

CHALMERS



Modell för klassificering av ytor för selektiva bärighetsförbättrande åtgärder

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

PETER ROSENGREN OCH DAVOR SENOHRADSKI

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Väg och trafik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2007
Examensarbete 2007:15

EXAMENSARBETE 2007:15

Modell för klassificering av ytor för selektiva bärighetsförbättrande åtgärder

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

PETER ROSENGREN OCH DAVOR SENOHRADSKI

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Väg och trafik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2007

Modell för klassificering av ytor för selektiva bärighetsförbättrande åtgärder.
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad
PETER ROSENGREN OCH DAVOR SENOHRADSKI

© PETER ROSENGREN OCH DAVOR SENOHRADSKI, 2007

Examensarbete 2007:15
Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Väg och trafik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:
Stora bilden visar en grensletruck i Skandiahammen som lossar en container. Lilla bilden längst upp till höger är en bild på ytan i etapp 11 i Skandiahammen. Lilla bilden längst ner till höger är en bild på Dynapacvälten CA 302 som användes vid examensarbetet.

Chalmers Reproservice
Göteborg, 2007

Model for Classification of Areas for Selective Reinforcement Measures
Master's Thesis in Civil and Environmental Engineering
PETER ROSENGREN AND DAVOR SENOHRADSKI
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of Road and Traffic
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The lift on lift off terminal of The Port of Gothenburg (Skandiahamnen) is frequently exposed to heavy traffic in the form of straddle carriers. The heavy traffic demands a sub-grade of high quality and it is important that the sub-grade is in good condition so that work can be carried out effectively. To keep the sub-grade in good condition is a hard task since the heavy traffic causes bearing capacity problems such as subsidence, uneven foundation and formation of tracks.

For examination of the bearing capacity of existing surfaces there are a number of different methods. For example Georadar which examines material variation of the sub-grade. A second method is Pavement Control Index (PCI) which describes with a number between 1 and 100 the pavement's condition. A third method is Static Plate Load where an area of the sub-grade is loaded with a circular steel plate and as a result the elastic modulus and deformation properties are obtained. A fourth method is Falling Weight Deflectometer, which is a dynamic plate bearing device that is fit on a trailer and is pulled by a car. The Falling Weight Deflectometer simulates the deformation caused by a wheel of a heavy machine. A fifth method is Continuous Compaction Control carried out by a roller. The roller measures the energy exchange between the sub-grade and the roller's drum. The energy exchange is a measurement of the sub-grade's resistance.

An earlier thesis has shown that the Georadar and Pavement Control Index are insufficient when bearing capacity of existing surfaces is to be examined. Tests with the Georadar gave a weak resemblance with actual results. Pavement Control Index is the result of many different types of surface damages. A few of these damages are irrelevant when an examination of bearing capacity is carried out.

This thesis focuses mainly on Continuous Compaction Control for examination of bearing capacity on existing surfaces. Continuous Compaction Control has been carried out with rollers from two different manufactures. The first roller is a Dynapac CA 302 which is a 12 ton roller. The second roller is a Hamm 3516 which is a 16 ton roller. In addition to Continuous Compaction Control, Falling Weight Deflectometer and Static Plate Load tests have been done. As a verification of the reliability of the methods in comparison to actual results, test pits have been dug.

A comparison between Continuous Compaction Control, Static Plate Load and Falling Weight Deflectometer respectively shows a clear relationship. The comparison between Continuous Compaction Control, Static Plate Load and Falling Weight Deflectometer has been done with a regression analysis. When a regression analysis is made a linear relationship between methods shows that calibration is acceptable. When a comparison is made with the Dynapac and Hamm roller the regression

analysis fulfils the Swedish Road Administration's requirements. When a comparison is made between test pits and the other methods a relationship cannot be found, because the test pits only had a depth of 1,5 meters. The bearing capacities obtained from the other methods are not dependent of only the top layer, but how the different sub-layers work together.

Key words: Continuous Compaction Control (CCC), bearing capacity, heavy loaded areas.

Modell för klassificering av ytor för selektiva bärighetsförbättrande åtgärder.

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

PETER ROSENGREN OCH DAVOR SENOHRADSKI

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för geologi och geoteknik

Väg och trafik

Chalmers Tekniska Högskola

SAMMANFATTNING

Lift on lift off hamnen i Göteborg (Skandiahammen) utsätts kontinuerligt för tung trafik från grensletruckar. Trafiken ställer stora krav på grundkonstruktionen och det är ytterst viktigt att grundkonstruktionen är i bra skick för att arbetet skall kunna utföras på ett effektivt sätt. Att hålla grundkonstruktionen i bra skick är en svår uppgift därför att trafiken orsakar bärighetsproblem som till exempel sättningar, ojämnt underlag och spårbildning.

För att undersöka bärigheten hos befintliga ytor finns en rad olika metoder. Dessa är bland annat georadar som ger upplysningar om materialförändringen mot djupet. Pavement Condition Index (PCI) beskriver med ett tal mellan 0 och 100 beläggningens kondition. Statisk plattbelastning (SPB) innebär att ett område på transportytan belastas med en cikulär stålplatta och därefter erhålls underlagets elasticitets- och deformationsegenskaper. Tung fallvikt (FWD) är en dynamisk plattbelastningsutrustning som är monterad på ett släp som dras efter en bil och ska simulera den deformation som ett hjul på ett tungt fordon orsakar. Yttäckande packningskontroll (YPK) som görs med hjälp av vält. Välten mäter energiutbytet mellan marken och vältens trumma. Energiutbytet är ett mått på underlagets motstånd.

Ett tidigare examensarbete har visat att de två först nämnda metoderna (georadar och okulärbesiktning med Pavement Control Index) är otillräckliga när bärighet hos befintligt ytor skall undersökas. Georadar ger en dålig överstämmelse med verkligt utfall och PCI är en sammanvägning av flera olika skador. Vissa av dessa är ointressanta vid inventering av ett hamnområde.

Detta examensarbete lägger därför störst vikt på att undersöka om ytpackningskontroll med hjälp av vält är en lämplig metod för att undersöka bärigheten hos befintliga ytor. Ytpackningskontrollen har skett med två motsvarande vältmodeller av olika tillverkare. Den första välten är Dynapac CA 302 som är en 12 tons vält. Den andra välten är en Hamm 3516 som är en 16 tons vält. Som komplement till ytpackningskontrollen har dessutom försök med statisk plattbelastning och tung fallvikt utförts. För att kontrollera mätmetodernas tillförlitlighet grävdes dessutom provgropar.

Vid en jämförelse mellan yttäckande packningskontroll och statisk plattbelastning respektive tung fallvikt syns ett klart samband. En jämförelse mellan yttäckande packningskontroll och statisk plattbelastning respektive tung fallvikt har gjorts med en

regressionsanalys. Vid en regressionsanalys ska ett linjärt samband mellan metoderna kunna påvisas för att kalibreringen ska vara godkänd. Vid jämförelsen uppfyller både Dynapac och Hammvälten Vägverkets krav. Vidare erhöles ett starkt samband mellan statisk plattbelastning och tung fallvikt. Vid en jämförelse mellan provgroparna och de olika provmetoderna erhöles inget samband, på grund av att provgroparna endast hade djup på 1,5 m. Bärighetsvärdet från de andra provmetoderna är inte endast beroende av hur översta lagret är uppbyggt men hur de olika lagren samverkar.

Nyckelord: Yttäckande packningskontroll (YPK), bärighet, tungt belastade ytor.

Innehåll

ABSTRACT	I
SAMMANFATTNING	III
INNEHÅLL	V
FÖRORD	VII
FIGURER OCH TABELLER	IX
VIKTIGA BETECKNINGAR	XII
1 INLEDNING	1
1.1 Syfte	1
1.2 Avgränsning	1
1.3 Metod	1
2 METODER FÖR MÄTNING AV BÄRIGHET	3
2.1 Tung fallvikt (FWD)	3
2.2 Statisk plattbelastning (SPB)	4
2.3 Yttäckande packningskontroll, vältmonterad packningsmätare (YPK)	6
2.3.1 Första försöken med YPK	8
2.3.2 Vilka krafter verkar på jorden och välten	9
2.3.3 Kraftdeformationsdiagram	13
2.3.4 CMV och H MV	13
2.3.5 Oscillerande vältar	17
2.3.6 E_{vib}	18
2.3.7 Variocontrol	22
2.3.8 k_s	24
3 FÄLTUNDERSÖKNINGAR	26
3.1 Förutsättningar	26
3.2 Tung fallviktsundersökningar	27
3.3 Yttäckande packningskontroll	28
3.4 Statisk plattbelastning	30
3.5 Provgropar	30
4 RESULTAT AV INVENTERING	31
4.1 Tung fallviktsundersökningar	31
4.2 Yttäckande packningskontroll	33
4.2.1 Dynapacvält	33
4.2.2 Hammvält	34
4.3 Statisk plattbelastning	36

4.4	Provgropar	36
5	ANALYS AV RESULTAT	38
5.1	Jämförelse mellan SPB och YPK	38
5.2	Jämförelse mellan Dynapac och Hammvälten	43
5.3	Jämförelse mellan FWD och YPK	45
5.4	Jämförelse mellan provgropar och andra provmetoder	47
6	SLUTSATSER	48
7	DISKUSSION, FRAMTIDA UNDERSÖKNINGAR OCH REKOMMENDATIONER	50
	REFERENSER	51
7.1	Publicerad litteratur	51
7.2	Opublicerad litteratur	51
7.3	Internet	51
7.4	Muntliga källor	52
8	FÖRTECKNING ÖVER BILAGOR	53

Förord

Detta examensarbete har utförts vid Institutionen för bygg- och miljöteknik, Avdelningen för geologi och geoteknik, Grupp väg och trafik vid Chalmers på uppdrag av Göteborgs Hamn AB och Ramböll Sverige AB. Projektet har finansierats av Svenska Väg- och Vattenbyggares Riksförbund (SVR) och har utförts under hösten 2006.

Vi vill tacka alla personer som medverkat i vårt examensarbete och gett oss värdefulla synpunkter. Ett stort tack riktas främst till:

Universitetslektor Gunnar Lannér (handledare och examinator)
Chalmers, Institutionen för bygg- och miljöteknik, Avdelningen för geologi och geoteknik.

Ingemar Moström (biträdande handledare)
Göteborgs Hamn AB och SVR

Richard Adeström, Lars Dahlin och Stig Östfjord
Göteborgs Hamn AB

Peter Johansson och Martin Jägar
Göteborgs Bygg och Bitumenbeläggningar AB

Adam Blom, Pierre Kroona, Sture Persson och Peter Täreby
Ramböll Sverige AB

Kurt Fröberg
SVR

Vi vill även tacka:

Hans-Josef Kloubert
Bomag

Jan Hansson
Chalmers och Skanska

Evert Andersson, Stefan Carlsson, Michael Knutsson och Ingemar Nordfelt
Dynapac Nordic AB

Carl Bertil Pettersson
Geodynamik HT AB

Ralf Schröder
Hamm AG

Olle Tholén
KUAB

Stefan Åkerström
Stig Maskin AB

Håkan Carlsson
VTI

Klas Hermelin
Vägverket

Anders Lenngren och Virgilio Perez
Vägverket Konsult

Johan Tretter
Wirtgen Sweden AB

Figurer och tabeller

Figurer

- Figur 2.1 Fallvikten skapar en deflektion som mäts från 200, 300, 450, 600, 900 och 1200 mm från belastningsplattans centrum. [2]
- Figur 2.2 En principskiss på en statisk plattbelastnings apparatur samt ett tidssättningsdiagram. [7]
- Figur 2.3 Statisk vält (A), vibrerande vält (B) och en oscillerande vält (C). [8]
- Figur 2.4 Fältförsöken som utförts. [8]
- Figur 2.5 Förhållandet mellan undersökta djupet, jordens densitet samt undersökta djupet. [9]
- Figur 2.6 Oanalytisk modell av vält-jord systemet. [10]
- Figur 2.7 Tre olika typer av dynamisk rörelse av en vibrationstrumma. a) kontakt med marken hela tiden, b.) trumman förlorar kontakt med marken ibland c) dubbelstuds. [10]
- Figur 2.8 En förenklad bild på de krafter som verkar på vältens trumma. [10]
- Figur 2.9 Kraftdeformationsdiagrammet visar sambandet mellan vertikallasten och deformationen under en vibrerande trumrotation. [11]
- Figur 2.10 Förhållandet mellan tvärkraftsmodulen G och parametern p (som är ett mått på jordens plasticitetsegenskaper). [12]
- Figur 2.11 De olika komponenter en packningsmätare består av (en processor, en display, en accelerometern och en fart sensor). [14]
- Figur 2.12 Förhållandet mellan tvärkraftsmodulen G , RMV och CMV. [15]
- Figur 2.13 De excentriska vikterna inne i trumman som skapar oscillation. [8]
- Figur 2.14 Kraftdeformationsdiagram där packningsenergin är markerad. [17]
- Figur 2.15 Förhållandet mellan jordens reaktionskraft, markförskjutningen och E-modulen. [16]
- Figur 2.16 De excentriska vikterna inne i trumman på en Variocontrol vält som skapar riktad oscillation. [18]
- Figur 2.17 Packningsresultat från en konventionell vält jämfört med en Variocontrol vält. [18]
- Figur 3.1. Etappens placering i Skandiahavnen.
- Figur 3.2 Tunga fallvikten som användes vid examensarbetet.
- Figur 3.3 Hammvälten som användes vid examensarbetet.

- Figur 3.4 Dynapacvälten som användes vid examensarbetet.
- Figur 3.5 Statisk plattbelastningsförsök med Dynapacvälten som motvikt.
- Figur 4.1 Undergrundsmodulerna för den östra delen av etappytan, den gröna färgen visar var ytan är hårt packad.
- Figur 4.2 Jämförelse mellan CMV och HMV.
- Figur 4.3 CMV-värden för befintlig yta på Etapp 11. Mätningarna är utförda med 35 Hz och låg amplitud.
- Figur 4.4 HMV-värden för befintlig yta på Etapp 11. Mätningarna är utförda med 35 Hz och låg amplitud.
- Figur 4.5 HMV-värden för befintlig yta på Etapp 11. Mätningarna är utförda med 27 Hz och hög amplitud.
- Figur 5.1 E_{v2} -, CMV- och HMV-värden i en längdsektion.
- Figur 5.2 Kalibrering mellan SPB och CMV.
- Figur 5.3 Kalibrering mellan SPB och HMV.
- Figur 5.4 Krav på bärlighet för befintlig yta. $E_{v2}=163$ MPa ger $HMV=58.9$ MPa.
- Figur 5.5 Etappens uppdelning då kravet på bärlighet har fastställts. Den rödfärgade delen av ytan uppfyller inte bärlighetskravet.
- Figur 5.6 Jämförelse mellan CMV och HMV.
- Figur 5.7 Etappens uppdelning då kravet på HMV har fastställts. Den rödfärgade delen av ytan uppfyller inte bärlighetskravet.
- Figur 5.8 Etappens uppdelning då kravet på CMV har fastställts. Den rödfärgade delen av ytan uppfyller inte bärlighetskravet.
- Figur 5.9 Jämförelse mellan YPK och $E(2)$ i elva punkter.
- Figur 5.10 Kalibrering mellan $E(2)$ och HMV.
- Figur 5.11 Kalibrering mellan $E(2)$ och CMV.
- Tabeller**
- Tabell 2.1 Sättningar och normalspänningar för olika diametrar på belastningsplattan. [5]
- Tabell 4.1 Lagermoduler för det mellersta lagret i de undersökta punkterna.
- Tabell 4.2 E_{v2} -värden i de undersökta punkterna på befintlig yta.
- Tabell 4.3 E_{v2} -värden i de undersökta punkterna på nyutlagt bärlager.

- Tabell 4.4 E_{v2}/E_{v1} i de undersökta punkterna på nyutlagt bärlager.
- Tabell 4.5 Uppmätta värden på asfaltstjocklek, tjockleken på bärlagret, tjockleken på förstärkningslagret samt terrassytan för de olika provgröparna.
- Tabell 5.1 E_{v2} -värden på bärlagret samt motsvarande värden på förstärkningslagret.

Viktiga beteckningar

CMV	Compaction Meter Value (Dynapacs och Geodynamiks mått på bärighet)
DCA	Dynapac Compaction Analyzer (Dynapacs mjukvara för analys av mätdata)
E(2)	Lagermodul som fås från tung fallviktsförsök
E_{v1}	Deformationsmodulen vid plastisk deformation (första belastningscykeln)
E_{v2}	Deformationsmodulen vid elastisk deformation (andra belastningscykeln)
E_{v2}/ E_{v1}	Bärighetskvot
E_{vib}	Vibrationsmodul (Bomags mått på bärighet)
HCN	Hamm Compaction Navigator (Hamms mjukvara för analys av mätdata)
FWD	Tung fallvikt
HMV	Hamm Meter Value (Hamms mått på bärighet)
k_s	Ammanns mått på bärighet
RMV	Mått som indikerar när dubbelslag inträffar
R	Korrelationskoefficient som erhöles vid en regressionsanalys
R^2	Korrelationsdeterminant som erhöles vid en regressionsanalys
YPK	Yttäckande packningskontroll
SPB	Statisk plattbelastning

1 Inledning

Göteborgs Hamn har planer på att expandera till en ännu större oceanhamn, vilket medför att större godsmängder kommer att hanteras. Denna ökning av godsomsättningen innebär att förstärkningsåtgärder måste vidtas för att klara av framtida lastökningar vid användning av större maskiner. Hantering av gods i Skandiahavet görs med grensletruckar som har en totalvikt på cirka 100 ton, lasten är fördelad på fyra axlar. Detta skall sättas i relation till en standardaxel på 10 ton som dimensioneringen i vanliga fall sker efter. De standarder som används för dimensionering fås från ATB Väg, Bro 2002 samt Anläggnings AMA. Eftersom den tunga trafiken inom området till stor del kör i samma spår, är det mycket viktigt att materialet som används i de olika lagren packas optimalt för att sättningar samt spårbildningen skall kunna minimeras.

1.1 Syfte

Syftet med examensarbetet är:

- Att beskriva vilka parametrar som väkten mäter. Beskriva hur bärighetsparametrarna som de olika välttillverkarna använder (HMV, CMV, E_{vib} , k_s) fås från vältförsöken och hur dessa kan användas för förbättring av bärigheten hos överbyggnaden.
- Att utföra försök med olika vältar och därefter jämföra tillförlitligheten i de olika vältarnas resultat med resultaten från tung fallvikt samt statisk plattbelastning. Efter försöken görs en selektiv utgrävning för att se hur bra resultaten stämmer med verkligheten.
- Att undersöka om information som hämtas från ett YPK-vältförsök kan användas som underlag för anpassade förstärkningsåtgärder av befintliga konstruktioner i Göteborgs Hamn.

1.2 Avgränsning

- Detta examensarbete beaktar endast etapp 11 inom hamnområdet (bilaga 1).
- Två vibrerande vältar har använts vid en yttäckande packningskontroll: en Dynapac CA 302 och en Hamm 3516.
- För att jämföra värdena från de olika provmetoderna har regressionsanalys används. Vid regressionsanalysen har CMV, HMV från yttäckande packningskontrollen plottas mot E_{v2} från statistiska plattbelastningsförsöken. Vid en regressionsanalys mellan statisk plattbelastning och tung fallvikt har E_{v2} plottas mot $E(2)$.

1.3 Metod

Information för utförandet av examensarbetet har inhämtas genom möten, intervjuer med sakkunniga, studier av litteratur utgivna av olika välttillverkare samt fältarbete som har utförts inom hamnområdet.

Utvärdering av mätresultat från statisk plattbelastning, tung fallvikt samt ytpackningskontroll har skett i programvaran Excel 2003. För att analysera mätdata från vältens dator i windows miljö användes Dynapacs DCA (Dynapac Compaction Analyzer) 1.0 respektive Hamms HCN (Hamm Compaction Navigator). För analys av tung fallviktsdata har MS-DOS baserade programvaran Clevercalc använts.

2 Metoder för mätning av bärighet

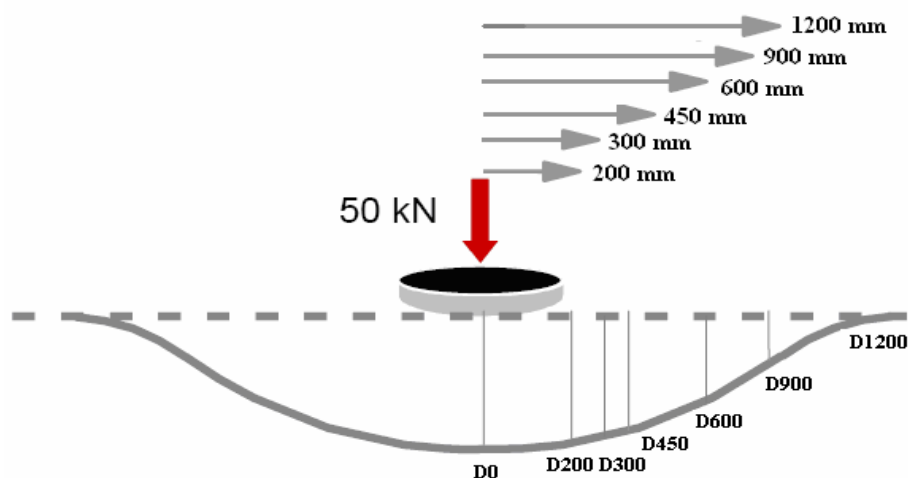
Enligt Vägverket definieras bärighet som ett mått på den högsta lasten, enstaka eller ackumulerad, som kan accepteras med hänsyn till uppkomst av sprickor eller deformationer.

Inventering av befintliga ytors bärighet kan göras med en rad olika metoder, dock har inventering med några metoder i Göteborgs Hamn i ett tidigare examensarbete (Maria Rimstedt: Uppföljning av bärighet och deformationutveckling av terminalytor vid inventering och nybyggnad i Göteborgs Hamn) visat sig ej vara helt korrekta på grund av brister i positionsbestämningen. Detta examensarbete lägger därför störst tyngd på bärighetsmätning med yttäckande packningskontroll (YPK). Nedan beskrivs i detalj vilka parametrar välten tar hänsyn till och vad exakt det är som välten mäter. Som komplement till yttäckande packningskontroll har undersökningar gjorts med tung fallvikt (FWD) och statisk plattbelastning (SPB) och förklaras kortfattat nedan.

2.1 Tung fallvikt (FWD)

Syftet med fallviktsförsöket är att simulera den deformation som åstadkommes av ett tungt fordon. En fallvikt är en mobil enhet monterad på ett släp och som dras efter en personbil. Det finns även enstaka utrustningar som är monterade i skåpbilar. Enligt VTIs standard simulerar fallvikten en last på 50 kN. [1]

Fallvikten består av en vikt som får falla på ett fjädersystem som är monterat över en belastningsplatta. Belastningsplattan överför kraftpulsens som genereras av systemet till marken. Belastningsplattan är fyrdelad och har en diameter på 30 cm. Anledningen till att den är delad är för att fallviktsförsök skall vara möjliga på ytor som inte är plana. Den belastning som fallvikten skapar beror på fyra faktorer: viktens massa, fjäderssystemets egenskaper, fallhöjden samt väggkroppens styvhet. Fallvikten belastar plattan i cirka 30 ms. Därefter mäts den deflektion (deflektionen definieras som vägytans momentana nedböjning under dynamisk last) som fallvikten skapar av sensorer som är placerade i belastningsplattans centrum samt 200, 300, 450, 600, 900 och 1200 mm från centrumet.



Figur 2.1 Fallvikten skapar en deflektion som mäts från 200, 300, 450, 600, 900 och 1200 mm från belastningsplattans centrum. [2]

Ytans deflektion i belastningscentrum är beroende av hur alla lagren samverkar. När avståndet ökar från belastningscentrum är det förhållandet mellan underbyggnad och undergrund som styr deflektionens storlek. Skillnaden mellan centrumdeflektionen och deflektionen närmast vid sidan av belastningsplattan påverkas i huvudsak av de översta lagren. De faktorer som påverkar hur stor deflektionen blir är beroende av de underliggande materialens styvhet samt tjocklek. [2] Vid fallviktsförsöken mäts även lufttemperaturen, beläggnings yttemperatur och inre temperatur. Med hjälp av erhållna mätresultat kan vägens styvhetsegenskaper bestämmas.

Vid beräkning av styvhetsegenskaper antas underlaget bestå av ett homogent, isotropt och linjärelastiskt lager. Följande är några enkla bärighetsmått:

- 1.) **Ytmodul och medelmodul** - modulerna som beskriver ytans styvhet.
- 2.) **Uppskattad undergrundmodul** - den genomsnittliga E-modulen för lagret mellan överbyggnadens underkant och ett oändligt tjockt fiktivt styvt lager i undergrunden.
- 3.) **Surface Curvature Index ”SCI”** - ett mått på styvheten av den övre delen av konstruktionen som kan användas för en relativ jämförelse.
- 4.) **Uppskattad asfalttöjning** - horisontell dragtöjning i underkant av beläggningsytan som är ett mått på risken för utmattningsprickor i underkant av beläggningsytan.
- 5.) **Krökningsradie** – krökningsradien i centrum på beläggningsytan är ett bärighetsmått som kan användas för en relativ jämförelse.

Resultaten från fallviktsförsöken kan användas [3]:

- som underlag för bärighetsklassning
- som underlag för utformning av belastningsrestriktioner
- för att prognosticera tillståndsförändringen
- för planering av strukturella åtgärder
- för utvärdering av genomförda åtgärders uppnådda effekter

2.2 Statisk plattbelastning (SPB)

Statisk plattbelastningen är en beprövad metod för att bestämma underlagets elasticitets- och deformationsegenskaper. Metoden har sedan länge använts i Tyskland, Schweiz och Österrike. Metoden började användas i Sverige i samband med att den infördes i VÄG 94 som krav för terrassytor och obundna överbyggnadslager. Utrustningen som krävs för att utföra ett statiskt plattbelastningsförsök är [4]:

- Ett belastningsmothåll. Belastningsmothållet skall vara 4,5 ton tyngre än den för försöket nödvändiga högsta provlasten (Vid försöken i examensarbetet användes Dynapacvälten).
- Belastningsutrustning bestående av lastplatta, tryckutrustning med oljepress, hydraulpress och högtrycksslang.
- Anordning för kraftmätning och mätning av sättning
- Dator eller fickräknare med program för utjämningsberäkning

Moderna apparaturer har en mätklocka samt en fältdator som registrerar värdena, detta innebär att resultaten inte går att manipulera.

Syftet med att utföra ett statiskt plattbelastningsförsök är att fastställa jord- eller vägöverbyggnadens deformationsmodul och packningskriterium. Försök med statisk plattbelastning sker genom att en platta med diametern 30 cm utsätts för en belastningsökning till en viss sättning eller normalspänning uppnåtts. Sättningen och normalspänningen är beroende av belastningsplattans diameter och skall vara i storleksordningen enligt tabell 2.1.

Tabell 2.1 Sättningar och normalspänningar för olika diametrar på belastningsplattan. [5]

Diameter mm	Sättning mm	Normalspänning MN/m ²
300	5	0,5
600	7	0,25
720	13	0,20

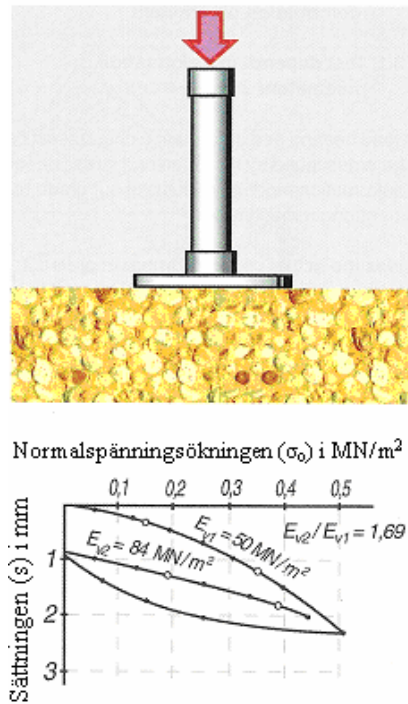
I länder som Tyskland, Finland, Norge och Sverige är en belastningsplatta på 30 cm standard. I till exempel Danmark används plattor av varierande diametrar beroende på mätobjektet (30, 40, 45, 60 eller 76 cm).

Belastningen av plattan skall ske i sju steg, nämligen 0,08-0,16-0,24-0,32-0,40-0,45 och 0,50 MPa. De första två stegen skall ligga på i 2 minuter och de följande stegen skall ligga på i 1 minut eller tills sättningshastigheten är noll. För varje lastökning registreras deformationen.

Efter att ha samlat in data från försöken kan deformationsmodulerna för två belastningscykler (E_{v2} och E_{v1}) samt bärighetskvoten (E_{v2}/E_{v1}) beräknas. E_{v1} fås ifrån den första belastningscykeln då plastisk deformation uppkommer. En plastisk deformation definieras som en permanent deformation. E_{v1} används vid till exempel beräkning av sättningar som uppkommer vid grundläggning av byggnader på den provade ytan.

E_{v2} fås ifrån den andra belastningscykeln då elastisk deformation uppkommer. En elastisk deformation definieras som en deformation med återfjädring. E_{v2} används vid dimensionering av vägöverbyggnader för trafiklast. Kvoten E_{v2}/E_{v1} är ett mått på packningsgrad. En hög kvot innebär att materialet är dåligt packat och en låg kvot innebär att materialet är väl packat. [6]

E_{v2} och E_{v1} fås genom att plotta sättningen (s) mot normalspänningökningen (σ_o) för respektive serie i ett tidsättningsdiagram.



Figur 2.2 En principskiss på en statisk plattbelastnings apparatur samt ett tidssättningsdiagram. [7]

Därefter beräknas E_v -värdena utifrån trycksättningslinjen. Trycksättningslinjen bestäms enligt följande formel:

$$S = a_0 + a_1 \sigma_0 + a_2 \sigma_0^2 \quad (2.1)$$

där s = nedböjningen i belastningsplattans centrum [mm]

σ_0 = medelnormalspänningen under plattan [MPa]

a_0, a_1, a_2 = konstanter som bestäms med minsta kvadratmetoden [-]

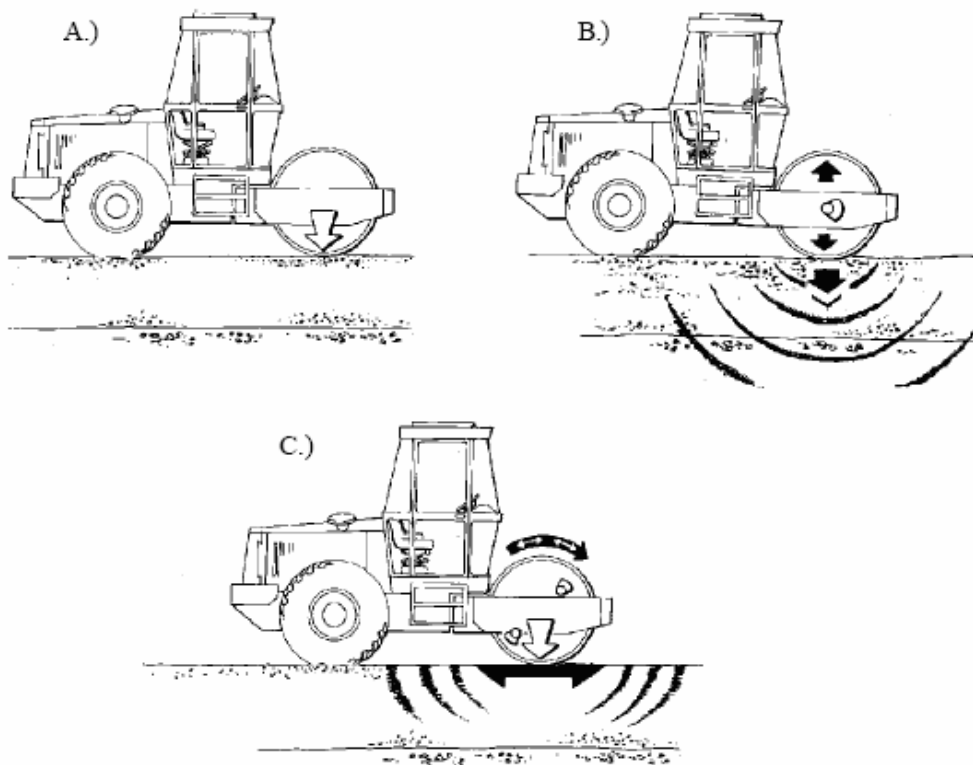
$$E_v = \frac{1,5 * r}{a_1 + a_2 * \sigma_{1,max}} \quad (2.2)$$

där r = belastningsplattans radie [mm]

$\sigma_{1,max}$ = maximal medelnormalspänningen vid första belastningen [MPa]

2.3 Yttäckande packningskontroll, vältmonterad packningsmätare (YPK)

För att få en helhetsbild av underlagets elasticitetsegenskaper är yttäckande packningskontroll (YPK), även kallad vältmonterad packningsmätare, en praktisk provmetod. Yttäckande packningskontroll görs med hjälp av en vibrationsvält eller en oscillerande vält. Det tre olika välttyperna är: (i) statisk vält som packar med enbart sin tyngd (ii) vibrerade vält, där vibration skapas av en massa som roterar inuti trumman och ger en upp- och nergående rörelse, samt (iii) oscillerande vält där två roterande centralaxlar ger välten en alternerande fram och tillbaka rörelse.



Figur 2.3 Statisk vält (A), vibrerande vält (B) och en oscillerande vält (C). [8]

När en yttäckande packningskontroll görs med hjälp av en vält registrerar vältens packningsgraden hos obundna jord- och bergmaterial. Vältens trumma innehåller en excentrisk vikt som under packningsarbetet sätter trumman i svängning. När trumman är i svängning sker ett energiutbyte mellan marken och trumman. Detta energiutbyte är ett mått på underlagrets motstånd (även kallade respons) och mäts kontinuerligt av en sensor som är monterad på trumlagret. Sensorn kallas för accelerometer. Accelerometern i sin tur omvandlar denna respons till ett tal. De olika välttillverkarna dokumenterar bärighet på olika sätt. Till exempel har Dynapac CMV (Compaction Meter Value), Hamm har HMV (Hamm Meter Value) och Bomag har E_{vib} (Vibrationsmodulen).

För dokumentering av packningsgraden finns en rad olika system. När YPK lanserades 1978 av Dynapac i samarbete med Geodynamik fanns endast ett enkelt system att dokumentera CMV värdet på en visartavla i välten. På senare år har dokumentation av packningsgraden blivit allt mer datoriserad. I moderna vältar har föraren numera en datorskärm framför sig, som visar hela packningsytan med ett antal parallella vältstråk. På skärmen visas grafiskt resultaten av packningen på olika delar av ytan. Moderna vältar är dessutom utrustade med GPS (global positioning satellite) eller dGPS (differential global positioning satellite). Fördelen med dGPS är att vältföraren skall slippa att köra i raka spår eftersom föraren med dGPS har möjlighet att få en exakt bild av var han kört. [6]

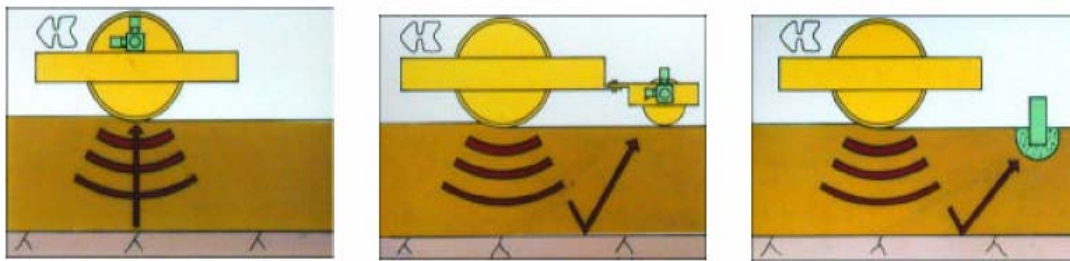
2.3.1 Första försöken med YPK

Vid packning av jord utsätter vältens trumma jorden för slag, i vanliga fall ett slag per rotation. Jordens reaktionskraft från slagen från trumman kan användas som ett mått på jordens bärighet.

För att fastställa ett samband mellan trumslagets kraft och jordens bärighet har olika fältförsök utförts.

De olika fältförsöken som utförts var: [8]

- Vältens trumma utrustades med en triaxial accelerometer. En triaxial accelerometer mäter trummans rörelse i x, y och z -led.
- Välten utrustades med en minivält som släpades efter den packande välten, för att registrerar vibrationer orsakade av den packande välten.
- Triaxial geofoner grävdes ner i marken för att mäta markvibrationen som packningsvälten orsakar.

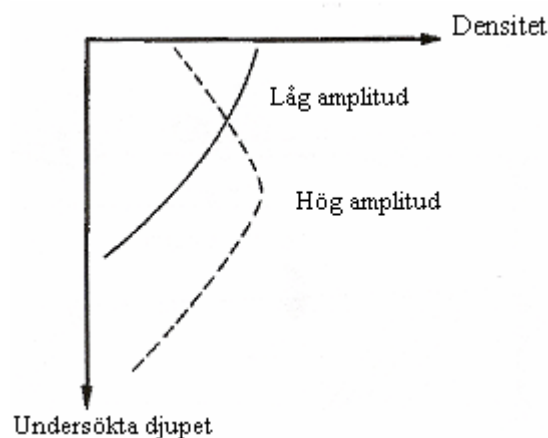


Figur 2.4 Fältförsöken som utförts. [8]

Data från försöken analyserades och resultaten visade att grundens bärighet ökade med varje vältöverfart. Grundens bärighet efter en vältöverfart mättes med en punktmetod (punktmetoder är till exempel statisk plattbelastning, tung fallvikt, lätt fallvikt). Efter försök med punktmetod kunde det fastställas att packningsgraden var beroende av amplitud och kan sammanfattas på följande sätt:

Lägre amplitud => Mindre packningsgrad => Undersökta djupet minskar

Högre Amplitud => Större packningsgrad => Undersökta djupet ökar

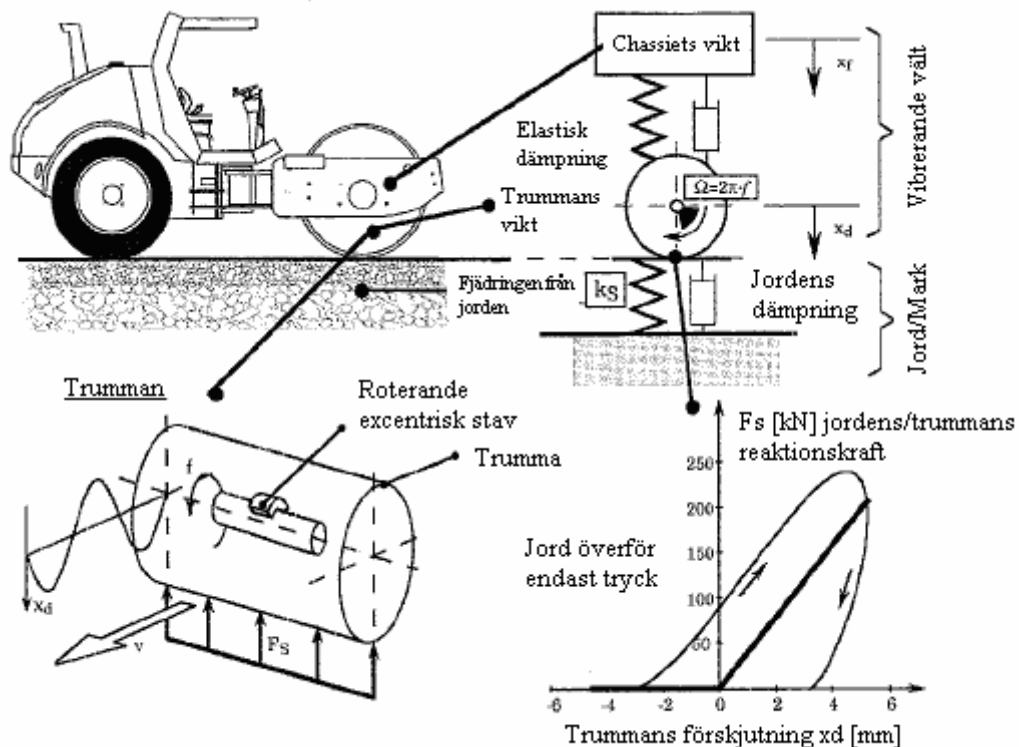


Figur 2.5 Förhållandet mellan undersökta djupet, jordens densitet samt undersökta djupet. [9]

2.3.2 Vilka krafter verkar på jorden och välten

Följande information är hämtad från referens [10].

För att kunna räkna ut en bärighetsparameter måste hänsyn tas till hur välten och marken samverkar. Figur 2.6 visar en vält med en trumma på ett obundet material med grundläggande vält och jordparametrar, som krävs för att räkna ut trummans rörelse. Vältens vikt består av motorns vikt, förarhyttens vikt, vikten av vältens chassi samt trummans vikt. Välten stöds av trumman. Stödet från trumman beror på markens styvhet samt dämpningen från marken.



Figur 2.6 Oanalytisk modell av vält-jord systemet. [10]

Vältens trumma med massan m_d innehåller en roterande obalanserad massa, som genererar tillsammans med marken en frekvens f . Som ett antagande kan marken modelleras som en fjäder med styvheten k_s med en viskös dämpare kopplat parallellt med dämpningskonstanten c_s . Tillsammans med trumman bildas ett fjäder-massavibrationssystem. Systemet förklarar trummans rörelse. Markens styvhet ökar med varje vältöverfart och dämpningen minskar. Med konstanta maskinparametrar varierar därför vibrationen hos systemet. Styvhetsparametern har använts som ett mått på markens bärighet vid ytpackningskontroll.

Marken och trummans samverkningskraft (F_s) kan skrivas som:

$$F_s = -m_d \ddot{x}_d + m_e r_e \Omega^2 \cos(\Omega * t) + k_t (x_d - x_f) + c_t (\dot{x}_d - \dot{x}_f) + m_d * g \quad (2.3)$$

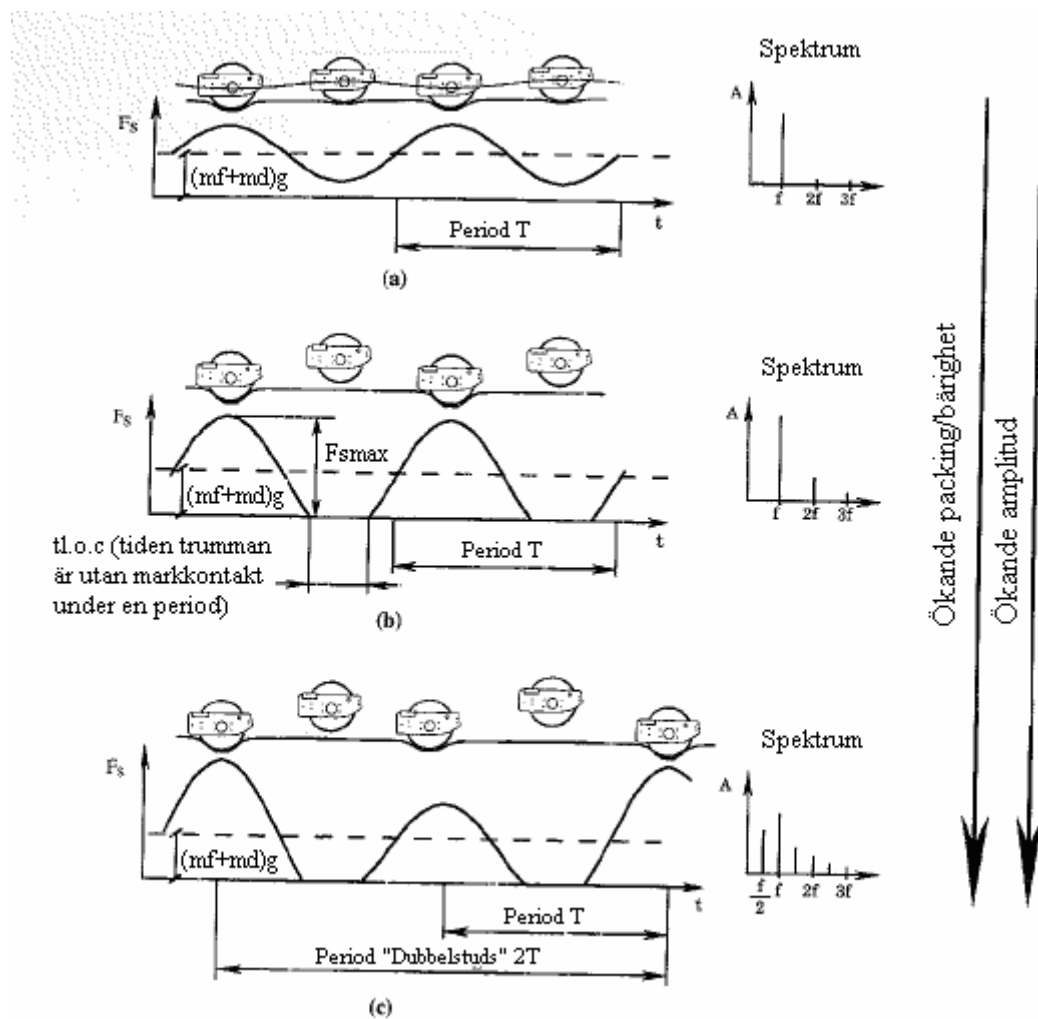
där

m_d = trummans vikt (kg),

f = frekvensen som trumman tillsammans med marken genererar (Hz),

m_f = chassiets vikt (kg),
 Ω = vinkelfrekvensen ($\Omega = 2\pi f = 2\pi/T$, där är svängningsperioden) (Hz),
 $m_e r_e$ = excentriska momentet av obalanserade massan (kgm),
 x_d = trummans förskjutning
 k_s = markens styvhet (MN/m),
 x_f = chassiets förskjutning
 c_s = dämpningen från marken (MN/m)
 k_t = upphängningens styvhet (MN/m)
 c_t = upphängningens dämpning (MN/m)
 t = tiden
 g = tyngdkraftsaccelerationen ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Trummans rörelse beror på jordens tillstånd och storleken på jordens motkraft, som orsakar att trumman lyfter från marken med periodiska intervaller. Dessa intervall syns i figur 2.7.



Figur 2.7 Tre olika typer av dynamisk rörelse av en vibrationstrumma. a) kontakt med marken hela tiden, b) trumman förlorar kontakt med marken ibland c) dubbelstuds. [10]

Figur 2.7a visar att trummans rörelse är linjär och att trumman hela tiden har kontakt med marken. Trumman uppför sig på detta sätt när jorden inte är packad. Vibrationen

är stabil och det sker ingen förändring i trummans rotation. Kurvans form är symmetrisk och detta beror på att trumman lyfter vid samma tidpunkt under rotationscykeln. Trumman slår på marken med en viss vinkel och vibration som medför en uppåt riktad acceleration.

Figur 2.7b visar att trummans rörelse är olinjär, beroende på att den ibland förlorar kontakten med marken. I detta fall börjar marken bli hårt packad.

Figur 2.7c illustrerar trummans tillstånd vid dubbelstuds. Dubbelstuds förekommer då jorden är väldigt hårt packad. Kurvan beskriver trummans acceleration och hastighet när dubbelstuds inträffar. Dubbelstuds innebär att trumman slår i marken väldigt hårt varannan rotation, trumman snurrar ett helt varv i luften innan den slår i marken igen. Vid dubbelstuds fås en högre amplitud och lägre frekvens, dock är vibrationen stabil. Dubbelstuds är inte önskvärd av ett antal anledningar. För det första innebär tyngre slag mot marken upplösningen av det packade materialet. För det andra kommer trummans vibration att bli hälften så stor, men däremot kommer amplituden att bli mycket stor. Detta innebär höga buller- och vibrationsnivåer inne i förarkabinen.

Till höger om sinuskurvan i figurerna 2.7a-2.7c syns spektret som beskriver Fourier-serien. Fourier-serien är en variant av Fourier-transformationen som gäller för funktioner som endast är definierade för en period (T). En kontinuerlig periodisk funktion kan skrivas som summan av ett antal sinusfunktioner med varierande amplitud. Varje sinusfunktion har en heltalsmultipel (en multipel eller heltalsmultipel av ett tal t är ett tal sådant att det kan skrivas som $t \cdot n$ för något heltal n .) av den lägsta frekvensen i den periodiska funktionen, $1/T$ eller f (grundtonen) som syns i spektret. Tillsammans med grundtonen förekommer det en överton. Det som skiljer grundtonen och övertonen åt är att övertonen har en högre frekvens. När övertonen är harmonisk innebär det att frekvensen är en jämn multipel av grundtonen, ($2f$, $3f$ och så vidare).

Trummans totala förskjutning kan förklaras med formeln:

$$x_d = \sum_i A_i \cos(i\Omega * t - \varphi_i) \quad (2.4)$$

där

A_i = amplituden vid frekvensen if

φ_i = vinkeln mot horisontalplanet som trumman slår ner i marken med.

Beroende på underlagrets tillstånd varierar i , notera spektrumet i figur 2.7.

Vid linjär svängning (Figur 2.7a) är $i=1$

Vid olinjär svängning (Figur 2.7b) är $i=1,2,3$

Vid dubbelstuds oharmonisk svängning (Figur 2.7c) är $i=1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, 3$

Olinjär svängning orsakad av att trumman förlorar kontakt med marken kan förklaras som en funktion av jordens reaktionskraft.

$$\frac{1}{2T} \int_0^{2T} F_s(t) dt = (m_f + m_d) * g \quad (2.5)$$

Integration av formel 2.5 sker över två vibrationsperioder. Dessutom har det antagits att jordreaktionskraften F_s har en sinusform som ger det analytiska sambandet mellan den tiden då trumman är utan markkontakt under en period ($t_{l.o.c.}$) och den maximala reaktionskraften.

$$\frac{F_s|_{\max}}{(m_f + m_d) * g} = \pi \frac{1 + \cos\left(\frac{t_{l.o.c.}}{T} * \pi\right)}{\left(1 - \frac{t_{l.o.c.}}{T}\right) * \pi * \cos\left(\frac{t_{l.o.c.}}{T} * \pi\right) + \sin\left(\frac{t_{l.o.c.}}{T} * \pi\right)} \quad (2.6)$$

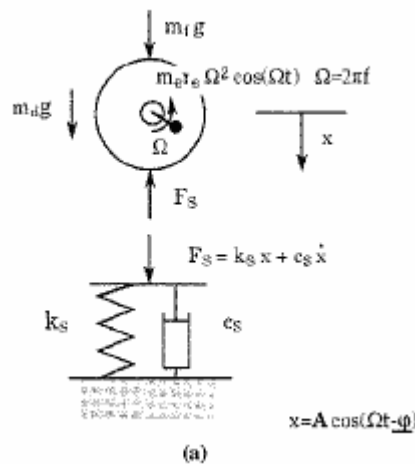
$F_s|_{\max}$ är den maximala samverkningskraften mellan jord och trumma under en period. Om ingen hänsyn till dynamiska kraften orsakad av chassiets elastiska upphängning och endast hänsyn tas till chassiets statiska last kan formeln 2.6 förenklas till:

$$F_s = \underbrace{(m_f + m_d)g}_{F_{stat}} + \underbrace{m_e r_e \Omega^2 \cos(\Omega t)}_{F_{centri}} - \underbrace{m_d \ddot{x}}_{F_{acc}} \quad (2.7)$$

Denna sistnämnda formel används vid de olika modellerna för beräkning av bärighet.

Formel 2.7 visar att jordens reaktionskraft är summan av kraften orsakad av den statiska kraften (F_{stat}), trummans centrifugalkraft (F_{centri}) och kraften orsakad av trummans acceleration (F_{acc}). De olika välttillverkarna har olika mått på bärighet (Dynapac har CMV, Hamm har HMV, Bomag har E_{vib} och Ammann har k_s) dock använder alla välttillverkarna formel 2.7 i sina beräkningar.

Figur 2.8 visar vilka krafter som samverkar mellan vältens trumma och marken.



Figur 2.8 En förenklad bild på de krafterna som verkar på vältens trumma. [10]

Med hjälp av formel 2.7 kan följande slutsatser dras:

- Välden har permanent kontakt med marken om $F_s|_{\max} \leq 2 (m_f + m_d) g$
- Välden har ingen kontakt med marken om $F_s|_{\max} > 2 (m_f + m_d) g$

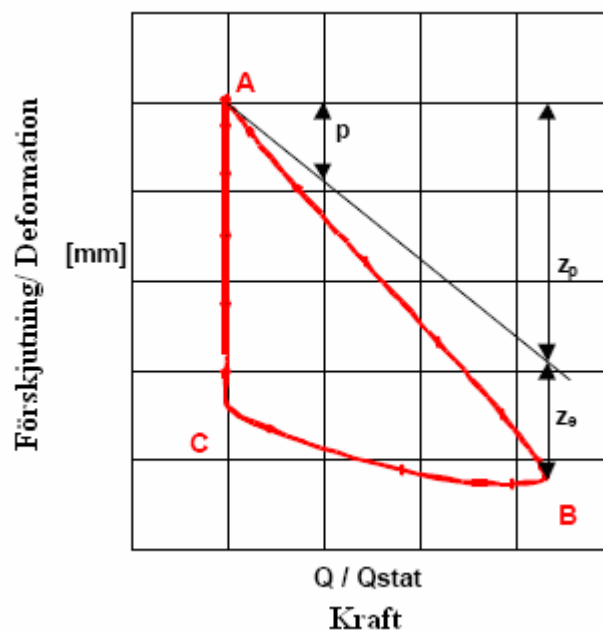
2.3.3 Kraftdeformationsdiagram

När kraften som marken utsätts för är känd plottas den mot förskjutningen (\ddot{x}) och resultatet av detta är ett kraftförskjutningsdiagram figur 2.9.

Mellan punkt A och B i figur 2.9, ökas belastningen från trumman, deformationen som trumman orsakar består av plastisk och elastisk deformation. Jordens plastiska deformation är enbart beroende på statiska lasten. Däremot är elastiska deformationen vid belastning av trumman beroende på lagertjockleken och egenskaperna av lagren under kontaktytan.

Vid maxlast är plastiska deformationen Z_p och elastiska deformationen Z_e . Avlastningsfasen sker mellan B och C och under denna fas får trumman en fjädring från marken och då återförs enbart elastisk energi och ingen plastisk energi. Plastiska energin förloras på grund av strålning och viskositet. En viss del av plastiska energin bidrar till jordpackningen, om inte plastiska energin upptas bidrar det till återupplösning av jorden i kontaktytan mellan trumman och jorden.

Mellan punkt C och A har trumman fått en återfjädring från marken och befinner sig i luften. [11]



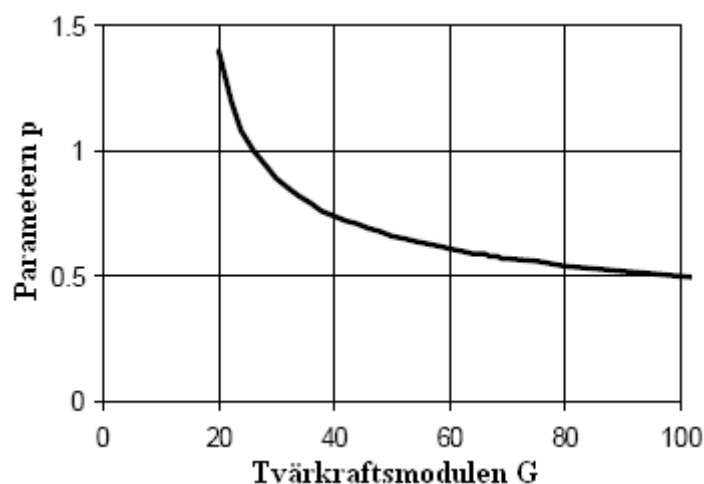
Figur 2.9 Kraftdeformationsdiagrammet visar sambandet mellan vertikal lasten och deformationen under en vibrerande trumrotation. [11]

2.3.4 CMV och HMV

Kraftdeformationsdiagrammet (figur 2.9) visar svårigheterna i att bedöma jordstyvheten genom att enbart använda lastfasen A-B. En separering av plastisk och elastisk deformation måste därför göras. Separering görs genom att införa tvärkraftsmodulen G och parametern p som ger ett mått på jordens

plasticitetsegenskaper. Tvärkraftsmodulen kan uttryckas som cylindriska deformationsmodulen E_c .

Det finns ett visst samband mellan p och G . En löst packad jord som har ett lågt G värde kommer oftast att ha ett högt p värde och tvärtom. Ett typiskt samband mellan de två parametrarna syns i följande figur 2.10. Beroende på jordtyp kommer det att ske förändringar i diagrammet. Om det till exempel finns ett styvt lager på en svag undergrund kommer p att vara mindre än den i figur 2.10. [12]



Figur 2.10 Förhållandet mellan tvärkraftsmodulen G och parametern p (som är ett mått på jordens plasticitetsegenskaper). [12]

Om jorden inte är packad kommer trummans förskjutning att se ut som i figur 2.7a. Typiska G och p värden på jord som inte är packad är 35 MPa respektive 0,8 mm. När jorden är packad kommer trummans förskjutning att se ut som i figur 2.7b, och när jorden är extremt välpackad och om dubbelstuds inträffar kommer trummans förskjutning att se ut som i figur 2.7c. Typiska G och p värde på jord som är packad är 80 MPa respektive 0,5 mm

Jordreaktionskraften (F eller F_s som erhöles från formel 2.7) är proportionell mot vertikalacceleration av trumman. Förskjutningen (s eller \ddot{x}) vid ett trumslag kan approximeras med amplituden av dubbelintegralen av accelerationen. Av detta skäl kan cylindriska deformationen (E_c) uttryckas som förhållandet mellan kraft och förskjutningen som den ger upphov till.

$$E_c = c_1 * \frac{F}{s} \quad (2.8)$$

där

F = Jordreaktionskraften

s = Förskjutningen

c_1 = konstant

F/s är lutningen av kraftdeformationskurvans (figur 2.9) linjära del, mellan punkt A och B. Lutningen är relaterad till trummans grund- och överton. Därför kan cylindriska deformationen (E_c) skrivas om till:

$$E_c = c_2 * \frac{A_1}{(A_0 / \omega^2)} \quad (2.9)$$

där

$\omega = \Omega$ = grundläggande vinkelfrekvensen av vibrationen

A_0 = Accelerationsamplituden av grundläggande komponenten av vibrationen (grundtonen)

A_1 = Accelerationsamplituden av första harmoniska komponenten av vibrationen (första övertonen)

c_2 = konstant

Av detta fås formeln för CMV (Compaction Meter Value) som är:

$$CMV = 300 * \frac{A_1}{A_0} \quad (2.10)$$

där konstanterna har valts för att ge en skala av 100

E_c och CMV kan kalibreras med värden som har enheten MPa, bland annat E_{v2} , E_{v1} som fås från statiskt plattbelastningsförsök och E_{vd} som fås från lätt fallviktsförsök. Detta gäller om följande villkor är uppfyllda:

- Inga ingående parametrar får ändras.
- Beräkningsmetoderna måste ta hänsyn till plastiska deformationer.
- Hänsyn skall tas till vältens undersökningsdjup.

Lastytan från en trumma är ett rektangulärt område. Storleken på området beror på vältparametrar som till exempel statisk linjelast, trummans radie, vältens hastighet, trummans frekvens samt olika jord parametrar. [8] Nedan beskrivs kortfattat vilka parametrar som påverkar CMV.

Faktorer som påverkar CMV kan delas upp i två grupper. [13]

1. Maskinfaktorer

- **Frekvens.** Högre vibrationsfrekvens medför lägre CMV
- **Amplitud.** Lägre vibrationsamplitud medför lägre CMV
- **Hastighet.** Högre vältastighet medför lägre CMV
- **Anliggning.** Sämre anliggning av valsen mot underlaget medför lägre CMV
- **Körriktning.** Sämre anliggning av valsen medför lägre CMV
- **Dubbelstuds** ger lägre CMV

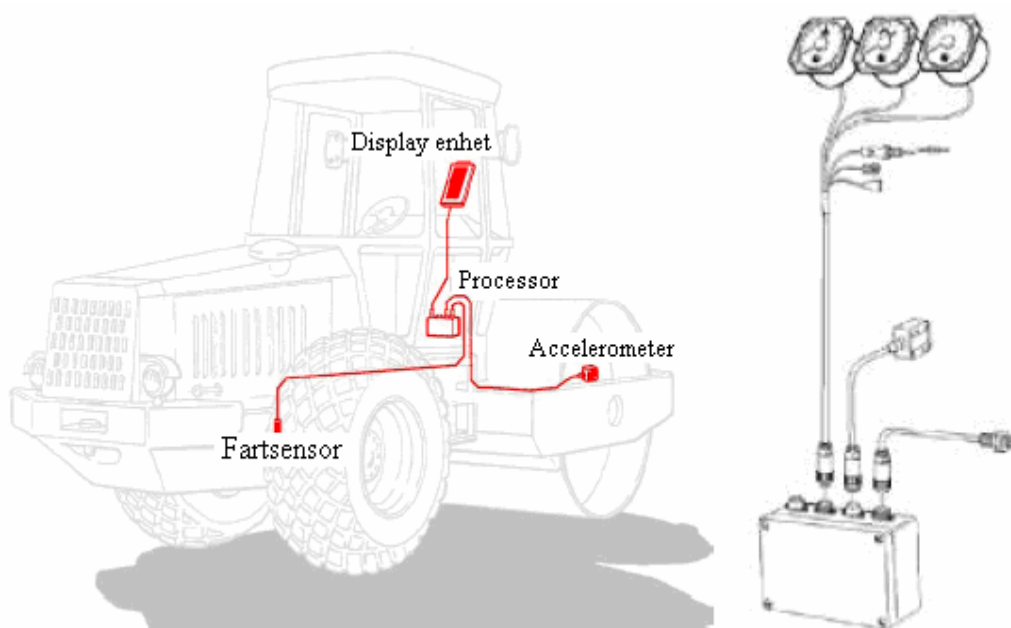
2. Underlagsfaktorer

- **Kornfördelning.** Är beroende på jordart. Grövre jordarter har högre styvhet än finkoriga som i sin tur medför ett högre CMV. Om materialet har en välgraderad kornfördelning ger det ett högre CMV än en ensgraderad.
- **Vattenkvot.** Vattenkvoten har stort inflytande på CMV. Desto finkornigare jordarten är desto mer påverkar vattenkvoten CMV. En

vattenkvot redan på 5-10 % har stor inverkan på ett finkornigt material. En vattenkvot > 15 % i finjordar har en väldigt stor inverkan på styvheten och därmed CMV.

- **Underlagrens fasthet.**

Figuren nedan visar de olika komponenterna som en packningsmätare består av. En accelerometer är placerad vertikalt på trummans lastplatta. Accelerometers signal analyseras av en processor och resultatet presenteras på en visartavla i vältens eller på en display. Även vältens hastighet registreras av en fartsensor. Packningsmätare har tre olika visartavlor. Dessa visar CMV, vibrationsfrekvensen samt Resonance Meter Value (RMV). RMV är ett mått på instabiliteten på vibrationen hos trumman och indikerar när och hur trumman får dubbelstuds. RMV värdet beräknas från accelerationssignalen och representerar halva amplituden av grundläggande frekvensen.



Figur 2.11 De olika komponenter en packningsmätare består av (en processor, en display, en accelerometer och en fartsensor). [14]

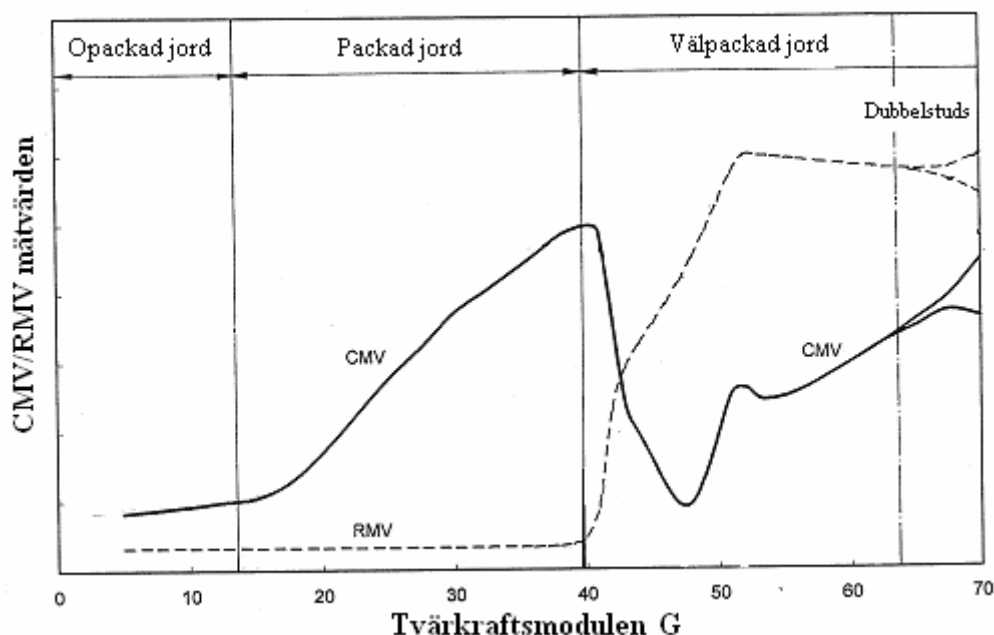
RMV fås av följande formel:

$$RMV = \frac{A_1}{A_0} (2.11)$$

$$A_{\frac{1}{2}} = \frac{\text{Halva trumfrekvensens amplitud}}{\text{trumfrekvensens amplitud}} \text{ (Halvtonen) } [19]$$

Nedan visas figur 2.12, där diagrammet beskriver hur CMV och RMV varierar när tvärkraftsmodulen G ökar. Som framgår av figuren ökar CMV tills att tvärkraftsmodulen är ungefär 40 MPa därefter minskar den tills att tvärkraftsmodulen är 45 MPa, för att sedan successivt öka igen. RMV är dock lågt fram tills tvärkraftsmodulen är 40 MPa, därefter ökar den fram tills att tvärkraftsmodulen är 55

MPa, efteråt minskar den något. Som diagrammet visar är RMV högt när tvärkraftsmodulen är hög och tvärkraftsmodulen är hög när jorden är välpackad. Därför kan slutsatsen dras att när jorden är välpackad ökar risken att välten ska få dubbelslag.



Figur 2.12 Förhållandet mellan tvärkraftsmodulen G, RMV och CMV. [15]

De finns en rad olika välttillverkare som har Geodynamiks och Dynapacs CMV som grund. Dessa välttillverkare är CAT, Hamm, Ingersoll Rand samt Sakai, dock har dessa olika tillverkare gjort små förändringar i CMV-formeln.

Till exempel har Hamm justerat formeln på följande sätt:

$$HMV = 300 * \frac{A_1 + A_3}{A_0} \quad (2.12)$$

där

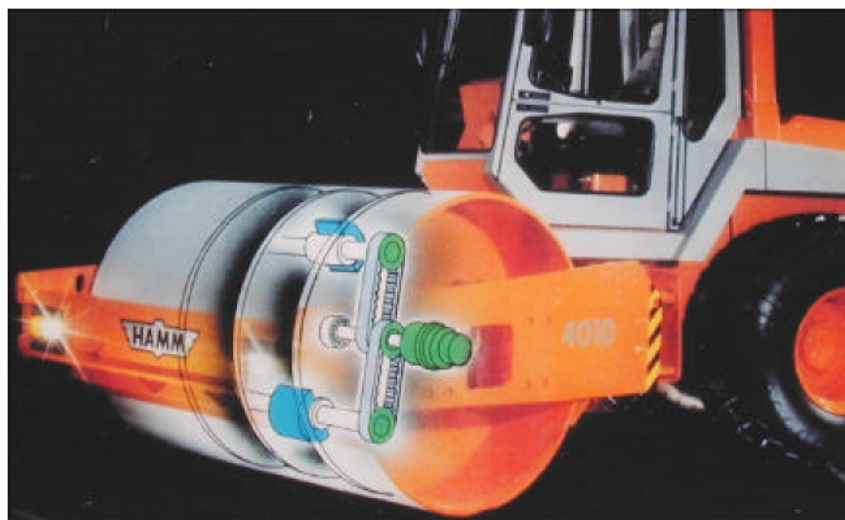
A_3 = Accelerationsamplituden av första harmoniska komponenten av vibration (tredje övertonen) [20]

Förändring har gjorts för att få patenträtt på värdet. Med patenträtten har tillverkarna också ändrat namn på vältmätarvärdet.

2.3.5 Oscillerande vältar

De första oscillerande vältarna kom för ungefär två årtionden sedan och utvecklades av Geodynamik i samband med vältföretaget Hamm. Som tidigare nämnts i kap 2.3 har en oscillerande vält två roterande centralaxlar som ger välten en alternerande fram och tillbaka rörelse. Oscillerande vältar används först och främst för att packa asfalt men oscillerande vältar tillverkas även för att packa jord.

Oscillerande vältar utsätter jorden för horisontala tvärkrafter tillsammans med en vertikal tryckkraft. Motsvarande CMV värde för denna typ av vält är OMV (oscillometer value). På en oscillerande vält installeras accelerometern horisontellt på trummans lastplatta istället för vertikalt. Detta är för att accelerometern skall mäta trummans horisontala acceleration. OMV värdet visas på samma sätt som CMV i förarhytten på en visartavla eller en display.



Figur 2.13 De excentriska vikterna inne i trumman som skapar oscillation. [8]

OMV erhålls från amplituden av horisontala accelerationen av trummans centrum. Värdet reflekterar horisontala kraften som påverkar marken. OMV är ett mått på horisontala styvheten hos jordens yta när en dynamisk last i form av en cylinder påförs. CMV mäter som tidigare nämnts ett rektangulärt område, som beror på olika parametrar.

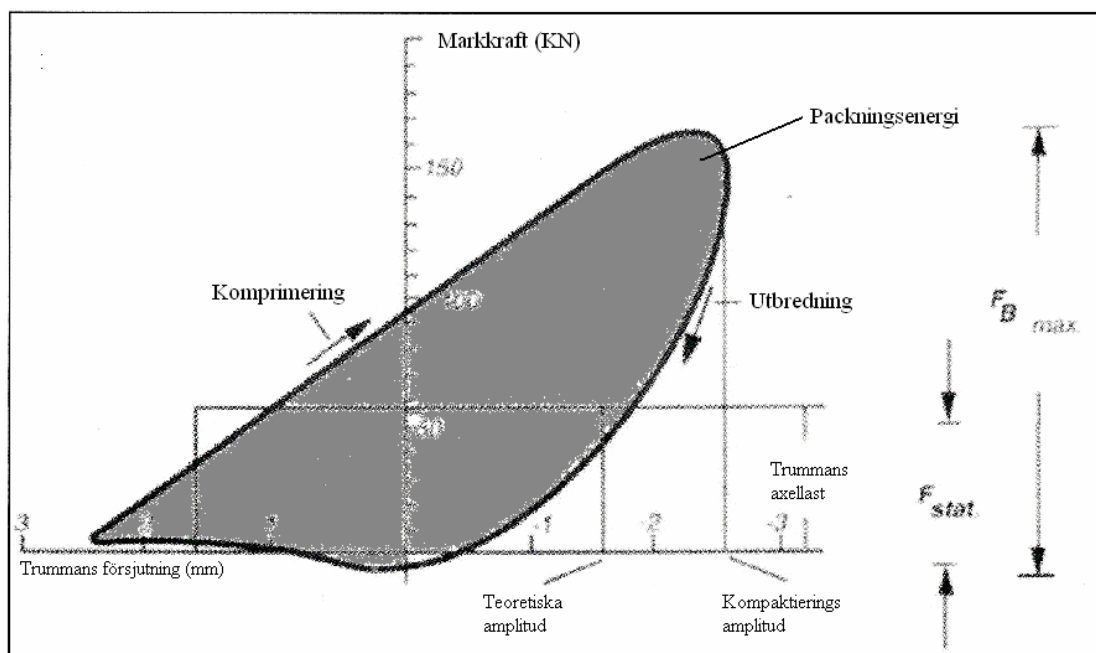
2.3.6 E_{vib}

Följande information är hämtad från referens [16].

Som tidigare nämnts kan en oscillerande eller en vibrerande vält användas för att bedöma bärigheten hos underliggande mark. Dock måste en kontroll i form av en kalibrering göras med deformationsmodulen E_v , som fås från någon konventionell metod, till exempel statisk plattbelastning eller lätt fallvikt.

För att kunna jämföra resultaten från vältens undersökning direkt med någon form av konventionell metod har vältföretaget Bomag tagit fram vibrationsmodulen E_{vib} . Vibrationsmodulen E_{vib} mäter sambandet mellan packningsenergin som vältens trumma utsätter marken för och kontaktytan mellan trumman och marken.

Packningsenergin från vältens trumma fås från kraftdeformationsdiagrammet. Markerade området i figur 2.14 representerar packningsenergin som transporteras ner till marken under en rotation av trumman. För förklaring av kurvan hänvisas till kap 2.3.3.



Figur 2.14 Kraftdeformationsdiagram där packningsenergin är markerad. [17]

När bärighet mäts med till exempel CMV tas ingen hänsyn till det markerade området (packningsenergin). Vid beräkning av CMV är kraft -försjutningsgradienten F/s , se formel 2.8, ett mått på styvhet. Detta innebär att komprimeringskurvan kommer att vara flack när jorden inte är packad. Vältens trumma får då mindre motstånd men kurvan blir brantare desto hårdare packad jorden är, vältens trumma får då mer motstånd.

Metoden har dock några nackdelar. Styvheten ökar med trummans bredd och diameter. Dessutom är metoden beroende av vibrationsmassan, vältens vikt, och obalanserade vikten.

Det kan sammanfattas att styvheten k är en fysisk godtagbar mätmetod, dock kan inte styvhetsvärdet som fås från en vält direkt jämföras med den från en annan vält på grund av att värdet varierar från en vält till en annan, beroende på de olika vältarnas fysiska parametrar.

Bomags metod för uppskattning av styvhet använder dock inte markstyvheten som grund. Den använder istället definitionen av E-modulen som grund. Nedan beskrivs proceduren för att få fram E_{vib} värden.

Som tidigare nämnts behövs inte E_{vib} kalibreras mot en deformationsmodul E_v som fås från någon konventionell mätmetod till exempel statisk plattbelastning eller lätt fallvikt. För att få en helhetsbild av E_{vib} , härleds först deformationsmodulen E_v .

Vid ett statisk plattbelastningsförsök belastas och avlastas en platta. Deformationsmodulen E_v fås från en eller fler belastningscyklar. Nedan är formeln för beräkning av markens deformation:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta s} = \frac{4 * G * r}{1 - \nu} \quad (2.13)$$

där

G = Tvärkraftsmodulen

r = Belastningsplattans radie.

ν = Poissons tal

Formeln 2.13 är baserad på sambandet mellan linjära, elastiska, isotropiska halv volymer och tar hänsyn till jordparametrar som G och ν .

Tvärkraftsmodulen G kan skrivas:

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)} \quad (2.14)$$

Skillnaden i markkontaktkraften kan skrivas:

$$\Delta F = \Delta \sigma * \pi * r^2 \quad (2.15)$$

Genom att insättning av formel 2.14 och 2.15 i 2.13 samt med följande förenkling:

$$(1 - \nu) * (1 + \nu) = 1 - \nu^2 \quad (2.16)$$

fås formeln för E-modulen:

$$E = \frac{\pi * (1 - \nu^2)}{2} * r * \frac{\Delta \sigma}{\Delta s} \quad (2.17)$$

I formeln 2.17 är $\frac{\pi * (1 - \nu^2)}{2} \approx 1.5$ därför kan formeln skrivas om till:

$$E_v = 1,5 * r * \frac{\Delta \sigma}{\Delta s} \quad (2.18)$$

För att få en mer detaljerad beskrivning av härledningen, se [21]

I verkligheten kan dock inte jord anses vara linjär, elastisk och isotropisk. Om detta skulle vara fallet skulle deformationsmodulen E_v konvergera mot E-modulen.

Vid jämförelse av E_v med bärighetsmättet som fås från välten måste hänsyn även tas till att E_v fås genom att belasta en cirkulärplatta och bärighetsmättet som fås från välten fås genom att belasta en liggande cylinder. Kontaktbredden mellan cylindern och marken kan beräknas genom att ta hänsyn till kraft, geometri, samt materialegenskaper. Detta kan göras med Lundbergs formel:

$$b = \sqrt{\frac{16 * R * (1 - \nu^2)}{\pi * E} * \frac{F_B}{l}} \quad (2.19)$$

Markförskjutning är beroende av kontaktbredden mellan cylindern och marken. När kontaktbredden mellan cylindern och marken är känd kan markförskjutning enligt Lundberg tecknas som:

$$\delta = \frac{1-\nu^2}{E} * \frac{F_B}{l} * \frac{2}{\pi} * (1,8864 + \ln \frac{l}{b}) \quad (2.20)$$

där 1.8864 är en konstant

b = Kontaktbredden mellan cylindern och marken

R = Trummans radie

ν = Poissons tal ($\approx 0,25$)

E = E-modulen

F_B = Markkontaktkraften

l = Trummans bredd

δ = Markförskjutningen

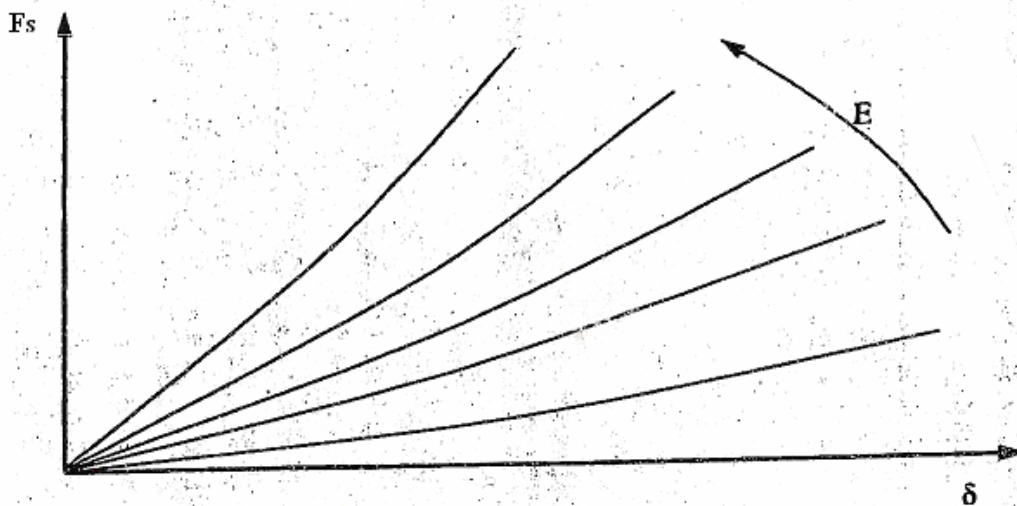
I ovanstående formler har följande antaganden/förenklingar gjorts:

- Trumman utsätter marken för en parabolisk last utmed kontaktytan
- Kontaktbredden måste vara mindre än trummans bredd
- Vältens trumma måste ha en något sfärisk form.

Sista antagandet kan tyckas vara självklart, dock ändras trummans form med tiden beroende på slitage. Trummans form varierar även från vält till vält beroende på trummans syfte.

När vältens geometri är känd (trummans radie, trummans bredd) kan dessa formler ge ett förhållande mellan markförskjutningen som funktion av markkontaktkraften och E-modulen.

Vid tillämpning av formlerna kan Poissons tal (ν) antas vara 0,25 och på grund av $(1-\nu^2)$ kan små förändringar i värdet försummas. Resultaten som fås från formlerna redovisas i nedanstående figur (figur 2.15).



Figur 2.15 Förhållandet mellan jordens reaktionskraft, markförskjutningen och E-modulen. [16]

På kurvans y-axel visas markkontaktkraften och på x-axeln markförskjutningen. Kurvans uppåtgående form kan förklaras på följande sätt. Efter att en viss förskjutning

har åstadkommit ökar förskjutningen proportionellt med markkontaktkraften. Detta är på grund av att högre jordvolym innebär att kontaktbredden ökar. Figuren visar även att E-modulen stiger med markkontaktkraften och markförskjutningen.

För att få fram deformationsmodulen från statisk plattbelastning används ett tidsättningsdiagram (figur 2.2). För att få fram deformationsmodulen från vältförsöken används komprimeringskurvan i kraftdeformationsdiagrammet. Därefter jämförs kraftdeformationskurvan med den kurvan i ovanstående diagram som är mest lik. Detta görs som en slag dubbelkontroll för att minimera felmarginalen. Resultatet av denna undersökning är den sökta E-modulen.

Dock är E-modul inte en korrekt benämning på den sökta modulen, på grund av att marken inte har antagits vara linjär, elastisk och isotropisk. Hänsyn har istället tagits till vibrationstillståndet som orsakas av välten. Detta är, som tidigare nämnts, för att få ett värde som är direkt jämförbart med deformationsmodulen. Modulen benämns istället vibrationsmodulen (E_{vib}).

På grund av att hänsyn har tagits till vibrationsvikten, vältens vikt, och obalanserade vikten kan E_{vib} antas oberoende av välten. Dessutom är E_{vib} inte en dimensionslös parameter som CMV, utan en modul som mäts i MPa som mäter den vertikala bärigheten hos marken.

Ett problem med E_{vib} är att den använder Lundbergs formel. Formeln gäller dock endast för elastisk deformation. När jord belastas sker både elastisk och plastisk deformation. Vid användning av denna formel tas ingen hänsyn till den plastiska deformationen. Dessutom, som syns i kraftdeformationsdiagrammet (figur 2.9), är plastiska deformationen mycket större än vad elastiska deformationen är. [19]

2.3.7 Variocontrol

Följande information är hämtad från referens [18] och det är Bomags värden som redovisas nedan.

Bomag har utvecklat vältar där oscillationens riktning kan ställas in. Med det system som Bomag har utvecklat kan en amplitud på 2,5 mm och en centrifugalkraft på 500 KN åstadkommas med en vibrationsmassa på 9000 kg.

Riktad oscillation åstadkoms genom att en koncentriskt monterad vibrationsstav bär tre excentriska viktar, två mindre vikter vid slutet av staven och en större excentrisk last på mitten av staven. Excentriska vikten på mitten roterar åt ett annat håll än de mindre excentriska vikterna som sitter vid slutet av staven. Resultatet av detta är en riktad oscillation. Verkningshållet av riktade oscillationen kan ändras genom att vända hela vibrationsenheten (figur 2.16). Genom denna uppbyggnad är det möjligt att skapa den önskade oscillationsvinkeln mellan 0 och 90 grader. Justeringen av vibrationsenheten görs med en hydraulisk motor.

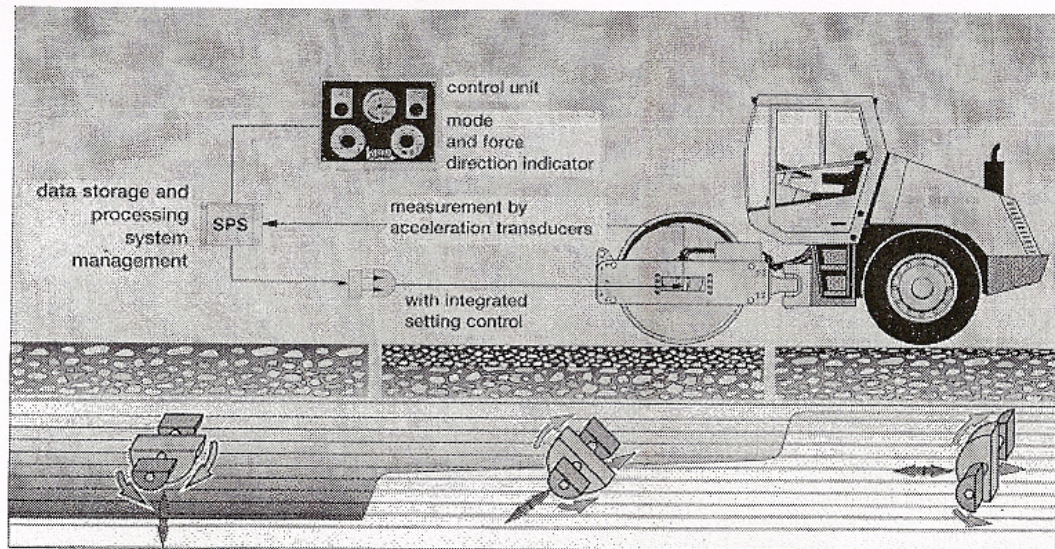


Fig 5: VARIOCONTROL system for single drum rollers

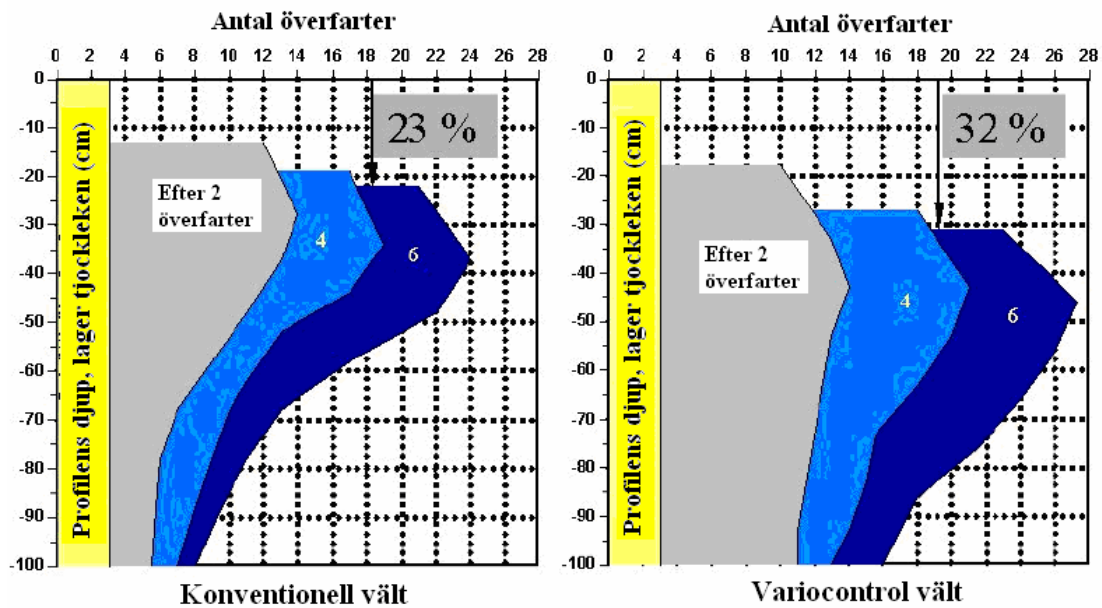
Figur 2.16 De excentriska vikterna inne i trumman på en Variocontrol vält som skapar riktad oscillation. [18]

Detta system för packnings- och ytpackningskontroll benämns Variocontrol. Bomags Variocontrol vältar är en form av Intelligent Compaction Machines (ICM). ICM vältar ändrar amplituden (som är den viktigaste parametern vid packning) efter underlagets förhållanden. Dessa vältar är överlägsna vanliga vältar när det gäller packning och effektivt djup. Andra välttillverkare till exempel Hamm, Dynapac, Ammann (Ammann ICM benämns ACE (Ammann Compaction Expert)) har också ICM vältar. Nedan beskrivs kortfattat hur packningen med en ICM Bomag vält går till. Principen för packning med ICM vältar från olika välttillverkare skiljer sig inte nämnvärt.

Variocontrol välten är utrustad med två accelerometrar på var sida av trumman. Accelerometern registrerar mätvärden och skickar sedan dessa till vältens processor. Värdena från vältens trumma jämförs kontinuerligt mot ett gränsvärde. När gränsvärdet överstigs, skickar processorn en signal till trumman som ändrar den riktade oscillationen och därmed effektiva amplituden för att erhålla ett perfekt packningsresultat. Systemet har möjlighet att snabbt anpassas till markens förhållanden.

Som tidigare nämnts är ICM vältar överlägsna konventionella vibrationsvältar när det gäller packningsdjup, packningsutförande samt anpassning till markens rådande förhållanden. Figuren nedan visar packningsresultat från en Bomag 213 D (en 13 tons vält) utrustad med Variocontrol systemet, jämfört med resultatet från en konventionell Bomag 213 D utan detta system. Försöken utfördes på siltigt grus.

Jämförelse mellan en konventionell vält och en Variocontrol vält.



Figur 2.17 Packningsresultat från en konventionell vält jämfört med en Variocontrol vält. [18]

Redan efter andra överfarten visar riktad oscillation en bättre packningseffekt som medför en ökning i jordens densitet jämfört med en konventionell vält. Under försöket hade både vältarna samma linjelast och frekvens. Ytterligare överfarter fastställde denna trend. Riktad oscillation transporterar högre packningsenergi till djupare områden än vad vanliga vibrationsvältar gör. Energin från vibrationsvältar är koncentrerad till ytan. Som syns i figuren har lagrets höjd minskat med 32% vid användningen av Variocontrol välten och bara med 23% vid användning av en konventionell vält.

Ytterligare en fördel med Variocontrol är att systemet tar hänsyn till förhållandena i undergrunden. Systemet ger ungefär samma packningsgrad även på djupet, vilket är av stor betydelse i till exempel vägbyggen och andra anläggningsarbeten.

Dessutom finns det ingen risk för överpackning (kornen krossas) vid användning av oscillerandevältar.

2.3.8 k_s

Följande information är hämtad från referens [10].

Vältföretaget Ammanns mått på bärighet är jordstyvhetsparametern k_s . Parametern k_s är oberoende av föränderliga maskinparametrar.

Värdet togs fram genom försök med en konventionell vibrationsvält med en packningsmätare på grovkorning, lättpackad homogen jord som kunde antas uppföra sig linjärt elastiskt. Amplituden (A) och fasvinkeln (φ) användes vid bedömning av jordstyvheten k_s . Att k_s värdet var konstant för olika amplituder och frekvenser vid låga frekvenser visar riktigheten i modellen. Det kan sammanfattas med att k_s är en

kvot av jordens reaktionskraft och den tillhörande amplituden hos trumman. Formeln för k_s är:

$$k_s = \frac{F_s \Big|_{\dot{x}=0} - (m_f + m_d) * g}{A} \quad (2.21)$$

där

$$A = |x_d| \text{ om } \dot{x} = 0; \ddot{x} < 0$$

Dubbelstuds inträffar inte om $A_{1/2} = 0$

Om F_s förenklas till formel 2.7 blir k_s :

$$k_s = 4\pi^2 * f^2 * \left[m_d + \frac{m_e r_e * \cos(\varphi)}{A} \right] \quad (2.22)$$

Denna förenkling kan göras om $F_s \Big|_{\max} \leq 2 * (m_f + m_d) * g$

Genom denna förenkling elimineras dämpningen c_s från formeln, samt den uppmätta styvheten blir oberoende av trummans frekvens. Det är endast vid väldigt höga frekvenser som systemet börjar bli beroende av föränderliga maskinparametrar.

Även k_s -värdet kalibreras med statiskt plattbelastningsförsök. Kalibrering görs för att använda välten som ett kontinuerligt plattbelastningsförsök. Dock bör följande noteras:

- Platt-jord ytan och trumma-jord ytan är olika.
- Undersökningsdjupet med ett statiskt plattbelastningsförsök är ungefär 40 cm och med trumman är det undersökta djupet $1000 * A$. Till exempel om trumman har en amplitud på 1 mm undersöks ett djup på en meter. Detta bör beaktas särskilt vid inhomogen jord.
- Trots att det finns en skillnad i kontaktytan vid de två olika försöken, är trycket som åstadkoms från båda prov väldigt lika för packade material.

Genom att införa Lundbergs formel (formel 2.19) tas hänsyn till kontaktytan mellan vältens trumma och jord. Formeln för k_s kan då skrivas:

$$k_s = \frac{E * L * \pi}{2 * (1 - \nu^2) * \left\{ 2.14 + \frac{1}{2} * \ln \left[\frac{\pi * L^3 * E}{(1 - \nu^2) * 16 * (m_f + m_d) * R * g} \right] \right\}} \quad [\text{MN/m}] \quad (2.23)$$

För att k_s skall vara direkt jämförbart med E_{v1} värdet, multipliceras k_s med en faktor 1.1, och för att vara direkt jämförbart med E_{v2} värdet, multipliceras k_s med en faktor 2.0.

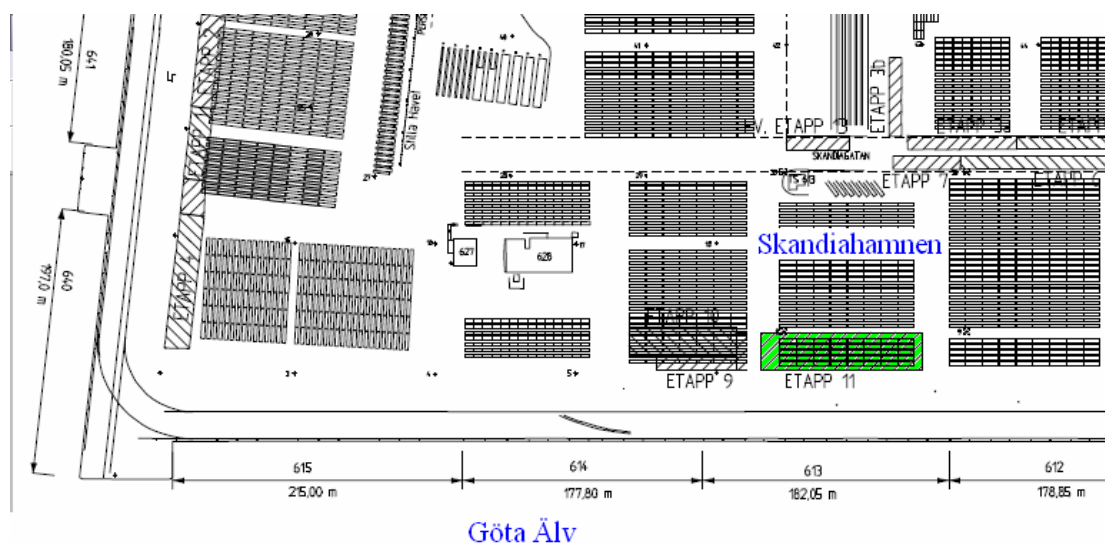
$$k_s = 1.1 * E_{v1} \quad (2.24)$$

$$k_s = 2.0 * E_{v2} \quad (2.25)$$

3 Fältundersökningar

Inventeringen av den befintliga ytan på etapp 11 (se figur 3.1) utfördes med tre mätmetoder: tungfallvikt (FWD), ytpacknings kontroll (YPK) och statisk plattbelastning (SPB). För att kontrollera rimligheten hos mätmetoderna valdes därefter 10 punkter där provgropar grävdes.

Etapp 11 är belägen ungefär 50 m från Göta Älvkanten i mitten på Skandiahamnen och är riktad i väst-östlig riktning. Etappytan kan ses i figur 3.1, den är cirka 140 x 38 m² och har tidigare använts för containeruppställning. För en detaljerad översikt av projektets delmoment hänvisas till tidplanen för examensarbetet (bilaga 2).



Figur 3.1. Etappens placering i Skandiahamnen.

3.1 Förutsättningar

Överbyggnaden på etapp 11 består av asfaltslager, bärlager och förstärkningslager. Hela överbyggnaden är i sin tur grundlagd på en gammal soptipp och de olika lagren varierar en hel del i sammansättning samt tjocklek över området.

Ytorna i Göteborgs Hamn trafikeras av grensletruckar som har en totalvikt på 100 ton fördelad på fyra axlar. Grensletruckarna inom hamnområdet kör till stor del i samma spår som leder till spårbildning. Truckarna är extremt känsliga för ojämnheter i vägytan och med anledning av detta har det ställts höga krav på jämnhet hos beläggningen. En ojämn beläggning orsakar kraftiga vibrationer och buller i grensletruckens högt belägna förarhytt, som leder till sjösjuka hos föraren och därför får en lutning av terminalytan på maximalt 1 % förekomma i hamnområdet.

Terminalytan i Skandiahamnen belastas även av containrar staplade på varandra. De två olika typer av containrar som finns i hamnområdet är 40-fots och 20-fots containrar. En 40-fots container har måtten 12.2 m (längd) × 2.44 m (bredd) × 2.59 m (höjd), och en 20-fots container har måtten 6.1 (längd) × 2.44 (bredd) × 2.59 (höjd). En 40-fots container har en totalvikt (full lastad container) på cirka 30 ton kg en 20-fots har en totalvikt på 24 ton. Containrar staplade på varandra utsätter terminalytan

för stora laster som i sin tur leder till sättningar. Containerar last fördelas på 4 fötter. På grund av den stora lasten bildas ojämnheter i beläggningen.

Eftersom det inte finns några regelverk för så tungt belastade ytor har normer gällande Göteborg Hamn tagits fram. Vid uppbyggnad av en ny konstruktion skall T3-modellen användas, detta gäller för ytor som trafikeras av grensletruckar. En T3-modell har följande lager och tjocklekar:

- Slitlager – 35 mm
- Bindlager – 70 mm
- Bundet bärlager – 70 mm
- Obundet bärlager – 80 mm
- Förstärkningslager – 1300 mm

Eftersom de befintliga lagren varierar mycket över området kan det behöva läggas till olika mycket förstärkningslager för att den erforderliga nivån skall uppnås. Där behovet är större kan förstärkningslagrets tjocklek ökas.

3.2 Tung fallviktsundersökningar

Efter att ha frilagt etapp 11 från containerar så skulle det bestämmas i vilka punkter undersökningarna skulle utföras. Punkterna där tung fallviktsundersökningarna skulle göras lades först in i CAD (bilaga 3) för att sedan markeras ut på etappen med hjälp av GPS. Totalt skulle tung fallviktsundersökning göras i 594 punkter. Anledningen till att tung fallviktsundersökning valdes att utföras i så många punkter var för att de skulle täcka hela etappens yta och sen lätt kunna jämföras med hur väl resultaten stämmer överens med vältens YPK undersökning (som mäter kontinuerligt).

Tung fallviktsundersökningarna genomfördes från den 12 till den 13 oktober 2006 och de utfördes direkt på asfaltslagret. I figur 3.2 visas hur en tung fallvikt ser ut. Vid undersökningstillfället användes tre olika fallvikter (50, 36 och 18 kN) för att se hur de påverkar konstruktionen. Under försöket mättes deflektioner (nedböjning av ytan) i ett antal punkter samt temperatur i luft och asfalt. Efter att ha utvärderat resultaten förslogs 16 punkter där statiskt plattbelastningsförsök skulle ske. Dock var några av dessa punkter tvungna att tas bort eftersom de var olämpligt utplacerade eller på grund av tidsbrist. De borttagna punkterna ersattes sedan av andra.



Figur 3.2 Tunga fallvikten som användes vid examensarbetet.

3.3 Yttäckande packningskontroll

Innan yttäckande packningskontroll kunde påbörjas behövde ytan jämnas av och packas eftersom den var ojämn efter att asfaltslagret hade tagits bort.

Yttäckande packningskontroll utfördes från den 19 till den 25 oktober. Undersökningarna gjordes med två stycken vältar, en vält från Hamm ses i figur 3.3 och en från Dynapac ses i figur 3.4. Hammvälten vägde 16 ton och hade en statisk linjelast på 43,5 kg/cm, den var utrustad med en differential GPS (dGPS) vilket innebar att den hade en mätprecision på cirka 20 cm till 2 m. Dynapacvälten vägde 12 ton och hade statisk linjelast på 38 kg/cm, vilket är tämligen nära Hammvälten. Den saknade däremot en dGPS vilket innebar att etappytan behövde markeras ut för att välten skulle kunna mäta noggrant. Yttäckande packningskontroll med Hammvälten utfördes av Martin Jägård på GBB medan undersökningar med Dynapacvälten utfördes av examensarbetarna.

Vältarna som användes skilde sig åt mera än vad som nämndes tidigare. Till exempel kunde Dynapacvälten endast vibrera med två förinställda frekvenser samt slå med endast låg amplitud, dock användes endast den högre frekvensen som var på 33 Hz för att dubbelslag skulle undvikas.

På Hammvälten kunde frekvensen ändras steglöst och även amplituden kunde varieras från låg till hög. Då en låg amplitud användes valdes en frekvens på 35 Hz medan då hög amplitud användes valdes frekvenserna 25 Hz respektive 27 Hz. Dessa frekvenser valdes för de olika amplituderna beror på att dubbelslag skulle undvikas. I och med att amplituderna på Hammvälten kunde väljas så innebar det att den yttäckande packningskontrollen kunde utföras på olika djup. Med den låga amplituden kunde djup på cirka 0.5 till 1 m undersökas medan användningen av hög amplitud visade hur väl konstruktionen var packad på ett djup mellan 1.5 till 2 m.

Efter ytäckande packningskontrollen valdes ytterligare punkter där det fanns intresse att utföra statisk plattbelastning.



Figur 3.3 Hammvälten som användes vid examensarbetet.



Figur 3.4 Dynapacvälten som användes vid examensarbetet.

3.4 Statisk plattbelastning

Sammanlagt gavs förslag på 22 punkter där kontroll med statisk plattbelastning skulle ske. Dessa punkter valdes efter en snabb granskning av resultat för att dåligt-, bra- och medelpackade punkter skulle erhållas.

Mätningen med statisk plattbelastning var planerad att ske den 23 oktober 2006 men på grund av oväder flyttades provet till den 26 oktober. Trots att även denna dag vara drabbad av regn var mätningarna tvungna att utföras på grund av tidsbrist och detta trots att SPB är ganska känslig för väta. I figur 3.5 går det att se att vältarna användes som motthåll vid mätningstillfället. Värdena från statisk plattbelastning för den befintliga etappytan används sedan för att kalibrera vältarna och för att kunna få fram gränsen för CMV respektive HVMV.

Några veckor senare, den 15 november, utfördes ytterligare en mätning med SPB för att undersöka ifall den nyutlagda förstärknings- och bärlagret var tillräckligt välpackade. I den nya underökningen mättes det endast i nio punkter.



Figur 3.5 Statisk plattbelastningsförsök med Dynapacvälten som motvikt.

3.5 Provgropar

Den 28 oktober 2006 grävdes 10 stycken provgropar för att kontrollera rimlighet i de tre mätmetoderna. I dokumenteringen mättes tjockleken på de olika lagren (bärlagret, förstärkningslagret) vad de olika lagren bestod av samt terrassytans nivå. Djupet på provgroparna var cirka 1,5 m.

4 Resultat av inventering

Alla undersökningarna som har utförts har visat att nästan hela etappytan är välpackad. Detta antas framför allt bero på att etappytan har belastats med containrar och grensletruckar under flera decennier vilket har lett till att området har packats väl. Materialet som har använts vid konstruktionens uppbyggnad är dessutom av bättre kvalitet än vad det har varit i andra delar av Skandiahavet. Detta gäller framför allt de tre sydligaste stråken.

Det är endast i några enstaka punkter och områden som det går att se att materialet inte är tillräckligt välpackat. Det gäller framförallt ett stråk i nordsydlig riktning, i mitten av etappen, där det tydligt går att se att det är dåligt packat. I det stråket finns det en vattenränna eller rör med kablar som omges av sand och som antagligen inte har packats tillräckligt väl.

Trots att stora delar av den befintliga ytan är välpackad så visar flera av de använda undersökningsmetoderna att ytan kan packas ytterligare.

4.1 Tung fallviktsundersökningar

Efter att Vägverket Konsult hade analyserat tung fallviktsundersökningen erhöles tre olika parametrar, undergrundsmodulen, ytmodulen samt bärighetsindex. (se bilaga 4, analys av tung fallvikt). Alla tre parametrarna visade att större delen av etappytan var välpackad. Det var endast i ett par stråk och områden som det ställda kravet på ytmodulen och bärighetsindexet inte uppfylldes. Utifrån undergrundsmodulen samt bärighetsindexet framgår att undergrunden i den östra delen av ytan var välpackad. I Figur 4.1 ses hur undergrundsmodulen varierar i den östra delen av ytan.

Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC
Å	Ä	Ö	AA	BB	CC	DD	EE	FF	GG	HH	II	JJ	KK	LL	MM	NN	OO	PP	QQ	RR	SS	TT	UU	VV	WW	XX	YY	ZZ	
Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv	Fv
186	163	152	159	134	140	174	188	178	181	163	170	169	181	191	191	229	226	236	225	237	269	321	343	319	313	284	276	275	
188	158	162	157	123	127	163	179	173	171	169	182	173	169	187	211	179	176	230	236	230	275	318	321	341	332	304	302	295	
170	171	155	152	110	160	122	169	181	181	167	168	182	156	183	184	150	175	221	225	225	255	260	273	276	321	243	217	203	
189	200	176	166	123	128	191	192	204	213	172	174	179	170	194	193	184	155	230	249	267	262	292	310	321	311	302	252	198	
175	183	174	173	121	133	175	159	192	208	177	162	158	156	165	176	195	160	193	229	248	276	292	319	341	323	311	296	221	
199	186	168	174	130	143	205	165	208	203	174	166	159	160	190	164	185	155	209	222	228	248	268	322	319	345	303	265	231	
191	204	163	177	133	204	179	142	164	187	197	200	165	176	185	152	169	169	193	205	253	274	265	261	309	356	282	265	250	
156	179	197	206	151	169	238	210	241	235	184	173	178	192	202	176	209	259	200	209	219	247	252	281	354	283	284	275	230	
176	192	185	184	145	137	216	210	247	218	196	176	180	204	200	179	204	204	195	217	227	239	238	269	203	273	268	249	230	
176	184	165	193	146	142	214	218	224	214	201	154	189	204	187	204	192	231	217	244	215	236	237	221	241	231	237	291	307	
175	169	174	169	154	125	165	193	218	189	181	198	184	192	190	188	159	191	187	228	206	203	257	215	241	198	238	425	362	

Figur 4.1 Undergrundsmodulerna för den östra delen av etappytan, den gröna färgen visar var ytan är hårt packad.

De tre erhållna parametrarna kan i sin tur analyseras ytterligare för att få fram en mängd olika data. För att kunna få fram dessa behövs dock kännedom om hur marken ser ut, till exempel lagerföljden och materialsammansättningen. Detta är dock ett tidskrävande arbete. Genom konsultation med professor Anders Lenngren och teknisk licentiat Jan Hansson vid Chalmers framkom att det vore bäst att koncentrera sig på ytmodulen eftersom denna beaktar den övre delen av konstruktionen. Eftersom tung fallviktsundersökning utfördes i många punkter och att det skulle ta väldigt lång tid att analysera alla, valdes endast de punkter som hade tidigare hade föreslagits.

I flertalet av dessa punkter fanns det dessutom exakt uppmätta asfaltstjocklekar vilket behövdes för vidare analys.

Med kännedom om asfaltstjockleken (se bilaga 5), luft- och asfaltstemperatur samt deflektionerna i de utvalda punkterna utfördes en analys av den översta delen i vägkonstruktionen med dataprogrammet Clevercalc 3.9. Vägkonstruktionen delades upp i tre lager, asfaltlager, mellanlager (75 cm) samt undergrunden. Målet var att få fram lagermodulen, E(2), för det mellersta lagret som sedan skulle kunna användas i jämförelse med de övriga testmetoderna. Lagermodulen visar vilken styvhet lagret har. Tvåan i E(2) står för andra lagret (mellanlager). Med hjälp av Clevercalc kunde en bakåträkning utföras och de olika lagermodulerna, spänningarna och töjningarna erhöles. Med bakåträkning menas att programmet utgår från de uppmätta deflektionerna och utför ett antal iterationer tills lagermodulerna för de tre olika lagren överensstämmer med de lagermoduler som skulle åstadkomma de uppmätta deflektionerna. Eftersom asfaltstjocklekarna varierade mycket, behövdes det undersökas vilka av de tre fallvikterna som åstadkom samma töjningar. Då töjningarna var ungefär lika stora i alla de undersökta punkterna kunde de motsvarande lagermodulerna användas. I bilaga 6 kan de uträknade lagermodulerna och töjningarna ses. Töjningarna är markerade med T”j-1” osv. i bilagan.

De erhållna lagermodulerna, E(2), för de undersökta punkterna kan ses i tabell 4.1 och de varierar från 101 MPa i punkt 6PP till 264 MPa i punkt 11ZZ. För att en lager skall ha godkänd bärighet bör den ha en lagermodul på ungefär 197,4 MPa. Denna gräns har tagits fram genom kalibrering mellan E(2) och E_{v2} -värdet från statisk plattbelastning. Exempel på hur kalibreringen utförs och hur gränsvärdet tas fram kan ses i kapitel 5.1 sid. 42. Av de 16 lagermoduler som fanns var det endast 8 som klarade gränsvärdet för god bärighet.

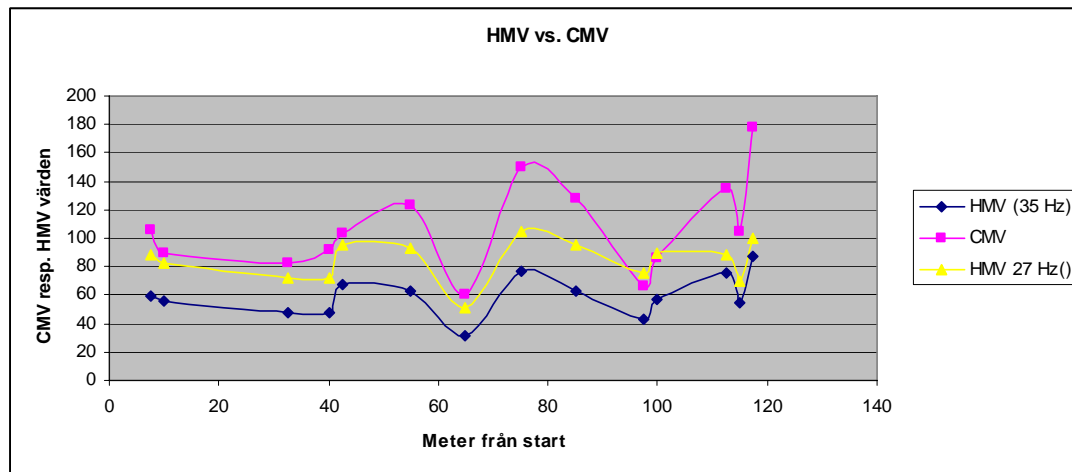
Tabell 4.1 Lagermoduler för det mellersta lagret i de undersökta punkterna.

Punkt	7B	9H	10I	9L	9M	7R	7U	4W	11Ä	4BB
E (2)	162	142	131	254	184	231	201	251	169	
7BB	7CC	8GG	10GG	1KK	6PP	5QQ	8WW	6VV	9XX	11ZZ
150	185	253		203	101	235				264

Som det kan ses från tabellen ovan, finns det lagermoduler för endast 16 av de 21 undersökta punkterna och detta beror på att några av punkterna (punkterna 8WW, 6VV och 9XX) hade så låga töjningar att de inte kunde jämföras med de övriga punkterna eller att iterationen som programmet utförde inte stämde med det verkliga utfallet (punkt 10GG). Punkt 4BB analyserades aldrig eftersom underliggande betongrör ej möjliggjorde iteration.

4.2 Yttäckande packningskontroll

De värden som erhöles från de båda vältarna stämde väl överrens. Som det framgår av figur 4.2 följer de tre kurvorna varandra rätt bra, vilket innebär att de bägge vältarna i de flesta fall visar samma ställen där det är bra respektive dåligt packat. Då vältarna var inställda på låg amplitud blev korrelationsdeterminanten (R^2) vid jämförelsen mellan dem 0.46, (se bilaga 7 för närmare information). Ju närmare 1 korrelationsdeterminanten är, desto bättre överensstämmelse är det. I kapitel 5.1, går det att läsa mera om detta.

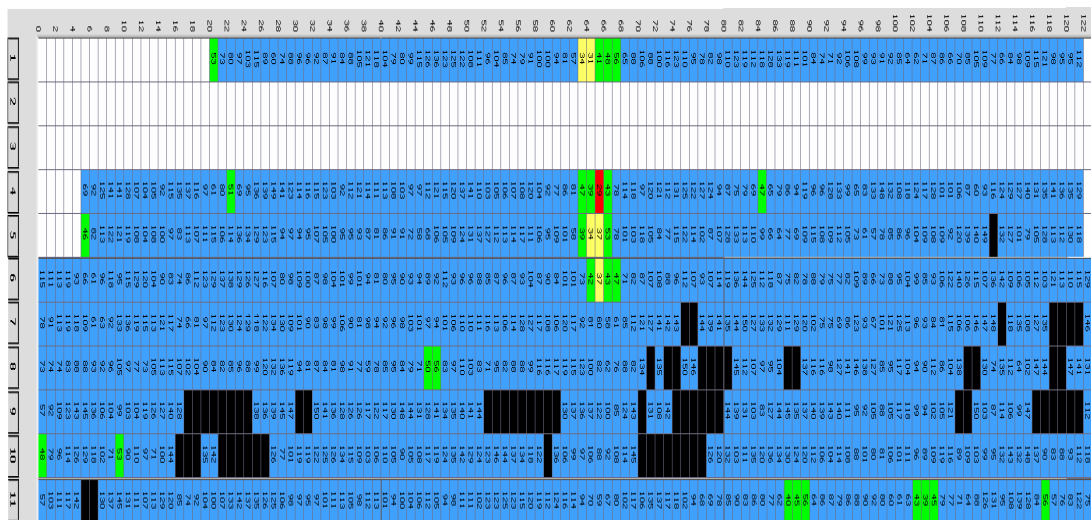


Figur 4.2 Jämförelse mellan CMV och HVM.

4.2.1 Dynapacvält

Trots att etappytan har belastats under många år har reproducerbarheten vid CMV-mätning efter två till tre överfarter inte visat sig vara tillräcklig. Värdena varierade väldigt mycket efter varje överfart och ofta framkom att packningen till och med hade minskat (bilaga 8). Detta antas bero på att välten saknade dGPS och därför inte körde i exakt samma spår, vilket kan vara svårt att uppnå.

CMV- värdena som uppmättes på den befintliga ytan var relativt höga. Det var framförallt i ett stråk i mitten av etappen som låga CMV- värden uppmättes. De högsta värdena fanns i östra delen av etappen samt de tre sydligaste stråken (9, 10 och 11). Där var konstruktionen så välpackad att till och med dubbelslag (de svart markerade rutorna) inträffade ett antal gånger, se figur 4.3. De olika färgerna i figuren nedan är redan förinställda i Dynapacs programvara och den blåa färgen symboliserar inte att kravet för god bärighet är godkänt.



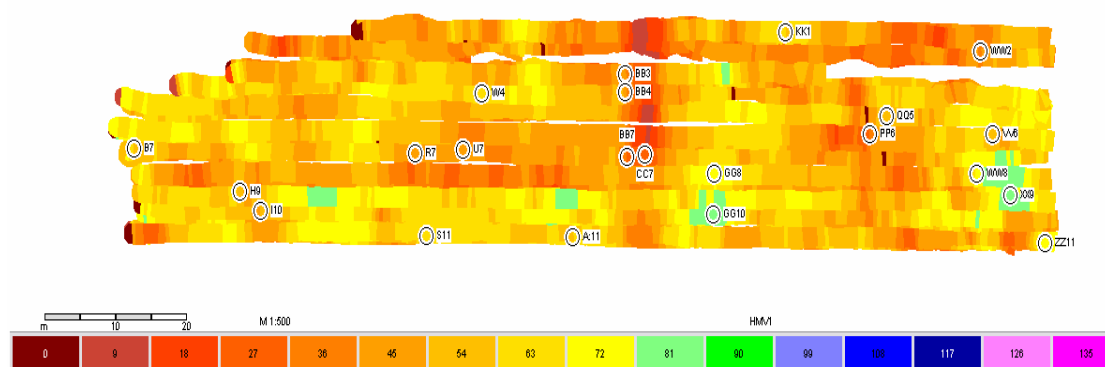
Figur 4.3 CMV-värden för befintlig yta på Etapp 11. Mätningarna är utförda med 35 Hz och låg amplitud.

Resultat från stråk två och tre saknas eftersom det fanns risk för dubbelslag samt att betongröret i konstruktionen under kunde skadas.

4.2.2 Hammvält

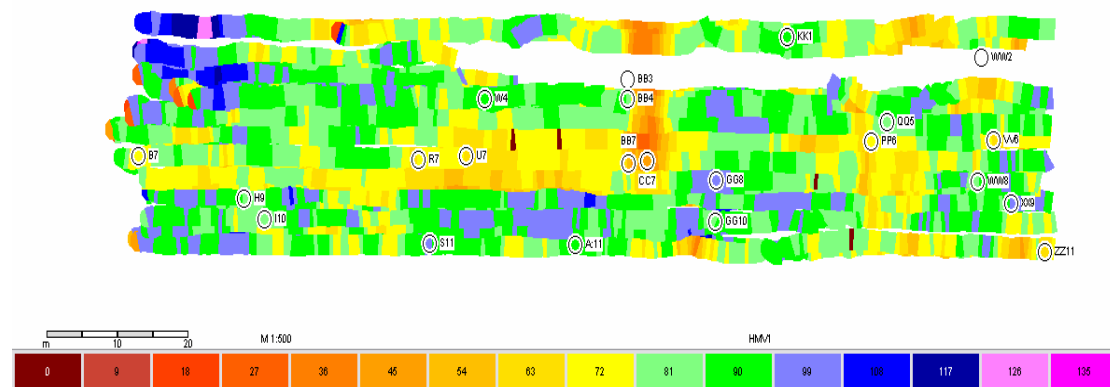
I likhet med Dynapacvälten gjorde även Hammvälten endast två till tre överfarter, men i detta fall var det tillräckligt för att reproducerbarheten skulle bli god (bilaga 9).

När välttrumman vibrerade med 35 Hz och slog med låg amplitud kunde man tydligt se att det är ett, nord-sydligt, stråk i mitten av ytan som var dåligt packat. Men det gick även att utläsa att det fanns en hel del andra områden på ytan som inte helt klarade kravet för god bärighet. Detta resultat erhöles trots att reproducerbarheten visades vara god. De mest välpackade ytorna finns i den östra delen samt i de tre sydligaste körstråken, se Figur 4.4. Ju grönnare och blåare ytorna är desto bättre packat är det.



Figur 4.4 HMV-värden för befintlig yta på Etapp 11. Mätningarna är utförda med 35 Hz och låg amplitud.

Vid undersökningen av hur välpackad den befintliga konstruktionen var på 1.5-2 m djup med frekvensen 27 Hz och hög amplitud, erhöles resultat som visade att nästan hela etappytan var välpackad, med undantag för det nord-sydliga stråket i mitten på etappen, se figur 4.5.



Figur 4.5 HVM-värden för befintlig yta på Etapp 11. Mätningarna är utförda med 27 Hz och hög amplitud.

4.3 Statisk plattbelastning

Resultatet från den statistiska plattbelastningsundersökningen på den befintliga etappytan visade att det var stor spridning bland E_{v2} -värdena. Det lägsta uppmätta värdet var 99 MPa medan det högsta var 265 MPa. Det var endast i 7 av de 21 undersökta punkter som gränsen för god bärighet underskreds (se tabell 4.1). Gränsen för god bärighet sattes i det här fallet till $E_{v2}=163$ MPa och hur detta värde har erhållits framgår av kapitel 5.1. Tre av de sju punkterna som inte klarade kravet för god bärighet finns i samma mindre välpackade stråk som framgick även av de andra undersökningsmetoderna. Dessa undersökningar gjordes för att få fram en korrelationskoefficient/determinant vid kalibrering med YPK.

Tabell 4.2 E_{v2} -värden i de undersökta punkterna på befintlig yta.

Punkt	7B	9H	10I	9L	9M	7R	7U	4W	11Ä	4BB
E_{v2}	166	124	154	228	212	153	174	166	140	99
	7BB	7CC	8GG	10GG	1KK	6PP	5QQ	8WW	6VV	9XX
	101	107	208	201	184	145	206	265	177	193
										190

När statisk plattbelastningsundersökning hade utförts som efterkontroll på det nyutlagda bärlagret erhöles högre E_{v2} -värden än vad som var fallet för den befintliga ytan. Flera av dessa var dock långt ifrån godkända eftersom kravet för god bärighet på ett nyutlagt förstärkningslager är 184,2 MPa. Se tabell 4.2. Till exempel ökade E_{v2} -värdet i punkt 4BB från 99 MPa till 137,9 MPa men detta är långt under gränsvärdet.

Tabell 4.3 E_{v2} -värden i de undersökta punkterna på nyutlagt bärlager.

Punkt	9R	9Ö	9GG	1NN	8YY	6HH	1KK	4BB	4U
E_{v2}	184,7	175,1	168,7	202,9	202	171,7	186,3	137,9	192,4

Vad gäller packningen av det nyutlagda förstärknings- och bärlagret så klarade 7 av 9 värden kravet på packning ($E_{v2}/E_{v1} < 2,5$). Se tabell 4.3.

Tabell 4.4 E_{v2}/E_{v1} i de undersökta punkterna på nyutlagt bärlager.

Punkt	9R	9Ö	9GG	1NN	8YY	6HH	1KK	4BB	4U
E_{v2}/E_{v1}	2,19	1,91	1,73	2,52	2,22	2,49	2,16	2,79	2,08

4.4 Provgropar

Resultaten från provgroparna framgår från nedanstående tabell. Den minsta asfaltstjockleken var 7,5 cm och den maximala var 55 cm. Tjockleken på bärlagret varierade från 0 och 50 cm, men i de flesta mätpunkterna låg tjockleken på bärlagret mellan 15 till 25 cm. Förstärkningslagrets tjocklek varierade från 40 och 120 cm, dock

i de flesta groparna var tjockleken på förstärkningslagret mellan 85 och 100 cm. I etapp 11 bestod förstärkningslagret av bergkross eller krossmaterial (tegelsten och andra byggnadsrester) i storleksordningen 0-300 mm. Terrassytan är mätt från överkanten på den befintliga asfaltsytan och ligger på ungefär 150 cm i de flesta groparna. Terrassytan i de flesta groparna bestod av lera. Provgroparnas placering kan ses i Bilaga 3.

Tabell 4.5 Uppmätta värden på asfaltstjocklek, tjockleken på bärlager, tjockleken på förstärkningslagret samt terrassytan för de olika provgroparna.

Provgrop	Asfaltstjocklek (cm)	Tjocklek bärlager (cm)	Tjocklek förstärkningslager (cm)	Terrassytan (cm)
9H	16,5	25	110	150
9L	14,5	0-5	120	140
7R	15	20	75	110
4W	30	25-30	100	150
7BB	7,5	15	40	-
6PP	32	15	85	130
2WW	52	15	90	155
8WW	49	20	85	155
6VV	55	20	85	160
11ZZ	20	50	110	220

5 Analys av resultat

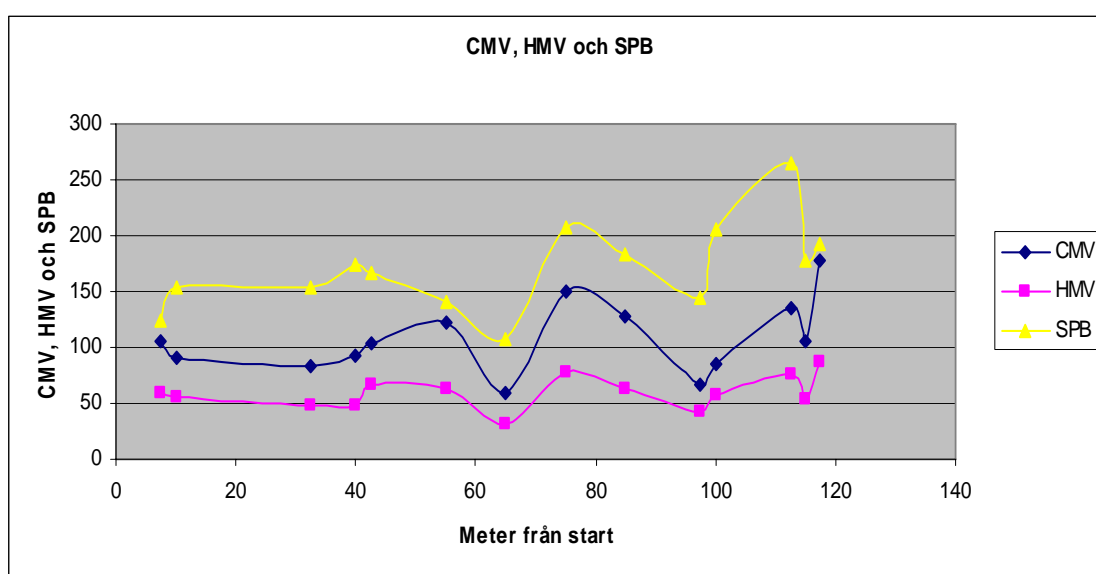
I följande avsnitt har de olika testmetoderna jämförts med varandra. Vid en jämförelse mellan SPB och YPK, FWD och YPK respektive CMV och HVM har en regressionsanalys använts. Analysen visar en god överensstämmelse mellan de olika metoderna. Vid en jämförelse mellan verkliga utfallet som framkom från provgroparna och de olika testmetoderna gick det inte att utläsa något samband troligen på grund av att provgroparna inte var tillräckligt djupa.

5.1 Jämförelse mellan SPB och YPK

Positionen för de punkter som har undersökts med statisk plattbelastning har noggrant fastställts med dGPS samt måttband, medan undersökningarna som är utförda med Hammvälten har positionsbestämts med endast dGPS. Vad det gäller Dynapacvälten har denna körts i endast raka spår och dessa är i sin tur fastställda med dGPS och måttband. Svårigheten med att behöva köra i raka spår är att vältens vibration kan leda till att välten börjar förflytta sig i sidled vilket innebär att den mäter utanför den fastställda routen. Detta kan i sin tur ge ett felaktigt resultat samt visa att reproducerbarheten mellan överfarterna är dålig.

Vid undersökningstillfällena med Dynapac- och Hammvälten var det fint väder varför resultaten bör vara relativt tillförlitliga. Resultaten från den statiska plattbelastningen är mycket känsliga för regn och fukt i konstruktionen. Vid undersökningstillfället rådde oväder med mycket regn varför resultaten kanske inte blev helt korrekta. Men trots ovädet ansågs det att vädret inte bör ha påverkat resultatet i någon större utsträckning eftersom marken var relativt välpackad.

Utifrån de erhållna resultaten går det att dra slutsatsen att det finns ett samband mellan undersökningarna utförda med SPB och YPK. Från figur 5.1 framgår att E_{v2} , CMV- och HVM-värden följs åt ganska väl i en längdsektion.



Figur 5.1 E_{v2} , CMV- och HVM-värden i en längdsektion.

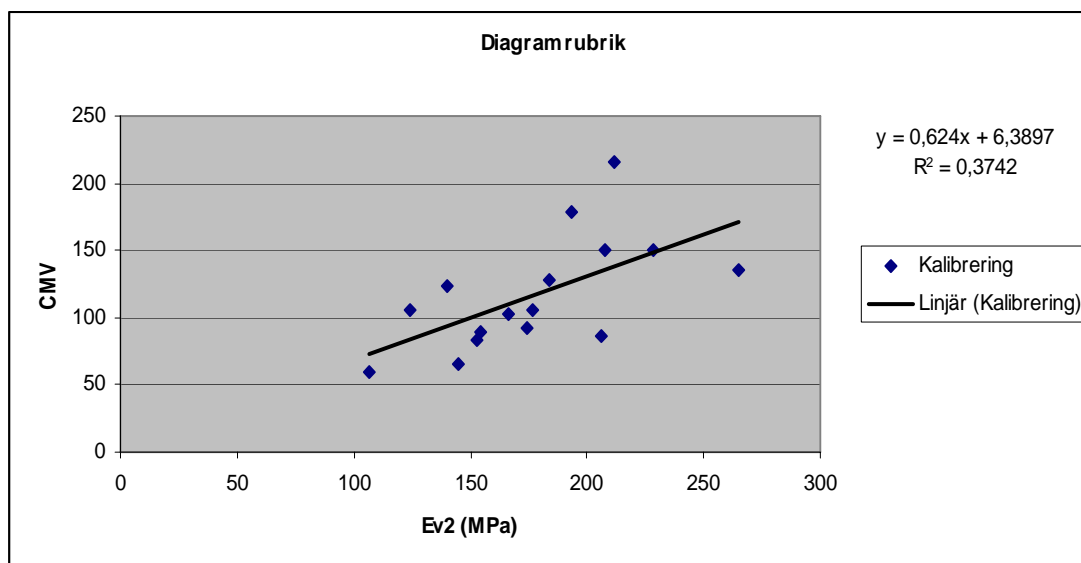
För att fastställa hur sambandet mellan de olika undersökningsmetoderna ser ut utfördes en kalibrering mellan dessa. För att en kalibrering skall vara godkänd i Sverige måste ett antal villkor enligt Vägverkets Metodbeskrivning 606 vara uppfyllda. Till exempel måste en regressionsanalys utföras med minst nio värden och för att sambandet skall vara godkänt krävs det att korrelationskoefficienten (R) skall vara större än 0.6 eller att korrelationsdeterminanten (R^2) överstiger 0.36. I Tyskland och några andra europeiska länder, där kraven är högre, krävs det att $R > 0.7$ eller att $R^2 > 0.49$. För att en korrelation skall anses som riktigt bra bör R^2 vara i närheten av 1.

När kalibreringen mellan SPB och CMV utfördes kunde endast 16 av de 21 värdena användas eftersom i ett antal av de punkter där SPB hade utförts hade det blivit dubbelslag. Även värden från ett par andra punkter kunde inte heller användas eftersom de inte ansågs vara tillräckligt tillförlitliga. Dessa punkter kunde till exempel befinna sig på svåråtkomliga ställen som etappens utkanter. Vid ett försök att utföra regressionsanalysen med 18 värden, erhöles ett resultat som inte uppfyllde kravet på att korrelationsdeterminanten (R^2) skulle överstiga 0.36. Korrelationsdeterminanten (R^2) blev endast 0.26.

Anledningen till att värdet på korrelationsdeterminanten blev låg berodde på att för få CMV var med i regressionsanalysen. Orsaken till att få CMV togs med i regressionsanalysen vara att dubbelslag ofta förekom i de punkter som skulle kalibreras med statisk plattbelastning. Vid en regressionsanalys får inte värden där dubbelslag förekommit tas med.

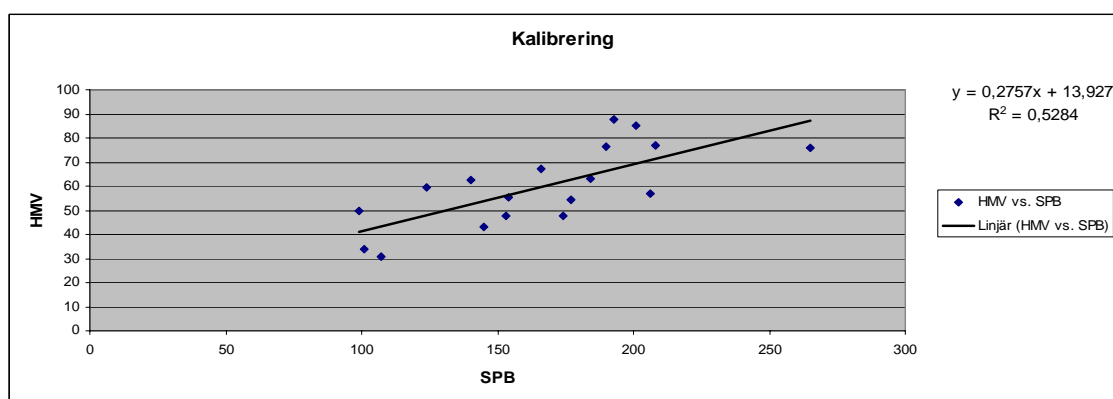
Enligt Dynapacs programvara DCA (Dynapac Compaction Analyzer) förekommer dubbelslag vid ett CMV på 151 dock är detta inte ett korrekt mått på dubbelslag, eftersom dubbelslag är beroende av RMV och inte CMV. Efter analys av RMV framkom det att flera CMV kunde tas med i regressionsanalysen.

Vid en regressionsanalys där flera CMV var med erhöles en korrelationsdeterminant på 0.37 vilket är godkänt. Se figur 5.2.



Figur 5.2 Kalibrering mellan SPB och CMV.

Eftersom det gick att ändra amplituden och variera frekvensen på Hammvälten samt att dess mjukvara var lättöverskådlig kunde exakta värden på positionen avläsas och därmed jämföras med motsvarande värden från statisk plattbelastning. Utifrån Hamms mjukvara, Hamm Compaction Navigator (HCN), kunde det inte upptäckas att dubbelslag hade inträffat vid undersökningstillfället. Detta kan bero på att välten vägde 16 ton och därför förekom inte dubbelslag eller att HCN inte var korrekt inställd. Eftersom dubbelslag aldrig inträffade innebär det att 18 värden kunde användas för kalibreringen. Två av de tre värden som inte togs med i regressionsanalysen var inte exakt positionerade i HCN vilket betydde att helt korrekta HMV-värden för dessa två punkter inte kunde erhållas. Den tredje punkten befann sig på en svåråtkomlig punkt på etappytan och var därför inte pålitlig. Korrelationsdeterminanten för kalibreringen mellan SPB och HMV blev 0.53, vilket är tillräckligt bra för att kravet i både Sverige och andra europeiska länder skall vara uppfyllt, se figur 5.3. Kalibreringen som utfördes gällde endast för HMV-värden från undersökningen med låg amplitud (35 Hz) eftersom dessa är från ungefär samma djup som SPB-värden.



Figur 5.3 Kalibrering mellan SPB och HMV.

Eftersom ytorna i hamnen belastas med mycket större axellaster än de vanliga svenska vägarna, har även kraven för bärighet (formel 5.1) varit tvungna att anpassas till den rådande situationen i Göteborgs Hamn. Formeln är tagen från Vägverkets ATB-väg 2002, sid. 34 och är en rekommendation vid egenkontroll av bärighet på förstärkningslagret för flexibel konstruktion.

$$E_{v2} > 125 + 0.96 * S \quad (5.1)$$

S står för standardavvikelsen bland de uppmätta E_{v2} -värden. Eftersom det har ställts högre krav i hamnen så har formel 5.1 modifierats något:

$$E_{v2} > 165 + 0.96 * S \quad (5.2)$$

Formel 5.2 har baserats på tidigare erfarenheter.

Beroende på skicket på de olika delytorna i den befintliga etappytan har det lagts till sammanlagt 0 till 0.45 m (i medel 25 cm) förstärknings- och cirka 8 cm bärlager. På de delytor som hade stora sättningar eller tjocka lager med asfalt var behovet av förstärkningslager större för att den erforderliga höjden skulle uppnås.

När det nyanlagda bärlagret var på plats utfördes en efterkontroll med statisk plattbelastning i nio punkter. Men i och med att kravet för bärlagret var ställt på förstärkningslagret så behövdes E_{v2} - värden där också. Genom konsultation med Klas Hermelin på Vägverket framkom att 1 cm bärlager ökar bärlagret med cirka 1,5-2 MPa.

Eftersom det läggs på cirka 8 cm bärlager på det nyutlagda förstärkningslagret så betyder det bärlagret ökar med cirka 14 MPa.

Men eftersom efterkontrollen har utförts på bärlagret och bärlagrets kravet finns för förstärkningslagret så måste de 14 MPa subtraheras från de, på bärlagret, uppmätta E_{v2} – värden, se tabell 5.1.

Tabell 5.1 E_{v2} -värden på bärlagret samt motsvarande värden på förstärkningslagret.

Punkt	9R	9Ö	9GG	1NN	8YY	6HH	1KK	4BB	4U
Bärlager – E_{v2}	184,7	175,1	168,7	202,9	202	171,7	186,3	137,9	192,4
Förstärkningslager – E_{v2}	170,7	161,1	154,7	188,9	188	157,7	172,3	123,9	178,4

Spridningen bland de nio E_{v2} -värden som har beräknats för det nyutlagda förstärkningslagret är 20 MPa, se bilaga 10: SPB -värdena 061117. När formeln för bärlagrets beräkning från föregående sida används fås bärlagrets kravet på ett nyutlagt förstärkningslager, i Skandiahallen, till $E_{v2}=184.2$ MPa.

Från diskussion med Anders Lenngren framgick att varje cm förstärkningslager ger en ökad bärlagret med cirka 0-2 MPa. Denna ökning är beroende av underliggande lagrets ytmodul samt förstärkningslagrets lagermodul, det vill säga hur mjukt lagret under är samt hur välpackat förstärkningslagret är. I det här fallet gjordes bedömningen att 1 cm förstärkningslager ökar bärlagret med 0.85 MPa, vilket är ungefär hälften av den ökning som bärlagret ger.

För att kunna veta vilket bärlagrets krav som skall gälla på ett visst djup i konstruktionen behövs exakt kunskap om hur mycket 1 cm bärlager respektive 1 cm förstärkningslager ökar bärlagret.

Eftersom det i genomsnitt behövdes läggas på cirka 25 cm förstärkningslager på den befintliga ytan för att den erforderliga höjden skulle uppnås, innebär detta att de båda vältarna kördes på en nivå som var 25 cm lägre än det färdigställda förstärkningslagret. Bärlagrets kravet på denna nivå blir 163 MPa. Beräkningsgången framgår nedan:

$$0.85 * 25 = 21.25 [MPa]$$

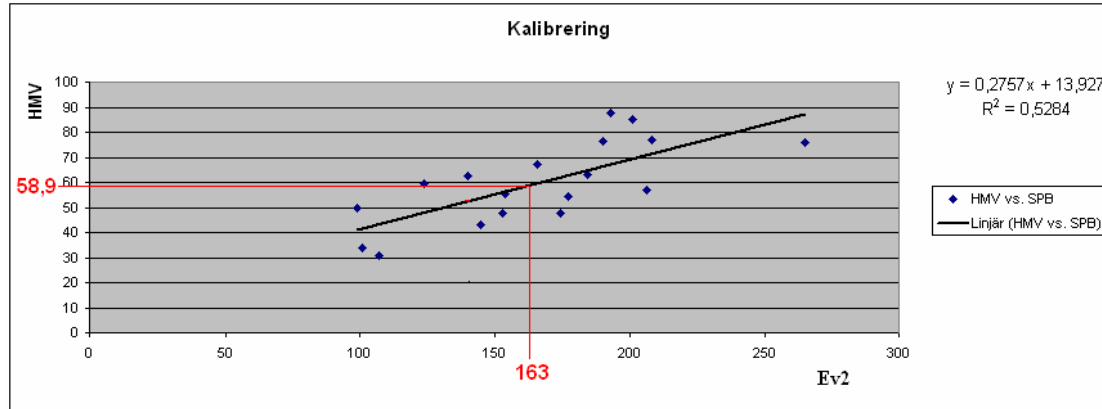
$$184.2 - 21.25 = 162.95 [MPa]$$

0.85 - bärlagretsökningen som fås av 1 cm förstärkningslager.

25 – antal cm förstärkningslager som behöver läggas till för att den erforderliga nivån skall uppnås.

184,2 - bärighetskravet på ett nyutlagt förstärkningslager.

Med kännedom om storleken på bärighetskravet för den befintliga ytan och de godkända kalibreringarna kunde motsvarande krav på CMV och HMV beräknas. De beräknade kraven är $CMV = 108.1$ och $HMV = 58.9$. Tillvägagångssättet för beräkningen framgår av figur 5.4.



Figur 5.4 Krav på bärighet för befintlig yta. $E_{v2} = 163$ MPa ger $HMV = 58.9$ MPa.

Utifrån de erhållna gränserna för HMV respektive CMV kan kartor som visar vilka delar av etappytan som är godkända respektive underkända ritas upp. Detta kan enkelt göras i de olika vältillverkarnas mjukvaror. I figuren 5.5 går det att se vilken del av ytan som inte uppfyller bärighetskravet.



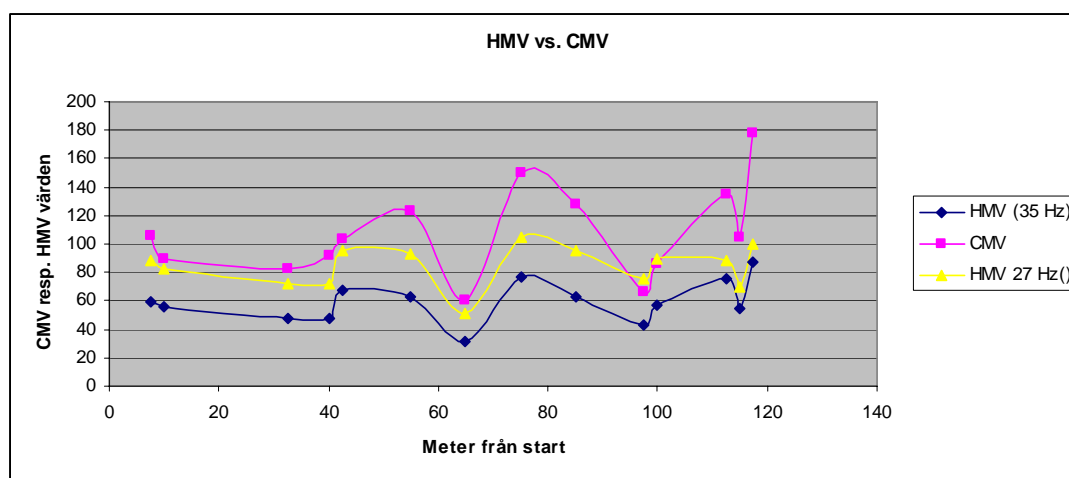
Figur 5.5 Etappens uppdelning då kravet på bärighet har fastställts. Den rödfärgade delen av ytan uppfyller inte bärighetskravet.

5.2 Jämförelse mellan Dynapac och Hammvälten

Positionen för de punkter som har undersökts med Hammvälten har noggrant bestämts med differential GPS (dGPS), vilket innebär att noggrannheten har varit mellan 20 cm – 2 m och att det gick att köra i nästan vilken riktning som helst medan resultaten erhöles kontinuerlig. När det gäller Dynapacvälten så har denna körts i endast raka spår och dessa är i sin tur fastställda med dGPS och måttband. Men eftersom välten vibrerar kraftigt kan det vara svårt att köra i raka spår. Detta kan i sin tur leda till att fel värden erhålls.

Den insamlade informationen från de två vältarna samlas i deras datorer för att sedan analyseras i mjukvaruprogrammen. Hamms mjukvara heter HCN (Hamm Compaction Navigator) medan Dynapacs kallas för DCA (Dynapac Compaction Analyzer). Med de båda mjukvarorna kunde ungefär samma resultat erhållas, men skillnaden var att Hamms mjukvara var lite enklare att använda samt att det gick att välja flera färgnyanser i figurerna. Problemet med den HCN -kopia som användes i examensarbetet är att språket var inställt på tyska och inte kunde ändras till något annat språk.

En jämförelse gjordes mellan värdena erhållna från försöken med Hammvälten respektive Dynapacvälten. En regressionsanalys av resultat från de båda vältarna gav en korrelationsdeterminant på 0.46, vilket är acceptabelt. Figur 5.6 visar att värdena från de två olika vältarna följs åt ganska väl i en längdsektion.



Figur 5.6 Jämförelse mellan CMV och HMV.

I figurerna 5.7 och 5.8 visas vilka delar av etappytan som uppfyller bärighetskravet, även här går det att se en likhet mellan de två vältarna.



Figur 5.7 Etappens uppdelning då kravet på H_{MV} har fastställts. Den rödfärgade delen av ytan uppfyller inte bärighetskravet.



Figur 5.8 Etappens uppdelning då kravet på C_{MV} har fastställts. Den rödfärgade delen av ytan uppfyller inte bärighetskravet.

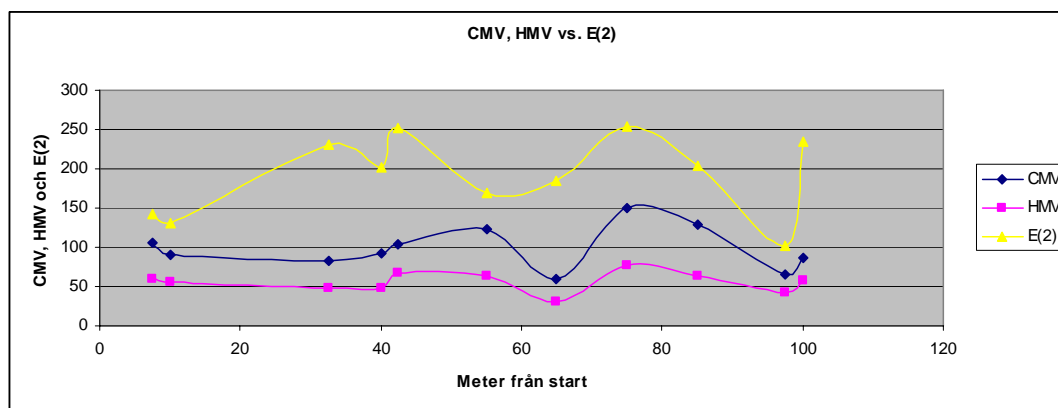
5.3 Jämförelse mellan FWD och YPK

Eftersom tung fallviktsundersökning utfördes direkt på den befintliga asfalten medan undersökningen med YPK utfördes när asfalten var bortriven, behövdes en metod som skulle möjliggöra att undersökningarna utfördes i exakt samma punkt. För att möjliggöra detta positionsbestämde de punkter som skulle undersökas med tung fallvikt med en dGPS. Som det angavs i kapitlet innan så användes en dGPS även vid YPK –undersökningarna. Detta säkerställde att undersökningarna utfördes i samma positioner.

Tung fallvikt är en metod som kan undersöka marken ner till ett djup på cirka 10 m, i vissa fall ännu djupare. Beroende på vilken vält som används för ytpackningskontroll (YPK) kan ett djup på cirka 3 m undersökas. Ju tyngre vält desto djupare kan den undersöka. Vid undersökningstillfället användes en vält på cirka 12 ton och en på 16 ton och det innebar ett undersökningsdjup på cirka 2 m. Tung fallvikt tar alltså hänsyn till mycket större djup än vad vältarna gör. Av den anledningen är det svårt att jämföra resultatet från dessa två metoder. Dessutom finns det även variationer mellan ytmodulen och undergrundsmodulen.

För att en rättvisande jämförelse skall kunna göras mellan dessa två metoder måste de undersöka på samma djup. Dynapacvälden kunde endast undersöka med låg amplitud och hög frekvens vilket motsvarar en undersökningsdjup mellan 0.5 och 1 m. Av denna anledning måste motsvarande värden från Hammvälden och tung fallvikt användas vid kalibreringen.

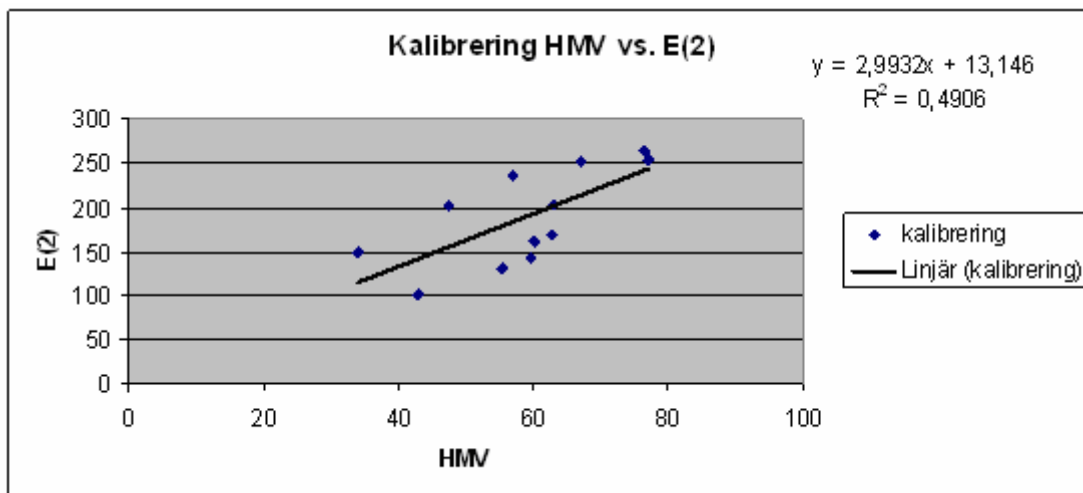
Utifrån de erhållna resultaten går det att se en tendens för samstämmighet mellan YPK och lagermodulen i Figur 5.9.



Figur 5.9 Jämförelse mellan YPK och E(2) i elva punkter.

Det kan urskiljas en del skillnader mellan de två metoderna. I Figur 5.9 går det att se att punkt 3 och 6 från vänster i E(2) -kurvan går i motsatt riktning i jämförelse med YPK -kurvorna. Detta kan bero på att asfaltstjocklekarna varierade en hel del och att det ibland var svårt att mäta dessa exakt. Vid beräkningen av lagermodulerna med Clevercalc kan detta leda till att det andra lagret tar del av asfaltens elasticitet och därför får en ökad lagermodul.

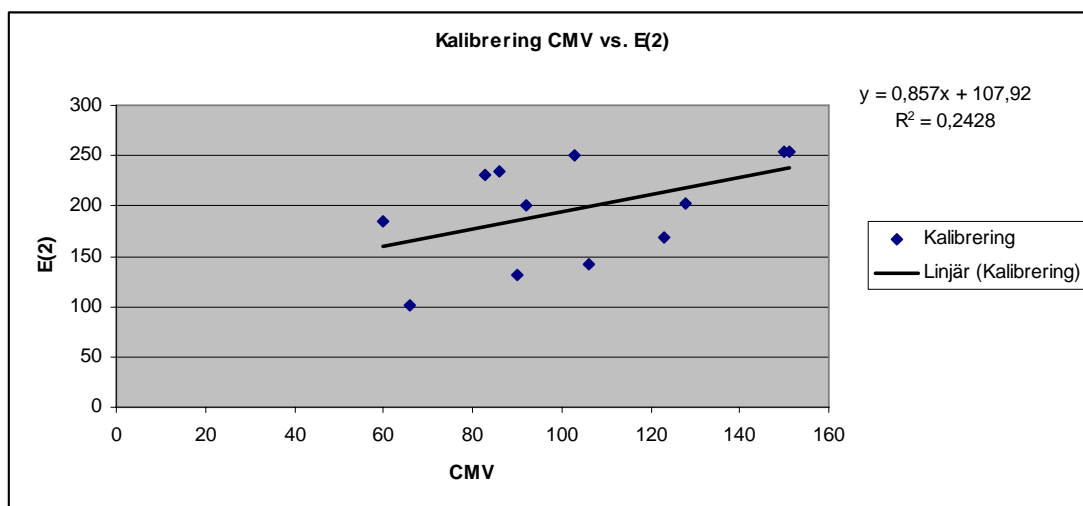
När kalibreringen mellan lagermodulen och HMV utfördes med alla 16 punkter erhöles en korrelationsdeterminant (R^2) på 0.29, vilket är lågt. Från Figur 5.10 framgår vad korrelationsdeterminanten blev när de tre mest avvikande punkterna togs bort.



Figur 5.10 Kalibrering mellan E(2) och HMV.

Eftersom det inte finns någon bestämmelse om vad korrelationsdeterminanten skall vara vid kalibrering mellan lagermodul och HMV rekommenderade Anders Lenngren att korrelationsdeterminanten skulle vara ungefär 0.8. Detta innebär att den erhållna korrelationsdeterminanten på 0.49 är något låg.

Då kalibreringen mellan CMV och lagermodulen E(2) utfördes med 13 punkter blev $R^2=0.08$, vilket är extremt lågt. När en av punkterna togs bort blev istället $R^2=0.24$, vilket är högre men fortfarande för lågt. Den andra kalibreringen kan ses i Figur 5.11.



Figur 5.11 Kalibrering mellan E(2) och CMV.

5.4 Jämförelse mellan provgröpar och andra provmetoder

Inget samband hittades mellan provgröparna och andra metoder för inventering, därför kan ingen slutsats dras.

Ett problem med provgröparna var att de endast hade ett djup på 1,5 m och att bärighetsvärdet som har fått fram genom andra inventeringsmetoder inte är beroende av enbart ett lager utan hur flera olika lager samverkar. Ett exempel är punkt 8WW, där E_{v2} som erhöles från de statiska plattbelastningsförsöken var 265 MPa, ett väldigt högt värde. YPK undersökningen med Hammvälten med en frekvens på 27 Hz gav ett H_{MV} på 88,4, ett relativt högt värde. Dessutom var enligt tung fallviktsförsöken punkt 8WW en av de starkaste på hela etappen, men när provgröpen grävdes i denna punkt var bärlagrets tjocklek 20 cm och förstärkningslagrets tjocklek 85 cm, som är genomsnittliga värden. Dock var asfalts tjockleken i denna punkt (49 cm) väldigt stor.

Eftersom tung fallviktsundersökningar gjordes på asfaltlagret kan det innebära att tjockleken på asfaltlagret var anledning till att höga värden erhöles. Dock Utfördes YPK och SPB undersökningar på bärlagret. Eftersom varken bär- eller förstärkningslagret var speciellt tjocka innebär det att undergrunden måste ha varit stabil.

Ytterligare en anledning till varför en slutsats inte kan dras var att alla provgröparna i etappen bestod av liknade material. Förstärkningslagret bestod av bergkross eller krossmaterial och terrassytan bestod av lera.

För att kunna dra en slutsats om hur bra provmetoderna stämde med verkligheten behövdes ett djup på cirka 10 m undersökas. Ett djup på 10 m kan undersökas med sonderingsprov. Företaget Carl Bro har undersökt några områden i Göteborgs Hamn med sonderingsprov dock inget område i närheten av etapp 11. Med anledning av stora variationer i grundens beskaffenhet i Göteborgs Hamn kunde inte sonderingsproven användas som en kontroll mot verkligheten. Vid en jämförelse skulle sannolikheten för en felaktig slutsats vara stor.

6 Slutsatser

Vid en jämförelse mellan värden som erhållits från en yttäckande packningskontroll (HMV, CMV) och statisk plattbelastning (Ev_2) i figur 5.1 ses att överensstämmelsen mellan HMV, CMV och Ev_2 var relativt god (figur 5.1).

En korrelation mellan (HMV/CMV) och (Ev_2) gav korrelationsdeterminanter på 0.53 respektive 0.37. Den främsta anledningen till att korrelationsdeterminanten blev bättre med Hammvälten var för att den var tyngre. Hammvälten vägde 16 ton och Dynapacvälten vägde 12 ton. På grund av att Dynapacvälten var lättare förekom dubbelslag oftare vid yttäckande packningskontroll. Dubbelslagen medförde att flera CMV ströks, som därmed medförde en sämre korrelationsdeterminant.

Ytterligare en nackdel med Dynapacvälten var att den saknade dGPS, vilket innebar att vid vältförsöken var Dynapacvälten tvungen att hålla ett spår som mättes ut med måttband och därefter markerades med spray. Att hålla ett rakt spår var en svår uppgift på grund av att välten vibrerade kraftigt, och detta är en anledning till att reproducerbarheten för de olika vältöverfarterna blev svagt.

En tredje nackdel med Dynapacvälten var att vältens trumma endast kunde vibrera med två frekvenser (hög och låg frekvens) och med endast en amplitud. Frekvensen som Hammvältens trumma vibrerade med kunde ställas in stegvis, dessutom kunde Hammvältens amplitud ställas in. Att amplituden kunde ställas in på Hammvälten innebar att vid en hög amplitud kunde välten undersöka ett djup på 1,5-2 m och vid en låg amplitud ett djup på 0,5-1 m. Dynapacvälten kunde endast undersöka ett djup på 0,5-1 m. Att frekvensen kan ställas in stegvis är en fördel på grund av att risken för dubbelslag blir mindre vid en yttäckande packningskontroll.

En fjärde anledning till att Dynapacvälten gav en sämre korrelationsdeterminant var att den var en prototyp (en modell som inte var färdig utvecklad). Anledningen till att en prototyp användes vid undersökningarna var att ingen annan vält som motsvarade Hammvälten fanns tillgänglig i regionen. På grund av att välten var en prototyp dröjde det ett tag innan rätt frekvens uppnåddes, detta medförde att CMV i början av yttäckande packningskontroll av varje stråk blev felaktig.

Korrelationsdeterminanten för både vältarna var dock godkänd enligt Vägverkets metodbeskrivning 606. Men det bör även påpekas att dagen då de statiska plattbelastningsförsöken utfördes regnade det kraftigt. Att marken var blöt vid försöken innebar att värden som fåtts från statiska plattbelastningsförsöken påverkats något, och är därmed inte helt korrekta. Om försöken däremot hade gjorts på torr grund skulle värdena vara mer korrekta.

Bärighetskravet på ett nyutlagt förstärkningslager erhöles genom formel 5.2, formeln är en modifikation av formel 5.1 som finns i Vägverkets ATB-väg 2002, sid. 34. Modifikationen gjordes för att ta hänsyn till de tunga lasterna som finns i hamnen. Gränsen för god bärighet beräknades till 184.2 MPa. Men eftersom undersökningarna med YPK och SPB utfördes på den befintliga ytan behövdes ett bärighetskrav där också. Bärighetskravet där kunde beräknas fram eftersom det i genomsnitt hade lagts till 25 cm förstärkningslager för att den erforderliga nivån skulle uppnås och vetskapen fanns om hur mycket varje cm förstärkningslager ökade bärigheten.

Bärighetskravet på den befintliga ytan kunde därför sättas till 140.2 MPa. Punkterna på etappen som klarade av bärighetskravet var ganska många enligt figur 5.5.

Vid jämförelse mellan YPK och SPB gick det att se att värden från de båda testmetoderna hade samma tendens och att kurvorna följdes åt väldigt väl (figur 5.1). Kravet på korrelationsdeterminanten (R^2) vid kalibreringen mellan SPB och HMV respektive SPB och CMV klarades i båda fallen. Kravet som gäller i Sverige är att korrelationsdeterminanten skall vara större än 0.36. För kalibreringen mellan SPB och HMV blev den 0.52 och mellan SPB och CMV blev den 0.37.

Om CMV och HMV-värden plottas mot värden som fås från tung fallviktsförsöken, E(2), (figur 5.9)) visas att kurvorna följer varandra ganska väl. Det är endast i ett fåtal punkter som kurvorna avviker. Korrelationsdeterminanten (R^2) från kalibreringen av E(2) och HMV blev 0.49 vilket är under riktvärdet på 0.8 men dock godkänt. Vid kalibreringen av E(2) och CMV blev korrelationsdeterminanten 0.24, vilket är för lågt.

Detta examensarbete har visat att yttäckande packningskontroll är en fullt användbar inventeringsmetod dock inte den bästa för att inventera befintliga konstruktioner i Göteborgs Hamn. Yttäckande packningskontroll är inte den bästa metoden på grund av att den undersöker ett maxdjup på 3 m. Problemet som visades med provgroparna ligger inte i de översta lagren, vilket väkten undersöker, utan djupare ner i undergrunden (cirka 10 m).

7 Diskussion, framtida undersökningar och rekommendationer

En kalibrering mellan yttäckande packningskontroll och statisk plattbelastning har visat att Hammvälten ger ett mera samstämmigt resultat än Dynapacvälten. Jämförelsen var dock inte helt rättvis. Om en jämförelse skall göras i framtiden mellan olika vältrar bör den göras med:

- Vältrar som är av samma vikt och linjelast.
- Vältrar som är utrustad med dGPS.
- Vältarnas amplitud och frekvens bör kunna ställas in stegvis.
- Inga av vältarna får vara prototyper

Utifrån de erhållna resultaten och jämförelsen med andra testmetoder kan slutsatsen dras att yttäckande packningskontroll är en bra metod för att undersöka ovanliggande lagren i en befintlig konstruktion. Metoden är enkel och snabb samt resultat erhålles på ett lättöverskådligt sätt. Ifall det visar sig att bärighetskravet inte uppfylls kan välten användas för ytterligare ett par överfarer. Om ytterligare examensarbeten skall göras om yttäckande packningskontroll skulle det vara intressant att:

- Jämföra resultat från de olika välttillverkarnas värden för yttäckande packningskontroll. Detta har gjorts i examensarbetet med en Hamm och Dynapacvält. Dock är både CMV och HMV utvecklade i samarbete med Geodynamik och därför är dessa värden snarlika. Det hade därför varit av stort intresse om en jämförelse hade gjorts mellan en välttillverkare som använder Geodynamiks bärighetmått som grund och Bomags E_{vib} system eller Ammanns k_s .
- Att ta reda på hur djupt en vält undersöker vid yttäckande packningskontroll. I examensarbetet har en 16 tons vält och en 12 tons vält används. Dock finns det vältrar som väger mer än så. Det skulle därför vara av stort intresse att undersöka djupverkningsgraden av till exempel en 25 tons vält.

För Göteborgs Hamn är inte yttäckande packningskontroll den bästa inventeringsmetoden. Vid en yttäckande packningskontroll undersöks endast de ovanliggande lagren (slitlagret, förstärkningslagret och bärlagret). Problemet i hamnen är inte de ovanliggande lagren utan undergrunden. Stora delar av hamnen är grundlagd på en ”soptipp”. När hamnen grundlades fanns inga containrar, endast styckegods. Det är lasterna från containrarna tillsammans med grensletruckarna som utsätter hamnens grund för stora påfrestningar. Lasterna från containrarna och grensletruckarna verkar på flera meters djup.

Trots att undergrunden har utsatts för stora belastningar sedan hamnen anlades har mätningarna med tung fallvikt visat att sättningarna inte har avstannat och kan pågå under ännu en tid

För tillfället staplas maximalt tre containrar på varandra. Vid en expansion av hamnens godstrafik kommer fler containrar att staplas på varandra, vilket kommer att medföra stora stabilitetsproblem om inga åtgärder vidtas. För framtida undersökningar av grunden bör tung fallvikt kombinerad med sonderingsprov användas. Fallvikten undersöker ett djup ner på 10 m. Resultaten från fallvikten skall därefter kontrolleras mot verkligheten, det vill säga resultat från sonderingsprovet.

Referenser

7.1 Publicerad litteratur

[10] Anderegg R, Kaufmann K (2004): Intelligent Compactions with Vibratory Rollers, Feedback Control Systems in Automatic Compaction and Compaction Control. Transportation Research Journal of the Transportation Research Board No 1868 TRB National Research Council Washington D C 2004, pp 124-134.

[9] Ammann (2002), *Compaction Guide*, Ammann, Verdichtung.

[15] Dietmar A. (1996): *Flächendeckende dynamische verdichtungskontrolle (FDVK) mit vibrationswalzen*. Technischen Universität Wien, Mödling.

[7] Floss R. (2001), *Compaction Technology in Earthwork and Highway and Transportation Engineering*. Bomag GmbH & Co. OHG, Boppard.

[6] Forssblad L. (2000): *Packning*. Svensk Byggtjänst, Stockholm.

[16] Floss R, Kröber W, Wolfgang W. (2001): *Infrastructure Construction Systems and Technologies, Dynamic Soil Stiffness as Quality Criterion for Soil Compaction*. Verlag Glückauf GMBH, Essen.

[21] Siedek P, Floss R (1977), *Handbuch des Straßenbaus*, Heidelberg, Berlin.

7.2 Opublicerad litteratur

[18] Floss R, Kloubert H J. (2000), *Latest innovation in soil and asphalt compaction*, International workshop on compaction of soils, granulates and foundations, Innsbruck 28-29 2000.

[17] Kloubert H J. (2006), *Intelligent Soil and Asphalt Compaction Technology*, 85th TRB Annual Meeting, Washington D C , January 20,2006.

7.3 Internet

[2] VV Metodbeskrivning 112 (1998), Vägverket publikation: *Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat*, www.vv.se/filer/publikationer/vvmb112.pdf 31/10/2005.

[3] VV Metodbeskrivning 114 (2000), Vägverket publikation: *Bearbetning av deflektionsmätdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat*, www.vv.se/filer/publikationer/vvmb114.pdf 03/11/2005.

[13] VV Metodbeskrivning 603 (1994), Vägverket publikation: *Yttäckande packningskontroll*, <http://www.vv.se/filer/publikationer/vvmb603.pdf> 15/12/2006.

- [5] VV Metodbeskrivning 606 (1993), Vägverket publikation: *Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning*, www.vv.se/filer/publikationer/vvmb606.pdf 03/11/2005.
- [8] Geodynamik, *Continuous Compaction Control CCC (2006)*, http://www.geodynamik.com/languages/pdf/pari_gb.pdf 15/12/2006.
- [4] Geodynamik, *Dokumentationssystem för Yttäckande Packningskontroll CDS-012-J (2006)*, www.geodynamik.com/languages/pdf/mcdse010.pdf 03/03/2006.
- [12] Geodynamik, *Numerical simulation of a vibratory roller on cohesionless soil (2006)*, <http://www.geodynamik.com/languages/pdf/Simvib2.pdf>, 15/12/2006.
- [11] Geodynamik, *Quality Assurance and Self Control in Road Construction Advanced Measurement Technology (2006)*, Heniz F Thurner, http://www.geodynamik.com/languages/pdf/bauma_gb.pdf 02/01/2006.
- [14] Geodynamik, *Intelligent Systems for QA/QC in soil compaction (2006)*, Åke J. Sandström och Carl B. Pettersson, http://www.geodynamik.com/languages/pdf/pari_gb.pdf 02/01/2006

7.4 Muntliga källor

- [1] Carlsson, Håkan. VTI, Linköping
- [19] Pettersson, Carl Bertil. Geodynamik, Stockholm
- [20] Schröder, Ralf. Hamm, Tirschenreuth

8 Förteckning över bilagor

Bilaga 1: Karta över Skandiahamnen och placering av etapp 11.

Bilaga 2: Tidplanen för examensarbetet.

Bilaga 3: Punkter som undersöktes med tung fallvikt.

Bilaga 4: Undergrundsmodulen, ytmodulen och bärighetsindex för punkterna som undersöktes med tung fallvikt.

Bilaga 5: Asfaltstjocklekar för punkter som undersöktes med statisk plattbelastning.

Bilaga 6: Rådata från programmet Clevercalc.

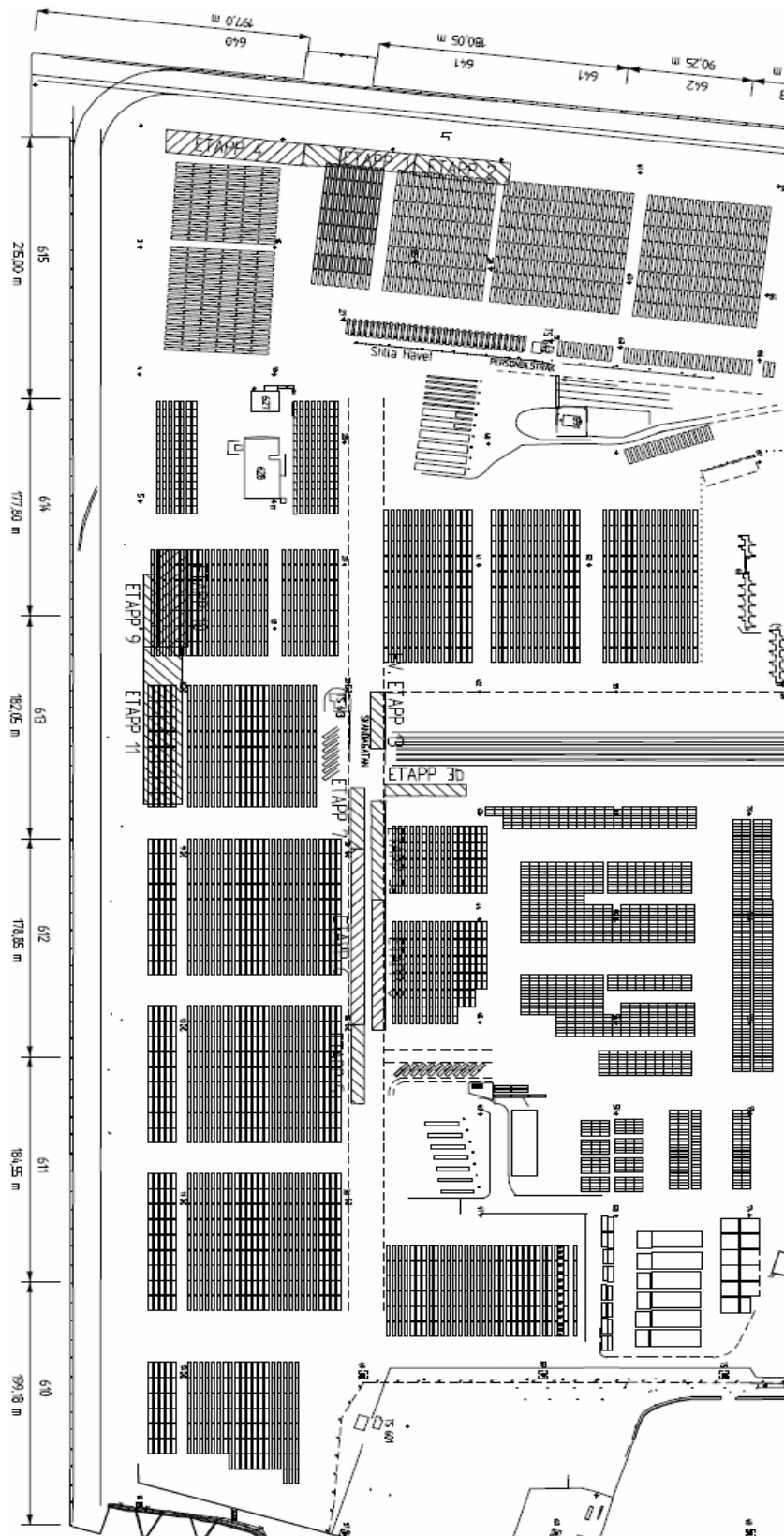
Bilaga 7: Regressionsanalys mellan H_{mv} och CMV.

Bilaga 8 Variation i CMV .

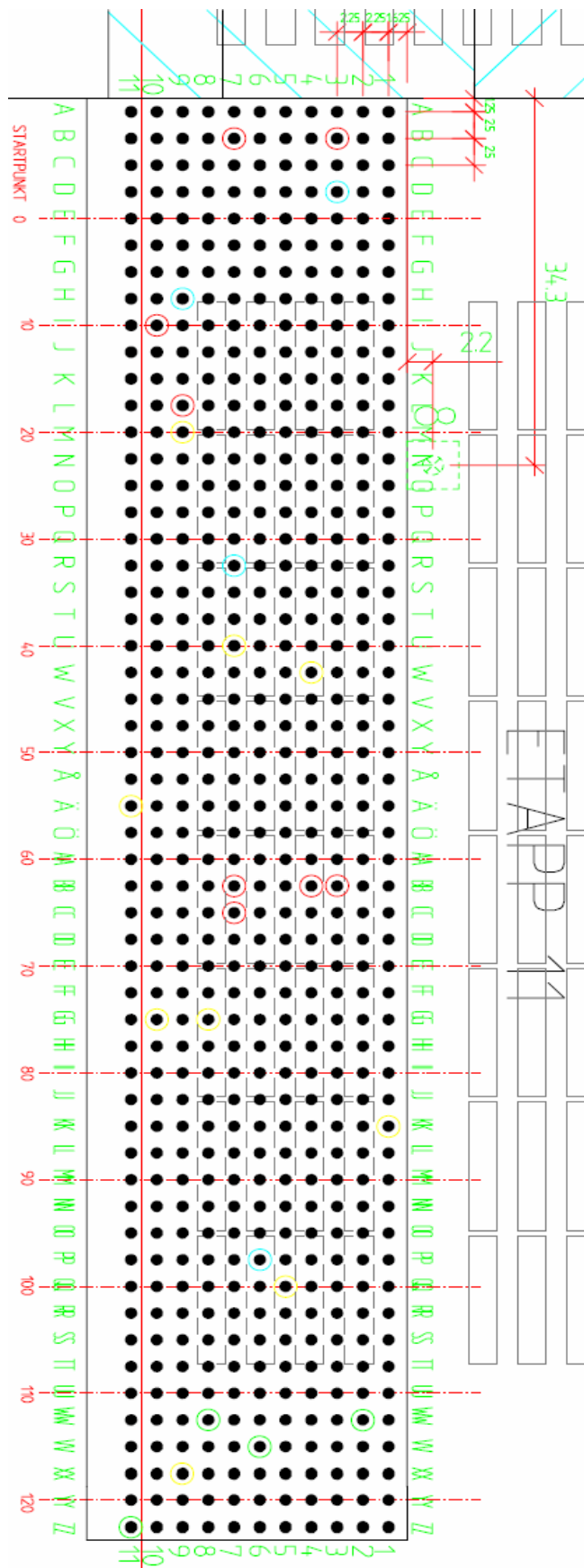
Bilaga 9 Variation i H_{mv}.

Bilaga 10: SPB -värdena 061117

Bilaga 1: Karta över Skandiahamnen och placering av etapp 11.



Bilaga 3: Punkter som undersöktes med tung fallvikt.



	PP	QQ	RR	SS	TT	UU	VV	VV	XX	YY	ZZ
1	236 249 12.3	225 270 12.3	237 282 13.2	269 263 13.9	321 253 14.1	343 272 16.8	319 299 15.7	313 235 16.7	284 258 17.1	276 176 14.5	275 227 10.9
2	230 224 13.4	236 227 13.7	230 237 14.6	275 230 18.0	318 251 15.5	321 233 15.7	341 265 16.7	332 271 18.2	304 204 17.8	302 212 12.3	235 222 11.3
3	221 224 13.1	225 207 15.3	225 207 15.2	255 204 17.6	260 198 16.3	273 212 17.0	276 230 18.2	321 244 16.9	243 239 15.7	217 187 9.8	203 214 8.8
4	230 260 10.8	249 276 11.0	267 276 12.3	262 283 14.4	292 279 14.7	310 283 14.1	321 273 15.8	311 253 17.9	302 207 14.5	252 208 10.6	198 254 9.6
5	193 160 9.3	229 238 9.3	248 240 11.1	276 237 13.2	292 231 15.5	319 259 14.5	341 261 15.7	323 224 17.2	311 226 14.2	296 200 10.3	221 221 8.7
6	209 269 11.3	222 229 9.6	228 247 11.8	248 217 14.7	268 236 14.8	322 228 15.4	319 268 17.5	345 242 17.4	303 219 13.1	265 229 8.7	231 212 9.4
7	193 309 9.7	205 251 10.4	253 288 12.2	274 248 15.0	265 281 14.3	261 266 15.5	309 308 15.2	356 253 17.1	282 253 13.0	265 189 9.4	250 186 9.8
8	200 299 6.7	209 294 8.7	219 264 8.3	247 309 11.1	252 291 14.1	281 333 15.5	334 279 18.3	283 258 16.9	284 231 13.2	275 197 8.7	230 210 8.8
9	195 192 7.5	217 193 10.5	227 308 12.4	239 267 14.2	238 280 14.6	269 271 15.6	203 286 14.6	273 218 18.1	268 149 12.2	249 172 8.7	230 205 9.2
10	217 305 7.0	244 293 9.8	275 274 9.6	236 275 10.4	237 271 12.4	221 318 13.5	241 290 14.4	231 210 11.8	237 191 8.8	231 226 7.3	307 252 8.2
11	187 233 8.0	228 185 9.4	206 277 9.5	203 240 10.4	257 260 11.0	215 270 11.0	241 308 12.6	198 189 12.7	238 189 12.7	425 168 10.6	362 233 9.6

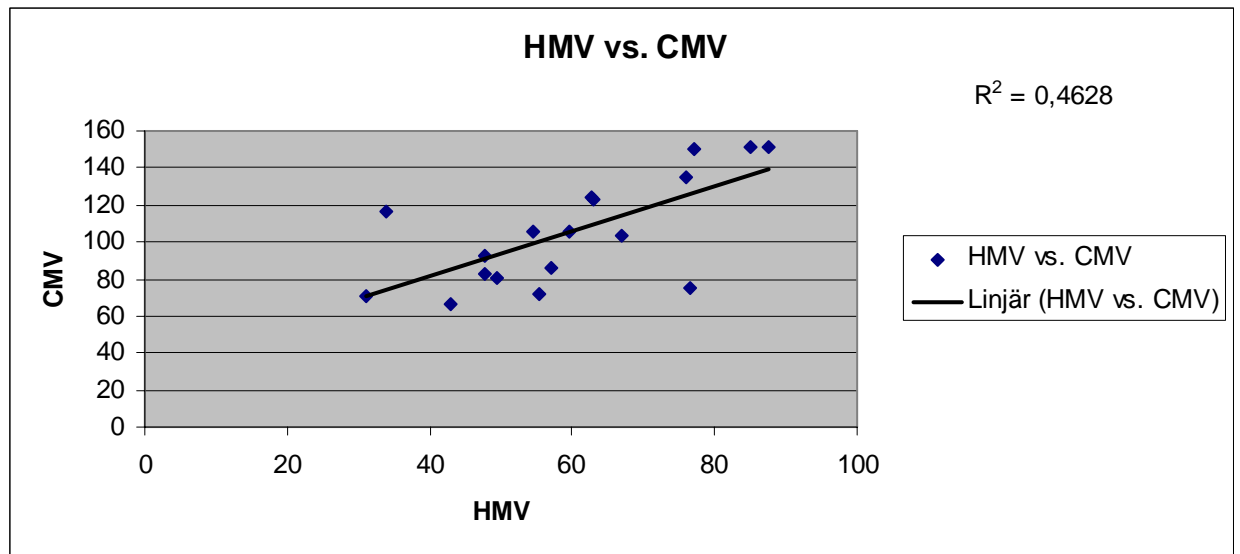
Bilaga 5: Asfaltstjocklekar för punkter som undersöktes med statisk plattbelastning.

Punkt	Asfaltstjocklek (cm)
7B	12
9H	16,5
10 I	16,5
9 L	14,5
9M	15
7R	15
7U	16
4W	30
11Ä	15
4BB	
7 BB	7,5
7 CC	8
8 GG	16
10 GG	16
1 KK	25
6PP	32
5 QQ	35
8WW	49
6VV	55
9 XX	50
11ZZ	20

Bilaga 6: Rådata från programmet Clevercalc.

sektion	E150	E(1)	E(2)	E(3)	T0C	T"j-1	T"j-2	T"j-3	RMS	Co	slag	Kraft
7B	4301	3880	152	235	16.4	298	-948	-110	1.28	2	2	50.6
7B	4871	4394	191	234	16.4	255	-804	-106	1.13	2	3	50.8
7B	4930	4447	189	228	16.4	191	-603	-81	.96	1	4	38.2
7B	5372	4846	162	248	16.4	95	-307	-38	2.01	2	5	19.1
9H	4502	4001	117	248	16.6	144	-430	-61	1.97	2	2	49.7
9H	4372	3885	157	205	16.6	137	-394	-73	.58	1	3	49.6
9H	4431	3937	142	278	16.6	104	-303	-43	1.67	2	4	37.0
9H	4554	4046	166	215	16.6	48	-138	-25	.91	1	5	18.2
10I	14964	8561	131	183	22.0	83	-282	-69	.48	1	2	48.9
10I	14936	8546	163	181	22.0	81	-266	-72	.38	1	3	49.4
10I	14720	8422	153	222	22.0	60	-201	-45	.85	1	4	36.2
10I	12399	7094	216	167	22.0	31	-97	-29	1.24	2	5	17.6
9L	16641	15352	171	329	16.1	87	-300	-52	1.00	1	2	49.7
9L	14891	13737	254	281	16.1	87	-280	-62	.46	1	3	49.9
9L	11950	11025	324	266	16.1	71	-220	-49	1.22	2	4	37.3
9L	9671	8922	430	216	16.1	37	-109	-27	2.13	2	5	18.4
9M	16313	14495	184	334	16.6	83	-280	-50	.92	1	2	49.4
9M	16400	14573	257	297	16.6	77	-249	-56	.52	1	3	49.8
9M	18015	16008	217	391	16.6	55	-186	-33	1.21	2	4	37.1
9M	10203	9066	460	211	16.6	33	-97	-26	3.06	2	5	18.2
7R	5612	4303	183	241	18.5	178	-543	-84	.99	1	2	48.8
7R	5965	4573	229	251	18.5	160	-481	-79	1.76	2	3	49.0
7R	5704	4373	238	249	18.5	120	-358	-59	1.57	2	4	36.0
7R	6348	4867	224	237	18.5	54	-165	-29	1.74	2	5	17.3
7U	6172	4582	146	286	18.9	165	-515	-69	.72	1	2	49.2
7U	6799	5048	177	308	18.9	147	-454	-64	.85	1	3	49.5
7U	5440	4039	218	253	18.9	118	-349	-57	.44	1	4	36.0
7U	6356	4719	184	281	18.9	54	-164	-25	1.19	2	5	17.4
4W	3898	1699	256	223	25.0	145	-402	-75	2.23	2	2	49.3
4W	4023	1753	325	236	25.0	131	-360	-70	1.97	2	3	49.6
4W	3635	1584	337	234	25.0	101	-274	-52	2.02	2	4	36.2
4W	2992	1304	431	166	25.0	49	-130	-29	2.52	2	5	17.5
11A	17191	8683	169	237	23.4	81	-274	-62	1.54	2	2	48.8
11A	15968	8066	229	210	23.4	80	-259	-70	1.53	2	3	48.9
11A	15110	7632	227	227	23.4	61	-199	-50	1.89	2	4	36.0
11A	16783	8478	225	219	23.4	27	-89	-24	1.91	2	5	17.3
7BB	12303	9508	100	192	18.4	275	-1123	-141	1.44	2	2	49.1
7BB	14478	11189	136	212	18.4	223	-894	-126	1.73	2	3	49.1
7BB	16251	12559	135	239	18.4	152	-617	-82	2.22	2	4	36.0
7BB	13332	10303	150	221	18.4	80	-313	-43	2.63	2	5	17.2
7CC	7473	6343	110	171	17.2	341	-1287	-160	2.39	2	2	48.6
7CC	8399	7130	162	190	17.2	276	-1016	-140	2.17	2	3	49.0
7CC	8694	7380	194	174	17.2	194	-711	-100	2.23	2	4	35.9
7CC	6646	5641	185	194	17.2	105	-377	-49	1.72	2	5	17.3
8GG	3322	2713	232	279	17.7	215	-619	-79	2.32	2	2	49.2
8GG	3569	2914	282	300	17.7	191	-545	-72	1.52	2	3	49.3
8GG	3251	2655	291	270	17.7	145	-411	-57	1.99	2	4	35.9
8GG	3242	2647	253	254	17.7	72	-207	-29	1.50	2	5	16.9
10GG	2141	1564	249	224	19.1	267	-749	-96	3.89	2	2	49.0
10GG	2572	1879	289	249	19.1	227	-637	-86	3.65	2	3	49.2
10GG	2406	1758	281	260	19.1	175	-492	-62	3.40	2	4	36.2
10GG	1841	1345	289	198	19.1	95	-264	-37	5.24	2	5	17.5
1KK	1821	895	174	235	23.7	200	-536	-74	2.10	2	2	49.3
1KK	2025	995	204	229	23.7	176	-470	-73	2.01	2	3	49.3
1KK	1963	965	209	227	23.7	130	-344	-53	1.96	2	4	35.8
1KK	1962	964	197	228	23.7	64	-170	-26	2.04	2	5	17.2
6PP	5920	3950	82	821	20.2	65	-211	-9	3.52	2	2	49.0
6PP	6364	4247	101	433	20.2	60	-187	-18	1.54	2	3	49.1
6PP	5463	3646	182	271	20.2	45	-127	-25	1.61	2	4	35.9
6PP	4573	3052	250	216	20.2	23	-61	-16	2.30	2	5	17.1
5QQ	4154	2635	235	279	20.8	62	-165	-35	1.40	2	2	49.3
5QQ	4201	2666	256	289	20.8	60	-158	-34	1.49	2	3	49.1
5QQ	3823	2425	306	272	20.8	44	-116	-28	1.51	2	4	36.0
5QQ	3528	2239	359	237	20.8	22	-55	-15	1.87	2	5	17.4
8WW	9762	8414	229	279	17.0	17	-48	-15	3.07	2	2	48.9
8WW	7058	6084	92	1108	17.0	24	-83	-3	4.10	2	3	49.4
8WW	7606	6556	95	765	17.0	16	-57	-4	3.25	2	4	36.1
8WW	6506	5608	69	.1E+07	17.0	9	-34	0	3.78	2	5	17.0
6VV	14089	7378	163	529	23.0	10	-35	-6	3.19	2	2	49.6
6VV	13665	7156	267	444	23.0	10	-30	-8	2.18	2	3	49.9
6VV	13528	7084	467	354	23.0	7	-19	-8	1.87	2	4	37.0
6VV	12622	6609	216	459	23.0	4	-12	-3	2.69	2	5	18.1
9XX	4828	2691	49	57972	22.3	33	-129	0	3.66	2	2	49.2
9XX	5118	2852	70	1069	22.3	31	-110	-4	3.83	2	3	49.5
9XX	5032	2804	56	.1E+08	22.3	24	-89	0	3.52	2	4	36.6
9XX	4778	2663	118	412	22.3	11	-34	-4	6.18	2	5	17.7
11ZZ	10483	5343	264	662	23.3	70	-214	-25	2.01	2	2	49.1
11ZZ	10254	5227	298	708	23.3	70	-209	-25	3.64	2	3	49.4
11ZZ	8732	4451	328	589	23.3	57	-166	-23	3.75	2	4	36.7
11ZZ	8266	4213	315	616	23.3	29	-86	-11	3.76	2	5	18.1

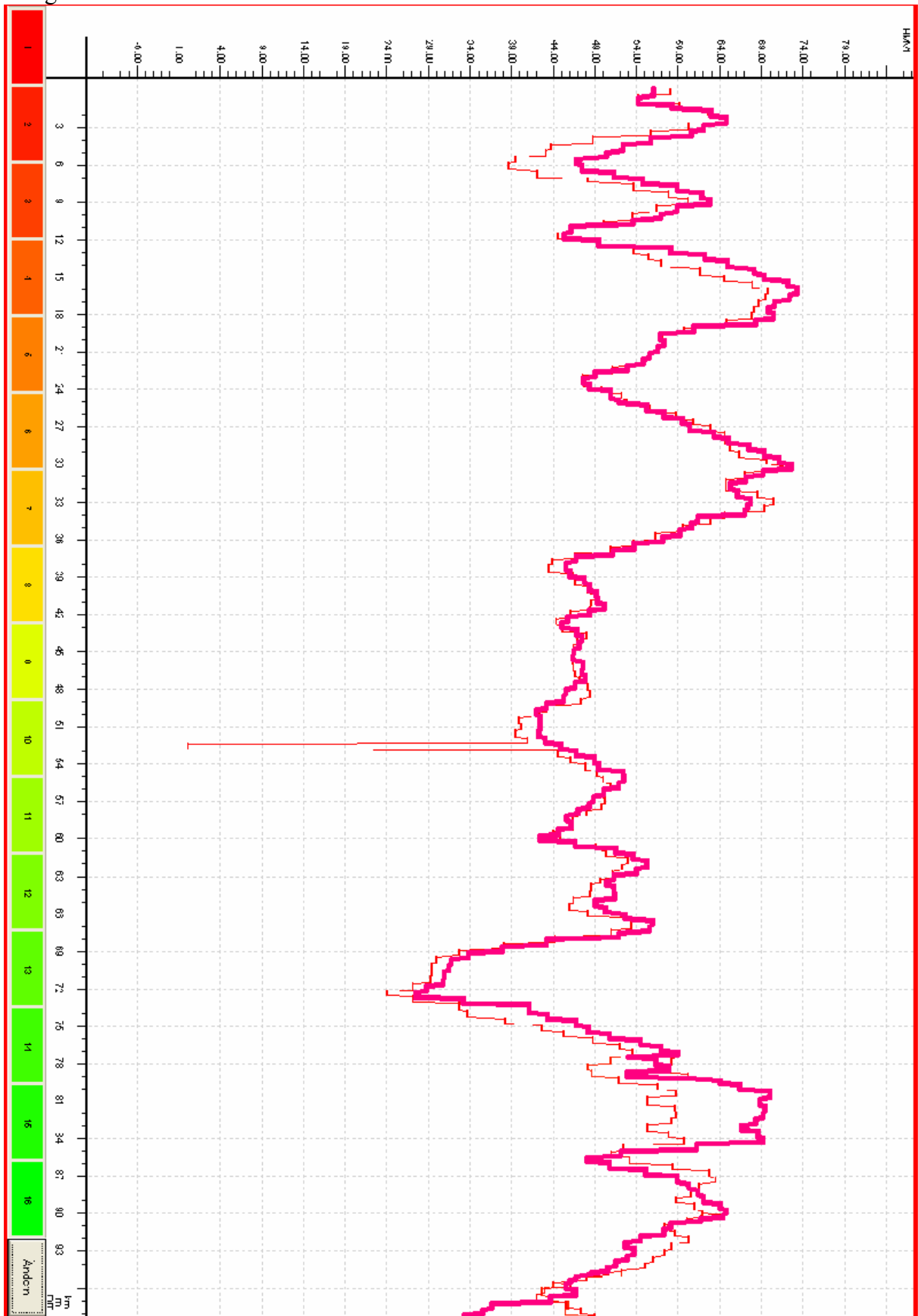
Bilaga 7: Regressionsanalys mellan HVM och CMV.



Bilaga 8: Procentuellvariation i CMV efter de två sista överfarterna.

167		**1**			**1**	48	1	23	6		
122		**1**			**1**	22	-3	-23	1	1	-44
	-16	**1**			**1**	35	-9	-5	34	-6	-6
120	-22	**1**		48	23	-1	19	-24	3	12	20
	-25	**1**		9	35	-3	15	-14	7	12	20
118	1	**1**		6	23	19	61	2	15	19	10
	-1	**1**		-11	49	-8	32	27	31	11	-2
116	13	**1**		8	69	15	47	56	33	8	1
	30	**1**		6	33	-1	-11	24	38	16	3
114	22	**1**		5	68	4	28	59	30	4	-6
	-25	**1**		12	53	-15	-18		15	1	-15
112	-28	**1**		10	17	22	15		15	5	-2
	1	**1**		-7	21	40	15	68	12	-5	12
110	23	**1**		-21	41	2	9	67	-6	-23	17
	9	**1**		-39	32	-11	15	30	-5	-10	26
108	17	**1**		3	24	-14	-1	10	17	14	12
	-3	**1**		2	45	9	-10	23	20	3	9
106	28	**1**		1	1	8	71	18	-4	-1	1
	34	**1**		20	21	24	40	19	12	-8	1
104	23	**1**		39	10	13	-1	32	16	-16	1
	19	**1**		38	8	2	-2	38	26	-27	5
102	-9	**1**		15	-4	7	-11	20	26	-25	11
	1	**1**		-3	1	5	-11	20	22	-14	1
100	2	**1**		-6	-3	4	-4	33	16	2	-23
	-5	**1**		30	-2	4	11	62	13	22	-27
98	-7	**1**		12	-8	19	45	77	19	61	-16
	-1	**1**		-7	-23	-21	-23		29	40	-2
96	10	**1**		-36	-10	14	-3		26	86	14
	20	**1**		-20	-22	41	44	76	16		10
94	27	**1**		48	4	39	28	42	22		1
	14	**1**		23	4	35	6	31	27	75	-9
92	14	**1**		-6	1	-1	32	17	22	52	-14
	-11	**1**		-31	9	-13	-20	19	12	37	-6
90	-4	**1**		31	17	8	-17	31	5	26	-6
	4	**1**		-34	73	3	-12	34	-4	22	-25
88	-7	**1**		-13	19	16	4	25	4	21	-49
	11	**1**		1	40	-21	-12	45	-2	16	-55
86	12	**1**		12	39	-16	-3	48	-5	8	-29
	3	**1**		5	21	23	-12	38	-2	14	-24
84	-4	**1**		-20	9	-2	-1	53	1	36	-26
	-1	**1**		34	12	21	-17	62	-2	76	-20
82	9	**1**		-30	3	3	-1	53	-3		-20
	12	**1**		-22	24	24	17	32	-4	81	-3
80	27	**1**		61	48	12	5	51	-8	51	2
	22	**1**		43	26	16	20	51	5	13	-16
78	-4	**1**		99	-11	18	5	69	7	7	-26
	-13	**1**		22	-16	-12	-22	22	5	1	-18
76	-4	**1**		-12	-4	12	21	8	6	3	-7
	14	**1**		-15	5	3	12	7	3	19	-20
74	14	**1**		-20	-7	-21	-8	12	1	30	-23
	30	**1**		20	-7	-5	2	26	-4	12	-26
72	-16	**1**		1	19	14	-7	47	-20	7	-23
	11	**1**		-16	18	11	-7	64	10	26	2
70	10	**1**		28	8	49	-13	28	15	29	-8
	1	**1**		1	11		20	10	5	25	1
68	11	**1**		-30	47	22	-13	13	3	53	-9
	6	**1**		-33	76	9	-10	17	8	56	-2
66	-15	**1**		-26	86	-3	-24	12	18	15	15
	-32	**1**		44	4	-41	2	6	15	16	5
64	-40	**1**		48	-20	-31	-16	16	8	-6	8
	-33	**1**		89	-19	-3	-3	15	59	-4	11
62	-23	**1**		8	-10	35	12	25	6	-3	21
	-9	**1**		-18	-7	-61	-3	19	1	-12	31
60	5	**1**		25	-12	27	-10	16	1	-2	58
	-2	**1**		42	6	4	-13	23	-1	24	99
58	-12	**1**		31	26	17	-3	17	-8	93	74
	-22	**1**		-14	32	5	5	16	-4	54	51
56	-23	**1**		11	20	-15	-3	15	-9	96	35
	6	**1**		-8	10	2	2	19	-6	49	36
54	-22	**1**		5	10	-2	4	26	4	29	
	-8	**1**		-7	25	4	6	20	16	23	
52	-14	**1**		-2	21	5	6	18	17	67	15
	29	**1**		30	14	2	2	27	-1	37	36
50	-5	**1**		2	1	1	4	41	-4	31	42
	-1	**1**		13	12	7	3	13	-10	25	13
48	2	**1**		29	-3	27	10	1	-5	13	-2
	12	**1**		61	1	-1	10	-29	-1	7	4
46	12	**1**		9	22	-9	17	-36	-2	10	18
	12	**1**		16	1	1	22	-8	18	18	35
44	12	**1**		27	16	24	26	2	22	18	41
	-20	**1**		27	32	17	7	2	12	10	
42	-2	**1**		14	36	40	10	-10	-1	14	-15
	19	**1**		2	22	5	13	-6	-4	20	-9
40	40	**1**		-9	8	-7	2	-4	-6	1	-6
	7	**1**		3	4	1	19	-29	-4	2	-18
38	43	**1**		1	-5	-4	3	-18	10	6	-31
	-11	**1**		-20	-10	-8	4	-16	5	5	-26
36	-1	**1**		-28	-10	-3	11	12	-10	17	-19
	1	**1**		8	-4	18	12	56	-9	38	-2
34	15	**1**		-5	6	21	32	27	-1	50	7
	-10	**1**		-27	8	-9	-1	1	4	47	53
32	-12	**1**		-19	-1	1	-19	-14	6	30	60
	-12	**1**		-11	-3	38	-17	-13	11	23	71
30	-2	**1**		2	-11	35	-15	-5	15	19	24
	12	**1**		6	-3	24	8	13	4	25	25
28	50	**1**		-9	18	-11	-5	2	9	-1	4
	9	**1**		-15	30	-20	-6	4	-4	1	10
26	53	**1**		-9	11	-5	-17	6	-7	5	7
	2	**1**		-32	12	2	-12	15	-7	8	3
24	-14	**1**		-43	12	13	2	1	1	7	11
	-17	**1**		-39	12	39	2	-16	2	11	7
22	-31	**1**		21	-2	33	1	-27	11	12	-2
		1		-36	10	24	1	-21	43	10	19
20		**1**		28	18	17	-2	-9	53	-2	13
		1		17	18	48	-1	15	12	-3	7
18		**1**		17	39	7	-31	10	3	-3	-8
		1		5	13	-25	-18	31	2	7	9
16		**1**		-4	6	-6	53	76	3	14	24
		1		1	5	7	69	54	1	30	22
14		**1**		28	-9	14	3	37	10	15	34
		1		2	-8	9	11	5	7	14	29
12		**1**		20	7	8	53	13	12	16	21
		1		56	19	-6		14	44	17	10
10		**1**		58	-7	-32		30	47	-21	12
		1		-13	-10	-2	9	32	41	-2	11
8		**1**		-18	-5	-44	25	55	22	3	15
		1		-18	-13	-37	53	18	28	6	8
6		**1**				-2	29	5	23	1	-1
4		**1**				63	5	-1	21	-11	12
		1				26	21	-29	2	-1	27
2		**1**				-2	18	-18	-11	-13	73
0		**1**				-21	9	-6	-63	-13	

Bilaga 9: Variation i HVM efter första och andra överfarten.



Resultat plattbelastning GBB Skandiahamnen 061117

Rivögatan, etapp 11

Punkt		Ev1	Ev2	Ev2/Ev1
R9	Bärlager	84,4	184,7	2,19
ÖÖ3	Bärlager	91,5	175,1	1,91
GG9	Bärlager	97,7	168,7	1,73
NN1	Bärlager	80,6	202,9	2,52
YY8	Bärlager	69,0	202,0	2,22
HH6	Bärlager	69,0	171,7	2,49
KK1	Bärlager	86,4	186,3	2,16
BB4	Bärlager	49,4	137,9	2,79
U4	Bärlager	92,4	192,4	2,08