SBUF - PROJEKT

Datum

2020-09-15

Bärighetsmätning med Traffic Speed Deflektometer (TSD).

Författare

Roger Nilsson - Skanska

Skanska Sverige AB
Månskärsvägen 10A
141 75 Stockholm
Tel: 010-448 78 76

Beteckning

13019

SBUF TRAFIKVERKET SKANSKA

Innehållsförteckning

Förord **3**

Sammanfattning **4**

1 Inledning **6**

1.1 Bakgrund **8**

1.2 Syfte och mål **9**

2 Vägsystemets funktion **10**

2.1 Bärighet **10**

2.2 Bärighetsmått **11**

2.2.1 Ytmodul 12

2.2.2 Surface Curvature Index, SCI300 13

2.2.3 Undergrundsmodul 14

2.2.4 Asfaltstöjning 14

2.2.5 Bärförmågeindex, BI 15

2.2.6 Krökningsradie 16

2.3 Passningsräkning **16**

2.3.1 Tvärkontraktionstal, Poissons tal 17

2.4 Korrelation mellan olika bärighetsmått **17**

2.5 Fallviktsmätning **17**

2.6 Traffic Speed Deflectometer (HSD/TSD) **19**

2.6.1 Polska TSD (IBDIM) 21

2.6.2 Exempel på TSD-data från Danska mätningar 24

3 Beskrivning av testytor **27**

3.1 E22

3.1.1 Fallviktsmätning på väg E22 28

3.1.2 Vägens uppbyggnad 28

3.2 TSD 32

4 Slutsatser 35

4.1 Fallviktsmätning 35

4.2 TSD-mätning 35

4.2.1 Potentiell användning och utveckling av TSD 37

Referenser 38

Bilagor: 39

Förord

Föreliggande rapport sammanfattar resultaten från ett branschgemensamt projekt där tillståndsmätning av vägöverbyggnader har utvärderats med rullande bärighetsmätning (TSD). Använd TSD från IBDIM mäter förutom bärighet även IRI. Ett antal vägar med varierande strukturell uppbyggnad har mätts för att utvärdera metodiken samt utrustningens relevans. Till projektet finns en databas med mätdata tillgänglig för fortsatta studier.

Till projektet har en styr- och referensgrupp bidragit med värdefulla synpunkter, Björn Kullander, Carl-Gösta Enocksson, Trafikverket, Robert Lundström, NCC, Lennart Holmqvist, PEAB, Richard Nilsson, Skanska, Niki Kringos, KTH. Till projektet har ett examensarbte varit kopplat. Stort Tack till alla inblandade för ett gott samarbete.

Roger Nilsson

Stockholm, september 2020

Sammanfattning

Syftet med projektet är att utvärdera rullande bärighetsmätning, TSD, för olika typer av svenska vägöverbyggnader.

Sverige har nyligen infört en helt ny bärighetsklass, BK4, som tillåter en maximal bruttovikt på 74 ton på utvalda delar av vägnätet. Denna uppgradering är positiv för näringslivet men ställer högre krav på väganläggningen. Det finns ett stort tryck på att öppna upp en större del av vägnätet för BK4.

Mer trafik och tyngre laster gör att väganläggningen slits hårdare och då krävs mer underhåll för att vidmakthålla anläggningens funktion. Ökad trafik påverkar också underhållskostnaderna genom att det är mer komplext att utföra underhållsåtgärder i högtrafikerade miljöer.

Ovannämnda utmaningar belyser vikten att förstå till vilken grad den ökande belastningen påverkar vägkroppens tillstånd och nedbrytning samt vilket underhåll som krävs för att vidmakthålla vägsystemets funktion för en ekonomisk hållbar nivå över dess livscykel.

Det har under flera år utvecklats ett antal metoder för att utvärdera tillståndet för en vägkropp. De flesta metoderna, lämpliga för vägnätsnivå, fokuserar på vägytan som tex spårbildning, sprickdetektering, jämnhet (IRI), friktion, textur mm. Data från dessa mätningar finns till stor del tillgängliga i PMSv3. Genom att jämföra en serie av dessa mätningar över tid kan tillståndsförändring analyseras. För att utvärdera övriga delar av vägkroppen som tex strukturell bärighet måste metoder som kräver avstängning av vägen. Exempel på dessa metoder är tex provtagning (borrkärnor/underlättaren), fallviktsmätning (FWD), georadar mätningar (GPR) med flera. Förutom att dessa metoder är långsamma, orsakar trafikstörningar samt ökad exponering av trafik för mättekniker är de inte praktiska eller kostnadseffektiva för mätningar på vägnätsnivå. Det finns därför ett stort behov av förbättrade mätmetoder som kan komplettera befintliga mätningar för att öka förståelsen av effekten av nya faktorer som tex tyngre fordon. Genom att erhålla större förståelse av vägsystemets tillstånd på vägnätsnivå kan förfinade prioriteringar samt val av underhållsåtgärder föreslås.

I föreliggande rapport har en ny typ av rullande bärighetsmätning utvärderats, TSD (Traffic Speed Deflectometer). TSD är i princip en lastbil med ett släp med endast en axel på 10 ton. Utrustningen mäter via doppler lasrar, i ca 80 km/h, kontinuerligt vägytans deflektion vilken används för att beräkna olika bärighetsmått. Uppmätt deflektion beror till stor det på vägkroppens uppbyggnad, materialegenskaper, samt omgivningsfaktorer som temperatur och fukthalt i ingående material.

För mätningar inom projektet har en Polsk TSD utrustning från IBDIM används. Ett antal vägar har mätts varav några har analyserats djupare.

Resultaten i detta projekt visar att:

- Rullande bärighetsmätning (TSD) är ett mycket bra komplement till befintliga analysmetoder.

- TSD-data bidrar och kompletterar befintliga mätningar så att en ökad förståelse av tillståndet i vägkroppen kan erhållas.

- TSD mäter deflektionen kontinuerligt med en upplösning ner mot 1 mm.
- Förutom deflektionsdata kan potentiellt ett antal andra tillståndsmätningar utföras samtidigt (IRI, Georadar, sprickdetektering, spårbildning, textur med flera).
- TSD detekterar och särskiljer partier med låg respektive hög bärighet.
- TSD-mätningar behöver ingen avstängning och påverkar inte trafiken då mätningar utförs i ca 80 km/h.
- Kunskap erhållen från denna studie kan bidra till en ökad förståelse om mer optimala strukturella åtgärder i tid och rum.
- Fortsatta mätningar med TSD bör beaktas på vägnätsnivå för att identifiera partier som behöver underhållsåtgärder.
- Vidare studier rekommenderas för att utveckla metoder som bättre kan beakta temperaturgradient i asfaltmaterial samt fuktinnehåll i obundna material och i terrassen.
- På längre sikt bör metodik utvecklas för att erhålla viskoelastiska materialegenskaper utifrån TSD-data.

1 Inledning

God väginfrastruktur är en viktig grund i ett lands ekonomiska tillväxt och välstånd. För att vidmakthålla vägsystemet på en godtagbar nivå krävs att de underhålls på ett kostnadseffektivt sätt. Kostnaderna för att vidmakthålla vägsystemets funktion påverkas av en rad faktorer. De två som bedöms ha störst betydelse är utvecklingen av trafikvolym och trafiklast, samt omfattningen av väganläggningstyp som vägsystemet består av.

Vägtrafiken ökar kontinuerligt. Från 1990 till 2015 ökade vägtrafiken med 26 procent. Dessutom har trafiklasterna ökat, både avseende totalvikt och boggitryck. Fram till 2030 väntas bilanvändandet öka med 1,1 procent årligen och godstransportarbetet med 2,4 procent årligen. Även trafiklasterna har ökat, både avseende totalvikt och boggitryck. Högsta tillåtna totalvikt har i Sverige gått från 10 ton på 20-talet och 35 ton på 50- och 60-talet, till dagens 64 ton. Från och med 2018 är det också tillåtet med laster upp till 74 ton på ett särskilt utpekat vägnät. I dagsläget är det bara Finland som tillåter högre tillåtna totallaster (76 ton). Internationellt är det vanligt med högsta tillåtna totalvikter på ca 40 ton. I Sverige tillåts således nästan dubbelt så tunga fordon.

Mer trafik och tyngre laster gör att väganläggningen slits hårdare och då krävs mer underhåll för att vidmakthålla anläggningens funktion. Ökad trafik påverkar också underhållskostnaderna genom att det är mer komplext att utföra underhållsåtgärder i högtrafikerade miljöer.

Underhåll har därför blivit ett av de mest kritiska, kostsamma och komplexa elementen i att vidmakthålla vägsystemet.

Samtidigt som vägunderhållet får ökade finansiella resurser, har trafiken ökat på vägarna och nya anläggningar har tillkommit i vägsystemet. Mer trafik och tyngre laster gör att väganläggningen slits hårdare och då krävs mer underhåll för att vidmakthålla anläggningens funktion. Ökad trafik påverkar också underhållskostnaderna, eftersom det är mer komplext att utföra underhållsåtgärder i högtrafikerade miljöer.

Uteblivet underhåll kommer att medföra en funktionsbrist på kort sikt, eller onödigt höga kostnader för att upprätthålla vägsystemets funktion över livscykeln. Framkomligheten och säkerheten på vägarna kommer att vara oförändrad under perioden, som en följd av prioriteringar att vidmakthålla vägnätets funktion på kort sikt. Åtgärderna förväntas bidra till att tillståndet på det mer högtrafikerade vägnätet blir oförändrat, medan tillståndet på det mindre trafikerade vägnätet kommer att försämras.

Sammantaget väntas åtgärderna i nuvarande underhållsplan (2020-2023) inte vara tillräckliga för att det ska gå att upprätthålla vägnätets nuvarande tillstånd [1]. Uteblivet underhåll kan medföra en funktionsbrist på kort sikt, eller onödigt höga kostnader för att upprätthålla vägsystemets funktion över livscykeln. Till exempel bedöms att kostnaderna för att bibehålla funktionen på flera av våra motorvägar riskerar att bli onödigt höga, sett över deras livscykler. Vägkroppen under beläggningen behöver göras om på motorvägar byggda på 50-, 60- och 70-talet, eftersom den är uttjänt. En vägkropp i dåligt skick står sämre emot tung trafik, vilket visar sig genom skador längre ner i vägkroppen. Det är en kostsam åtgärd att göra om vägkroppen i förhållande till att bara byta vägens översta beläggningslager. Åtgärden

lönar sig dock över tid eftersom en förstärkt vägkropp medför reducerad nedbrytningstakt av vägkroppen. Det är därför viktigt att kunna bedöma och sätta in rätt underhållsåtgärder i rätt tid. Detta har blivit allt viktigare i ljuset av att en stor andel av vägsystemet börjar att nå slutet på sin livslängd och behovet av underhållsåtgärder är större än tillgänglig finansiering.

För belagda vägar innebär underhållsplanen att fler förebyggande åtgärder behöver senareläggas och att det blir en ökning av avhjälpande underhåll (lappning och lagning). På de lågtrafikerade vägarna, kommer Trafikverket inte att göra åtgärder i samma takt som vägnätet bryts ned, och tillståndet på dessa vägar kommer att försämras.

Eftersom de finansiella ramarna inte tillåter erforderligt underhåll som ur ett livscykelkostnadsperspektiv borde utföras inom perioden 2020 till 2023 finns stor risk för framtida högre underhållskostnader för att bibehålla funktioner än vad vi skulle få om tillgängliga medel förelåg idag. Om inte ytterligare medel tilldelas i kombination med nya optimerade underhållsstrategier samt prioriterade aktiviteter kommer vägsystemet ytterligare att försämras och öka det eftersläpande underhållsberget till kommande generationer.

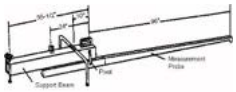
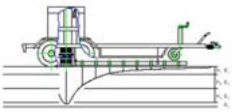
Trafikverket har under några år ökat andelen total- och funktionsentreprenader där entreprenörerna har fått ökat ansvar att ta fram lämplig teknisk lösning. Vidare har kraven ökat där entreprenören förväntas bedöma tillståndet samt ta över ansvaret för befintlig vägkropp vid breddning- samt förstärkningsentreprenader.

Detta har ökat behovet på att kunna utvärdera samt analysera vägkroppens strukturella bärighet och tillstånd. Det finns ett antal tillgängliga metoder att utvärdera bärigheten på färdiga vägar där FWD är en av de vanligaste metoderna. FWD är en statisk test som mäter deflektionen (responsen) när en cirkulär vikt träffar vägytan. I verkligheten är lasten från fordonen rörlig. Tidigare forskning har även visat att främst asfaltens egenskaper är beroende av belastningstid och temperatur. Det är därför bättre att mäta bärigheten under en rullande hjullast. En annan fördel är att man inte behöver störa trafikanterna eller ha personal på vägen vilket alltid innebär en ökad arbetsmiljörisk. Rullande bärighetsmätning sker i hastigheter upp mot 80 km/h vilket innebär minimala trafikantstörningar samt förbättrad arbetsmiljö eftersom ingen personal behöver exponeras för trafik. En annan fördel är att bärigheten mäts över hela sträckan och inte bara i några enstaka punkter. I dagsläget erhålls liknande mätdata som för FWD-mätningar. I en nyutvecklad Traffic Speed Deflektometer utrustning (TSD) har lasrar monterats framför respektive bakom ett belastat hjul. Detta möjliggör att viskoelastiska egenskaper hos överbyggnaden kan mätas och analyseras. Den nya utrustningen förväntas att ge betydligt djupare kunskap om vägars inneboende bärighet. I början av 1990-talet utvecklade VTI en liknande utrustning som kallades RDT. Denna utrustning var mycket modern med så långt före sin tid att bl.a. dåvarande datorkapacitet inte räckte till. Behovet då var samma som nu, dvs. att få tillgång till bättre och noggrannare bärighetsmätningar. Det finns därför ett stort behov och potential för att öka kunskapsnivån inom det aktuella området för både beställare, konsulter och entreprenörer, genom att öka tillgången till mer potentiella mätmetoder och förfinade analyshjälpmedel för att bredda förståelsen för bärigheten i en vägkropp. På sikt bidrar detta till en kunskapsuppbyggnad i hela branschen angående verifiering av vägars bärighet. Genom att kunna identifiera svagare partier i tid kan optimerade drift- och underhållsarbeten planeras och sättas in i rätt tid.

1.1 Bakgrund

Karakterisering av en vägkropps strukturella egenskaper spelar stor roll för att bestämma vägens livslängd. Ett antal olika metoder har utvecklats sedan 50 talet.

- Benkelman Beam (1952)
- LaCroix Deflectograph (1957)
- FWD (Late 1960s →)
- Danish Deflectograph (1972→)
- Curviamètre (1972→)
- RDT (1992-2006)
- HSD/TSD (2003 →)
- TSD (2010 →)
- Raptor (2016 →)

Gemensamt för dessa metoder är att de mäter vägytans deflektion. Deflektionen kan mätas statiskt, dynamiskt samt rullande. Under 70-talet utvecklades utrustningar som kunde mäta deflektionen under ett rullande fördonslast. Dessa utrustningar förfinades allt eftersom kraftigare analysverktyg samt datorer blev tillgängliga. Det är värt att nämna att VTI började att utveckla en mycket avancerad mätutrustning, RDT, under 1990-talet. Dessvärre krävde systemet mer datorkraft än vad som var tillgängligt. Från början av 2000-talet skedde en snabb utveckling av systemen och sedan 2010 blev kommersiella utrustningar tillgängliga, TSD, Greenwood [2]. Dynatest lanserade Raptor 2017 [3]. Dessa utrustningar mäter deflektioner (kontinuerligt i ca 80 km/h).

Fallviktsmätning (FWD) är idag den vanligaste metoden för att mäta vägkroppens strukturella egenskaper. Fallviktmätning används för alla vägunderlag i Sverige. Fallviktsmätning ger nyttig information om vägens skick, dvs. vägens bärighet i förhållande till trafikmängden. Dessa mätdata kan analyseras för att sedan bestämma vilka åtgärder som behöver göras. Fallviktsmetoden anses vara en långsam metod eftersom det tar tid att analysera data. Även mätningen tar tid, en mätpunkt tar ungefär en minut. På en timme kan man mäta ca 3 km väg, om intervallet mellan varje mätning är 50 m. Vidare kräver fallviktsmätning avstängning av vägen.

Intresset har därför ökat för de rullande deflektions mätningarna i och med att de börjar bli kommersiellt tillgängliga. Rullande bärighets mätning är snabb och kostnadseffektiv metod. På en timme kan man mäta ca 80 km väg eftersom bilen färdas i hög hastighet, (upp till ca 80 km/h).

Inom ramen för detta projekt har olika vägar mätts med en TSD utrustning från Polska IBDIM.

Kunskap om rullande bärighetsmätningar är mycket begränsade för svenska förhållanden. Denna kunskapsbrist försvårar bredare implementering av tekniken.

Det finns därför ett stort behov och potential för att öka kunskapsnivån inom det aktuella området för både beställare, konsulter och entreprenörer.

1.2 Syfte och mål

Föreliggande FoU-projekt syftar till att öka kunskapen om rullande bärighetsmätning samt hur den beräknade bärigheten kan analyseras och värderas. Projektet skall utföra TSD-mätning samt kompletterande FWD-mätningar på ett antal utvalda vägsträckor med dokumenterad historik. Analys skall utföras med elastiskt och viskoelastiskt beräkningsprogram. Projektet förväntas öka kunskapen om de faktorer som bidrar till vägkroppens bärighet. Arbetet förväntas också att bidra med kunskapsuppbyggnad för utvecklande av framtida funktionskrav att tillämpa i kommande regelverk och kvalitetssystem.

I rapporten presenteras en jämförelse mellan mätningar som på E22:an med TSD och traditionell fallviktsmätning för att hitta likheter och skillnader mellan dessa två metoderna. Även praktiska tillämpningar med TSD ska undersökas, exempelvis räkna ut vägens styvhet och deflektion.

Vidare redovisas mätningar från en teststräcka på Rv40 där både TSD samt FWD mätningar jämförs.

2 Vägsystemets funktion

Vägsystemets funktion påverkas direkt av anläggningens tekniska tillstånd, som i sig påverkas av yttre påfrestningar som exempelvis väder och trafik. När en väganläggning bryts ned försämras dess tekniska tillstånd, och tillslut är tillståndet så dåligt att en funktionsbrist uppstår. Det kan exempelvis röra sig om att vägen är så spårig eller ojämn att det inte går att köra säkert i den hastighet den byggdes för. För att undvika att en funktionsbrist uppstår måste underhåll som förbättrar väganläggningens tillstånd utföras innan tillståndet blivit för dåligt. En grund för att planera underhåll är därför att ha kännedom om vägsystemets tekniska tillstånd.

2.1 Bärighet

Bärighet används som ett begrepp för hur stor last som kan accepteras med tanke på risk för sprickor eller vägdeformationer. Trafikverket definierar bärighet som högsta last, enstaka eller ackumulerad, som kan accepteras med hänsyn till uppkomst av sprickor eller deformationer, (TRVMB114, 2012). Vägar som är motståndskraftiga för sprickor och deformationer klarar högre belastning, ex. motorvägar.

Vägar som inte är enskilda delas in i fyra bärighetsklasser, BK1, BK2, BK3 och BK4. Om inte annat har föreskrivits tillhör en allmän väg bärighetsklass 1 (BK1) och övriga vägar som inte är enskilda bärighetsklass 2 (BK2). Föreskrifter om att en allmän väg eller del av en sådan väg ska tillhöra bärighetsklass 2, 3 eller 4 meddelas av Trafikverket eller, om kommunen är väghållare, av kommunen. Trafikverket får meddela föreskrifter om att förandet av fordon eller fordonståg på väg med bärighetsklass 4 ska vara förenade med villkor.

Max tillåtna bruttovikt, axeltryck, boggitryck och trippelaxeltryck beskrivs nedan:

Tabell 1 Max bruttovikt [4]

	BK1	BK2	BK3	BK4
	64 ton	51.4 ton	37.5 ton	74 ton

Tabell 2 Max axeltryck [4]

	BK1	BK2	BK3	BK4
Axel som inte är drivande	10 ton	10 ton	8 ton	10 ton
Drivande axel	11.5 ton	10 ton	8 ton	11.5 ton

Tabell 3 Max boggitryck [4]

	BK1	BK2	BK3	BK4
Avstånd <1.0 m	11.5 ton	11.5 ton	11.5 ton	11.5 ton
Avstånd 1.0 – <1.3 m	16 ton	16 ton	12 ton	16 ton
Avstånd 1.3 – <1.8 m	18 ton	16 ton	12 ton	18 ton
Avstånd >1.8 m	20 ton	16 ton	12 ton	20 ton

Tabell 4 Max trippelaxeltryck [4]

Max trippelaxeltryck				
	BK1	BK2	BK3	BK4
Avstånd <2.6 m	21 ton	11.5 ton	11.5 ton	21 ton
Avstånd 2.6 – <4.4 m	24 ton	16 ton	12 ton	24 ton
Avstånd 4.4 – <4.7 m	25 ton	16 ton	12 ton	25 ton
Avstånd >4.7 m	26 ton	16 ton	12 ton	26 ton

För ytterligare fordonsuppgifter hänvisas till Transportstyrelsen [4].

De generösa maxvikterna är bra för Sveriges transportintensiva industrikonkurrens men kräver bärkraftiga vägkroppar samt kostnadseffektiva underhållsåtgärder för att varaktigt vidmakthålla vägsystemets funktion.

2.2 Bärighetsmått

Det finns inget exakt mått på bärighet enligt Trafikverkets definition. Det har därför tagits fram ett antal olika metoder och mått för att beskriva bärighet för en vägkropp.

För en översiktlig och snabb uppskattning av det strukturella tillståndet kan vissa representativa parametrar vara lämpliga. Det gemensamma för dessa är att de är enkla att beräkna med hjälp av uppmätta deflektioner.

Nedan ges exempel på kategorisering av tre vägartyper [5] samt sex vanliga och enkla bärighetsmått som kan beräknas utifrån mätdata [6].

Tabell 5 Exempel på indelning av vägtyper med hänsyn till ÅDT [5]

Kategori	ÅDT (fordon/dygn)
Små vägar	< 800
Mellanstora vägar	800-3000
Stora vägar	> 3000

För att bestämma lagerstyvheterna utförs en passningsräkning med hjälp av datorprogrammet PMS-objekt [7]. Passningsräkning räknar ut elasticitetsmodulerna (styvheten), för överbyggnaden, obundna lagret samt terrassen (undergrunden). Vad som är bra och dåliga värden beror på flera faktorer, bland annat ÅDT och vilken vägtyp som avses. I tabell 6 ges en indikation på rimliga bärighetsvärden baserade på studerade vägar utan att de behöver förstärkas.

Tabell 6 Intervall för olika bärighetsmått före förstärkning [5]

Bärighetsmått	Små vägar	Mellanstora vägar	Stora vägar
Ytmodul	220-345 MPa	350-500 MPa	500-600 MPa
Asfaltstöjning	380-550 µm/m	200-350 µm/m	150-200 µm/m
SCI	280-400 µm	125-250 µm	75-125 µm
Bärighetsindex, BI	2-3	3.5-6.5	5.5-8.5
Krökningsradie	70-90 m	100-200 m	250-400 m
Undergrundsmodul	50-100 MPa	25-100 MPa	40-100 MPa

2.2.1 Ytmodul

Med ytmodulen beräknas ytans E-modul vid avståndet noll från lasten, dvs. rakt under belastningsytan. Ytmodulen betecknas ofta med, E0. Uträkningen utgår från att underlaget är homogent, isotropt och linjärelastiskt med ett enda lager, alltså räknar man med ett medelvärde på E-modulen [6]. Eftersom beräkningen utförs direkt under belastningen påverkas E-modulen av asfalten, obundna lagret samt terrassen. För att bestämma ytmodulen krävs det information om deflektionen, spänningen, tvärkontraktionstalet samt belastningsplattans diameter och styvhet, se Ekvation 1.

$$E0 = \frac{1000 * f * (\alpha - \nu^2) * \sigma_0 * \alpha}{D_0} \qquad \text{[Ekv 1]}$$

där:

$E0$ = Ytmodul [MPa]

f = 2 för segmenterad platta, $f = \frac{\pi 2}{2}$ för styv platta

D_0 = deflektion i centrum, [µm]

Medelmodulen beskriver ytmodulen fast på ett längre avstånd från centrum, ju längre ifrån centrum vi räknar desto färre lager tas i praktiken med i beräkningen. Detta är på grund av att färre lager påverkas av lasten. Ofta antas en 45° lutning av lastutbredningen för deflektionen.

$$E_r = \frac{1000 * \sigma_0 * \alpha^2 * (1 - \nu^2)}{D_r * r} \qquad \text{[Ekv 2]}$$

där:

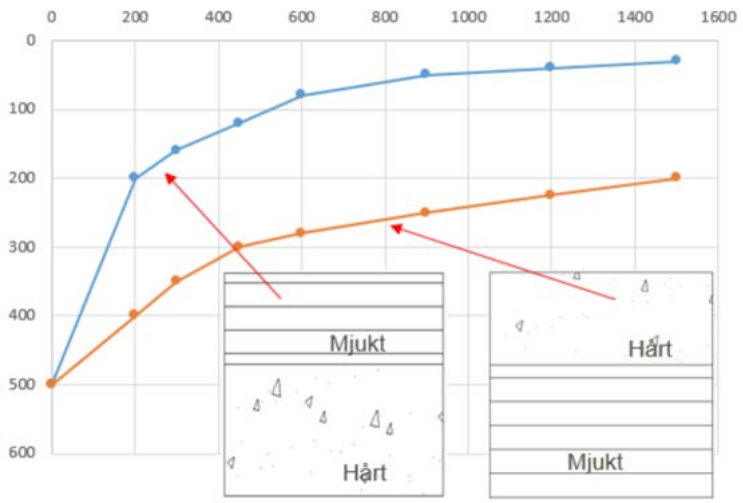
E_r = Medelmodul på avståndet r från centrum [MPa]

α = plattans radie [mm]

ν = poissons tal kan antas vara 0.35

2.2.2 Surface Curvature Index, SCI300

SCI300 är ett mått på styvheten av beläggningen. Deflektionen i centrum, D_0, subtraheras med deflektionen 300 mm ifrån centrum, D_{300}. Med SCI_{300} beskrivs om beläggningen har bra bärighet. Ju lägre värde på SCI_{300} desto bättre bärighet har beläggningen. Om vägen har dålig beläggning sjunker vägen mest under belastningscentrum och man får ett högt värde på SCI_{300}. Om vägen har styv beläggning sjunker inte vägen lika mycket under belastningscentrum och värdet på SCI300 blir lågt, se figur 1 för illustration av bra och dålig beläggning.



Figur 1. Exempel på SCI300 för styv beläggning (orange) samt mjuk (blå) [8].

2.2.3 Undergrundsmodul

Det finns olika formler och metoder att räkna på undergrundsmodulen men den vanligaste som används i Sverige är trafikverkets undergrundsmodul för färdigbyggda vägar, se ekvation 3. Undergrundmodulen kan bestämmas med hjälp av geotekniska mätningar såväl som fallviktsmätning.

Vid fallviktsmätning utnyttjas deflektionen på 900mm ifrån belastningscentrum.

$$E_u = \frac{52000}{D_{900}^{1.5}} \qquad \text{[Ekv 3]}$$

I tabell 7 anges några typiska E-moduler för undergrundsmaterial.

Tabell 7 Exempel på typiska E-moduler för olika undergrundsmaterial [8]

Material	E-modul [MPA]
Organiska jordar	10-25
Ler	5-1000
Silt	15-45
Sand	30-100
Grus	75-150
Morän	35-500

2.2.4 Asfaltstöjning

Sprickor i asfalten uppkommer från töjningar som bildas i underkant av beläggningen som ett resultat av dålig dimensionering eller på grund av tung trafik. Vid belastning av tung trafik på ytan uppkommer det horisontella trycktöjningar samtidigt som i underkant uppkommer det horisontella dragtöjningar. Horisontella dragtöjningar i underkant av beläggningen är ett mått på risken för utmattningssprickor i underkant av beläggningen [6]. Asfaltstöjningen brukar antas vara en kritisk punkt i vägkonstruktionen. Detta gör att asfaltstöjningen används för livslängdberäkningar enligt TRVK Väg. Detta mått kan uppskattas enligt ekvation 4, men det finns även andra mått som fungerar för vissa vägar bättre än denna.

$$\varepsilon_\alpha = 37.4 + 0.988 * D_0 - 0.553 * D_0 - 0.502 * D_0 \qquad \text{[Ekv 4]}$$

där:

ε_α = töjning i underkant beläggning [µm/m]

Eftersom asfalt är känslig för temperaturförändringar behövs det temperaturkorrigering för att kunna jämföra uträkningarna med andra vägar. Om temperaturen är hög på ytan blir asfalten mjuk och om temperaturen är låg blir asfalten styv.

2.2.5 Bärförmågeindex, BI

Bärförmågeindex, BI, är ett dimensionslöst mått för vägens bärighet. Måttet är objektivt och enkelt att bestämma. Måttet utgår endast från asfaltstöjningen men är ett mer pedagogiskt mått eftersom ju högre värde desto bättre bärighet. BI beskriver hur motståndskraftig beläggningen är mot utmattning och kan användas för bedömning av beläggningens tillstånd före och efter en åtgärd. BI kan tillämpas för alla typer av vägar som har en asfaltslager [6]. BI beräknas enligt ekvation 5

$$BI = \frac{1000}{\varepsilon_\alpha} \qquad \text{[Ekv 5]}$$

där:

ε_α = töjning i underkant beläggning [µm/m]

Temperaturkorrigering krävs för att jämföra mätningar och värden från sträckor som har mätts vid olika tillfällen med olika temperaturer. Temperaturkorrigeringen görs om till 10°C och en ny töjning beräknas enligt ekvation 6.

$$\varepsilon_{\alpha,10} = \frac{\varepsilon_{\alpha,T}}{(\frac{T}{10})^{0.0308*h_1*D_0}} \qquad \text{[Ekv 6]}$$

där:

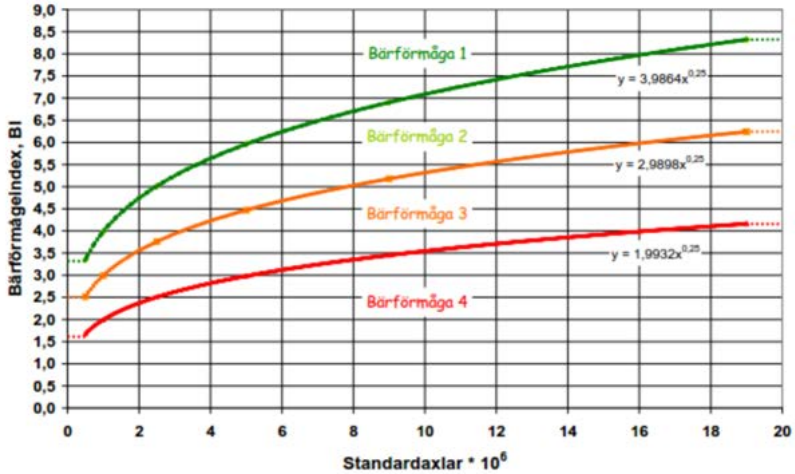
$\varepsilon_{\alpha,10}$ = dragtöjning vid + 10°C [µm/m]

$\varepsilon_{\alpha,T}$ = dragtöjning vid mättemperaturen, T [µm/m]

T = mätt temperatur [°C]

h_1 = beläggningstjocklek [mm]

Bärförmågan bestäms genom kunskap om antal standardaxlar som beräknas belasta vägen. Figur 2 visar bärförmågaindex med hänsyn till antalet standardaxlar.



Figur 2. Bestämning av bärförmågeklass med hänsyn till dimensionerande antal standardaxlar [6].

2.2.6 Krökningsradie

Krökningsradien används främst för jämförelse. SCI_{300} och krökningsradien har likadana variabler och är därför beroende av varandra. Krökningsradien används för att beskriva bärigheten på beläggningsytan och räknas ut enligt ekvation

$$R_{300} = \frac{45000}{D_0 * (\frac{D_0}{D_{300}} - 1)} \qquad \text{[Ekv 7]}$$

2.3 Passningsräkning

För uträkning av passningen krävs kännedom om vissa parametrar. I PMS-objekt delar man upp sin modell i tre lager, bundet lager, obundet lager och undergrund som är i allmänhet terrassen. Längre ner under terrassen antas en styv yta, (berg).

Bundet lager rekommenderas ha en tjocklek som är halva tjockleken av belastningsplattan, oftast 75mm. Detta gör det enklare för PMS-objekt att räkna ut E-modulen. För tjocklekar under 75mm antas en realistisk E-modul med hänsyn till temperatur och sprickor [6].

Obundet lager består oftast av bär – och förstärkningslager med eventuellt skyddslager men i PMS-objekt betraktas detta som ett lager.

Undergrunden står på en fast yta, (berg). Fasta ytan beräknas vara styv med E-modulen 1GPa. För att räkna ut hur långt ner berget är används ofta fallviktens mätningar som deflektionen på olika avstånd. Dessa deflektioner plottas i ett invers avstånd, (1/r) – deflektion diagram.

Information om lagertjocklekar och material kan fås genom olika metoder, exempel på några metoder är upptagning av borrkärnor, GRP (georadarpenetration) och seismisk undersökning.

2.3.1 Tvärkontraktionstal, Poissons tal

Tvärkontraktionstalet eller Poissons tal varierar normalt mellan 0,15 – 0,5, det förstnämnda gäller betong och det senare för mjukt underlag. Förutom för betongbeläggning, kan det vara lämpligt att sätta Poissons tal till 0,35. Denna förenkling gör man för att olika lager slås ihop till en modell [6].

2.4 Korrelation mellan olika bärighetsmått

Vilka mått som ska användas för att beskriva bärigheten för vägen beror bland annat på vilket mått som man är mest van vid att använda. Tabell x nedan visar hur korrelationen ser ut mellan olika bärighets mått. Vissa mått använder sig av samma deflektions data, därför är det onödigt att redovisa både, ex. ytmodul och D_0. Här är korrelationen 1,0. Värdena i tabell 8 är gjord med hjälp av data från två vägar, en styv väg med bra bärighet och är högtrafikerad och en annan med låg bärighet och är lågtrafikerad. Dessa data är inte tillräckligt för att tabellen ska vara helt pålitligt men den visar med stora drag att det finns samband mellan vissa mått. Gröna värden innebär att korrelationen är god och det räcker att endast redovisa ett av måtten för beskrivning av samma lager.

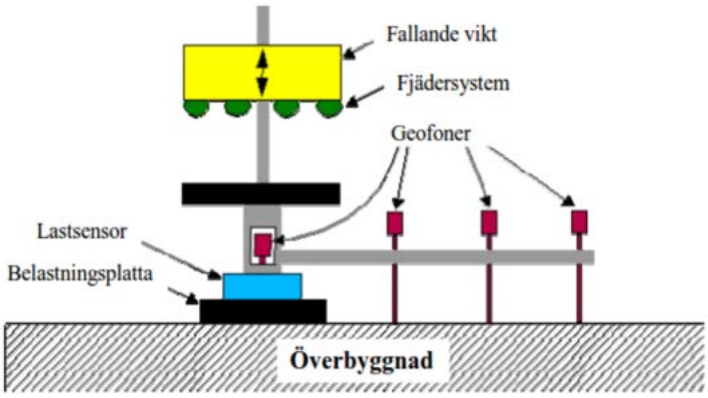
Tabell 8 Exempel på korrelation mellan olika bärighetsmått [8].

	D0	Ytmodul	SCI300	Asfaltstöjning	BI	Krökningsradie	Area	BDI	BCI	Undergundsmodul
D0	1									
Ytmodul	1	1								
SCI300	0,97	0,97	1							
Asfaltstöjning	0,95	0,97	1	1						
BI	0,97	0,98	0,99	1	1					
Krökningsradie	0,94	0,95	0,99	0,98	0,99	1				
Area	0,77	0,76	0,84	0,84	0,84	0,88	1			
BDI	0,97	0,97	0,94	0,94	0,93	0,9	0,7	1		
BCI	0,91	0,96	0,89	0,98	0,88	0,83	0,57	0,97	1	
Undergrundsmodul	0,6	0,52	0,4	0,41	0,38	0,38	0,1	0,5	0,65	1

2.5 Fallviktsmätning

Ett sätt att mäta bärighet är fallvikt. Mätningen är en simulering av en tung hjulöverfart genom en dynamisk belastning på ytan, dvs. tunga fordon med viss hastighet. Det som mäts är deflektionen och kraften, dessa kan användas till bland annat bärighetsanalys.

Det som mäts vid belastningen är hastigheten av responsen som man får tillbaka eller deflektionen i belastningspunkten (belastningscentrum). För att få en bra analys av hela sträckan mäts belastningen ett antal mm ifrån belastningscentrum också, på så sätt kan slitlagret och underliggande lagers skick beräknas, se figur 3.



Figur 3. Exempel på fallviktsmätning [5].

Förutom information om vägöverbyggnaden ger fallviktmätning information om terrassen. Terrassmätningar jämförs sedan med överbyggnadsmätningar för att få information om hela konstruktionen för att kunna dra säkrare slutsatser i beslutsprocessen.

Vid test av färdiga vägar ska normalt belastning på 50 kN användas med en avvikelse på ±5 %, denna last motsvarar en standardaxel på 100 kN fördelat över två hjul. Vid terrassmätningar kan man välja andra belastningar från 10 kN till 90 kN. Betongvägar bör testas så att deformationerna inte blir för små. En rekommendation är att använda belastningar över 70 kN. Pålastningstiden som definieras av den sammanlagda tid under vilken kraften först ökar från 5 % upp till sin maximala storlek, dels sjunker ned till 95 % av detta värde, ska vara minst 10 ms (millisekunder) [9].

På färdiga vägar ska en belastningsplatta på 300 mm i diameter användas för att representera bredden på hjulet på bästa sätt. Denna platta bör ha ett gummiunderlag med tjockleken 5 mm. Gummiunderlägget ska kunna ge god klisterbarhet med vägen så att den inte rör sig, räfflade gummiunderlägg rekommenderas. Segmenterade plattor formar sig efter vägens ojämnhet och erbjuder en jämn lastfördelning eftersom plattan består oftast av två eller fyra delar som tillsammans bildar en cirkulär platta.

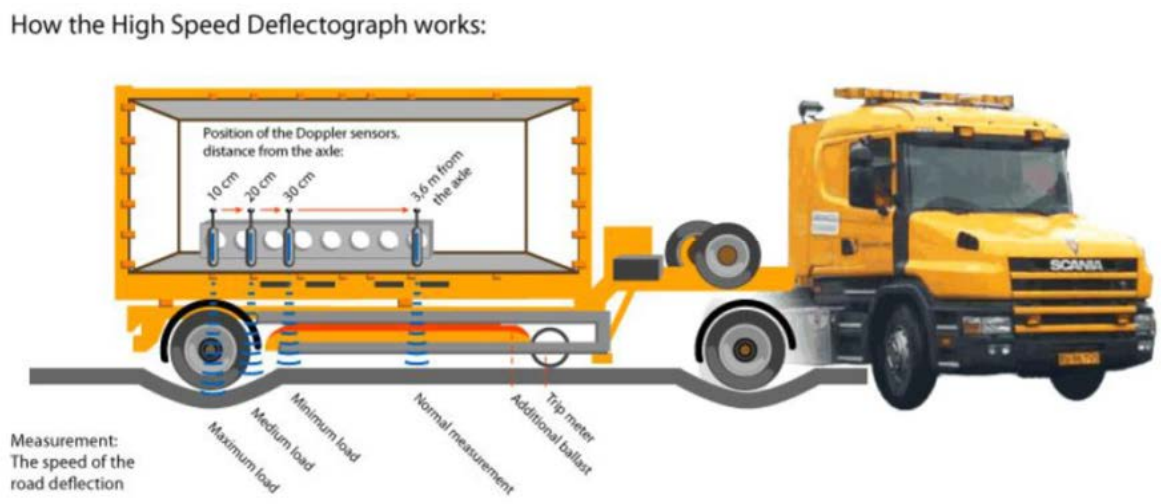
En nackdel med fallviktsmätningar är att vid mätning så är man ibland stänga av gatan och sätta upp skyltar för alternativa vägar. När man mäter bör fordonet vara helt stilla för att sedan sänka plattan och till sist släppa vikten för att mäta bärigheten. Analys och bearbetning av data kan ta lång tid.

Komponenterna som är typiska för att mäta bärigheten med fallvikt är bland annat ett kontrollsystem, lastvikt och platta, hydrauliskt system och geofoner (sensorer). Dessa komponenter kan monteras på ett fordon eller lastvagn.

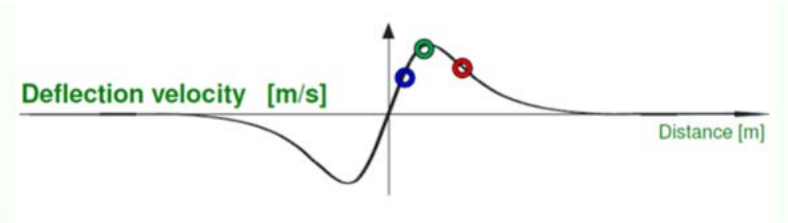
2.6 Traffic Speed Deflectometer (HSD/TSD)

Idén att skapa den perfekta rullande bärighetsmaskinen har funnits länge. Det började i Danmark, de första utrustningarna kunde mäta i en hastighet på ca 2-8 km/h vilket är långsamt jämfört med dagens som kan mäta i upp till 80-90 km/h.

Danska HSD/TSD fordonet är en lastbil med en trailer som har en singel axel på 10ton (100KN) som är standard för Danmark. Eftersom 10 tons axellaster används även i Sverige kan denna även tillämpas i Sverige. HSD/TSD använder dopplersensorer för att mäta deflektionen som uppstår av axellasten. Dessa lasrar är placerade enligt figur 4 och fungerar som geofoner. Sensorerna mäter vertikala hastigheten av deflektionen under det högra hjulet, se figur 5. Mätningarna är kontinuerliga deflektionsmätningar.



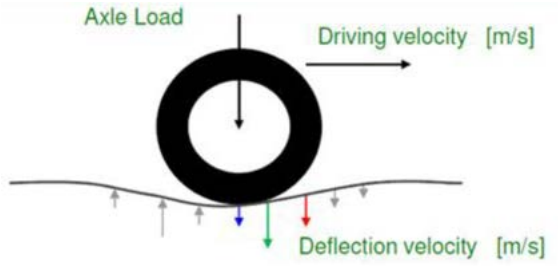
Figur 4. Danska HSD /TSD



Figur 5. Diagram av mätt deflektionshastigheten [10]

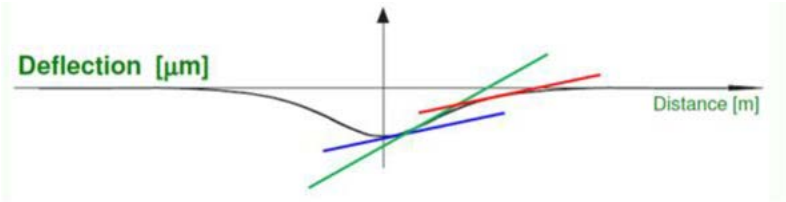
De första resultaten som fås ut av TSD är information om lutningarna längs med vägen, (slopes). Dessa lutningar definierar hur vägytan ser ut. Horisontella lutningar (värdet noll), indikerar en hård yta. Helt vertikala lutningar indikerar att vägen är sprucken eller skadad. Genom att ha kunskap om dessa lutningar kan vägen bedömas för sprickbildning eller deformationer. Dessa lutningar räknas slutligen om till deflektioner vid olika avstånd från centrum. Analys av bärigheten görs med hjälp av deflektions data och lutningar.

Dopplersensorerna mäter framförallt deflektionshastigheten istället för förskjutningen av ytan. Principen är det att man mäter direkt under däcket och ett antal millimeter framför. Figur 6 visar deflektionshastigheten under ett rullande hjul.



Figur 6. Princip av deflektionshastighet [10]

Deflektionshastigheten redovisas i diagram för bättre förståelse, se figur 5. Deflektionslutningen bestäms av deflektionshastigheten dividerad med körhastigheten. Eftersom lutningen på deflektionen, se figur 7, är derivatan av förskjutningen kan förskjutningen bestämmas. Detta innebär att deflektioner på olika avstånd från lasten kan mätas.

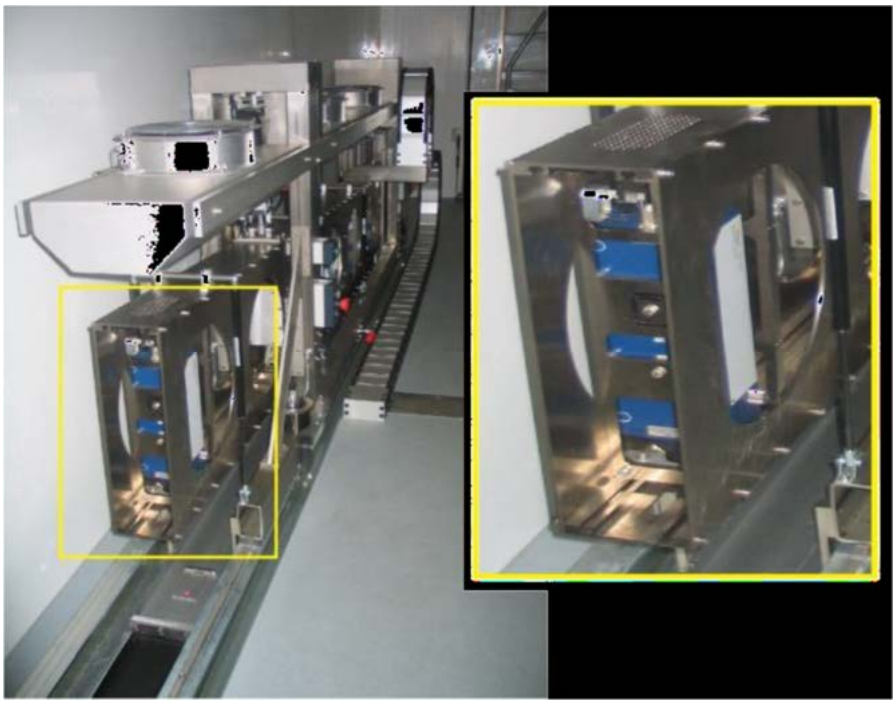


Figur 7 Deflektionen, tangent av lutningen [10]

2.6.1 Polska TSD (IBDIM)

Den polska TSD maskinen är en av den mest uppdaterade/avancerade i dagsläget enligt Greenwood. Utförda mätningar har utförts med denna lastbil. I figurerna nedan visas utseendet av lastbilen, lasrarna och hur det ser ut när lasrarna är aktiva.

Figur 8 Polska TSD utrustningen

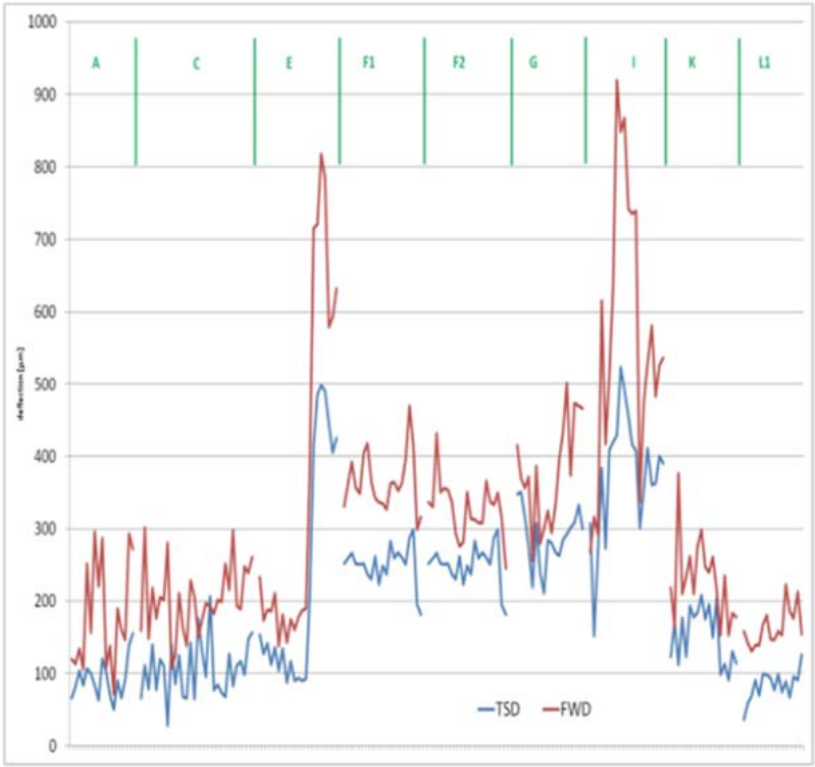


Figur 9 Illustration av mätutrustning i den tempererade lastvagnen

Figur 10 Illustration av de aktiva lasrarna

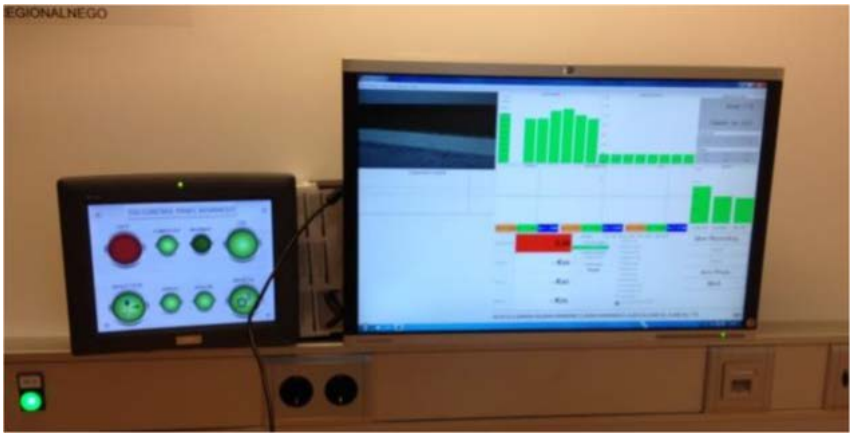
Innan mätningen påbörjas kalibreras utrustningen. Detta görs på två sätt. Först kalibrering utan ballast. Det innebär att man kör över en betongväg för att här kan den vertikala deflektionshastigheten försummas eftersom deflektionerna är väldigt små. Lasrarnas visar värden på deflektioner som är noll därmed kan laservinklarna kalibreras. Sedan gör man en geometrisk kalibrering. Detta innebär att lastbilen körs på en väg med varierande jämnhet, när de vertikala lutningarna och den horisontella längden beräknats kan vinklarna korrigeras till referenslasern.

TSD mätningar har jämförts med FWD mätningar över en lång sträcka för att fastställa hur bra TSD överensstämmer med andra metoder. Resultatet visade att TSD visar bra korrelation till FWD, se figur 11.



Figur 11 Exempel på jämförelse mellan TSD och FWD mätning.

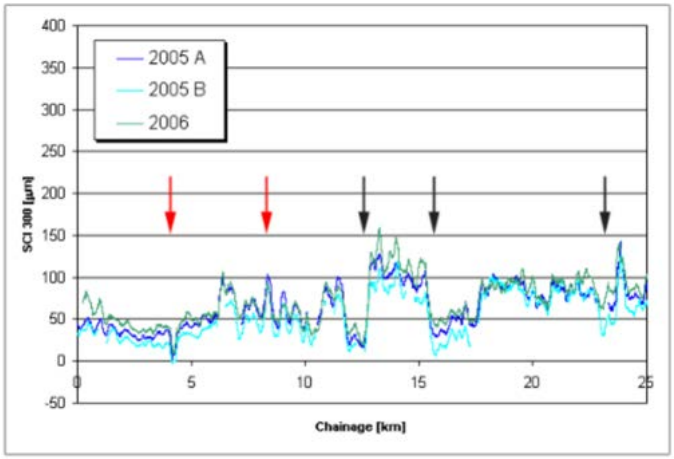
Utrustningen som tidigare nämnts finns i lastvagnen och består av 6 st lasrar som är kopplade till lastbilen där det kan kontrolleras av operatören. Operatören kan välja vad som ska mätas. Personal som krävs för att sköta fordonet är en förare och en TSD operatör. Under mättiden får ingen vara närvarande i lastvagnen eftersom temperaturen måste hållas konstant. Uppmätt data gör det möjligt att uppskatta deflektionen kontinuerligt. Datainsamlingen kan därefter bearbetas i särskilda program. Figur 12 visar mätutrustningen som finns inne i lastvagnen och vid passagerarsidan i själva lastbilen. Denna utrustning kontrolleras vid passagerarsidan när lastbilen gör mätningar.



Figur 12 Datorskärmar inne i TSD-lastvagnen [5].

2.6.2 Exempel på TSD-data från Danska mätningar

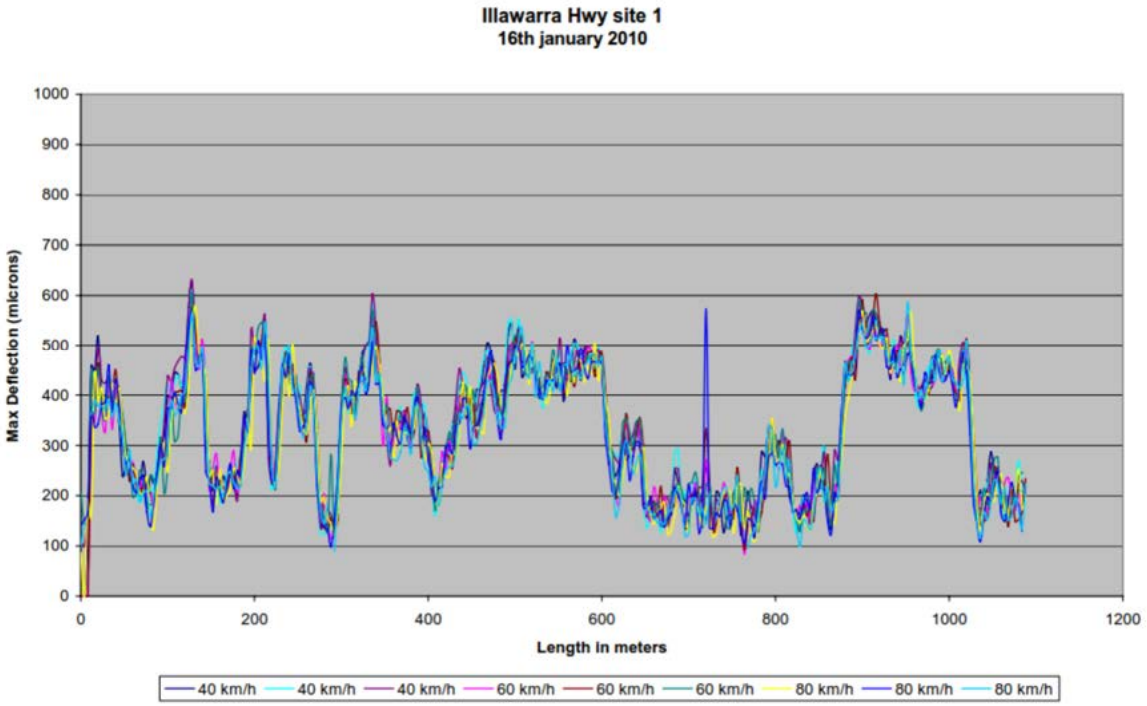
Under 2005 och 2006 mättes det statliga danska vägnätet, ca 3300 km, med TSD under 10 dagar respektive år, två mätningar gjordes 2005 och en 2006. Figur 13 visar tre linjer, data från juni 2005 är blått, data från juli 2005 är ljusblått och data från september 2006 är grön. Grafen visar bra repeterbarhet, nivåskillnaderna kan bero på temperaturskillnader [10].



Figur 13 Exempel på Danska mätningar 2005 och 2006 [10].

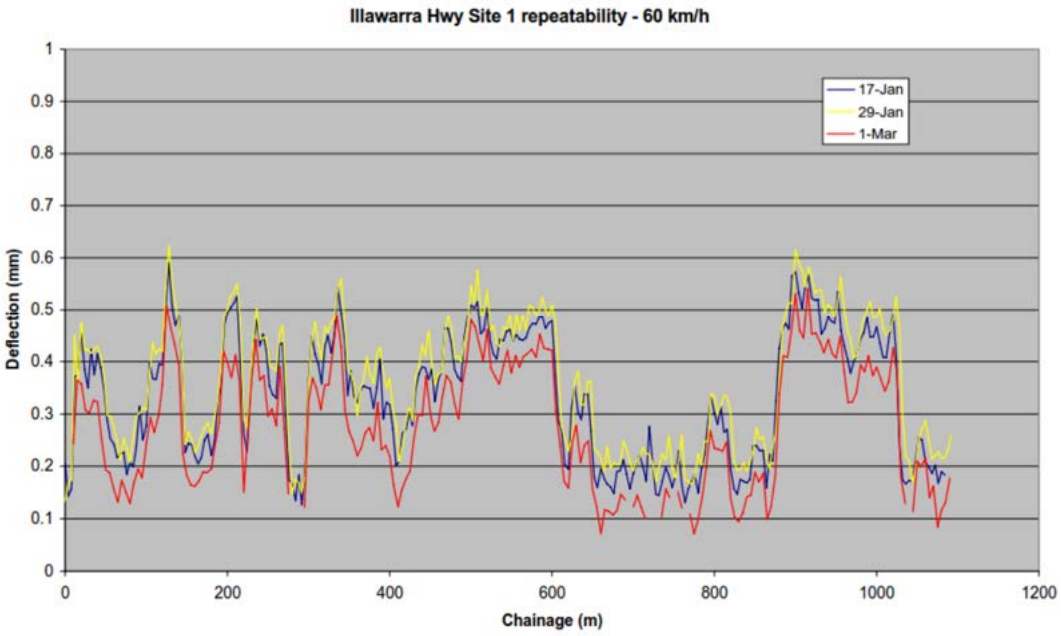
Beroende på vilket underlag mätningarna görs kan fordonet färdas i relativt höga hastigheter. På släta underlag kan TSD köras i 80-90 km/h och ändå ge bra resultat, men det är ovanligt att man kör i 90 km/h utan 80 km/h brukar man hålla sig till för att få så bra resultat som möjligt. Minsta hastighet är begränsad till 40 km/h, vid lägre hastigheter blir resultaten mindre noggranna.

I Australien har mätningar gjorts med TSD och där ville man visa hur de mätresultaten skiljer sig vid olika hastigheter. På en och samma sträcka gjordes nio mätningar med tre olika hastigheter, detta illustreras i figur 14. Nämnvärt är att skillnaden inte är så stor mellan dessa mätningar [11].



Figur 14 Exempel på 9 st mätningar på samma sträcka [11].

Beroende på årstid och temperatur i luften kan styvheten i marken ändras. Mätningar av kvalitetskontroll som gjordes i Australien visar att i januari var markstyvheten sämre än i mars då temperaturen minskat. I Australien är årstiderna motsatta Sveriges därför minskningen av temperaturen. I figur 15 visas resultatet, man kan notera att formen på linjerna är likadana men med lite nivåskillnader och detta beror på att det är olika temperaturer på ytan [15].



Figur 15 Exempel på mätningar vid olika temperaturer [11].

TSD-mätningar är snabbare än traditionella metoder för bärighetsanalyser. Detta kan leda till mindre kostnader för samma arbete. Temperaturen i bilen kan hållas konstant för att erbjuda optimal komfort för både personal och lasersensorer oavsett temperatur på utsidan. Eftersom ingen personal behöver exponeras för trafik är metoden säker. TSD kan kombineras med andra mätinstrument för att få annan information som krävs till efterbearbetningen [11].

3 Beskrivning av testytor

3.1 E22

December 2012 invigdes E22:ans två nya motorvägsdelar. Den ena delen ligger vid Hörby Norra – Linderöd och omfattar totalt en tio km lång motorväg och den andra delen ligger mellan Hurva – Rollsberga och är totalt 5 km. Vägen stod klar 1,5 månad tidigare än beräknat.

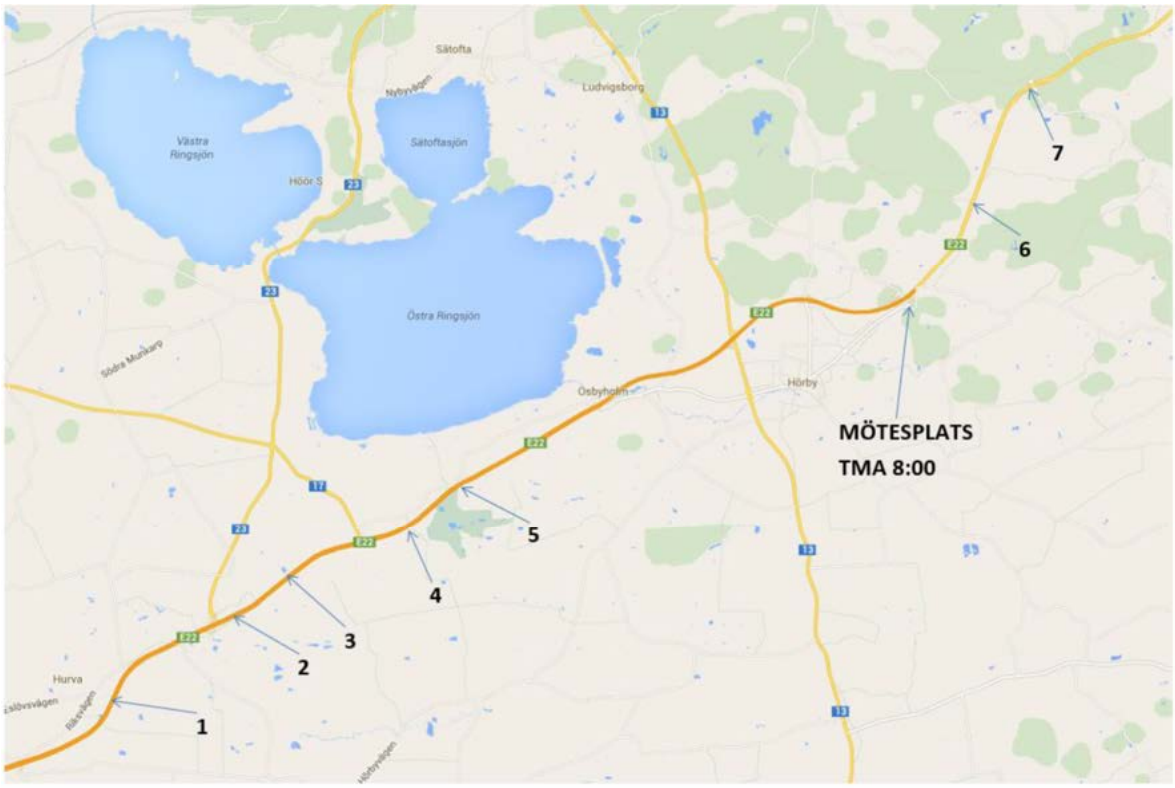
Redan några veckor efter invigningen upplevde trafikanterna ojämnheter i beläggningen och i mars månad 2013 sänktes hastigheterna på delar av vägen till 50 km/h på grund av gupp som uppstod på vägen, (Skånska dagbladet, 2013). Problemet berodde på bland annat ojämna tjällyftningar2.

Tjäle är ett fenomen som uppstår i marken, vatten som finns under marken fryser till is under vintertid och marken blir tjälad. Hur långt ner tjälen når beror på köldperioden. Is tar större plats än vatten och kan höja marken, vid tjällossning så kommer marken att sjunka därmed kan den spricka eller tappa sin bärighet.

Vägen är byggd med cementstabilisering som förstärkning men detta visade sig vara ineffektivt vid fogarna mellan bro och väg. Initiala ojämnheterna berodde på asfalten längs hela sträckan. Första vintern ökade ojämnheterna markant längs hela sträckan. Extra tydligt blev det vid broarna där det uppstod gupp uppemot ca 10 cm. Broarna som är av betong är hårdare än stabiliseringen i vägen och när stabiliseringen trycktes mot betongen höjdes asfalten vid fogarna3. Åtgärden gjordes under maj månad för de två broarna på E22:an vid Hörby Norra och Arup. Åtgärden var att ta bort cementstabiliseringen på 10 m och på var sida om respektive bron och ersätta med traditionell vägöverbyggnad, dvs. fylla marken med grus och asfaltera om. Denna lösning bedömdes motverka återkommande tjälproblem.

3.1.1 Fallviktsmätning på väg E22

Mätningarna på väg E22 börjar på löpande längd 68/090 och slutar på 91/300 enligt längdmätning i NVDB, som är en nationell vägdatabas. Figur 16 visar vilka delar som mättes. Längden på de sju mätningarna är på 300 m vardera förutom första sträckan som är på 450 m.



Figur 16 Illustration av E22 samt punkter som mättes med FWD.

Alla uppmätta sträckor har ett jordmaterial som är av morän förutom sista mätsträckan 91,000 – 91,300 som är isälvssediment.

3.1.2 Vägens uppbyggnad

Punkterna 1 och 2 som är mellan Hurva – Rolsberga samt 6 och 7 som är mellan Hörby Norra – Linderöd har samma konstruktion och detta förklaras i tabell 10 nedan. Punkterna 3,4,5 har en annan konstruktion. Data från dessa tre punkter används främst för jämförelse mellan fallvikt och TSD och passnings räknas inte.

Vägen, (punkt 1,2,6,7), är 700 mm tjock med cementstabilisering som förstärkning. Lagertjocklekarna redovisas i tabell 9. Körfält ett och två är respektive 3,25 m med vägrenen på två meter. Körfält 1, körfält 2 och vägrenen har samma konstruktion.

Tabell 9 Överbyggnadskonstruktion E22

Lager	Material	Tjocklek [mm]
Slitlager	Viacotop 11	35
Bindlager	ABb 16 PMB 45/80-55	50
Bindlager	ABb 8 PMB 45/80-55	15
Flis	2-5 mm 3 kg/m2	-
Förseglingsemulsion	BE60R 0.6 kg/m2 + BL20RK 0.3 kg/m3	-
Stabiliserat krossmaterial	Krossmaterial 0/31.5 med cement/merit	200
Stabiliserat jordmaterial	Jordmaterial typ 2-5 med cement	400

Mätningarna lades in i ett Excel ark där sex olika bärighetsmått användes för analysen. Mätningar har gjorts av spänningar tillsammans med deflektioner från centrum till 1800 mm från centrum (D0, D200, D300, D450, D600, D900, D1200, D1500, D1800). En annan information som krävs för beräkningen är temperaturen på vägytan. Temperaturen används för att korrigera mätvärdena till vad de skulle varit om temperaturen varit 10°C. Kraften kan beräknas genom formeln $\sigma = FA$, arean motsvarar belastningsplattans area. Plattan som används har en diameter på 300 mm. Eftersom deflektionerna påverkas av belastningens storlek, normeras deflektionerna, till 50 kN. Exempelvis får vi ut en kraft på 49kN och vill normera deflektionen, D0, som är 70 μ m: 5049∗70=71,43 $blir\ den\ nya\ D0$. Om kraften avviker mer än ±5 % av 50 kN antas mätningen vara underkänd [9].

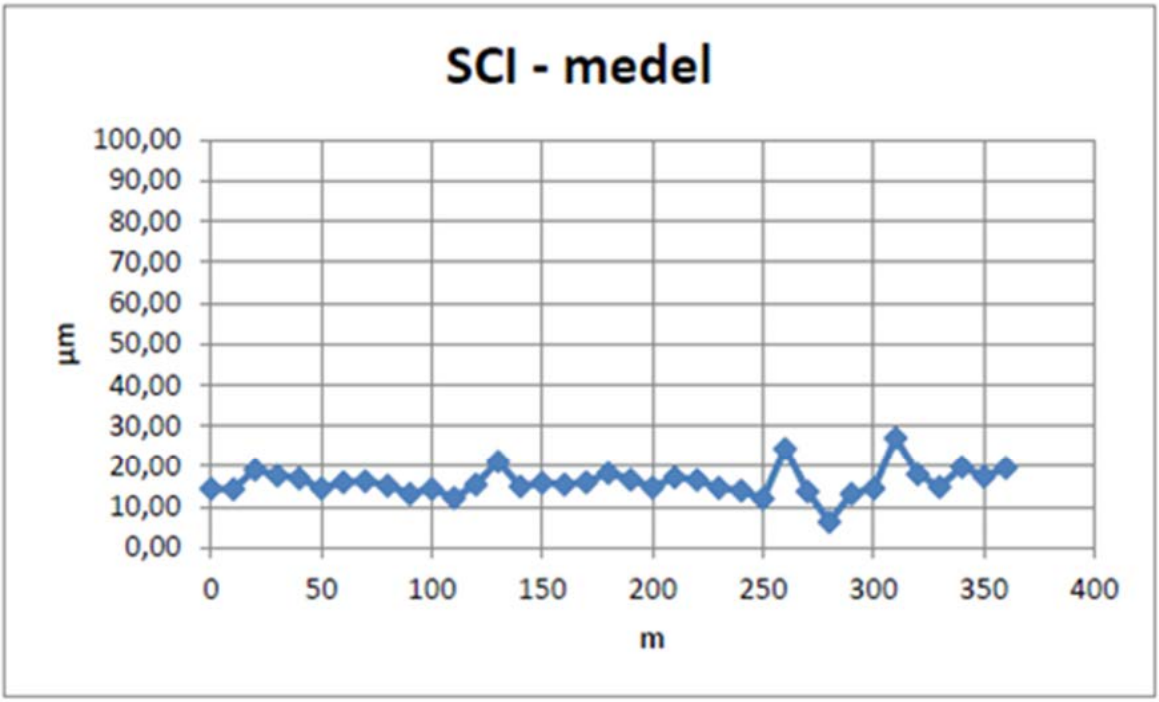
Eftersom varje mätpunkt har mätts tre gånger har ett medelvärde för varje mätpunkt tagits fram. Medelvärdet har också tagits fram för respektive delsträcka som mättes.

3.1.2.1 Sträcka 68/090 – 68/450

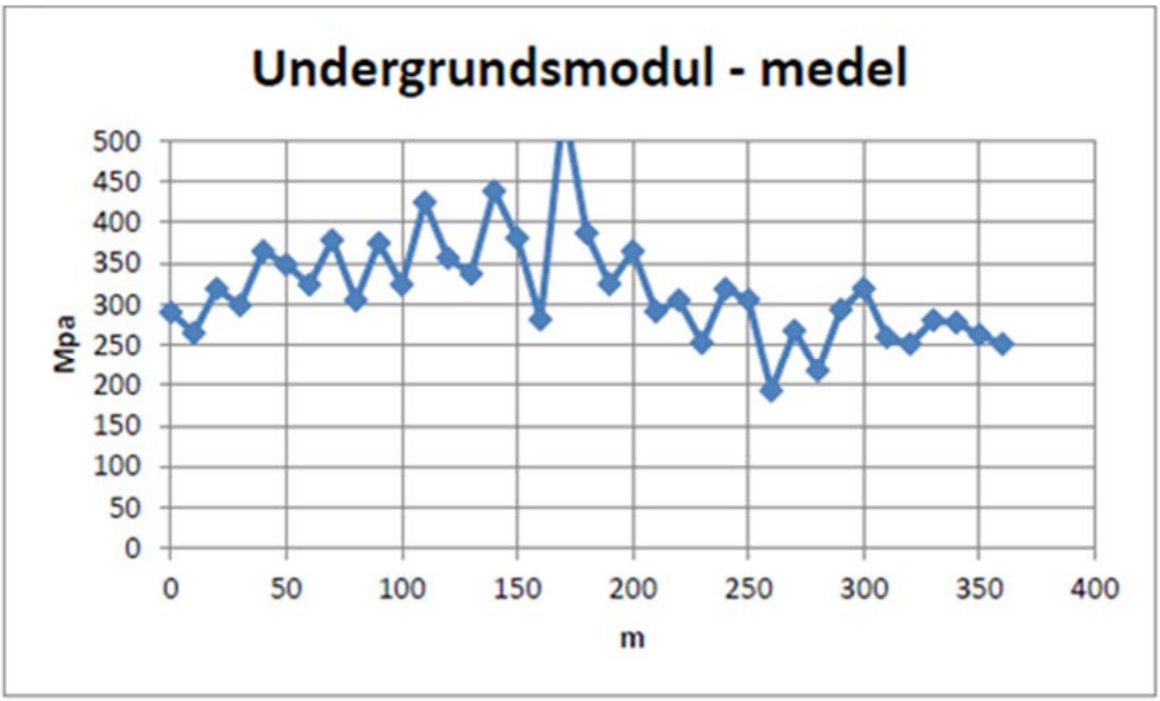
Denna del ligger mellan Hurva – Rolsberga och har bra bärighet i ytliga lagret eftersom värdena på SCI300 är låga. Mätsträckan är längre i denna del än de resterande sträckorna. SCI300 visar goda värden enligt figur 17, BI-värdena är över 15 vilket innebär att BI ligger i bärförmåga 1 oavsett standardaxlar på vägen. Ytmodulen ligger omkring 3000 MPa som tyder på att denna sträcka har hård yta och är ganska homogent. Undergrunden verkar vara hård enligt figur 18. I tabell 10 kan man se inom vilka intervall de olika bärighetsmåtten ligger.

Tabell 10 Intervall värden för sträcka 68/090 – 68/450

	SCI300 [µm]	Ytmodul [MPa]	Undergrunds-modul [MPa]	Asfaltstöjning [µ-strain]	Kröknings-radie [m]	BI [-]
Intervall	6 – 27	2200 – 2400	200 – 450	49 – 66	1074 – 6500	15 - 20



Figur 17 Medelvärde av SCI300



Figur 18 Medelvärde av undergrundsmodulen

3.1.2.1 Sträcka 71/051 – 71/350

Denna del ligger mellan Hurva – Rolsberga och har lite högre SCI300 än förra delsträckan, men värdena överstiger inte 50 μ m vilket innebär att ytliga lagret är hårt. Bärförmågeindexet ligger mellan 12-19 vilket är högt (Bärförmåga 1). Ytmodulen ligger runt 2000Mpa med några värden över och några som ligger under. Undergrunden har lägre styvhet än förra delsträckan men en punkt som avviker från de andra.

3.1.2.1 Sträcka 72/400 – 72/700

Ytan visar på bra bärighet när man tittar på SCI300, ytmodulen och asfaltstöjningen. SCI300 ligger ganska lågt med några värden som är över 40 men det mesta ligger under 40 μ m. Bärighetsindexet ligger i bärförmåga 1, detta innebär att vägen klarar av höga belastningar enligt figur 1. Denna delsträcka är ganska homogent. Undergrunden är bra, styvheten ligger inom en rimlig intervall, se

3.1.2.1 Sträcka 74/680 – 74/980

Här är ytan nästan likadan som förra delsträckan med några värden för SCI300 över 40 i slutet. Ytmodulen och asfaltstöjningen styrker att ytan är hård och har bra bärighet. I början på sträckan är undergrunden mycket hård och har en styvhet på 800Mpa, men värdena sjunker snabbt ner till ca.100Mpa, därför kan första värdet vara fel. Förutom första värdet är undergrunden mellan 100-200Mpa. Bärighetsindexet är över 10 därför anses vägen vara i bärförmåga 1.

3.1.2.1 Sträcka 76/390 – 76/690

I början av sträckan har vägytan mycket bra bärighet sedan ökar SCI300 ju längre bort tills den ligger på ca 60 μ m i slutet, detta värde är fortfarande litet därför anses ytan vara hård längs med hela delsträckan. Även ytmodulen börjar högt för att sedan sjunka, men bärigheten är fortfarande bra. BI ligger på över 8. Undergrunden har lägre värden än de andra delsträckorna, mellan 50 – 100 MPa.

3.1.2.1 Sträcka 88/600 – 88/900

Förutom en punkt för SCI300 som avviker från de andra är ytan mycket hård, punkten ligger på sträckan 190 m. Ytmodulen och asfaltstöjningen stärker att bärighet är god och klarar höga belastningar. Nästan överallt kan vi se att vid 190 m händer det något som gör att vägen vid denna punkt är sämre än resten av delsträckan, vid punkten 190m ligger BI på 6, Krökningsradien på 300m, asfaltstöjning på 140 μ-strain och ytmodulen på 860 MPa. Undergrunden verkar vara mycket hård med höga styvheter.

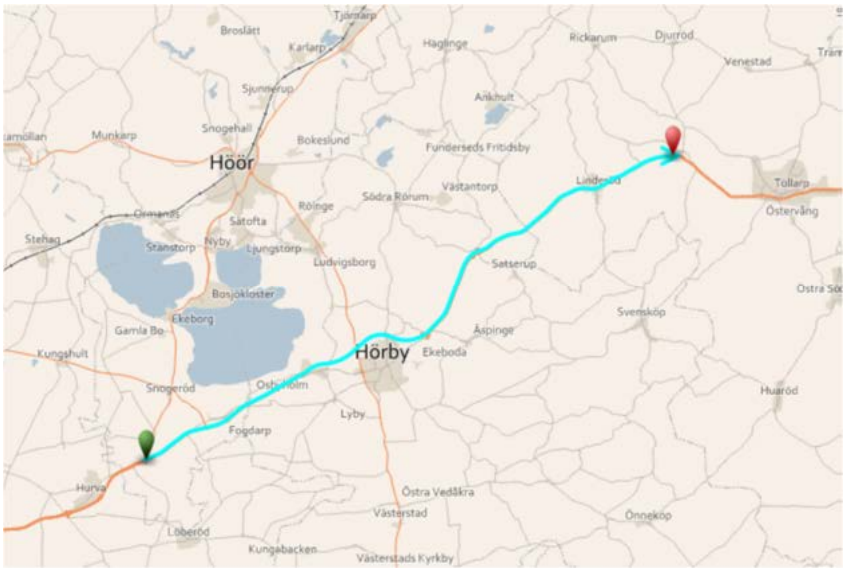
3.1.2.1 Sträcka 91/000 – 91/300

Ytan varierar från mycket hård till hård, alltså har ytan bra bärighet för SCI300. Undergrunden har bra styvhet som helhet av delsträckan, i början sjunker den ner mycket men styvheten ökar ju längre bort.

3.2 TSD

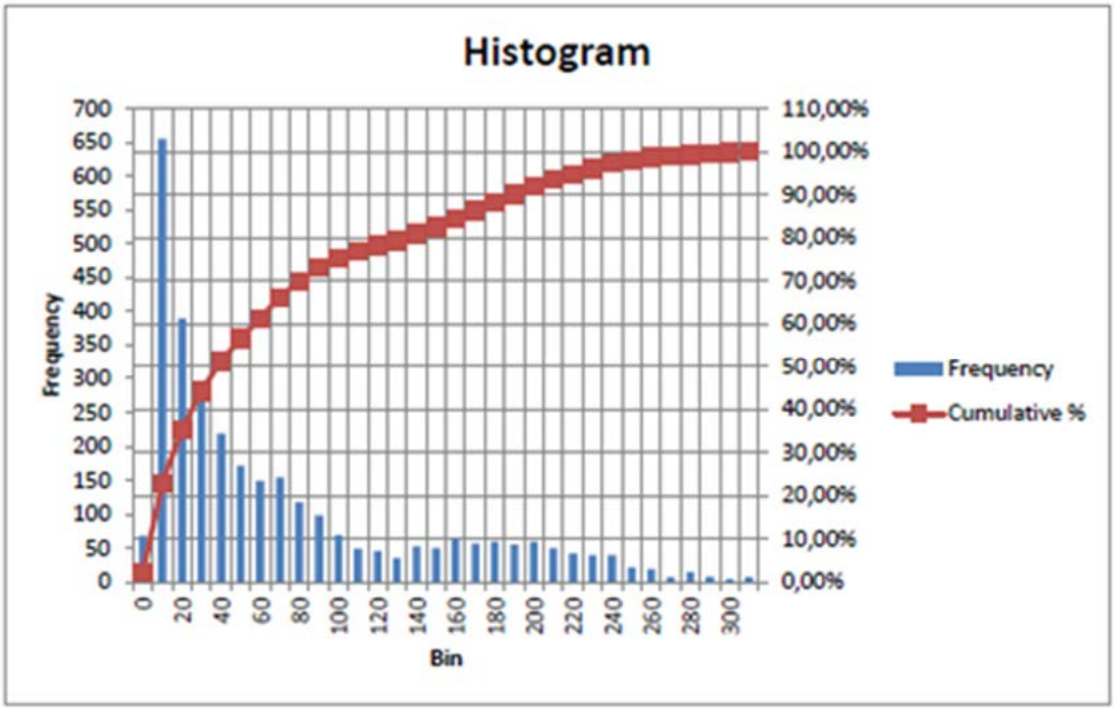
Från TSD data fås mycket information, bl.a. GPS koordinater, IRI, Körhastighet, doppler hastighet (m/s), deflektionshastighet (mm/s) och deflektioner (μ m). Det som är av intresse är framför allt GPS-koordinater och deflektioner. SCI300 bestäms för att kunna avgöra om värdena som man har fått är bra eller dåliga. Denna analys görs genom histogram för de olika delsträckorna samt hela sträckan som mättes med TSD. Mätningarna gjordes för både körfälten av E22:an. Sträckan 68,090 – 68,390 saknar mätdata eftersom mätningarna började från längdsträckan 71000, därför kommer denna delsträcka inte att analyseras med TSD.

Mätningen började med att köra Från Rollsberga till Linderöd (medriktning) ca kl. 11.30. Sträckan som mättes var ungefär 31km och tog en halvtimme, temperaturen i luften var ca 15,5°C och på vägytan ca 14,6°C.



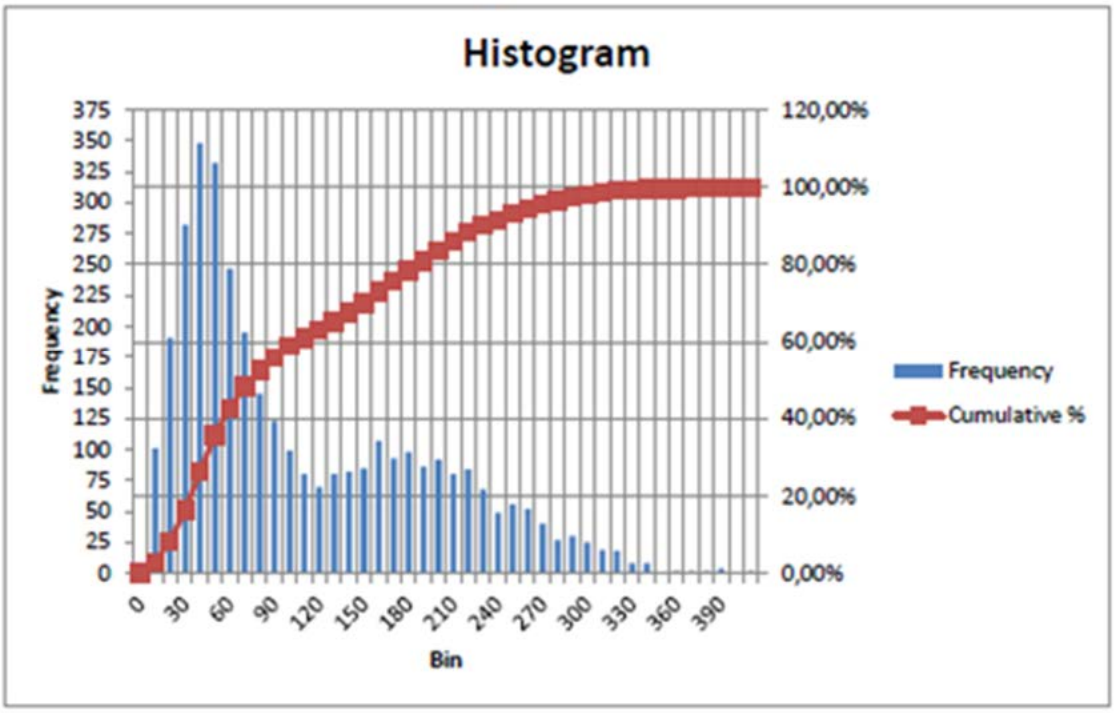
Figur 19 Karat över sträcka som mättes med TSD

Figur 20 visar histogrammet av SCI300 för detta körfält. De blåa staplarna indikerar antalet mätpunkter, dvs. SCI300 för varje mätpunkt (10 m). Den röda linjen är det procentuella värdet av varje värde av SCI300. Exempelvis är 50 % av värdena under 40 μ m. De flesta punkterna har värdet 10 μ m, 655 st. Om man skulle sätta exempelvis värdet 40 μ m och uppåt som ett rimligt värde för denna del av vägen så skulle man ta bort hälften av mätvärdena eftersom de ligger under det värdet.



Figur 20 Histogram för hela mätsträckan, SCI300, medriktning.

Efter att mätningen var klar på ena körfältet då var det dags för nästa körfält, Linderöd tillbaka mot Hörby – Fogdarp (motriktning) och denna sträcka som mättes på andra körfältet var ca 35 km, temperaturen på denna sträcka var varmare och i luften låg det på ca 16,4°C och på vägytan på ca 16,9°C. Se figur 21 för histogram av SCI300 för andra delen av körfältet. Denna del har bättre värden. De ligger jämnare och eftersom denna väg är hård, bör värdena vara små och detta stämmer bra överens med histogrammet.



Figur 21 Histogram för hela mätsträckan, SCI300, motriktning.

Varje delsträcka kommer att analyseras med histogram och redovisas i bilagor. Detta görs för att visa en annan typ av jämförelse mellan fallviktens mätpunkter samt mätpunkterna med TSD.

En jämförelse av riktning ett och riktning två kommer att göras för SCI300 (körfält 1 och körfält 2) för att visa att riktning ett har sämre värden än riktning två därför används del två för analyserna.

Jämförelse mellan fallviktsmätning och TSD

Vägen som helhet är hård vilket resulterar i att värdena som fås för fallviktsmätningen är rätt små jämfört med vanlig väg med grusbitumenöverbyggnad (GBÖ). TSD mätningarna visar dåliga värden för ena riktningen och för andra riktningen blir värdena lite bättre. TSD fungerar bäst på asfalt och kan normalt inte mäta bärigheten på hårda underlag (betong), detta beror på att hårt underlag inte sjunker mycket vid belastning, lasrarna kommer i detta fall att filtrera bort värdena eftersom de tror att värdena är felaktiga. Jämförelsen är för D0 och SCI300 mellan fallvikt och TSD data.

D0 och SCI300 från fallvikten anses vara korrekta därför används de som referens. Vi vill att TSD mätningarna ska efterlikna dessa värden och former så bra som möjligt, detta beror på att fallviktsmätning är en välkänd metod och har använts länge. Men eftersom det är två olika metoder där fallvikten är en punktlast och TSD är kontinuerlig last kan vi inte dra den slutsatsen att FWD och TSD ska vara lika. Vi får titta på det på ett annat sätt, TSD under långa sträckor borde analyseras och jämföras med hur fallvikten ser ut under samma sträcka med så många mätningar som möjligt. För att bedöma hur TSD kan användas borde samma sträcka mätas och analyseras under två olika förhållanden samt mäta på styv och svag väg. Om mätningarna är likadana under två olika förhållanden och TSD visar bra bärighet på den styva och dålig bärighet på den svaga kan vi dra slutsatsen att den är pålitlig. TSD är känsligare för störningar

(temperaturförändringar, partiklar på vägen osv.) än fallvikten, detta kan vara en annan orsak till att formen på kurvan inte är samma. TSD kan användas för nätverksnivå för att bedöma dåliga och bra delsträckor. För att bestämma åtgärdsmetoden kan fallviktmätningar utföras på de delsträckor som är dåliga och bestämma åtgärdsmetoden. Denna åtgärdsmetod kan i princip användas för alla de delsträckor som visade liknande bärighet med TSD, på så sätt kan man minska antalet fallviktsmätningar.

4 Slutsatser

4.1 Fallviktsmätning

Slutsatsen av fallviktsmätningarna är att vägen har bra bärighet på de delsträckor som mättes mellan E22 Hurva – Rollsberga, Rollsberga – Fogdarp och Hörby Norra – Linderöd.

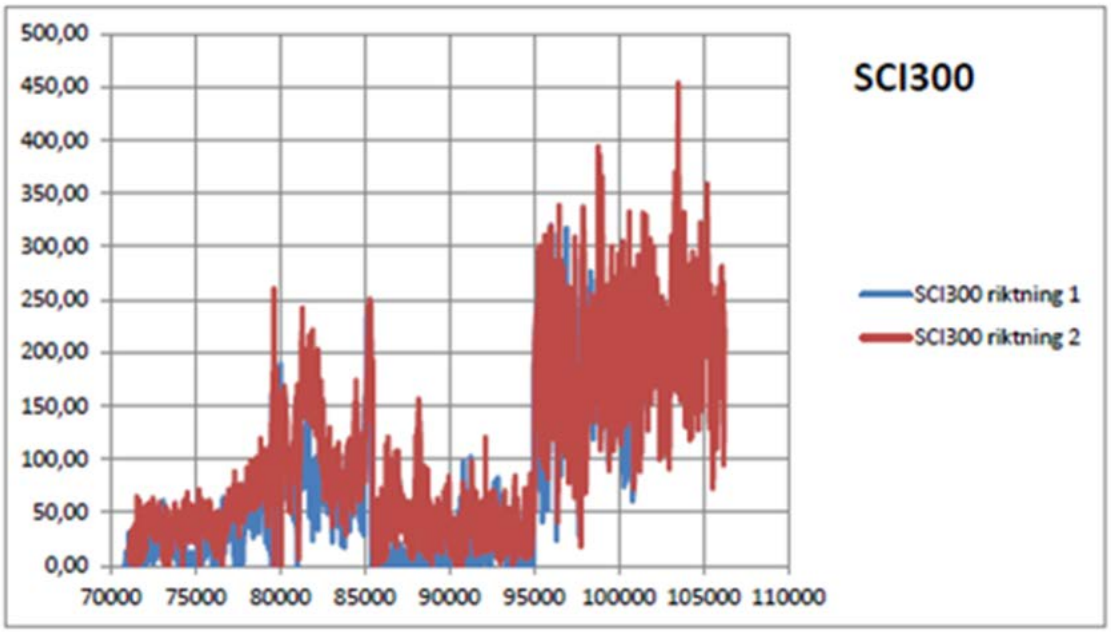
Handberäkningar och passningsräkningen visade att ytan är hård. Passningsräkningen visade att stabiliseringen är ganska hård och troligen kommer att behålla sin bärighet flera år framåt. Ytmätningarna, SCI300, E0, asfaltstöjning samt krökningsradie, från passningsräkningen och handberäkningarna var likadana med små skillnader, därför anses analysen av ytan vara pålitlig. Undergrunden av handberäkningar kan jämföras med lager 3:s styvheter för att se ifall de överensstämmer. I de flesta delsträckorna är formen av linjen likadana men värdena är olika, detta kan bero på att PMS-objekt kan arbeta endast med tre lager i taget eller att formeln som användes inte är hundraprocentigt pålitligt. Om man skulle kunna lägga in fler lager så tror jag att skillnaden skulle vara mindre mellan lager 3 och undergrundsuträkningen. Ett medelvärde för styvheten för beläggningen och stabiliseringen räknas ut för att detta värde anger den slutliga styvheten för de mätta sträckorna.

Cementstabilisering brukar leda till hårda beläggningar, detta bekräftades i passningsräkningen då styvheterna var mycket höga, även skillnaden i styvhet mellan beläggningen och stabiliseringen var stor. En faktor som kan leda till beläggningen har hög styvhet och stabiliseringen har låg styvhet är att PMS-objekt har tagit fram en lösning som inte stämmer med verkligheten. Detta är helt på grund av att PMS-objekt har räknat ut att med dessa styvheter blir RMS värdet lägst.

4.2 TSD-mätning

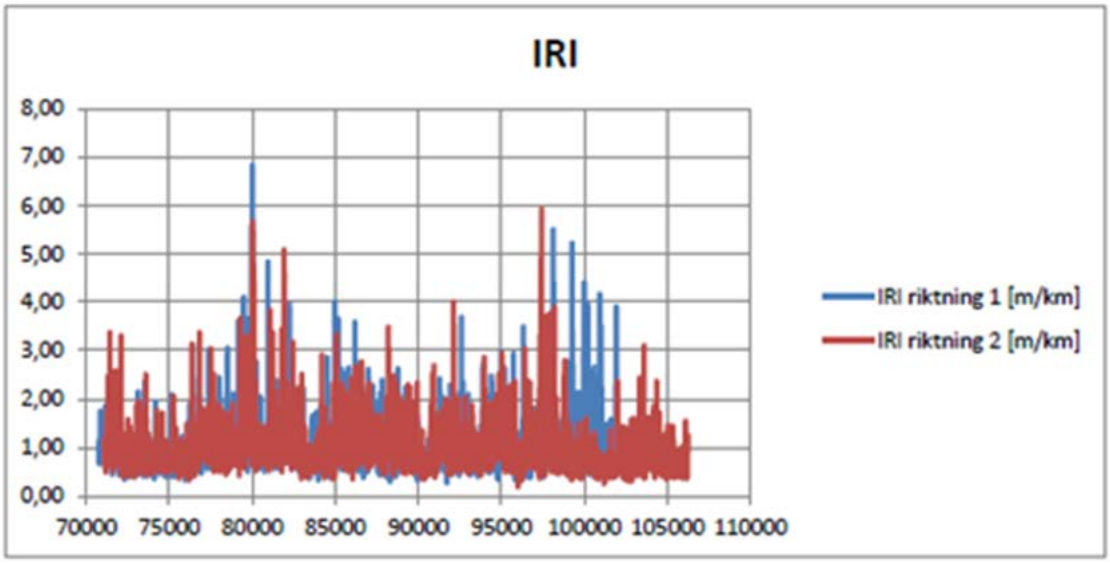
Histogram är ett bra hjälpmedel för att bestämma vilket värde som är rimligt för vägen för att sedan välja bort de resterande som ligger under det värdet som man tycker är rimligt. Första riktningen som mättes dvs. högra körfältet med trafiken mot Hörby – Linderöd visar på dålig kvalitet i mätningen, dessa värden har många nollor i deflektionerna vilket gör det svårt att analysera några bärighetsmått. Några bärighetsmått har analyserats för riktning ett men resultatet är antigen orimligt höga värden eller orimligt låga samt division med noll förekommer vilket inte är möjligt. Man kan även se i histogrammen för de olika sträckorna att procentuellt ligger de flesta SCI300 under ett lågt värde. TSD-data kan därför inte användas för analys eller användas för bärighetsanalys alls för denna del. Detta kan bero på att stabiliseringen

är väldigt hård vilket leder till hård beläggning och därmed fås dåliga värden, även att värdena filtreras bort av operatören eftersom de anses för dåliga, de värden som filtreras bort benämns med en nolla. Värdena är framförallt dåliga i början av mätningen dvs. vid längdsträckan 70 0000 och fram till ca 80 0000 sedan visar det vara bra värden fram till ca km 86 000. De dåliga värdena upprepas vid längdsträckan 86 000 till 95 000 sedan blir värdena bra igen. Det finns inga fallviktsmätningar efter 95 000 därför kan inga jämförelser göras här. De två mätningarna är gjorda samma dag, den blåa är högra körfältet i medriktning och den röda är det vänstra körfältet. Temperaturen skiljer enstaka grader mellan dessa två mätningar. Man kan se från de två figurerna att värdena följer samma form därför vilket tyder på att mätningarna är korrekta.



Figur 22 SCI300 mot- och medriktning.

Andra delen visar bättre värden än första delen men även här fanns det låga värden vid liknande längdsträcka som del 1. Något verkar störa maskinen just vid dessa längdsträckor. Andra delen hade mycket mindre nollor än första delen och därmed anses värdena här vara mer användbara än den första. Histogrammen visar på bättre värden än första delen. Andra delen jämfördes med fallvikten, första delen användes inte för jämförelse eftersom den visar dåliga värden. Problemet med första delen kan ha varit för många störningar som påverkade lasrarna och detta kan visas i IRI diagrammet nedan, där ojämnheterna är större för del ett än del två.



Figur 23 IRI i mot- och medriktning.

4.2.1 Potentiell användning och utveckling av TSD

TSD är snabbt och kontinuerligt. Detta kan användas för att mäta på nationell. Regional samt projektnivå, på så sätt anger vi vilka delar av nätverket har dåliga, bra och mycket bra partier. Nedan visas ett exempel från Warszawa där de delsträckor som ligger inom den röda zonen bör analyseras med tex FWD för noggrannare analys, sedan kan en åtgärdsmetod väljas. I Polen har man mätt med TSD i vägnätsnivå och angett vilka delar som har bra respektive dålig bärighet, detta markeras med grön(bra) och röd (dålig) färg, se figur 24.

Figur 24 Exempel på strukturell indelning av del av vägnät.

Referenser

1. Rapport Underhållsplan 2020–2023, Trafikverket, april 2020, https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/76045/Ineko.Product.RelatedFiles/2020_111_Underhallsplan_2020_2023.pdf

2. https://greenwood.dk/road/tsd/

3. https://www.dynatest.com/rolling-weight-deflectometer-raptor

4. Mått och vikt, Transportstyrelsen, 2020, https://www.transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/Yrkestrafik/Gods-och-buss/Matt-och-vikt/Grundregler/

5. Boo E. & Karlsson E., Utvärdering av olika bärighetsmått, examensarbete på LTH, 2005.

6. TRVMB 114, Bearbetning av deflektionsmätdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat, TRV 2012:051, https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11016/RelatedFiles/2012_051_TRVMB_114_bearbetning_av_deflektionsmatdata_erhallna_vid_provbelastning_av_vag_med_FWD_apparat.pdf

7. PMS-Objekt, Trafikverket, 2020, https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/teknik/Tekniska-dokument/Vagteknik/PMS-Objekt/

8. Broosek Ezzadin, Bärighetsmätningar med Traffic Speed Deflectometer, Examensarbete, LTH, 2015.

9. TRVMB 112, Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat, 2012, https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11015/RelatedFiles/2012_050_trvmb_112_deflektionsmatning_vid_provbelastning_med_fallviktsapparat.pdf

10. ARRB, 24th ARRB conference, 2010. CONTINUOUS BEARING CAPACITY PROFILE OF 18,000 KM AUSTRALIAN ROAD NETWORK IN 5 MONTH.

Bilagor:

1: Resultat från passningsräkning E22.

2: Histogram från respektive delsträcka, E22

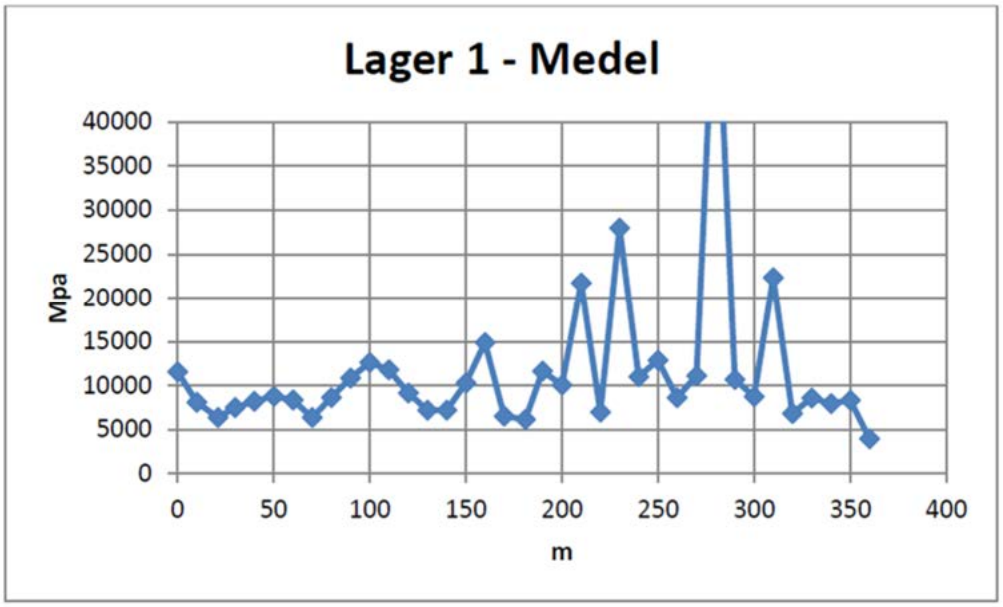
3:

4:

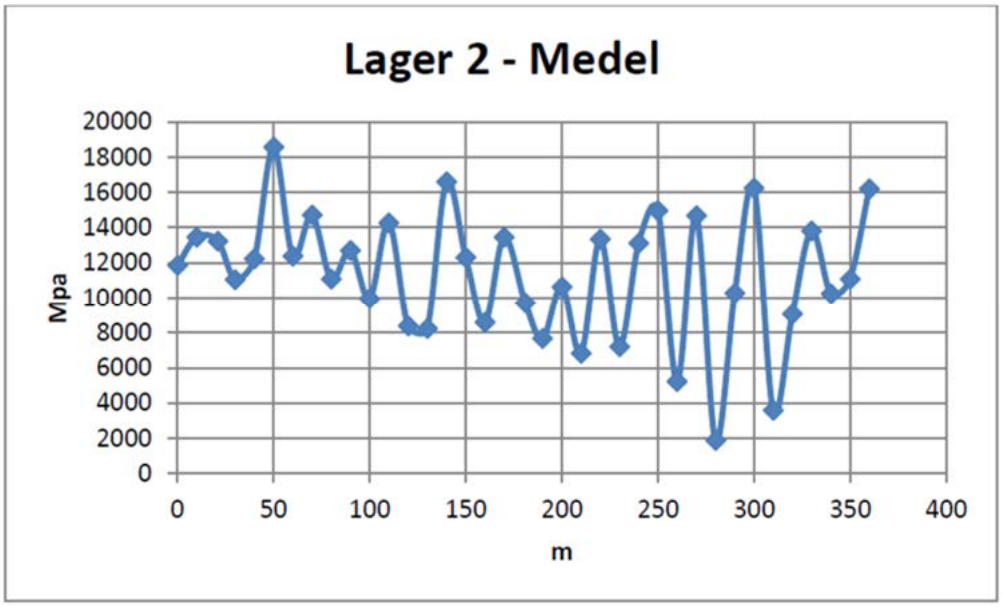
5:

Bilaga 1 Resultat från passningsräkning E22.

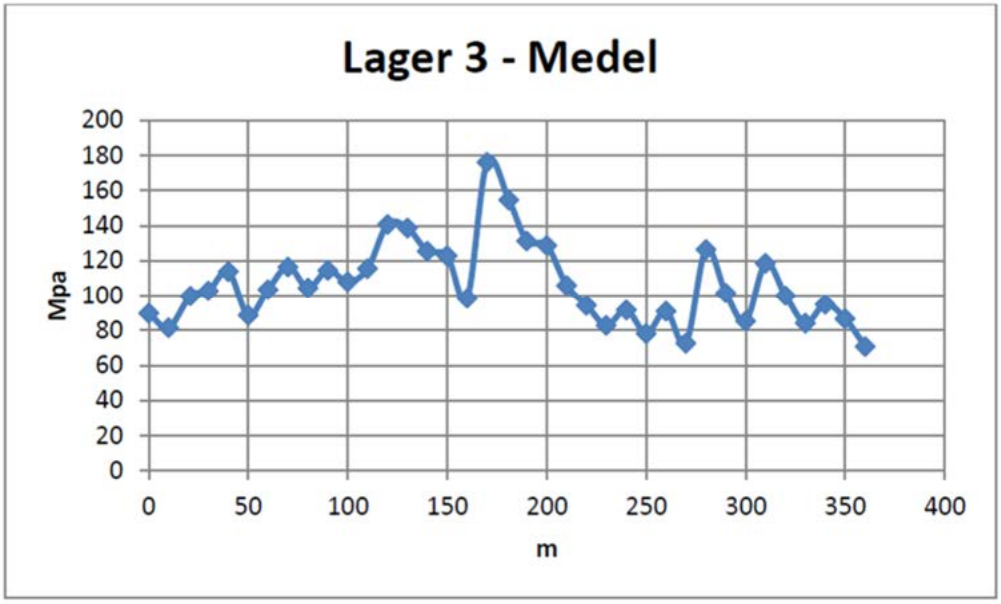
Sektion 68/090 – 68/450



Beräknad styvhet för lager 1 (Beläggning, 68/090 - 68/450)

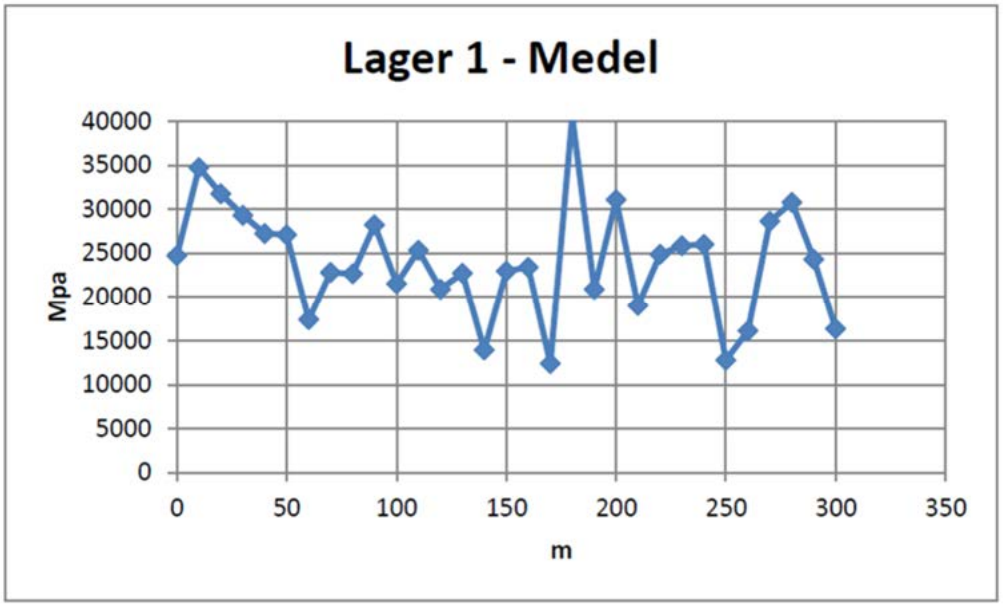


Beräknad styvhet för lager 2 (Stabilisering, 68/090 - 68/450)

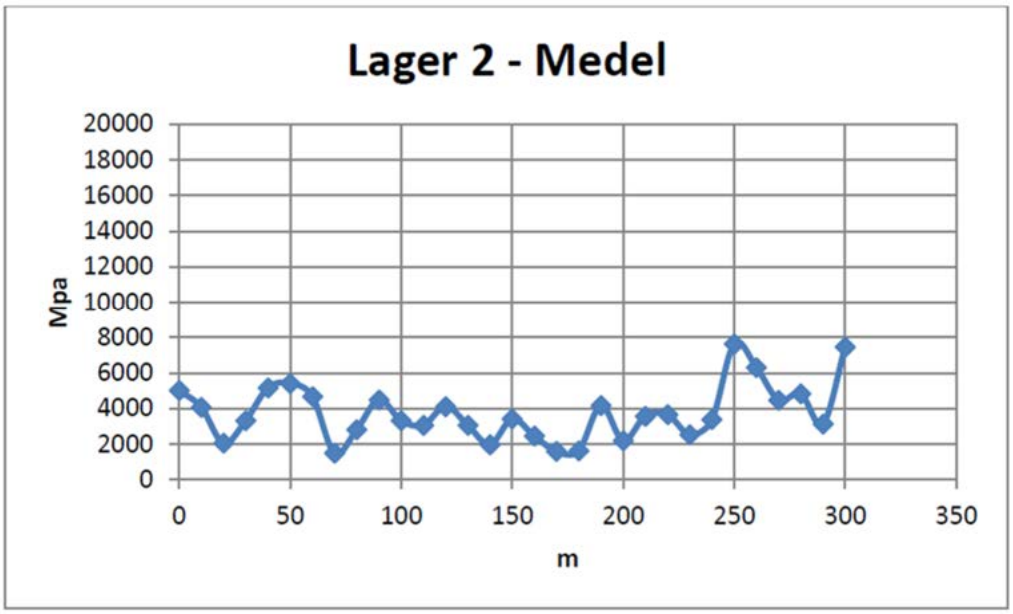


Beräknad styvhet för lager 3 (Terrass, 68/090 - 68/450)

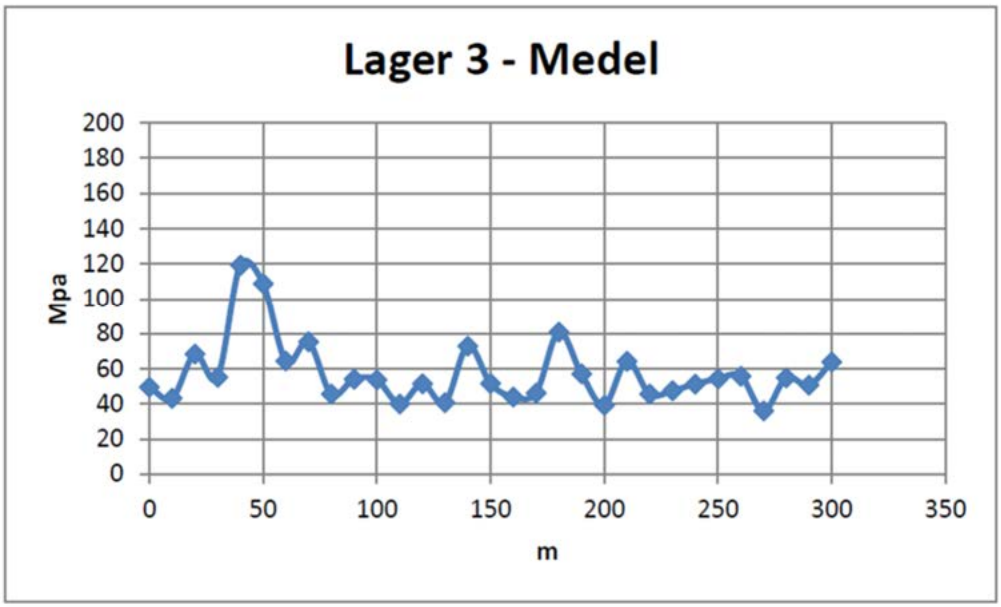
Sektion 71/050 – 71/350



Beräknad styvhet för lager 1 (Beläggning, 71/050 - 71/350)

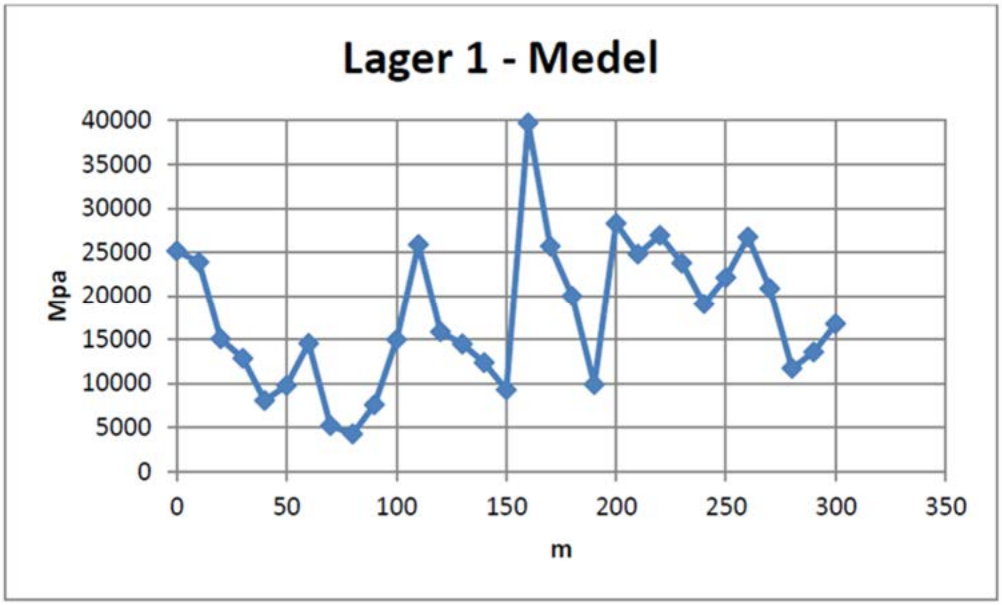


Beräknad styvhet för lager 2 (Stabilisering, 71/050 - 71/350)

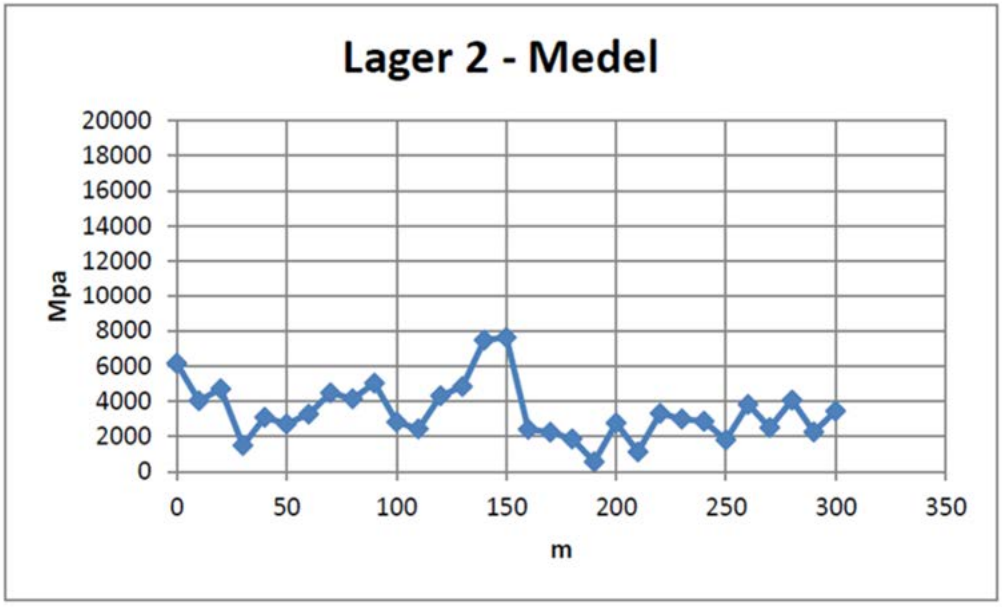


Beräknad styvhet för lager 3 (Terrass, 71/050 - 71/350)

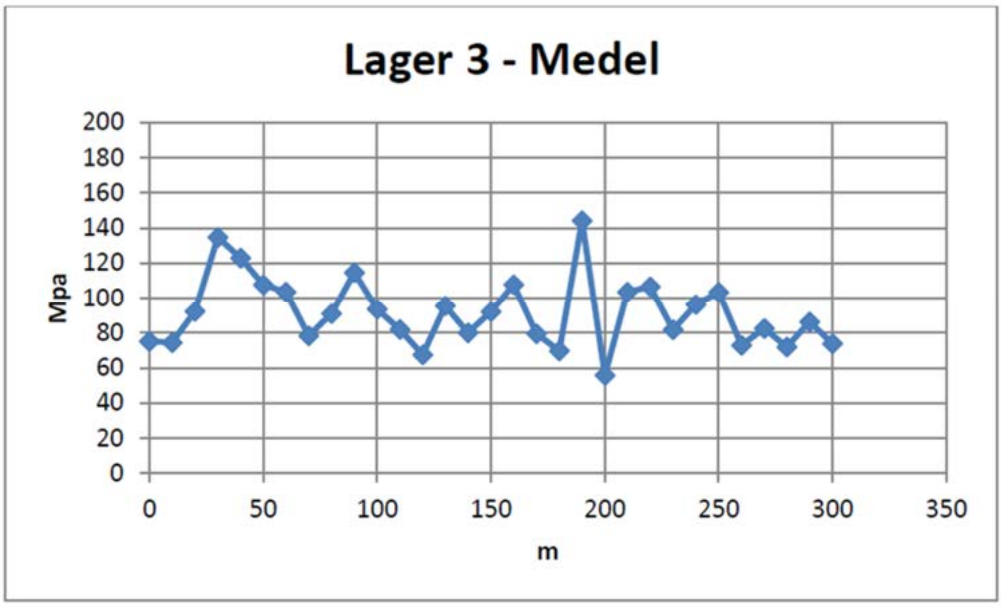
Sektion 88/600 – 88/900



Beräknad styvhet för lager 1 (Beläggning, 88/600 – 88/900)

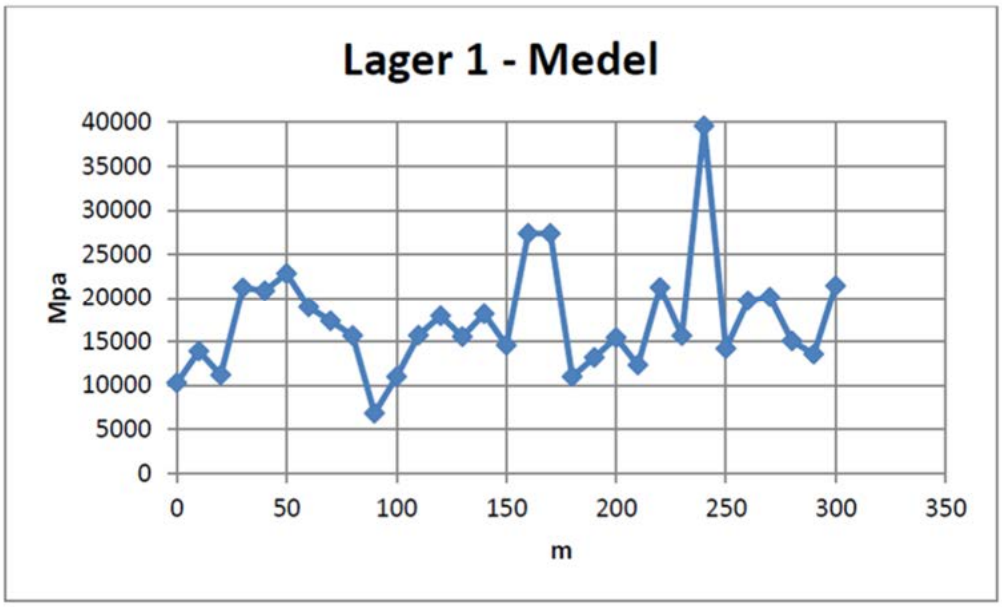


Beräknad styvhet för lager 2 (Stabilisering, 88/600 – 88/900)

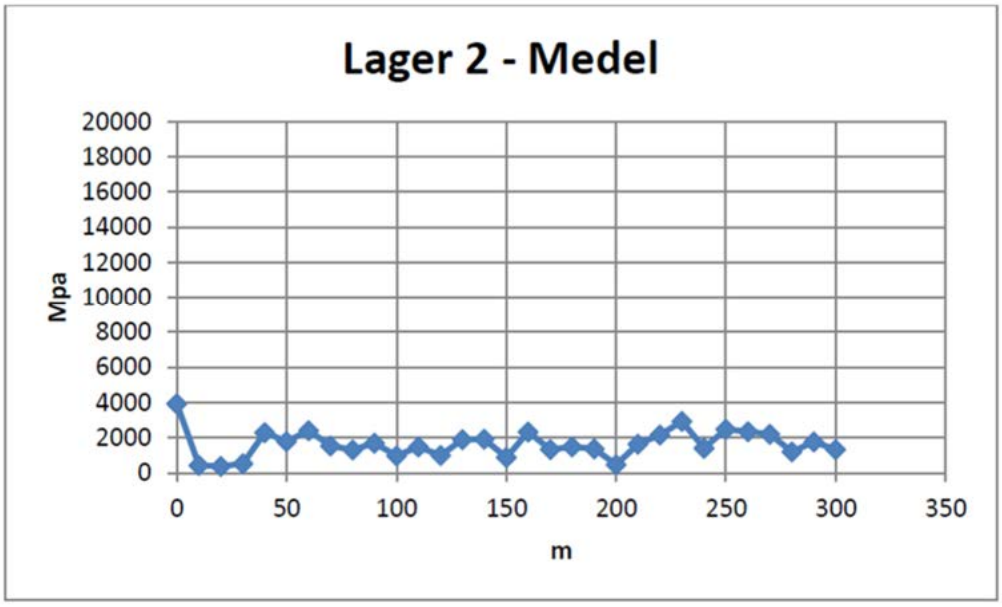


Beräknad styvhet för lager 3 (Terrass, 88/600 – 88/900)

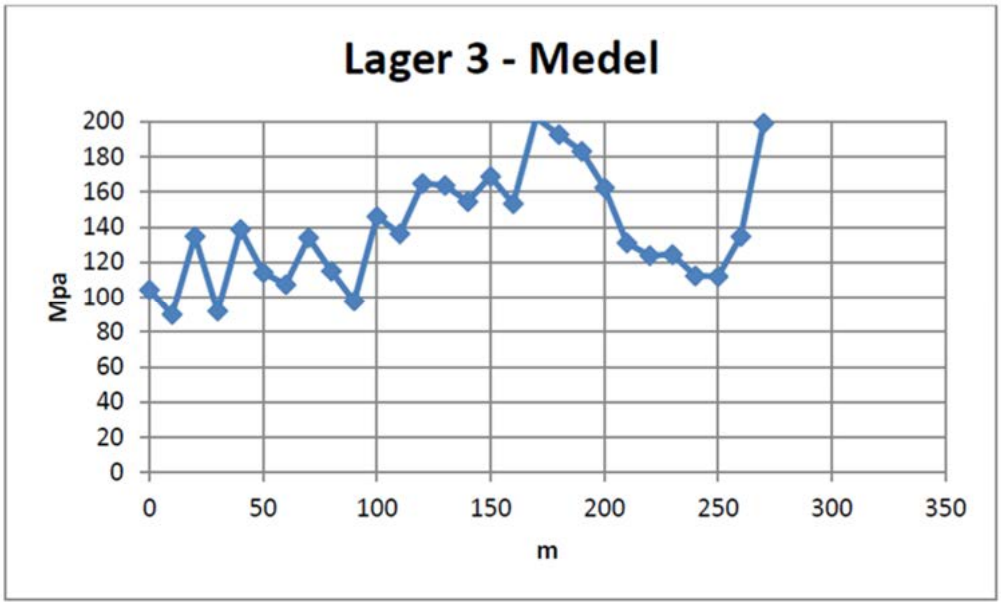
Sektion 91/000 – 91/300



Beräknad styvhet för lager 1 (Beläggning, 91/000 – 91/300)



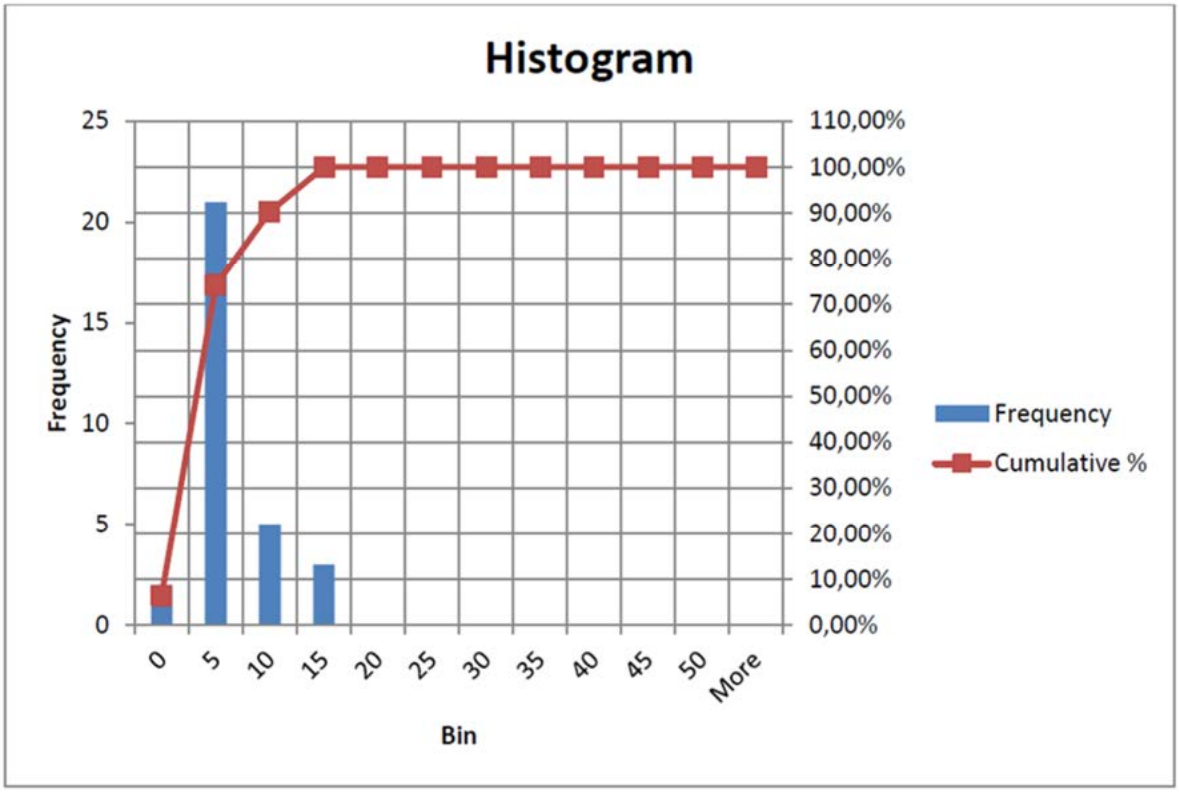
Beräknad styvhet för lager 2 (Stabilisering, 91/000 – 91/300)



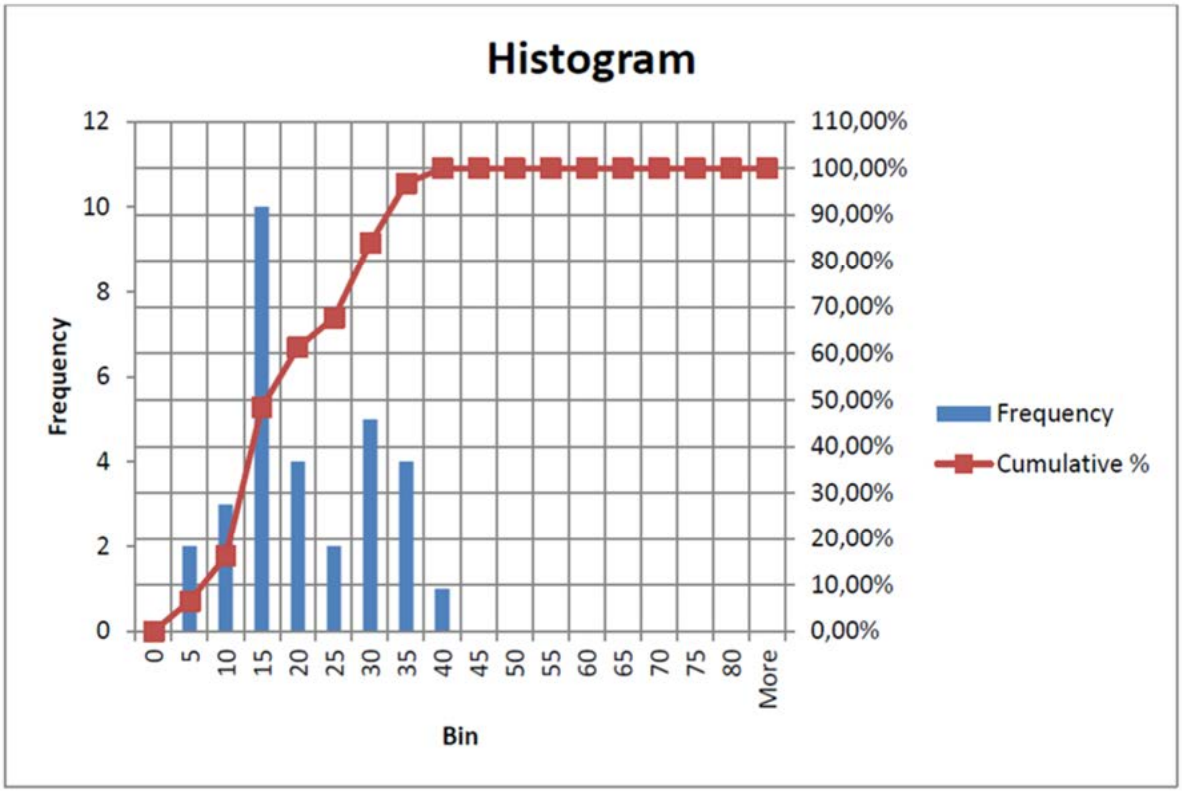
Beräknad styvhet för lager 3 (Terrass, 91/000 – 91/300)

Bilaga 2 Histogram från respektive delsträcka, E22.

Sektion 71/050 – 71/350

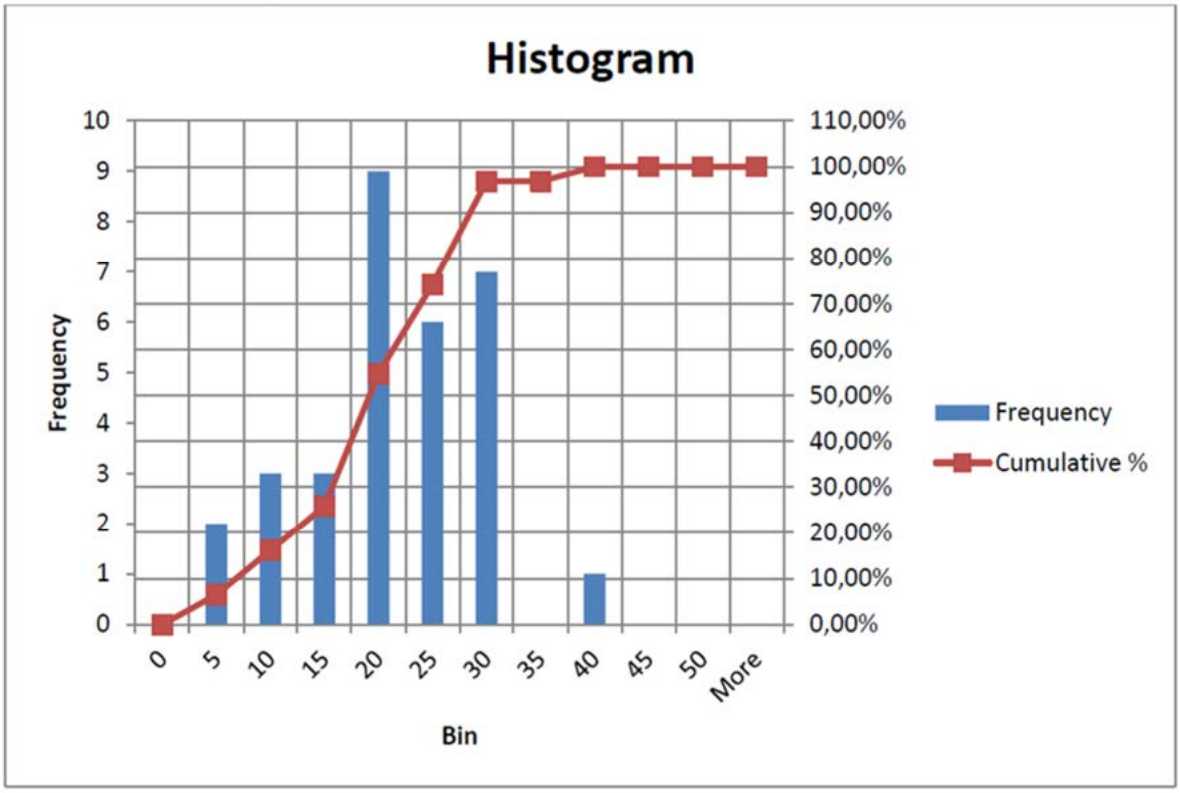


Medriktning SCI300 för sträckan 71/050 – 71/350

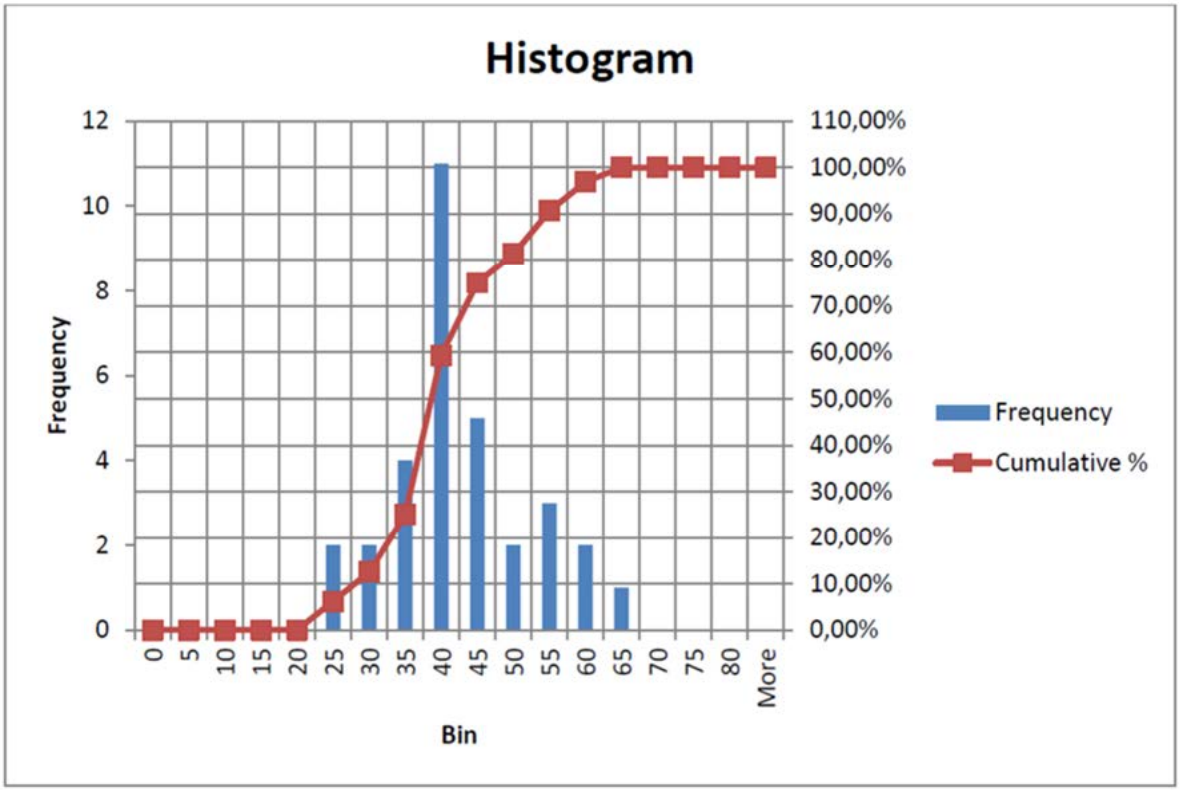


Motriktning SCI300 för sträckan 71/050 – 71/350

Sektion 72/400 – 72/700

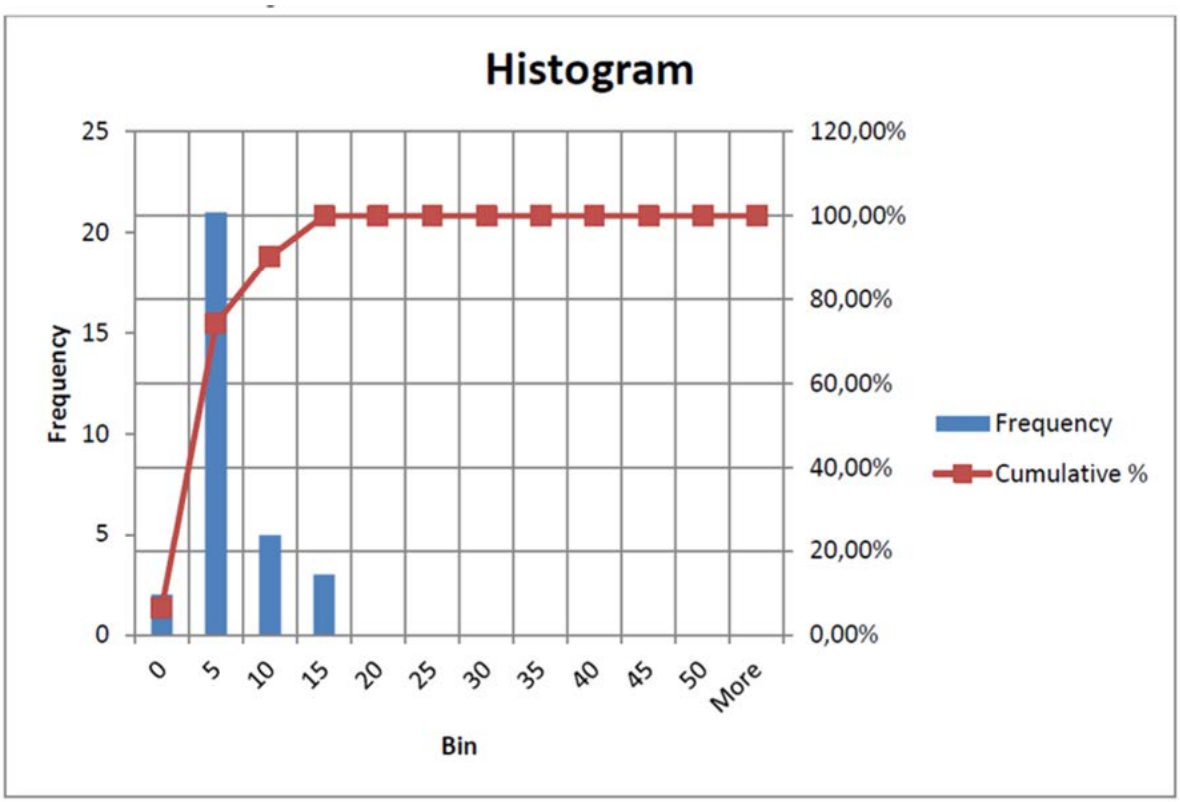


Medriktning SCI300 för sträckan 72/400 – 72/700

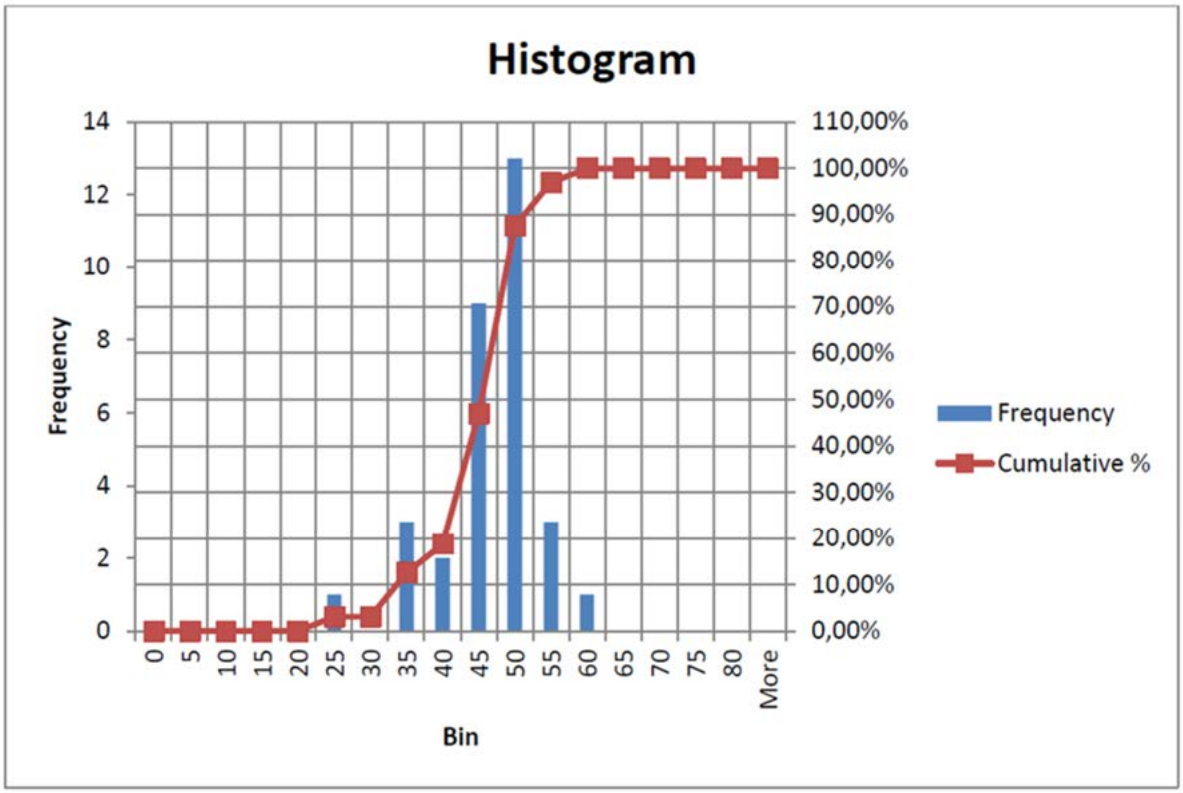


Motriktning SCI300 för sträckan 72/400 – 72/700

Sektion 74/680 – 74/980

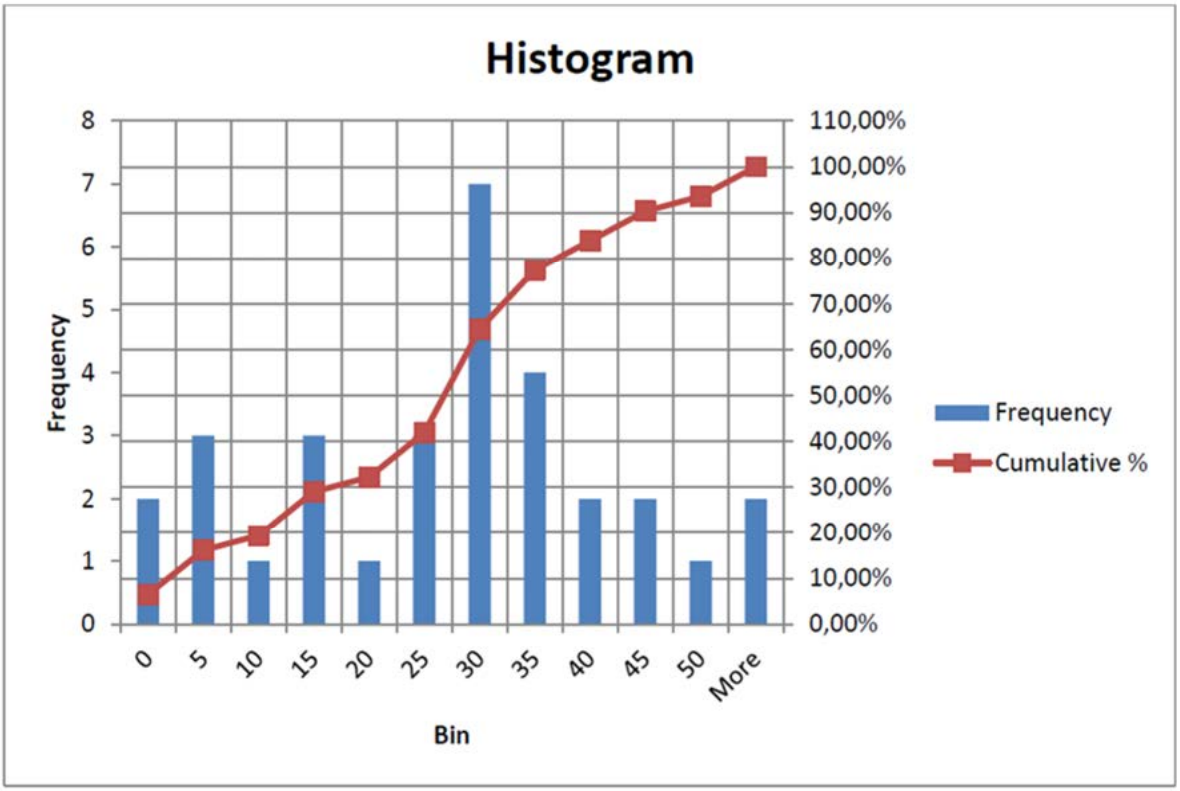


Medriktning SCI300 för sträckan 74/680 – 74/980

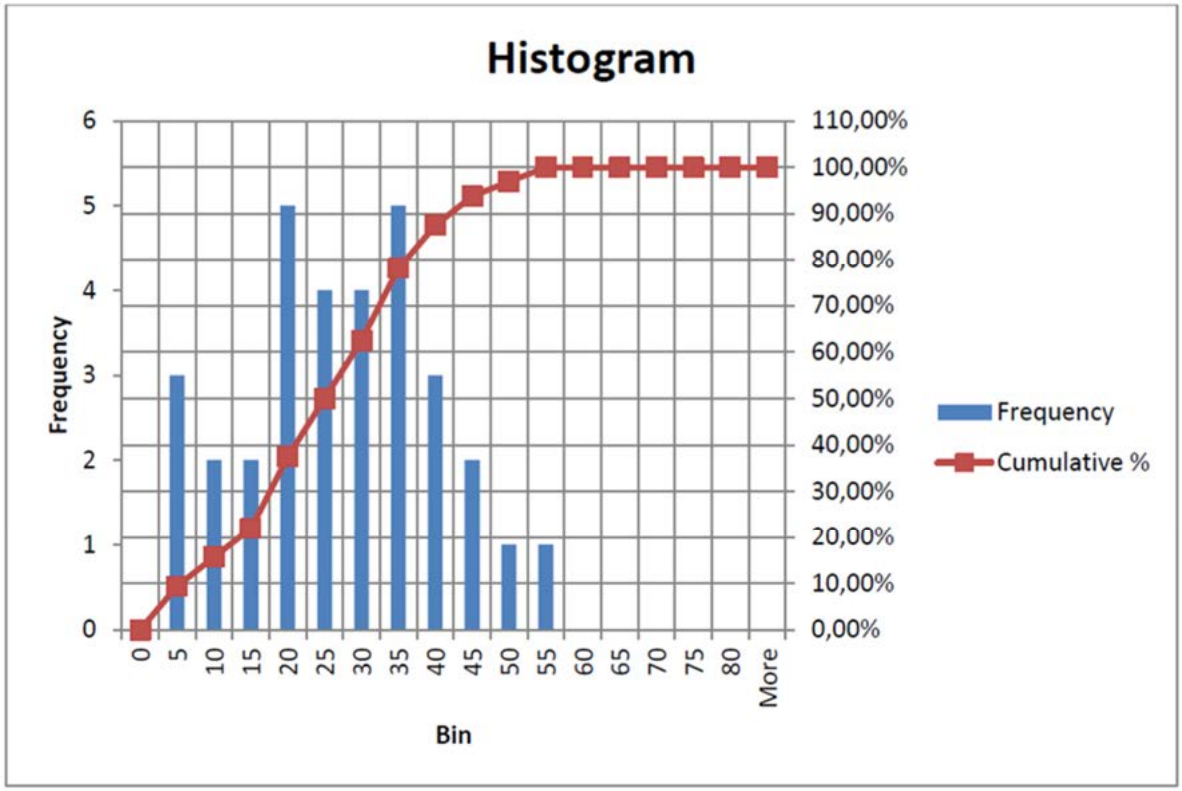


Motriktning SCI300 för sträckan 74/680 – 74/980

Sektion 76/390 – 76/690

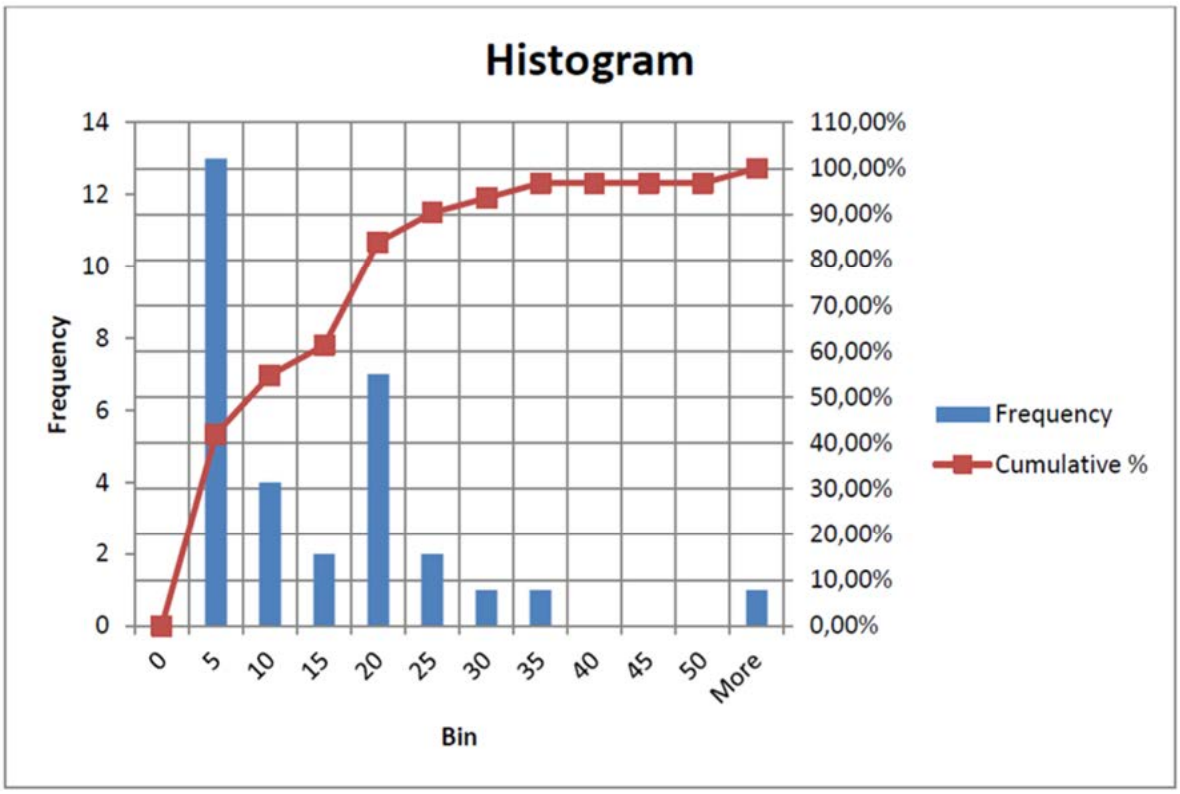


Medriktning SCI300 för sträckan 76/390 – 76/690

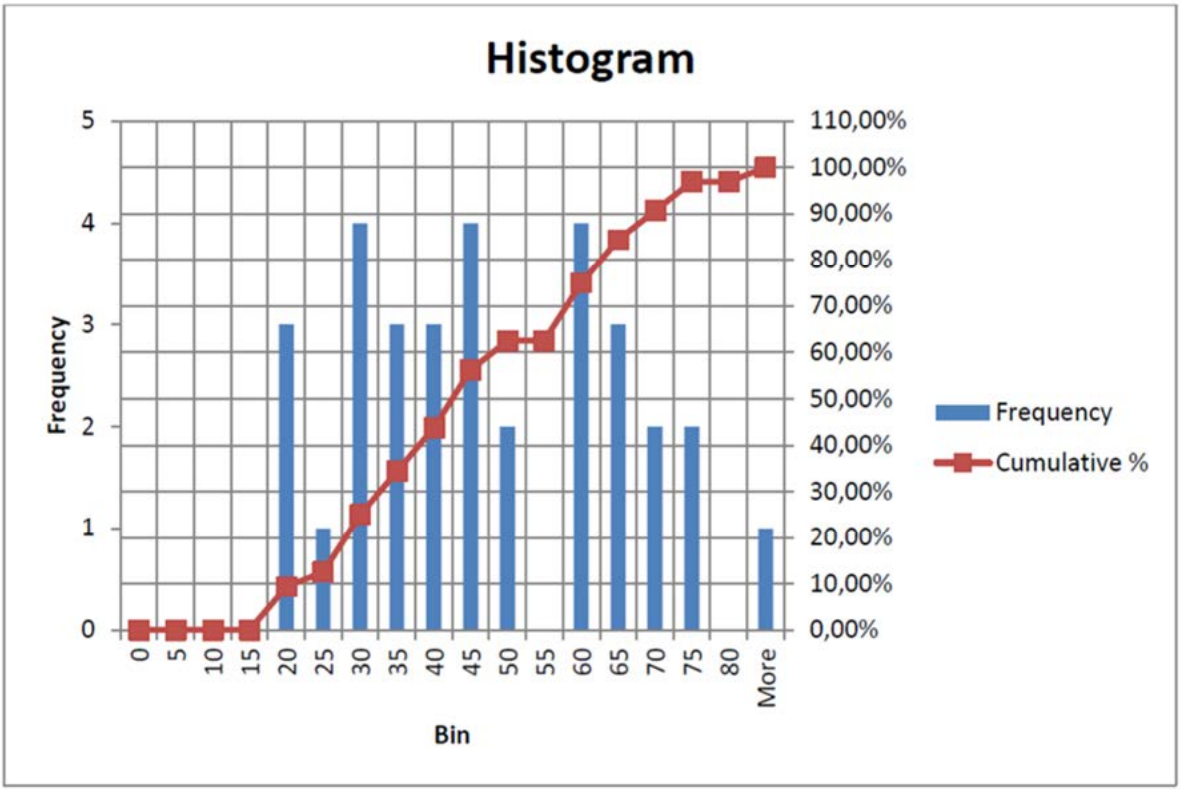


Motriktning SCI300 för sträckan 76/390 – 76/690

Sektion 88/600 – 88/900

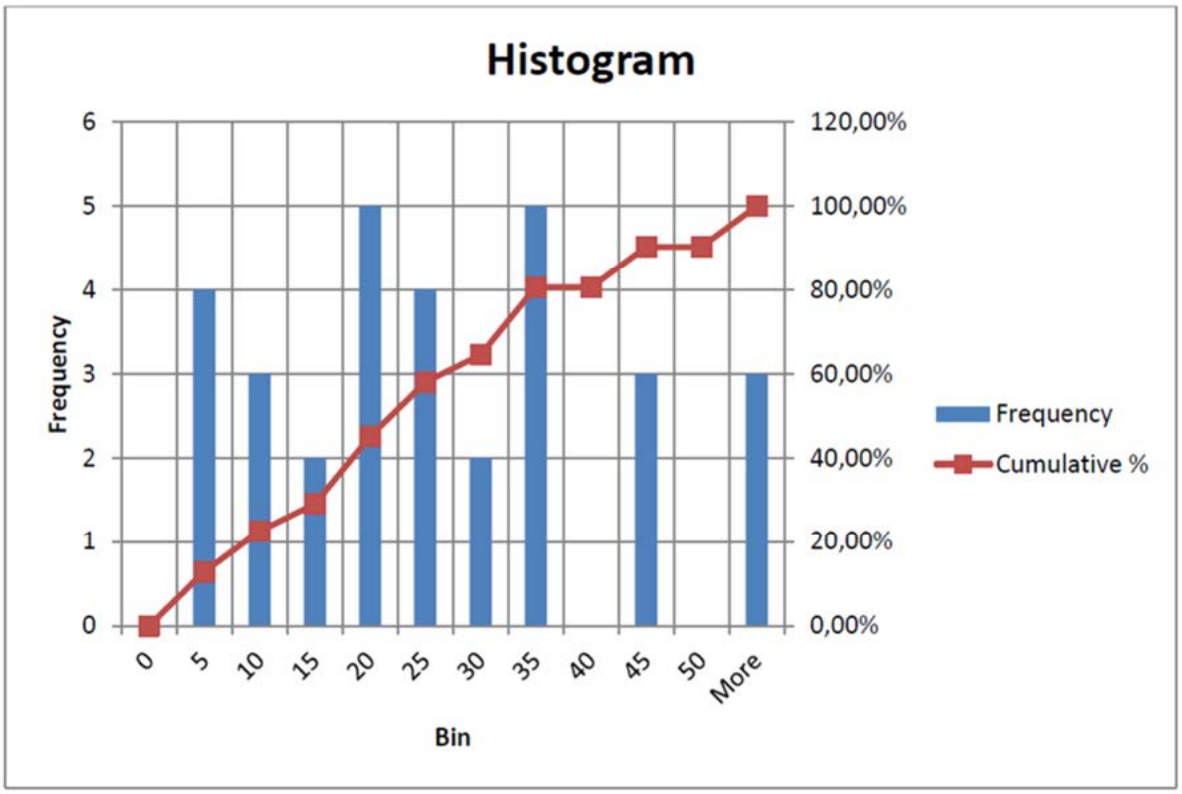


Medriktning SCI300 för sträckan 88/600 – 88/900

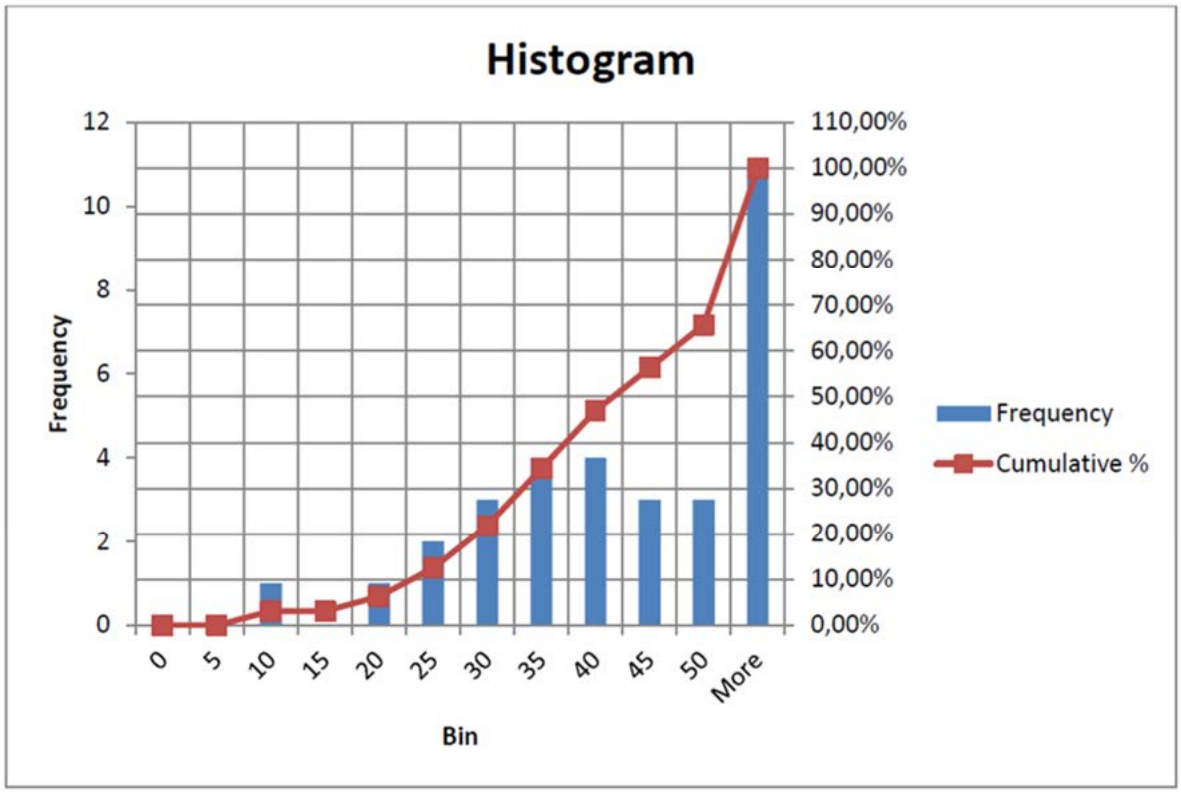


Motriktning SCI300 för sträckan 88/600 – 88/900

Sektion 91/000 – 91/300



Medriktning SCI300 för sträckan 91/000 – 91/300



Motriktning SCI300 för sträckan 91/000 – 91/300