till cirka 6 mm vilket enligt Tabell 6 ovan innebär att spåren är synliga men att inga underhållsåtgärder behöver genomföras. Som högst uppgår spårdjupet till 9 mm vilket likaså inte utlöser någon underhållsåtgärd. Med denna låga spårdjupsutveckling har vägen även till ytan visat sig hålla en god kvalitet. Detta är goda tecken på att vägen hårdar över tid och att den krossade asfalten börjar likna ett bundet lager med tiden.

Liknande resultat kan tydas från mätningarna på Snorkelgatan, där 100% asfaltgranulat har använts som ballast. Samtliga parametrar indikerar att bärigheten på asfaltgranulatet är bättre än referenssträckan. Detta är en indikation på att bärigheten är tillräckligt god för framtida användning av materialet. Asfaltstjörningen är något större hos asfaltgranulatet vilket skulle kunna bidra till fler utmattningsprickor. Snorkelgatans beläggning är i sammanhanget relativt ny vilket gör det svårt att dra för många slutsatser. Undersökningen som genomfördes av Jacobsson år 2002 där asfaltgranulat användes som konstruktionsmaterial i cykelbanor i Stockholm visade att tjörningen i underkant av asfalten ökade som mest under det första året i förhållande till referenssträckan. Även här har entreprenören likt dem som anlade snorkelgatan haft svårt att packa materialet, vilket är vad Jacobsson tror är anledningen till den ökande tjörningen. Vid anläggningen behövdes stora mängder vatten för att uppnå rätt packningsgrad. Av den anledningen blir härdning och efterpackning av vägen det första året som störst.

Vid användandet av fjärdepotensregeln konstaterades att livslängden för vägen med 90% asfaltkross blev 5 gånger så lång som för referenssträckan. Det är dock viktigt att ha i åtanke att spridningen av data var stor för konstruktionen med 90% asfaltkross och att medelvärdet kanske inte är representativt för just den sträckan. Här borde kanske medianen använts och undersökts och vara en

ingående parameter vid uträkning av den förlängda livslängden. Dessutom baserades det på asfalttöjningen som indikerar utmattningssprickor.

5.2.1.2 Tegel och betong

Tegel och betong gav i förhållande till sina referenssträckor låga styvhetsvärden. Redan vid anläggningen av vägen år 1999 konstaterades att kraven på styvhet som ställs i väg 94 inte uppnåddes. Förutsättningarna för god bärighet på vägen var dåliga just på grund av förseningar i arbetet och att vägen blev anlagd i regnigt väder. Med tanke på att terrassen består av lermorän kan den ha utsatts för väta vilket kan ha påverkat möjligheterna till att packa materialet till fullgod kravnivå. På grund av platsbrist så har kross av olika fraktioner förvarats på samma plats. Detta medför att det vid utläggning av materialet blir svårt att identifiera kornstorleksfördelning, vilket kan ha påverkat resultatet.

Vid rätt förutsättningar, god planering och ordentlig packning i korrekta väderförhållanden borde denna sorts ballastmaterial ha större potential att uppnå bärighetsresultat som klarar av större laster.

Passningsräkningen (som illustrerat i resultatet under 4.6.2) ger högre styvhet år 2020 än vad det gjorde 1999. Detta är särskilt tydligt på ytmodulerna för de obundna lagerna i konstruktionen men har givetvis att göra med det faktum att det mellan tidpunkterna för mätningarna anlades ett nytt slitlager av ABS 11 70/100 om 35 mm. Detta frambringar att även här, likt asfaltkrossen, fått en efterpackning av materialet.

Styvheten för tegel och betong är lägre än för asfalt, enligt resultatet i rapporten. Däremot betyder det inte att betong och tegel inte kan användas som ballastmaterial i framtiden. Det går att argumentera för att konstruktionen på Törringevägen inte lämpar sig ifall antalet standardaxlar skulle öka markant de kommande åren. För närvarande är trafiken så låg att Törringevägen enligt väg 94 hamnar under trafikclass 0. Dessutom är andelen tung trafik 3%, vilket antyder att denna typ av material lämpar sig bra. Se tabell 7.

5.2.1.3 Framtida arbeten

För att skapa en djupare förståelse om vägarnas tillstånd kan det vara en god idé att genomföra en okulär tillståndsbedömning på samtliga sträckor. Utifrån synliga skador och defekter på beläggningen kan slutsatser dras om underhållsarbete är nödvändigt. Det är en förutsättning för att vägghållaren ska kunna planera underhållsarbete på ett effektivt sätt.

Bära eller brista är en handbok som kan användas som hjälpmedel vid okulär besiktning av vägar och gator. I handboken behandlas belagda vägar där alla typer utgör en del. Det kan likväl vara gång- och cykelvägar som motorvägar. En okulär tillståndsbedömning är en metod där information om synliga skador identifieras och samlas in varpå konstruktionens tillstånd värderas utifrån skadorna och deformationerna. Handboken i sig är i grunden en portfölj av typiska skador och deformationer av olika slag. Med den till förfogande kan svar på följande frågor besvaras.

- Vilken typ av skada eller defekt är det fråga om?
- Vilken svårighetsgrad har skadan?
- Vad är den tänkbara orsaken till skadan?

Generellt är protokollet en förutsättning för väghållaren vid planering av framtida underhållsinsatser på ytan. Informationen underlättar vid prioritering av underhåll men är i grund och botten en subjektiv bedömning (Bära eller brista 2019).

6 Slutsats

Rapporten ska huvudsakligen besvara:

1. Hur beter sig sekundära ballastmaterial i förhållande till konventionella ballastmaterial?
2. Hur har de sekundära materialens egenskaper förändrats över tid?

Utifrån rapporten och genomförd undersökning konstaterades följande:

- I förhållande till sin konventionella referenssträcka så är asfaltkross som obundet bärlager styvare och således lämpligt som ballastmaterial för vägar.
- Vägen som undersöktes innehållandes betong- och tegel i de obundna lagren (Törringevägen) åskådliggjorde att konstruktionen blev styvare med tiden men att referenssträckan gav fördelaktigare resultat.
- Alla material som undersöktes i rapporten blev styvare med tiden.

6.1 Rekommendationer till Malmö Stad

Att vidga och sträva efter cirkulärt byggande i Malmö stad bör vara en praxis som används oftare. Vid anläggning av ny väg borde i första hand möjligheten till att använda sekundära ballastmaterial undersökas för att sedan gå vidare till konventionella material.

Enligt undersökningen kan asfaltkross- och asfaltgranulat användas som obundna material i huvudgator men även mindre gator. Däremot borde inte materialet användas vid anläggning av parkeringsytor, eftersom det inte tål statiska laster i samma utsträckning som konventionella material.

I linje med resultatet i rapporten bör tegel- och betongkross inte användas på huvudgator, på grund av sin låga styvhet. Däremot kan det vara lämpligt för lokalgator, om materialet finns till förfogande.

7 Referenser

Abrahamsson, P; Borinder, T; Hagert, C; Hedén, S; Jansbo, K; Josefsson, L; Lynhagen, E; Phil, K. 1999. *Projektet Nya sten – och grusmaterial. Användning av betong, tegel och slaggrus som obundet vägbyggnadsmaterial.*

ABT Väg. 2005. *Kapitel E, Obundna material.*

Agardh, S & Parhamifar, E. 2014. *Vägbyggnad. Egypten: Liber.*

Carlsson, Håkan. 2001. *Prov med krossad betong på Stenbyvägen i Göteborg.* <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:670049/FULLTEXT01.pdf>

Chai, G; Chowdhury, S; Golding, A och Manoharan, S. 2018. *A study of the structural performance of flexible pavements using traffic speed deflectometer.* https://www.researchgate.net/publication/321438904_A_Study_of_the_Structural_Performance_of_Flexible_Pavements_Using_Traffic_Speed_Deflectometer

Cornell Local Roads Program. 2005 *An important Tool For Highway Management.* <https://cals.cornell.edu/nysltap-local-roads/publications-resources/newsletters> (Hämtad 2023-03-15)

Granhage, L. 2009. *Kompendium i vägbyggnad.* <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1452855/FULLTEXT02.pdf>

Hamid Jahanbakhsh, Mohammad M. Karimi, Hamed Naseri, Fereidoon Moghadas Nejad. 2020. Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: Performance assessment, cost analysis, and environmental impact. *Journal of Cleaner Production* 244. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118837>.

Hon, Philip. 2010. *Utvärdering av kontrollmetoder för obundna granulära material.* Lund: Institutionen för Teknik och Samhälle, Lunds Tekniska Högskola. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8920929&fileId=8920930>

Inge Hoff, Helge Mork, Rabbira Garba Saba. 2022. *Proceedings, Eleventh international conference on the bearing capacity of roads, railways and airfields.* <https://www.taylorfrancis.com/books/oa->

[edit/10.1201/9781003222910/eleventh-international-conference-bearing-capacity-roads-railways-airfields-inge-hoff-rabbira-saba-helge-mork](https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:670130/FULLTEXT01.pdf)

Jacobson, Torbjörn. 2002. *Återvinning av krossad asfalt som bär- och förstärkningslager*. Linköping: VTI.
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:670130/FULLTEXT01.pdf>

Jacobson, Torbjörn. 2007. *Återvinning av tjärasfalt och krossad asfaltsbeläggning vid motorvägsbygget på E4 via Markaryd*.
<http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:670345/FULLTEXT01.pdf>

Jacobson, Torbjörn och Waldemarson, Andreas. 2011. *Återvinning av asfalgranulat vid motorvägsbygget på E4, Markaryd*. Linköping: VTI.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:670458/FULLTEXT01.pdf>

Jan Hartlén, Raul Grönholm, Tommy Nyström och Jörgen Schultz. 1999. *Återanvändning av sekundära material inom anläggningsområdet*. Stockholm: Naturvårdsverket.

Karlström, M. 2014. *Dubbeldelad hybridbuss driven av biogas i Malmö*
<https://omev.se/2014/03/17/dubbelledad-seriehybridbuss-driven-av-biogas-i-malmo/> (Hämtad 2023-02-01)

KUAB. 2014. *Road data presentation program KUAB PVD User manual*.

Larsson, Ola; Ljungström, Martin. 2007. *Framtidens ballastmarknad*
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1019640/FULLTEXT01.pdf>

Naturvårdsverket. 2023. *Sekundära resurser kan vara viktiga för omställningen till en cirkulär ekonomi*. (Hämtad 2023-03-21)

Paulson, Ulf. 2022. *Examensarbeten, att skriva uppdragsbaserade uppsatser och rapporter*. 1:1 uppl. Lund: Studentlitteratur.

Ramboll. 2014. *Jämnt hela vägen*.
<https://bransch.trafikverket.se/contentassets/50e12058cb4747ea9809b2ffa8c3dbe2/handbok-i-vagytematt.pdf>

Ramboll. 2022. *Fallviktsrapport, Malmö Stad, FWD Malmö Stad*.

Regeringen. 2022. *Agenda 2030 för hållbar utveckling*. Stockholm: Regeringskansliet.
<https://www.regeringen.se/regeringens-politik/globala-malen-och-agenda-2030/> (Hämtad 2023-03-21)

RISE. 2020. *Constructivate arbetspaket 3 – Återvinning av rivningsavfall som ballast i betong*. Borås: RISE. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1442513/FULLTEXT01.pdf> (Hämtad 2023-03-22)

Statens geotekniska institut. 2019. *Jords tekniska egenskaper*. Linköping: SGI. <https://www.sgi.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/jords-tekniska-egenskaper/>

Sveriges kommuner och regioner. 2019. *Bära eller brista – handbok i tillståndsbedömning av belagda gator och vägar*.

Trafikverket. 2023. *TRVINFRA-002244*. Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket. 2022. *Cirkulärt byggande – hinder och möjligheter*. <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1726571/FULLTEXT01.pdf>

Trafikverket. 2020. *TDOK 2013:0529, Krav, Bitumenbundna lager*

Trafikverket. 2020. *TDOK 2019:0464, Utvärdering av vägkonstruktioners bärighet med fallviktsapparat*.

Trafikverket. 2014. *TDOK 2014:014, Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning*.

Trafikverket. 2012. TRMVB 114. *Bearbetning av deflektionsmätdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat*. https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11016/RelatedFiles/2012_051_TRMVB_114_bearbetning_av_deflektionsm_atdata_erhallna_vid_provbelastning_av_vag_med_FWD_apparat.pdf

Trafikverket. 2011. *TDOK 2011:264, TRVK Väg*.

VTI. 2022. *Vägytemätning*. <https://www.vti.se/tjanster/vag--och-geoteknik/vagtillstandsmatning/vagytematning> (Hämtad 2023-03-27)

Vägverket. 2004 *Allmän beskrivning av krossad betong i vägkonstruktioner*. https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10592/RelatedFiles/2004_11_atb_krossad_betong_i_vagkonstruktioner.pdf

Wiman, Leif G; Tholén, Olle. 1999. *Asfaltboken*. <https://asfaltboken.se/vagens-uppbyggnad/>.

Ydrevik, Krister. 2000. *Förstärkningslagermaterial av krossad betongslipers, Erfarenheter från provsträckor på väg 869 vid Stenstorp*. VTI; Linköping, Sverige.