

Thesis 236

# **Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan**

Method for calculation of dynamic vehicle tire loads into the pavement

Anders Carlén

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



Vectura Consulting AB  
Humanistgatan 2 B  
Box 874, 781 28 Borlänge

Copyright © Anders Carlén

LTH, Institutionen för Teknik och samhälle  
CODEN: LUTVDG/(TVTT-5202)/1-67/2013  
ISSN 1653-1922

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet  
Lund 2013

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

---

Examensarbete CODEN: LUTVDG/(TVTT-5202)/1-67/2013  
ISSN 1653-1922

Thesis / Lunds Tekniska Högskola,  
Institutionen för Teknik och samhälle,  
Trafik och väg, 236

Author: Anders Carlén

Title: Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

English title: Method for calculation of dynamic vehicle tire loads into the pavement

Language Svenska

Year: 2013

Keywords: Long unevenness; dynamic vehicle tire load; RQM; Profilograph

Citation: Anders Carlen, Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan. Lund, Lunds universitet, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2013. Thesis. 236

### Abstract:

Inte bara potthål och andra korta gupp, utan även mycket långa ojämnheter på vägbanan skapar stora dynamiska laster då tunga fordon färdas där. Dessa laster skadar vägbanan och gör att slitaget ökar så att livslängden på vägbanan förkortas. Detta leder i sin tur till att kostnaden för att hålla vägbanan i acceptabelt skick ökar. Syftet med detta examensarbete är pröva en metod för att beräkna och påvisa problemet med dynamiska laster orsakade av 5 -30 m långa ojämnheter. Efter mätning av vägens profil och därmed dess ojämnheter kan man visa detta lasttillskott och hur stor den totala lasten är som vägen utsätts för. För att utvärdera detta insamlades vägdata med hjälp av Vecturas mätbil Profilograf. Två vägar har undersökts, väg Y 950 mellan Holmsta och Helgum i Sollefteå kommun och vägunderhållsobjektet F588/F594 utanför Hestra före och efter geometrisk reparation utförd enligt Vecturas beläggningsprojektering. Inhämtad vägdata analyserades i ett program, framtaget av Vectura, RQM (Ride Quality Meter). Med insamlad data kan den totala skadefaktorn beräknas. Resultatet visar att det uppstår stora dynamiska lasttillskott på vägavsnitt med långa ojämnheter. Däremot minskar vägskadefaktorn på det vägavsnitt som man gjort beläggningsåtgärder på till ca en fjärdedel.

Trafik och väg  
Institutionen för Teknik och samhälle  
Lunds Tekniska Högskola, LTH  
Lunds Universitet  
Box 118, 221 00 LUND

Transport and Roads  
Department of Technology and Society  
Faculty of Engineering, LTH  
Lund University  
Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden



## Förord

Examensarbetet är en avslutande del i civilingenjörsutbildningen i Väg- och vattenbyggnadsteknik vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet utfördes under 2012 vid avdelningen för trafik och väg. Uppdragsgivare och handledare var Johan Granlund på Vectura Consulting AB i Borlänge.

Ett stort tack till:

- Johan Granlund, teknikchef på Vectura Consulting AB
- Andreas Persson, handledare LTH
- Ebrahim Parhamifar, examinator LTH
- Kjell Ahlin, professor KTH
- Familj och vänner

Lund 2013

Anders Carlén



## Sammanfattning

Inte bara potthål och andra korta gupp, utan även mycket långa ojämnheter på vägbanan skapar stora dynamiska laster då tunga fordon färdas där. Dessa laster skadar vägbanan och gör att slitaget ökar så att livslängden på vägbanan förkortas. Detta leder i sin tur till att kostnaden för att hålla vägbanan i acceptabelt skick ökar. Syftet med detta examensarbete är pröva en metod för att beräkna och påvisa problemet med dynamiska laster orsakade av 5 - 30 m långa ojämnheter. Efter mätning av vägens profil och därmed dess ojämnheter kan man visa detta lasttillskott och hur stor den totala lasten är som vägen utsätts för. För att utvärdera detta insamlades vägdata med hjälp av Vecturas mätbil Profilograf. Två vägar har undersökts, väg Y 950 mellan Holmsta och Helgum i Sollefteå kommun och vägunderhållsobjektet F588/F594 utanför Hestra före och efter geometrisk reparation utförd enligt Vecturas beläggningsprojektering. Inhämtad vägdata analyserades i ett program, framtaget av Vectura, RQM (Ride Quality Meter). Med insamlad data kan den totala skadefaktorn beräknas. Resultatet visar att det uppstår stora dynamiska lasttillskott på vägavsnitt med långa ojämnheter. Däremot minskar vägskadefaktorn på det vägavsnitt som man gjort beläggningsåtgärder på till ca en fjärdedel. Insamlad och framräknad data kan användas för projektering och beläggningsåtgärder för att förlänga vägens livslängd.

**Nyckelord:** Långa vägojämnheter, dynamiska laster, RQM, Profilograf





## Summary

Large dynamic loads are created by heavy vehicles passing over not only potholes and short-wave corrugations, but also long-wave unevenness of a road surface. These loads damage the road and the wear increases the cost of keeping the road in an acceptable condition. The purpose of this thesis is to try a method and analyse data to calculate and demonstrate the problem of dynamic loads on roads, caused by 5-30 m wavelength undulation in the road. Two roads have been measured, road Y950 between Holmsta and Helgum in Mid-Sweden and road F588/F594 outside Hestra, Southern Sweden. The second one was measured before and after geometric repair of long-wave unevenness. Data were collected by Vectura's Profilograph, a vehicle equipped with sophisticated measuring instruments. After measuring the road's profile and imperfections, the collected information was analyzed in RQM (Ride Quality Meter), a computer program developed by Vectura. The total load and the total road damage factor were calculated. The results show a large dynamic load contribution in road sections with long unevenness. However, on the repaired road there is a reduced road damage factor to about one quarter.

**Keywords:** Long unevenness, dynamic vehicle tire load, RQM, Profilograph

## Förklaringar

Amplitud- Höjden på sinuskurvans våg, avstånd mellan nolläge och ytterläge.

ASTM standard- ASTM International, tidigare American Society for Testing and Materials (ASTM), är en av de stora standardutvecklarna i världen och är specialiserade inom industri och teknik.

Bitumen- blandning som håller ihop ballast/stenar i en vägbeläggning. Utvinns genom att destillera råolja. Bitumen är en mycket tung kolväteblandning.

Bruksvillkor - Område för måttstorhet resp. influensstorhet inom vilka ett mätdons fel och andra egenskaper ska uppfylla ställda specifikationer.

Bärighet- Högsta last som kan accepteras med hänsyn till snabb uppkomst av sprickor eller deformationer.

Effektivvärde- Är det kvadratiska medelvärdet av variabla storheter, t.ex. i en sinuskurva.

Excitera- Något tillförs energi

Frekvens- Är antalet svängningar per sekund i ett svängningsförlopp, enhet Hz

IRI- International Roughness Index och har enheten mm/m. IRI beräknas då de vertikala skakningar som uppstår i en fordonsmodell, (The Golden Car) en fjärdedels standardpersonbil, färdas i 80 km/h över en aktuell vägyta. Är vägen jämn så får man ett lågt IRI-värde.

Makrotextur- Beteckning för sådana avvikelser hos en beläggningsyta (jämfört med ett idealt plan) som har karaktäristiska dimensioner hos våglängd och amplitud från 0,5 mm och upp till sådana som ej påverkar interaktion mellan däck och vägbanan.

Megatextur- Beteckning för sådana avvikelser på 50-500 mm är en övergång mot ojämnheter (längre än 0,5 m) i vägbanan.

Mikrotextur- Beteckning för sådana avvikelser hos en beläggningsyta (jämfört med ett idealt plan) som har karaktäristiska dimensioner hos våglängd och amplitud under 0,5 mm.

Nyttolast- Skillnaden mellan t.ex. ett transportmedels maximala vikt inkl. last och dess egenvikt.

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

---

Profil- Är en 2-dimensionell bild av en yta. Genereras genom att en sensor, t.ex. en laserstråle, kontinuerligt mäter av ytan medan den rör sig längs med mätsträckan.

Resonans- Egensvängning eller självsvängning.

Stelkropps beteende- Är då en kropp inte kan deformeras, deformationen försummas.

Våglängd- Avståndet mellan två repeterande delar i ett vågmönster, t.ex. i en sinusvåg. Symbol  $\lambda$ , enhet m.

## Innehållsförteckning

Förord.....	v
Sammanfattning .....	vii
Summary .....	ix
Förklaringar.....	x
Innehållsförteckning.....	xii
1 Inledning .....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Problemområde .....	1
1.3 Syfte .....	2
1.4 Avgränsningar.....	2
2 Metod och material .....	3
2.1 Litteraturstudie .....	3
2.2 Analytisk studie .....	3
2.2.1 Väginmätning och mätfordon .....	4
2.2.2 Underhåll av väg med datorstödd maskinstyrning.....	6
2.2.3 RQM .....	7
2.2.4 Vägreparationer lämnar ofta långa ojämnheter utan åtgärd.....	10
3. Teori.....	11
3.1 Spänning, acceleration och kraft.....	11
3.2 Statiska laster och fjärdepotensregeln .....	14
3.3 Dynamiska laster.....	15
3.4 Utformning av vägbanan.....	17
3.5 Vågojämnheter .....	19
3.6 Dimensionering av vägbanan.....	20
3.6.1 AASHO Road Test.....	20
3.6.2 Dimensionering av vägöverbyggnad.....	21
3.7 Skadefaktor och laster på vägkonstruktionen .....	22
4. Resultat .....	24
4.1 Objekt Holmsta-Helgum .....	24
4.2 Simulering i RQM av objekt Holmsta-Helgum .....	24
4.3 Objekt Hestra .....	26
4.4 Simulering i RQM av objekt Hestra.....	29
4.4.1 Simulering sträcka 594/588 .....	29
4.4.2 Simulering sträcka 588,2.....	34
4.4.3 Simulering sträcka 588,2 , Efterkontroll.....	37
5. Analys av resultat.....	40
5.1 Resultat av simulering för sträckan Holmsta-Helgum .....	40
Simuleringen av bakaxellasten.....	40
5.2 Resultat av simulering för sträckan Hestra .....	41
5.2.1 Simuleringen av bakaxellasten sträcka 594/588 .....	41
5.2.2 Simuleringen av bakaxellasten sträcka 588,2 .....	41
5.2.3 Simuleringen av bakaxellasten, efterkontroll sträcka 588,2 .....	42
5.3 Sammanställning av vägskadefaktor för Hestra och HolmstaHelgum.....	43

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

---

6. Diskussion.....	44
7. Slutsats och fortsatt arbete .....	46
Referenser .....	47
Muntliga.....	47
Skriftliga .....	47
Internet .....	48
Bilagor.....	49
1. Hestra fältprotokoll objekt 594/588 .....	49
2. Hestra fältprotokoll objekt 588,2 .....	51
3. Hestra fältprotokoll efterkontroll objekt 588 .....	53



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

I det kända AASHO Road Test 1958-1961, utvecklades dimensioneringsmetoder som används idag, bl.a. etablerades den s.k. fjärdepotensregeln som visar sambandet mellan statisk trafiklast och strukturell vägskada. I sambandet ingår viss inverkan av dynamisk last, i form av hjulskakningar vid däckens egenfrekvens, ca 8 - 12 Hz. Dessa skakningar exciterades av Megatextur (avvikelser i vägytan på 50-500 mm) och liknande korta ytskador som uppkom i takt med att de nybyggda testbanorna trafikeras. Däremot ingår i fjärdepotensregeln inte inverkan av dynamisk last från chassits och nyttolastens gungningar vid chassifjädringens egenfrekvens ca 1 - 2 Hz. Dessa gungningar orsakas av långa ojämnheter med våglängd som kan vara mer än dubbelt så långa som fordonet självt. Sådana ojämnheter saknades helt på de testbanor som användes i AASHO Road Test. Däremot är de mycket vanliga på gamla vägar i det svenska vägnätet. Studier av forskare så som Cebon (1993), Gillespie och Karamihas (1994) samt Slyngstad (1985) har visat att framförallt just "långa" vägojämnheter genom lågfrekvent excitering av karosseriet och dess nyttolast ("payload") orsakar kraftiga dynamiska lasttillskott. Lasttillskotten uppkommer när fordonet och dess massa sätts i vertikalrörelse, t.ex. när fordonet "bottnar" i slutet av en svacka på vägbanan. Dessa laster skadar i stor omfattning vägarna, med asfaltuppsprickning och tilltagande ojämnhetsstillväxt som följd. Detta påverkar i sin tur trafikanternas säkerhet och hälsa. För att klara en god väghållning krävs alltså att vägbanorna inte har betydande "långa" vägojämnheter, d.v.s. sådana vägskador som har våglängder mellan ca 5 och 30 meter. Detta är viktigt att beakta vid planering av vägbanereparationer och vid livslängdsbedömningar av vägkonstruktioner (Granlund, 2012). Trafikverkets kostnader för drift och underhåll är ca 8 miljarder kronor per år, varav hälften är kostnader för underhåll av beläggningar (Trafikverket, 2011). Insamlad och framräknad data kan användas för projektering och beläggningsåtgärder för att förlänga vägens livslängd och därmed minska dessa kostnader.

## 1.2 Problemområde

Målet med arbetet är att få ökad insikt i betydelsen av att påvisa och åtgärda långvägiga vägojämnheter. Arbetet belyser en metod att värdera vägprofiler för tung trafik med olika hastighet. Kan man på ett enkelt sätt lokalisera problemen med långvägiga vägojämnheter med hjälp av datorprogrammet, Ride Quality Meter (RQM)? Ett program som Vectura tagit fram i samarbete med professor Kjell Ahlin.

### 1.3 Syfte

Rapporten ska visa hur man kan beräkna de lasttillskott som dynamiska laster (i synnerhet vid låga frekvenser; ca 1-2 Hz) påverkar vägen med. Hur kan man efter mätning av vägens profil och därmed dess ojämnheter visa detta lasttillskott och storleken på den totala trafiklast som vägen utsätts för? Med svar på dessa frågor kan man bättre förstå varför vissa delar av vägbanan skadas mer än andra och varför skadorna uppstår mer frekvent just där. Kan man förstå detta kan det leda till kostnadseffektivare underhåll. Rapporten ska även utvärdera effekterna (minskad dynamisk påverkan) av beläggningsåtgärder som utförts efter projektering enligt denna modell.

### 1.4 Avgränsningar

Arbetet tar bara upp den inverkan som lasterna har och som fordonen utsätter vägbanan för. Vilka dessa krafter exakt är eller hur lasterna sedan fördelas ner i vägkonstruktionen är inte arbetets fokus, det är effekten av lasterna och dess påverkan som är det intressanta. Vägkonstruktionen är en komplicerad konstruktion och därför måste en rad olika förenklingar göras. Hur vägojämnheter uppstår är inte detta arbetes fokus, men principerna för hur de uppkommer tas upp. Kostnader för de skador som uppkommer av dynamiska hjullaster är mycket stora, men inte heller dessa kommer arbetet att behandla. Andra konsekvenser av vägojämnheter finns och har också stor betydelse såsom hälsoaspekter och säkerhet, men även det är avgränsat från detta arbete.



## 2 Metod och material

### 2.1 Litteraturstudie

Litteraturstudien omfattade:

- Att studera vilka faktorer som ingår och påverkar vägbanan vid dynamiska laster.
- Vägens uppbyggnad, dimensionering av vägkonstruktionen.
- Studera fjärdepotensregeln och statiska laster.
- Studera den typ av mätbil, Greenwood Profilograf, som användes vid insamlandet av data.
- Manual till datorprogrammet Ride Quality Meter, RQM.

Litteratur inom ämnet inhämtades från LTHs Trafik och Väg institution samt bibliotek. En stor del av informationsinsamlingen gjordes även på internet, där relevanta artiklar och publikationer för arbetet studerades.

### 2.2 Analytisk studie

I den analytiska studien granskades vägbanans ojämnheter med hjälp av insamlad data från en av Vecturas vägskademätbilar, Profilograf P16. Denna mäter vägens geometri och vägytans skick, samt ger en 3D-modell av inmätt körfält. Från 3D-data hämtas enkelt 1-17 längsgående vägprofiler. Vanligtvis studeras en profil i det yttre hjulspåret, eftersom mest trafik kör i hjulspåren och det yttre spåret oftast är mer skadat än det inre spåret (vägen har sämre sidostöd nära väggkanten).

Inhämtade data bearbetades först i programmet Profilograph for Windows och analyseras sedan i RQM, Ride Quality Meter, ett program som Vectura utvecklat tillsammans med Kjell Ahlin (Ahlin, 2012).

Två objekt studerades, Holmsta-Helgum i Sollefteå kommun och Hestra i Småland. I Hestra studerades två vägavsnitt, varav på det ena gjordes mätning vid två tillfällen. Först gjordes inmätningar för att identifiera de geometriska fel som vägbanan hade samt för att projektera reparation av dessa. Denna inmätning för s.k. ”beläggningssprojektering” gjordes 2008-05-28. Efter ombyggnad med asfaltfräs och asfaltmassa utfördes uppföljande kontrollmätning av vägsträckan 2008-09-24. Vid varje tillfälle körde Vectura med mätfordonet fyra gånger över sträckan, två gånger i respektive riktning, se bilaga 1,2,3. I bilaga 1 visas fältprotokoll för beläggningssprojekteringen på sträckorna F594 och F588.1, där riktning R1 är mätning av vägfilen i riktning in mot Hestra och R2 av vägfilen bort från Hestra. Bilaga 2 visar sträckan F588.2 i riktning från Riksväg 26 mot F594 och bilaga 3 visar efterkontrollen på sträckan F588.2.

### 2.2.1 Väginmätning och mätfordon

För att göra mätningar på vägytans geometri (horisontal- resp vertikalkurvatur), lutningar, ojämnheter och textur kan man använda sig av en Profilograf (en sort av mätbil som finns tillgänglig), se figur 1.



**Figur 1 Profilograf (Ahlin,Granlund,Lindström, 2004)**

Profilografsystemet läser av vägbanans 3D-profil och gör det enkelt att föra över inmätt data till datorn för vidare analys. Data från inmätta vägytor är en viktig del för PMS-analys (Pavement Management Systems), projektering för vägkonstruktionens kostnader och reparationer. Inmätt data används även då man vill följa upp hur vägens skick ändras över tid.

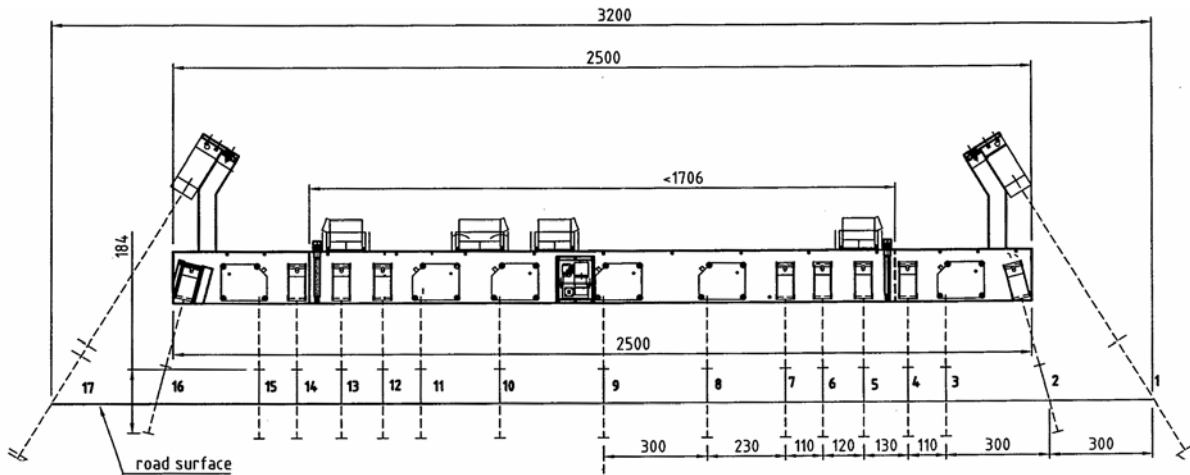
Inmätta vägojämnheter har stor inverkan vid:

- Vägreparationsbudgetering
- Vägytans avvattning
- Underhåll av vägen vintertid
- Fordonsdynamik
- Dynamisk hjullast
- Upplevd färdkomfort
- Andra effekter som kan uppkomma av vägojämnheter, hälsa, säkerhet och fordonskostnader
- Ekonomisk reglering av vägentreprenader

(Ahlin,Granlund,Lindström, 2004)

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

Profilografsystemet har mätsensorer som samlar in data och som sitter på ett 2,5m brett mätinstrument i fronten på bilen, figur 2.

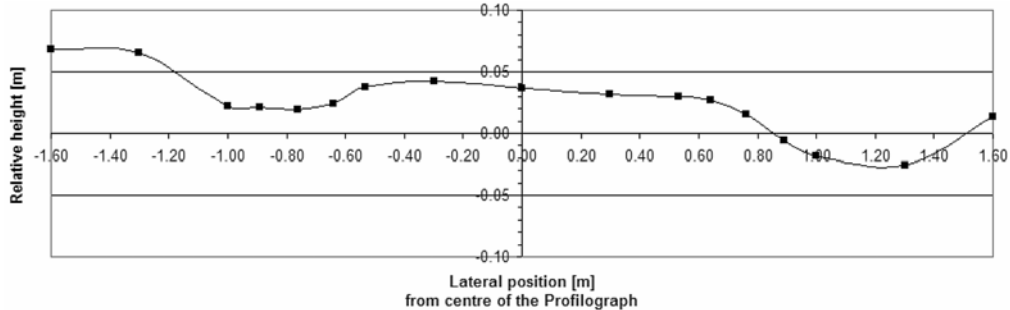


**Figur 2 Mätsensorer uppsatta på fronten av Profilografen (Ahlin, Granlund, Lindström, 2004)**

De 17 lasersensorerna som mäter vägens profil har normalt en samplingsfrekvens på 16 kHz, vilket gör att vid en hastighet på 100 km/h (27,8 m/s) ger detta en upphöjds nivåmätning varje 1,7mm. Vid 36 km/h registreras profildata varje 0,62 mm. Balken innehåller också tröghetsinstrument som registrerar rörelser i olika riktningar under färd. Även instrument som mäter hur långt man har färdats finns på fordonet, de sitter på de odrivna bakhjulen. Alla dessa inmätningar sammanställs och man kompenserar för mätbilens egna rörelser och får då fram en tredimensionell bild på vägytan, som är fartoberoende (Exempel figur 7, sid 10). Nyare Profilografsystem mäter vägytans textur i 64 kHz, dvs flera gånger per mm även i 90 km/h.

Den profilmätning som sparas är ett medelvärde på normalt 100 mm längs vägen. Detta gör att det är möjligt att registrera ojämnheter med en våglängd på ner till 200 mm. Våglängder som är längre än ca 100m filtreras bort. Sammanlagt ger detta profildata i vägens längdriktning som klarar våglängder från 0,2 m och upp till åtminstone 65 m. Använder man dessa profildata i simuleringsprogram där man låter fordon färdas över inmätt vägyta, beaktas vibrationer i intervallet 0,1-40 Hz i hastigheter på 30 km/h samt i intervallet 0,6-140 Hz vid farter på 140 km/h. (Ahlin, Granlund, Lindström, 2004)

Exempel på inmätt tvärsektion med 6 cm djupa hjulspår, Figur 3.

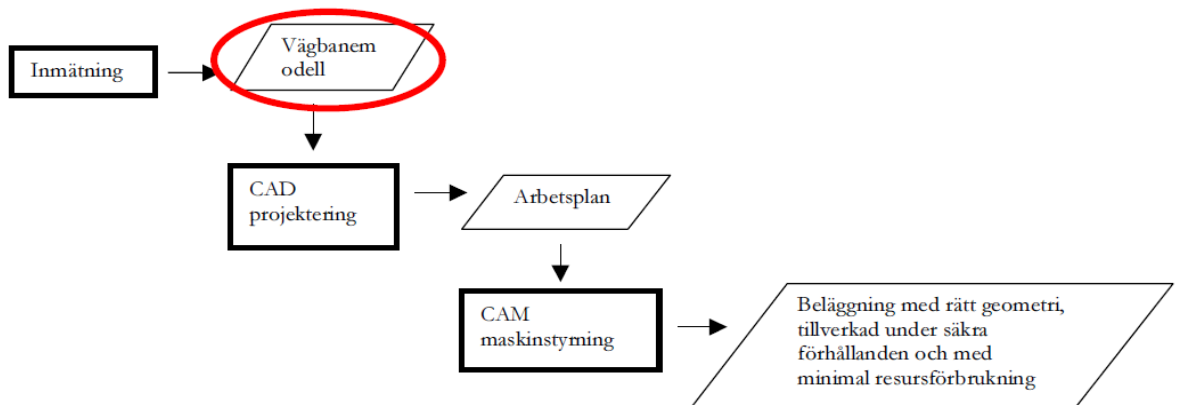


Figur 3 Exempel på 3.2 m bred tvärsektion med djupa hjulspår (Ahlin, Granlund, Lindström, 2004).

### 2.2.2 Underhåll av väg med datorstödd maskinstyrning

Att ”kartera vägbanan” kan vara ett bra sätt att få underlag till underhåll av vägarna. En väg med ojämnheter påverkar hur fordonet rör sig på vägen, hur man upplever färden, dynamiska laster kan uppstå, vattenavrinning och vinterväghållning påverkas. När man ska underhålla dessa vägar så rättar man ofta till ojämnheterna med antingen fyllnad av asfaltsmassa eller fräsning av befintlig yta. Detta är dyrt och därför är en väl genomförd inmätning av ytan viktig för att kostnadseffektivt skapa önskvärd slutprodukt, se figur 4.

Tillvägagångssätt



Figur 4 Trafikverkets arbetssätt vid geometrisk vägbanereparation (Vägverket, 1999)

Där CAD står för Computer Aided Design  
CAM – Computer Aided Manufacturing

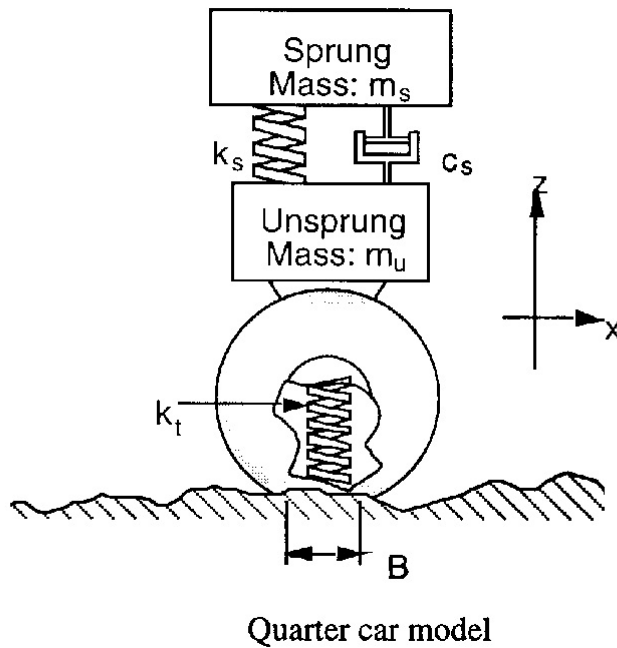
När man bygger nytt är målet att skapa konstruktioner som uppfyller förutbestämd höjd, man använder t.ex. en totalstation för att åstadkomma detta. Vid underhåll och reparation är syftet att rätta till ojämnheter och lutningar, öka eller bibehålla bärighet, samt att säkerställa underlaget för det nya slitlagret som läggs på. Vid underhåll som har till syfte att skapa en säker och god färdupplevelse används ofta en snabb mätbil istället för totalstation, bl.a. för att undvika mätpersonal på trafikerade vägbanor. (Vägverket, 1999)

När man lägger nytt slitlager på vägen tas de ”korta” ojämnheter bort. Problemet är att de ”långa” ojämnheter (sättnings mm) till stor del finns kvar. Det är viktigt att man jämnar ut topparna och dalarna på vägprofilen så att fordonet och dess nyttolast inte sätts i gungning.

### 2.2.3 RQM

RQM, Ride Quality Meter är ett program som ursprungligen togs fram för att kunna beräkna den komfortpåverkande vertikalacceleration som ett fordon utsätts för då den färdas över en ojämn yta (Ahlin, 2012). Programmet utvärderar vägojämnheter, genom att beräkna färdvibration i fordonsmodeller. Som indata används inmätt vägyteprofil, fordonshastighet och data för aktuellt fordon, förvalda parametrar för ”The Golden Truck” som används vid IRI-index (Kapitel 3.5).

Den senaste versionen av programmet ger bl.a. ut tabeller och grafer som visar vägprofil, acceleration i fordonets chassi (filtrerad enligt ISO 2631 Wk), effektivvärdet (kvadratisk medelvärde, rms) av accelerationen, samt dynamisk hjullast ned i vägbanan. Programmet kan simulera färd med kvartsfordonsmodell, se figur 5 (ett hjul), halvfordonsmodell (två hjul) samt fullfordonsmodell (fyra hjul).



Figur 5 Modell på uppbyggnad av Quarter car i RQM, (taget från RQM).

RQM-programmet kan ställas in för beräkning av färdvibration med vilka parametrar som helst för fjädring, dämpning och massa (Ahlin, 2012). För att göra jämförelser behövs standardiserade parametrar. I detta arbete används en referenslastbil ”The Golden Truck”, specificerad i ASTM standard E2034-99 (ASTM E2034-99, 2012), som man låter ”köra” över den inmätta vägprofilen i en simulerad hastighet. De vertikala rörelser som uppstår då beräknas. Det är denna lastbils bakaxel som är använd för att beräkna kurvan i Figur 11 (sid 16). Simuleringen är gjord i RQM.

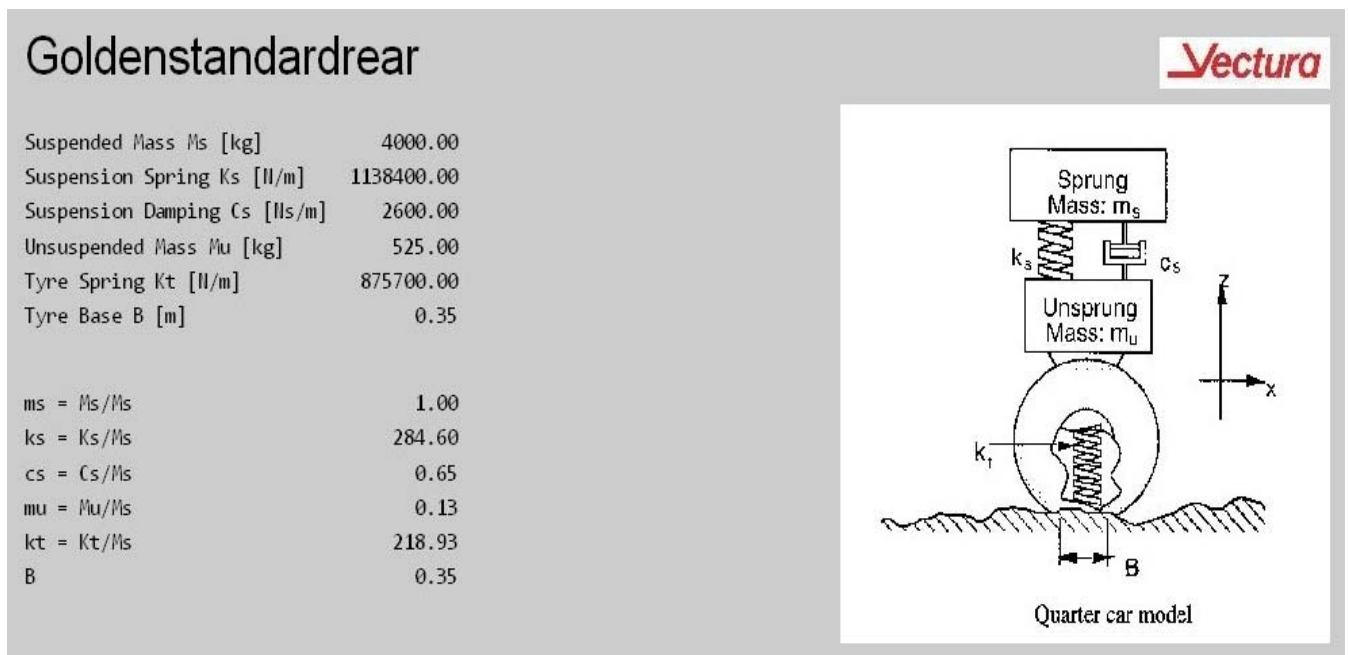
Ett antal förenklingar har gjorts för att kunna göra dessa beräkningar. Man bortser bl.a. ifrån nickrörelser mellan axlar och krängningar över resp. axel, som ger av- och pålastningar som kan bli stora vid viss typ av ojämnheter. Exempelvis vid ojämnheter som inte ligger i fas. Man antar också att fjädringen inte går i botten och då slår i genomslagsgummit (bumpstop), vilket kan ske vid stora fjädringsrörelser. Stora stötkrafter uppstår vid sådana genomslag (Granlund, 2012). Vägkonstruktionens varierande respons kan påverka rörelser i tunga fordon, så som vid körning över ”mjuka fläckar” i vägbanan. Vidare kan nickrörelser mellan axlar och krängningar över resp. axel ge stora av- och pålastningar. Det är intressanta faktorer som för att kunna beräkna på ett någorlunda enkelt sätt bortser ifrån vid dessa simuleringar. RQM kan även användas för mer detaljerade beräkningar i en fullfordonsmodell, men i detta arbete är det den principiella effekten av dynamiska laster som är intressanta, inte exakta krafter.

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

Data för "The Golden Truck":

- Framaxelhjulen (inkl ofjädrade delar av hjulupphängningen) väger 280 kg/st
- "Hytt-andelen" är 2450 kg/hjul
- Vägbanan belastas totalt med en vikt på 2730 kg under varje hjul, vilket ger en statisk kraft på ca 27000 N
  
- De parmonterade bakaxelhjulen väger (inkl ofjädrade delar av hjulupphängningen) 525 kg per axelsida.
- "Flak-andelen" är 4000 kg/axelsida
- Vägbanan belastas totalt med en vikt på 4525 kg under två parmonterade hjul, vilket ger en statisk kraft på ca 45000 N

Datan matas in i Ride Quality Meter ®, figur 6.



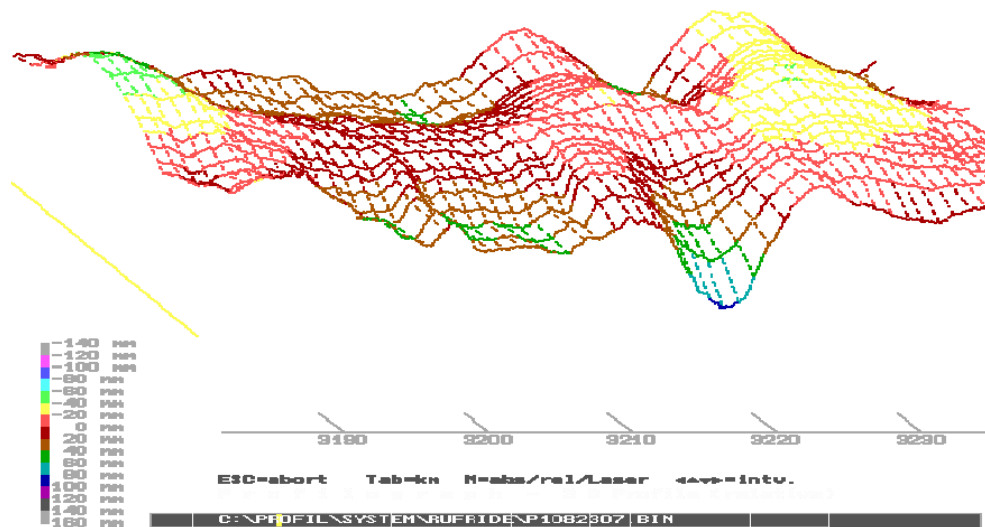
**Figur 6 Data från bakaxelhjulen från "The Golden Truck"**

Totalt blir det 7,3 ton för två fjärdedelar av lastbilen, man räknar en sida, en hel lastbil blir då 14,6 ton. Denna vikt är ganska vanlig bland distributionslastbilar, men ett timmerbilskeppage väger betydligt mer, upp till 60 ton med släp. Det pågår dessutom test med upp till 90 tons timmerbilar i Norrbotten. I Sverige har det utförts dispenstransporter på över 800 ton, fördelat på hundratalet axlar och i mycket låg hastighet (Granlund, 2012).

## 2.2.4 Vägreparationer lämnar ofta långa ojämnheter utan åtgärd

Figur 7 visar 17 profiler från ett kort avsnitt från en lågtrafikerad väg, Y 950, mellan Holmsta och Helgum, ett av objekten som analyseras i arbetet. Man hade gjort reparationer en kort tid före mätningen där man fläckvis hade reparerat vägbanan med obundet bärlagergrus 0-30 mm och platstillverkad bitumenbunden beläggning med 4-8 mm stenmaterial (Granlund, 2012).

Man ser av mätningen att efter lagningen av vägens ojämnheter, främst småskaliga, så finns det kvar en stor del av de storskaliga ojämnheterna. Mäter man i bilden ser man att man har ojämnheter från topp till botten på upp till 120 mm och med en våglängd på ca 12-15 m. Medellutningen från topp till botten är ca 30 mm/m och maxlutningen 50 mm/m. Figuren visar också att de båda hjulspårens ojämnheter inte alltid ligger i fas vilket medför förutom vertikala rörelser även stora sido- och rollrörelser, framförallt hos fordon med hög tyngdpunkt.



Figur 7 Del av profil av väg Y950 (Ahlin,Granlund,Lindström, 2004)



### 3. Teori

Vägdesign och utformningen av vägar har bl.a. som mål att få en så låg total kostnad för samhället som möjligt. Både vid byggnation och under vägens brukstid (Ullidtz, 1998).

#### 3.1 Spänning, acceleration och kraft

Inom mekaniken brukar det vara så att saker går sönder när belastningen blir större än bärformågan. Mekaniskt brott uppkommer när belastningsspänningen  $\sigma$  överskrider brottspänningsnivån  $\sigma_b$ . Det kan även ske vid upprepade höga belastningar vid ”tillräckligt” många tillfällen, då säger man att utmattningsspänningsnivån  $\sigma_u$  överskrids. Det senare är bland annat aktuellt vid vibrationer i vägkonstruktionen.

$$\sigma > \sigma_b, \sigma_u$$

Mekaniskt brottvillkor.

Spänningen  $\sigma$  beräknas med sambandet

$$\sigma = F/A$$

Där  $F$  är kraften i Newton [N] och  $A$  är tvärsnittsytan i kvadratmeter [ $m^2$ ]. Enheten för spänning blir då [ $N/m^2$ ], pascal[Pa].

Vid ett prov av ett vanligt konstruktionstål SS-1312 som man låter dragbelastas i en testmaskin, ska stålet klara en spänning på över 240 MPa (Mårtensson & Isaksson, 2000) innan man kan säga att stålet skadas oacceptabelt. För en fyrkantig stålstav på 10 mm ( $A=0,01*0,01 m^2 = 0,0001 m^2$ ) blir detta en kraft på 24 000 N.

Oacceptabel skada är då materialets konstruktion (stål i detta fall) får så stor sprickbildning eller formändring att det inte längre har kvar sina egenskaper som den ska användas till. Den kan gå sönder eller utseendemässigt se skadad ut.

Newtons andra lag säger att den kraft som påverkar en kropp är proportionell mot dess massa multiplicerat med dess acceleration.

$$F = m \cdot a$$

När kroppen är i viloläge (statisk) är det jordens tyngdacceleration,  $9,82 m/s^2$  i Sverige, som påverkar kroppen i vertikalled (Meriam & Kraige, 1998).

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

---

Konstruktionsstålet SS-1312 ovan klarade en kraft på 24 000 N vilket skulle betyda att om man räknar med en tyngdacceleration på  $10 \text{ m/s}^2$  (avrundat värde) skulle det klara en last på 2400 kg som hängde vertikalt.

Man kan med samma metod se hur mycket ett bilhjul som håller upp en bilkaross påverkar vägbanan. Om bilhjulet väger 40 kg och en fjärdedel av bilen väger 400 kg så blir detta en statisk last på vägbanan ca  $(400 + 40) \text{ kg} * 10 \text{ m/s}^2 = 4400 \text{ N} = 4,4 \text{ kN}$ .

Elasticiteten hos ett material är också intressant, d.v.s. hur väl ett material återhämtar sig efter att det utsatts för belastning. Hookes lag beskriver förhållandet mellan spänning och töjning (TRVK Väg, 2011).

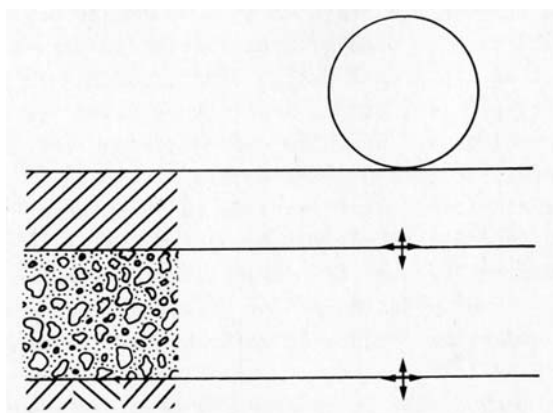
$$\text{Hookes lag: } E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

där  $E$  = styvheten i materialet, [Pa]

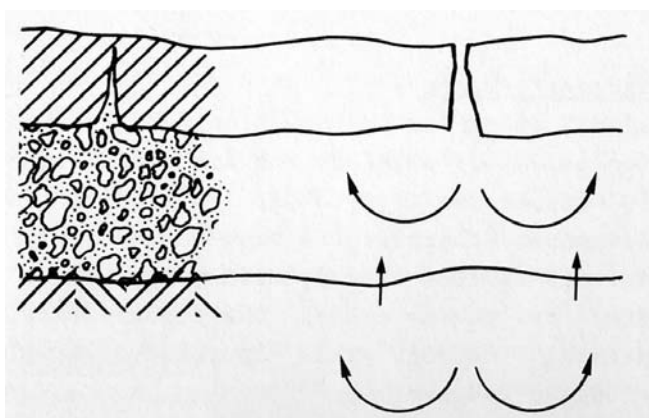
$\sigma$  = den vertikala spänningen, [Pa]

$\varepsilon$  = töjningen

När man ska konstruera en väg gör man en bedömning av vilken typ av fordon och vilken mängd som ska trafikera vägbanan. Man räknar också med ett antal extremfordon som kör där. Utifrån detta gör man kriterier på oacceptabla deformationer och asfaltuppsprickningar som får förekomma. Detta gör att man kan sätta gränser för storleken på horisontella dragtöjningar som uppstår i underkanten av beläggningsen och de vertikala trycktöjningar som påverkar terrassen då tunga fordon färdas på körbanan. Dessa typer av töjningar på väggroppen är till en stor del relaterade till de skador som uppkommer där, Figur 8 och 9.



**Figur 8 Drag- och trycktöjningar som vägbanan utsätts för.**  
(Ulliditz, 1987)

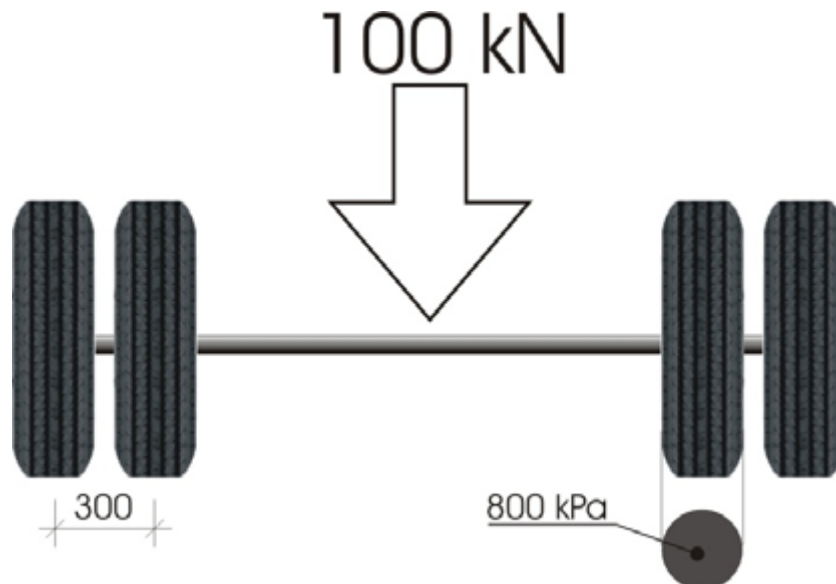


**Figur 9 Sprickor och skador som uppkommit p.g.a. dessa töjningar**  
(Ulliditz, 1987)

En vägs verkliga hållfasthet är alltså mycket intressant att mäta och räkna på, även den verkliga last och belastning som en väg utsätts för är intressant. Vägens hållfasthet är väl dokumenterad men hur ser det ut med den verkliga vägbelastningen, hur stor är den?

### 3.2 Statiska laster och fjärdepotensregeln

Vid dimensionering av vägöverbyggnad beräknar man hur mycket last en väg ska klara av för att bevara sina goda egenskaper under den tid vägen är dimensionerad för. Den trafikbelastning som vägkonstruktionen ska klara av beror på hur mycket axeltryck från tunga fordon vägen är dimensionerad för. Här menar man vilken statisk last som varje hjulaxel påverkar vägen med. Man talar om hur många standardaxlar vägens överbyggnad ska klara av. Standardaxel är en fiktiv axel med 100 kN axellast som är jämnt fördelat mellan parmonterade hjul. Hjulen har i respektive hjulpar ett inbördes centrumavstånd på 300 mm och varje hjul har en kontaktyta som belastar vägen med ett konstant tryck på 800 kPa. Se Figur 10.



**Figur 10 Standard axellast enligt Väg 94 (TRVK Väg, 2011)**

Standardaxeln är ett verktyg, en vägskadefaktor, som jämför olika fordonstyper och trafikbelastningar. Här hjälper fjärdepotensregeln till att omräkna alla typer av fordon till ett enhetligt mått som motsvarar antalet standardaxlar. När man ska beräkna antalet standardaxlar görs det genom normering till antalet 100 kN-axlar,  $N$ .

Fjärdepotensregeln utgår ifrån den belastning som en standardaxel ger, 100 kN, ”normalbelastning” och tar också med i beräkningen att en överlast ger ökad skada på vägkonstruktionen med en potens 4. En belastning som är mindre än normalbelastningen ger då en motsvarande minskning av skadetillväxten.

$$\text{Fjärdepotensregeln: } N = \left( \frac{P_i}{P} \right)^4 * k_i$$

N= Antalet standardaxellaster

P<sub>i</sub> = Aktuella fordonsaxelns vikt i kN

P= Standardaxellasten 100kN

k<sub>i</sub> = Typ av axel med axeltrycket P<sub>i</sub>

(Hjort, 2008)

k<sub>i</sub> = 1 för en enkel axel

k<sub>i</sub> = (10/18)<sup>4</sup>=0,0952 för en tandem-axel

k<sub>i</sub> = (10/24)<sup>4</sup>=0,0302 för en trippel-axel

(Skadeförhållandet mellan tandem- resp. trippel-axel beror på konstruktionen).

Detta gör att det krävs 10 000 personbilar för att ge en motsvarande belastningsskada som en tung lastbil. Därför kan man normalt bortse från de belastningar som en personbil ger vid dimensionering av vägkonstruktioner. (TRVK Väg, 2011)

### 3.3 Dynamiska laster

I formeln för fjärdepotensregeln beaktas inte de dynamiska laster som ett tungt fordon lastar vägen med. I sambandet ingår viss inverkan av dynamisk last, i form av hjulskakningar vid däckens egenfrekvens, ca 8 - 12 Hz, som man på ett erfarenhetsmässigt sätt kom fram till när vägkonstruktionen bröts ner i de empiriska försöken i AASHO Road Test. Längre ojämnheter uppkom inte på de provslingor som man körde testerna på. Därför underskattas problemet med belastning från lågfrekvent skumpande. Enligt Cebon så är ökningen av vägnedbrytningen p.g.a. dynamiska axellaster i snitt 10-40 % av den statiska påverkningen. (Cebon, 1993). Men han säger även att de kan uppstå en ökning av toppvärden på den dynamiska lasten på upp till 400 % av den statiska lasten. De lägre värdena baserar han på att de dynamiska lasterna fördelas slumpvis över vägytan medan de högre värdena beror att de dynamiska lasterna läggs på samma område (Cebon, Hardy, 1993).

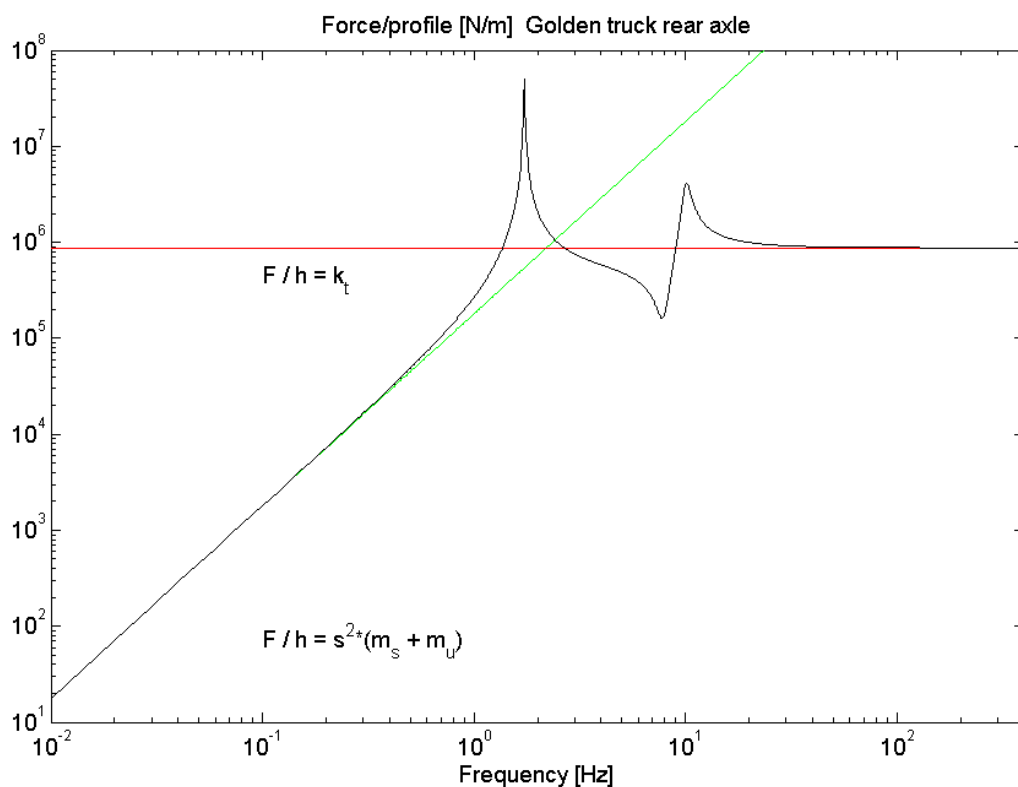
Ökningen av den dynamiska lastfaktorn i förhållande till den statiska blir mindre för fordon med axelgrupper som har fler axlar än för fordon med en axel. En studie visar att ökningen är för en axel 40 %, två axlar 30 % och tre axlar 25 % (Sundquist, 1998).

Vägojämnheter gör så att de fordon som färdas på vägen sätts i oönskad rörelse, främst i vertikalled. När tunga fordon trafikerar vägen innebär detta att stora dynamiska krafter uppstår och dessa påverkar vägbanan. Med sensorer så som kraftgivare eller accelerometrar fastsatta på fordon kan man skatta de dynamiska krafterna. Det krävs accelerometrar som klarar över hundra svängningar per sekund för att få relevans i mätningarna (Granlund, 2012).

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

Man kan även mäta och få fram profiler av ojämnheter från vägbanans hjulspår. Accelerationer beräknas sedan i datormodeller (RQM) av olika fordon och som har olika fart. Denna metod är bra vid mer omfattande mätningar och används i detta arbete.

Figur 11 visar den dynamiska kraften från ena bakaxeln på ett tungt fordon ner i vägbanan och hur den är orsakad av en sinusformad ojämnhet med given amplitud (höjd eller djup). Indata kommer från det test man på Vectura gjorde på väg Y950, mer om detta i kapitel 4. Den dynamiska kraften varierar beroende av vilken frekvens som överfarten sker med (Granlund, 2012).



**Figur 11 Dynamisk kraft ned i vägbanan, orsakad av rörelser i en tung lastbil (bakaxelhjul)**

En kombination av ojämnhetens våglängd och det tunga fordonets fart bestämmer frekvensen. Man kan i ett trafikantperspektiv betrakta frekvensen som beroende av ojämnheternas våglängd, med farten given. Men i ett väghållarperspektiv med de befintliga ojämnheterna/våglängderna i vägnätet så kan man istället se frekvensen som en funktion av farten. (Granlund, 2012)

Är ojämnheterna extremt långvågiga, så som långa sättningar, kommer detta att medföra svängningar/rörelser med mycket låg frekvens och då aktiverar dessa överhuvudtaget inte fjädringssystemet. Man säger att fordonet uppvisar ett stelkroppsbeteende. Detta fenomen kan man se om man följer den gröna diagonala styvhetslinjen i Figur 11. Man ser att detta är fallet vid frekvenser upp till 0,5 Hz. Fart på 20 m/s (72km/h) över ojämnheter med våglängder på ner till 40 m orsakar dessa frekvenser. Det motsvarar svackor och ojämnheter med längder på minst 20 m (Granlund, 2012).

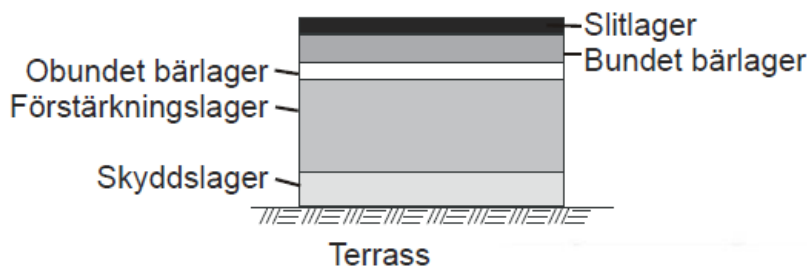
Det andra extremfallet är mycket kortvågiga ojämnheter. Dessa uppstår då fordonet utsätts för rörelser som medför mycket hög frekvens. Det kan vara ytans skrovlighet som gör detta. Men då aktiveras bara däcken och inte fjädringssystemet. Detta kan man se om man följer den horisontella röda styvhetslinjen. Dessa väldigt korta ojämnheter tar däckets genom sin utjämnande effekt upp förutsatt att vägprofilens amplitud inte är mycket stor (Granlund, 2012).

Ojämnheter i intervallet mellan ca 0,5 till 40 meter ger i landsvägsfarter (20 m/s) fordonsrörelser med frekvenser från ca 0,5 till 30 Hz, och då är fjädringssystemet aktivt. I Figur 11 ser man att kraften varierar väldigt mycket i detta intervall. I detta fall måste man ta hänsyn till fordonsdynamiken och det är här man, på ett noggrant sätt, kan uppskatta de dynamiska lasterna som tillkommer.

Figur 11 visar att lastbilens bakaxel ger stora dynamiska laster när den utsätts för frekvenser på ca 1,5 Hz. Ser man på en lastbil som färdas i landsvägsfart på ca 70 km/h, vilket är en vanlig hastighet i Sverige, ger detta en ojämnhet med en våglängd på ca 13 meter. Det motsvarar en svacka på 6,5 meters längd.

### 3.4 Utformning av vägbanan

En asfalterad vägkonstruktion byggs upp enligt Figur 12, där överbyggnaden består av slitlager, bärlager samt förstärkningslager. Terrassen (underbyggnaden) är jord och fyllnadsmaterial.



Figur 12 Uppbyggnad av vägkonstruktionen (TRVK Väg, 2011)

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

Det finns tre typer av överbyggnader med bundna material: styv, flexibel och halvstyva. Cementbetong används i den styva typen, medan asfaltgrus (AG) används i den flexibla typen. Grusbitumenöverbyggnad (GBÖ), bergbitumenöverbyggnad (BBÖ) och cementbitumenöverbyggnad (CBÖ) är de vanligaste typerna av överbyggnad i Sverige, se Figur 13 nedan (TRVK Väg, 2011).

	GBÖ	BBÖ	CBÖ
Wearing course	Slitlager 40 mm	Slitlager 40 mm	Slitlager av betong
Basecourse	Bundet bärlager Asfaltgrus	Bundet bärlager	Bitumenbundet bärlager 150 mm
Roadbase	Obundet bärlager av krossat material Obundet bärlager	Bitumen indränkt makadamlager 40 mm	Obundet bärlager 80 mm
Sub-base	Förstärkningslager av krossat eller okrossat material	Förstärkningslager av obunden bergkross 460 mm	Förstärkningslager 220 mm
	ev. skyddslager av okrossat material 0-200 mm		ev. skyddslager av okrossat material 0-200 mm

**Figur 13 Olika typer av överbyggnad enligt (TRVK Väg, 2011).**

**Slitlagret (beläggningen)** är ett bundet lager. Detta fördelar effektivt lasten som vägen utsätts för. Denna del håller även ihop strukturen och de lager som ligger under. Slitlagret kan vara dränerande eller ett tätt lager som ser till att underliggande lager förblir torra. God friktion, jämnhet, vattenavrinning och bullernivå är egenskaper som slitlagret ska ha. Funktionellt hjälper detta lager till att de fordon som färdas på vägen får en så följsam och bra körbarhet som möjligt med god trafiksäkerhet som följd.

**Bindlager** används för att reducera sprickbildning, förbättra deformationsresistensen och ge ett jämnare underlag för nästa beläggningslager.

**Bärlagret** fördelar lasterna och benämns ofta bitumenbundet bärlager. AG är en annan benämning. Materialets densitet och elasticitet bestämmer hur bra lasten fördelas. Bärlagret dimensioneras efter trafikmängden. Ofta låter man bärlagret trafikeras under en tid för att sedan lägga på slitlagret, detta för att det ska sätta sig så bra som möjligt. (Doré & Zubeck, 2009)

**Förstärkningslager** består av krossat eller okrossat grus, bergkross eller sprängsten och funkar som en fördelning av lasten ner till underbyggnaden. Det är ett dräneringslager och en spärr så att fina partiklar inte kommer upp i bärlagret från jorden under. Förstärkningslagret skyddar mot tjäle och tjälsprängningar.



**Jordlager/undergrunden** är det material som finns lokalt på platsen för vägkonstruktionen. Kallas ofta **terrass** och det är på denna som överbyggnaden vilar.

Här är vägbankens utformning också viktig så att bortforslingen av vatten sker på ett tillfredställande sätt.

**Terrassyta** är den yta som bildar gräns mellan överbyggnaden och underbyggnad/undergrund

Utformningen av vägbanan är viktig, eftersom den är en konstruktion som ska användas under en lång tid. Design, konstruktion, material och underhåll är viktiga delar i vägens utformning, och om någon del fallerar så blir hela konstruktionen försvagad och dess livslängd förkortas (TRVK Väg, 2011).

### 3.5 Vägojämnheter

Ojämnheter är avvikelser på en vägyta från idealt plan på 0,5-50m våglängd. Oftast bildas ojämnheter då sättningar i vägkonstruktionen uppstår. Det kan vara besvärliga förhållande som påverkar, material kan exempelvis dräneras bort. Även felaktigheter vid byggnation kan påverka och då är packningen av material av stor vikt. Yttre miljöaspekter påverkar också då tjällyftning är ett stort problem, framförallt i norra Sverige.

Ojämnheter mäts ofta i IRI (International Roughness Index) och har enheten mm/m. IRI beräknas då de vertikala skakningar och gungningar som uppstår i en fordonsmodell, (The Golden Car) en fjärdedels standardpersonbil, färdas i 80km/h över en aktuell vägyta. Rörelsen mellan den ofjädrade massan (hjulet) och den fjädrade massan (karossen) beräknas. Detta divideras med körd sträcka, resultatet blir IRI-värdet (mm/m) (Yang, 2004).

IRI är linjärt proportionerligt mot vägens ojämnhet, en jämn väg har lågt IRI-värde. Man har sett att det finns ett starkt samband mellan en vägs IRI-värde och trafiksäkerheten. En IRI-värdeökning från 0,9 mm/m till 3 mm/m ger 50 % större risk för trafikolyckor (Yang, 2004).

Textur i vägytan delas in i tre intervall: Mikrotextur, Makrotextur och Megatextur.

Mikrotextur är avvikelser på beläggningsytan som har våglängder under 0,5mm.

Makrotextur är avvikelser på beläggningsytan som har våglängder mellan 0,5-50mm, och har stor betydelse för väggreppet.

Megatextur med avvikelser på 50-500 mm är en övergångsform mot ojämnheter (längre än 0,5 m) i vägbanan (Hjort M, Jacobson T, 2008).

### 3.6 Dimensionering av vägbanan.

#### 3.6.1 AASHO Road Test

Organisationen ”American Association of State Highway Officials” var den förening av trafik och vägbyggnadsexperter som tog initiativet till AASHO Road Test. Testet pågick under åren 1956-1961 och resultatet ligger till grund för de dimensioneringsmetoder som vi har idag vid vägkonstruktion. 716 olika provsträckor i Ottawa i delstaten Illinois analyserades till en kostnad vid avslutad tidpunkt på 27 miljoner dollar (över 1 miljard svenska kronor i dagens värde). Det var både styva betongbeläggningar och flexibla asfaltbelagda vägkonstruktioner som studerades och dessa utsattes för över en miljon överfarter av fordon med varierande axellast. Syftet var att se hur vägslitage utvecklades över tid och hur dimensioneringen av överbyggnaden på vägen skulle se ut, alltså sambandet mellan axellast och nedbrytning av vägkonstruktionen. Sex provslingor byggdes där fordon med varierande axellast trafikerade olika typer av beläggningssammansättning, -tjocklek osv. En slinga trafikerades av lättare trafik och en trafikerades inte av någon trafik alls. Här ville man studera omgivande miljö och temperaturskillnaders påverkan på beläggningen. Resterande slingor var trafikerad med tyngre lastbilstrafik.

29 % av betong- och 78 % av asfaltkonstruktionerna kördes sönder och kasserades, i fallet med asfaltkonstruktionerna var det till stor del kraftiga hjulspår och ojämnheter i längdriktningen som låg till grund för detta. Vägkonstruktionen hade sammanpressats i de olika lagrena, 32 % av minskningen i tjocklek skedde i beläggningen, 14 % i bärlagret, 45 % i förstärkningslagret och 9 % i undergrunden. (Svenska Cementföreningen, 1963)



**Figur 14 som visar byggandet av testslingorna (United States Department of Transportation, 2012).**

Man utvecklade även en metod för att objektivt kunna bedöma vägegenskaperna kallad PSR (Present Serviceability Rating). Detta resulterade i sin tur i PSI (Present Serviceability Index) som är en skala från 1-5 där ett kvalitetsbetyg för vägkonstruktionen sätts. 5 motsvarar mycket god beläggning och 1 motsvarar mycket dålig. Vid värden under 1,5 ansågs beläggningen vara oanvändbar.

Försöken visade att nedbrytningen av en vägkonstruktion vid passagen av en lastbil växer omvänt med fjärde potensen av axeltrycket. (Svenska Cementföreningen, 1963)

### 3.6.2 Dimensionering av vägöverbyggnad

För att få en vägkonstruktion att hålla för de krav som man ställer på den krävs att man gör en god dimensionering. Konstruktionen ska hålla under hela sin livstid men kostnaden ska inte skena iväg för att man använt för ”mycket” material, överdimensionerat. Man ställer då upp ett antal krav/frågor.

- Hur stor trafikbelastning förväntar man att vägkonstruktionen ska klara av, hur stor andel tunga fordon ska trafikera den?
- Hur lång ska den förväntade livslängden på konstruktionen vara?
- Vilken yttre påverkan av klimatet ska konstruktionen klara av? Nederbörd, temperatur, tjäldjup, mm.
- Vilken bärighet har marken som vägen kommer byggas på?
- Vilka egenskaper ska de ingående materialen i konstruktionen ha?

(TRVK Väg, 2011)

Med fjärdepotensregeln som togs fram under AASHO-testen räknar man ut trafikbelastningen. Klimatet påverkar undergrunden och överbyggnaden, nederbörd kan göra att material i konstruktionen ”dräneras” bort. Beläggningen påverkas av temperaturen, risken för hjulspårbildning ökar t.ex. vid varma dagar då asfalten mjuknar.

Dimensioneringsmetoden delas huvudsakligen in i två grupper beroende på tillvägagångssätt. Empirisk metod och mekanistisk metod, man kan även kombinera de två.

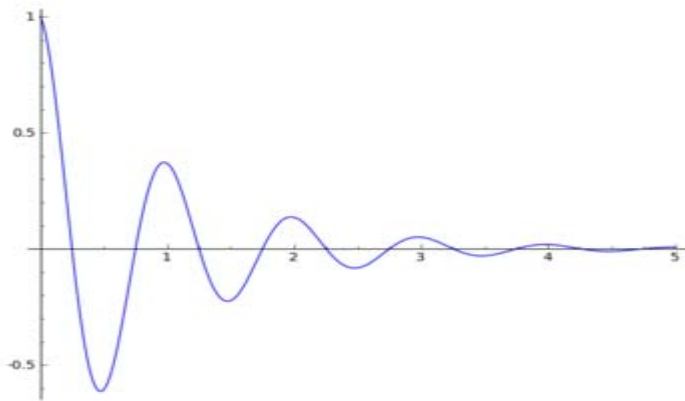
Den empiriska dimensioneringsmetoden, vilken är den vanligaste, utgår från erfarenhet som man samlat på sig och studerat (ASSHO-projektet är ett sådant exempel). Här använder man sig ofta av överbyggnader och lagertjocklekar som man vet fungerar sedan tidigare. Ett problem med denna metod är att den inte är så flexibel vid tillfällen då omständigheterna ändras t.ex. ny typ av trafikbelastning, nya vägmateriäl och ändrat klimat, jämfört med tidigare standardförhållanden.

Vid mekanistisk dimensionering utgår man istället från de beräkningar som man gör på aktuell vägkonstruktion, t.ex. deformationer och töjningar som uppstår. Man dimensionerar efter att ingående materials hållfastighet uppfylls under den tid som konstruktionen skall hålla. Det är en metod som är anpassningsbar för varierande förhållanden (TRVK Väg, 2011).

### 3.7 Skadefaktor och laster på vägkonstruktionen

I Figur 11 (sid 16) ser vi de resonanstoppar som motsvarar de rörelser som ett normalt vägfordon utsätts för under färd. Toppen som syns vid den lägre frekvensen (ca 1-2 Hz) är orsakad av de gungningar som karossen utsätts för, medan toppen vid den högre frekvensen (ca 6-15 Hz) orsakas av skakningar i hjulaxlarna (Granlund, 2012).

Då hjulaxelns massa är mycket mindre än karosseriets massa, mindre än en tiondel, så ger Newtons andra lag (kapitel 3.1) att om hjulet ska utsätta vägkonstruktionen för lika stor kraft som karossen så måste det accelereras minst 10 gånger mer. Detta sker sällan och då i regel under mycket kort tid. Karossens gungningar varar under längre tid än hjulens skakningar och belastar då vägen mer under längre tid än hjulet, Figur 15. Vidare kan hjulaxelskakningar vara mer skadliga för fordonet självt än för vägkonstruktionen.



**Figur 15** Exempelbild på hur gungningarna varierar med tiden (Damped sine wave, 2012)

Detta medför att gungningar i karosseriet är mer skadliga för vägarna än hjulaxelskakningar, vilket i sin tur medför att lägre frekvenser (ca 1-2 Hz) är skadligare för vägen än högre frekvenser (ca 6-15 Hz). Långvågiga ojämnheter på vägytan blir därför skadligare än kortvågiga. Vägar som är mjuka och har dålig bärighet löper stor risk att få skador p.g.a. trafikbelastningens påverkan av långa ojämnheter.

Vid dimensionering av en väg räknar man ut hur många standardaxlar vägen ska klara utan att den skadas oacceptabelt, med sprickor och ojämnheter som följd. Antalet standardaxlar på 10 ton (5 ton per hjulkonstruktion) ger oss ett värde på vad vägen ska klara av. Som sagts innan, ger detta en skadefaktor som det aktuella fordonet har jämfört med en standardaxel (Vid boggielaster reducerar man skadefaktorn med 0,6).

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

---

En axel på 10 ton hos en lastbil ger alltså skadefaktor på

$$\left(\frac{10}{10}\right)^4 = 1$$

Medan en 2-axlad personbil som har en axellast på t.ex. 0,7 ton ger en skadefaktor på

$$\left(\frac{0,7}{10}\right)^4 * 2 = 0,000048$$

Ett fullastat timmerekipage på 60 ton med 7-axlar ger en skadefaktor på ca 4 (Granlund, 2012).

Detta visar att det krävs ca 83000 överfarter med en personbil för att ge lika stor skada som en överfart med ett fullastat timmerekipage (lagligt lastad).

För att kunna räkna ut den totala last som lastbilen i simuleringen skulle påverka vägbanan med så måste fordonets statiska last och den dynamiska last, som uppkommer när fordonet kör över ojämnheter, adderas.

Total last = Statisk last + Dynamisk last.

För att beräkna vilken vägskadefaktor som denna totala last medför måste den dynamiska lasten ”räknas om” till statisk. Detta för att kunna använda sig av formeln

$$N = \left(\frac{P_i}{P}\right)^4 * k_i$$

Resultatet blir då den vägskadefaktor som kan uppstå vid ojämnheter och som sedan kan påverka vägbanan under en sträcka efter det att karossen satts i gungning.

## 4. Resultat

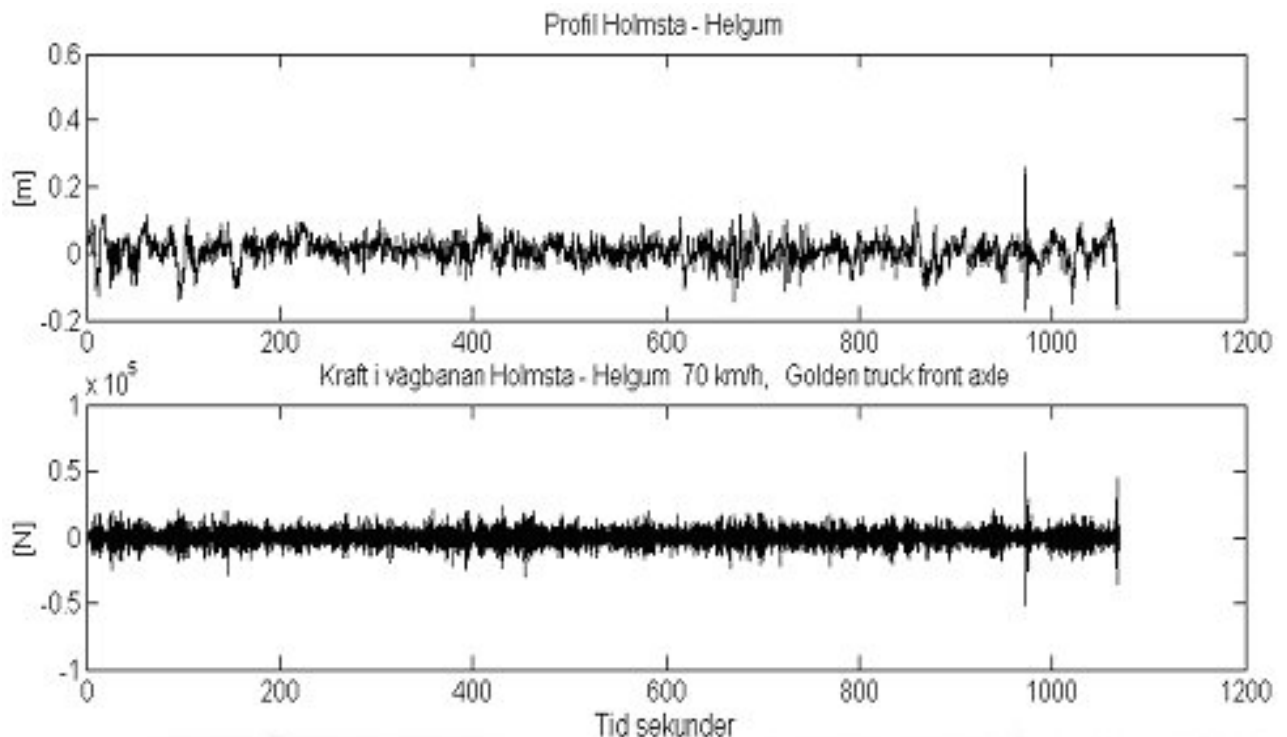
### 4.1 Objekt Holmsta-Helgum

Vectura gjorde en inmätning av vägytan på väg Y950 mellan Holmsta och Helgum i Sollefteå kommun. Den information som man samlat in kunde sedan användas för att räkna ut de vertikala rörelser som uppkommit till följd av vägens ojämnheter.

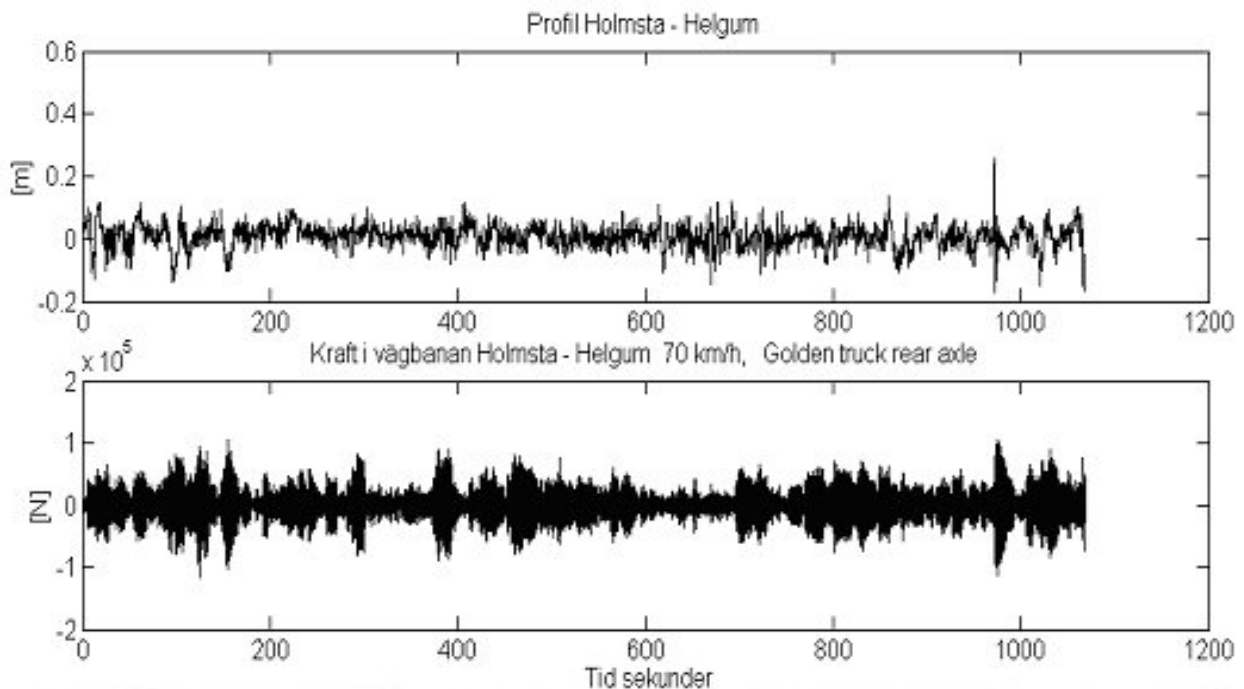
Vi har sett i Figur 11 att bakaxeln ger väldigt stora dynamiska laster vid excitering från ojämnheter som ger frekvenser på ca 1,5 Hz. Detta ger i typiska lastbilsfarter på 70 km/h våglängder på ca 13 meter. ( $20\text{m/s} / 1,5\text{ Hz} = 13\text{ m}$ )

Resultatet från simuleringarna visas i Figur 16 (nedan) och 17 (sid 25). Figur 16 visar framaxelns kraft ner på vägbanan och Figur 17 visar bakaxeln. Figurerna visar vägens profil och det simulerade fordonets kraft ner mot vägbanan.

### 4.2 Simulering i RQM av objekt Holmsta-Helgum



Figur 16 Resultat för framaxelkonstruktionen, Holmsta-Helgum



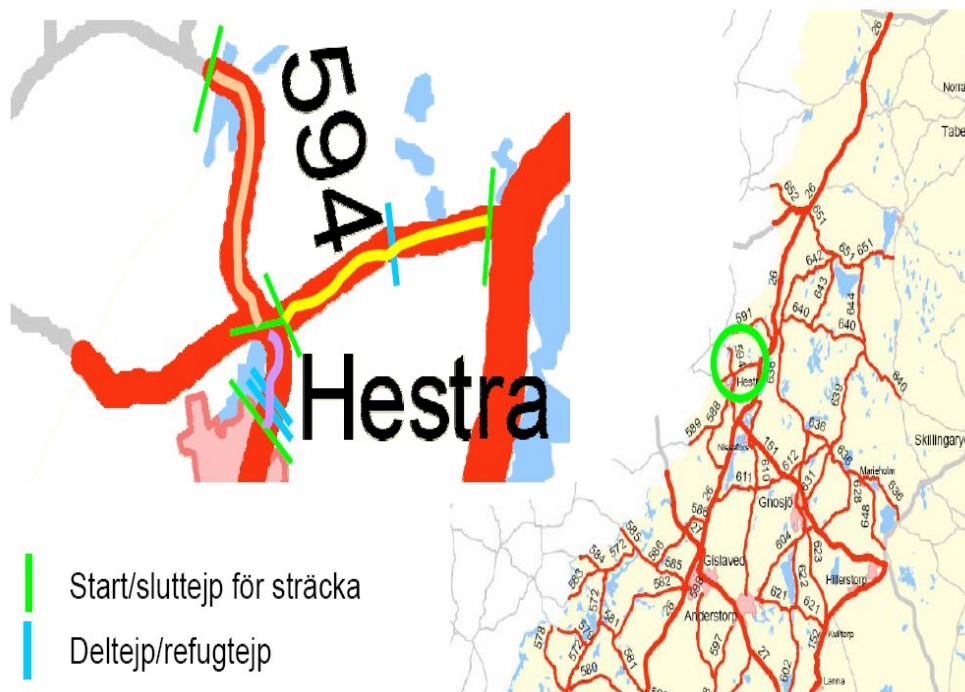
**Figur 17 Resultat för bakaxelkonstruktionen, Holmsta-Helgum**

Den höga toppen till höger i figurerna, strax före tid = 1000 s, är orsakad av en väldigt ojämn korsning med en tvärjärnvägskurva nära Helgum (Granlund, 2012). I verkliga livet kör man inte med den farten, 70 km/h, över denna korsning, så denna topp kan man bortse ifrån. Efter mätningen har korsningen byggts om, så att vägprofilen anpassats till stambanans rälsöverhöjning.

Framaxeln ger mindre belastning än bakaxeln, i detta fall ca 10 kN för framaxeln mot ca 50 kN för bakaxeln, på vägkonstruktionen och ger då naturligtvis mindre dynamiska laster. Eftersom detta är fallet i alla simuleringar så redovisas endast bakaxeln som är den intressantare delen framöver i rapporten.

### 4.3 Objekt Hestra

Vectura har gjort en inmätning av vägytan på beläggningsprojektering F588 / F594 utanför Hestra, datum 080924. Objektet är uppdelat i tre olika delar, varav två stycken kan köras som ett. Från Riksväg 26 in till korsningen 594/588 heter objektet F588.2 (gul). Vid länsgränsen börjar objektet F594 (gul) och slutar vid korsningen 594/588. I samma korsning börjar det tredje objektet F588.1 (lila) som sedan går söderut in i Hestra.

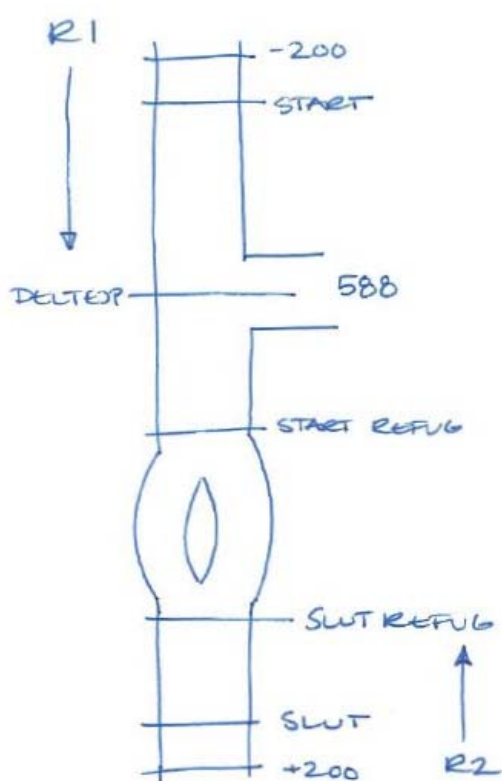


Figur 18 Inmätta vägars lokalisering i Hestra (Vectura).



**Sträcka 594/ 588**

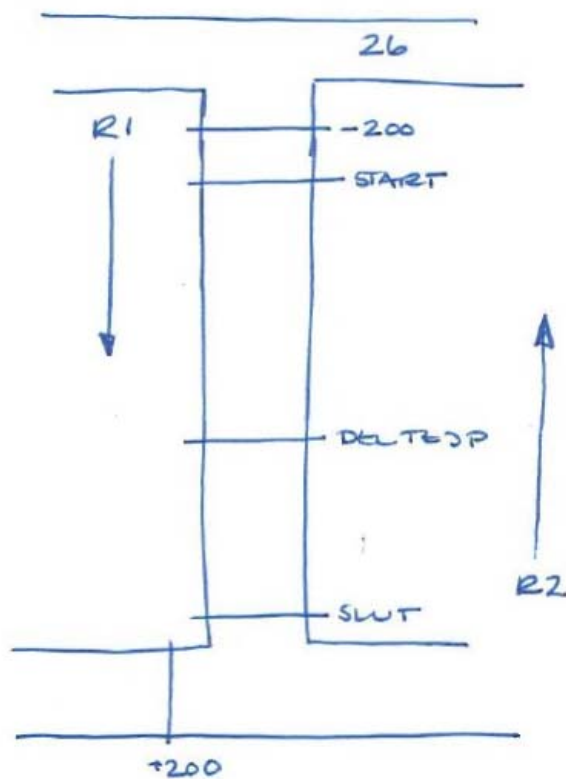
Här ser vi en förenklad bild på objektet som innehåller ett antal noteringar längs sträckan. Totala längden på mätningen är 4500 m. Startnoteringen kommer ca 100 m in på mätningen. Korsningen med sträcka 588,2 kommer vid 3145 m. Refugen startar vid 4160 m och slutar 4300 m. Slutnoteringen 4400 m in på mätningen. Dessa distanser är när man kör sträckan i riktning R1.



**Figur 19 Objekt 594/588**

### Sträcka 588,2

Förenklad bild av aktuell sträcka. Totala längden på mätningen är 3370 m. Startnoteringen kommer ca 60 m in på mätningen. Deltejpen ligger vid 1360 m. Slutnoteringen 3335 m in på mätningen. Dessa distanser är när man kör sträckan i riktning R1.

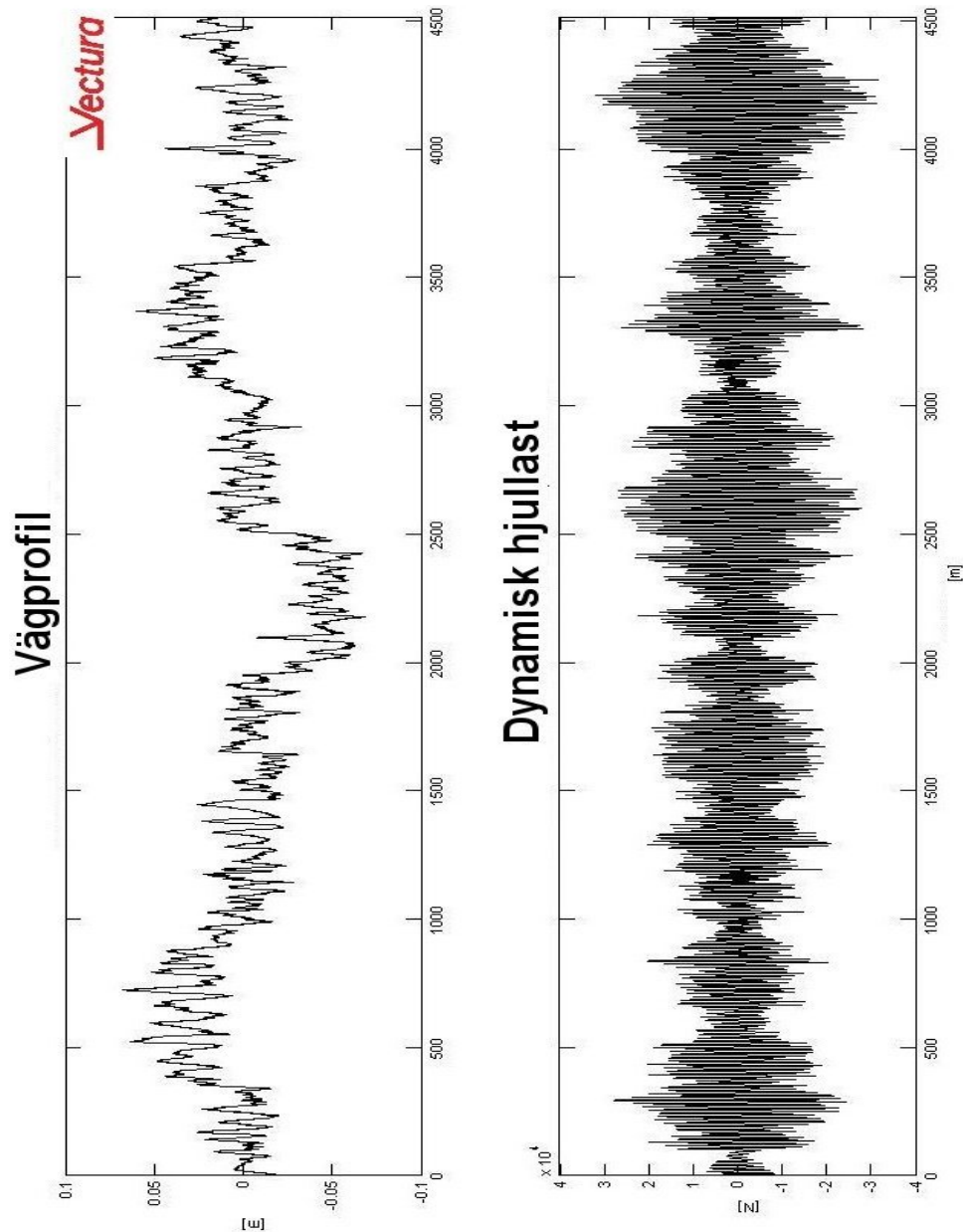


Figur 20 Objekt 588,2

## 4.4 Simulering i RQM av objekt Hestra

### 4.4.1 Simulering sträcka 594/588

Kör man en analys av hela sträckan 594/588 i RQM får man detta resultat, Figur 21. Indata är som tidigare värden från ”The Golden Truck” och man färdas i 80 km/h. Här är det ett bakaxelhjul som simuleras, med en belastning av 4525 kg, en så kallad quarter car analysis.



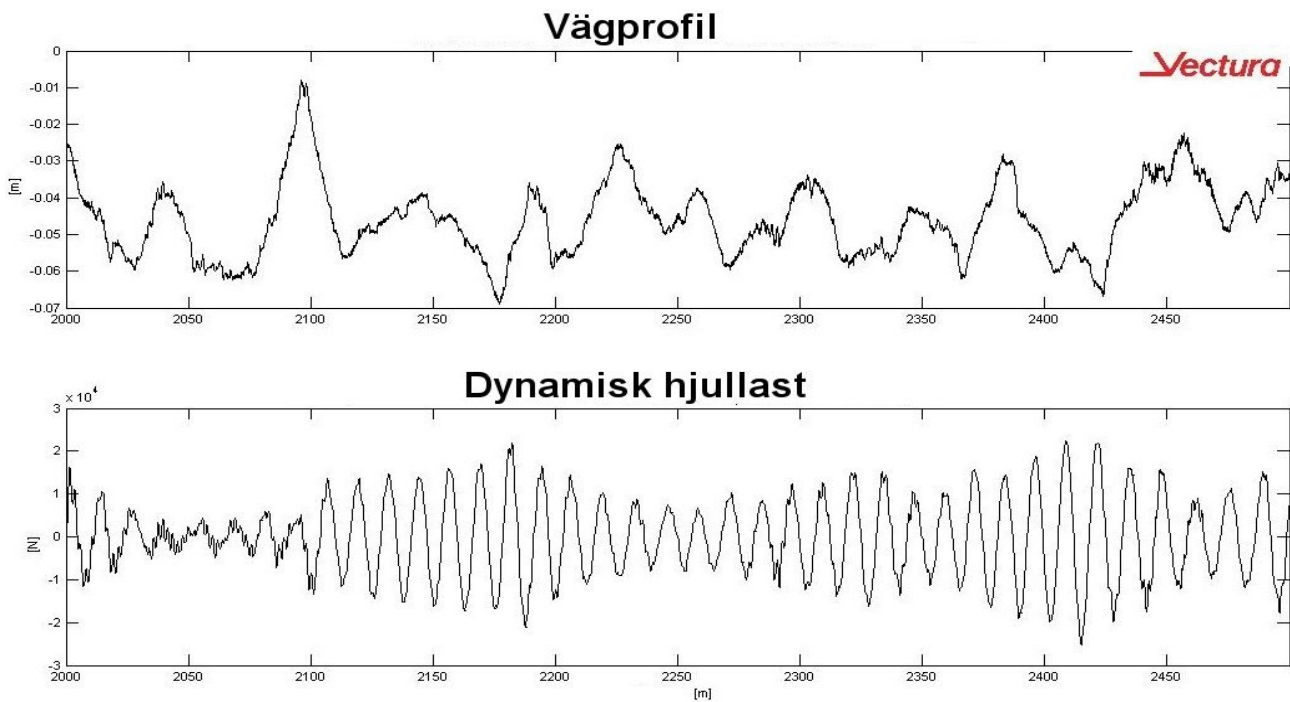
Figur 21 Simulering av bakaxeln sträcka 594/588, hela sträckan.

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

Delar av sträckan simuleras, där ojämnheter i vägens profil och toppar i den dynamiska hjullasten funnits.

### Del av hela sträckan, 2000 till 2500 m.

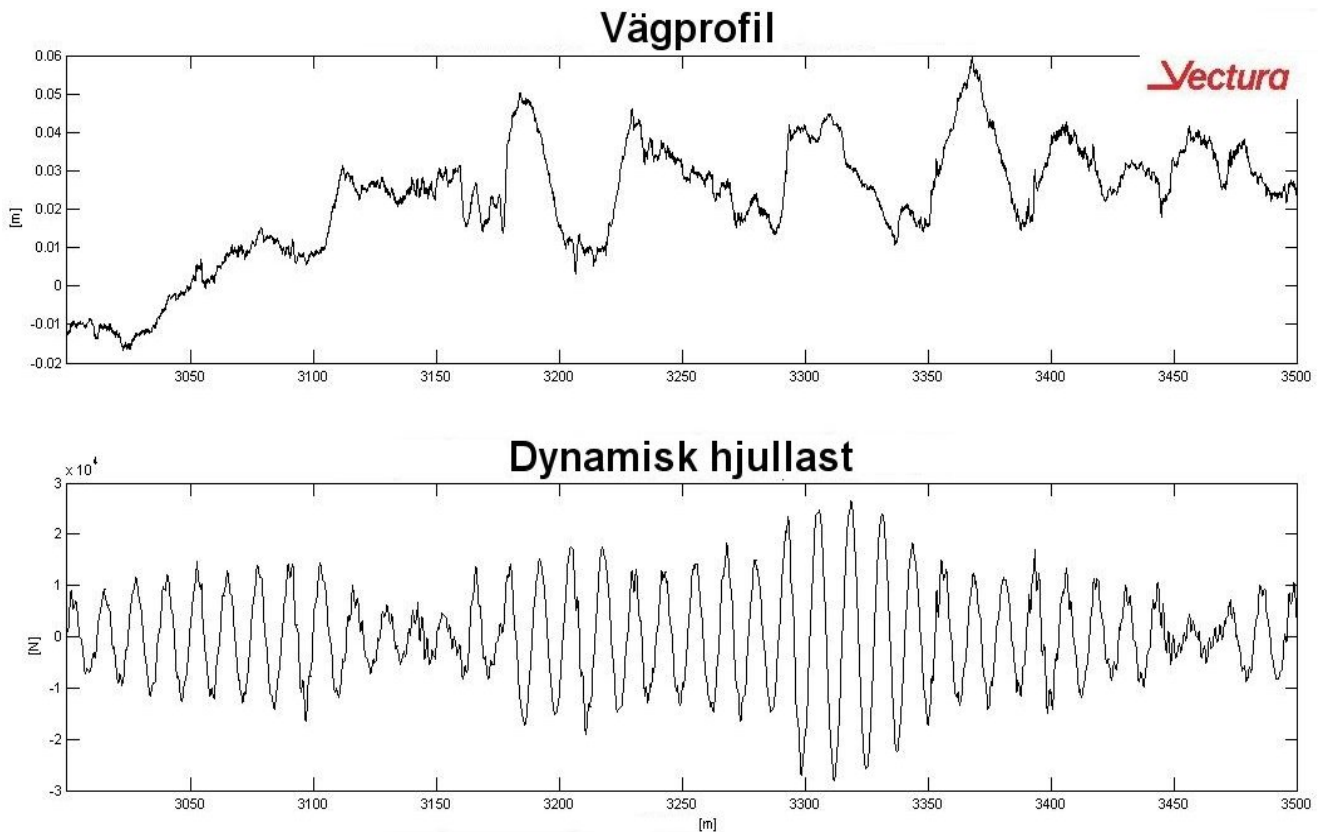
Här ser man att den långa ojämnheten mellan ca 2050-2090 m ger upphov till dynamiska laster på ca 15 kN. När det sedan kommer en till lång ojämnhet mellan 2150-2170 m ger detta upphov till dynamiska laster på upp till 20 kN. Liknande fall vid ca 2400 m.



Figur 22 Del av sträcka 594/588, från 2000m till 2500m.

**Del av hela sträckan, 3000 till 3500 m.**

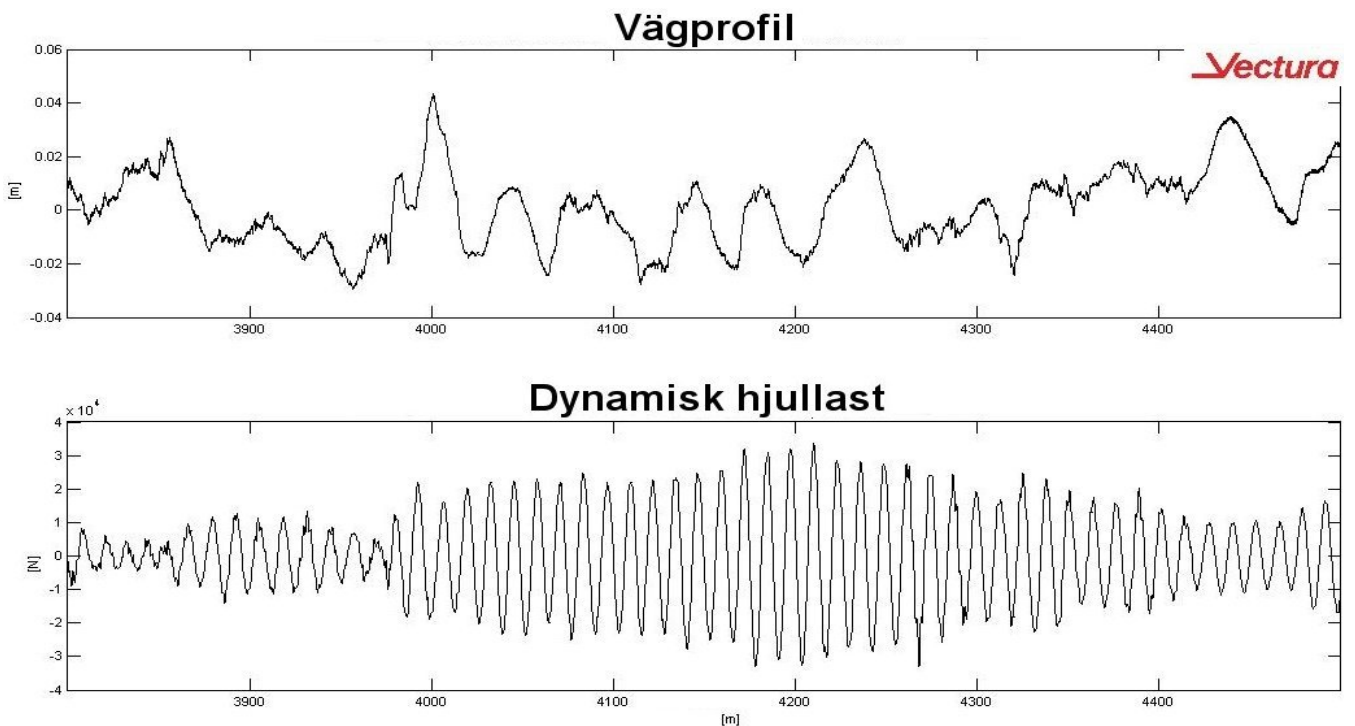
Här ser man att långa ojämnheter efter varandra ger upphov till dynamiska laster på ca 25 kN.



**Figur 23 Del av sträcka 594/588, från 3000m till 3500m**

**Del av hela sträckan, 3800 till 4500 m.**

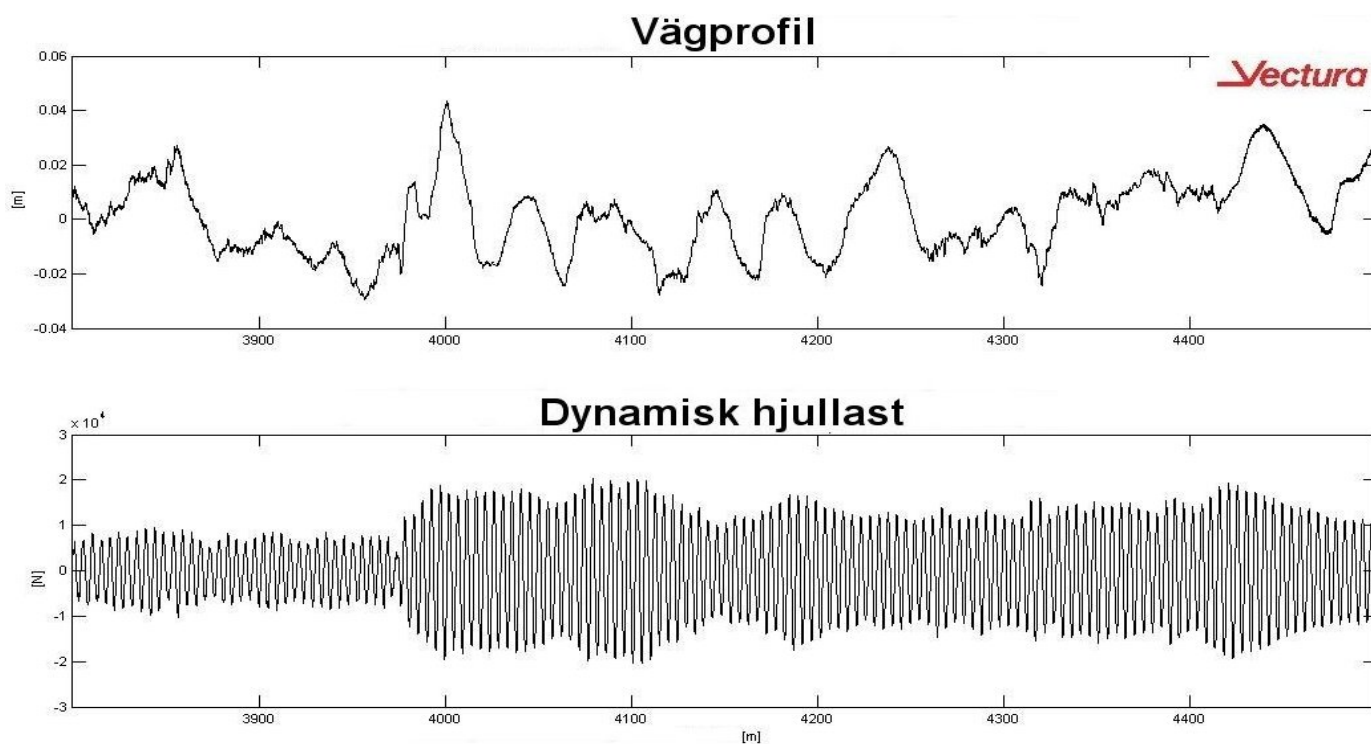
Lång ojämnhet mellan ca 3950-4000 m ger upphov till dynamiska laster på ca 20 kN. Här kan man också se att sträckan mellan 4160-4300 m ger upphov till dynamiska laster på ca 30 kN. Detta är i det området där refugen ligger och då är det lätt att förstå varför det blir stora laster här. I normala fall så kör man inte i 80 km/h genom denna refug. En simulering av denna sträcka i 30 km/h är gjord och visas i Figur 25.



**Figur 24 Del av sträcka 594/588, från 3800m till 4500m.**

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

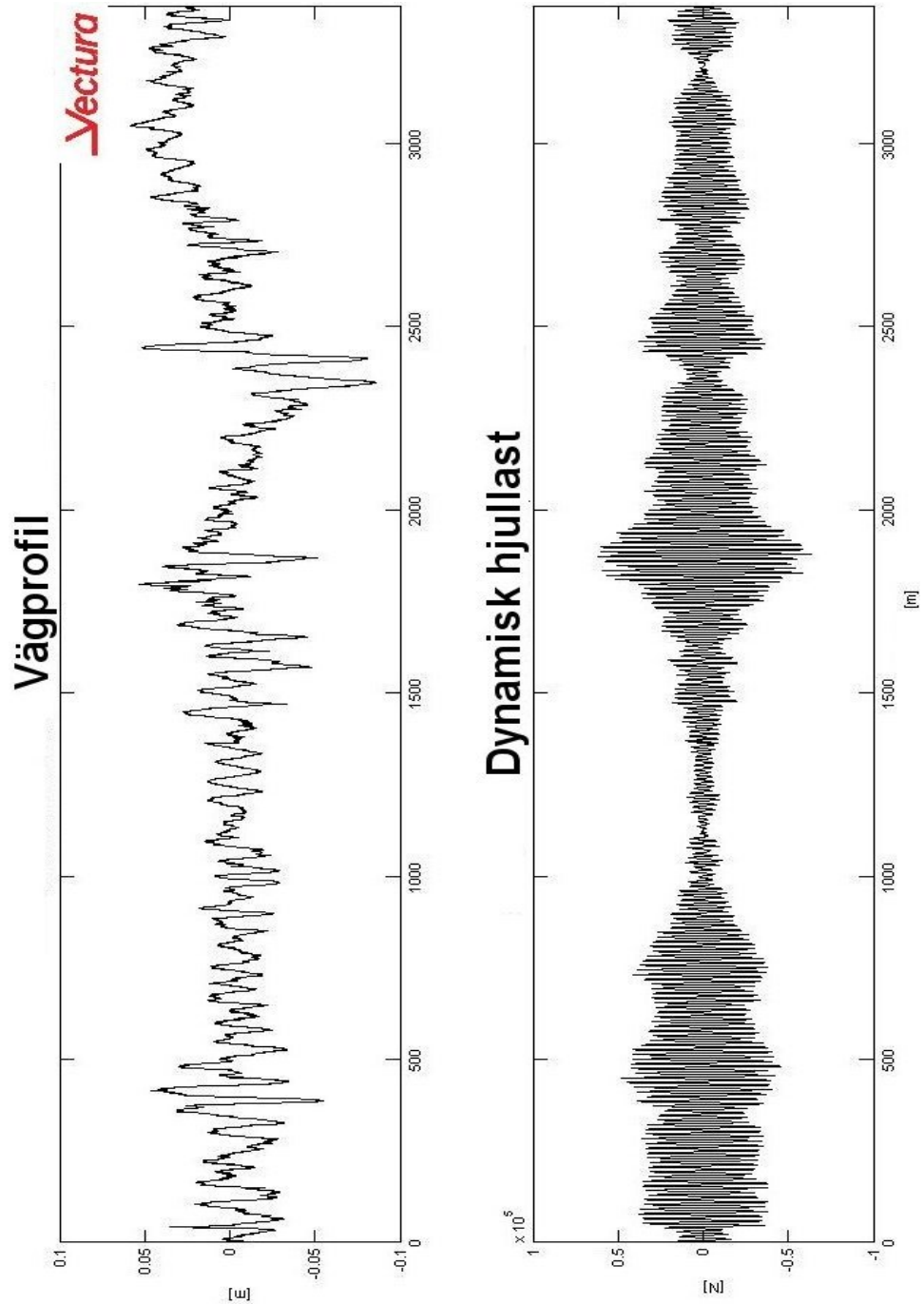
I Figur 25 ser man att i fall man kör denna sträcka i 30 km/h istället för 80 km/h så kommer de dynamiska lasterna att minska till ca 15 kN i området för refugen, 4160-4300 m.



**Figur 25** Del av sträcka 594/588, från 3800m till 4500m simulerad i 30km/h.

#### 4.4.2 Simulering sträcka 588,2

RQM analys av sträcka 588,2 ger följande resultat, Figur 26. Bakaxeln simuleras.

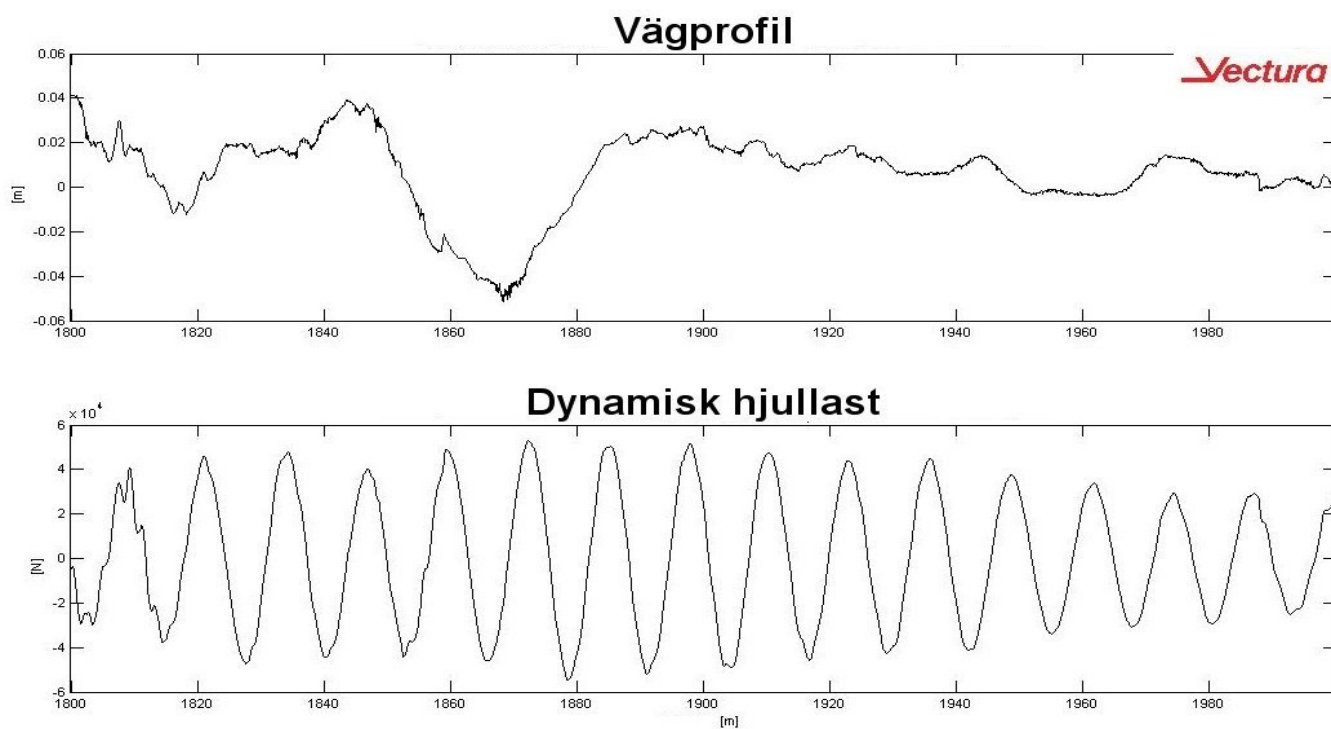


Figur 26 Simulering av bakaxeln sträcka 588,2, hela sträckan.



**Del av hela sträckan, 1800 till 2000 m.**

Långa ojämnheter från 1500 till 1900 m, se föregående figur, ger här dynamiska laster på upp till 50 kN.

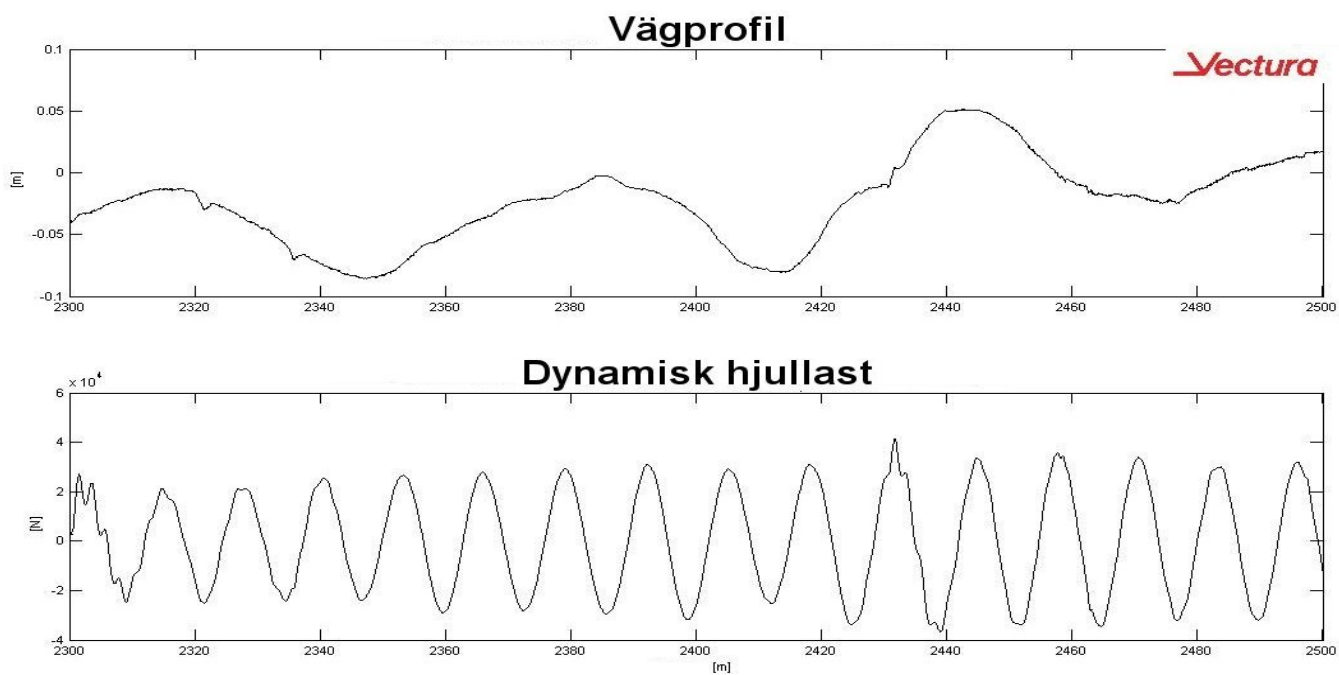


**Figur 27 Del av sträcka 588,2, från 1800m till 2000m**

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

**Del av hela sträckan, 2300 till 2500 m.**

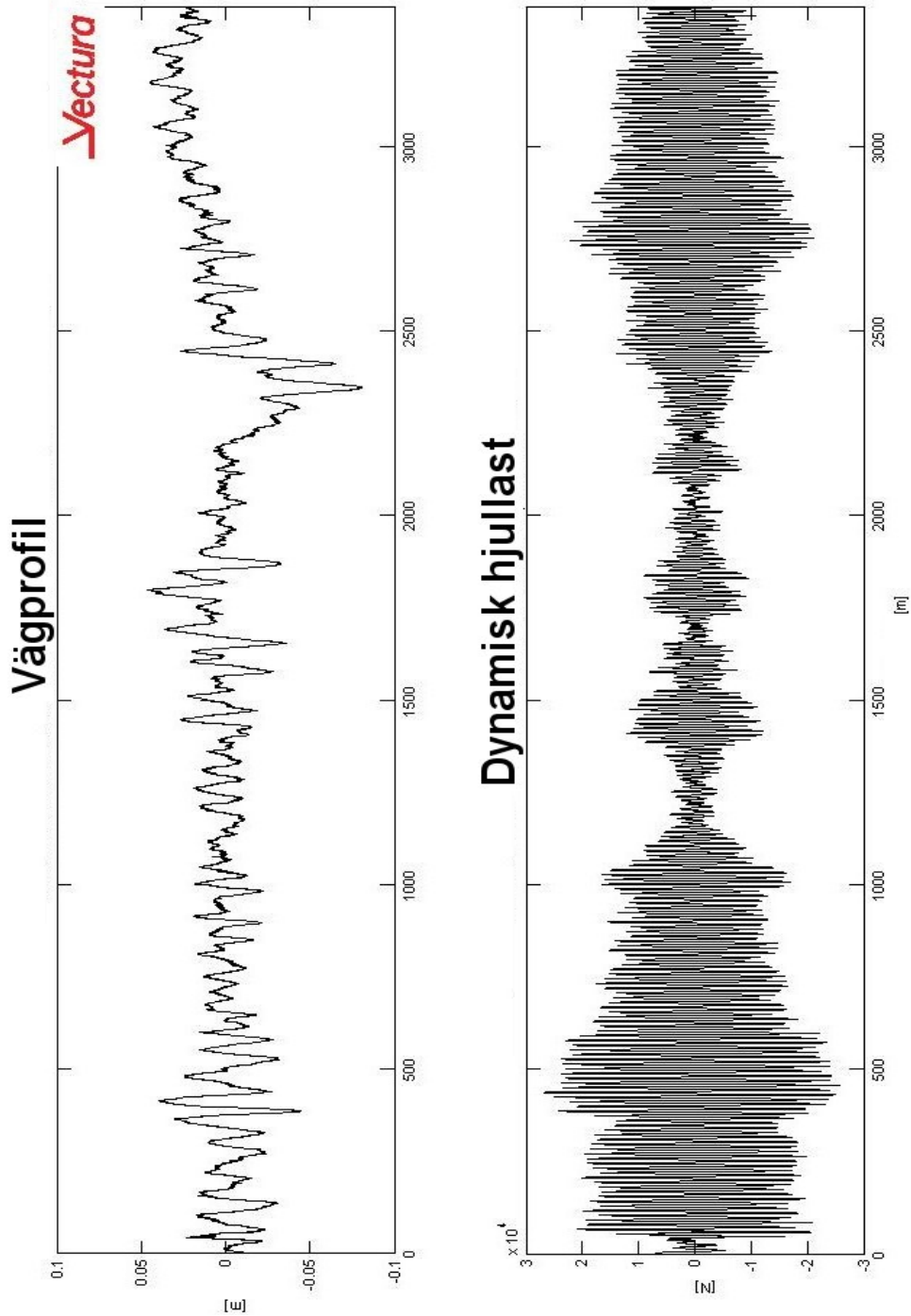
Dynamiska laster på upp till 40 kN kan uppstå på denna sträcka.



**Figur 28 Del av sträcka 588,2, från 2300m till 2500m**

#### 4.4.3 Simulering sträcka 588,2 , Efterkontroll.

RQM analys av sträcka 588,2, Figur 29, ger följande resultat. Detta är samma sträcka som simulerades innan, Figur 20, fast nu är det en efterkontroll efter utförda fyll- och fräsarbeten. Bakaxeln simuleras.



Figur 29 Simulering av bakaxeln sträcka 588,2 (efterkontroll), hela sträckan.

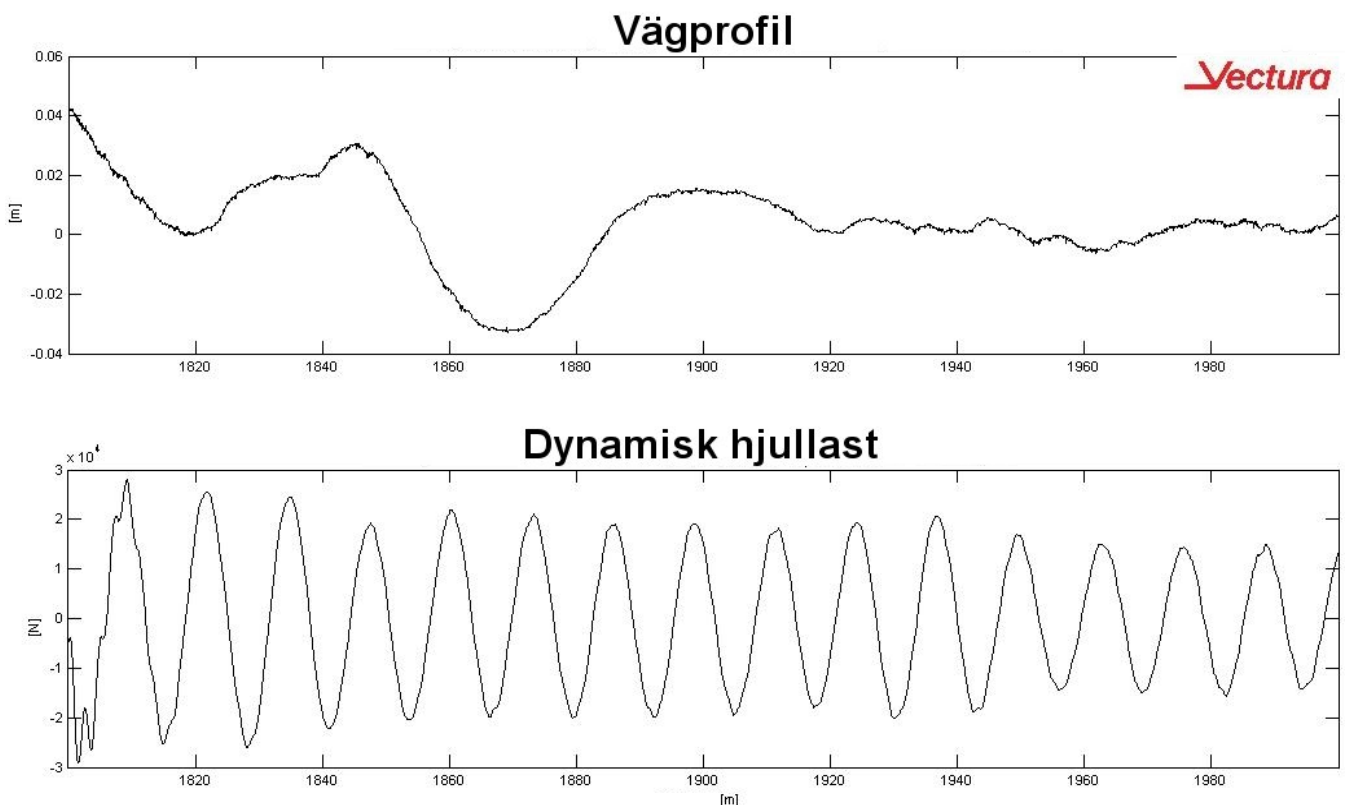
## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

Om man jämför denna analys Figur 29 med den som gjordes inför beläggningsprojekteringen Figur 26 så kan man se att toppen på inmätt profil vid ca 2450 m har blivit något mindre. Men den dynamiska lasten som denna ojämnheter skapar är fortfarande ca 20 kN. Däremot har den dynamiska lasten som uppkommer vid ca 1800 m blivit mycket mindre, från ca 50 kN till ca 5 kN efter arbetet.

Den statiska last som ett bakhjul påverkar vägbanan med är 45 kN. Detta betyder att den dynamiska last som uppstod innan beläggningsprojekteringen var mer än 100 % av den statiska. Den dynamiska tillskottet efter arbete blev endast ca 10 % av den statiska, en klar förbättring. Även de dynamiska lasterna vid ca 400 m har blivit mindre, från ca 40 kN till ca 25 kN. Jobbet med fräsning och ny beläggning då man jämnade ut ojämnheter har alltså gett stor effekt. Reparationen borde dock ha varit ännu mer omfattande för att verkligen minimera trafikbelastningen och på det sättet maximera vägens hållbarhet.

### Del av hela sträckan, 1800 till 2000 m.

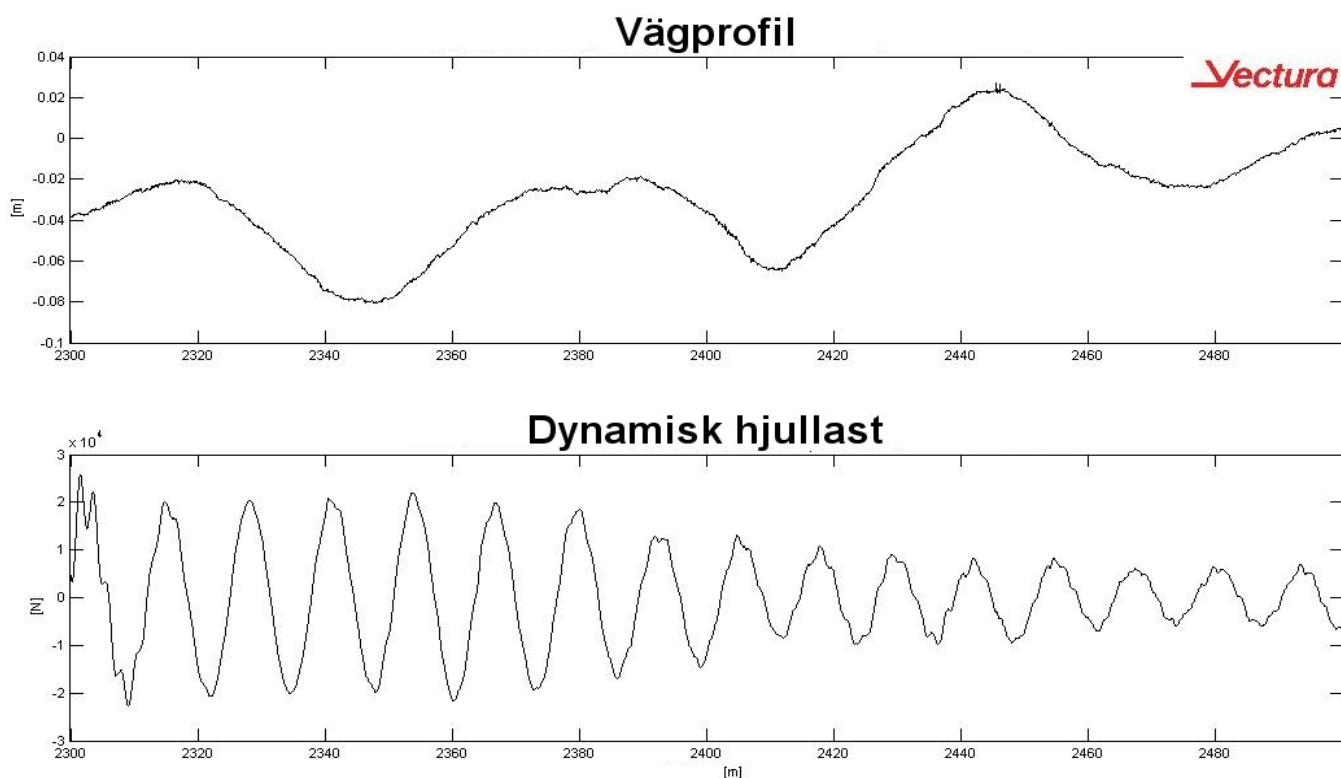
Jämför man denna profilen med samma sträcka på profilen i Figur 27 så ser man att den blivit jämnare. De dynamiska lasterna har även minskat från upp till 50 kN till ca 20 kN.



Figur 30 Del av sträcka 588,2, från 1800m till 2000m

**Del av hela sträckan, 2300 till 2500 m.**

Även här har profilen jämnats ut och den dynamiska lasten minskat, från upp till 40 kN i Figur 28 till ca 10 kN.



**Figur 31 Del av sträcka 588,2, från 2300m till 2500m**

## 5. Analys av resultat

De dynamiska lasterna som presenterades i simuleringen från RQM används nu till att räkna ut vilken vägskadefaktor som aktuell vägsträcka utsätts för då ”The Golden Truck” färdas över denna.

Total last= statisk + dynamisk, räknas ut och sedan räknas vägskadefaktorn ut enligt ekvationen för fjärdepotensregeln (kapitel 3.2).

$$N = \left( \frac{P_i}{P} \right)^4 * k_i$$

### 5.1 Resultat av simulering för sträckan Holmsta-Helgum

#### Simuleringen av bakaxellasten

##### Statisk del:

Hela bakaxeln ger en statisk last på 2\*4,5 ton =9 ton= 90 kN

Detta ger  $N = \left( \frac{90}{100} \right)^4 = 0,66$  i vägskadefaktor av bakaxelns statiska last.

##### Dynamisk del:

För att få fram de maximala krafterna, toppvärdet, på kurvorna så multipliceras kurvans värde med roten ur två (Matematisk terminologi, 2012).

Från simuleringen, Figur 17 (sid 25), ser vi att den dynamiska lasten ofta kan bli  $1,41 * 50000 \text{ N} \approx 70 \text{ kN}$

70 kN per bakaxelhjul ger en total dynamisk last på 140 kN.

##### Total bakaxellast som uppstår:

$90+140= 230 \text{ kN}$  vilket ger  $N = \left( \frac{230}{100} \right)^4 = 28$  i total vägskadefaktor

Jämför man detta värde med det värde som man fick vid enbart statisk kraftpåverkan så ser man att vägskadefaktorn har ökat med  $28/0,66= 42$

Alltså har vägskadefaktorn från bakaxeln ökat med 4200 % vid ställen med stora ojämnheter jämfört med då vägen hade varit helt jämn (bara statisk last). Det är den aldrig men ökningen är ändå markant. Med boggieaxel blir ökningen 2500 %. (Avrundningar har gjorts, det är effekten av den dynamiska lasten som är det intressanta här)

## 5.2 Resultat av simulering för sträckan Hestra

### 5.2.1 Simuleringen av bakaxellasten sträcka 594/588

#### Statisk del:

Hela bakaxeln ger en statisk last på  $2 \cdot 4,5 \text{ ton} = 9 \text{ ton} = 90 \text{ kN}$

Detta ger  $N = \left(\frac{90}{100}\right)^4 = 0,66$  i vägskadefaktor av bakaxelns statiska last.

#### Dynamisk del:

Från simuleringen av sträcka 594/588, Figur 21 (sid 29), ser vi att den dynamiska lasten kan bli  $1,41 \cdot 25000 \text{ N} \approx 35 \text{ kN}$

35 kN per bakaxelhjul ger en total dynamisk last på 70 kN.

#### Total bakaxellast som kan uppstå:

$90 + 70 = 160 \text{ kN}$  vilket ger  $N = \left(\frac{160}{100}\right)^4 = 6,5$  i total vägskadefaktor

Vägskadefaktorn från bakaxeln har ökat med  $6,5 / 0,66 = 9,8 = 980\%$

### 5.2.2 Simuleringen av bakaxellasten sträcka 588,2

#### Statisk del:

Hela bakaxeln ger en statisk last på  $2 \cdot 4,5 \text{ ton} = 9 \text{ ton} = 90 \text{ kN}$

Detta ger  $N = \left(\frac{90}{100}\right)^4 = 0,66$  i vägskadefaktor av bakaxelns statiska last.

#### Dynamisk del:

Från simuleringen av sträcka 588,2, Figur 26 (sid 34), ser vi att den dynamiska lasten kan bli  $1,41 \cdot 50000 \text{ N} \approx 70 \text{ kN}$

70 kN per bakaxelhjul ger en total dynamisk last på 140 kN.

**Total bakaxellast som kan uppstå:**

90+140= 230 kN      vilket ger       $N = \left(\frac{230}{100}\right)^4 = 28$  i total vägskadefaktor

Vägskadefaktorn från bakaxeln har ökat med  $28/0,66=42=4200\%$

**5.2.3 Simuleringen av bakaxellasten, efterkontroll sträcka 588,2**

**Statisk del:**

Hela bakaxeln ger en statisk last på  $2*4,5$  ton =9 ton= 90 kN

Detta ger  $N = \left(\frac{90}{100}\right)^4 = 0,66$  i vägskadefaktor av bakaxelns statiska last.

**Dynamisk del:**

Från simuleringen av sträcka 588,2, Figur 29 (sid 37), ser vi att den dynamiska lasten kan bli  $1,41*25000$  N  $\approx$  35 kN

35 kN per bakaxelhjul ger en total dynamisk last på 70 kN.

**Total bakaxellast som kan uppstå:**

90+70= 160 kN      vilket ger       $N = \left(\frac{160}{100}\right)^4 = 6,5$  i total vägskadefaktor

Vägskadefaktorn från bakaxeln har ökat med  $6,5/0,66=9,8=980\%$



### 5.3 Sammanställning av vägskadefaktor för Hestra och Holmsta-Helgum

<b>Belastning från bakaxel</b>				
<b>Vägsträcka</b>	<b>Dynamisk last (kN)</b>	<b>Vägskadefaktor statisk del</b>	<b>Vägskadefaktor dynamisk del</b>	<b>Ökning av vägskadefaktor</b>
<b>Hestra Sträcka 594/588</b>	70	0,66	6,5	980%
<b>Hestra Sträcka 588,2</b>	140	0,66	28	4200%
<b>Hestra Sträcka 588,2 efterkontroll</b>	70	0,66	6,5	980%
<b>Holmsta-Helgum</b>	140	0,66	28	4200%

**Figur 32 Sammanställning av vägskadefaktor för Hestra och Holmsta-Helgum.**

Här ser man att det blivit stora förbättringar i vägskadefaktorn före och efter att man gjort åtgärder på sträcka 588,2. Vilket visar att risken för att stora dynamiska laster skall uppkomma minskat efter underhåll av sträckan.

Jämför man med vad exempelvis Cebon kommit fram till tidigare (Cebon, Hardy, 1993), att en ökning av den dynamiska lasten från ett fordon kan uppgå till 400 % av den statiska lastdelen, så ser man i simuleringarna att de i dessa fall kan bli 10 gånger högre. Vad det beror på är svårt att säga och detta är toppvärden som kan uppkomma, men en ökning av tidigare värden är märkbar. En orsak kan vara att datan (dämpning m.m.) för ”The Golden Truck” är omodern och simuleringar med värden för modernare fordon bör göras i framtida studier. Ytterligare simuleringar (flera sträckor) med andra indata för fordonen bör göras för att se om samma stora ökning av vägskadefaktor kvarstår.

## 6. Diskussion

Resultatet av simuleringen visar att långa ojämnheter kan orsaka lågfrekventa 1-2 Hz gungningar av chassi och nyttolast och därmed ge upphov till laster som skadar vägarna. Även kortvågiga ojämnheter orsakar rörelser men det är framförallt de långvågiga som påverkar. Detta gör att man kan förvänta sig sprickbildning och skador på vägbanan efter dessa ojämnheter då tyngre fordon ligger och ”pumpar” på vägen.

Att vägskadefaktorn ökar med de förhållanden som resultaten visar, betyder att vägens förväntade och dimensionerade livslängd är rejält förkortad pga befintliga vägojämnheter.

En lastbil med boggieaxel skulle på väg Y950 få en vägskadefaktor som ökar med över 2500 % mot motsvarande faktor vid enbart statisk last. En faktor 25, vilket skulle göra att en väg som ska hålla i ca 20 år inte ens håller ett år.

Detta gör att om de längre ojämnheter inte åtgärdas vid reparation så kommer vägnas livslängd förkortas.

Väg Y950 har på senare år fått repareras vartannat år till följd av detta, vilket visar att simuleringens resultat stöder detta.

Simuleringen av väg 588,2 utanför Hestra visar att ökningen av vägskadefaktorn kan bli så stor som 42 gånger då stora dynamiska laster uppstår.

Simuleringen visar också att efter underhåll av vägen så förbättras detta markant, vägskadefaktorn blir då ”bara” 10 gånger större än vid en teoretiskt helt slät väg.

Förenklingarna som gjorts gör att man inte exakt kan säga vilken ökning av vägskadefaktor som uppkommer, men man kan ändå visa de problem som kommer uppstå.

Förenklingar som gjorts är bl.a.:

- Dynamiska lasteffekter från viss ojämnhet på vägen har räknats in i standardaxelbegreppet, men de vägar som testades 1956-1961 var nybyggda och saknade till stor del långa ojämnheter till skillnad från de lite äldre vägar som repareras och där dessa är vanligare.
- Vägen antas ha en jämn bärförmåga utan variationer.
- Man bortser bl.a. ifrån nickrörelser mellan axlar och krängningar över resp. axel, som ger av- och pålastningar som kan bli stora vid viss typ av ojämnhet.
- Man antar också att fjädringen inte slår i bumpgummit, vilket kan ske vid stora fjädringsrörelser.
- Resonanser i undergrunden har man inte tagit hänsyn till.
- Dynamiska effekter i däcken har grovt förenklats.
- Förarnas körbeteende är inte med, t.ex. inbromsningar och sidoflyttningar på vägen.

De resulterande diagrammen, Figur 21 – Figur 31, visar att den använda lastbilsmodellen – ASTMs ”The Golden Truck” – har usel dämpning då den aldrig vill sluta gunga. Riktigt så illa är det knappast med moderna svenska Scania- och Volvo-lastbilar. Därför är ett viktigt steg att validera en mer realistisk referensmodell för svensk lastbil. Ahlin et al (2004) redovisar parametrar som uppmätts för en Volvo FH-lastbil och som verkar betydligt mer realistisk för analys av svenska vägar och lastbilar än den amerikanska Golden Truck.

De dimensioneringsmodeller som används idag för vägarna bortser till stor del från de dynamiska laster som kan uppstå när chassi och nyttolast gungar vid ca 1-2 Hz. Vägdimensioneringsmodellerna skulle därför behöva kompletteras eller ses över. Detta för att inte enbart fordonens statiska last och hjulskakningarna ska ingå i beräkningarna.

Ett sätt att minska ökningen av fordonens vägskadefaktor är att försöka bygga bort de större ojämnheter vid reparation av vägarna. Detta kan göras med fräsning och fyllningar av utvalda vägavsnitt som man m.h.a. lasermätbil sett har stora ojämnheter. Väl genomförda projekteringar och med datorstödd maskinstyrning hjälper till att få en jämnare väg efter reparation.

## 7. Slutsats och fortsatt arbete

Slutligen kan man med hjälp av inmätningar och datorsimulering konstatera att de långa sättningarna som finns på vägbanan gör att man får en stor ökning av dynamiska laster ner på vägbanan, som i sin tur medför ökat slitage och kortare livstid av vägkonstruktionen. RQM fungerar som ett bra verktyg för att kunna lokalisera dessa sättningar och analysera vägens jämnhet och då hjälpa till vid projektering och underhåll av våra vägar. En kombination av väl utförda profilmätningar av vägkonstruktionen och utvärdering av dessa i RQM ligger till grund för en god utvärdering av vägar. Vid reparation av äldre vägar åtgärdar man ofta inte de längre sättningarna och då kvarstår problemet med att stora dynamiska laster som kan uppstå då fordonen sätts i gungning p.g.a. dessa.

De dynamiska laster som uppstår är viktiga att ta med i de dimensioneringsmodeller som man använder idag för att förstå att vägskadefaktorn på vägbanan ökar och därmed så minskar vägens förväntade och dimensionerade livslängd. Simuleringarna gjordes med en modell av en relativt lätt lastbil som körde i 80 km/h, de vägar som trafikerades av väldigt tung trafik t.ex. timmertransporter kommer medföra mycket större dynamiska laster. Dämpningen för simuleringsfordonet ”The Golden Truck” skiljer sig ganska kraftigt från de tunga lastbilar som trafikerar de analyserade vägarna idag, därför bör man i vidare studier införa en ny referenslastbil med moderna egenskaper för att få ett än mer relevant resultat. Då är RQM ett bra verktyg för att visa dessa påverkningar som vägarna utsätts för och var laster och skador uppstår. RQM kan även visa varför vägarna ofta inte håller för den livslängd som den är konstruerad för, detta mycket beroende på befintliga vägojämnheter.

Vidare studier bör göras för att få detta att implementeras på rätt sätt och att RQM kan användas på ett så smidigt sätt som möjligt, och därmed göra det enklare vid projektering och reparation av vägkonstruktioner.

## Referenser

### Muntliga

Granlund J, Civilingenjör och Teknikchef Vectura, under 2011-2012

### Skriftliga

Ahlin K, Granlund J, Lindström F (2004) *Comparing road profiles with vehicle perceived roughness*, Sverige

Ahlin K (2012) *Manual till Ride Quality Meter*, Sverige

ASTM E2034-99 (2012) *Standard Practices for Simulating Truck Response to Longitudinal Profiles of Vehicular Traveled Surfaces*, USA

Cebon D, Hardy A (1993) *Response of Continuous Pavement to Moving Dynamic Loads*, England

Cebon D (1993) *Effects of Heavy-Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance*, Transport Research Board NCHRP Report 353, USA

Doré G, Zubeck H.K. (2009) *Cold Regions Pavement Engineering*, USA

Gillespie T, Karamihas S (1994) *Heavy Truck Properties Significant to Pavement Damage*, Vehicle-Road Interaction, USA

Hjort M, Jacobson T (2008) *Polering av asfaltbeläggning*, VTI notat 25-2007, Sverige

Meriam J.L., Kraige L.G (1998) *Engineering Mechanics Dynamics*, Kanada

Mårtensson A, Isaksson T (2000), *Tabell och formelsamling avdelning för konstruktionsteknik* LTH, Sverige

Slyngstad T (1985) *Trafikbelastningar*, Norges tekniske høgskole, Institut for veg- og jernbanebygging, Norge

Sundquist H (1998) *Laster och lasteffekter av trafik på broar*, Litteraturstudie, Sverige

Svenska Cementföreningen (1963) *AASHO Road Test 1956-1961*, Sverige

## Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan

---

TRVK Väg (2011) *Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion*, TRV 2011:072, Sverige

Ulliditz P (1998) *Modelling Flexible Pavement Response and Performance*, Danmark

Ulliditz P (1987) *Pavement Analysis*, Danmark

Vägverket publikation 1999:100 (1999) *Vägbanemodell för datorstödd utformning av Underhållsbeläggningar*, Sverige

Yang H. Huang (2004) *Pavement Analysis and Design*, USA

### Internet

*ASSHO Road Test*, United States Department of Transportation - Federal Highway Administration

<http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/06mar/07.cfm>

*Damped sine wave* (2012)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Damped\\_sine\\_wave](http://en.wikipedia.org/wiki/Damped_sine_wave)

Granlund J (2010) *Reducing Health and Safety Risks on Poorly Maintained Rural Roads*

[www.nvfnorden.org/lisalib/getfile.aspx?itemid=3455](http://www.nvfnorden.org/lisalib/getfile.aspx?itemid=3455)

Hjort M (2008) *Växelsväng mellan väg och fordon*

<http://www.nvfnorden.org/lisalib/getfile.aspx?itemid=310>

*IRI, Introduction to the International Roughness Index*

<http://www.dot.state.mn.us/materials/smoothnessdocs/IRIIntroduction.pdf>

Matematisk terminologi (2012), *Tidsperiodiska storheter*

<http://matmin.kevius.com/vaexel.php#medel>

Trafikverket (2011) *Vägunderhåll- så här vårdar och sköter vi våra vägar och anläggningar*.

[http://publikationswebbutik.vv.se/upload/6385/100435\\_vagunderhall\\_sa\\_har\\_vardar\\_och\\_skoter\\_vi\\_vara\\_vagar\\_och\\_anlaggningar.pdf](http://publikationswebbutik.vv.se/upload/6385/100435_vagunderhall_sa_har_vardar_och_skoter_vi_vara_vagar_och_anlaggningar.pdf)

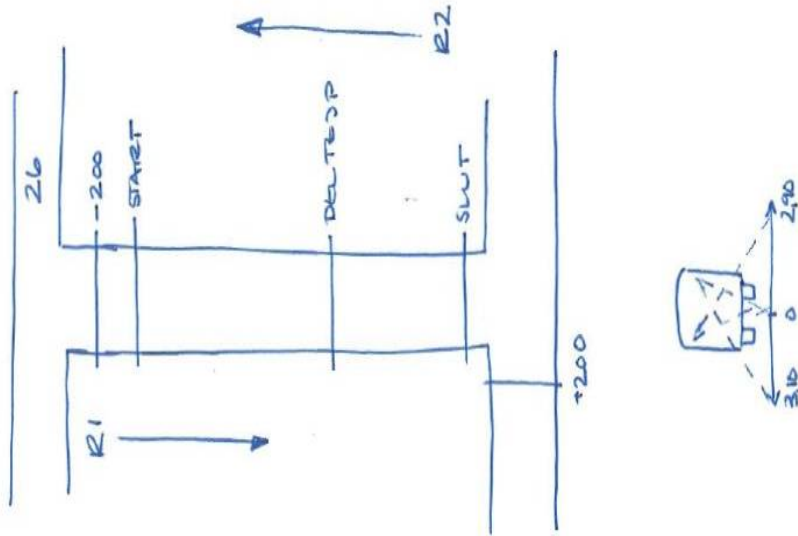








Metod för att beräkna dynamiska hjullaster på vägbanan



Före FoF-mätning		J/N
Delmoment:		
Ring TIC-en		
Kontrollera läsnar & gyro (rengöring & funktion)		
Tjuga upps objektet: Startslupunkt		
+/- 200 m punkter		
Delobjekt (refuger, el, > 8 km)		
Alltvarna Nätverks-RTK i GPS		
Rita skiss i mätprotokollet		
Rehögning av kameror		
Översiktsfilmning: R1		
R2		
Övrigt:		

Efter FoF-mätning		J/N
Delmoment:		
Kontrollerat filerna i FGRW		
Avaktivera Nätverks-RTK		
Rendera film		
Bränn ner mätdata och film på CD/DVD		
Meddelat TIC:en om avslutning		
Anteckna tid för olika arbetsmoment		
Övrigt:		

Före objektmätning		J/N
Delmoment:		
Ring TIC-en		
Kontrollera läsnar & gyro (rengöring & funktion)		
Tjuga upps objektet: Startslupunkt		
Notpunkter		
ID-punkter		
Bej skenvar		
Övrigt		
GPS-filmning: R1		
R2		
Rita skiss i mätprotokollet		
Rehögning av kameror		
Översiktsfilmning: R1		
R2		
Övrigt:		

Efter objektmätning		J/N
Delmoment:		
Kontrollerat filerna i FGRW		
Kontrollerat filerna i Labelfila		
Rendera film		
Bränn ner mätdata och film på CD/DVD		
Meddelat TIC:en om avslutning		
Anteckna tid för olika arbetsmoment		
Övrigt:		

