

Rullande bärighetsmätning i vägprojekt

- En jämförelsestudie mellan fallviktsmätningar (FWD) och rullande bärighetsmätningar (RWD)



**LUNDS
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Institution för Teknik & Samhälle

Examensarbete:
Hussein Al-Baidhani

© Copyright Hussein Al-Baidhani

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 2025

Förord

Detta examensarbete har utförts på Lunds Tekniska Högskola som ett avslutande moment inom teknik och samhälle, avdelning byggteknik med inriktning väg- och trafikteknik. Rapporten har genomförts i samarbete med Ramböll RST (Road Survey Technology) i Malmö, som har erbjudit datamätningar från fallvikt och Raptor (Rapid Pavement Tester).

Jag vill börja med ett stort tack till min handledare Pajtim Sulejmani, universitetsadjunkt vid trafik och väg på Lunds Universitet som med konstruktiv feedback, tydlig kommunikation, stöttning och engagemang lyckats hjälpa mig framställa denna rapport. Jag vill även tacka min externa handledare Ola Aurell, senior Consultant i vägteknik (RST Road Technology) som har hjälpt med datainsamling och hjälpt till med betydande analyser. Jag vill dessutom tacka Sven Agardh, lektor vid vägbyggnadsavdelningen på Lunds universitet som har ställt upp som examinator.

Tack till hela Ramböll RST teamet i Malmö som har välkomnat mig med ett trevligt bemötande på kontoret och verkstaden.

Avslutningsvis vill jag tacka min familj och vänner för deras stöd.

Hussein Al-Baidhani
Halmstad, maj 2025

Sammanfattning

Syftet med detta arbete är att undersöka om rullande bärighetsmätningar RWD är ett alternativ till fallviktsmätningar FWD i arbetet kring vägbärighet i vägprojekt. Bärighet beskrivs av Trafikverket som ” *Den högsta last, enstaka eller ackumulerad, som kan accepteras med hänsyn till uppkomst av sprickor eller deformationer*”. Det vill säga hur tunga fordon en väg eller en bro kan belastas med samt antal. Det behövs effektiva och säkra metoder för att kunna mäta bärigheten. Då bärigheten av en väg är framförallt viktig för väghållare men även för entreprenörer. Vanligaste sättet att mäta bärigheten är med hjälp av fallviktsmätningar, men det har tillkommit nya mätmetoder som rullande bärighetsmätningar som är både effektivare och trafiksäkrare.

Målet med undersökningen är att se vilken metod som är mer gynnsam vid noggrannhet av mätdata, effektivitet samt den praktiska användningen när vi tittar på både fallvikt och rullandebärighetsmätningar. Båda metoderna har analyserats med hjälp av data från verkliga mätningar, och grundar sig på litteraturstudie av tekniska rapporter och vetenskapliga artiklar. Mätningarna grundar sig i ett testprojekt på ca. 13 km på E4, Arlanda – Glädjen, med datainsamlingar av fallviktsapparat tillsammans med Rambölles verktyg för rullande bärighetsmätningar Raptor (Rapid Pavement Tester).

Resultatet indikerar att fallvikts- och Raptor-mätningarna har likartade tolkningar av styvheten i konstruktionens översta och mellersta del, med undantaget att fallviktsmätningarna hade något högre värden än vad Raptor hade. Större avvikelser förekom vid apparaternas tolkning av styvheten i konstruktionens nedersta del samt undergrunden. Där fallvikten gav detaljerad information av vägens bärighet speciellt vid djupare nivåer av vägkroppen, till skillnad från Raptor mätningarna som inte var lika detaljerade och exakta.

Slutsatsen är att rullande bärighetsmätningar är praktiska och användbara vid översiktliga undersökningar och planeringar av underhåll, men att det inte helt kan ersätta fallviktsmätningar. När vägkroppen ska analyseras, göra detaljerade undersökningar och bedömningar samt utformning av förstärkningar, särskilt vid djupare nivåer är fallvikt fortfarande den mest säkra metoden. Däremot för en hållbar och effektiv väghållning rekommenderas en kombination av både fallvikt och rullande bärighetsmätningar. Särskilt vid mätningar som avser styvheten i konstruktionens övre delar.

Nyckelord: RWD (Rullande bärighetsmätning), Raptor (Rapid Pavement Tester), FWD (Fallviktsmätning), Bärighet, Jämförelsestudie.

Summary

The purpose of this project is to investigate if RWD is an alternative to FWD in analysing road bearing capacity in road projects. According to the Swedish Transport Administration (Trafikverket), the definition of bearing capacity is described as “the maximum load whether single or cumulative, that can be accepted without causing cracking or deformation”. In other words, it refers to how much load a road or bridge can carry. To be able to measure bearing capacity, we need reliable and efficient methods because it is crucial not only to road authorities but also to entrepreneurs. The most common method that is being used is FWD, but throughout the years, new methods, such as RWD, have been developed which seems to be more efficient and a safe alternative.

The main objective of this project is to determine which method, FWD or RWD, is more advantageous in terms of measurement accuracy, efficiency, and practical application.

Both methods have been analysed using data from real-life measurements, and the study is based on technical reports and previous research. The measurements were operated in a test project covering about 13 km on the E4, between Arlanda – Glädjen. The data was collected using an FWD device and Ramboll's RWD tool, Raptor (Rapid Pavement Tester).

The results indicate that both FWD and Raptor provided similar interpretations of stiffness in the upper and middle layers of the road structure, although FWD had higher values than Raptor. In the assessment of stiffness in the lower layers and subgrade – greater discrepancies were observed. FWD measurements gave more detailed information on the road's bearing capacity, especially at deeper levels of the road structure, whereas Raptor measurements were less detailed and less accurate.

The conclusion is that RWD is practical and useful for general investigations and maintenance planning, but it cannot fully replace FWD. When we need to analyse, get into detailed investigations, evaluations, and the design of reinforcement, especially at deeper levels of the road structure, FWD remains the most reliable method. However, for sustainable and efficient road management, a combination of both FWD and RWD is recommended, particularly for measurements targeting the stiffness of the upper layers of the road structure.

Keywords: RWD (Rolling Wheel Deflectometer), Raptor (Rapid Pavement Tester), FWD (Falling Weight Deflectometer), Bearing, Comparative Study.

Begreppsförklaring

Redovisning av beteckningar och benämningar som tillkommer i detta examensarbete. Dessa begrepp och symboler förklaras samt illustreras i Tabell 1 & 2.

Tabell 1: Sammanställning av ingående beteckningar i detta arbete (Trafikverket, 2020).

Beteckningar	
Tecken:	Förklaring:
<i>ABS</i>	<i>Stenrik asfaltbetong.</i>
<i>AG</i>	<i>Asfaltgrus.</i>
<i>BBÖ</i>	<i>Bergbitumenöverbyggnad</i>
<i>BI</i>	<i>Bärförmågeindex</i>
<i>BFK</i>	<i>Bärförmågeklass</i>
<i>BK</i>	<i>Bärighetsklass</i>
D_0	<i>Deflektion i belastningscentrum, mäts i μm.</i>
E_0	<i>Ytmodul, mäts i MPa.</i>
E_u	<i>Undergrundsmodul, mäts i MPa.</i>
f	<i>Faktor som beror på utformningen av belastningsplattan. Det motsvarar 2 för segmenterade belastningsplattor, eventuellt $\frac{\pi}{2}$ gällande styva belastningsplattor.</i>
f_s	<i>Justeringsfaktor med hänsyn till sprickor och krackeleringar.</i>
<i>FWD</i>	<i>Falling Weight Deflectometer.</i>
<i>GBÖ</i>	<i>Grusbitumenöverbyggnad.</i>
<i>MK</i>	<i>Mätklass.</i>
$N_{te,i}$	<i>Beskriver det tillåtna antalet standardaxlar för terrassyta, under klimatperiod (i).</i>
$N_{till,bb}$	<i>Antalet tillåtna standardaxlar för beläggningens bitumenbundna bärlager.</i>
$N_{till,BB,i}$	<i>Tillåtet antal standardaxlar för bitumenbundet bärlager, under klimatperiod (i).</i>
r	<i>Avståndet från den aktuella givaren till belastningscentrum, mäts i mm.</i>
<i>RDI</i>	<i>RAPTOR Deflection Indieces.</i>
<i>RWD</i>	<i>Rullande bärighetsmätning.</i>
T_i	<i>Temperaturen i bitumenbundna beläggningar, mäts i $^{\circ}\text{C}$, under klimatperiod (i).</i>
v	<i>Tvärkontaktionstal.</i>
z	<i>Avstånd (distance)</i>
<i>ÅDT</i>	<i>Årsdygnstrafik, det är ett mått på trafikflödet per dygn vid ett visst vägsnitt, under ett visst år.</i>
$\epsilon_{a,T}$	<i>Dragtöjningen.</i>
$\epsilon_{a,10}$	<i>Temperaturkorrigeringen i horisontell dragtöjning i underkant av beläggningen.</i>
$\epsilon_{bb,i}$	<i>största dragtöjningen (horisontellt) i det bitumenbundna bärlagret, för klimatperiod (i), vid belastningar med en standardaxel på vägytan.</i>
$\epsilon_{te,i}$	<i>största vertikala töjningen i terrassytan, gällande för klimatperiod (i). Detta avseende på belastning med en standardaxel på vägytan.</i>
σ_0	<i>Kontakttrycket under belastningsplattan, mäts i MPa. Plattradie på 150 mm och en belastning på 50 kN ger kontakttrycket 0,7 MPa.</i>

Tabell 2: Sammanställning av benämningar, (Trafikverket, 2020).

Benämningar	
Term:	Förklaring:
<i>Base Curvature Index, (BCI)</i>	<i>Det är ett styvhetsmått, för den centrala delen av vägkonstruktionen. Måttet är till för att beräkna skillnaden mellan D_{300} och D_{600}, dvs. deflektionsavstånden 300 mm samt 600 mm från belastningscentrum.</i>
<i>Base Damage Index, (BDI)</i>	<i>Det är ett styvhetsmått, för den nedre delen av vägkonstruktionen. Måttet är till för att beräkna skillnaden mellan D_{600} och D_{900}, dvs. deflektionsavstånden 600 mm samt 900 mm från belastningscentrum.</i>
<i>Belastningstid</i>	<i>Det är tiden för kraftpulsens som räknas i samband med att kraften stiger till 5 % av sitt maxvärde i samband med pålastning. Detta tills den tid där kraftpulsens antas sjunka till 10 % av sitt avslutande maxvärde.</i>
<i>Beläggning</i>	<i>Det är slit-, bind- eller bärlager som är asfalt- eller cementbitumenbundet.</i>
<i>Bindemedel</i>	<i>Bitumen, bunden cement.</i>
<i>Bärighet</i>	<i>Det är den högsta last, enstaka eller ackumulerad, som kan accepteras med hänsyn till uppkomst av sprickor eller deformationer.</i>
<i>Deflektion</i>	<i>I samband med belastning av en fallviktsapparat, detekteras nederbörden i en vägyta.</i>
<i>Deflektionsbassäng</i>	<i>Uppmätning av vägytans nederbörd i ett belastningscentrum samt i olika punkter som är på olika avstånd.</i>
<i>Deformation</i>	<i>I samband med mekaniska belastningar kan vägen genomgå ändringar i dess form eller volym. Dessa ändringar kan vara återgående eller permanenta.</i>
<i>Dimensioneringsperiod</i>	<i>Vägens livslängd.</i>
<i>Elasticitetsmodul (E-modul)</i>	<i>Det är en parameter som syftar på sambandet mellan spänningen och töjningen av elastiska material.</i>
<i>Elastisk deformation</i>	<i>Reversibel, temporär deformation.</i>
<i>Fallviktsapparat</i>	<i>Det är en apparat, till för att mäta deflektionen på vägens yta. Detta genom att själva vägen belastas med en last som motsvarar ett lastbilshjul.</i>
<i>Geofoner</i>	<i>Det är ett mättningsverktyg som detekterar genom laser/vibrationer den elastiska spänningen av ett material. I detta fall är geofonerna fjädermonterade i fallviktsapparat med avstånd emellan respektive, för att detektera deflektionen av vägen.</i>
<i>Homogent material</i>	<i>Det är ett eller kombination av flera material som är av fullständigt likartade egenskaper.</i>
<i>Hållfastighet</i>	<i>Det är ett begrepp kopplat till hur olika material kan motstå olika laster, avseende på dess förmåga.</i>
<i>Isotrop ämne/material</i>	<i>Det är ett material med samma egenskaper i alla riktningar.</i>
<i>Medelvärde</i>	<i>Summan av ett antal värden som sedan divideras med själva antalet av samtliga värden.</i>
<i>Mätklass (MK)</i>	<i>Det bygger på likartad omfattning av mätningar. I detta fall är det fördefinierade mätklasser som gäller i samband av beställning av fallviktsmätningar.</i>
<i>Mätresultat</i>	<i>Det avser resultat av mätetal och måttenhet. Genom kalibrering kan olika mätvärden korrigeras, detta för att uppskatta eventuella systematiska fel.</i>

<i>Passningsräkning</i>	<i>Det är en metod till för att beräkna undergrundens E-moduler, samtidigt som vägkonstruktionens olika lager. Detta med hjälp av deflektionsdatamätningar. Därav görs jämförelser av de uppmätta nedsjunkningarna som uppfattas vid själva beräkningen.</i>
<i>Plastisk deformation</i>	<i>Permanent deformation.</i>
<i>Raptor</i>	<i>Rapid Pavement Tester.</i>
<i>Standardavvikelse</i>	<i>Ett på observerade iakttaga variationer av olika serier. Det kan hanteras enligt följande formel:</i> $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ <i>s = standardavvikelse</i> <i>x_i = mätvärdet (i= antalet observationer t.ex. 1,2, 3,..., n).</i> <i>x = det aritmetriska medelvärdet.</i>
<i>Standardaxel</i>	<i>Det är en förtecknad fordonsaxel, till för att efterlikna belastningarna som tillkommer från tunga fordon. Med en omvandlingsfaktor kan fordonslasten av en lastbil överförs till ett antal standardaxlar med avseende på fordonets axellast och axelkonfiguration.</i>
<i>Surface Curvature Index, (SCI)</i>	<i>Det är ett styvhetsmått, för den övre delen av vägkonstruktionen. Måttet är till för att beräkna skillnaden mellan D₀ och D₃₀₀, dvs. deflektionen från 300 mm till belastningscentrum.</i>
<i>Terrassyta</i>	<i>Det avser den yta som undergrund till överbyggnaden. Terrassen ska jämnas ut för att få ett jämnt tvärfall som går sedan att efterlikna hur den belagda vägen kommer att se ut. Det är av jord- och bergmassor som befinner sig mellan överbyggnaden och undergrunden.</i>
<i>Tjällossning</i>	<i>Vid tjällossningsfasen tinar vatten som befinner sig inom väggroppen, då det återgår från frusen is till vätska. Därav leder det till överskott av vatten i vägkonstruktionen.</i>
<i>Tunga fordon</i>	<i>Det är fordon som är avsedda med en bruttovikt som är över 3,5 ton, t.ex. lastbilar.</i>
<i>Tvärkontraktionstal</i>	<i>Ett dimensionslöst tal (Poissons tal) till för att beskriva eventuella förändringar i samband med belastning. Det avses som förhållandet mellan töjningen både tvärs och längs kraftriktningen.</i>
<i>Töjning</i>	<i>Det är en dimensionslös storhet som kopplas till deformationen av olika slags material. Om töjningen visar positiva värden råder dragtöjning av material, om det är negativt värde betyder det trycktöjning, dvs. materialet ihop trycks. Töjning anges i mm/m eller μ – stain.</i>
<i>Undergrundsmodul</i>	<i>Det är mått som indikerar styvheten i undergrunden.</i>
<i>Utmattning</i>	<i>Tillkommer då vägen utsetts för många repeterande belastningar och är beroende av lasternas storlek samt antal.</i>
<i>Vägkonstruktion</i>	<i>Det begriper de ingående delarna som väggroppen, undergrunden, diken, slänter samt väg- och avvattningsanordningar.</i>
<i>Väggropp</i>	<i>Det är hela överbyggnaden av vägen, dvs vägen inklusive all dess lager.</i>
<i>Ymodul</i>	<i>Det är ett mått som indikerar styvheten i konstruktionen från ytan och nedåt. Detta råder om vägöverbyggnadens undre lager är av homogena-, isotropa-, och linjärelastiska lagermaterial</i>
<i>Överbyggnad</i>	<i>Det är den byggda delen av vägkonstruktionen som befinner sig över terrassen.</i>

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och mål	2
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Rapport disposition	3
2 Metod & metodbeskrivning.....	4
2.1 Val av metod.....	4
2.2 Litteraturstudie.....	4
2.3 Jämförelsestudie	5
2.4 Datainsamling & databearbetning	5
3 Litteraturstudie	6
3.1 Bärighet	6
3.1.1 Bärighetsmått	6
3.1.2 Bärighetsklasser	7
3.1.3 Faktorer som påverkar vägens bärighet	8
3.1.3.1 <i>Klimatpåverkan</i>	<i>8</i>
3.1.3.2 <i>Temperaturpåverkan.....</i>	<i>8</i>
3.1.4 Sprickor & olika typer av deformationer	13
3.2 Fallviktsmätning.....	16
3.2.1 Beskrivning av fallviktsapparat	16
3.2.2 Påverkande krafter och belastningar	19
3.2.3 Kalibrering & kontroll	22
3.2.4 Mätningens omfattning	23
3.2.4.1 <i>Mätningssklass</i>	<i>23</i>
3.3 Rullande bärighetsmätningar (RWD).....	25
3.3.1 Beskrivning av Raptor (Rapid Pavement Tester)	27
3.3.2 Raptor systemhantering	29
3.3.3 Jämförelse mellan FWD och Raptor	32
3.3.3.1 <i>Fältexperiment 1</i>	<i>32</i>
3.3.3.2 <i>Fältexperiment 2</i>	<i>34</i>
3.4 Analys och bearbetning av deflektionsdata.....	36
3.4.1 Granskning/uteslutning av data	36
3.4.2 Bärighetsmått enkla beräkningar	37
3.4.3 Bärförmågeklass & bärförmågeindex, BI	39
3.4.3.1 <i>Tvärkontraktionstal.....</i>	<i>43</i>
3.4.4 Olika klasser av analyspaket	43
4 Resultat	44
4.1 Undersökningsområden.....	44
4.1.1 Projektmätning Arlanda-Glädjen (79 500 – 92 470 m)	44
4.1.1.1 <i>Deflektion D0 – D6.....</i>	<i>46</i>

4.1.1.2 Deformationsbassängsparametrar.....	49
4.1.1.3 Ytmodul & Undergrundsmodul.....	53
4.1.1.4 Bärförmågeindex, <i>BI</i>	56
5 Diskussion.....	58
5.1 Metoddiskussion	59
5.2 Resultatdiskussion.....	62
6 Slutsats och framtida studier.....	66
6.1 Slutsatser	66
6.2 Framtida studier	67
Litteraturförteckning.....	69
7 Bilagor	71
7.1 Bilaga 1.....	71
7.2 Bilaga 2.....	73
7.3 Bilaga 3.....	76
7.4 Bilaga 4.....	77

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Det är viktigt att veta hur mycket belastning en väg tål, hur beständig den är, vilka förstärkningar som kan behövas och vilken årsdygnstrafik (ÅDT) den klarar av. Svar på sådana frågor kan man få genom att utföra bärighetsmätningar. Bärighet av en väg kan vara ett svårtolkat begrepp. En vägs bärighet beskriver vägens förmåga att klara av tunga laster från trafiken. Dålig bärighet av en väg kan leda till att förstärkningsåtgärder behöver utföras mer frekvent alternativt att flytta trafiken över på vägar med bättre bärighet (Agardh. S, Parhamifar. E, 2014). Därav är information om vägens bärighet användbar för väghållare och utförare, för att bättre kunna planera underhåll av vägar. Därför krävs det tillförlitliga metoder och instrument som uppskattar bärigheten av en väg och dess tillstånd.

Det vanligaste sättet att mäta vägars bärighet är med fallviktsmätning (FWD), en metod som kan användas för alla vägunderlag. Fallviktsmätningar ger besked om vägens tillstånd och styrka i förhållande till den trafik den prognostiseras att utsättas för samt eventuellt behov av förstärkningar. Fallviktsmätningar är en tidskrävande och kostsam metod. Mätfordonet måste vara helt stilla under arbetet, då kan det behövas avstängning av vägen, säkerhetsanordningar för personalen och omledning av trafiken. Trots att det är tidskrävande i praktiken så är det även tidskrävande vid hantering av all mätdata som samlas in. Metodens mätvärden bygger på enskilda slag där bärigheten genom deformation på vägen kan beräknas. Det ger en bild av hur vägen beter sig endast under den punkt som mätningen utförs på, vilket i regel brukar vara var 50:e meter. Därför krävs en ständig effektivisering av mätmetoden för att sänka tidsåtgången och öka trafiksäkerheten och även för att öka tillförlitligheten i utvunnen data genom att få information över hela vägsträckan och inte bara under belastningspunkten.

På senare tid har möjligheter att samla information genom rullande bärighetsmätningar (RWD) tillkommit och mötts med växande intresse. Metoden anses vara snabb, där den kan mäta bärigheten kontinuerligt och samla in mätdata under färdens gång, i trafikhastighet. Apparaten skannar större områden, vilket antas vara tidseffektivt. Dessutom kan rullande bärighetsmätningar hantera mätdata snabbt som i sin tur främjar trafiksäkerheten genom heltäckande, tillförlitliga kalkyler (Ramboll RST, 2020).

1.2 Syfte och mål

Detta examensarbete har två sammanställda huvudsakliga syften:

- Analysera bärighetsmätningar som har utförts på E4, Arlanda – Glädjen och ge en bedömning och utvärdering av resultaten från både fallviktsmätningar och rullandebärighetsmätningar.
- Undersöka hur bärighetsdata från fallviktsmätningar (FWD) förhåller sig i relation till rullande bärighetsmätningar (RWD).

Det övergripande målet är att kunna dra slutsats om rullande bärighetsmätningar kan ersätta fallviktsmätningar i vägprojekt.

1.3 Avgränsningar

Examensarbetets fokus har riktats mot ett testprojekt på en sträcka som motsvarar ca. 13 km, väg E4 mellan Arlanda och Glädjen, med startsektion 79 500 och slutsektion 92 470, hämtad av PMSv4. Sträckan är uppbyggd av ABS-beläggning (stenrik asfaltbetong) och en styv konstruktion för att kunna motstå en hög trafikbelastning. Mätningarna på sträckan utfördes med både fallvikt och Raptor i slutet av våren 2022. Dessa mätningar har analyserats i detta projekt i form av en jämförelsestudie mellan fallvikt och Raptor. Övriga väginfrastrukturer eller trafikmiljöer hanteras inte i detta projekt.

1.4 Rapport disposition

I detta avsnitt presenteras samtliga kapitel inom detta examensarbete. Projektets upplägg redovisas i punktform enligt nedan:

- Kapitel 1 Inledning:
I detta kapitel introduceras bakgrunden av projektet, dess syfte och mål, eventuella avgränsningar samt dispositionen.
- Kapitel 2 Metod:
Här redogörs en djupgående presentation av valet av metoden med utgångspunkter som hantering av litteraturstudien, jämförelseanalysen samt datahanteringen.
- Kapitel 3 Litteraturstudie:
Här beskrivs vad bärigheten är och hur bärighetsmätningar av vägkonstruktioner bearbetas. Information om hur fallvikts- och rullande bärighetsmätningar går till. Dessutom redovisas bärighetsmått och parametrar med beräkningsförslag på samtliga mätmetoder.
- Kapitel 4 Resultat:
Här jämförs en del objekt (projekt) där mätningar från både FWD samt Raptor (RWD) jämförs med varandra. Detta med hjälp av tydliga diagram, tabeller samt beräkningar, till för att kunna analysera mätmetoderna tillförlitligt.
- Kapitel 5 Diskussion:
Här diskuteras resultaten av studien samt valet av metoden som har används.
- Kapitel 6 Slutsats:
Detta avsnitt besvarar målet med detta examensarbete samt presenterar en lista på framtida studier som kan vara relevanta för att bygga på detta arbete.
- Kapitel 7 Referenser:
Detta avsnitt avser samtliga källor som har använts för att forma denna undersökning.
- Kapitel 8 Bilagor:
Redovisar större diagram, relaterat till resultatet av detta arbete.

2 Metod & metodbeskrivning

2.1 Val av metod

Kunskapen i detta examensarbete grundar sig på pålitliga källor. Framförallt vetenskapliga artiklar samt dokument för att få så relevant, framstående och djupgående fakta som möjligt. Trafikverkets senaste uppdateringar av kravdokument som har varit grundläggande i detta examensarbete, avseende på deflektionsmätningar och provbelastningar. Papers från senaste BCRRA-konferensen (*Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*) har varit en viktig källa i detta arbete för att få med den innovativa och uppdaterade informationen från workshoprepresentationer. Samtlig inhämtad information i detta arbetet har valts i samband med handledare för att säkerställa den konkreta litteraturens pålitlighet. Dessutom baseras detta examensarbetet på (Paulsson, 2020) som lyfter fram hur uppsatser/rapporter för studentlitteratur bör anpassas efter, samt (Bryman, 2018) som visar vikten av att följa samt belysa olika samhällsvetenskapliga metoder.

2.2 Litteraturstudie

Vid sammanställning av litteraturen har vetenskapliga källor med relevant information för detta projekt används. Detta med avseende på att informationen ska stämma överens med utgångspunkten i arbetet samt dess mål, nämligen att dra slutsatser om en framtida användning av rullande bärighetsmätningar.

Därav har inhämtat material i projektet baserats på kurslitteratur och rapporter framställda av medverkande, pålitliga aktörer inom branschen. Till hjälp användes sökmotorer som Google, Google Scholar, LUBcat och vetenskapliga dokumentationer som pålitliga databaser för tillgängligt akademiskt underlag. Dessutom har tredjepartskällor använts med hjälp av sökmotorerna för att dels skapa ett djup i litteraturstudien men även se hur väl informationen överensstämmer i de olika kanalerna.

2.3 Jämförelsestudie

Denna jämförelsestudie baserar sig på mätningar med Rambölls, Raptor samt fallviktsmätningar som utfördes parallellt på en sträcka motsvarande 12,9 km på E4, Arlanda – Glädjen i Sverige. Med Raptor som mäter kontinuerligt har mätningarna längs sträckan sammanställts med medelvärden över 10 meters avstånd, medan fallviktsmätningarna utfördes ca. var 200 meter. I denna studie har Raptor- mätningarna gjorts om från att ange ett medelvärde på var 10:de meter till ett samlat approximativt värde på var 200:de meter. Detta för att efterlikna fallviktsmätningar för att sedan jämföras, med utgångspunkt i *Analyspaket 2* (Trafikverket, 2020). Analyspaketet innehåller bärighetsmåten Surface Curvature Index (SCI), Base Curvature Index (BCI), Base Damage Index (BDI), ytmodul, undergrundsmodul, dragtöjningar samt bärförmågeindex (BI). Mer om jämförelsestudien finns under *Kapitel 4. Resultat*.

2.4 Datainsamling & databearbetning

Bärighetsmätningar har utvecklats under lång tid. Därav finns mycket litteratur samt sekundärdata (datainsamlingar) tillgängligt. Mycket av metoden i detta projekt baseras på tillgängliga dokument och datainsamlingar. Därför valdes just denna metod, då tack vare de befintliga dokumenten blir arbetet både tids- och kostnadseffektivt (Paulsson, 2020). Datamätningarna med fallvikt och Raptor är befintliga, då de har utförts sedan tidigare av Ramböll RST. Detta tillsammans med tillgängliga dokumentationer från Trafikverket om krav och riktlinjer på analys av bärighet och olika bärighetsmått, samt tidigare utförda litteratur- och forskningsstudier om fallviktsmätningar kontra rullande bärighetsmätningar. Mätningarna som har utförts av Ramböll RST har analyserats och behandlas i detta projekt, för att undersöka eventuella samband mellan fallvikt och Raptor (rullande bärighetsmätningar).

3 Litteraturstudie

Detta kapitel bygger på en litteratursökning av information med relevans samt ger en inblick på granskningen av detta vetenskapliga arbetet. Detta för att stärka arbetet med grundläggande information om vad bärigheten är och hur det bearbetas samt information om hur fallvikts- och rullande bärighetsmätningar går till. Denna litteraturstudie syftar på att ge samtliga läsare en god och grundläggande kunskap som är till för allmän tillämpning.

3.1 Bärighet

Bärighet är ett begrepp som beskriver vägens förmåga av hur pass tunga trafiklaster den klarar av. Begreppet bärighet definieras av (Trafikverket, 2020) som ” *Den högsta last, enstaka eller ackumulerad, som kan accepteras med hänsyn till uppkomst av sprickor eller deflektioner*”. Det är svårt att framställa den absoluta verkliga bärigheten av en väg. Då vägens bärighet påverkas av vädret som skiftar ständigt (temperatur och luftfuktighet). Normalt tenderar inte en väg att ”gå sönder”, utan den brys ned långsamt. Därför går det inte att bestämma den maximala lasten som vägen kan klara av. Det är inte bara lasten som har betydelse, utan även antalet laster (Agardh & Parhamifar 2014).

3.1.1 Bärighetsmått

Bärighetsmått syftar på att beskriva vägens bärförmåga. Det vanligaste sättet att mäta vägens bärighet är genom att utföra deflektionsmätningar under känd belastning (Agardh & Parhamifar 2014). Genom detta kan flera olika metoder av bärighetsmått beräknas. I denna rapport har enkla centrala bärighetsmått använts och beräknats med formler. Dessa mått avser deflektionsmätningar, SCI, BCI, BDI, moduler som yt- och undergrundsmodul, bärförmågeindex och bärförmågeklass, mer om detta redogörs i avsnitt 3.5 *Analys och bearbetning av deflektionsdata*.

Bärighetsmåten delas in i två kategorier, *empiriska metoder* och *analytiska metoder*. De empiriska metoderna baseras på rena mätningar, som är statistiska metoder av utförda vägtester, dessutom kan mätningarna göras under olika laster, och jämförs med varandra (Lundberg, 2020). De analytiska metoderna (centrala bärighetsmått), kan de betraktas som någon form av viktat medelvärde av elasticitetsmodulerna för överbyggnaders olika materiallager, inklusive undergrunden (Agardh & Parhamifar 2014).

3.1.2 Bärighetsklasser

Bärigheten av vägkonstruktioner delas in i klasser. Dessa bärighetsklasser är BK1, BK2, BK3 samt BK4, och är juridiska klasser som är till för att fastställa de tillåtna fordonslaster som beläggningen kan klara, dvs. har egentligen inget med uppmätt bärighet att göra. Följande klasser redovisas nedan i punktform, (Taner & Ericson 2021):

- **BK1:** Tillåter en maximal bruttovikt på 64 ton,
- **BK2:** Tillåter en maximal bruttovikt på 51,4 ton,
- **BK3:** Tillåter en maximal bruttovikt på 37,5 ton,
- **BK4:** Tillåter en maximal bruttovikt på 74 ton.

För allmänna vägar gäller bärighetsklass 1, detta med avseende på enskilda vägar. BK1 har sedan tidigare förknippats med högsta bärighetsförmågan, vidare medföljer resterande klasserna BK2 och BK3 (Länsstyrelsen Skåne , 2022). Bärighetsklass 4 infördes för effektivisering av tyngre laster, som bland annat godsstransport som kräver normaltvis tyngre fordon. BK4 tillåter en tungtrafik med högsta möjliga bruttovikt på 74 ton. Det var tänkt att ca. 64 % av det statliga strategiska vägnätet vara öppnat för BK4, redan vid slutet av 2024 och resultatet blev 66 %. Det förväntas även att implementeringsplanen ska vara ca 71 % vid slutet av 2027 (Trafikverket, 2025). Detta för att bibehålla Trafikverkets riktlinjer om att etablera 70-80 % av vägnätet för BK4 fram till 2029, som anses vara mer lämpligt för tungtrafiken. Detta med avseende på att ersätta hela BK1 vägnätet mot BK4 (Trafikverket, 2022). Tillåtna värden på axeltryck och boggitryck presenteras i Tabell 3.

Tabell 3: Visar en sammanställning av axel-, boggi-, och trippeltryck samt bruttovikt av fordon och fordonståg, enligt (Länsstyrelsen Skåne , 2022).

Axeltryck, anges i [ton]	BK1	BK2	BK3	BK4
Ej drivande axel	10	10	8	10
Drivande axel	11,5	10	8	11,5
Boggitryck, anges i [ton]				
Avstånd mellan axlarna < 10 m	11,5	11,5	11,5	11,5
Avstånd mellan axlarna $\geq 1,0$ m, men $\leq 1,3$ m	16	16	12	16
Avstånd mellan axlarna $\geq 1,3$ m, men $\leq 1,8$ m	18	16	12	18
Avstånd mellan axlarna $\geq 1,3$, men $\leq 1,8$ m. Drivaxel med dubbelmonterade hjul och luftfjädrinf eller likvärdig fjädring, alt. Drivaxlar med dubbelmonterade hjul där vikten ej översiger 9,5 ton på axlarna.	19	16	12	19
Avståndet mellan axlarna är $\geq 1,8$ m	20	16	12	20

3.1.3 Faktorer som påverkar vägens bärighet

Som tidigare nämnt i avsnitt 3.1 tenderar vägarna att brytas ned långsamt. Detta då bärigheten avses att försämrans p.g.a. skiftande väderförutsättningar och även luftfuktighet. Dessa påverkande effekter lyfts fram i detta avsnitt för att ge en bättre förståelse om vägens bärighet.

3.1.3.1 Klimatpåverkan

Väder tenderar att förändras ständigt. Detta kan leda till påverkande effekter som uppstår på vägen när klimatet förändras. Sådana effekter kan förekomma p.g.a. kortare perioder av frusna vägar. Detta anses påverka vägens bärighet och leda den till sämre förhållanden. Klimatet har en stor påverkan på hur materialet i vägkonstruktionerna beter sig, vid klimatförändring ändras tillståndet i vägkonstruktionen. Den största inverkan av materialbeteendet vid klimatförändringar är temperatur och fukt. Förändringen förväntas att ändra på vägens dimensionering men även dess tillståndsutveckling. Detta beaktas som ett komplext samspel som kan bygga på många olika faktorer, t.ex. kan temperaturhöjningen generellt öka möjligheten till spårbildning i de asfaltsbundna delarna av vägkonstruktionen, men samtidigt minskar frysningseffekten, då det inte uppstår temperatursprickor (Sulejmani & Agardh 2021).

3.1.3.2 Temperaturpåverkan

Temperaturen har en effekt på beteendet av de bitumenbundna lagren. Detta gäller i första hand på deformationsegenskaperna, så som spårbildning, men även utmattningsegenskaper och beständighet som t.ex. stensläpp av vägkonstruktionsmaterial. De bitumenbundna lagrens egenskaper förändras även över tid, där höga temperaturer beaktas som en påverkande faktor till vägens åldringsprocess, likväl luftfuktigheten och vatten. Det kan även vara bra att notera dubbdäckslitage, som också påverkar vägytan. Detta då den är beroende av vägytans fuktighet, då nötning på slitlagret är betydligt större vid vått väglag än vid ett torrt (Sulejmani & Agardh 2021). Detta visas i Tabell 4, som ger en överblick om hur klimatförändringar påverkar de asfaltsbundna lagren av en vägkonstruktion.

Tabell 4: Sammanställning av klimatförändringens påverkande effekt på bitumenbundna lagren av väggkroppen, inspirerad av (Sulejmani & Agardh 2021).

Klimatparametrar:	Effekter:
Ökad nederbörd	Beständigheten minskar genom att accelerera åldringsförloppet, samtidigt som stensläpp och dubbdäcksavnötning ökas.
Värmare somrar	Den ökade spårbildningen leder till bättre läkning av mikrosprickor i väggkroppen.
Mildare vintrar	Minskad risk för lågtemperatursprickor, vilket leder till en lägre utmattningshållfasthet.
Ökat antal tjällossningsperioder per vinter	Leder till ökad risk för sprickor samt slaghål.
Flera frys- och töcykler	Försämrar väggkonstruktionens beständighet, vilket kan leda till ökad stensläpp, slaghål och dubbdäcksavnötning.

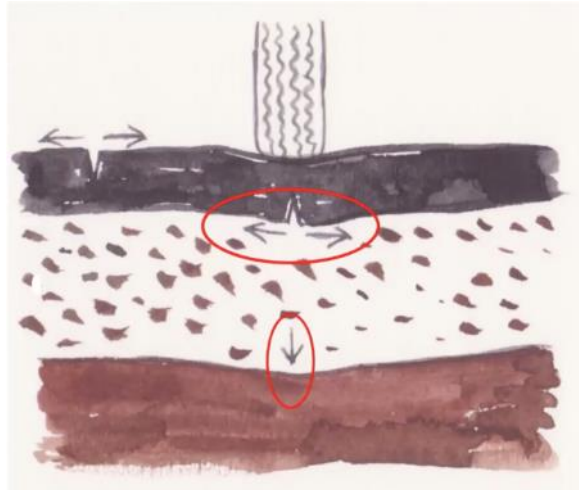
Temperaturen betraktas att ha en liten påverkande effekt på de obundna lagren. Dock så är materialets styvhet och dess deformationsegenskaper i den obundna lagern väldigt beroende av fukt. Dessutom kan fukt i kombination med temperatur, t.ex. frysning och tjällossning ha en inverkan på beteendet av de obundna lagren (Sulejmani & Agardh 2021).

Sammanställning enligt Tabell 5 visar hur de obundna lagren påverkas med avseende på klimatförändring.

Tabell 5: Sammanställning av klimatförändringens påverkande effekt på obundna lager - förstärkningslager, inspirerad av (Sulejmani & Agardh 2021).

Klimatparametrar:	Effekter:
Ökad nederbörd	Detta kan minska på bärigheten, vilket i sin tur ökar risken för permanenta deformationer.
Varmare somrar	Liten påverkande effekt, betraktas väldigt lindrig (nästintill ingen effekt).
Mildare vintrar	Den minskar på den påverkande effekten av frost, dock så blir tjällossningsperioden längre.
Ökat antal tjällossningsperioder per vinter	Flertal perioder där bärigheten är låg, löper större risk för permanenta deformationer.
Flera frys- och töcykler	Detta kan göra omlagring av stenpartiklar i bärlagret, då kan risken för tillkomst av permanenta deformationer öka. Effekten betraktas att vara lindrig (liten) i förstärkningslagret.

Innan en vägkonstruktion ska dimensioneras och byggas ska samtliga material i vägen bestämmas inklusive dess lagertjocklek. Vanligtvis utförs detta med avseende på två kriterier. Det ena är dragtöjningen i underkant av asfaltsbeläggningen och det andra är tryckspänningen, eller töjningen i ovkant av terrassen. Fokus kommer riktas i detta fall mot det första kriteriet, töjningen i underkant av asfalt, se Figur 1. Detta mot bakgrunden av att det är ett kriterium avseende sprickor i hjulspåren.



Figur 1: Visar den kritiska punkten avseende på töjning i underkant, där sprickor tillkommer i asfalten, hämtad av (Sulejmani & Agardh 2021), ritad av Rebecka Svensäter.

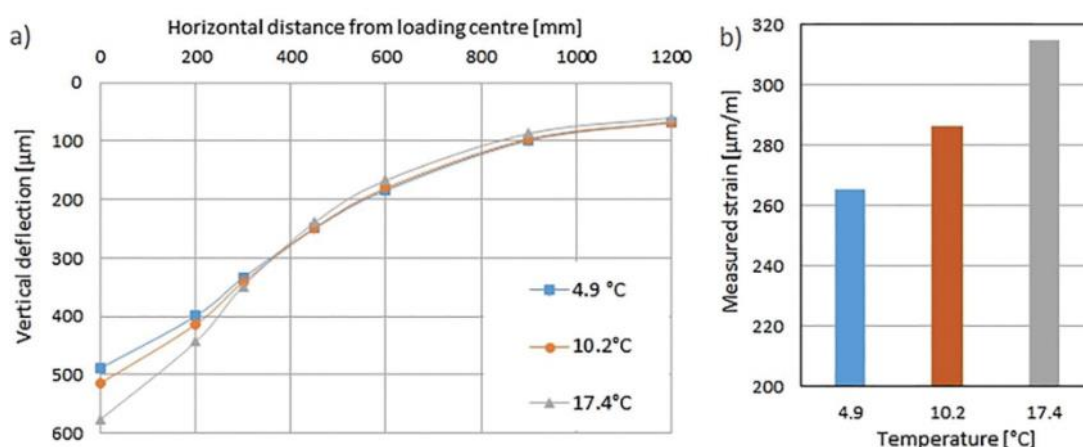
Töjningens utbredning betraktas att bero särskilt på asfaltens temperatur, men även på stödet som den får av de underliggande lagren. Detta då asfalten blir mer viskös vid varma temperaturförhållanden, vilket leder till att töjningen blir större. Dessutom när det tillkommer vatten i de underliggande lagren så förväntas det leda till en minskning av friktionen mellan stenmaterialen, vilket då leder till töjning p.g.a. bristande stöd från beläggningens underliggande lager (Sulejmani & Agardh 2021).

Tillståndsbedömningar av beläggningar kan göras genom fallviktsmätningar, mer om detta beskrivs under avsnitt 3.2. Detta där en vikt på 50 kN släpps med avseende på att detektera deflektionen i beläggningen, både under- och vid sidan av lasten. Detta där den ska simulera lasten av ett standardaxel-hjul (Sulejmani & Agardh 2021). I en studie utförd av (Sulejmani, Said, Agardh & Ahmed 2021) har tre konstruktioner dimensionerats samt byggts med avseende på att mäta den riktiga töjningen i underkant av en vägbeläggning. De tre olika konstruktionerna är SE14, vilket motsvarar den tjocka konstruktionen, SE18 som är mellankonstruktionen med 197 mm asfalt samt SE20 som är den tunna konstruktionen. Enligt studien har dessa tre konstruktioner utrustats med töjnings- och temperaturgivare. Detta för att mäta temperaturen i asfalten, fuktsensorer samt fuktsensorer för att mäta polymetriska vattenhalt i terrassen. Det utfördes fallviktsmätningar vid olika temperaturer, grundvattennivåer samt polymetriska vattenhalt för samtliga konstruktioner, se Tabell 6.

Tabell 6: Visar sammanställt data av utförda fallviktsmätningar för samtliga testkonstruktioner. Detta med avseende på olika temperaturer, GWT och polymerisk vattenhalt, sammanställt av (Sulejmani et al. 2021).

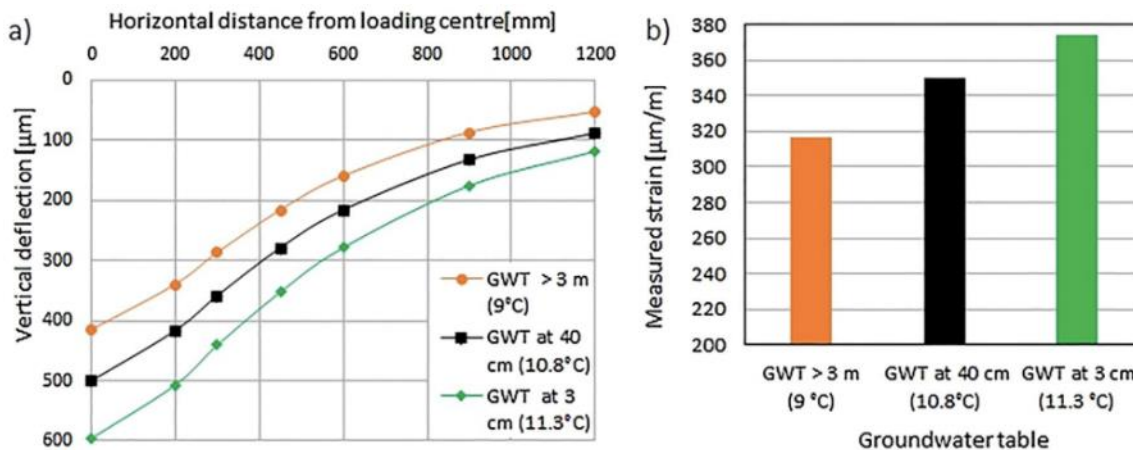
Environmental Conditions	SE 14					SE 18			SE 20	
Temperature [°C]	5.5	9.0	18.5	10.8	11.3	4.9	10.3	17.4	0.9	6.6
GWT (below subgrade surface) [cm]	>300	>300	>300	40	3	>300	>300	>300	>300	>300
Volumetric water content (22,5 cm below subgrade surface) [%]	8.2	8.3	8.3	20.9	30.1	16.6	16.1	16.0	8.0	8.0

I studien varierades grundvattennivån (GWT) som hamnar på ett stort djup >3m i fall 1. I fall 2 varierades grundvattennivån när den befinner sig 40 cm under terrassen, då dränering av vägen ska ligga minst 30 cm från terrassytan, samt i fall 3 när grundvattnet befinner sig precis 3 cm under terrassytan, därav efterlikna när dräneringen i beläggningen brister (Sulejmani et al. 2021). Gällande temperaturens inverkan på den inre deflektionen samt töjningen, betraktas en påverkan på de inre geofonerna. Där med högre temperaturförhållanden förväntas det att förekomma större deflektion i beläggningen. Däremot så påverkas inte de yttre geofonerna lika mycket som de inre gör. Detta beror främst på att deflektioner visar mer på de obundna lagren som inte påverkas särskilt mycket av temperaturen, se Figur 2 (a). Även töjningen i underkant av asfalten visar en ökning på spänningen, detta i samband med ökad temperatur, se Figur 2 (b) (Sulejmani et al. 2021).



Figur 2: (a) visar en deflektionsbassäng av fallviktsmätningar, detta avseende på en normal överbyggnad. (b) visar den uppmätta töjningen i underkant av asfalten, hämtad av (Sulejmani et al. 2021).

Fukt betraktas att påverka samtliga geofoner till skillnad från temperatur. Detta då linjerna enligt Figur 3 (a) inte är sammanfogade. Detta tillkommer p.g.a. ju närmre grundvattennivån befinner sig terrassytan, desto mer nedsjunkningar förekommer av samtliga geofoner. Detta indikerar att fukt har en inverkan på samtliga lager i en vägöverbyggnad. Detta gäller även om det råder om att vattnet berör endast terrassytan. Dessutom så betraktas töjningen i underkant asfalt att ha en ökning, avseende på förhöjt grundvattennivå, se Figur 3 (b) (Sulejmani et al. 2021).



Figur 3: (a) visar fallviktsmätningar avseende på fukt, där temperaturen i grundvattennivån är 10°C. (b) uppmätt horisontal töjning i botten av de bundna asfaltslagren, hämtad av (Sulejmani et al. 2021).

Vid undersökningen togs det fram formler för beräkning av töjningen i underkant av asfalt. Detta grundas på regressionsanalys, där en beroende variabel samt en oberoende variabel togs fram. Den beroende variabeln avser töjningen i underkant asfalt, samt den oberoende variabeln inriktar sig på deflektioner, volumetrisk vattenhalt på 22,5 cm under terrassytan och asfaltens temperatur. Studien indikerar att vid användning av fukt som en variabel, kan tydligare beräkningar genomföras om förhållandet i vägkonstruktionen. Därav har följande ekvationer tagits fram (Sulejmani et al. 2021):

$$\varepsilon_{ac} = 199,25 + 5,31 \cdot T - 5,50 \cdot v + 0,69 \cdot D_0 - 1,62 \cdot D_{300} + 3,39 \cdot D_{900}$$

$$\varepsilon_{ac} = 298,01 + 3,05 \cdot T + 1,03 \cdot D_0 - 2,43 \cdot D_{300} + 2,87 \cdot D_{900}$$

Beskrivning av samtliga beteckningar i samtliga ekvationer:

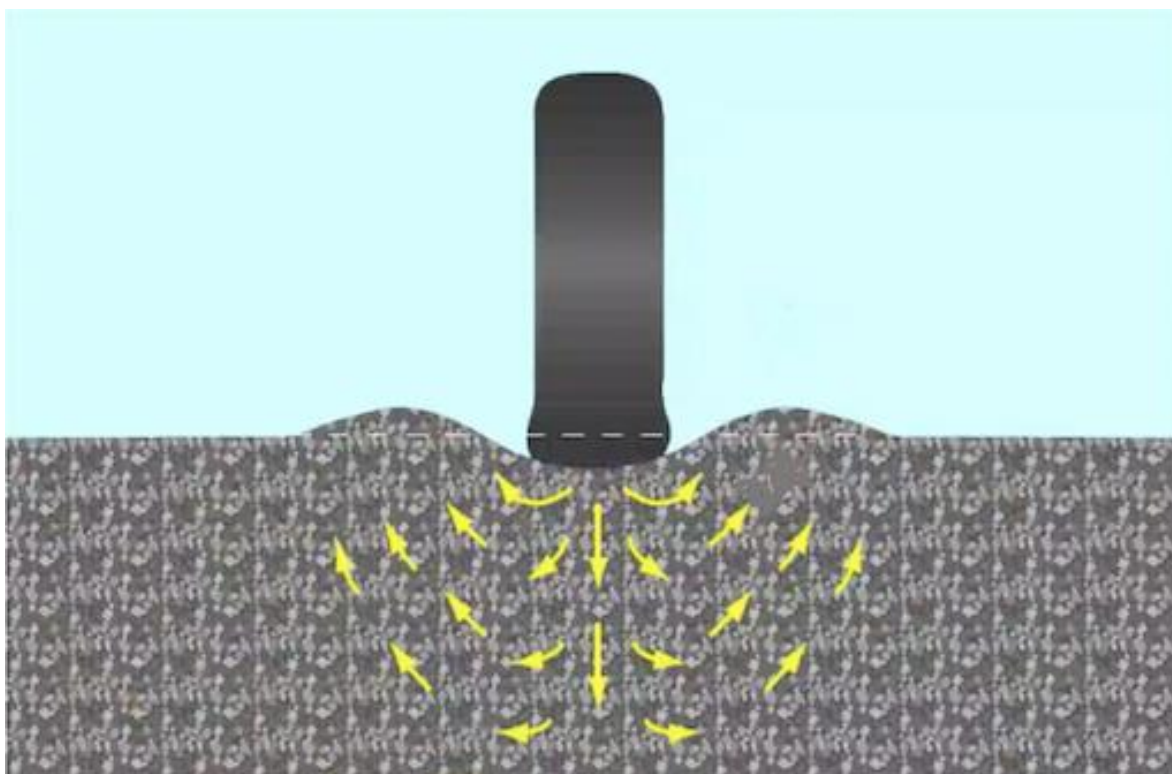
- ε_{ac} = Töjningen i underkant av asfalt, mäts i $\mu m/m$,
- T = temperatur, °C,
- v = volumetrisk vattenhalt 22,5 cm, under terrassen, %,
- D_0 = deflektionen med avstånd från belastningscentrum, 0, mäts i μm ,

- D_{300} = deflektionen med avstånd från belastningscentrum, 0, mäts i μm ,
- D_{900} = deflektionen med avstånd från belastningscentrum, 0, mäts i μm .

Masterkurvorna som presenterades i Figur 2 & 3 beskriver egentligen asfaltens styvhet som en funktion av både temperatur och frekvens. Där ju högre temperatur vi har desto högre styvhet finns i asfalten. Därav kan frekvens ersättas med belastningstid, och temperatur som då hänger ihop. Detta bidrar till en effekt, där bindemedel vid höga temperaturer blir väldigt mjukt och kan tappa sin bindande förmåga och fungerar mer snarare som ett smörjmedel. Därav förväntas att asfalten vid höga temperaturer att ha sämre hållfastighet i samband med tillsättning av mer bindemedel (Agardh, 2021).

3.1.4 Sprickor & olika typer av deformationer

Skador i asfalten kan inträffa normaltvis på två sätt, sprickor eller deformationer. Sprickor tenderar avseende på belastning att spridas i underkanten av asfalten. Dessutom så kan sprickor tillkomma p.g.a. det varierande temperaturförhållandet och klimatet. Där hela asfalten kan krympas eller utvidgas, vilket leder till sprickor. Sprickor kan även inträffa i ovankant, bredvid hjulspåret. Dock så betraktas de belastningsberoende sprickorna i underkanten mer vanligare. Den vanligaste faktorn till sprickors uppkomst är utmattning av vägen, där flera belastningar som förekommer på vägkroppen, höjs risken av att sprickor tillkommer. Den andra typen av skador i asfalten är deformationer, som är med andra ord spårbildningar. Detta är vanligt förekommande i samband med att asfalten packas (gäller för spårbildning längre ner i de obundna lagren) och trycks ihop. Deformationer som är i relation till asfalten trycks ned från den belastade ytan, sedan ut p.g.a. däckslasten, se Figur 10. Spårbildningen förekommer p.g.a. antingen låga belastningstider eller låga hastigheter (Agardh, 2021). Det finns tre övervägande faktorer som har en påverkan till uppkomsten av spårbildningar. Det ena är materialets densitet, dvs. dess packningsgrad. Den andra faktorn är den påverkande trafikens last. Den tredje är klimat- och miljöomständigheter som temperaturen och luftfuktigheten (Tarefder & Zaman 2003).



Figur 4: Visar en illustration på hur lasten påverkar väggroppen och hur deformationerna tillkommer, hämtad av (Agardh, 2021).

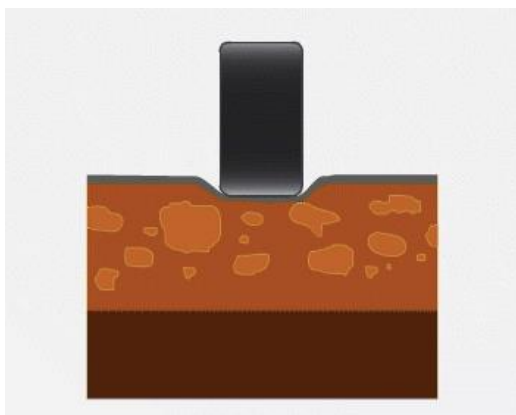
Deformationer kan vara av två typer. Det ena är elastiska deformationer, dvs. temporära deformationer och är reversibla. Det andra är duktilitet deformation, benämns även som plastisk deformation och är en permanent variant som tillkommer i väggroppens alla lager eller dess undergrund (Nelson, 2015). När det kommer till de plastiska deformationerna så kan de delas in i fyra olika varianter, 0–3 beskrivs nedan samt visas i figurerna 5 till 8:

Spårbildning av typ 0 – sker i samband med att beläggningens översta lager (bitumenbundet slit- och bärlager) är dåligt packat, se Figur 5. Därav så packas det ned av den förväntade trafikbelastningen (Gustafsson, 2015). Det krävs att packningen ska vara tillräcklig innan vägen trafikeras. Det betraktas även att spårbildning av typ 0 är självstabiliserande och ser därför till att möjligheten för mer packning avlägsnas. Materialet blir då betydligt styvare, vilket minskar i sin tur trycket i överbyggnadens undergrund och sprider lasterna jämnt över vägen (Roadex, 2023).

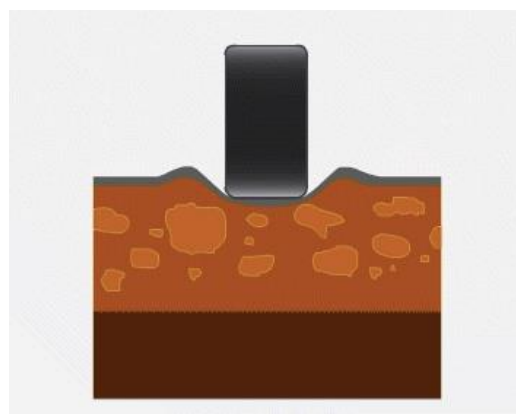
Spårbildning av typ 1 – förekommer där överbyggnadens översta lager är av svagare granulära material. Detta skapar en sämre skjuvhållfastighet av vägen, där expansion tillkommer intill hjulspåren, se Figur 6 nedan. Detta p.g.a. skjuvtöjningar som löser upp de översta lagren av beläggningen (Roadex, 2023).

Spårbildning av typ 2 – förekommer p.g.a. en allt för svag undergrund, därmed så sjunker den inklusive överbyggnadens obundna lager, se Figur 7 nedan (Roadex, 2023). Deformationer av denna sort betraktas inte att vara drabbat av förtunning i material, utan av en låg bärighet samt överskott av vatten i terrassen (Gustafsson, 2015).

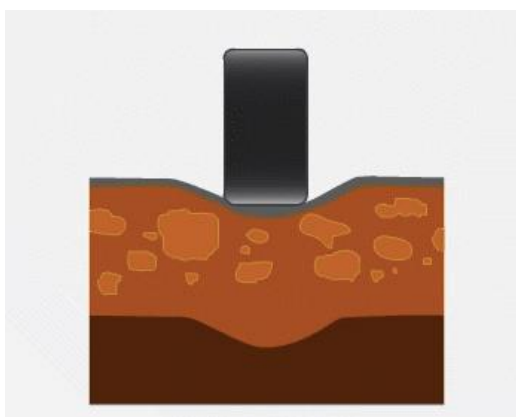
Spårbildning av typ 3 – är tillskillnad från spårbildning av typ 0, beläggningsslitage och är vanligt förekommande på högtrafikerade vägar. Denna deformation förekommer av bland annat dubbdäck som sliter på beläggningen av den belagda vägen, se Figur 8.



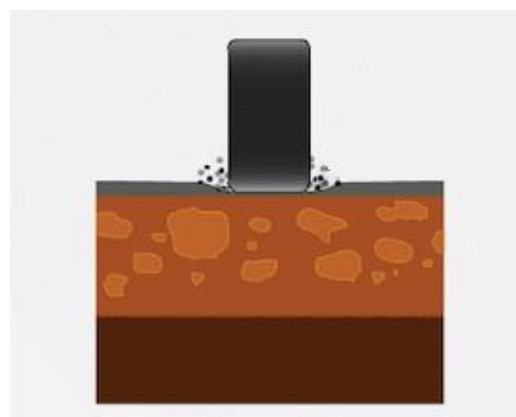
Figur 5: Spårbildning av typ 0, resultatet av efterpackning av överbyggnaden, hämtad av (Roadex, 2023)



Figur 6: Visar spårbildning av typ 1, hämtad av (Roadex, 2023).



Figur 7: Spårbildning av typ 2, låg bärighet i undergrunden, hämtad av (Roadex, 2023).



Figur 8: Spårbildning av typ 3, visar på beläggningsslitage, hämtad av (Roadex, 2023).

3.2 Fallviktsmätning

Det vanligaste sättet att mäta bärigheten på är genom att skapa deformationer på vägen, dvs. att vägen belastas. Därav så betraktas mätningen av deformationer som ett alternativ till den verkliga belastningen (fordonslasten) som vägen i själva verket utsätts för. Bärigheten i sig brukar relateras i de flesta fallen till tyngre deformationer på vägen, därför är det mer troligt att utföra mätningar utifrån ett lastbilshjul. Detta kan omsättas i praktiken med hjälp av s.k. fallviktsapparat, där fallviktsmätningar är en vanligt förekommande metod för att mäta bärigheten i vägen. I detta avsnitt redogörs hur hanteringen av fallvikt går till, hur vägen egentligen belastas, mätningen med hjälp av fallviktsapparaten samt omfattningen av fallviktsmätningar.

3.2.1 Beskrivning av fallviktsapparat

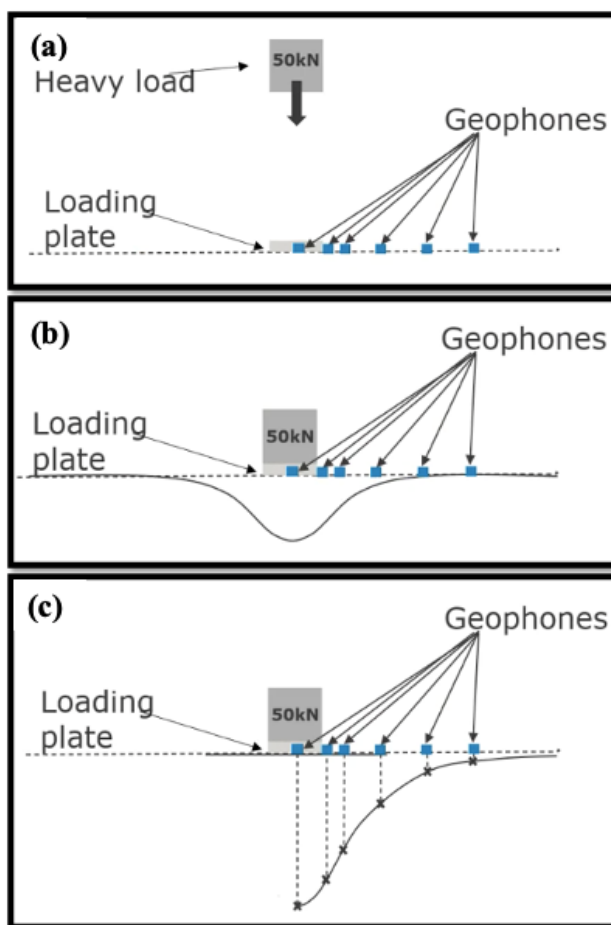
Fallvikten utvecklades i syftet om att kunna efterlikna de vanligt förekommande belastningarna av lastbilar, som påverkar vägkroppens olika lager. Därav är fallvikt ett användbart redskap för bedömning av bärighetsegenskaperna som vägnätet präglas av. Bärigheten av vägarna kännetecknas av bland annat lagrens tjocklekar, styvheter och eventuellt styvhet av terrasser. Dessutom så beaktas styvheten i de olika lagren att variera i samband med variation av temperaturen samt fukthalten (Trafikverket, 2020).

Fallviktsapparaten bygger på en vikt som släpps ner på ett fjädersystem över en belastningsplatta, se Figur 9. Detta medger i sin tur belastningen som vägen utsätts för i form av en kort belastningstid. Apparaten positioneras i en fast ställning, därav tillkommer samma belastningstid genom hela konstruktionen. Detta till skillnad från lastbilens rörliga hjullast som har en längre belastningstid djupt in i konstruktionen och kortare belastningstid nära ytan. När vikten släpps ner på fjädersystemet kan deflektioner under belastningsplattan registreras. Mätningen av den tillkomna deflektionen kan delas in i två huvudsakliga delar, dels hur pass mycket mätplattan sjunker i förhållande till belastningscentrum, dels hur mätningarna varierar under ett antal olika punkter i avstånd ifrån den verkande lasten. Mätningen av dessa verkande punkter görs genom geofoner som själva apparaten är försedd med. Dessa geofoner befinner sig längs med apparaten och är i huvudsakligen till för att mäta och ange variationen i deflektionerna längs det uppmätta området (Agardh, 2021).



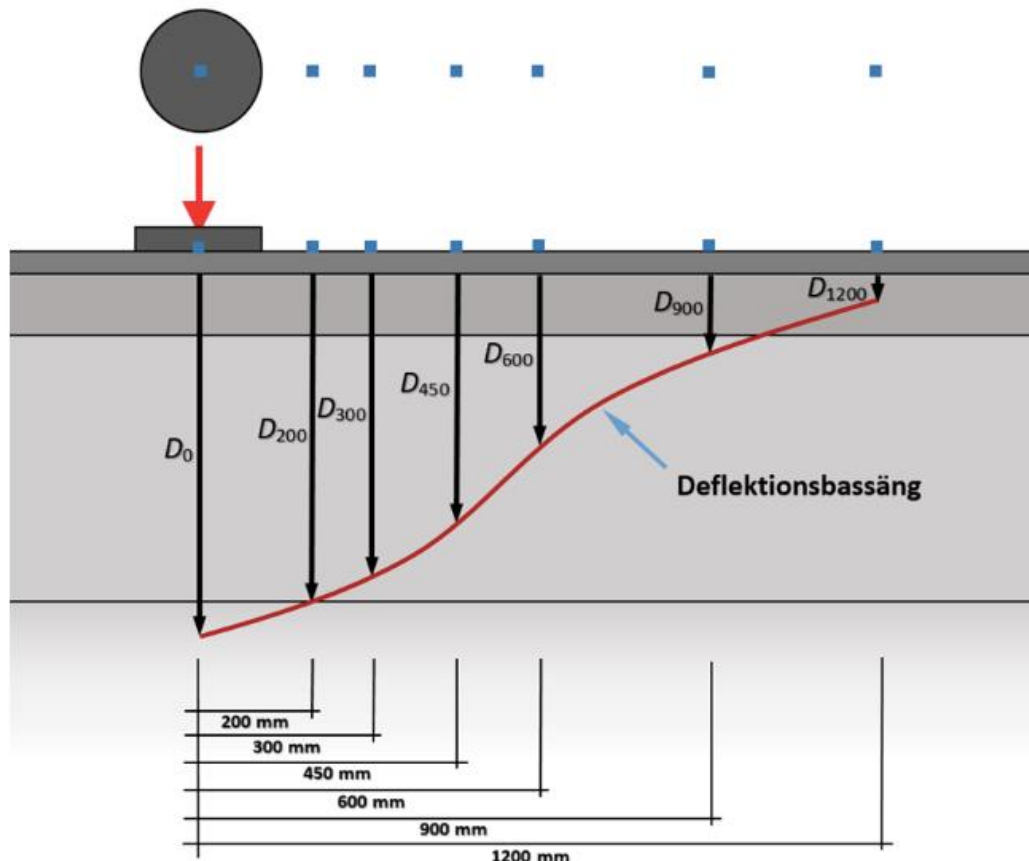
Figur 9: Visar en fallviktsapparat, hämtad av (Agardh, 2021).

Nedan visas en principskiss enligt Figur 10 på hur fallvikten hanteras, där en last (50 kN, representerar en standardaxellast av en lastbil) faller ned (a). Detta för att skapa en deformation utifrån belastningen som vägen utsätts för (b). Därefter mäts skillnaden i deformationen med hjälp av geofonerna som är placerade på olika ställen längs med apparaten (c).



Figur 10: Illustrerar hur den fallande vikten på fjädersystemet över belastningsplattan påverkar vägkroppen för att kunna läsa av deformationer.

Provb belastningen antas att ha en påverkande effekt i samband med att vikten faller över belastningsplattan, se Figur 11 nedan. Detta avser att deflektionsbassängens utseende inklusive de olika mätpunkterna av geofonerna är beroende variabler av styvheten samt tjockleken för överbyggnadens underliggande lager.



Figur 11: Visar deflektionsbassäng som förekommer av fallviktsapparaten, hämtad av (Trafikverket, 2020).

Centrumdeflektionen (deflektionen i belastningscentrum, D_0) påverkas av överbyggnadens samtliga lager. Enligt figur 11 ovan illustreras hur de olika mätpunkterna påverkas på olika sätt av den uppmätta konstruktionen. Mätpunkterna representerar fallviktsapparaten 7 olika givare (en apparat ska vara utrustad med minst 7 givare). Dessa givare är placerade med bestämda avstånd från belastningscentrum vilket även visas i figuren, dessa avstånd betraktas som standardplaceringar och placeras normaltvis på samma riktning i förhållande till belastningsplattan. Vid mätningen av deflektionspunkterna anses det att vara viktigt att upprätthålla en mätnoggrannhet med tillåtet fel lägre än $1 \mu\text{m} + 2 \%$, dessutom med en precision där slumpmässiga fel ej överstiger $1 \mu\text{m} + 1 \%$ av mätvärdet. Genom GPS verktyget ska respektive mätpunkt bestämmas positionsmässigt, därav anges enligt SWEREF99 systemet. Ifall det råder om användning av ett annat referenssystem bör krav för vald mätklass gällande upplösningen, noggrannheten samt precisionen tillgodoses (Trafikverket, 2020).

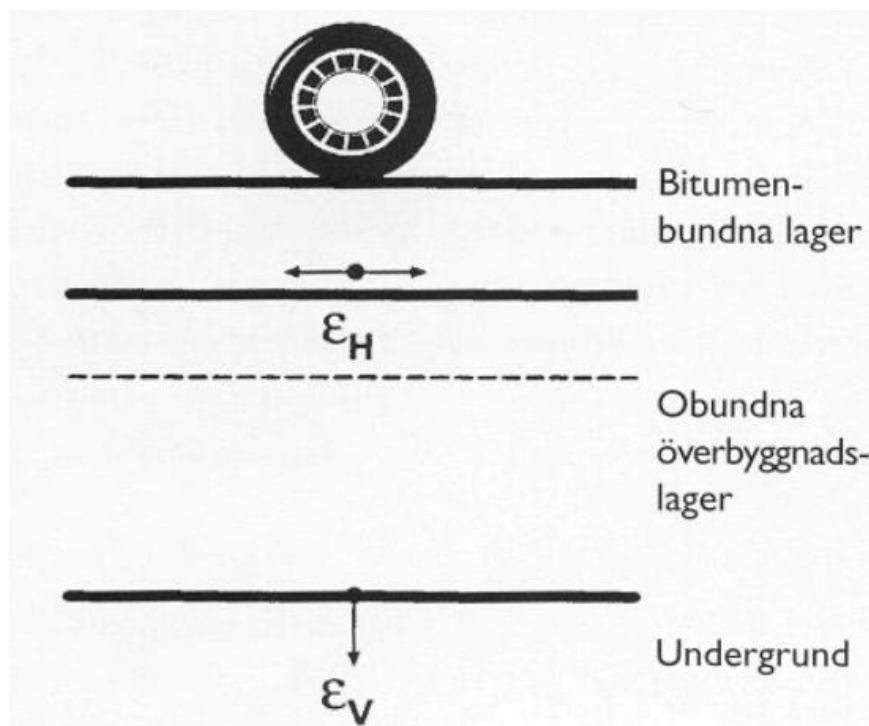
3.2.2 Påverkande krafter och belastningar

När lastbilshjulen förflyttar sig över en specifik punkt så mjuknas vägkonstruktionens lager upp. Genom att en sådan belastning upprepas flera gånger så tillkommer flera töjningar på vägen, eventuellt sprickor samt-/eller spårbildningar (Asfaltboken, 2020). Därav används fallviktsapparaten som skapar en liknande belastning på vägytan, där den deformerar vägen precis som lastbilshjulen gör vid överfart. Dock så bygger fallviktsdeformationerna på provlaster som anges punktvís längs vägen, vilket ska vara i form av en estimering av hur lastbilshjulen beter sig på vägen och är i dagslägen en bra testapparat till att utreda den motsvarande effekten.

Väggroppen utsätts normaltvis för spänningar och töjningar av trafikerande fordonslaster. Dessa faktorer (spänning & töjning) kan bestämmas genom den linjära elasticitetsmetoden. Detta med avseende på att vägkonstruktionens olika material bedöms att vara elastiska, homogena samt isotropa. Dock är detta acceptabelt i teorin, då vägkonstruktionens samtliga materiallager, särskilt de obundna materialen inte erhåller sådana egenskaper i verkligheten. Anledningen till att de elastiska egenskaperna anses vara användbara som en metod är p.g.a. trafikbelastningarna som vägen utsätts för är tillfälliga. Detta då tillkomsten av deformationer igenom väggroppens olika lager är i småmarginal i samband med den påverkande hjullasten vid överfart. Därmed bedöms teorin av vägöverbyggnadsmaterialens elastiska egenskaper att vara en bra uppskattning (Asfaltboken, 2020).

För att kunna bestämma vägöverbyggnadens spänningar samt töjningar så krävs det i första hand att bestämma de mekaniska egenskaperna hos vägmaterialet. Dessa egenskaper bestäms enligt de elastiska styvhetsparametrar (E-modulerna) samt tvärkontraktionstalet, för mer om detta se delavsnitten 3.5.2 samt 3.4.3.1 under avsnitt 3.5 *Analys och bearbetning av deflektionsdata*.

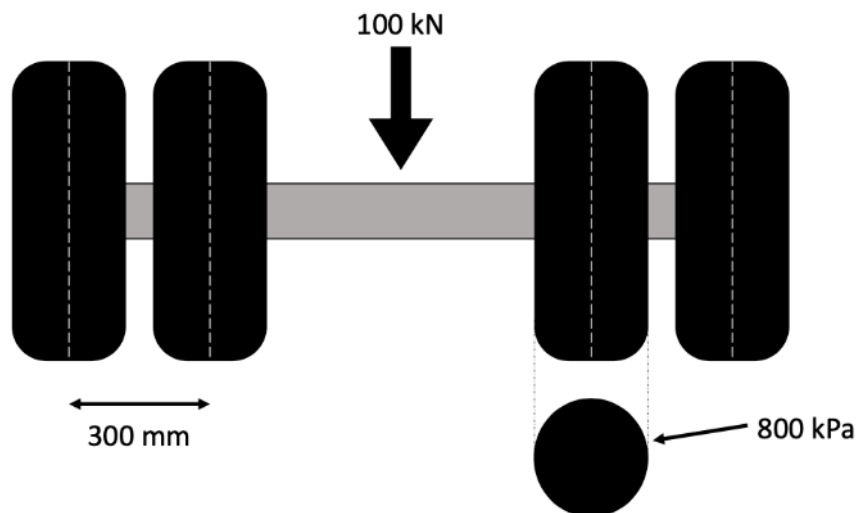
Väggroppen utsätts för kritiska påkänningar. Dessa påkänningar bedöms att vara avgörande i förhållande till bärigheten av vägen. Detta enligt tidigare avsnitt 3.1 *Bärighet*, så är påkänningarna dels horisontal dragtöjning i underkant av ε_H (i väggroppens bitumenbundna lager), samt dels vertikal trycktöjning ε_V (undergrundens material), visas i Figur 12 (Asfaltboken, 2020).



Figur 12: Kritiska påkänningar som vägöverbyggnaden utsätts för, hämtad av (Asfaltboken, 2020).

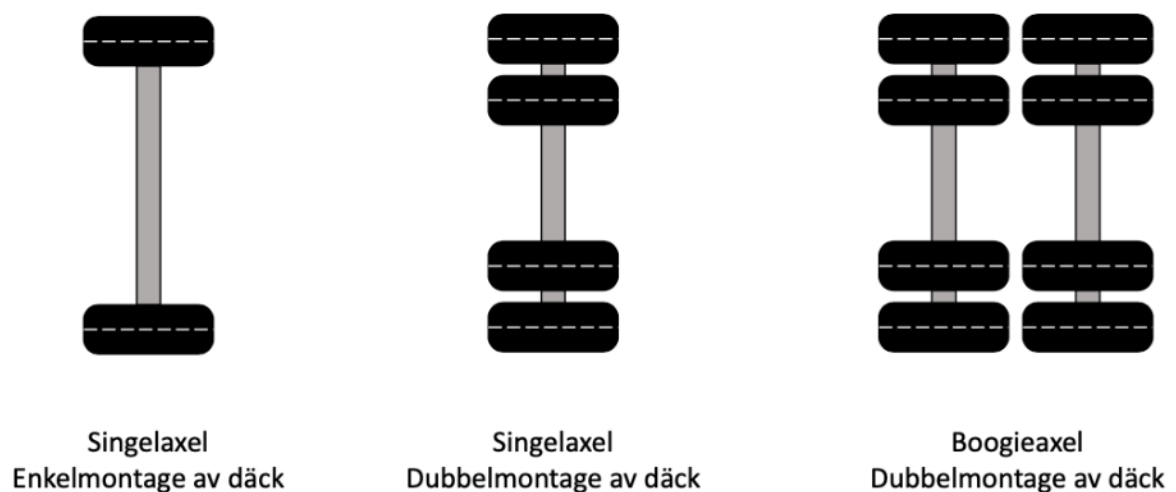
Som tidigare nämnt så kan asfalten antingen utsättas för sprickor eller för spårbildningar. Om det råder om allt för stora töjningar i konstruktionens bitumenbundna materiallager (i underkant) kommer asfalten att utsättas för utmattning, vilket i sin tur ökar risken av att sprickor tillkommer. Samtidigt om det är allt för stora töjningar i konstruktionens undergrundsmaterial, kan det leda till spårbildningar i form av permanenta deformationer i vertikalled, både i överbyggnadens bundna- och obundna materiallager (Asfaltboken, 2020).

Det finns tillåtna, bestämda värden gällande de kritiska påkänningarna (särskilt gällande de kritiska töjningarna) och kan estimeras i förhållande mellan vägens livslängd (teoretiskt 20 år) samt antalet av trafikbelastningar som den egentligen utsätts för. Enligt detta har en standardbelastning definierats som en faktor till för att underlätta beräkningen av de kritiska töjningarna. Standardbelastningen är den förväntade trafiken som vägen antas att belastas av, och bygger på antalet ekvivalenta standardaxla-/eller belastningar. Dessa standardaxlar är laster som motsvarar 100 kN, dvs. motsvarande till en lastbilshjulsaxel som delas då på två stycken hjul, se Figur 13. Dessutom belastar dessa axlar vägen med en kontaktyta på 800 MPa (Asfaltboken, 2020).



Figur 13: Visar en grundlig standardaxellast, enligt svenska normer, hämtad av (Lundberg, 2020).

Det finns även flera andra axellaster- och konfigurationer än den typiska standardbelastningen enligt svenska normer. Dessa laster visas i Figur 14.



Figur 14: Visar olika typer av standardaxlar, hämtad av (Lundberg, 2020).

För att efterlikna den nominella standardbelastningen så är fallviktsapparaten utrustad med en belastning som genererar 50 kN, vilket motsvarar den normala lasten av en standardaxel (en lastbilhjulslast). Denna last beaktas att ha utrymme till en avvikelse som skiftar på ca 5 %. Dock trots denna avvikelsen betraktas lasten till 50 kN. Kraftpulsen av fallviktsapparaten är försedd med pålastningstid som varar i minst 10 millisekunder. Därav så ska belastningstiden totalt sätt vara mellan 1,8–2,5 gånger av pålastningstiden. Däremot om det visar sig att deflektionsvärden är större än själva mätningområdet av deflektionsgivarna, bör en gradvis reducering av belastningen genomföras. Detta utförs fram till att deflektionens maxvärde sammanfaller enligt deflektionsgivarnas mätområde. Mätningarna-/slagen av deflektionsgivaren bör även sparas. Detta för att minska på eventuella risker

som kan inträffa, där ickelinjära felmätningar främst gällande givarens punkter som befinner sig långt ifrån deflektionscentrum (belastningscentrum) (Trafikverket, 2020).

Gällande kraven av kraftgivaren så bör dess upplösning vara 0,1 kN. Samtidigt som mätnoggrannheten inte ska överstiga 5 % fel, eller 2 % av själva mätvärdet. Detta avser hela mätområdet där det råder om det mest konsekventa kravet. Dessutom så ska fel i mätprecisionen, dvs. slumpmässiga fel vara som lägre än 0,1 kN. Detta ska alltså vara i form av en standardavvikelse (Trafikverket, 2020).

Belastningsplattan har krav, där mätningar på färdiga väglag, bör plattan ha en diameter på 300 mm. Dessutom så ska plattan vara utrustat med gummiunderlägg med en minsta möjlig tjocklek på 5 mm som ska vara räfflat, detta för att få en bra anliggningsyta på vägen. Däremot vid vägar som är trafikerade sedan tidigare bör plattan vid mätning vara segmenterat. Detta för att skapa och få en jämnt fördelad last längs med vägytan (Trafikverket, 2020).

3.2.3 Kalibrering & kontroll

Kalibreringen av deflektionsgivare bör utföras en gång om året. Detta avser deflektionsmätningar, krafter, luften (gällande lufttemperatur) samt temperaturen i borrade hål, dvs. försummande hål efter provkroppar. Kalibrering kan också utföras i samband av framtagna åtgärder avseende på påverkande effekter av själva kalibreringen, t.ex. om en eller flera av givarna byts ut. Vid kalibrering så kan även IR-termometern inspekteras. Däremot så behöver den inte kalibreras om inga åtgärder åtgärdsbehov uppmärksammas i samband med själva inspektionen (Trafikverket, 2020).

Vid kontroll bör flera aspekter uppmärksammas, dessa formuleras i punktform enligt följande (Trafikverket, 2020):

- *Det hela mätsystemet* – ska respektive provbelastning kontrolleras automatiskt. Detta görs i form av signalkontroll med avseende på nivåerna av respektive punktgivare.
- *Deflektionsgivarna* – ska kontrolleras precisionsmässigt, dvs. i samband med deflektionsbestämning. Detta utförs i samband med att belastningarna når upp till 10 000, men bör även kontrolleras var sjätte månad, trots att belastningarna ej uppnår sådana antal. Denna kontroll ska utföras med 12 belastningar gällande en och samma punkt. Av kontrollernas 12 belastningar utesluts normaltvis de 2 första

provkontrollerna, där de resterande 10 kontrollerna gäller. Dessa kontroller beräknas med standardavvikelse, där deflektionerna normeras till samma kraft. Standardavvikelsen ska vara $<2 \mu\text{m}$, eller $1,5 \mu\text{m} + 1,25 \%$ av medelvärdet för respektive givare. Detta där nivån av belastningarna vid D_0 hamnar mellan 0,3–1,0 mm, samtidigt som D_{900} samt D_{1200} , dvs. de yttre deflektionerna inte är alldeles för små i värdet.

- *Kraftgivare* – ska kontrolleras precis som deflektionsgivarna gör. Dock så bör standardavvikelsen vara $<2 \%$ av medelvärdet. Detta gäller enbart för de 10 provkontrollerna (belastningarna) som tas med i kontrollen.

Deflektionsgivarena ska jämföras årligen. Detta görs genom att respektive givare sätts i en hållare. Detta med avseende på att givarna ska exponeras för samma deflektion, en deflektion mellan $300 \mu\text{m}$ och $600 \mu\text{m}$. Där $2 \mu\text{m} + 1,0 \%$ är det högsta möjliga medelvärdet av det största samt minsta mätvärdet, vilket ska inte överstigas (Trafikverket, 2020).

3.2.4 Mätningens omfattning

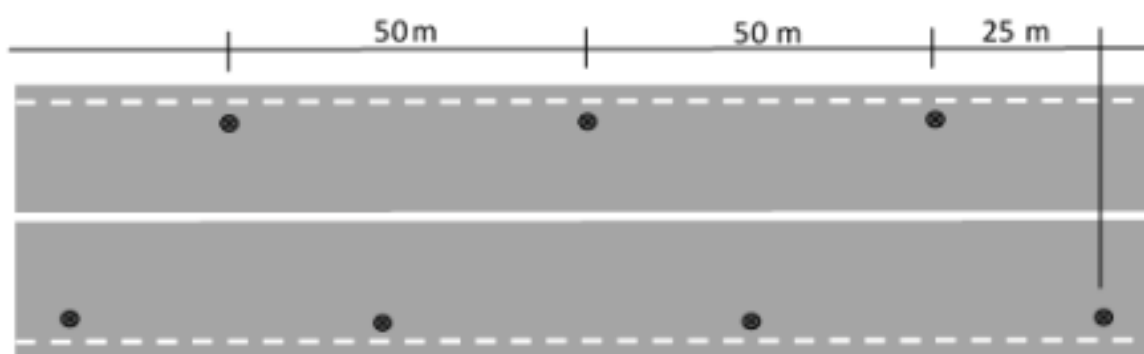
Det förekommer vanligtvis olika sorters inventeringsarbeten gällande tillståndet av vägarna men även gällande Trafikverkets mål och krav. Mätningarnas omfattning bör därför regleras med avseende på att ta fram lämpliga resultat i förhållande till undersökningar. Detta genom att utnyttja olika sorters kombinationer av mättnings- och inventeringsmetoder, för att få fram kvalitativa fallviktsmätningar (Trafikverket, 2020).

3.2.4.1 Mättningsklass

Det finns 4 fördefinierade mätklasser som gäller i samband av beställning av fallviktsmätningar. Uppfattning av olikheterna mellan mätklasserna är bland annat mättningslinjerna, belastningsnivån, positionsnoggrannheten samt punkttätheten. I detta examensarbetet behandlas mätklass 1 (MK1). Resterande mätklasserna som MK2 används för obbyggda vägar, dvs. grusvägar som genomgår en ombyggnation, men även äldre belagda vägar. MK3 likt MK2, men kan även tillämpas för 2+1-vägar. MK4 används i samband med forsknings- och utvecklingsuppdrag (Trafikverket, 2020).

Mätklass 1 (MK 1):

Mätklass 1 bygger på en kortfattad undersökning av föremål, med en minimal förändring. Detta kan tillämpas på längre sträckor och är med syftet om planering av t.ex. belastningsrestriktioner eller granskning av färdiga, utförda förbättringsåtgärder. Belastningsnivån vid mätningen ska vara 50 kN, motsvarande en standardaxellast. Detta ska utföras med positionering av belastningen i det högra hjulspåret av respektive körfält i både riktningarna, se Figur 15. Därav ska punkttätheten vara på avstånd om 50 meter, dessutom så ska noggrannheten av positionen uppfylla de krav som gäller för positionsklass av typen 1 (Trafikverket, 2020).



Figur 15: Visar mätningar av typen MK1, där mätpunkterna i respektive körriktning är korsade, hämtad av (Trafikverket, 2020).

3.3 Rullande bärighetsmätningar (RWD)

För att innovativt modifiera samt effektivisera de traditionella fallviktsmätningarna har det sedan länge utvecklats andra metoder som är till för att utföra bärighetsutredningar/mätningar. Rullande bärighetsmätningar är en sådan metod som syftar främst på att skapa en bättre simulering av belastningar som påverkar vägen. Detta genom att ständigt mäta deformationerna som tillkommer på vägen under själva lastbilens färd.

Idén har haft sin start i Frankrike, därefter har utvecklingen av rullande bärighet varit främst ledande i Danmark. Detta där två framstående företag har stått till utvecklingen. Det ena företaget är GreenWood som har utvecklat TSD (Traffic Speed Deflectometer) och har haft sin produkt kommersiellt nu i ett tag. Det andra företaget var Dynatest, mest kända för tillverkning av fallvikt. Dynatests produkt av rullande bärighets mätningar köptes senare, under 2020 av Ramboll som idag erhåller RWD/Raptor. I samband med detta ingick tre stycken lastbilar, inklusive mjukvara (Ramboll RST, 2021). Rambolls Raptor (Rapid Pavement Tester) är utrustat till att kunna dagligen mäta samt samla in data på vägens bärighet mellan 150–400 kilometer (Ramboll RST, 2022), detta avseende på en normal trafikhastighet som motsvarar 80 km/h (rekommenderat), se Figur 16 på en Raptor.

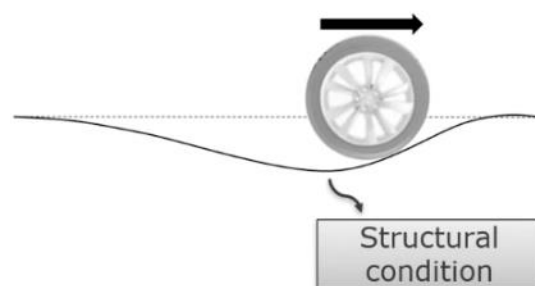


Figur 16: Visar RWD/Raptor, bild.

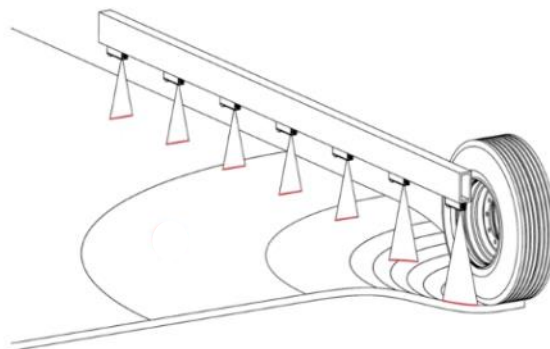
Principen av Raptor är att skapa en asymmetrisk deformation, då asfalt anses vara ett trögt material, så förekommer den största andelen av deformationerna bakom hjulets last, dvs. att nedsjunkningskurvan skiljer sig i förhållande till lasten framför hjulet jämfört med bakom hjulet, se Figur 17. Detta är då till skillnad från fallviktsapparaten som anger den maximala deformationen precis där lasten (hjulet) befinner sig avseende på nedsjunkningskurvan.

Raptor är utrustad med ett supersingelhjul, dvs. ett enkelmontage av däck (singelaxel). Detta till skillnad från GreenWoods produkt TSD som utgår från ett dubbelmonterat hjul (dubbelaxel) som då mäter deflektionen mellan hjulen. I och med att Raptor har en singelaxellast sker deformations-mätningarna bredvid själva hjulet, detta illustreras enligt Figur 18 nedan.

Utifrån mätningarna som framtas av Raptor ska vägens strukturella tillstånd, dvs. bärighet efterlikna resultaten från fallviktsmätningarna med den märkbara skillnaden att Raptor mätningar görs under en rörlig last, detta till skillnad från falkvikten som registrerar mätdata i form av en punktlast. Mer om Raptor framställs under *avsnitt 3.3.1*.



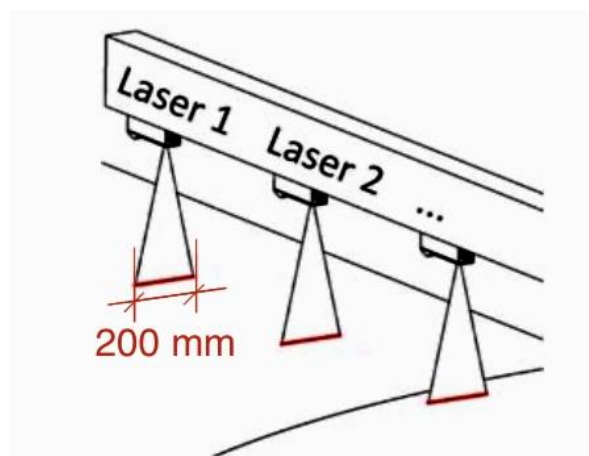
Figur 17: Principiell bild av hur last egentligen fördelas, hämtad av (Agardh, 2021).



Figur 18: Principiell bild av axellasten av Raptor (Agardh, 2021).

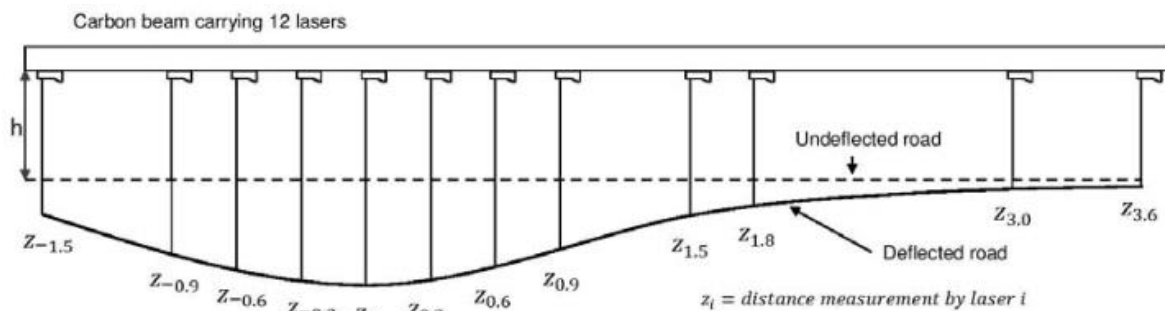
3.3.1 Beskrivning av Raptor (Rapid Pavement Tester)

Raptor är en produkt av rullande bärighetsmätningar (RWD), med det bakomliggande syftet om att mäta beläggningens respons kontinuerligt i trafikhastighet, dvs. under själva färdens gång, konstaterar Madsen och Pedersen (2022). De påpekar även att produkten är utrustad med ett speciellt lastbilssläp som är försett med en 5,4 meter lång beam och att bakaxeln är utrustad med justerbara vikter som motsvarar 10 ton i last, vilket representerar 50 KN last från respektive hjul som verkar på beläggningen, och att framaxeln belastar beläggningen med ca hälften av denna last. Balken består av 12 linje-laser, monterade längs ena sidan av bakhjulet, se den förenklade modellen i Figur 19. Dessa linje-laser kan mäta hur stor deformationen är på flera olika avstånd (bägge sidorna om hjulet) så att man får mätdata både före, likväl efter lasten, där dess positionering är 1,5 meter bakom respektive 3,6 meter framför hjulet, vilket illustreras principiellt enligt Figur 20 där beam samt avståndet mellan respektive laser visas. Detta där var och en av dessa 12 linje-laser är 20 cm i bredd och kan registrera mätningar upp till 1280 punkter, med avsikten om att säkerställa att apparaten kan mäta, snarare identifiera samma plats på den mätta sträckan två gånger. Det här genom tekniken, det så kallade bildigenkänning som möjliggör att man kan fastställa platsen för den exakta punkten längs släpvagnens beam (balk).



Figur 19: Principiell bild på laserlinjer monterade på beam, hämtad av (Madsen & Pedersen 2022), redigerad av författaren.

Enligt Madsen och Pedersen (2022) som belyser även i sin studie att både referenshöjden samt texturen kan försummas. Detta sker tack vare möjligheten av att utföra en kombination av tre lasermätningar som förhåller sig på samma distans ifrån varandra, i två separata tidsåtgångar. Därav säkerställs att Raptor kan igenkänna den exakta punkten på beläggningssytan med hjälp av olika lasrar.



Figur 20: En skiss av balken på 5,4 m i längd, samt 12 lasrar med avstånd till beläggningen (z), hämtad av (Madsen & Pedersen 2019).

Lasrarnas grundliga uppgifter är att mäta avståndet mellan balken och beläggningen, dvs. hur mycket nedsjunkning tillkommer i samband med lasten som genereras av hjulet. Detta där avståndet för lasern betraktas som z (*distance measurement by i*), z_i , och att i är en hänvisning på vart de olika lasrarna befinner sig på balken enligt hjulet. Därav betraktas avståndet av lasern som befinner sig närmst till hjulet som z_0 , vilket innebar att lasern som mäter $z_{0,3}$ är alltså placerad 0,3 m framför, vidare innebär det att $z_{0,6}$ är placerad 0,6 m framför ända fram till $z_{3,6}$ som motsvarar 3,6 m som avståndet framför hjulet. På liknande sätt mäts avståndet z_i baklänges, dvs. bakom hjulet, detta tolkas som exempelvis som $z_{-0,3}$ (negativt), ända tills $z_{-1,5}$ som är lasern som är placerad 1,5 m bakom hjulet (Madsen & Pedersen 2019).

Nedan följer en beskrivning av hur man i praktiken arbetar med Raptor, samt ett experiment som har utförts sedan tidigare som riktar sig på jämförelse mellan Raptor rullande bärighetsmätningar och fallviktsmätningar FWD. Dessa presenteras under delavsnitten 3.3.2 *Raptor systemhantering* samt 3.3.3 *Fältexperiment, Raptor & Fallvikt*.

3.3.2 Raptor systemhantering

I detta avsnitt redovisas hanteringen av Raptor systemet i praktiken, som avser hur företaget, Ramboll RST omfattar datasystemet, användning, kommunikation, dvs. de kritiska teknikerna för hantering samt användning av själva apparaten. Dessutom så presenteras det även tydligare bilder på själva Raptor enligt Figur 21 - 23 nedan.



Figur 21: Bild på Raptor i Norge, redigerad av författaren.

För att utföra Raptor-mätningarna i praktiken behövs det en förare, som kör själva lastbilen samt en operatör, som styr systemet både innan som under färdens gång. Det första man gör är att sätta igång hela systemet. Föraren och operatören börjar med att koppla GPR systemet, där markantennen samt hornantennen monteras på lastbilens stötfångare, se Figur 21 ovan. GPR är frekvenser på georadar som mäter i en linje, dvs. en distans som Raptor mäter i. Det GPR verktyg som Ramboll använder sig av kan nå upp till hastigheter med en maxgräns på ca. 114 km/h, vilket är tillräckligt med tanke på att Raptor ska hålla en rekommenderad hastighet på 80 km/h. Det konfigurerar matriser genom fasta kanaler under mätningen. Markantennen som är markerad i figuren ovan, arbetar med en lägre frekvens som ligger på 400 MHz, vilket innebär att den konfigureringen är lämplig för mätning samt

datainsamling av de obundna lagren. Detta till skillnad ifrån hornantennen som arbetar med högre frekvenser, 1 GHz och mäter på de bundna lagren, exempelvis slitlager, bundet bärlager, Ag lager och andra typer av bundna lager. Dessa antenner binds fast med kablar som är till för att ge direkt information om frekvensen på georadar som syns i operatörens skärm.

Systemet sätts igång för att mäta distans, detta för att GPS och XDS ska bearbeta för att navigeringssystemet ska bland annat få en satellituppkoppling. Detta görs för att höja osäkerheten genom att ha igång systemet, för ju mer systemet arbetar desto lägre differens förväntas, exempelvis DAQ som kan vara felet i rotationen (rullsäkerheten). Med andra ord så aktiverar operatören samtliga system som mäter någon form av distans, det ena är genom GPS-tid och den andra genom hjulpulsgivare i själva bakhjulet som mäter hur mycket man färdas (läser av hastigheten). När samtliga värden betraktas vara i en god säkerhet, under 0,2 mm på DAQ verktyg, som är ett verktyg till för att på ett effektivt och smidigt sätt samla samt bearbeta data från diverse källor. Detta verktyg kan mäta bland annat temperaturen, trycket, töjning, accelerationen etc.

Efter att GPS-tiden är angiven då kan operatören sätta igång själva Raptor verktyget. Kalibrering utförs av Raptor samt radar, i detta fall är det hornantennen (mäter på bundna lager) för radar, detta för att få en nollnivå för båda. Anledningen till att man bortser från markantennen är för att den mäter på obundna lager som är svårt att få en nollpunkt på. Man kan kalibrera på två sätt. Det ena sättet som är det vanligaste också är genom att simulera på en asfaltsränna som fälls ut, se Figur 22. Asfaltsrännan sitter fast, med ett takpapp som motsvarar en asfaltsyta. I och med att rännan är fastbunden kan balken vid kalibrering åka i ett spår över den fram och tillbaka 10 gånger. Detta ska vara jämförbart med en ideal styv beläggning utan deflektion. Det andra sättet för kalibrering kan utföras genom att köra över en bro, eftersom broar betraktas vara en styv yta som kan ge en jämn mätning.



Figur 22: Kalibrering i lastvagnen, utfälld ränna, tagen av författaren.



Figur 23: Bild på Gocator lasrarna (dagtid).

Tanken med kalibreringen är att matcha de 12 olika linjelasern (Gocators) till varandra. Detta då de försöker hitta samma punkt, därav kan den läsa av avståndet för att veta hur långt det egentligen är från beläggningen till Gocator. Detta ger i sin tur nollpunkten, dvs allt som är större innebär en deflektion. Vid kalibreringen så accelererar balken upp i hastighet, vilket ger oss både avstånd i meter samt hastigheten i själva balken. Detta är kritiskt viktigt, dels för att skydda Raptor-systemet, samt ange data på hur balken egentligen beter sig i hastighet.

Systemet som Raptor utgår ifrån kallas för R-soft, förr så användes Dynatests system. I samband med att systemet sätts igång, så startar en maskin, TC08, ett mätinstrument som är till för att reglera lufttemperaturen i balken (ingår i R-soft systemet). Dessutom så mäts även asfaltsytan genom en IR-temp. Det är rekommenderat att ha igång systemet över natten, om det råder om att landström är tillgängligt. Detta ger möjlighet till att ha igång AC, luftvärmepump samt fläktar som är monterade i lastvagnen. Dessa fläktar är huvudsakligen till för att förflyta luften runt in i Raptor för att åstadkomma en jämn lufttemperatur i släpet och att balken inte ska utvidgas. Det är bra att notera att samtliga deflektionsmätningar är i mikrometernivå, därav kan drastiska temperaturskillnader ha en stor påverkan på balken. Exempelvis om det är väldigt kallt på morgonen vid mätning och att temperaturen höjs till 30 grader under dagen så kommer balken att expandera, därför så är det kritiskt viktigt att se till att reglera lufttemperaturen i släpet.

Efter att samtlig mjukvara och systemet sätts igång och samtliga kontroller utförs och godkänns så börjar själva färden. Som tidigare nämnt så utförs arbetet av en förare samt en operatör. R-soft datasystem i lastvagnen har en speglade skärm i passagerarsätet där operatören kan se samt inflika på vad som sker under färdens gång.

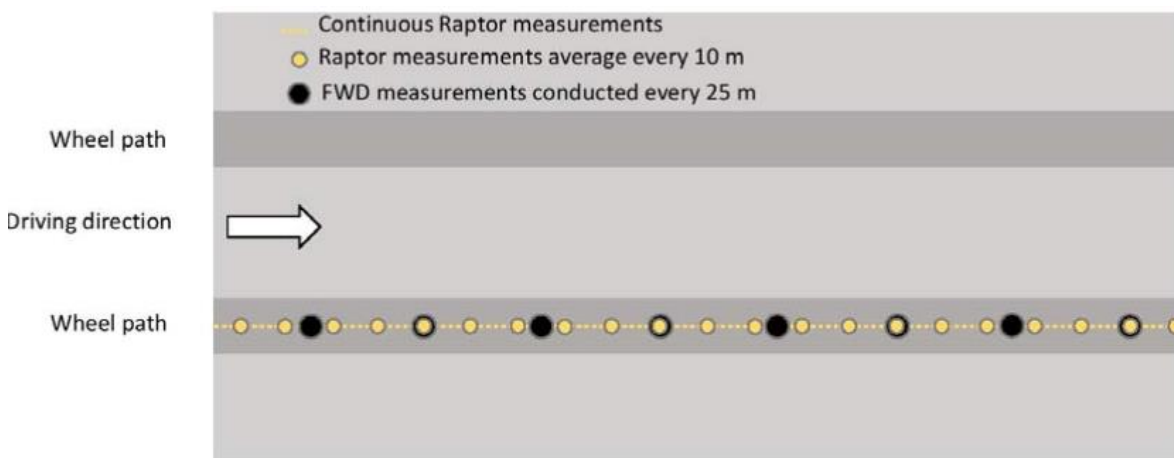
3.3.3 Jämförelse mellan FWD och Raptor

I detta avsnitt presenteras två fältundersökningar utfärdade med ett bakomliggande syfte om att studera fallviktsmätningar gentemot mätningar från Raptor.

3.3.3.1 Fältexperiment 1

Den 9 juni 2018 utfördes ett fältexperiment, där både Raptor och Fallvikt ställdes inför ett test. Syftet med undersökningen var att mäta en sträcka som motsvarar 10 km och befinner sig i Köpenhamns närområde. Tanken var att samla mätdata av Raptor samt Fallvikt under samma dag, där bland annat temperaturförhållandet var detsamma för båda, ca 20 grader.

Fallviktsapparaten mätte punkter belägna på den högra hjulaxeln var 25:e meter, med en belastning som motsvarar 50 kN på beläggningen. Raptor mätte på samma sträcka i en konstant hastighet, motsvarade 50 km/h enligt den rekommenderade hastigheten under mätningens gång, och beräknade in data var 10:e meter, konstaterar Madsen och Pedersen (2019), se skiss i Figur 24 nedan.

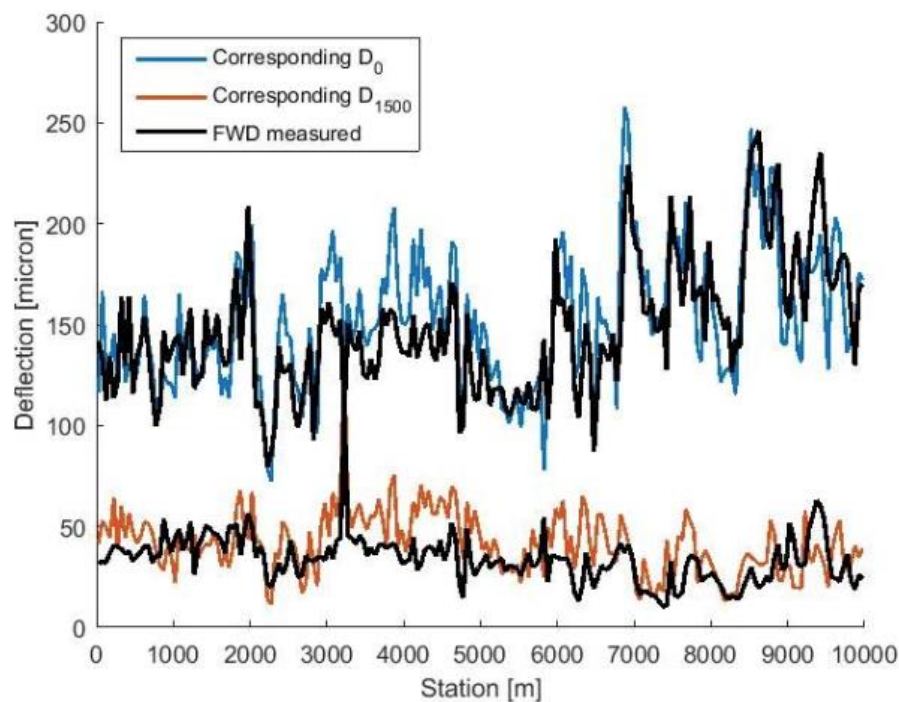


Figur 24: Visar fältmätning på Raptor samt Fallvikt, visar hjulbana och krökning/kurvaturen på motorvägen, hämtad av (Madsen & Pedersen 2019)

Det noterades även av Madsen och Pedersen (2019) att 38 krökningar/kurvaturer uppkom under ett intervall på 10 meter. Det påpekades även att asfaltens lagertjocklek bedömdes till att vara 25cm (250mm) och att undergrunden är på 30cm (300mm).

Det som gjordes var att de utnyttjade tidigare utfärdade mätdata, i detta fall mätningar mätta av Raptor, bakåt i tiden, med avseende på vägens elastiska förmåga. Dessa mätningar utnyttjades senare för att ta fram ett mönster med avsikt att se hur beläggningen skulle bete sig senare i tiden vid användning av

fallviktsapparaten. Med det så kallade för *Backcalculation*, dvs. bakåtberäkning, togs det fram parametrar som indata, framförallt till för att förutspå deflektionerna som fallvikten genererade. I studien konstaterade de att måtten samt de beräknade deflektionerna skulle jämföras på två punktlaster. Det ena, som betraktas vara vanligast vid jämförelser är centrumdeflektionspunkten D_0 (0mm), men även D_{1500} (1500mm ifrån last punkten). Detta då deflektioner som är belägna längre bort ifrån deflektionscentrumet, i detta fall D_{1500} , kan vara ett bra verktyg för att åstadkomma mer kunskap om förhållandet i undergrunden (Madsen & Pedersen 2019).



Figur 25: Visar det maximala värdet av fallviksdeflektionerna inklusive fallviktsdeflektionerna från lastpunkten (D_0 och D_{1500}), hämtad av (Madsen & Pedersen 2019).

Enligt Figur 25 ovan har man lagt märke till en tydlig korrelation, där både deflektionerna D_0 och D_{1500} följer ett liknande mönster i både form och storlek. Detta tyder på att metoden för bakåtberäkning är godtycklig i jämförelse med fallviktsmätningarna påpekar Madsen & Pedersen (2019), som även belyser att trots avvikelser, så kan man iaktta liknande trender och magnitud. Detta med avseende på att iakttagelserna från Raptor efterliknar fallviktens uppmätta D_0 och D_{1500} .

3.3.3.2 Fältexperiment 2

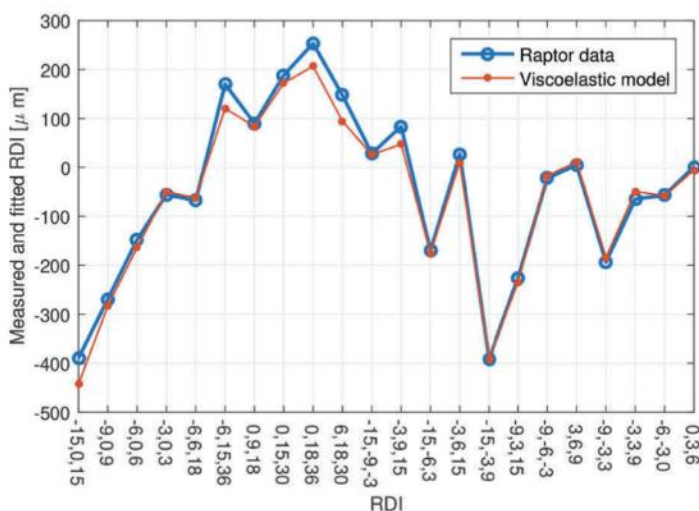
Under samma år, 2018 har ytterligare ett studietest av Raptor och FWD utförts parallellt. Testet täckte en sträcka på 3,5 km i Köpenhamns stad.

Förhållandena i detta var det samma som i föregående test under 3.3.3.1

Fältexperiment 1, där Raptor mätte konstant med ett medelvärde som rapporterades var 10:e meter, och fallviktsmätningarna utfördes var 25:e meter. Det användes en modell för att ta fram en kalkyl på de ekvivalenta deflektionerna av FWD i förhållande till Raptor insamlade mätningar, beskriver Madsen och Pedersen (2022).

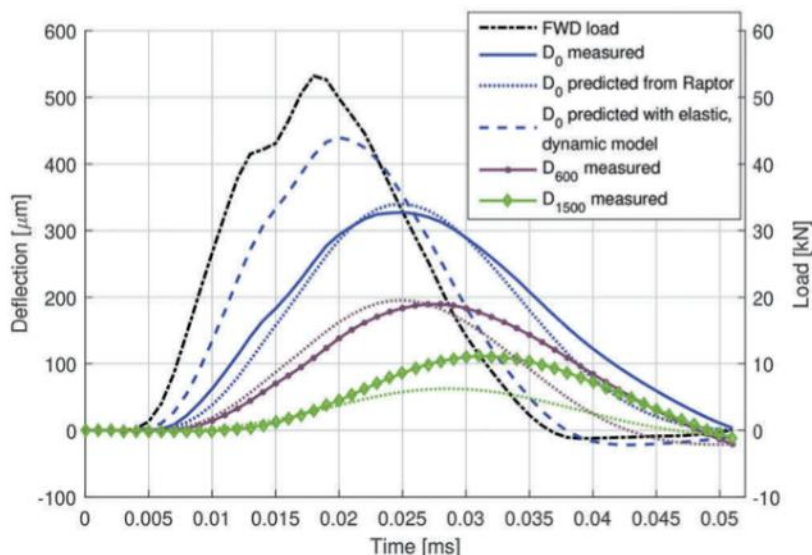
Med hjälp av en 3D finita elementmodell har man utgått från en storlek på 120 meter i körriktning, 60 meter i tvärriktning samt 20 meter i djup. Dessutom med en stor domän som användes för att ta hänsyn till påverkan som kan inträffa från gränsen. Det konstaterades även att Raptor färdades i en konstant hastighet, 50 km/h och att samtliga hjul togs med i beräknings-modellen (Madsen & Pedersen 2022).

Det togs hänsyn till 22 möjliga utfall av RDI (Raptor Deflection Indices), där bakåtberäkning användes för att mäta RDI på specifika punkter (Madsen & Pedersen 2022). I Figur 26 nedan, kan man se ett tydligt samband på hur uppmätta och modellerade RDI kan matcha.



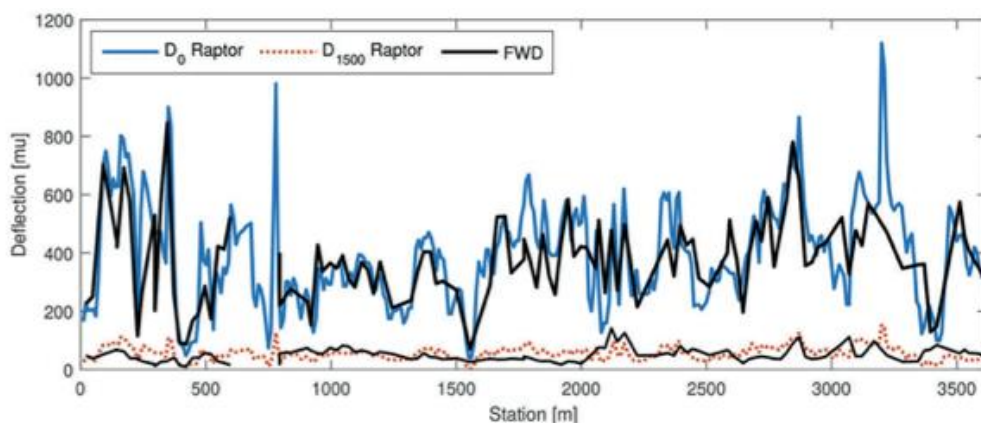
Figur 26: Visar uppmätta och modellerade RDI-värden, hämtad av (Madsen & Pedersen 2022).

Vidare undersöktes hur pass väl iakttagelserna från Raptor stämmer egentligen överens med de faktiska mätningarna från FWD. För att se hur beläggningen beter sig har man utgått från bakåtberäkningar (backcalculation) av Raptor-mätdata. Därpå används denna data för att simulera hur FWD hade betet sig på samma sektion och med samma förutsättningar (Madsen & Pedersen 2022) Se Figur 27.



Figur 27: Visar en tidshistorisk på iakttagelserna av Raptor mätningar samt utförda fallviktsmätningar, hämtad av (Madsen & Pedersen 2022).

Resultatet visar de verkliga mätningarna av FWD (svart linje), där den prickade linjen representerar Raptor förutsägelserna (blå linje). Det användes även D_0 , D_{600} samt D_{1500} med syftet om att kunna illustrera ett samband mellan iakttagelserna av Raptor och mätningarna av FWD. Detta genom att titta på deflektioner i centrum, mitten och långt ut i deflektionsbassängen. I grafen kan man se ett tydligt samband mellan dessa linjer. Detta innebär att Raptor iakttagelserna har efterliknande, karaktäristiska drag från de faktiska mätningarna av FWD (Madsen & Pedersen 2022).



Figur 28: Raptor- prediktion och FWD- mätning, i punkterna D_0 och D_{1500} , hämtad av (Madsen & Pedersen 2022).

Vidare har man tagit en närmre titt på deflektionspunkterna D_0 (blå linje), och D_{1500} (orange linje) för Raptor iakttagelser och FWD (helsträckt svart linje) mätningar, som enligt Figur 28 ovan visar en god korrelation, både nära deflektionspunkten likväl långt ut ifrån. Notera att mätningar från sektion 600-800m (sträcka på 200m) saknas, trots detta visar mätningarna en god överensstämmelse av respektive, beskriver Madsen och Pedersen (2022).

3.4 Analys och bearbetning av deflektionsdata

Detta avsnitt i litteraturstudien beskriver hur hanteringen av deflektionsdata går till. Detta utifrån trafikverkets metodbeskrivning (Trafikverket, 2020). Här redogörs bland annat hur granskningen av deflektionsdata går till-, och hur utvärderingen av mätresultaten utförs. Det redogörs även hur de allmänna beräkningarna av bärighetsmått samt de centrala bärighetsmåten används.

Samtlig information som redovisas i detta delkapitel tillämpas som allmän kunskap. Alla beräkningar, moduler och modeller kan användas till diverse undersökningssyften. Underrättelse i detta avsnitt stöds av de senast uppdaterade kravdokumenten av (Trafikverket, 2020).

3.4.1 Granskning/uteslutning av data

Fallviktsmätningens deflektionsdata är en aktuell mätning, dvs. att det beskriver tillståndet i vägen vid det särskilda mättillfället (Trafikverket, 2020). Det benämns även att mätningar som är äldre än 5 år kan ha en hög osäkerhet för att kunna ta beslut om tänkbara förstärkningsåtgärder. Däremot kan de äldre datamätningarna utnyttjas i bland annat trendanalyser.

Det är viktigt att granska deflektionsdata innan påbörjandet av en noggrann undersökning. Detta för att kunna i förväg utesluta felaktiga data, eventuellt data som ej överensstämmer i samband med den utvalda analysmodellen. Detta kan undvikas genom omprövning av modellen, om det inte går så ska datamätningen tas bort (Trafikverket, 2020).

En vanligt förekommande metod för granskningen av mätdata är att skapa en illustration av deflektionsbassängen. Detta ska sedan studeras visuellt.

Trafikverket hävdar i sina kravdokument om vilka punkter som ska uppmärksammas vid beslut om att exkludera mätdata (Trafikverket, 2020):

- Om djupet av deflektionsbassängen inte reduceras gradvis i riktning från belastningscentrum.
- Om ingen deformation har uppmätts vid en eller flera av givarna.
- Om det råder om en stor avvikelse mellan en punkt och de närliggande punkterna.
- Om deflektionsbassängen ser onormal ut. Detta är särskilt avseende på överbyggnader med mycket skriftande egenskaper i både längs- och tvärled, alldeles nära mätpunkten och vid väldigt stora spruckna, skadade och lappade ytor.

3.4.2 Bärighetsmått enkla beräkningar

Det kan tillämpas förenklade bärighetsmått för genomförandet av en grundläggande beräkning av överbyggnadens strukturella tillstånd, t.ex. D_0 som anger deflektionen i belastningscentrum. Genom att identifiera deflektionsbassängens form, kan flera beräkningsindex (deformationsbassängsparametrar) hjälpa oss med att analysera överbyggnadens olika komponent. Dessa index är Surface Curvature Index (SCI), Base Curvature Index (BCI) och Base Damage Index (BDI). Genom dessa deformationsbassängsparametrar går det att identifiera styvheten i vägkroppens olika delar, visas i Tabell 7 nedan (Trafikverket, 2020).

Tabell 7: deformationsbassängsparametrar (Trafikverket, 2020).

Parameter	Formel	Beskrivning
Största Deflektion, D_0 [μm]	Deflektionen i belastningscentrum	En indikation på hela vägkroppens 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 vägkonstruktionen. 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 vägkonstruktionen. Används för relativ jämförelse. 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 vägkonstruktionen. Används för relativ jämförelse. Ju lägre värde på BDI desto styvare undergrund.

Det är viktigt att notera att innan beräkningen av de enkla beräkningarna (deflektionsbassängsparametrarna) ska normering av deflektionerna utföras. Detta gör att deflektionerna passar samman med den nominella belastningsgraden, beskriver (Trafikverket, 2020). Detta görs genom att deflektionerna multipliceras med en så kallad justeringsfaktor. Resultatet uppskattas sedan som en kvot mellan den nominella- och uppmätta belastningsgraden. Mer om de enkla bärighetsmåten och hur bärigheten varierar längs vägen redogörs under avsnitt 3.4.3.

Det finns även andra enkla bärighetsmått som kan beräknas med deflektionsdata, så som *ytm modul* och *undergrundsmodul* (Trafikverket, 2020). Likväl går det med dessa enkla moduler att identifiera eventuella variationer i bärigheten av vägen.

Ytmodul (E_0):

Denna modul beskriver styvheten i överbyggnaden (från ytan och nedåt). Detta med avseende på att vägens underlag är homogent, isotropt samt linjärelastiskt. Nedan presenteras beräkningsekvationen av ytmodulen (Trafikverket, 2020):

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

Beskrivning av samtliga beteckningar i ekvationen:

- E_0 = Ytmodul,
- f = en faktor som beror på utformningen av belastningsplattan. Det motsvarar 2 för segmenterade belastningsplattor, eventuellt $\frac{\pi}{2}$ gällande styva belastningsplattor,
- ν = tvärkontraktionstalet,
- σ_0 = kontakttrycket under belastningsplattan, mäts i MPa,
- a = radien av belastningsplattan, mäts i mm,
- D_0 = deflektionens belastningscentrum, mäts i μm .

Undergrundsmodulen (E_u):

Det är mått som indikerar styvheten i undergrunden. Undergrundsmodulen beräknas med hjälp av deflektionen D_{900} som är ett avstånd på 900 mm från belastningscentrum. Detta avseende på givare som befinner sig långt från belastningsplattan. Dessa givare antas kunna reagera på saker som händer långt ner i överbyggnaden. Undergrundsmodulen används till bedömning av E-moduler för terrassmaterial, detta med avseende på bestämning av underhållsåtgärder. Dessutom kan modulen utnyttjas i samband med information, för att kunna dela upp vägen i homogena delsträckor. Nedan presenteras ekvationen av undergrundsmodulen (Trafikverket, 2020):

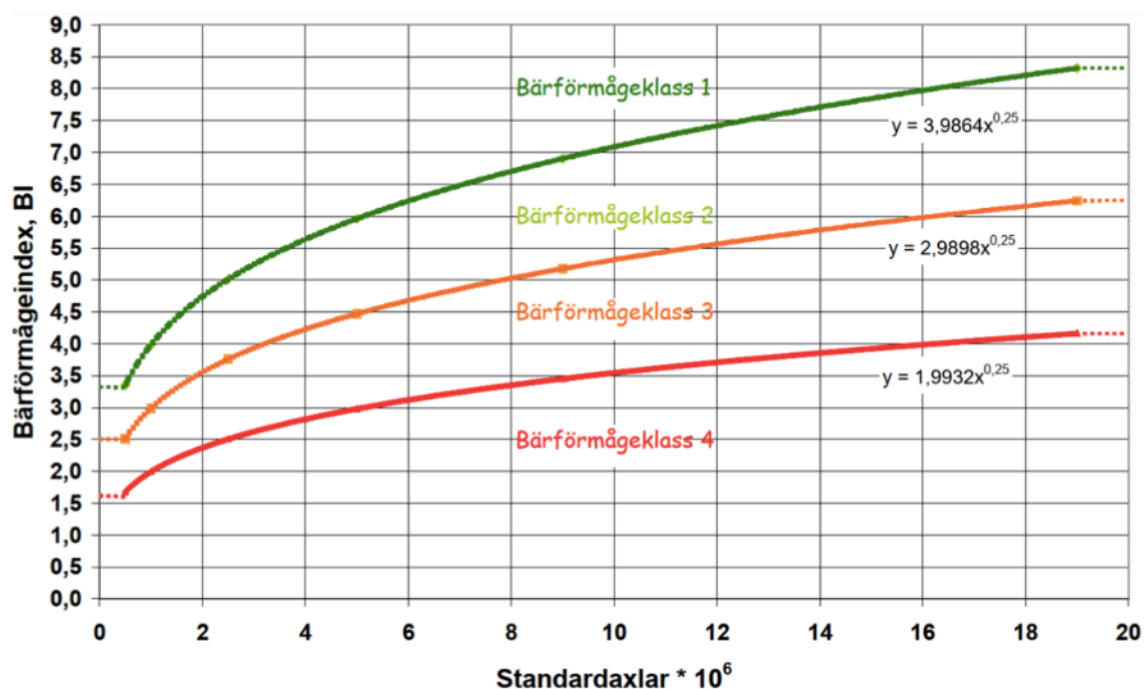
$$E_u = \frac{5,2 \cdot 10^4}{D_{900}^{1,5}}$$

Beskrivning av samtliga beteckningar i ekvationen:

- E_u = Undergrundsmodul,
- D_{900} = deflektionen på avståndet 900 mm från belastningscentrum, mäts i μm .

3.4.3 Bärförmågeklass & bärförmågeindex, BI

Metodberäkning beskriver översiktligt vägens bärförmåga, med kombination av den aktuella trafikbelastningen som lastar vägen och anger dess klassning. Bärförmågeindex, BI betraktas som ett objektivt, dimensionslöst mått som beskriver bärigheten av vägkroppen, se illustrationen i Figur 29. Dessutom är måttet enkelt att bestämma, då det bygger på töjningen i asfalten och med ett högt måttvärde i beräkningen resulteras det i enkla avtagande och slutsatser om att vägens bärighet är bra. Bärförmåga avser vägkroppens strukturella styrka och hur motståndskraftigt det är gällande utmattning. Det kan dras orättmätiga fördelar med avseende på verkliga och fiktiva beläggningar, detta i form av bedömning av dess tillstånd. Detta kan vidare utnyttjas för bedömning av vägars tillstånd både före utförandet av åtgärder men likväl efter. Dessutom kan det omsättas i praktiken för alla typer av belagda vägar (oavsett vilket bitumenbundet slitlager som vägen är utrustad med) (Trafikverket, 2020).



Figur 29: Visar bärförmågeklass avseende på antal standardaxlar som belastar vägkonstruktionen i samband med vägens dimensioneringsperiod samt beräknat bärighetsindex, hämtad av (Trafikverket, 2020). Beskrivning av diagram y-axel= bärförmågeindex, BI, x-axel= Standardaxlar · 10⁶.

Bärförmågan delas in i fyra olika klasser som beskriver bärigheten gradvis. Där bärighetsklass 1 kan i princip jämföras med överbyggnader som GBÖ och BBÖ. Detta är tillskillnad från bärighetsklass 4 som avser mer på svårt drabbade vägar. Det benämns även att dessa konstruktioner är dimensionerade enligt (Trafikverket, 2011), (Trafikverket, 2020).

Bärförmågeindex ändras beroende på vägens tillstånd. Så länge vägen är oskadad, förblir indexet beständigt. Dock kan bärförmågeindexet sjunka i samband med skador av beläggningen, t.ex. att den spricker. Det är även viktigt att påpeka att vägkonstruktioner som är utsatta för sprickor har inga särskilda behov av stora förstärkningsåtgärder, detta utan hänsyn till den höga bärighetsklassen, beskriver Trafikverket (2020). Det benämns även att fallviktsmätningar för jämförelseindex av bärförmågan på olika vägar ska utföras under samma period (rekommenderas från sommar- till höstperioden under året).

För att kunna bestämma beläggningens bärförmågeklass samt få information om de aktuella trafiklasterna som belastar vägen, måste bärförmågeindex beräknas ut först. Detta görs enligt följande ekvation nedan (Trafikverket, 2020):

$$BI = \frac{1000}{\varepsilon_{a,10}}$$

Beskrivning av samtliga beteckningar i ekvationen:

- BI = Bärförmågeindex,
- $\varepsilon_{a,10}$ = temperaturkorrigeringen i horisontell dragtöjning i underkant av beläggningen.

För beräkning av $\varepsilon_{a,10}$, den temperaturkorrigerade dragtöjningen, vid temperatur $+10^{\circ}\text{C}$, redogörs en ekvation nedan (alternativet är töjningen i asfalt som bestäms enligt E-modulen från passningsräkningar, $\mu - strain$) (Trafikverket, 2020):

$$\varepsilon_{a,10} = \frac{\varepsilon_{a,T}}{\left(\frac{T}{10}\right)^{3,08 \cdot 10^{-8} \cdot h_1^2 \cdot D_0}}$$

Beskrivning av samtliga beteckningar i ekvationen:

- $\varepsilon_{a,10}$ = Temperaturkorrigerade dragtöjningen,
- $\varepsilon_{a,T}$ = den beräknade horisontella dragtöjningen, vid temperaturen $T^{\circ}\text{C}$, i $\mu - strain$,
- T = temperaturen i beläggningen, enhet $^{\circ}\text{C}$,
- h_1 = tjockleken av beläggningen, enhet mm,
- D_0 = deflektionens belastningscentrum, mäts i μm .

**Det är viktigt att observera att beräkning av temperaturkorrigeringen betraktas som ej lämplig gällande minusgrader i °C. Dessutom är det stor osäkerhet i samband med mättemperatur nära 0°C.*

För beräkning av dragtöjningen $\varepsilon_{a,T}$, horisontellt i underkant av beläggningen kan följande ekvation användas:

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

Beskrivning av samtliga beteckningar i ekvationen:

- $\varepsilon_{a,T}$ = Dragtöjningen,
- D_0 = deflektionen i belastningscentrum, mäts i μm ,
- D_{300} = deflektionen 300 mm från belastningscentrum, mäts i μm ,
- D_{600} = deflektionen 600 mm från belastningscentrum, mäts i μm .

Efter identifieringen av beläggningens bärförmågeindex, kan en ekvation sammanställas för beräkning av beläggningens bärförmågeklass. Metoden bygger egentligen på *utmattningskriterium för bitumenbundet bärlager*, framställt av (Trafikverket, 2021) och bygger på antalet standardaxlar som beläggningens bundna lager tål, se ekvation nedan:

$$N_{till,BB,i} = f_s \frac{2,37 \cdot 10^{-12} \cdot 1,16^{(1,8 \cdot T_i + 32)}}{\varepsilon_{bb,i}^4}$$

Beskrivning av samtliga beteckningar i ekvationen:

- $N_{till,BB,i}$ = Tillåtet antal standardaxlar för bitumenbundet bärlager, under klimatperiod (i),
- f_s = korrigeringsfaktor, avseende på skadegraden i befintlig beläggning (för nybyggnation betraktas $f_s = 1,0$), Alternativt se tabell 11 för korrigeringsfaktor,
- T_i = temperaturen i bitumenbundna beläggningar, mäts i °C, under klimatperiod (i),
- $\varepsilon_{bb,i}$ = största dragtöjningen (horisontellt) i det bitumenbundna bärlagret, för klimatperiod (i), vid belastningar med en standardaxel på vägytan.

Det går även att tillämpa beräkning för att veta det tillåtna antalet standardaxlar för de bitumenbundna bärlagren med $N_{till,bb}$ (Trafikverket, 2021), se ekvation:

$$N_{till,bb} = \frac{365}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{till,bb,i}}}$$

Beskrivning av samtliga beteckningar i ekvationen:

- $N_{till,bb}$ = Antalet tillåtna standardaxlar för beläggnings bitumenbundna bärlager,
- m = antalet klimatperioder,
- n_i = antalet dygn, under klimatperioder (i),
- $N_{till,bb,i}$ = tillåtet antal standardaxlar för bitumenbundet bärlager, under klimatperiod (i).

Det kan även vara till nytta att säkerställa bärigheten (konstruktioner med bitumenbundna lager >75mm) enligt $N_{till,bb} \geq N_{ekv}$ (N_{ekv} innebär trafiklasten för vägens tekniska livslängd och betecknas som antal ekvivalenta standardaxlar). Detta med till bärighetens utmattning i underkant av de bitumenbundna lagren (asfaltsgrus) som ryms av bindemedeltypen 160/220 (Trafikverket, 2021).

Avseende på vertikala trycktöjningar i ovankant av terrassen gäller beräkning av $N_{te,i}$. Där $N_{till,te} \geq 2 \cdot N_{ekv}$, (Lundberg, 2020). Se ekvation nedan:

$$N_{till,te} = \frac{365}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{te,i}}}$$

$$N_{te,i} = f_s \cdot \frac{38,06 \cdot 10^{-0,8}}{\varepsilon_{te,i}^4}$$

Beskrivning av samtliga beteckningar av ekvationerna:

- $N_{te,i}$ = Beskriver det tillåtna antalet standardaxlar för terrassyta, under klimatperiod (i),
- n_i = antalet dygn, under klimatperiod (i),
- f_s = justeringsfaktor med hänsyn till sprickor och krackeleringar,
- $\varepsilon_{te,i}$ = den största vertikala töjningen i terrassytan, gällande för klimatperiod (i). Detta avseende på belastning med en standardaxel på vägytan.

Korrigeringsfaktorn är en bra indikator på skadegraden i vägen, avseende på sprickor och krackeleringar i de bitumenbundna lagren. Identifieringen av

skadegraden görs genom en uppskattning av skadornas svårighetsgrad samt utbredning (Trafikverket, 2021) stöds även av handboken (Bära eller brista, 2019).

Tabell 8: Korrigeringsfaktor, f_s , hämtad av (Trafikverket, 2021).

	Skadegrad enligt Tabell 12-9							
	0	1	2	3	4	5	6	7
f_s	1,0	0,95	0,9	0,85	0,65	0,45	0,2	0

3.4.3.1 Tvärkontraktionstal

Tvärkontraktionstal (ν) medger eventuella ändringar i vägkonstruktionen vid utsättning av en belastning. Det beräknas som förhållandet mellan töjningen, tvärs- och längs kraftriktningen. Tvärkontraktionstalet är ett dimensionslöst värde och om inga bättre värden finns i det enskilda fallet används ofta *Poissons tal* 0,35. Detta gäller för obundet bär- och förstärkningsmaterial, se Tabell 9 nedan (Trafikverket, 2020):

Tabell 9: Visar tvärkontraktionstal för de vanligt förekommande materiallagern i vägkonstruktioner, hämtad av (Trafikverket, 2020).

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

3.4.4 Olika klasser av analyspaket

Vid utförandet av en analysstudie kan användning av fördefinierade analyspaket tas i anspråk. Dessa analyspaket har sammanställts av (Trafikverket, 2020) och redogörs nedan i punktform:

- Analyspaket 1: $D_0, SCI, BCI, BDI, E_0, E_u$.
- Analyspaket 2: $D_0, SCI, BCI, BDI, E_0, E_u$, eventuellt $\varepsilon_{a,T}, \varepsilon_{a,10}, BI$. passningsräkning av E-moduler.
- Analyspaket 3: $D_0, SCI, BCI, BDI, E_0, E_u, \varepsilon_{a,T}, \varepsilon_{a,10}, BI$ och passningsräkning av E-moduler.
- Analyspaket 4: syftar på avancerade analyser och modeller.

4 Resultat

Detta kapitel avser tillgängliga, befintliga mätdata som är utförda och hämtade av Ramboll RST. Mätdata avser mätningar på respektive Raptor (RWD) samt fallviktsmätningar (FWD) som är mätta på samma områden och ställs i jämförelse med varandra.

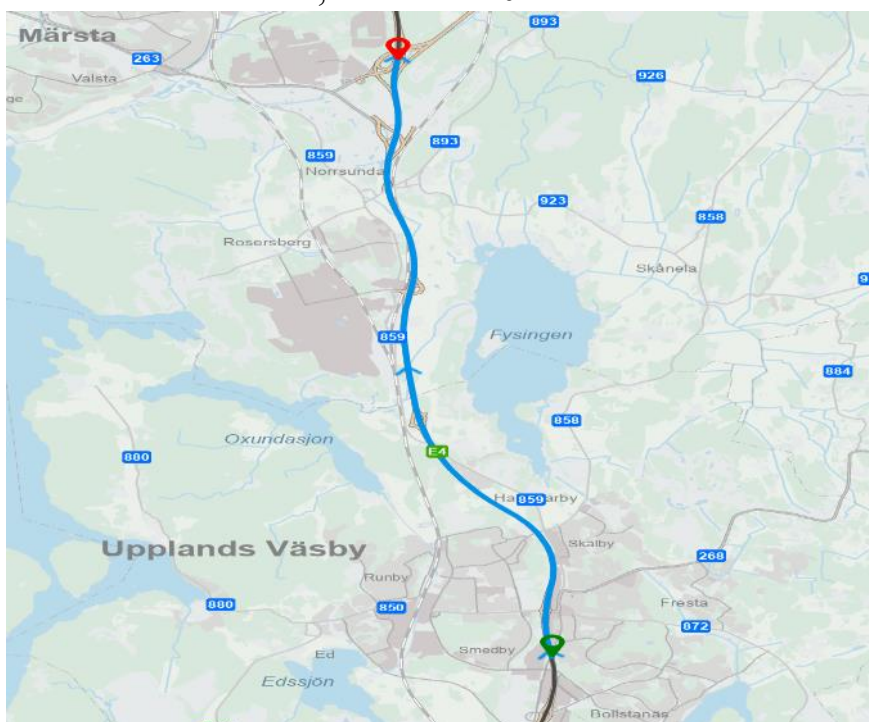
4.1 Undersökningsområden

Samtliga objekt som har analyserats och beräknats genom Excel. Mätdata från respektive Raptor och fallvikt presenteras i Bilaga 1–2, detta för att ge ett tydligare perspektiv på hur de olika mätpunkterna egentligen beter sig, när de ställs i jämförelse. Dessutom har en förenklad regressionsanalys utförts, se *Bilaga 4*.

4.1.1 Projektmätning Arlanda-Glädjen (79 500 – 92 470 m)

Mätningarna för jämförelse mellan FWD och RWD utfördes på E4 Arlanda-Glädjen av Ramboll, där mättes en sträcka på ca. 12 970 meter med startsektion vid 79 500 som slutar vid 92 470 meter, enligt NVDB:s längdmätning av den totala väglängden. I denna sträcka har man mätt på med både Raptor verktyget som täcker själva längden 79 500 – 92 470 m under 2022-05-22, men även fallvikt (FWD) som täcker längden 80 179 – 92 362 m under 2022-05-18. Raptor mätningen utfördes kl.21.00, med en lufttemperatur på ca. 19° och en beläggningstemperatur omkring 14.34°. FWD mätningarna utfördes vid ungefär liknande tid på dygnet ca. kl.21.30, temperaturen var ca. 15,6° och beläggningstemperaturen var omkring 17,8°, se *Bilaga 3*. Samtliga mätningar utfördes på körfält K1, Raptor mätte på både K1 och K2 i med- och motriktning. Dock valdes det att begränsa denna jämförelsestudie, enbart till K1 mätningar i medriktning av respektive mätningssmetod. Raptor mätte i ett intervall om jämna 10 meter, däremot så har fallviktsmätningarna utförts inom ett intervall om ca. 200 meter emellan längs den uppmätta sträckan. Till hjälp har verktyget (Trafikverket, PMSv4 2024) används för att identifiera sträckan samt få fram dataanalys på det, se Figur 30. Enligt PMSv4 rör det sig om en ABS-beläggning (stenrik asfaltbetong). Den beräknade årsdygnstrafiken (ÅDT) uppskattas att vara omkring 43 840 fordon totalt. Valet av just denna vägsträcka har varit kritiskt, ty beläggningen är av större stenmaterial, vilket gör vägen starkare och därav tål större belastningar från trafiken. Vid undersökning har bärighetsmått $D_0 - D_6$, SCI, BCI, BDI, E_0 , E_u samt BI varit i fokus för jämförelse samt analys. Detta avser då analyspaket 2, vilket presenteras under avsnitt 3.4.4 *Olika klasser och analyspaket*. Samtliga

formler för dessa beräkningar finns i delkapitel 3.4 *Analys och bearbetning av deflektionsdata*. När det kommer till höjden, load, distansen från belastningsplattan samt positionering för samtlig mätmetod så har de utförts under liknande förhållanden, se Tabell 10.



Figur 30: Visar det studerade området på E4 Arlanda, Glädjen, där den blåa linjen representerar den uppmätta sträckan av Raptor och FWD på 12 970 meter, hämtad ifrån (Trafikverket, PMSv4 2024).

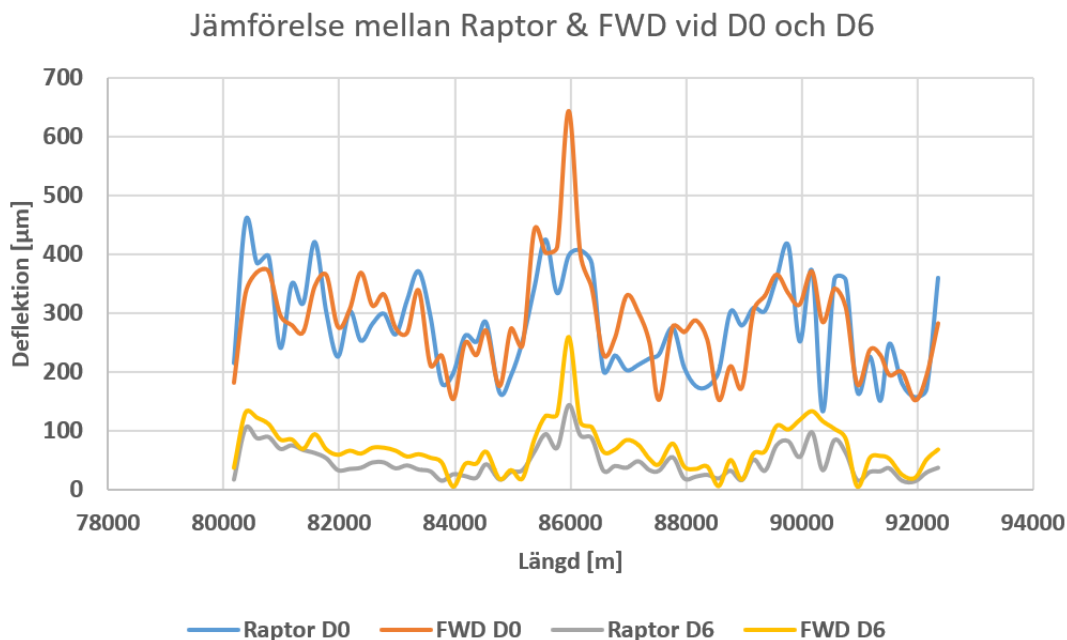
Tabell 10: Visar information på utförandet, Raptor och Fallvikt (FWD).

Raptor (RWD)							
Nummer:	0	1	2	3	4	5	6
Höjd:	1	2	3	4	-	-	-
Load: [kN]	10	24,9	40	50	-	-	-
Distans: [cm]	0	20	30	45	60	90	120
Position	centrum	bakom	bakom	bakom	bakom	bakom	bakom
Fallvikt (FWD)							
Nummer:	0	1	2	3	4	5	6
Höjd:	1	2	3	4	-	-	-
Load: [kN]	10	24,9	40	50	-	-	-
Distans: [cm]	0	20	30	45	60	90	120
Position:	centrum	bakom	bakom	bakom	bakom	bakom	bakom

För att kunna utföra en rättvis bedömning och jämförelse, har samtlig load data av Raptor och fallviktsmätningar normerats till 50 kN. Detta p.g.a. att storleken på själva belastningen kan ha en effekt på mätresultaten. Det utfördes bakåtberäkningar, där positionerna som utgicks ifrån är centrum till bakom hjulet, med distans på gators från 0–120 cm, som motsvarar punkterna $D_0 - D_6$ i denna studie.

4.1.1.1 Deflektion $D_0 - D_6$

I denna del har fokus varit på jämförelse av deflektionspunkterna $D_0 - D_6$ för Raptor mätningar och fallviktsmätningar. Som tidigare nämnt så har man mätt och tagit fram betydligt mer mätpunkter (var 10:e meter) med hjälp av Raptor än vad fallvikten har, som då mätte ca. var 200 meter. Därav genom Excel verktygets funktioner har mätdata från Raptor approximerats i enlighet med fallvikt, för att få fram punkter i sektioner som kan jämföras med punkterna från fallvikten. För jämförelse av punkter från Raptor samt fallviktsmätningar, approximativt under samma punkt (sektion) valdes studera deflektionerna vid positions-punkterna D_0 samt D_6 , resultaten redovisas i Figur 31 nedan. Resterande deflektionspunkter presenteras separat i diagram under bilagor, *avsnitt 8.2*, Figur 53–60, dessutom tas det med diagram på hur pass mycket respektive deflektion avviker ifrån varandra. I Figur 31 visar x-axeln på sektionerna (löpande längd) i meter och y-axeln visat på deflektionerna i μm .



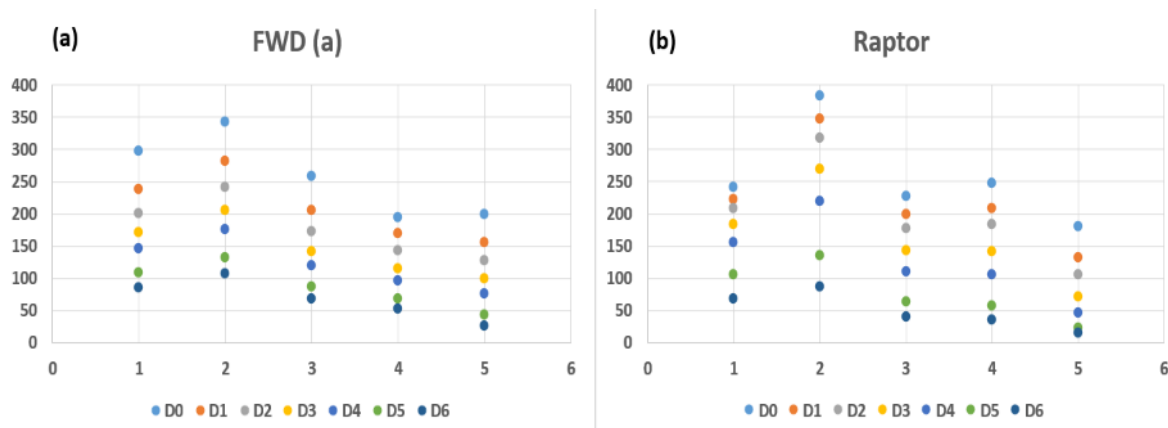
Figur 31: Raptor- approximativa mätningar och FWD mätningar, i punkterna D_0 samt D_6 .

Enligt intervallen visar resultaten av Raptor approximationerna från 10 meters mätpunkter till 200 meters mätpunkter en god korrelation med fallviktsmätningarna, detta gällande deflektionsstorlek, både från D_0 likväl D_6 . Det vill säga båda verkar följa samma trend genom sektionen. Raptor erhöll generellt lägre deflektionsmätningar i jämförelse med FWD, särskilt ju längre ut man kommer från deflektionspunktern, vilket syns tydligt vid D_6 . Det går även att notera en tydlig avvikelse på ca. 250 μm mellan mätningarna ungefär vid sektion 86 000. Denna trend går även att se i samtliga deflektionspunkter samt deras avvikelser under Bilaga 2.

Vidare undersöktes sektionerna mer djupgående för att hitta punkter, där både Raptor och fallviksmätningarna är utförda på exakt samma ställe. Det identifierades fem sektioner längs hela den uppmätta sträckan som kan ge en mer klarare bild på hur de två mätmetoderna egentligen förhåller sig när det kommer till deflektionspunkter mellan D_0 och D_6 , se Figur 32 nedan för jämförelse. Dessa sektionspunkter som plottades ut är följande:

Tabell 11: Faktiska punkter där Raptor och FWD har mät på.

Nummer:	1	2	3	4	5
Sektion:	80 980	86 370	86 770	91 520	91 740



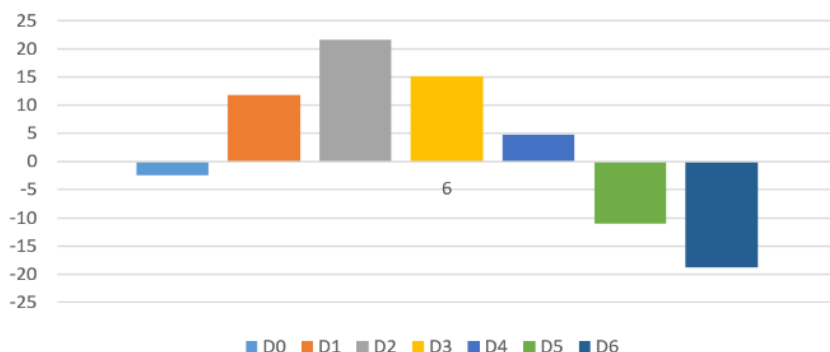
Figur 32: Diagram (a), visar deflektionspunkterna mätta med FWD, diagram (b) visar deflektionspunkterna mätta med Raptor.

Generellt följer deflektionerna av Raptor, se Figur 32 t.v. en liknande kurva som mättningspunkterna utfärdade med FWD, i Figur 32 t.h. Trots denna likhet går det att notera en del avvikelser, främst vid deflektionspunkterna från $D_0 - D_3$, där det visar en skillnad med ca. $40 - 30 \mu m$ lägre deflektion vid Raptor mätningarna. När man kommer längre bort från deflektionscentrumet, verkar deflektionsvärdena överensstämma mer med varandra, då avvikelserna i deflektion sjunker i absoluta värden samtidigt som de är mindre. Nedan har Tabell 12 sammanställts för att redovisa samtliga resultat från dessa fem sektioner. Dessutom har diagram i Figur 33 en tydligare illustration av avvikelserna mellan mättningsmetoderna.

Tabell 12: Visar avvikelserna mellan Raptor- och fallviksmätningar.

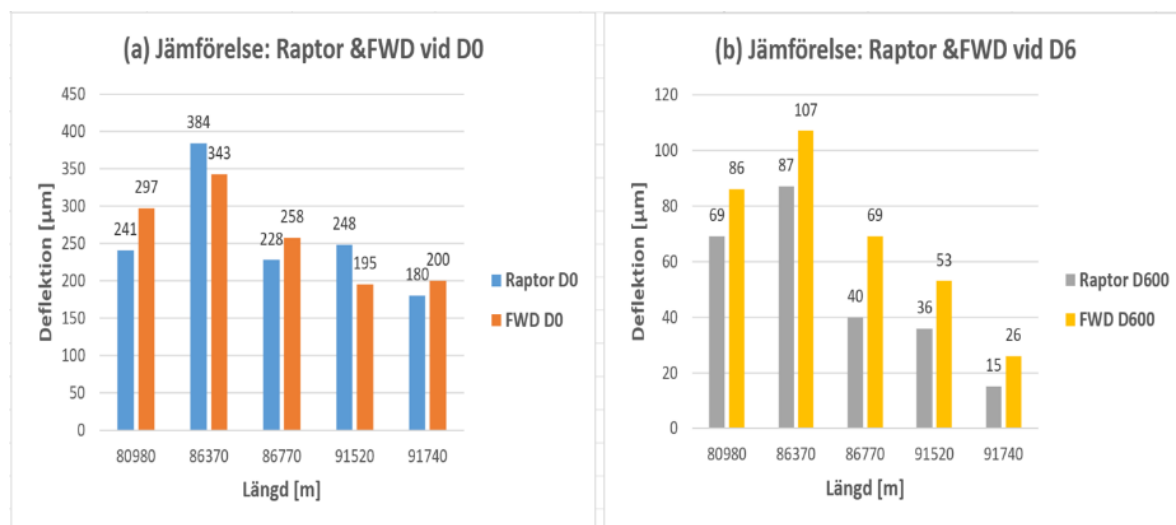
		Avvikelse [Absolutbelopp]						
Nr:	Sektion	D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
1	80 980	56	16	8	13	10	3	17
2	86 370	41	65	77	64	43	2	20
3	86 770	30	7	5	2	9	24	29
4	91 520	53	39	39	26	10	10	17
5	91 740	20	22	21	29	30	20	11
Medel. avvikelse		-	40	29,8	30	26,8	20,4	11,8
Standardavvikelse		-	15	23	29	23	15	10

Medel diff. i varje deflektionspunkt med tecken



Figur 33: Visar medelavvikelsen för respektive deflektionspunkt, inklusive tecken.

Figur 34, visar de fem faktiska mätningssektionerna vid D_0 och D_6 som ger då en återblick på den approximativa mätningen som presenterades i Figur 31 ovan. Här kan man notera att vid centrumdeflektionen, D_0 , se (a) i Figur 34, dvs. 0 mm ifrån deflektionscentrum så har fallvikten en större deflektion än Raptor, som sedan avtar vid den andra punkten, då Raptor värden är högre. Det förekommer en del variationer mellan metoderna, men avvikelserna är generellt relativt små.



Figur 34: Exakta Raptor mätningar och fallviktsmätningar, vid deflektionspunkterna D_0 och D_6 .

Det som är intressant i detta fall är att värden vid deflektionspunkten D_6 , dvs. deflektioner som befinner sig 1200mm bakom hjulet, se (b) i Figur 34 tyder på att Raptor ger lägre deflektion på samtliga fem sektioner. Detta stöder den trend som illustrerades i Figur 31 ovan, där de approximativa Raptor värdena också visar en lägre deflektion längs hela intervallet än vad fallvikten gör. Detta tyder på att det finns en god korrelation mellan mätinstrumenten ju längre bort man kommer ifrån belastningscentrumet just i detta fall.

4.1.1.2 Deformationsbassängsparametrar

Förenklade bärighetsmått har beräknats för att analysera hur Raptor och fallvikten bedömer överbyggnadens strukturella tillstånd. För att kunna analysera överbyggnadens samtliga komponenter, har index (parametrar) som Surface Curvature Index (SCI), Base Curvature Index (BCI) samt Base Damage Index (BDI) använts. Dessa bärighetsmått används och beräknas på, enligt delkapitel 3.4 *Analys och bearbetning av mätdata*, avsnitt 3.4.2, se även Tabell 5 där ekvationerna presenteras. Det är även viktigt att påpeka att beräkningar av fallviktsmätningar har normaliserats till en belastning med 50 kN. Dessutom har index-formlerna korrigerats efter deflektionspunkterna som råder och är angivna som mått för denna studien.

Raptor värden har beräknats och följande formler har använts för beräkning av samtliga parametrar:

$$SCI: D_0 - D_2$$

$$BCI: D_4 - D_5$$

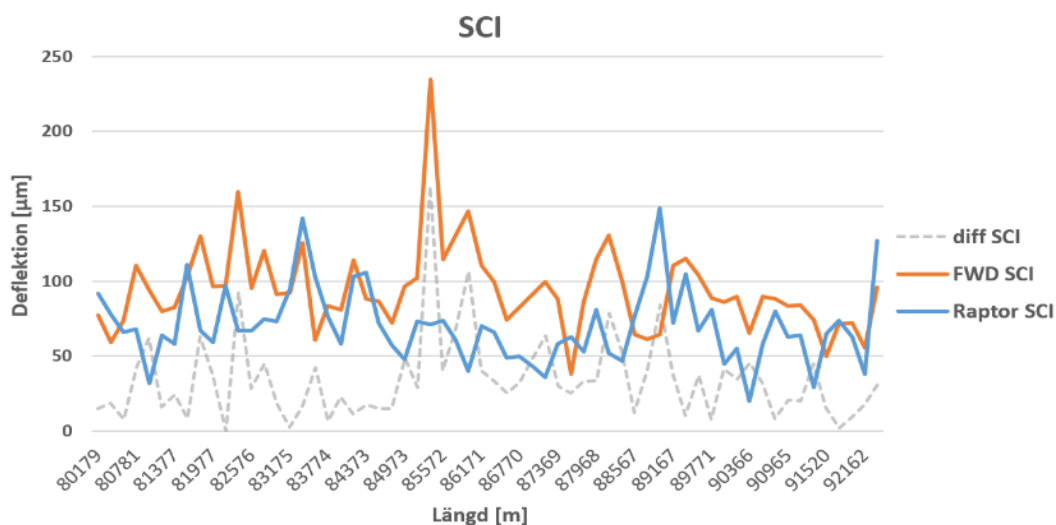
$$BDI: D_2 - D_4$$

Fallviktsmätningarna har även beräknats med Excel-verktyget, det har reglerats för att ha en liknade belastning som Raptor har, dessutom som har det korrigerats med exakt samma deflektionspunkter som för Raptor ekvationerna för en godtycklig jämförelse, se ekvationerna nedan:

$$SCI: \frac{50}{belastning} \cdot \left(\frac{(D_0 - 50)}{(belastning \cdot D_2)} \right)$$

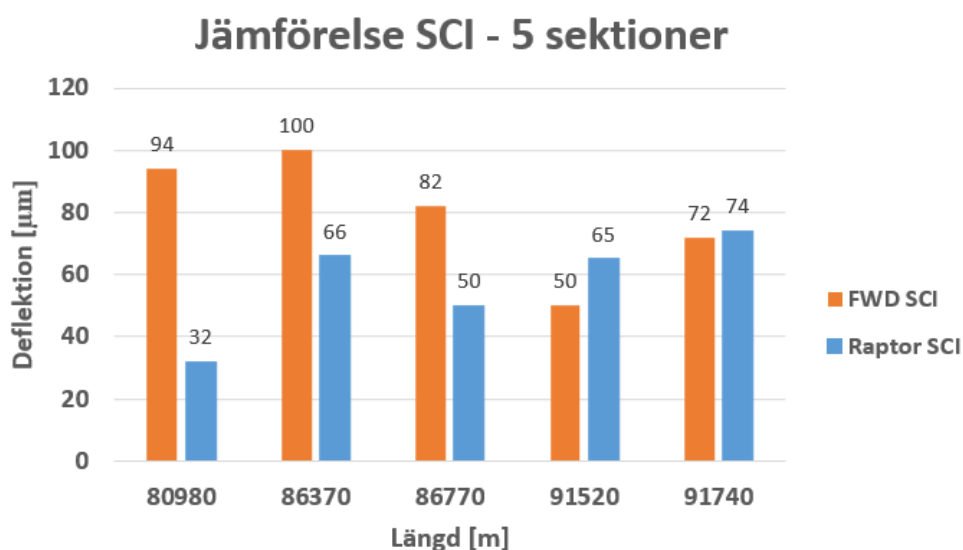
$$BCI: \frac{50}{belastning} \cdot \left(\frac{(D_4 - 50)}{(belastning \cdot D_5)} \right)$$

$$BDI: \frac{50}{belastning} \cdot \left(\frac{(D_2 - 50)}{(belastning \cdot D_4)} \right)$$



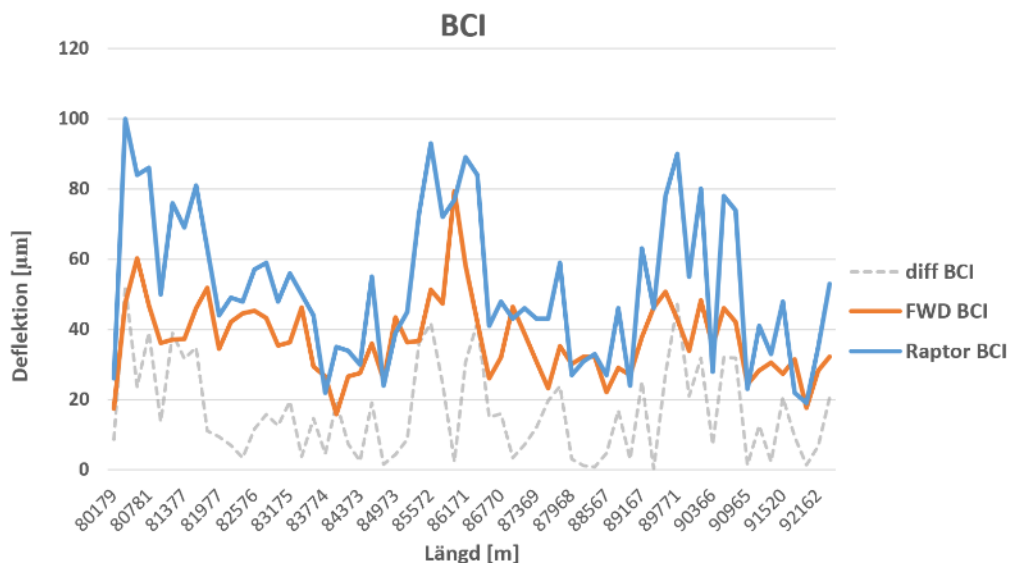
Figur 35: SCI - beräkningar längs sträckan, visar Raptor- approximativt (blå), FWD-mätningar (orange) samt avvikelserna (streckat grå).

SCI som är ett mått på styvheten i övre delen av konstruktionen. Detta där D_0 , motsvarar 0 mm från belastningscentrum samt D_2 , motsvarar 300 mm bakom belastnings-centrum (gäller både för Raptor och FWD). Enligt Figur 35 ovan kan man konstatera att Raptor approximationen generellt erhåller lägre värden (medelvärde: $70 \mu m$) än vad FWD gör (medelvärde: $94 \mu m$), vilket tyder på styvare övre del av konstruktionen enligt Raptor värden jämfört med vad FWD mätningarna visar. Större avvikelse förekommer vid sektion 85 000 som sedan trappas ned till ett mer likartat mönster vis slutet av mätningarna. I Figur 36 nedan visas SCI värden för de 5 punkterna där mätmetoderna mätte på samma ställe.



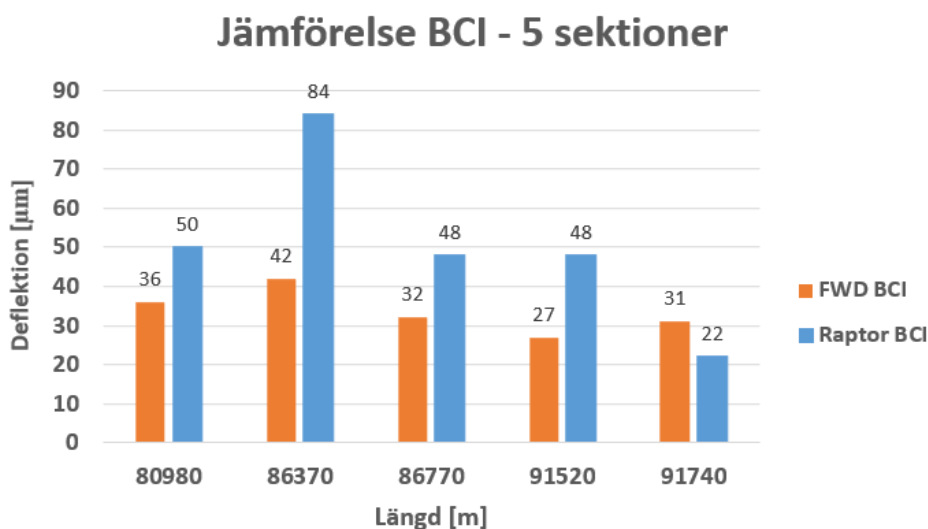
Figur 36: Exakta Raptor- och FWD mätningar, visar SCI värden samt avvikelse.

BCI är till för att mäta styvheten i konstruktionens mellersta del, dvs. med deflektionsavstånd mellan 300 – 600mm. Enligt Figur 37 nedan kan en korrelation observeras, där mönstret av båda mätmetoderna överensstämmer med varandra.



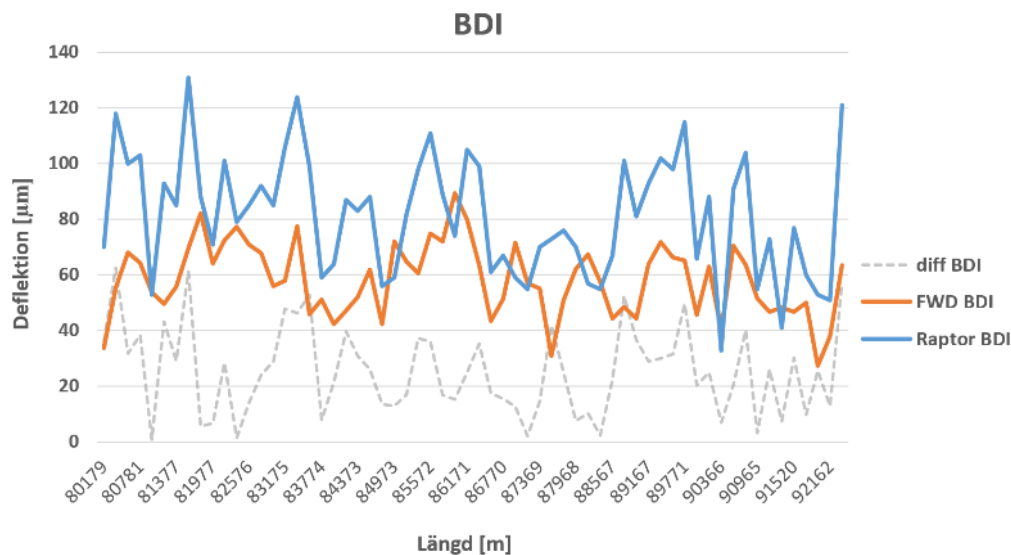
Figur 37: BCI- beräkningar längs sträckan, visar Raptor- approximativt (blå), FWD- mätningar (orange) samt avvikelser (streckat grå).

Raptor värden (medelvärde: $52 \mu m$) är allmänt något högre än värden på FWD (medelvärde: $37 \mu m$), till skillnad ifrån SCI beräkningen som visade på motsatsen. Detta innebär att FWD visar på att konstruktionen är styvare än vad Raptor visar. I Figur 38 nedan, visas de fem faktiska sektioner som uppmättes av både Raptor och FWD. Det går att notera en stor avvikelse vid provsektion 86 370, där avvikelsen är dubbelt så stort. Som tidigare nämnt så är det en trend på avvikelser, särskilt gällande sektion 85 000 – 86 000. Trots detta visar de fem faktiska punkterna på att Raptor erhåller högre värden, vilket återigen styrker den approximativa jämförelsen.



Figur 38: Exakta Raptor- och FWD mätningar, visar BCI värden samt avvikelse.

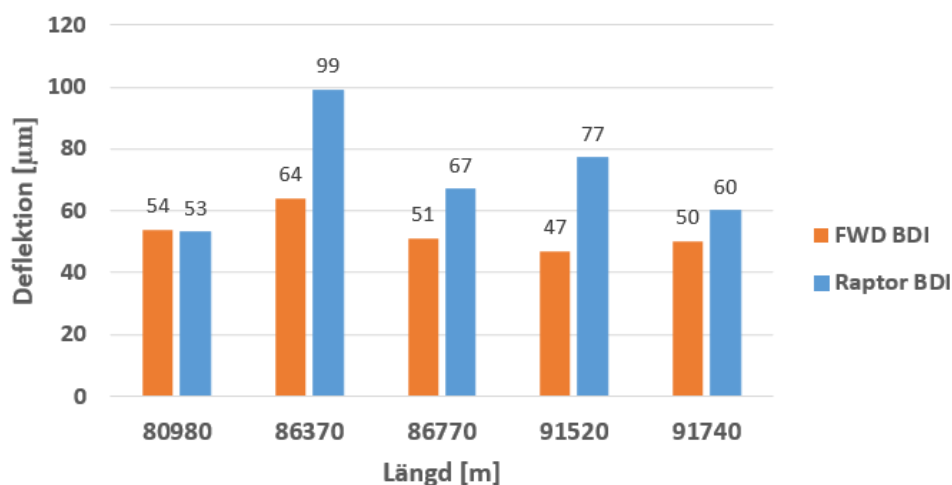
BDI är ett mått, till för att visa styvheten i konstruktionens nedersta del. Kriterier på deflektionsavstånden i denna parameter är mellan 600-900mm. Figur 39 nedan, visar på större avvikelser i början av den uppmätta sträckan, fram till ca. 84 000m där avvikelserna reduceras, vilket sedan ökar vid ca. 89 000m fram tills slutet på mätintervall.



Figur 39: BDI- beräkningar längs sträckan, visar Raptor- approximativt (blå), FWD- mätningar (orange) samt avvikelser (streckat grå).

FWD erhåller allmänt lägre deflektionsvärden, som tyder på en styvare undergrund än vad Raptor mätningar visar. Enligt de faktiska provmätningpunkterna kan man se att Raptor värden är i genomsnitt högre än FWD värden, vilket stämmer överens med den approximativa jämförelsen ovan. Dessutom så är avvikelserna betydligt lägre i de faktiska mätpunkterna, observera bland annat sektion 80 980 i Figur 40 nedan, som visar på nästintill ingen skillnad.

Jämförelse BDI - 5 sektioner

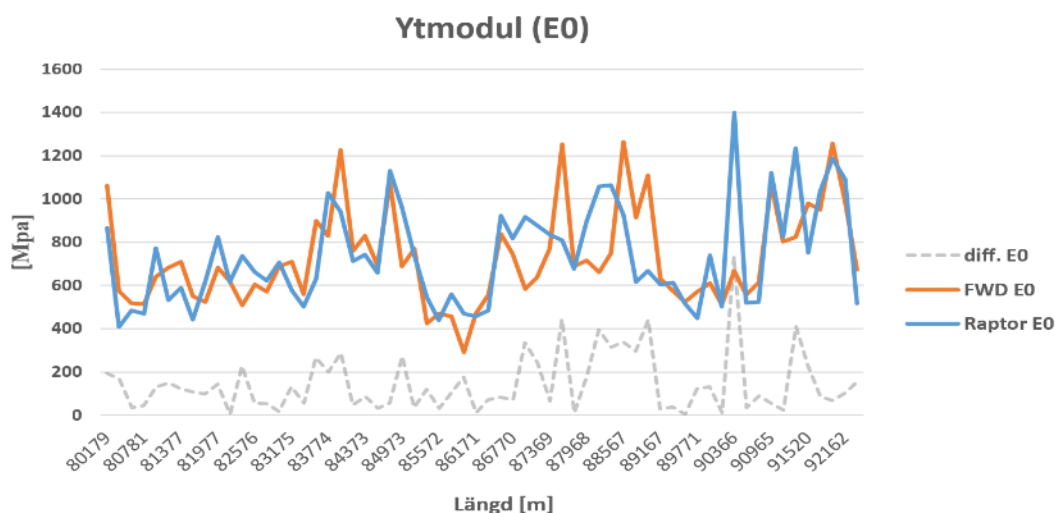


Figur 40: Exakta Raptor- och FWD mätningar, visar BDI värden samt avvikelse.

4.1.1.3 Ytmodul & Undergrundsmodul

Med hjälp av deflektionsdata kan man även beräkna andra bärighetsmått. Sådan bärighetsmått kan vara ytmodul och undergrundsmodul. Dessa moduler kan användas för att studera variationer längs vägen. I detta avsnitt utnyttjas dessa bärighetsmått för att se variationerna mellan användning av Raptor och FWD.

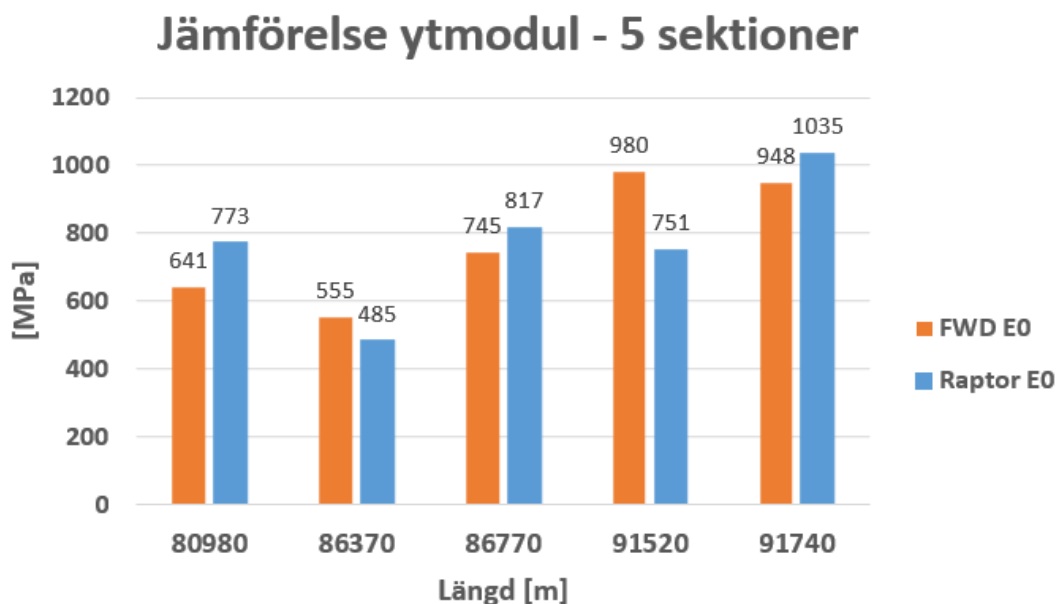
Ytmodulen är en elasticitetsmodul som används för att se styvheten i överbyggnaden, detta från ytan och nedåt. När det kommer till undergrundsmodulen så är det ett bra mått på att undersöka vad som egentligen händer djupt ner i vägkroppen. Detta genom att utnyttja deflektionerna som befinner sig längre bort ifrån belastnings-centrumet. Beräkningar, ekvationer samt eventuella förklaringar finns i delkapitel 3.4 *Analys och bearbetning av deflektionsdata, avsnitt 3.4.2 Bärighetsmått enkla beräkningar*. Formlerna för beräkningen har tillagts i Excel-verktyget för att sedan sammanställa samtliga mätdata från Raptor och fallvikt.



Figur 41: Ytmodul-beräkningar längs sträckan, visar Raptor- approximativt (blå), FWD- mätningar (orange) samt avvikelse (streckat grå).

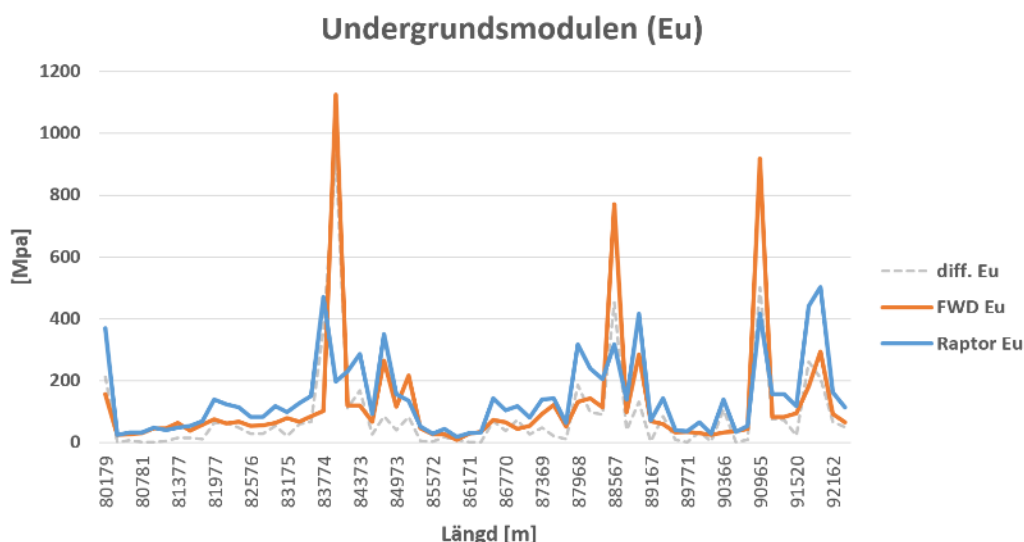
Figur 41 ovan visar att ytmodulen för Raptor samt FWD har ett mönster där de överensstämmer med varandra, fram till omkring sektion 87 000, då börjar de avvika en del. Båda mätmetoderna visar på ett relativt lägre värde gällande första halvan av mätintervall, som sedan ökar en bit mot sträckans andra halva, detta tyder på att både Raptor och FWD uppfattar att vägkroppen blir styvare längre fram. Raptor har ett medelvärde längs sträckan på 735 MPa, medan FWD visar ett medelvärde på 723 MPa. Det innebär att båda förhåller ett liknade värde längs sträckan, dock är detta ett medel, vilket beskriver inte riktigt avvikelserna som tillkommer på olika platser. Därav är det bra att undersöka de fem exakta punkterna som det mättes på, i Figur 42. Där kan man se att avvikelserna omkring sektion 86 000 är låga jämfört med

avvikelsen vid punkt 91 520. Detta stärker den de approximativa Raptor värden, då det är en tidlig likhet mellan mätmetoderna i den första halvan av sträckan, vilket innebär lägre avvikelser som sedan ökar vid den andra delen av sträckan. Generellt visar detta på en god ytmodul som ligger på ett intervall omkring 1400 – 400Mpa, rapporterat av Raptor, samt omkring 1300 – 300Mpa av FWD. Båda mätningarna visar att vägen över lag har god bärighet.



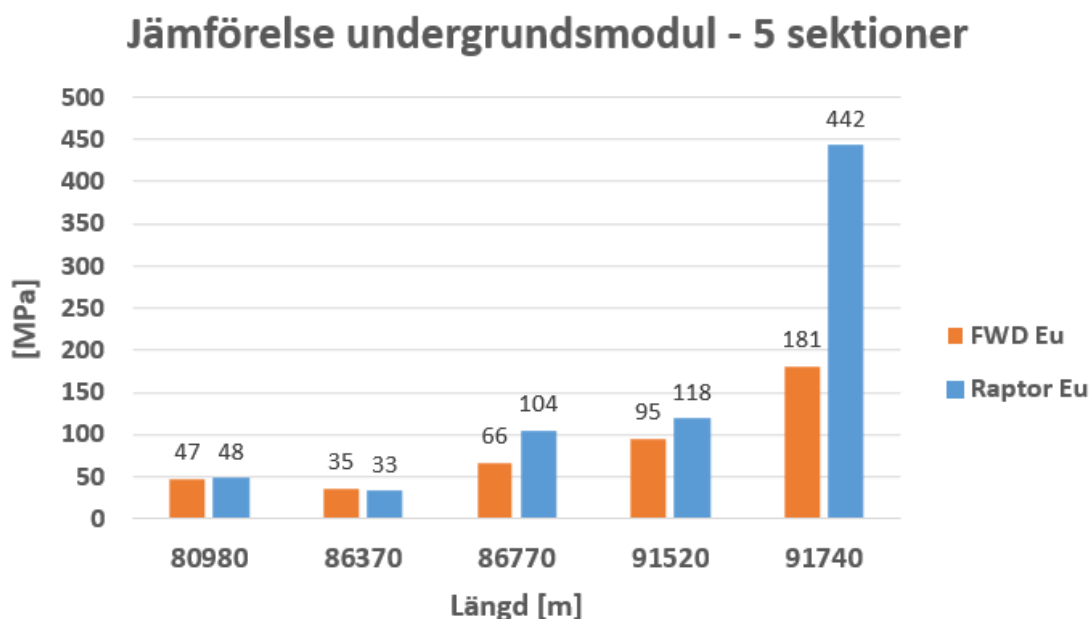
Figur 42: Exakta Raptor- och FWD mätningar, visar ytmodul-värden samt avvikelse.

Figur 43, visar undergrunden, det kan noteras att både verktygen uppfattar en strängt sjunkande styvhet i början (omkring 50 MPa) fram tills ca. 82 000, som sedan ökar längre fram i mätningen. Man betrakta tre, tydliga punkt av FWD mätningarna som avviker ganska stort, vilket tyder på väldigt hög styvhet, i jämförelse med hur de resterande punkter egentligen förhåller sig längs sträckan. Detta kan bero på mätfel då de avviker med mer än dubbla värden. Det går även att notera förhöjda värden från Raptor mätningarna runt om kring dessa tre avvikelser. Det kan innebära att styvheten faktiskt är hög vid dessa sektioner och att terrassen är hård. Detta skulle eventuellt bero på att berg finns närmre ytan i dessa punkter än på resten av vägen. Förutom dessa tydliga avvikelserna så är det ett godtyckligt mönster som kan iakttas av mätmetoderna, särskilt vid de sektioner där undergrunden uppvisar värden under 200 MPa.



Figur 43: Undergrundsmodul - beräkningar längs sträckan, visar Raptor-approximativt (blå), FWD- mätningar (orange) samt avvikelserna (streckat grå).

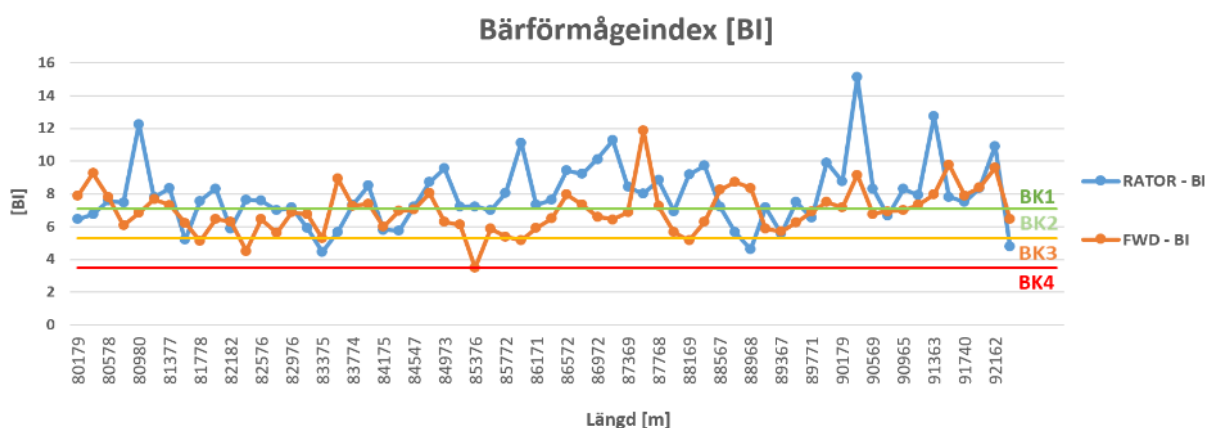
För att vidare analysera förhållandet mellan Raptor och FWD vid mätning av undergrunden, observeras de exakta mätpunkterna, där båda metoderna hamnade på, se Figur 44 nedan. Det visar på bra resultat ifrån mätpunkt 80 980 samt punkt 86 370, där bägge visar på en avvikelse som motsvarar 1 MPa. Tittar man vidare på punkterna 86 770 samt 91 520 så är avvikelsen mer högre mellan Raptor och FWD. Dock så avviker det väldigt mycket vid punkt 91 740. Detta kan kopplas till Raptor mätningarna och fallviktsmätningarna som visas i Figur 43, där tre områden verkar ha en onormal variation och just punkt 91 740 ingår där. Bortsett ifrån denna punkt, visar de fyra andra punkterna en god överensstämmelse.



Figur 44: Exakta Raptor- och FWD- mätningar, visar undergrundmodul värden samt avvikelse.

4.1.1.4 Bärförmågeindex, BI

Detta avsnitt avser beräkning samt klassning av bärförmågeindex, mer om detta finns beskrivet i delkapitel 3.4 *Analys och bearbetning av deflektionsdata*, 3.4.3, inklusive diverse formler som användes för denna jämförelseberäkning. Här fokuseras det på hur respektive mätverktyg mäter töjningen i asfalten, som sedan kan användas för att analysera vägens återstående livslängd. I samband med utförandet av beräkningarna har data av asfaltstjockleken h_1 hämtats av operatören, genom georadarmätning längs den studerade sträckan. Det valdes att enbart fokusera på K1 i medriktning för Raptor mätningarna, med den särskilda anledningen av att kunna jämföra det med FWD mätningar, då det antogs vara bättre till bedömning samt jämförelse.

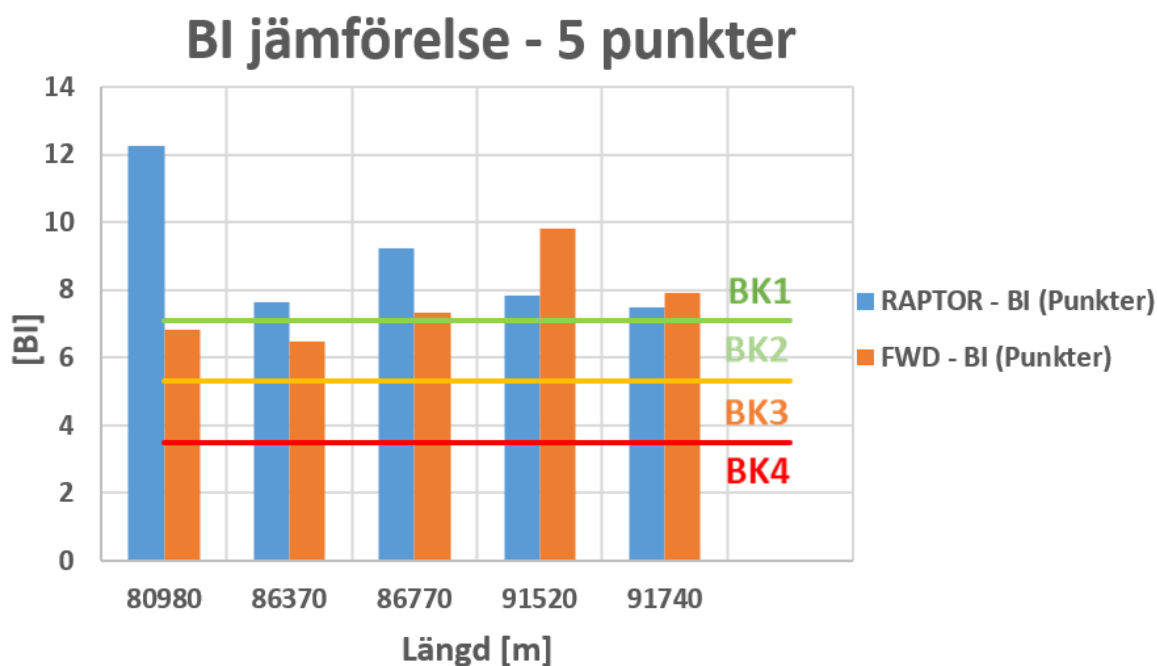


Figur 45: Bärförmågeklass, avser Raptor- approximationer samt FWD- mätningar, medriktning, K1.

Figur 45 ovan visar på ett jämförelseindex. Där uppmärksammas det att Raptor generellt tolkar att vägsträckan har en högre bärförmågeklass, jämfört med vad FWD gör. Båda visar på att det rör sig om en hög bärförmåga i början av den studerade sträckan och hamnar på kriterierna för BFK1, dvs. beläggningen är motståndskraftig och tål mer utmattningar. Detta fram tills ungefär sektion 82 000, där de visar ett likartat, sjunkande beteende, från BFK1 till BK2. När indexet sjunker, betyder det i detta fall att beläggningen riskerar att spricka, därav ändras bärförmågeklass. Det finns ett tydligt lägre värde från FWD mätningen, vid ca. 85 000, som hamnar under kriterierna för BFK4. Detta kan bero på skador på beläggningen, eventuella sprickor. Raptor verkar inte uppfatta denna avvikelse. Nedan visas i Tabell 13 antalet punkter för respektive samt bärförmågeklass.

Tabell 13: Sammanställda antal av BK, för respektive apparat

	Raptor	FWD
Bärförmågeklass 1	41 st.	25 st.
Bärförmågeklass 2	18 st.	30 st.
Bärförmågeklass 3	4 st.	7 st.
Bärförmågeklass 4	-	1 st.



Figur 46: Faktiska Raptor- och FWD-mätningar, visar BI värden i 5 punkter.

För att undersöka förhållandet mellan Raptor och FWD, vid tolkning av BI – värden, har återigen de fem kritiska punkterna, där metoderna faktiskt överlappar varandra vid mätning tagits fram. Enligt Figur 46, kan man konstatera att vid tre av dessa fem punkter har både Raptor och FWD tolkat en bärförmåga på vägen, motsvarande BFK1, vilket visar på en god överensstämmelse vid de punkterna. Den mest märkbara skillnaden är punkt 80 980, där de avviker dubbelt så mycket i BI värde, dessutom tolkar de på olika bärklassnivåer. Generellt tenderar Raptor att tolka en högre bärförmåga, enligt Figur 45, och i de fem faktiska punkterna är det inget undantag, som återigen verkar stämma överens med Raptor approximationerna samt FWD-mätningarna.

Samtliga diagram som det har beräknats på för jämförelse, visas under bilagor, för att ge en överblick av hur mätmetoderna förhåller sig till varandra. Dessutom redovisas det även enkla regressionsanalyser av deflektionspunkterna $D_0 - D_6$ för respektive mätningss metod.

5 Diskussion

Tanken med denna studie är att jämföra Raptor med FWD, genom att visualisera det i diagram samt tabeller. Det ansågs vara mer givande att jämföra utifrån FWD:s förutsättningar, detta då Raptor anses ha liknande egenskaper. Dessa egenskaper består i att Raptor har samma antal och avstånd i sina gators (från centrumdeflektionen och bakåt) som de sju givare som en vanlig FWD är utrustad med, s.k. standardplaceringar. Dessutom kan Raptor justeras till att efterlikna den nominella standardbelastningen som motsvarar 50 kN, precis som vid FWD, för att i sin tur mäta deflektionsbassängen genom denna belastning. Därmed har dessa förutsättningar utnyttjats till att utföra denna jämförelse. Å andra sidan får man ha i åtanke att trots att Raptor efterliknar FWD, så mäter metoderna på helt olika sätt i praktiken. Detta då FWD mäter genom provlaster som anges punktvis längs vägen och Raptor mäter kontinuerligt under färd. Denna skillnad är särskilt märkbar då FWD:s provlaster ger oss en symmetrisk deflektionsbassäng, då vikten faller på ett fast fjädersystem. Däremot visar Raptor på asymmetrisk deflektionsbassäng, då den större delen av deformationerna sker bakom hjullasten. Ytterligare en märkbar skillnad är antalet mätpunkter, där Raptor mäter på upp till ca 1200 punkter på en 200 mm bred linje kontinuerligt visas i Figur 19, kontra FWD som mäter enstaka punkter med jämna mellanrum.

I fältstudie som gjorts av Madsen och Pedersen (2022) har simuleringar genom att framåtsimulera FWD mätningarna till att efterlikna Raptor mätningarna i antal utförts, detta då FWD har betydligt färre punkter från början. I denna studie valdes ett annat sätt hantera mätdata. Raptor mätningarna simulerades till att efterlikna fallviktsmätningarna under samma sträcka istället. Raptor- mätningarna började i denna fältstudie ca. 300 meter före fallvikten, dessutom mäter de var 10:e meter vilket motsvarar totalt 12 97 punkter längs sträckan. Detta är då väsentligt mer än vad fallvikten registrerade, 62 punkter. Därav har beräkningar genomförts till att enbart fokusera på 62 punkter, med tillräcklig noggrannhet för en relativ jämförelse. Detta resulterade i liknande tolkning av vägens bärighet för båda mätmetoderna, precis som fältstudien av Madsen och Pedersen (2022) visade.

Vid undersökningens gång uppmärksammades även fem punkter längs sträckan, där både Raptor och fallvikten hade faktiska mätningar på samma punkt (ej simulerade). Notera att dessa fem mätpunkter ligger på olika sektioner längs sträckan, därför är det av intresse att titta på var och en av dem enskilt. Dessa punkter säger oss egentligen hur mätmetoderna tolkar de faktiska deflektionerna. Därmed utnyttjades de till att vara utgångspunkter till att stämna av de approximerade-Raptor värden med FWD-mätningar.

5.1 Metoddiskussion

Genom att knyta ihop all information som undersöktes med avseende på analyspaket 2 har en förenklad sammanställningen gjorts i Tabell 14. Eftersom Raptor mätningarna innehåller betydligt fler registrerade mätpunkter än vad fallvikten har mätt på, så blir det per automatik ett fåtal mätpunkter som faktiskt stämmer överens med varandra (överlappar), vilket det har konstaterats fem punkter. Däremot så har Raptor värden approximerats till att ligga i linje, positionsmässigt med FWD. Dessa simulerade värden presenterades i diagram enligt föregående avsnitt *Resultat 4*, och gemensamma drag kan beaktas. Syftet med att approximera Raptor-mätningarna var för att enkelt kunna jämföra dem med fallviksmätningarna. Detta för att studera mönster och värden av diverse bärighetsmått utifrån lika många mätpunkter. Vid hantering samt bearbetning av rådata och approximationer har användningen av Excel-verktyget varit givande, och gav betydelsen i denna rapport. Detta med avseende på att det gav en bredare förståelse samt genom att visualisera hur mätmetoderna egentligen beter sig när de simuleras och ställs inför olika jämförelser. Därför anses den valda metoden vara passande då det dels går att studera olika bärighetsmått för respektive apparat, och dels för att minska på svårigheten med att jämföra spridningen av mätvärden. Andra verktyg som kan vara användbara är bland annat Python eller MATLAB. Python är bra för numerisk simulation samt hantering av större datamängder, den kan även utföra automatiska analyser till skillnad från Excel där det utförs manuellt. MATLAB är ytterligare ett verktyg som kan vara bra alternativ till Excel, där det också går att utföra simulationer av större datamängd. En nackdel med att approximera värden är att det blir mer komplicerat att tolka samt avbilda den verkliga situationen. För att det ska fungera i detta arbete valdes en förenklad simulering, där mönster samt beteende undersöktes utan att förvränga verkligheten allt för mycket. En nackdel med att approximera värden är att det kan dölja på olikheterna i detaljnivå. Ytterligare en nackdel vid att approximera är att man kan tappa relevant information. Detta där viktiga komponenter samt skillnader kan döljas, vilket i sin tur kan rubba uppfattningen av apparaternas verkliga funktion.

En alternativ metod för att avhålla sig från felaktiga indata är att använda statistiska metoder, för att jämföra Raptor med fallvikt utan att ändra på antalet mätpunkter. Detta kan utföras genom bland annat regressionsanalys eller sannolikhetsfördelningar, där man kan skapa en större mängd av slumpmässiga utfall. Ett annat alternativ är att få in mer data från fallvikten och öka antalet mätpunkter, på så sätt kan apparaterna enkelt jämföras med varandra. Detta kan tillämpas genom att exempelvis utnyttja fallvikts-mätningar som är utförda på var 25:e meter istället för var 200:de meter. Det

går även att framåtsimulera fallviktsmätningarna till att efterlikna Raptor-mätningarna, precis som studien som utfördes av Madsen & Pedersen (2022). Därmed utföra en känslighetsanalys och studera ifall simuleringen har en märkbar betydelse ifall det är Raptor eller fallvikten som approximeras. Den givande metoden är att studera fler exakta punkter där båda apparaterna mäter på. I denna studien har totalt fem sådana punkter noterats. Det vore mer givande att ha fler av sådana punkter för att kunna dra giltiga slutsatser om apparaternas likheter såväl skillnader.

Det är även viktigt att beakta att ifall vi hade mätt på en specifik punkt (hypotetiskt tänkt) två gånger med samma mätmetod vid två helt separata tidpunkter, exempelvis med fallviktsapparaten så hade vi fått två olika värden som differerar deflektionsmässigt i μm – nivå, på liknade sätt som jämförelsen mellan fallviktsmätningarna och Raptor visade i denna studie. Detta då bärigheten är ett svårtolkat begrepp och att förhållandet i vägkroppen kan varieras, beroende på diverse faktorer som bland annat luftfuktighet, temperaturen i själva beläggningen, vinden etc. Det innebär att siffror kan vara missvisande ifall man enbart fokuserar på dem, och att vi inte ska titta på det allt för mycket, med undantag för ifall skillnaderna i deflektion är alldeles för märkbara, då är det förmodligen särskilda faktorer som har inträffat vid mätningen. Dessa faktorer kan vara intressanta i sig, för då har man möjlighet att undersöka just dessa märkbara skillnader, genom att analysera vad det är som egentligen händer där.

När det handlar om små deflektionsskillnader vid jämförelse mellan de båda mätmetoderna, så är det faktiskt mer intressant att studera mönster, dvs. att ifall båda följer liknande kurvatur och tolkar bärigheten, vägens tillstånd utifrån diverse bärighetsmått på ett någorlunda liknade sätt, då är apparaterna kompatibla i sin tolkning av hur vägen egentligen mår. Om båda mätmetoderna förhåller sig till ett likartat intervall så kan man ha i åtanke att siffror kan faktiskt ständigt variera beroende på diverse omständigheter. Raptor apparaten kan samla in ett väsentligt antal mätningar på individuella mätpunkter, där det snittas var 10:e meter. Detta skiljer sig markant ifrån FWD som mäter under en liten yta på större avstånd. Denna faktor påverkar omfattningen i mätpunkterna, avseende på tolkningen av svaga såväl starka punkter i beläggningen. Detta där FWD kan övergeneralisera mätningarna, till skillnad från Raptor, och kan bero på att FWD har en symmetrisk last medan Raptor har en asymmetrisk last. För att motverka detta kan en annan metod vidtags genom att studera två separata teststräckor istället för en. Detta där ena sträckan ska vara beständig och den andra sträckan ska vara utmattad. Ifall Raptor uppfattar bärigheten av den beständiga respektive den utmattade sträckan på liknade sätt som fallvikten, då kan en tydlig likhet mellan apparaternas tolkning av bärigheten visas.

Metoden bakom detta arbete har grundats på att samla in samt bearbeta befintliga data i en större mängd. Detta anses vara givande, i samband med att sätta igång arbetet, med avseende på att samtlig information har varit lättåtkomlig. Men å andra sidan får man ha i åtanke att viss information kan vara ledande, dvs. har ett bakomliggande syfte som eventuellt kan ha en påverkan på resultatet av arbetet, vilket är en nackdel. Därav har målet med detta examensarbete varit i fokus, för att på ett objektivt sätt kunna bedöma samt jämföra likheterna i detalj, likväl skillnaderna i detalj. Det bakomliggande syftet är att på ett smidigt sätt kunna dra slutsatser för denna analys baserat på jämförelserna. Ytterligare en nackdel är att med en större mängd av information blir det lätt att tappa fokus från arbetet. Detta kan vara både bra och dåligt, beroende på hur man ser på det. Med mycket information genom litteraturstudien som detta arbete erbjuder, kan det vara en bra utgångspunkt till att eventuellt bygga på själva arbetet inför framtida studier, med tanke på att det erbjuder en litteratur, rik på information.

I och med att det rör sig om två olika mätmetoder, har det varit viktigt att försöka få fram likvärdig signifikans vid jämförelsen. Detta genom att förse båda fallviktsmätningar samt rullande bärighetsmätningar med lika vikt samt undersökning som det möjligtvis går, genom sekundärdata (tillgänglig datainsamling). När det kommer till fallviktsmätningar så har det varit betydligt enklare att få tag på information, kontra informationen som finns om rullande bärighetsmätningar. Detta då fallvikten i sig är ett välstuderat område med flertal studier, med bland annat kravdokument från Trafikverket, som i sig har legat till grund som riktlinje för att analysera samt bearbeta samtliga deflektionsdata. Informationen om rullande bärighetsmätningar har hämtats främst genom sekundärdata. Vilket har legat till grund för att på ett tidseffektivt sätt kunna sammanställa relevant information och datamätningar. Information genom tidigare kurslitteratur, men främst genom pålitliga operatörer samt externa handledare med djupgående kunskaper angående ämnet. Dessutom har information byggts upp genom workshoprepresentationer, där tidigare forskning gav bra grund samt förkunskaper till att bygga upp detta arbete. Datainsamling har på liknande sätt varit tillgänglig och hämtats ifrån erfarna operatörer från Ramböll RST, som har utfört mätningarna innan detta arbete påbörjades.

Genom Trafikverkets dokument för utvärdering av vägars bärighet, har de teoretiska beskrivningarna beprövats med verkliga mätvärden. Detta gav en bredare förståelse av samtliga formler och beräkningar, beträffande bärighetmått. Vilket i sig knyter ihop informationen från litteraturstudien med resultaten i denna jämförelsestudien.

5.2 Resultatdiskussion

Deflektion $D_0 - D_6$:

Vid deflektionscentrum D_0 , visar både medelvärde och standardavvikelse goda värden med små avvikelser mellan Raptor och FWD. Den mest märkbara skillnaden är hos deflektionsvärdena, där FWD erhåller något högre värden än vad Raptor- approximationerna gör, Tabell 14. Längre ut från deflektionscentrum, vid punkten D_6 , 1200mm bakom hjullasten, uppmärksammas skillnader i medelvärden, standardavvikelse samt intervallen. Med tanke på att standardavvikelsen är låg i båda, innebär det att de flesta mätpunkterna förhåller sig omkring medelvärden, som i sig visar på skillnader. Detta då mätosäkerheten antas öka vid deflektioner som är längre bort. Om vi ser på saken strukturellt visade metoderna på en likartad trend genom hela mätsträckan, punkten omkring 86 000, där avviker FWD-mätningen mer och kan bero på berg nära ytan som gör att apparaten uppfattar terrassen att vara styvare. Denna trend kan även Raptor uppfatta men i en mindre skala på grund av apparatens dynamiska påverkan över tid medan FWD genererar djupare vågor i vägen, se även bilagor för tydligare bild. Det går även att notera lägre värden vid D_6 av Raptor jämfört med FWD. Detta kan bero på att Raptor registrerar information från ytan lik väl som från undergrunden. Trots att Raptor mätningarna har simulerats till att efterlikna FWD mätningarna, visade detta på goda resultat då ett tydligt mönster mellan båda apparaterna har noterats. Dessutom kunde de fem faktiska punkterna, där mätmetoderna överlappade, ge oss skäl att anta att approximationerna faktiskt stämmer överens med FWD mätningarna.

Deflektionsbassängsparametrar:

När det kommer till deformationsbassängsparametrarna visar det sig att båda apparaterna tolkar styvheten i konstruktionens övre del (SCI) med ett liknade mönster och en liknande trend. Generellt sett ger Raptor lägre värden än vad FWD gör. Detta kan bero på att FWD-apparaten är känsligare vid tolkning av deformationer i vägens övre lager och då kan ge skarpere deflektioner, vilket vi kan notera i resultatet. Det observerades att avvikelserna mellan metoderna verkar öka i samband med beräkning av konstruktionens styvhet i de mellersta lagren (BCI), dvs. att skillnaden mellan metoderna verka öka ju djupare ner i vägkonstruktionen man kommer. Vilket även (BDI) visar, då avvikelserna vid tolkning av styvheten i konstruktionens nedersta del (med avseende på undergrunden) ökar markant. Detta förklarar mätosäkerheten i väggkroppens olika lager och att ju djupare man mäter desto mer osäkra värden uppstår. Dock får man ha i åtanke att detta påstående gäller för såväl Raptor som FWD, då studier intygar om att vi inte kan få lika bra resultat ju djupare ner i beläggningen man mäter, på grund av att effekten i mätningen avtar med djupet (VTI 2022).

Enligt sammanställningen i Tabell 14 visar dessa parametrar på måttliga avvikelser, (BDI) värden visar på de mest märkbara skillnaderna, annars är variationen i värden relativt låg.

E-moduler:

Ytmodulen visar relativt likartade värden längs sträckan, detta går att bevisa genom dess medelvärde samt intervall, som tyder på likartat resultat av respektive mätmetod. Standardavvikelsen är relativt hög, iakttagelserna har med andra ord utspridd variation och ligger inte riktigt nära medelvärdet, se Tabell 14. Variationen kan bero på att underlaget inte är linjärelastiskt, detta då ytmodulen i sig tolkar styvheten från ytan och nedåt, med avseende på ett homogent underlag. Om man istället enbart observerar mätningarnas mönster, så verkar de vara överens om styvheten i överbyggnaden från ytan och nedåt. Det tillkommer en tydlig korrelation mellan båda apparaterna med likartat beteende gällande data från ytmodul, mer specifikt i den första halvan av sträckan. Vid slutet av sträckan verkar de tappa denna korrelation då deras tolkning av styvheten i terrassen verkar variera. Raptor uppfattar styvheten som högre, jämfört med vad fallvikten visar. Anledningen till att fallvikten visar lägre styvhet kan vara att den mäter i punktlast, vilket i sig kan skapa deformationer som varar längre, jämfört med Raptor som mäter kontinuerligt.

När det kommer till undergrunden, visar den på en högre skillnad mellan apparaterna, som tidigare nämnt i resultatet kan detta bero på terrassen är styvare vid tre märkbara punkter, visas i Figur 43. Det kan även vara på grund av tre cykeltunnlar eller de fyra vägtunnlarna under sträckan (NVDB 2025), där styvheten vanligtvis blir högre, vilket märks med Raptor-värdena, som också stiger vid just dessa sektioner, dock inte lika högt. Generellt visar siffrorna på FWD- mätningarna av undergrunden på ett dubbelt så stort intervall, jämfört med Raptor- intervall. Men om vi å andra sidan bortser ifrån dessa punkter som avviker stort och analyserar enbart strukturen, så kan vi notera en god relation mellan hur Raptor och fallvikten tolkar styvheten i undergrunden, framförallt i början av sträckan och någonstans i mitten, då avvikelserna är relativt små. Dock så överväger inte denna analys, med tanke på att avvikelserna i intervallstorleken är tydligt stora. Man kan konstatera att mätosäkerheten ökar vid analys av vad som egentligen händer i djupet, nere i vägkonstruktionen. Detta beror på att undergrunds-modulen utnyttjar data som befinner sig längre bort från belastningscentrum. Och som tidigare har konstaterats, så antas osäkerheten öka i mätningen ju längre ut i deflektionsbassängen man kommer.

Bärförmågaindex (BI):

Bärförmågaindex är ett bra mått för att bestämma töjningen i asfalten, och genom dess värden kan vi bedöma vägens bärförmåga på ett enkelt sätt. Det som även är bra med användningen av just detta mått för jämförelse är att det är universellt och går att tillämpa på alla typer av belagda vägar, oavsett lager som vägen är utrustad med. Denna tillskillnad från andra bärighetsmått som inte går att tillämpa på alla typer av belagda vägar, såsom deflektionsbasängsparametrarna SCI, BCI och BDI och dessutom ytmodul. Med Bi ingår flera parametrar som kan ge en mer samlad bild av vägen. En nackdel med jämförelseindex är att mätningarna bör vara utförda under samma period (rekommenderat sommar – höst). Därav för att styrka användningen av detta mått, har både Raptor och FWD mätt under samma period, dvs. kravet för jämförelseindex är uppfyllt. Detta ger oss trygghet i att hantera mätdata och av resultaten kunna dra slutsatser om vägens strukturella tillstånd. Den temperaturkorrigerade dragtöjningen avser temperatur som ska vara 10 °C (Trafikverket, 2022). I detta fall har båda mätningarna utförts i goda temperatur-förhållanden se Bilaga 3, Figur 61, som överstiger detta krav. Dessutom har mätningarna utförts senare mot kvällen. Detta innebär att temperaturen har hunnit lägga sig under dagen, och ett jämnt förhållande i beläggningen kan förväntas ha uppstått.

Tittar vi på bärförmågan BI längs hela sträckan, visar det på en stor variation för både Raptor och FWD, då värden är spridda. Raptor har i genomsnitt tolkat att vägen uppnår en högre bärförmågaklass än vad FWD gör. Detta där Raptor låg på BFK1. Däremot låg FWD på BFK2. Detta kan bero på att Raptor är känsligare än fallvikten och kan vara anledning till tolkning av olika bärförmågor har uppstått. I och med att jämförelseindexet kan tillämpas på alla väglag, kan det vara av intresse att studera hur Raptor och fallvikt beter sig när de mäter bärigheten av olika väglag och se ifall Raptor verkligen överskattar vägens bärförmåga jämfört med fallvikt. Det är även viktigt att påpeka att under beräkningsgången fattades en del data på beläggningstjockleken h_1 , där fattades ca. 300 meter av georadar, mellan 80 290 – 80 630. Dessa saknade värden har sedan uppskattats genom ett medelvärde som låg på 17,55.

Observerar vi sträckan sektionvis så uppfattar Raptor högre bärförmåga i den första delen av sträckan. Raptor hade dubbelt så många punkter som tolkade att vägen klarar av BK1, vilket innebär att vägkroppen har god strukturell styrka och är beständig. Däremot lutade FWD värden mer åt BK2. Detta kan bero på att beläggningen tenderar att mjukna vid högre temperaturer, vilket i sin tur visar på lägre bärförmåga, vilket vi kan konstatera då beläggningstemperaturen vid fallviksmätningarna snittade på ca. 19° medan vid Raptor- mätningarna temperaturen i beläggningen var ca. 14°. Detta kan

vara anledningen till att fallvikten hade generellt en lägre tolkning av vägens BI. Det är även viktigt att notera att just under den första delen av sträckan, saknas georadarvärden för beläggningstjockleken. Däremot noterades en bra överensstämmelse mellan Raptor och FWD mot slutet av sträckan, där de båda konstaterade att vägens bärförmåga mestadels klarade av BK1, med en god styrka på beläggningen, motståndskraftig nog till att klara av eventuella utmattningar.

Sammanfattningsvis kan man säga att enligt de BI värden som båda apparaterna har uppmätt kan vägsträckan antas ej vara benägen för deformationer, trots att resultaten visar på en stor variation av bärförmågeklass. Dessa skillnader sammanhänger egentligen med BFK1 och BFK2, tolkade av respektive apparat. Och att fallvikten visar på allmänt lägre värden, kan bero på att beläggningen vid dess mätning hade högre temperatur än motsvarande vid Raptor- mätningarna.

Tabell 14: Förenklad sammanställning av Raptor- approximationer samt FWD- värden.

RAPTOR – Approximativa mätvärden				
-	Enhet	Medelvärde	Standardavvikelse	Intervall
D_0	[μm]	278	83	457–133
D_6	[μm]	47	28	143–14
SCI	[μm]	70	25	149–20
BCI	[μm]	52	21	100–19
BDI	[μm]	82	22	131–33
E_0	[MPa]	735	232	1400–408
E_u	[MPa]	145	123	503–18
$\epsilon_{a,T}$	[μ -Strain]	134	32	225–66
$\epsilon_{a,10}$	[μ -Strain]	134	32	225–66
BI	-	8	2	15–5
FWD – Mätvärden				
-	Enhet	Medelvärde	Standardavvikelse	Intervall
D_0	[μm]	286	85	644–152
D_6	[μm]	71	41	260–6
SCI	[μm]	94	29	235–38
BCI	[μm]	37	11	79–16
BDI	[μm]	58	13	89–27
E_0	[MPa]	723	221	1263–292
E_u	[MPa]	123	198	1125–9
$\epsilon_{a,T}$	[μ -Strain]	149	32	287–84
$\epsilon_{a,10}$	[μ -Strain]	149	31	286–84
BI	-	7	1	12–4

6 Slutsats och framtida studier

Jämförelse mellan rullande bärighetsmätningar och fallviktsmätningar har i detta arbete studerats utifrån frågeställningen som presenterades i *delavsnitt 1.2 Syfte och mål*. Med huvudsakliga syftet om att göra en bärighetsanalys av mätningarna, med bedömning och utvärdering av resultat från fallviktsmätningar och rullande bärighetsmätningar. Dessutom var ett syfte att undersöka hur bärighetsdata från respektive apparat förhåller sig i relation till varandra. Målet med studien är att kunna dra slutsats om en tänkbar ersättning av fallviktsmätningar med rullande bärighetsmätningar. Nedan följer avsnitt som redogör för slutsatser samt rekommendationer på framtida studier för rullande bärighetsmätningar i vägprojekt.

6.1 Slutsatser

Slutsatserna av denna rapport presenteras nedan.

- Raptor (RWD) är jämförbart med fallvikt som verktyg för bestämmande av vägars bärighet. Detta med avseende på en tydlig överensstämmelse i tolkning av storlek och trend i deflektions-punkter från belastningscentrum och bakom (enkla bärighets-parametrar).
- Raptor och fallvikt visade på en god korrelation vid uppfattning av överbyggnadens strukturella tillstånd med avseende på bärighetsmått, SCI och BCI. Där Raptor kan användas istället för fallvikt som verktyg för att kontrollera styvheten i övre och mellersta delen av konstruktionen.
- Mätningsskottmetoderna visar på likhet gällande tolkning av styvhet i överbyggnaden från ytan och nedåt. Detta innebär att Raptor kan vara ett bra alternativ för mätning av ytmodul.
- Större avvikelser och mätosäkerhet tillkom vid mätning av konstruktionens nedersta del (BDI) samt undergrunden.
- Skillnad mellan mätmetodernas uppfattning av vägens styvhet ökar ju djupare ner i vägkonstruktionen man kommer.
- Raptor överskattar bärighetsindexet (BI) jämfört med FWD, då den i genomsnitt tolkar att vägen klarar av bärförmågeklass 1, medan fallvikten visar på bärförmågeklass 2.

Raptor är praktisk och kan vara användbar vid översiktliga undersökningar, men den kan inte ersätta fallvikten. Vid undersökningar av vägens tillstånd särskilt vid djupare nivåer av vägkroppen är fallvikten fortfarande den mest säkra metoden. För en hållbar och effektiv väghållning rekommenderas en kombination av fallviktsmätningar och rullande bärighetsmätningar (Raptor). Detta särskilt med avseende på mätningar som riktar sig på styvheten i konstruktionens övre delar.

6.2 Framtida studier

Bärighet är ett svårtolkat begrepp, men generellt handlar det om att med hjälp av diverse mått, bedöma livslängden av en väg. Att jämföra rullande bärighetsmätningar med fallviktsmätningar kan vara utmanande, då flertal djupgående undersökningar behöver utföras för att stärka dess korrelation. Därav har detta avsnitt ägnats åt att ta fram konkreta förslag på hur man kan fortsätta utvecklingen av denna studie. Följande förslag presenteras i punktvis nedan.

- Jämföra Raptor kalibrering med fallviktsmätningar på broar.
- Studera om variation i hastighet kan ha en betydande påverkan på mätresultaten samt dess tolkning av bärigheten. Detta avser flera tester med rullandebärighetsmätningar på en specifik beläggning i flera olika hastigheter samt eventuellt jämföra det med fallviktsmätningar.
- Studera klimatets inverkan på mätresultaten. Detta genom att undersöka variationen av luftfuktigheten samt temperaturen. Detta med avseende på hur klimatet påverkar styvheten i beläggningen och om det har en effekt på kvaliteten av mätresultaten. Det är det av intresse att utföra sådana studier för Raptor mätningar och studera om eventuella nivåskillnader råder vid varierande temperaturer.
- Studera flera områden med mätningar där Raptor och FWD har parallellt mätt på. Detta avseende större analyspaket, såsom *Analyspaket 3*, som inkluderar passningsräkningar utöver bärighetsmått och parametrar som har hanterats i detta arbete. Det bakomliggande syftet är att erhålla mer djupgående analyser samt jämförelser mellan respektive mätmetod. En annan fördel med detta kan vara att få med flera vägtyper i jämförelsen.

- Utnyttja *Analyspaket 4* som avser avancerade analyser i forskningsuppdrag vid specifika utredningar och uppföljningar. Ett förslag på en sådan analys kan vara jämförelser mellan Raptor och mätningar med tung fallvikt (HWD) och se om rullande bärighetsmätningar klarar av att komplettera det vid flygplatslandningsbanor.
- Utföra djupgående statistiska analyser för att bestämma trovärdigheten i sambandet mellan respektive metod. En sådan analys kan vara i form av en fördjupad regressionsanalys för att ta fram konkreta förutsägelser om förhållandet mellan respektive metod samt utvecklingen av exempelvis deflektionsbassängen. Det kan vara gynnsamt att undersöka vissa punkter som mäts med Raptor i och med att den registrerar mätpunkter var 10:e meter, t.ex. 100 meter fram och 100 meter bakåt, för att sedan jämföra med fallvikten ifall den mäter på var 200 meter. Alternativet blir att utföra jämförelserna utifrån enstaka, specifika punkter som betraktas vara intressanta och avviker en del ifrån resterande mätning.

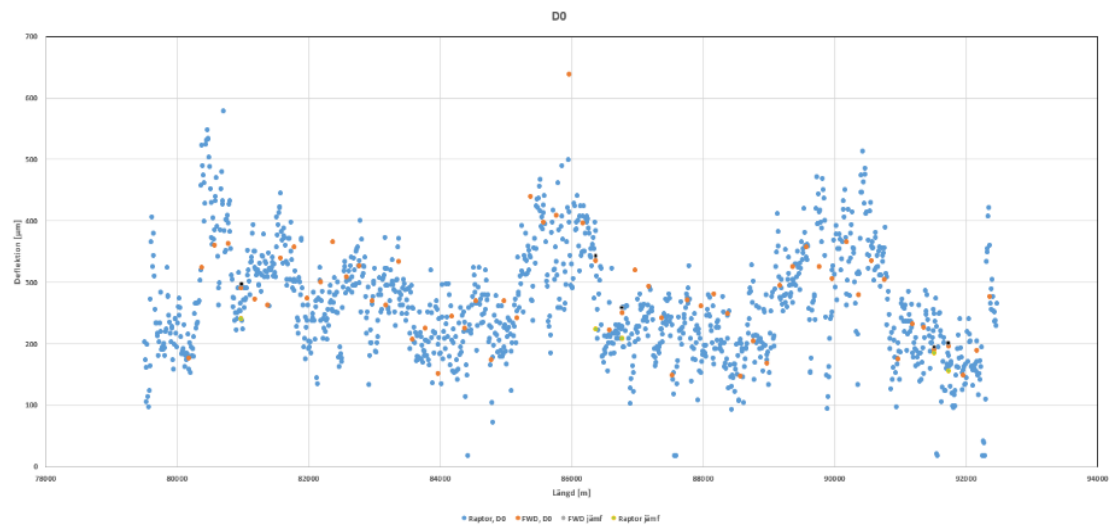
Litteraturförteckning

- Agardh, S. (2021). *Föreläsning Fallvikt, VVBN10 - Vägbyggnadsteknik*. [12-03-2023]. Lunds Tekniska Högskola.
- Agardh, S. & Parhamifar, E. (2014). *Vägbyggnad*. 1 Red. Stockholm: Liber.
- Asfaltboken (2023). *Asfaltsboken - vägens uppbyggnad*.
<https://asfaltboken.se/vagens-uppbyggnad/> [22-03-2023].
- Bära eller brista (2019). *Handbok i tillståndsbedömning av belagda gator och vägar*. Stockholm.
- Bryman, A. (2018). *Samhällsvetenskapliga metoder* (Vol. Upplaga 3). Liber AB. Oxford university.
- Gustafsson, O. (2015). *Effekt av grusmängd och vältnings för spårbildning på grusväg*. https://stud.epsilon.slu.se/7962/7/gustafsson_o_150528.pdf [15-03-2023].
- Länsstyrelsen Skåne (2022). *Sammanställning över allmänna vägar*. Malmö 205 15: Länsstyrelsen Skåne .
- Lundberg, J. (2020). *Dimensionering av överbyggnader*. Lunds Tekniska Högskola.
- Nelson, S. A. (2015). *Deformation of Rock*. Physical Geology:
<https://www2.tulane.edu/~sanelson/eens1110/deform.htm>. [25-03-2023].
- Paulsson, U. (2020). *Examensarbeten - Att skriva uppdragsbaserade uppsater och rapporter* (Vol. 1:1 uppl.). Lund: Studentlitteratur AB.
- Tarefder, R. A. & Zaman, M. (2003). *A laboratory and statistical evaluation of factors affecting rutting - International Journal of Pavement Engineering* (Vol. 4 Uppl.).
- RAMBOLL RST. (2020). *Ramboll.com*. <https://www.ramboll.com/sv-se/nyheter/med-raptor-kan-ramboll-sakra-vagarna-for-transporternas-framtida-behov>. [13-05-2023].
- Ramboll RST. (2021). *Ramboll.com*. <https://www.ramboll.com/sv-se/nyheter/nu-rullar-rambolles-raptor-teknologi-ut-pa-vagarna>. [11 05 2023].
- Roadex. (2023). *Permanent deformation, E-learning - Klassificering av spårbildning från permanent deformation*. (Roadex Network for better rural roads). <https://www.roadex.org/sv/e-learning/lektioner/permanent-deformation/3-klassificering-av-sparbildning-fran-permanent-deformation/> [11-04-2023].
- Madsen, S. S. & Pedersen, N. L. (2019). *Backcalculation of Raptor (RWD) measurements and forward prediction of FWD deflections compared with FWD measurements*. Proceeding of the International and Highway Pavements Conference. (pp. 382-391). [03-09-2023].

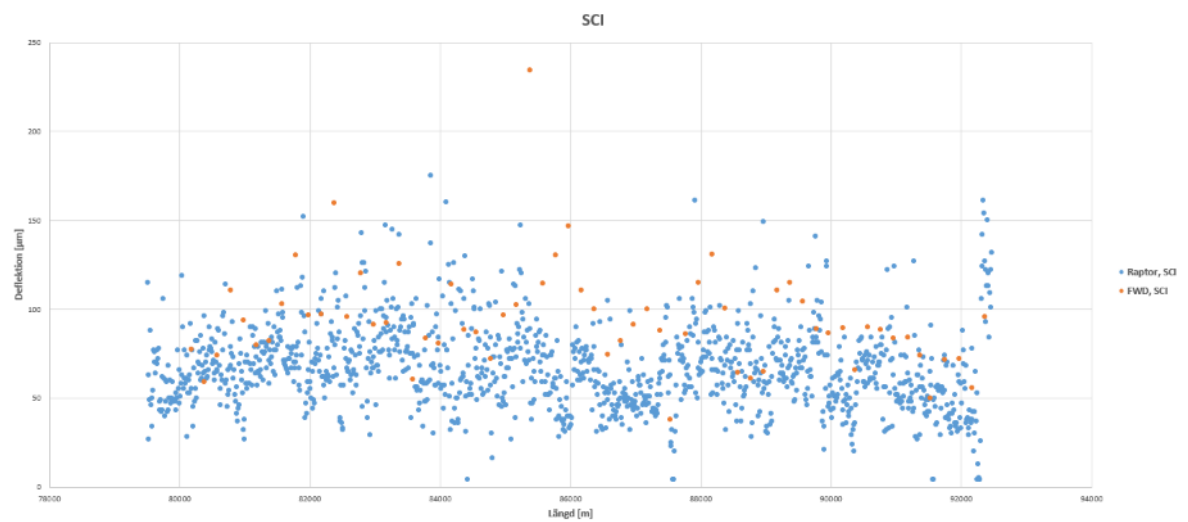
- Madsen, S. S. & Pedersen, N. L. (2022). *Comparison of RAPTOR measurements with falling weight deflectometer deflections using backcalculation*. Taylor & Francis Group:
<https://www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.1201/9781003222910-4/comparison-raptor-measurements-falling-weight-deflectometer-deflections-using-backcalculation-madsen-pedersen>. [03-09-2023].
- Sulejmani, P., Said, S., Agardh, S. & Ahmed, A. (2021). *Impact of temperature and moisture on the tensile strain of asphalt concrete layers*. International Jurnal of Pavement Engineering:
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2020.1715404> [28-03-2023].
- Sulejmani, P. & Agardh, S. (2021). *VVBNO5 - Drift och underhåll av vägar*. [18-03-2023]. Lunds Tekniska Högskola.
- Taner, S. (2021). *Tyngre transporter på det kommunala vägnätet - Kunskapsstöd för kommunala väghållare om bärighetsklass 4*. Avdelning för tillväxt och samhällsbyggnad. SKR. Stockholm: Sveriges Kommuner och Regioner.
- Trafikverket, PMSv4. <https://pmsv4.trafikverket.se> [07-04-2024].
- Trafikverket NVDB. <https://nvdbpakarta.trafikverket.se> [18-06-2025].
- Trafikverket. (2011). *TRVK Väg*. Borlänge: Trafikverkets Tekniska Krav Vägkonstruktion. https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10750/RelatedFiles/2011_072_TRVK_vag_2.pdf
- Trafikverket. (2014). *Inventering och värdering av befintlig väg*. KRAV. Trafikverket.
- Trafikverket. (2020). *Utvärdering av vägkonstruktioners bärighet med fallviktsapparat*. Trafikverket.
- Trafikverket. (2021). *KRAV TRVINFRA-00224. Överbyggnad vägdimensionering och utformning*.
- Trafikverket. (2022). *Uppdatering av regeringsuppdrag - Implementering av bärighetss 4*.
<https://bransch.trafikverket.se/contentassets/9d861d7e13004618aa2decb5db07510c/uppdatering-av-regeringsuppdrag---implementering-av-barighetsklass-4---2022.pdf>.
- Trafikverket. (2025). *Uppdatering av regeringsuppdrag - Implementering av bärighetsklass 4*. TRV 2020/44448.
- Trafikverket. (2024). *Beläggningar*. <https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/underhall/sa-skotervi-vagar/underhall-av-belagda-vagar/belaggningar/> den [30-04-2024].
- VTI. (2022). *Pavement inputs variability characterization: En litteraturstudie*. Linköping: Statens väg- och transportforskningsinstitut [18-06-2025].

7 Bilagor

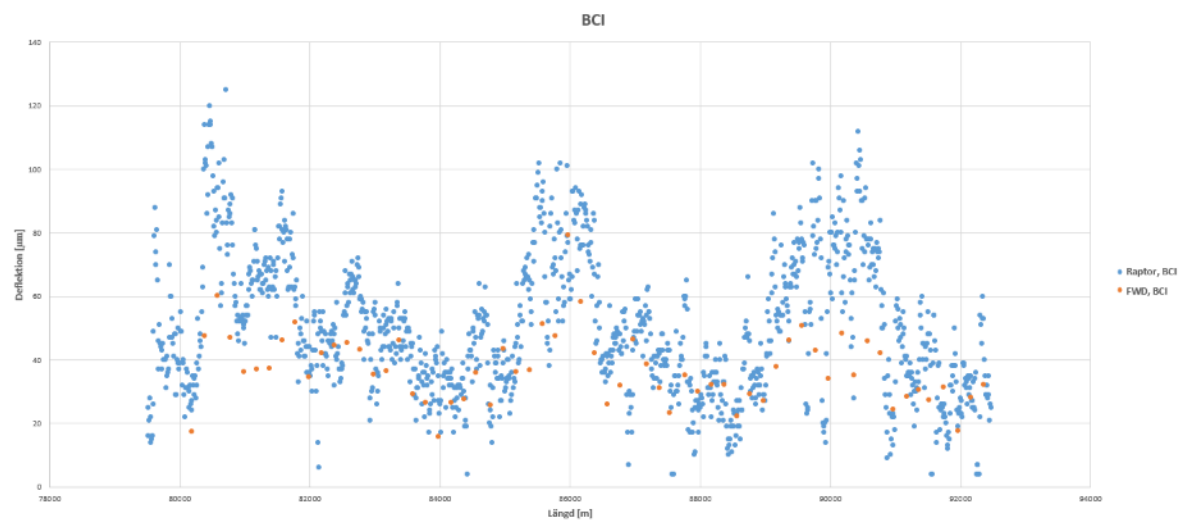
7.1 Bilaga 1



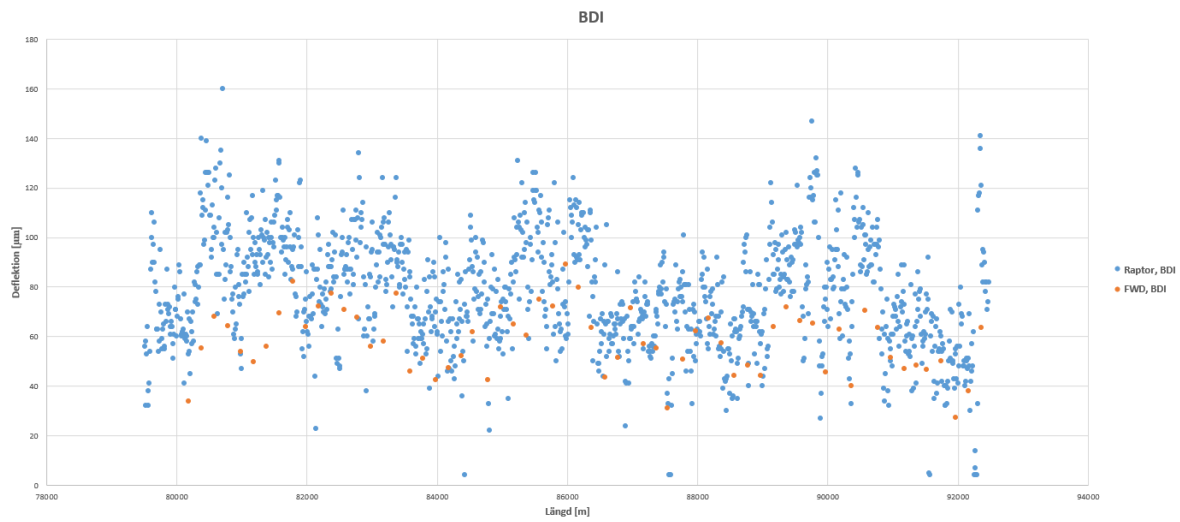
Figur 48: D0 - Sträcka 79 500 – 92 470.



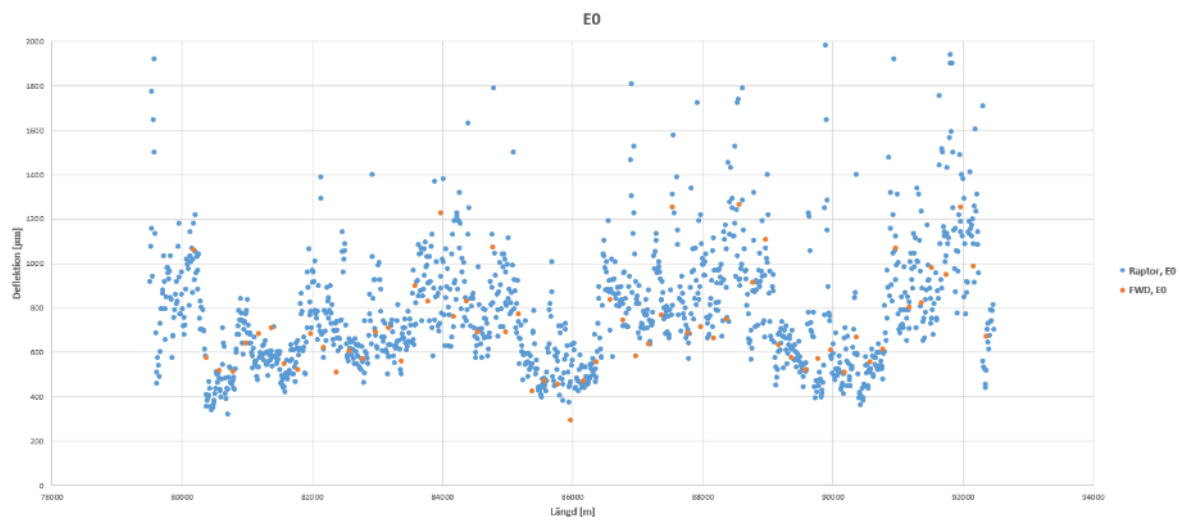
Figur 47: SCI - Sträcka 79 500 - 92 470.



Figur 49: BCI - Sträcka 79 500 - 92 470.



Figur 50: BDI - Sträcka 79 500 - 92 470.

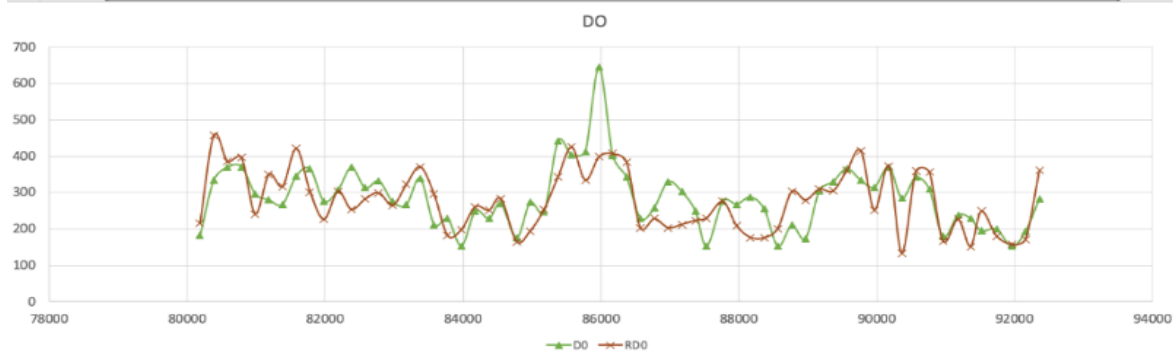


Figur 51: Ytmodul - Sträcka 79 500 - 92 470.

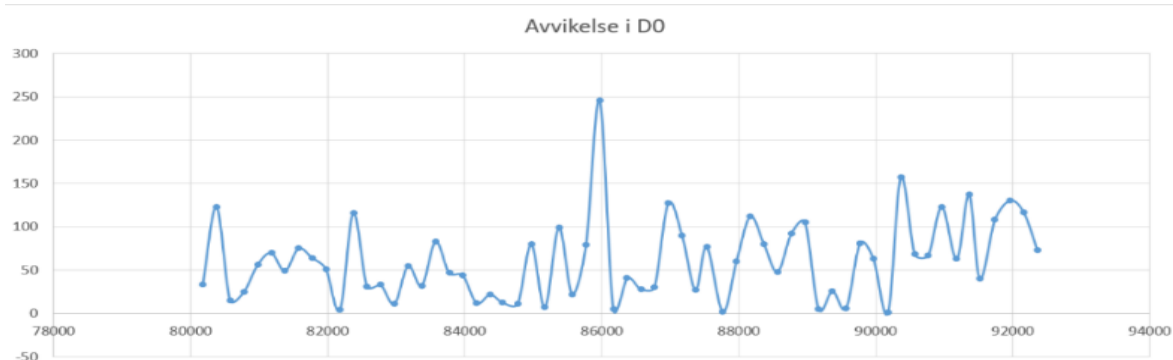


Figur 52: Undergrundsmodul - Sträcka 79 500 - 92 470.

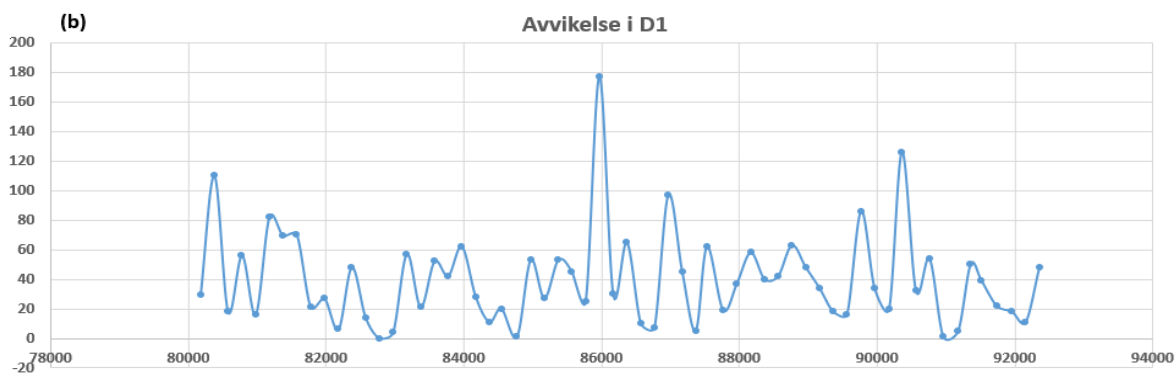
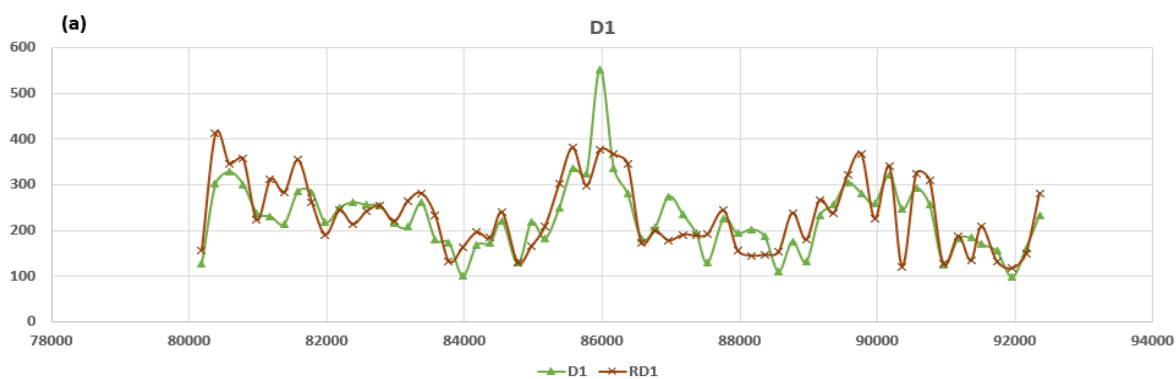
7.2 Bilaga 2



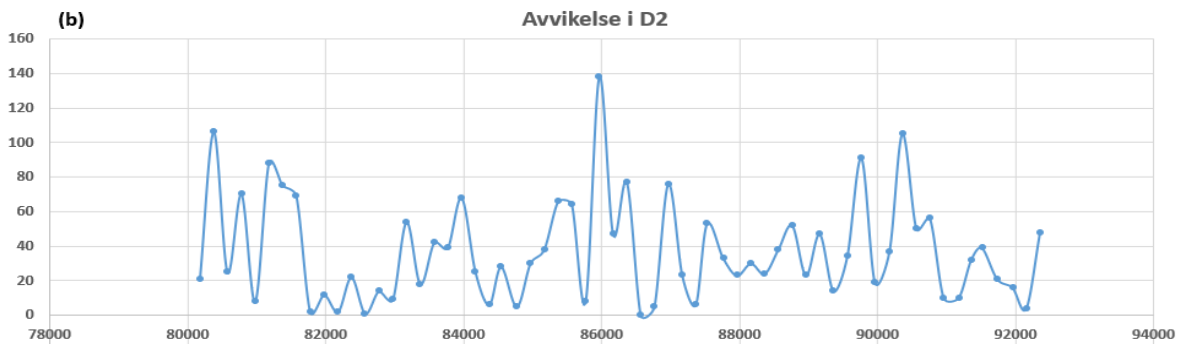
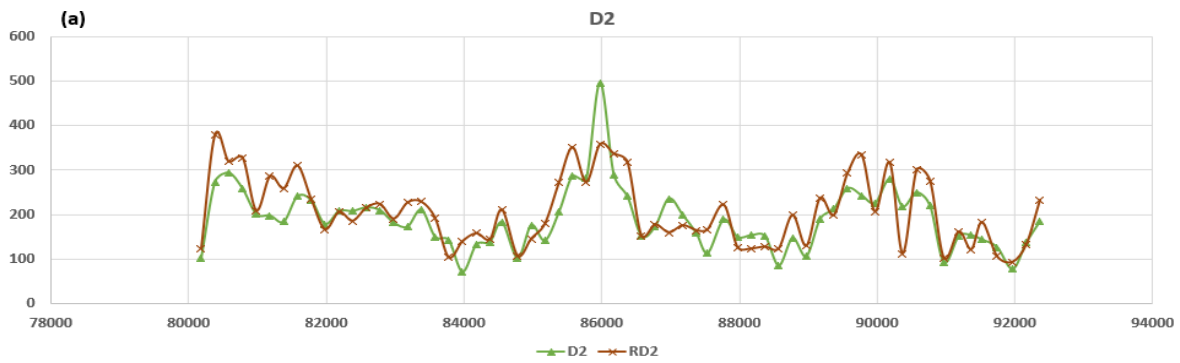
Figur 54: Do - Raptor- approximationer samt FWD- mätningar (80 179 - 92 362).



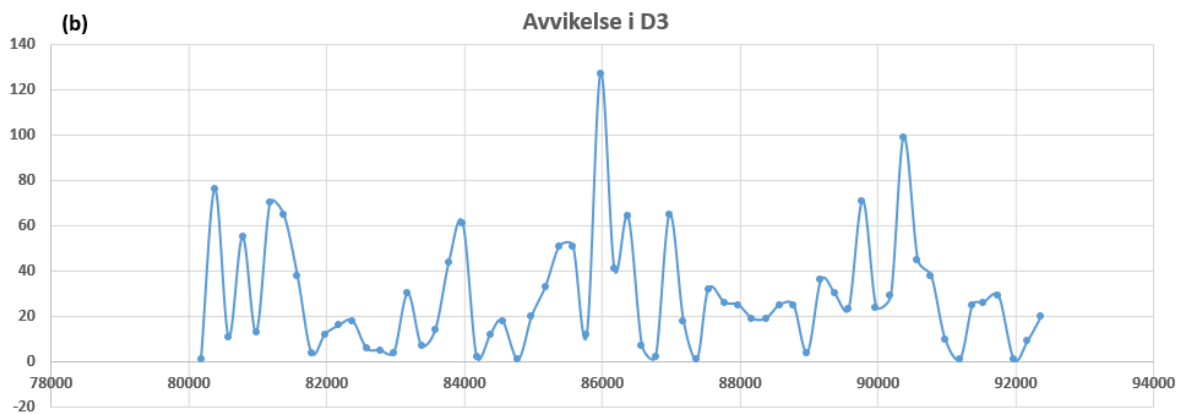
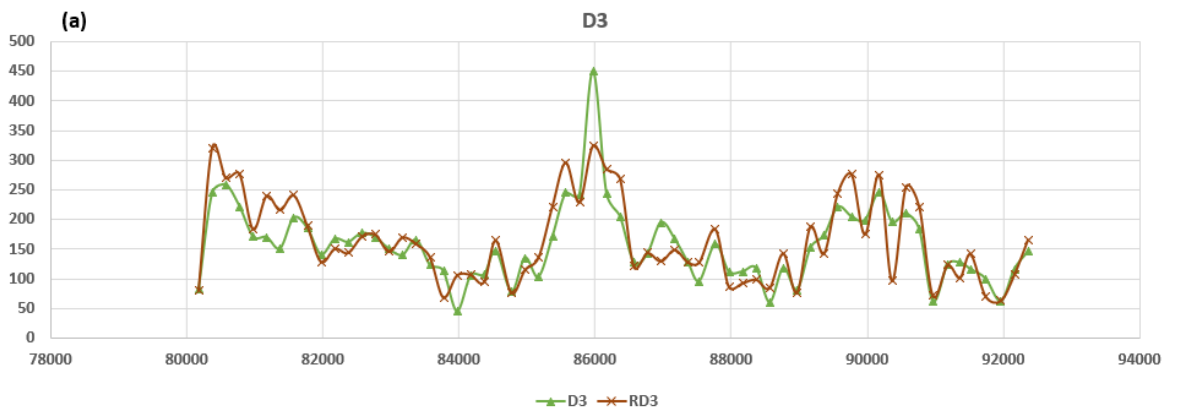
Figur 53: Avvikelser - Raptor- approximationer samt FWD- mätningar, Do.



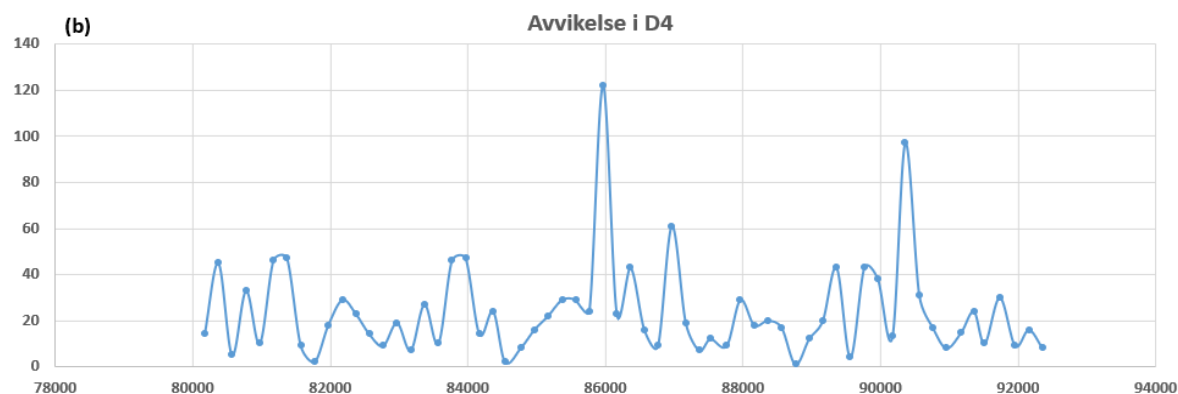
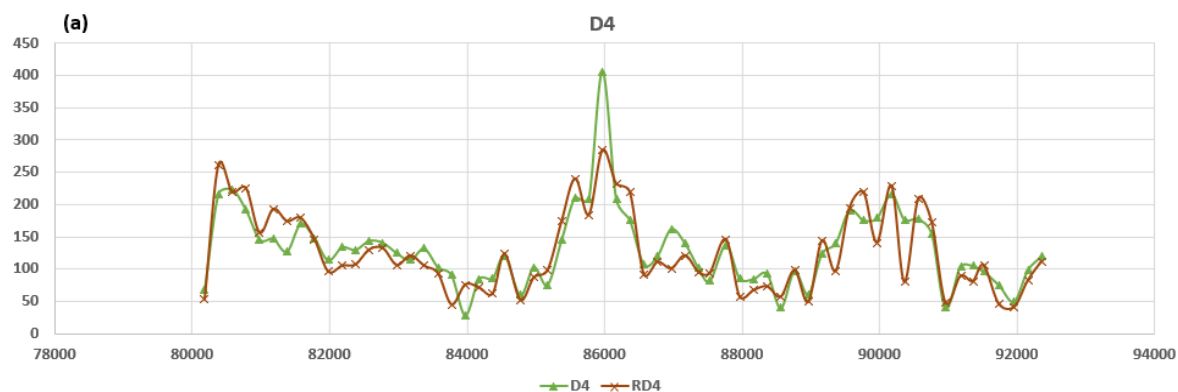
Figur 55: D1 - Raptor- approximationer samt FWD- mätningar (80 179 - 92 362), se diagram (a). Avvikelser visas i diagram (b).



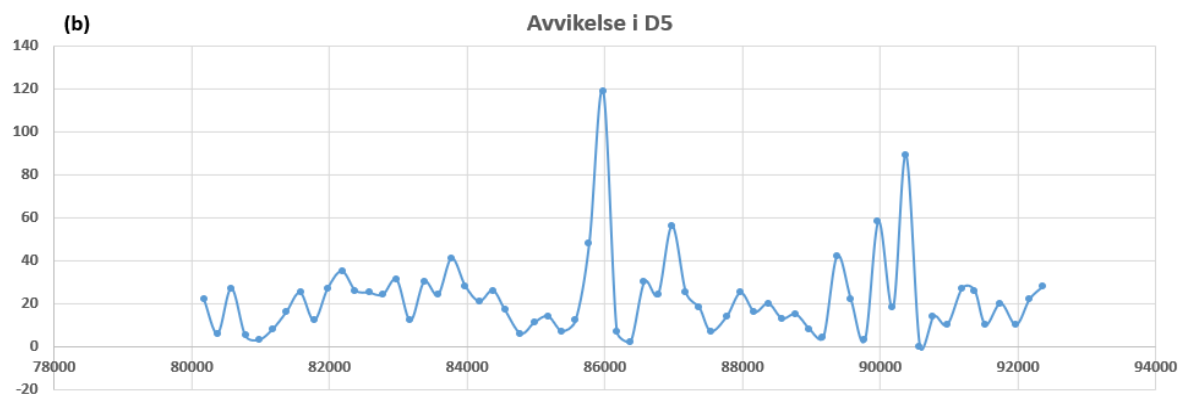
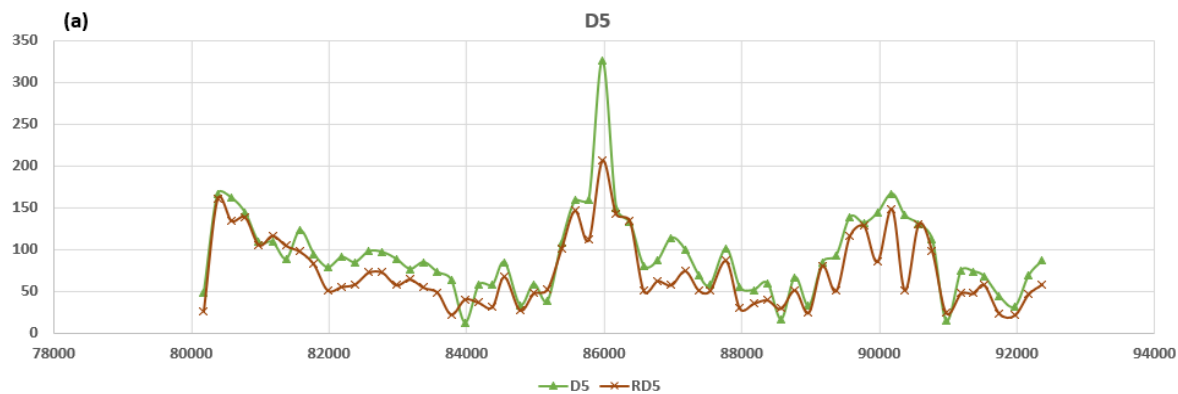
Figur 57: D2 - Raptor- approximationer samt FWD- mätningar (80 179 - 92 362), se diagram (a). Avvikelser visas i diagram (b).



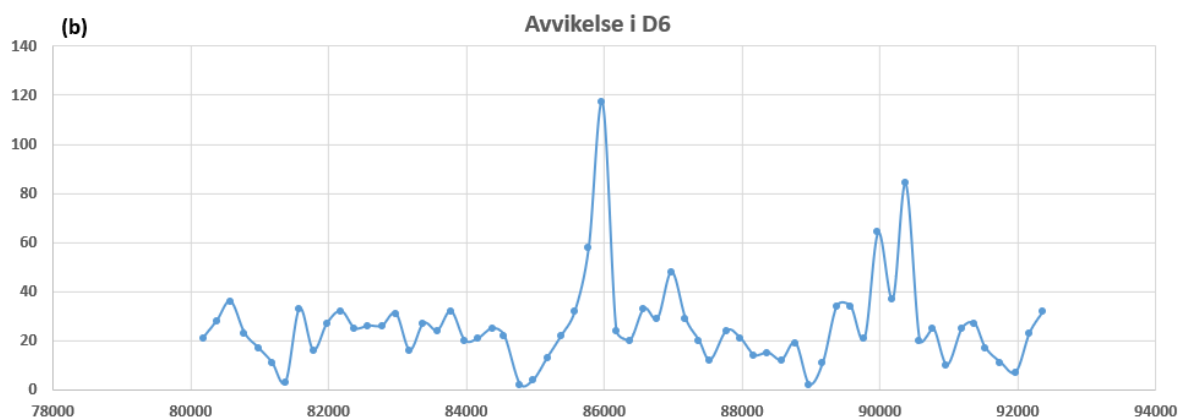
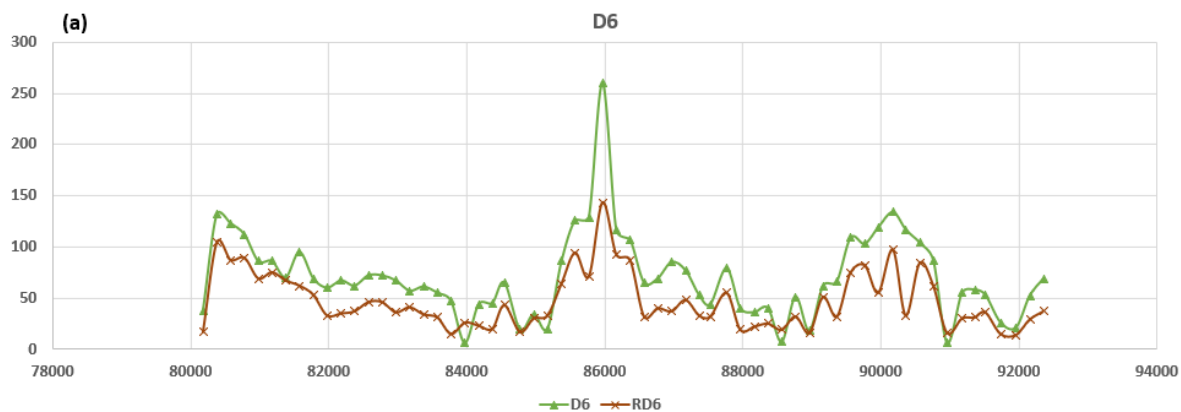
Figur 56: D3 - Raptor- approximationer samt FWD- mätningar (80 179 - 92 362), se diagram (a). Avvikelser visas i diagram (b).



Figur 59: D4 - Raptor- approximationer samt FWD- mätningar (80 179 - 92 362), se diagram (a). Avvikelse visas i diagram (b).



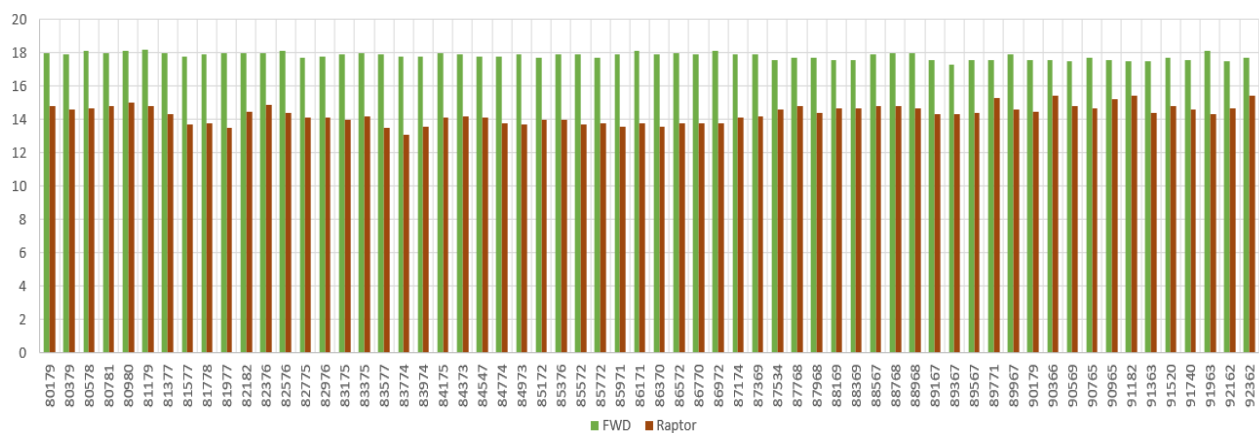
Figur 58: D5 - Raptor- approximationer samt FWD- mätningar (80 179 - 92 362), se diagram (a). Avvikelse visas i diagram (b).



Figur 60: D6 - Raptor- approximationer samt FWD- mätningar (80 179 - 92 362), se diagram (a). Avvikelser visas i diagram (b).

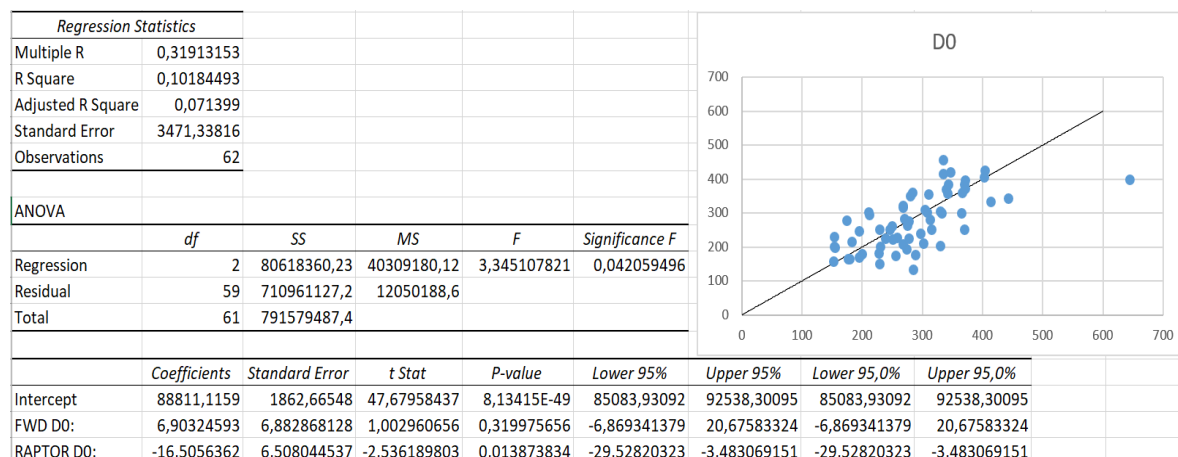
7.3 Bilaga 3

Temp. Raptor & FWD (beläggning)

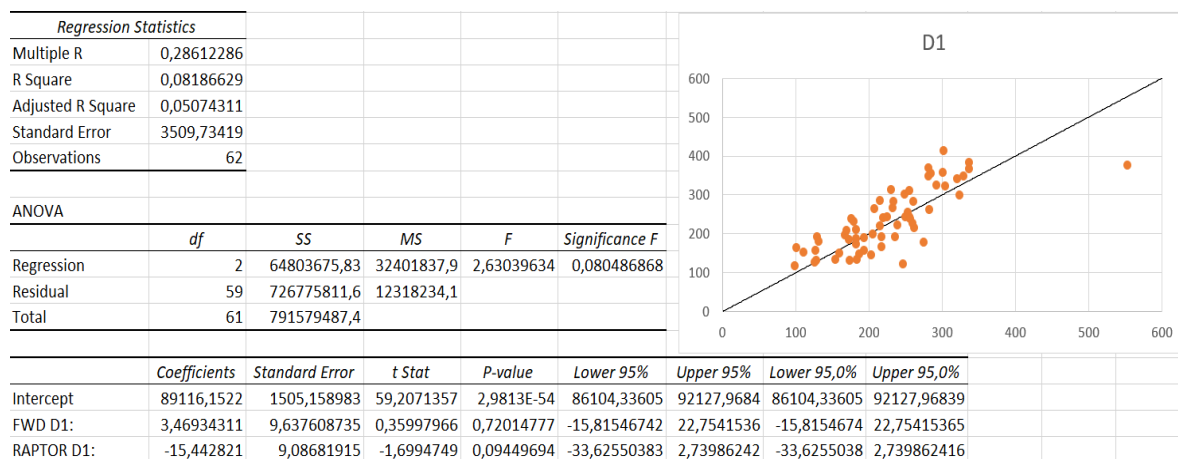


Figur 61: Temperatur i beläggningen vid respektive mätverktyg.

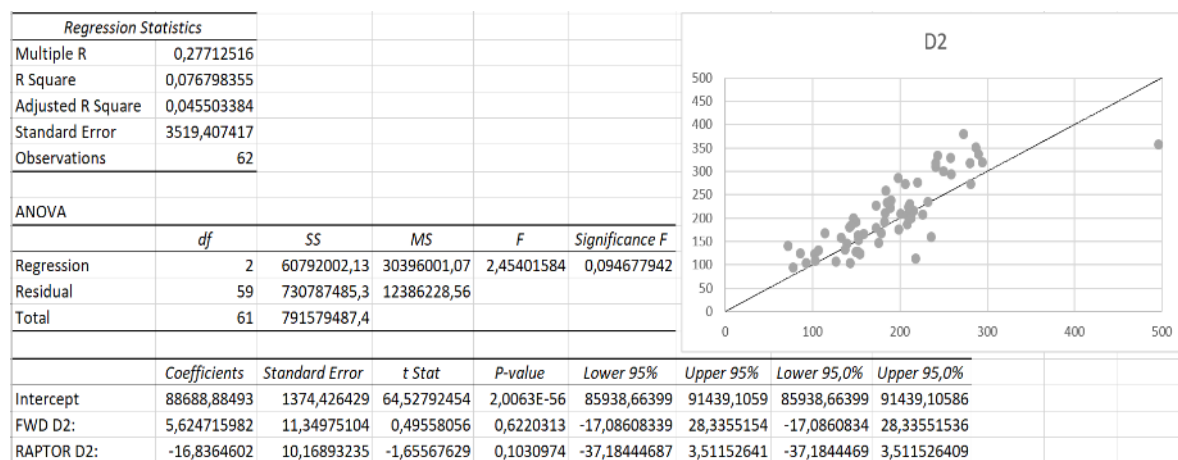
7.4 Bilaga 4



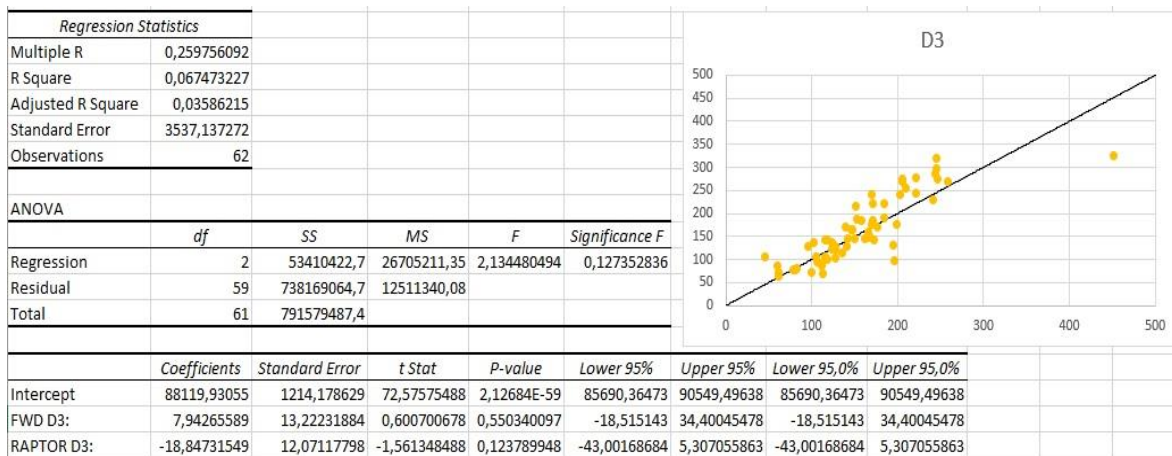
Figur 62: Diagram hämtad av operatör, beräkningar utförda av författare, avser D0.



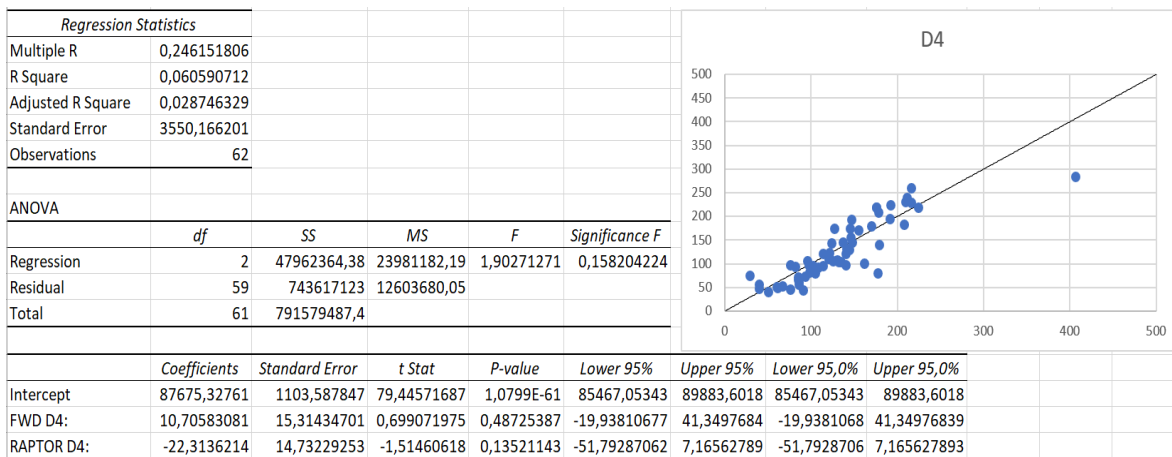
Figur 63: Diagram hämtad av operatör, beräkningar utförda av författare, avser D1.



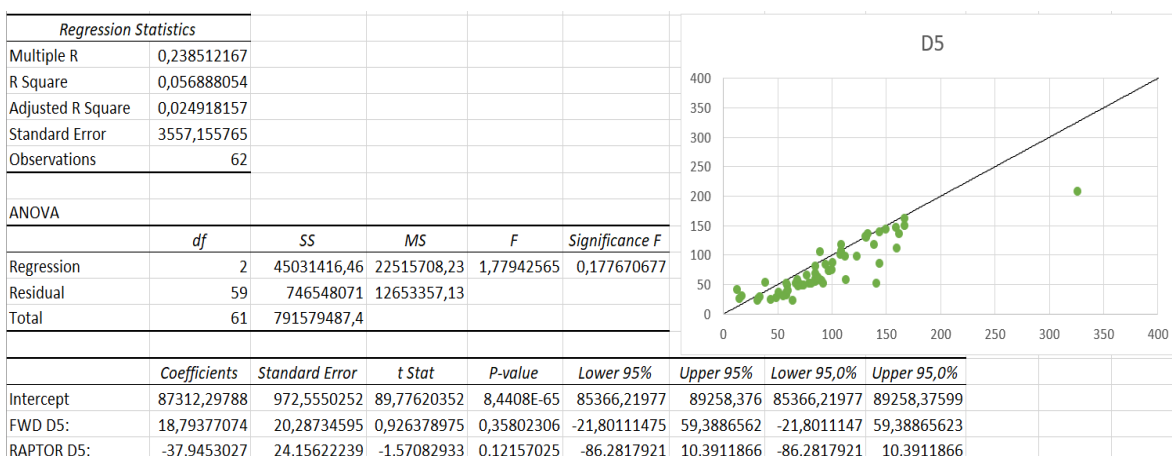
Figur 64: Diagram hämtad av operatör, beräkningar utförda av författare, avser D2.



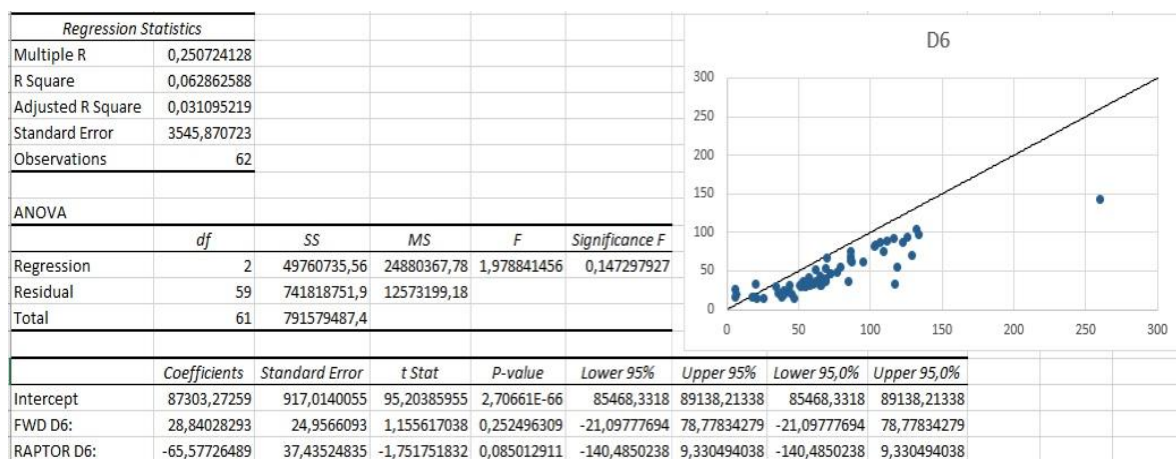
Figur 65: Diagram hämtad av operatör, beräkningar utförda av författare, avser D3.



Figur 66: Diagram hämtad av operatör, beräkningar utförda av författare, avser D4.



Figur 65: Diagram hämtad av operatör, beräkningar utförda av författare, avser D5.



Figur 66: Diagram hämtad av operatör, beräkningar utförda av författare, avser D6.