



Bärighet på väg – via förbättrad packning

- fullskaleförsök med lättklinker som underbyggnad

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

JOHN SUNDBLAD

PER WIDÉN

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Forskargrupp Geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2007
Examensarbete 2007:33

EXAMENSARBETE 2007:3

Bärighet på väg – via förbättrad packning

- fullskaleförsök med lättklinker som underbyggnad

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

John sundblad

Per Widén

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Forskargrupp Geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2007

Bärighet på väg – via förbättrad packning
- fullskaleförsök med lättklinker som underbyggnad
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad
JOHN SUNDBLAD
PER WIDÉN

© JOHN SUNDBLAD PER WIDÉN, 2007

Examensarbete 2007:3
Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Forskargrupp Geoteknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

,

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2007

Bearing capacity on road – through improved packing
- fullscale test with lightweight aggregates as sub grade
Master s Thesis in Civil and Environmental Engineering
JOHN SUNDBLAD
PER WIDÈN
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of GeoEngineering
Geotechnical Engineering Research Group
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

On the highway E6 through Bohuslän great issues with rutting has evolved. The planned lifespan has only been reached in exceptionally occasions. The source of the problem probably derives from constructing the pavement construction, especially during the packing procedure. The road sections has been founded on soft subsoil made of clay or lightweight aggregates.

The purpose of the Master's Thesis is to investigate the compaction procedure for a road construction with lightweight aggregate as soft subsoil, to decide the impact on the bearing capacity due to the thickness of the overlayer and also to evaluate the mechanical property of the lightweight aggregate.

Full scale tests have been built up and rolled with a vibrating roller. Measurements have been performed during the experiment on the deformation, the bearing capacity and the earth pressure. The lightweight aggregate has been tested before and after the experiment in a laboratory.

The results of the tests shows that:

- Further rolling would have provided larger deformations and therefore better bearing capacity.
- The limit value for crushing the lightweight aggregate reached 100 kPa on the type of road construction that was evaluated.
- The compaction of the lightweight aggregate was about 3 % and was packed to a depth of at least 2.5 m.
- The bearing capacity is dependent on the thickness of the overlayer. The results indicates that overlayer thickness above 400 mm agrees to the demands in ATB Väg. Due to unsure results no definitive conclusions can be made concerning the bearing capacity.

Keywords: Lightweight aggregate, packing, soft subsoil, deformation measurement, vibrating roller, bearing capacity, EMU

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad
JOHN SUNDBLAD
PER WIDÉN

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Forskargrupp Geoteknik
Chalmers Tekniska Högskola

SAMMANFATTNING

På E6 genom Bohuslän har man haft problem med kraftig spårutveckling. Endast i undantagsfall har avsedd livslängd uppnåtts. Källan till problemet härrör troligen från själva utförandet och uppbyggnaden av vägkonstruktionen och då framförallt packningsförfarandet. Sträckorna är grundlagda på mjuk undergrund av lös lera eller lättklinker. Examensarbetet är en del i ett projekt. Projektet syftar till att undersöka packningsförfarandet på en vägkonstruktion med lös undergrund.

Examensarbetet syftar dels till att undersöka packningsförfarande för en vägkonstruktion med lättklinker som lös undergrund, dels till att kontrollera överbyggnadstjocklekens inverkan på bärigheten samt att utvärdera lättklinkerns mekaniska egenskaper i en vägkonstruktion..

Fullskaliga provsträckor har byggts upp och packats med en vibrerande vält. Under försöket har mätning av deformation, bärighet och jordtryck utförts. Utöver detta har laboratorieförsök av lättklinkern genomförts.

Resultaten från försöken visar att:

- Ytterligare packning hade gett större deformationer och därmed förbättrat vägens bärighet.
- Lättklinkern nedkrossas vid ca 100 kPa i tillskottslast från välten vilket överensstämmer bra med triaxialförsök.
- Lättklinkern komprimeras ca 3 % och packas till minst 2,5 m djup
- Bärigheten är beroende av förstärkningslagrets tjocklek. Mätresultaten indikerar att tjocklekar över 400 mm klarar kraven i ATB Väg. På grund av oklara resultat kan dock inga bestämda slutsatser angående bärigheten dras.

Nyckelord: Lättklinker, packning, lös undergrund, deformationsmätning, bärighetsmätning, vibrationsvält, bärighet, EMU

Innehåll

ABSTRACT	III
SAMMANFATTNING	IV
INNEHÅLL	V
FÖRORD	VII
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Metod	1
2 TEORI	3
2.1 Vägkonstruktion	3
2.1.1 Slitlager	3
2.1.2 Bärlager	3
2.1.3 Förstärkningslager	3
2.1.4 Skyddslager	4
2.1.5 Undergrund / Underbyggnad	4
2.2 Vägdimensionering	4
2.2.1 Allmän vägdimensionering	5
2.2.2 Vägdimensionering lättklinker	5
2.3 Vägdeformationer	6
2.4 Packning av vägöverbyggnad	6
2.4.1 Statiskt tryck	6
2.4.2 Vibrering	7
2.4.3 Beräkning av tillskottsspänningar orsakade av packning	8
2.5 Metoder för att verifiera utförd packning	9
2.5.1 Statisk Plattbelastning, (SPB)	9
2.5.2 Falling Weight Deflectometer, (FWD)	10
2.5.3 Yttäckande packningskontroll, (YPK)	12
3 FÖRSÖK	13
3.1 Geotekniska förutsättningar	13
3.2 Försökssträckornas uppbyggnad	14
3.2.1 Förberedande Provytan	14
3.2.2 Försök 1 och 2	15
3.2.3 Instrumentering	15
3.3 Försöksförfarande	16
3.3.1 Packning	16
3.3.2 Mätning	17
	V

4	RESULTAT	19
4.1	Deformationsmätningar	19
4.1.1	Förberedande Provytan	19
4.1.2	Försök 1	20
4.2	Bärighetsmätningar	22
4.2.1	Statisk Plattbelastning, (SPB)	22
4.2.2	Falling Weight Deflectometer, (FWD)	23
4.2.3	Yttäckande packningskontroll, (YPK)	23
4.3	Laboratorieförsök av lättklinker	24
5	ANALYS AV RESULTATEN	25
5.1	Packningsproceduren	25
5.2	Lättklinker som underbyggnad	26
5.3	Deformationsegenskaper	26
5.4	Bärighet	27
5.5	Armeringsnät	28
6	SLUTSATSER	30
6.1	Framtida forskning och rekommendationer	30
7	REFERENSER	31
	BILAGOR	33

Förord

Examensarbetet har utförts på Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för Bygg- och Miljöteknik, avdelningen för geologi och geoteknik. Arbetet har genomförts i samarbete med NCC och Vägverket.

Vi vill tacka våra handledare Helene Kennedy NCC/Chalmers och Bo Johansson Vägverket, för god handledning och stort engagemang.

Vi vill även tacka följande personer och organisationer som bidragit till att examensarbetet varit möjligt att genomföra.

Mattias Odén på Svensk Leca

Robert Angmyr och Daniel Knutsson vid NCC entreprenad i Saltkällan.

Håkan Carlsson på VTI

Dynapac AB

SBUF

Infra Kompetenscentrum

1 Inledning

1.1 Bakgrund

På Europaväg 6 genom Bohuslän har man haft problem med kraftig spårutveckling längs vissa sträckor norr och söder om Uddevallabron. Spårutvecklingen varierar över och inom sträckorna och endast i undantagsfall uppnås avsedd livslängd. I övriga fall är livslängden upp till halverad. Källan till problemet härrör troligen från själva utförandet och uppbyggnaden av vägkonstruktionen och då framförallt under packningsförfarandet. Denna slutsats kan dras eftersom vissa delsträckor uppfyller kraven vid liknande förhållanden. Detta indikerar att det kan finnas stora möjligheter att förbättra dagens packningsförfarande och därigenom minska överbyggnadstjockleken eller öka vägens livslängd.

Sträckorna längs E6 är huvudsakligen grundlagda på mjuk undergrund av lös lera eller lättklinker. Den lösa undergrunden har försämrat packningsresultatet, vilket har kompensrats med en mäktigare överbyggnad. Detta har gett högre kostnader på grund av ökad materialåtgång.

Examensarbetet utförs på Chalmers Tekniska Högskola i samarbete med NCC, Vägverket, Svensk Leca, VTI och finansieras förutom av dessa parter av SBUF, Dynapac och Infra kompetenscentrum.

Studien för examensarbetet avser ett provområde på NCC entreprenad Saltkällan. Den utgör en del i ett projekt där de övriga delarna redovisas i rapporten *Bärighet på väg – via förbättrad packning Fullskaleförsök med lera som lös undergrund* av Bo Johansson och Helene Kennedy, Chalmers Tekniska Högskola, med nummer 2007:7 ISSN 1652-9162.

1.2 Syfte

Examensarbetet syftar till att undersöka:

- Packningsförfarandets betydelse för en vägkonstruktion med lättklinker som underbyggnad
- Lättklinkerns egenskaper i en vägkonstruktion
- Överbyggnadstjocklekens betydelse för packningsresultatet
- Hur ett armeringsnät i underkanten av vägöverbyggnaden inverkar på packningsresultatet och konstruktionens bärighet.

1.3 Metod

I anslutning till NCC entreprenad på E6 Saltkällan - Fläskeberget uppfördes tre olika provsträckor. Packningsutförandets verkan på förstärkningslager och underbyggnad övervakades och undersöktes. Provsträckorna byggdes upp på en plats på vilken det var möjligt att efterlikna rådande förhållanden i områden med mäktiga lerlager.

Provsträckorna vältades med olika frekvens och amplitud, emellan packningsöverfarterna mättes utbildade deformationer på olika nivå i överbyggnaden. Vertikala och horisontella jordtryck registrerades i samband med vältöverfarterna. Bärigheten kontrollerades efter genomförda packningsöverfarter på förstärkningslagrets överyta och jämfördes med kraven i ATB VÄG 2006. Det utfördes även tester på lättklinkern före och efter försöken.

Mätningar genomfördes på tre olika provsträckor som byggdes upp som olika konstruktioner, vilka benämns Förberedande Provytan, Försök 1 och Försök 2 i rapporten. Förberedande Provytan bestod av en konstruktion som hade till syfte att testa valda mätmetoder och därigenom kunna förebygga oförutsedda problem. Försök 1 och 2 indelades i vardera fyra provytor med olika förutsättningar i form av olika tjocklekar på förstärkningslagren. Den här rapporten är i första hand inriktad på Förberedande Provytan och Försök 1, båda med lättklinker som underbyggnad. Försök 2 med lera som lös undergrund, redovisas mer ingående i *rapporten Bärighet på väg – via förbättrad packning Fullskaleförsök med lera som lös undergrund* med rapportnummer 2007:7.

2 Teori

I detta kapitel avses att ge en övergripande bild av en vägs uppbyggnad, dimensionering av vägöverbyggnad och den bakomliggande teorin till försöken som har genomförts i studien.

2.1 Vägkonstruktion

Den principiella uppbyggnaden av en väg framgår av Figur 2.1. Vägkonstruktionen består av ett antal materiallager med olika funktioner. Tillsammans skall de säkerställa att vägen blir säker, bärig och beständig under dess livslängd. Man brukar dela in vägbyggnader i flexibla, styva och halvstyva konstruktioner. I de flexibla är de bundna lagren bitumenbundna, de styva är betongvägar med beläggning av cementbetong och de halvstyva är en kombination mellan bitumenbundna och cementbundna lager. Den flexibla konstruktionen är den vanligast använda i Sverige och beskrivs mer ingående i följande avsnitt (Asfaltboken, 2002).

Slitlager
Bundet bärlager
Obundet bärlager
Förstärkningslager
Skyddslager
Undergrund/underbyggnad

Figur 2.1 Lagerföljd i en typisk vägöverbyggnad

2.1.1 Slitlager

Slitlagrets uppgift är att ge vägen en jämn yta som är säker och bekväm att köra på. Det finns krav uppsatta på jämnhet i längd- och tvärled samt på friktion. Tillsammans med de övriga lagren skall det sprida lasten så att påkänningarna på underbyggnaden inte blir för stora (Asfaltboken, 2002).

2.1.2 Bärlager

Bärlagrets primära funktion är att fördela belastningen från trafiken på vägytan för att undvika skadliga spänningar i förstärkningslager och underbyggnad. Lagret kan vara både obundet och bundet beroende på hur stor trafikbelastning som vägen är dimensionerad för (Asfaltboken, 2002).

2.1.3 Förstärkningslager

Förstärkningslagret ska tåla de spänningar som nedförs från bärlagret och fördela dessa vidare till underbyggnaden. Lagret skall utgöras av ett så pass grovt material att det fungerar som ett dränerande lager och inte är frostkänsligt. Materialet skall även

ha tillräcklig bärighet för byggtrafik och klara belastningar från packning och utläggning av ovanliggande lager (Asfaltboken, 2002).

2.1.4 Skyddslager

Skyddslagret fungerar som ett materialavskiljande lager och förhindrar undergrundsmaterial från att tränga upp i förstärkningslagret. Det bidrar även till att minska lasten på underbyggnaden och minskar ojämna tjällyftningar (Asfaltboken, 2002).

2.1.5 Undergrund / Underbyggnad

Terrassen är gränsen mellan överbyggnad och undergrund/underbyggnad. Terrassens bärighet avgör tjockleken på ovanliggande obundna överbyggnadslager. Delen under terrassytan benämns undergrund vid skärning och underbyggnad vid bankfyllning. En underbyggnad kan även bestå av ett lättfyllnadsmaterial (Asfaltboken, 2002). De vanligaste lättfyllnadsmaterialen är lättklinker och cellplast.

2.1.5.1 Lättfyllning

Lättfyllning används som fyllnadsmaterial inom vägbyggnad för att minska sättningar eller som stabilitetsförhöjande åtgärd, men också för att minska jordtryck mot konstruktioner. Lättfyllning definieras som fyllningsmassor med en torrdensitet lägre än $1,2 \text{ ton/m}^3$ (ATB, Lättklinker i vägkonstruktioner, 2003).

Lättklinker och cellplast är de vanligaste lättfyllnadsmaterialen.

Lättklinker är den gemensamma benämningen på bränd, expanderad lera, i form av kulor med en diameter från några millimeter till ca 30 mm, se Figur 2.2. Det är ett keramiskt material som är beständigt mot kemiska ämnen från vägtrafiken och upprepade frysningar och tiningar. Kulorna varierar i densitet vilket medför att lättklinkern har en torrdensitet mellan 250 och 400 kg/m^3 .

Hållfastheten beror på storleken på kulorna där de små kornen har högre densitet och därigenom högre hållfasthet. Elasticitetsmodulen sätts i vanliga fall till 40 MPa, (ATB, Lättklinker i vägkonstruktioner, 2003). I ett triaxialförsök, utfört av Dongmo-Engeland B. (2006), med ett celltryck på 20 kPa beräknades E-modulen till 16 MPa.



Figur 2.2 Lättklinkerkula i genomsärning (Maxit, 2007)

2.2 Vägdimensionering

Nedan beskrivs allmänt de parametrar som beaktas vid dimensionering av vägkonstruktioner. Därefter beskrivs mer utförligt hur en överbyggnad med lättklinker som lättfyllnadsmaterial dimensioneras.

2.2.1 Allmän vägdimensionering

Vid dimensionering av vägöverbyggnader är målet att erhålla önskad funktion, ytjämnhet och friktion, med hänsyn till laster och tillgängligt material.

Dimensioneringen skall ta hänsyn till stabilitet, sättning och säkerhet mot uppflytning, vilka beror av trafiklast och de ingående materialens egentyngd.

Olika material beaktas vid dimensioneringen genom att olika hållfasthet och deformationsegenskaper ansätts (Vägverket, 2005).

Vid dimensionering av asfaltväg i Sverige används dimensioneringskriterier, asfalttöjningskriterium och undergrundstöjningskriterium. Nedan visas kriterierna och hur de beror av den permanenta töjningen. E-modulen i materialen påverkar töjningen, se Hookes Lag, $\sigma = E \times \varepsilon$.

Asfaltkriterium:

$$N100 = 1,03 \times 10^{10} \times \varepsilon^{-2,14} \times T^{0,43} (1 + 2,3 \times 10^{11} \times \varepsilon^{-5,0}), T > 0 \quad (2.1)$$

N100 = Ekvivalent antal 100 kN:s referensaxlar

ε = Dragtöjningen i beläggningens underkant, μ strain

T = Beläggningstemperatur

Undergrundskriterium:

$$N100 = 1,4 \times 10^{17} \times \varepsilon_v^{-4} \quad (2.2)$$

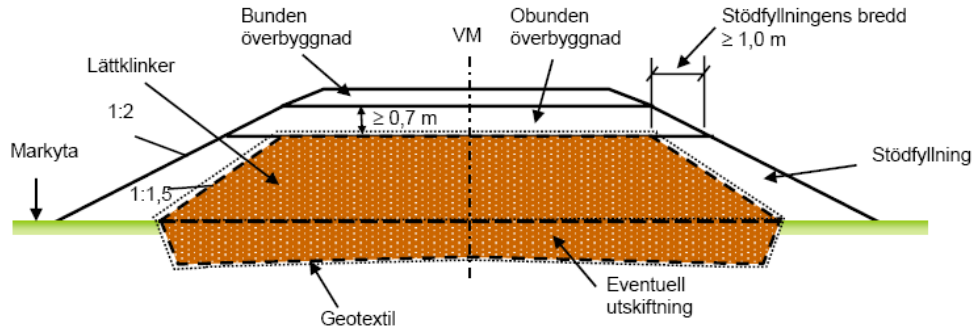
N100 = Ekvivalent antal 100 kN:s referensaxlar

ε_v = Vertikal trycktöjning på terrassen, μ strain

(VTI, 1996)

2.2.2 Vägdimensionering lättklinker

Överbyggnadens tjocklek dimensioneras enligt ATB VÄG 2005. Elasticitetsmodulen för lagren av lättklinker sätts till $E = 40$ MPa oavsett årstidsperiod. Enligt ATB VÄG 2005 är minsta möjliga avståndet mellan lättklinkern och överytan 0,5 m på grund av risken för frosthalka. För vägar med $\text{ÅDT}_{\text{tot}} > 2000$ är dock minsta obunden överbyggnadstjocklek 0,7 m. Nedan redovisas en principskiss av en vägkonstruktion med lättklinker (Vägverket, 2003).



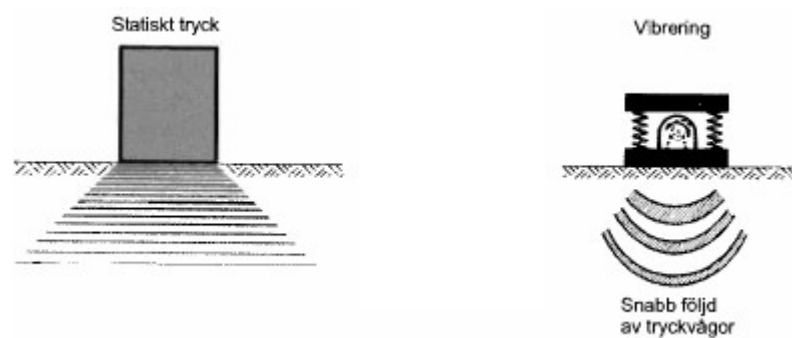
Figur 2.3 Vägkonstruktion med lättklinker (Vägverket, 2003)

2.3 Vägdeformationer

Strukturella förändringar i vägkonstruktionen såsom spårbildning kan bero på plastisk deformation, bärighetsförsämring och tjäle i undergrunden. Den deformation som packningens utförande kan ha störst inverkan på är den bärighetsberoende nedbrytningen. Spårbildningen som uppstår på grund av dessa deformationer är till största delen beroende av bärigheten i de obundna lagren. (Svenska Kommunförbundet, 2003)

2.4 Packning av vägöverbyggnad

Avsikten med packning är att öka densiteten hos ett material och därmed förbättra materialegenskaperna. Densiteten påverkar bland annat hållfastheten, bärigheten och vattengenomsläppligheten hos alla sorters kornformiga material. De faktorer som främst påverkar packningsresultatet är material, vattenkvot, packningsmetod, tillfört packningsarbete och underlagets fasthet (Forssblad, 2000). Vid packning av en vägöverbyggnad används i första hand statiskt tryck och/eller vibrering.



Figur 2.4 Schematisk figur över olika packningsmetoder (Forssblad, 2000)

2.4.1 Statiskt tryck

Packningen från statiskt tryck beror av den statiska linjelasten och vältens kontaktyta mot marken. Beroende på materialets styvhet och valsens nedsjunkning varierar trycket mot marken. Vid ett mjukt material blir kontaktytan mellan vals och mark stor,

vilket minskar trycket mot marken. Trycket ökar således när materialet är styvt. (Forssblad, 2000)

2.4.2 Vibrering

Vibreringspackning utförs med vibratorplatta eller vibrationsvält, som med återkommande dynamiska belastningar sätter jorden i rörelse vilket minskar materialets hållfasthet. Det orsakar en omlagring av kornformiga material till en tätare struktur (Forssblad, 2000).

Vibrationsvälten har en excenter som roterar i valsen och orsakar en oscillerande rörelse, se Figur 2.5 (CIMA 1994).

Den dynamiska lasten, centrifugalkraften F , som uppstår med vibrerande vals beror av frekvens och amplitud enligt sambandet:

$$F = A \times (2\pi f)^2 \quad (2.3)$$

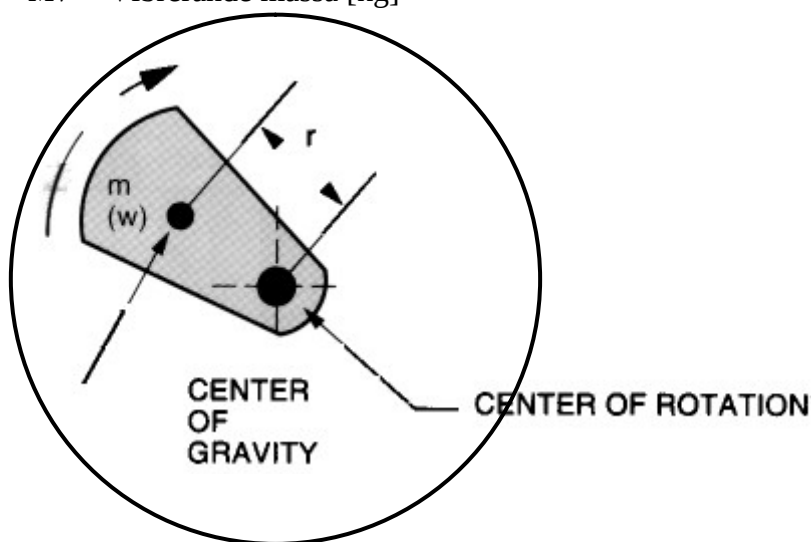
A = Nominell amplitud [mm]

f = Frekvens [Hz]

$$A = \frac{m \times r}{Mv} \quad (2.4)$$

$m \times r$ = Excentriskt moment [kgmm]

Mv = Vibrerande massa [kg]



Figur 2.5 Principskiss på vibrerande vals (CIMA 1994)

Oscillationsvälten är en vält som använder en ny typ av vibrationspackning. Den fungerar på ett liknande sätt som vibrationsvälten men har istället två excenters som gör att valsen inte studsar utan går med jämnt tryck över ytan. Oscillationsvälten orsakar i högre grad horisontella vibrationer än vibrationsvälten (Hamm AG, 2006).

2.4.2.1 Packningsprocedurens påverkan på packningseffekten

Med packningseffekt menas här det packningsresultat som uppnås med hänsyn till densitet och bärighet. Parametrar som i första hand är avgörande för en vibrationsvälts packningseffekt är:

Välthastighet och antal överfarter

Försök som påvisar att välthastighet och antal överfarter har betydelse för packningseffekten har presenterats dels av Forssblad 1965 och dels av D'Appolonia et al 1969. Approximativt gäller att man vid dubblad välthastighet måste köra dubbelt så många överfarter för att uppnå samma packningsgrad (Johansson, 2001).

Den statiska linjelasten

Den statiska linjelasten för en vibrationsvält är avgörande för dess packningsverkan. Om linjelasten ökas samtidigt som övriga data är oförändrade så ökar de statiska och dynamiska trycken i marken linjärt med vältens vikt, vilket både beräkningar och praktiska prov visat (Forssblad, 2000).

Frekvens och amplitud

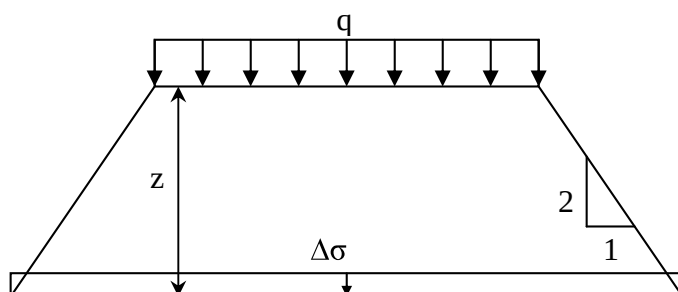
Den dynamiska lastens storlek och art påverkas av frekvens och amplitud. Det är därför mycket svårt att separera de olika parametrarnas individuella inverkan. För en konventionell vibrationsvält ger en fördubblad amplitud en ungefär dubbelt så hög dynamisk last. Den ökade packningseffekten kan lika väl bero på den större dynamiska lasten som den högre amplituden åstadkommer.(Johansson, 2001).

Dynamisk last

Det finns en proportionalitet mellan den maximala dynamiska spänningen i ett fyllnadsmaterial och den påförda statiska och dynamiska lasten. Den maximala spänningen blir nästan dubbelt så hög för en vibrerande vält som för en statisk vält (Johansson, 2001).

2.4.3 Beräkning av tillskottsspänningar orsakade av packning

Vid beräkning av tillskottsspänningar i konstruktionen orsakade av vältens kan 2:1-metoden användas. Det är en närmetod för beräkning av tillskottsspänningar på olika djup. Man antar då att de uppkomna spänningarna från en last sprids med en lutning på 2:1.



Figur 2.6 Principskiss på 2:1 metoden

Tillskottsspänningen på ett visst djup beräknas med 2:1 metoden för en utbredd last enligt följande:

$$\Delta\sigma_z = \frac{b \cdot q}{(b + z)} \quad (2.4)$$

$\Delta\sigma_z$ = vertikal tillskottsspänning [kPa]

b = lastens bredd [m]

q = lastens storlek [kN]

z = djup från markyta [m]

(Bergman Genberg, 2005)

2.5 Metoder för att verifiera utförd packning

För att kontrollera och analysera resultaten av packning kan olika mätmetoder användas. Nedan redogörs kortfattat för de metoder som använts i utförda fältförsök.

2.5.1 Statisk Plattbelastning, (SPB)

Packningskontroll utförd med SPB infördes i Sverige i och med VÄG 94, som redovisade metoden för kontroll av terrassytor och obundna överbyggnadslager. Metoden hade då sedan länge använts i Tyskland, Österrike och Schweiz (Rimstedt, 2006).

SPB är en metod för bestämning av underliggande lagers statiska deformationsmodul, E_v , vilken indirekt ger en indikation på utförd packning och förbättringar hos materialet. Lagret belastas med en stegvis pålastning med en mellanliggande avlastning samtidigt som deformationen till följd av belastningen registreras. Från dessa deformationer fås två deformationsmoduler, E_{v1} och E_{v2} . Kvoten, E_{v2}/E_{v1} , kallas för bärighetskvot och den bör vara så låg som möjligt, eftersom det antyder en hög packningsgrad. För att utvärdera resultaten görs en jämförelse av deformationsmodulen, E_{v2} , och bärighetskvoten, E_{v2}/E_{v1} , med Vägverkets krav (Rimstedt, 2006)(Vägverket, 1993).

Pålastning görs i ett förutbestämt antal steg där tryckspänning och sättning registreras. E_v beräknas därefter baserat på en andragsgradskurva anpassad enligt minsta kvadratmetoden till de uppmätta sättningarna och spänningarna. Ur andragsgradsfunktionen (2.5) som uppstår fås de tre konstanterna a_0 , a_1 och a_2 (Rimstedt, 2006).

$$s = a_0 + a_1\sigma_0 + a_2\sigma_0^2 \quad (2.5)$$

s = nedböjningen i belastningsplattans centrum [mm]

σ_0 = medelspänningen under plattan [MPa]

a_0, a_1, a_2 = regressionskonstanter [-]

För att beräkna E_v används a_1 och a_2 i ekvation (2.6)

$$E_v = \frac{1,5 \times r}{a_1 + a_2 \times \sigma_{1,\max}} \quad (2.6)$$

E_v = jordmaterialets deformationsmodul [MPa]

r = belastningsplattans radie [mm]

a_1, a_2 = regressionskonstanter [-]

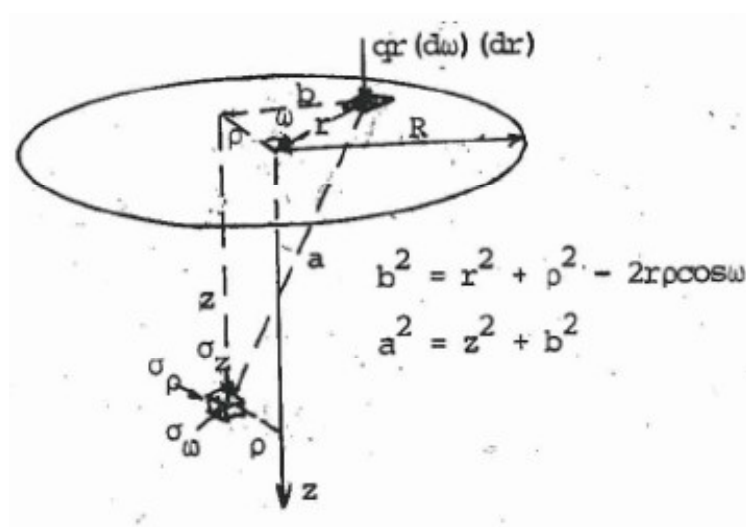
$\sigma_{1,\max}$ = maximal medelnormalspänning vid den första belastningen [MPa]

2.5.1.1 Beräkning av tillskottsspänningar under statisk plattbelastning

Vid beräkning av tillskottsspänningar under statisk plattbelastning kan man använda sig av Boussinesq formel. Enligt Boussinesq blir spänningen i en punkt under en cirkulärt utbredd last:

$$\Delta\sigma_z = \frac{3qz^3}{2\pi} \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{rd\omega dr}{[z^2 + r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cdot \cos\omega]^{5/2}} \quad (2.7)$$

med beteckningar enligt Figur 2.6:



Figur 2.7 Tillskottsspänningar för utbredd last enligt Boussinesq (Hansbo 1990)

2.5.2 Falling Weight Deflectometer, (FWD)

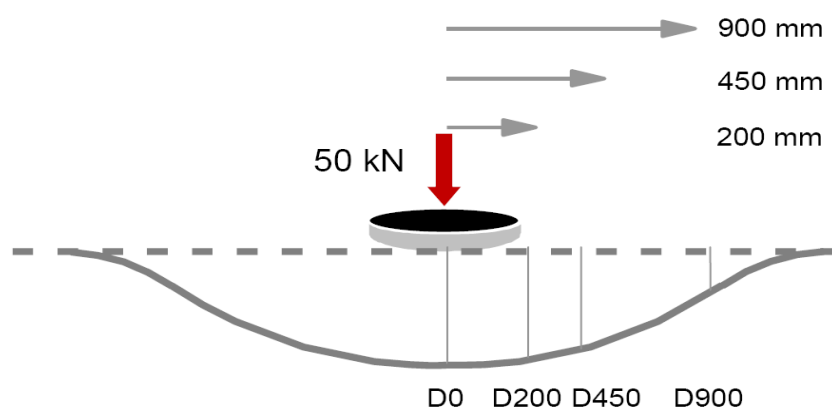
FWD, också benämnd Tung Fallvikt, se Figur 2.8, används för att bedöma vägars bärighet och ingående lagers styvhet. Det görs genom att vägkonstruktionens nedsjunkning på olika avstånd från en dynamisk belastning mäts. Utifrån

nedsjunkningens storlek och utseende samt tjockleken på de underliggande lagren kan den dynamiska E-modulen på olika djup bakberäknas.



Figur 2.8 FWD

Den dynamiska lasten skapas av en vikt som faller på ett fjädersystem ovanpå en belastningsplatta. Vanligtvis är belastningstiden 30 ms och kraften 50 kN. Deformationerna som uppstår vid belastningen mäts dels i belastningsplattans centrum, men även i sex punkter på valda avstånd från centrum, se Figur 2.9. Nedböjningens storlek och avstånd till centrum indikerar vilket lager som hade störst påverkan på nedböjningen. Ju längre från plattan deflektionen sker desto mindre påverkar vägkroppens övre lager.



Figur 2.9 Sjunctratt FWD (Vägverket 1998)

Vid beräkningarna antas materialen oftast vara linjärelastiska, homogena och isotropa. För att kunna göra jämförelser mellan olika mätvärden bör de vara genomförda under samma tid på året då olika klimatförhållanden kan påverka bärigheten. Vid mätning med FWD skall därför lufttemperaturen, beläggningens ytemperatur och inre temperatur registreras (Vägverket, 1998).

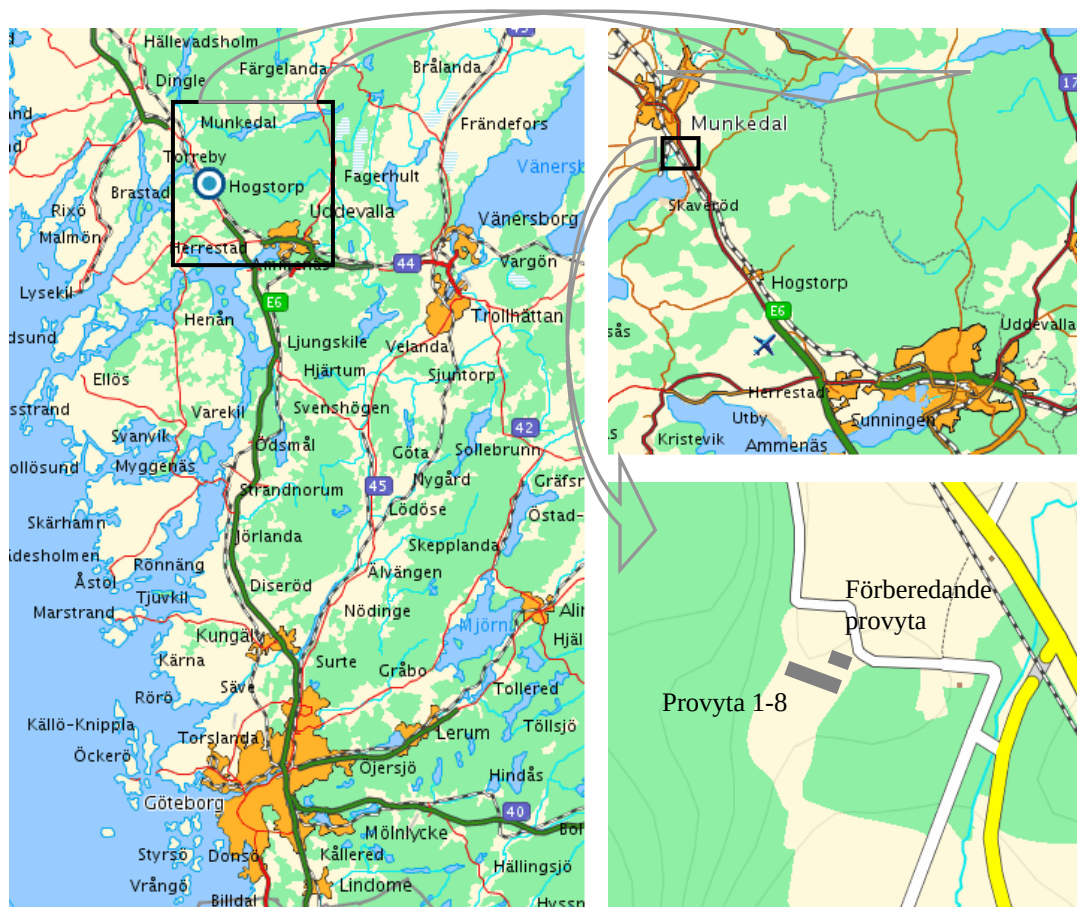
2.5.3 Yttäckande packningskontroll, (YPK)

Yttäckande packningskontroll är ett dokumentationssystem som kontinuerligt registrerar underliggande lagers styvhet under pågående vibrerande packning. Metoden har stora fördelar gentemot konventionella kontrollmetoder eftersom resultatet kontinuerligt kan utvärderas.

Packningskontrollen utförs av en accelerometer som är monterad direkt på vältens vals axel. Den mätta accelerationen används för att beräkna ett packningsvärde, CMV-värde. Eftersom CMV-värdet påverkas av vältens inställda frekvens och amplitud, vilket medför att enbart värden med samma vältinställning kan jämföras. (Dynapac, 2001).

3 Försök

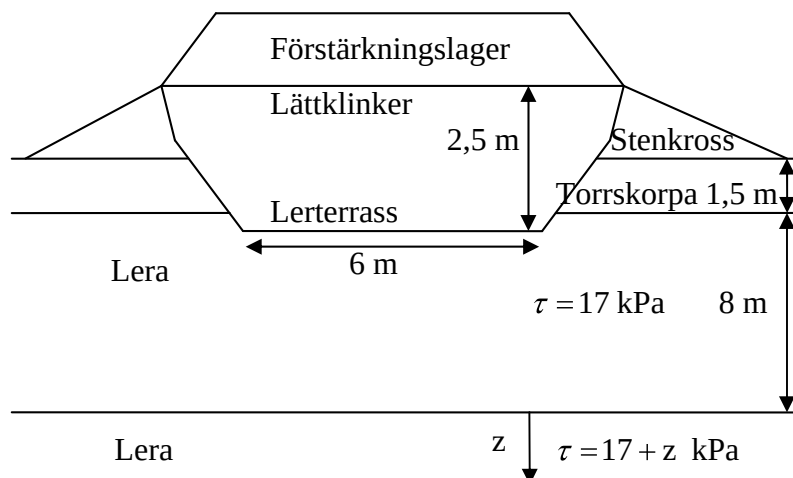
Under september till oktober 2006 genomfördes försöken på provsträckorna, som byggdes upp i anslutning till NCC:s entreprenad i Saltkällan utanför Munkedal, se Figur 3.1. Området ligger i en dal mellan två skogsbevuxna bergstoppar ca 20 m ö h.



Figur 3.1 Karta över försöksområdet

3.1 Geotekniska förutsättningar

Ett flertal provborrningar, utförda av Scandiaconsult, har gjorts inom försöksområdet. Borrningarna indikerar ett homogent lerlager med varierande mäktighet mellan 30 och 45 meter under ca 1,5 m torrskorpa. Skjuvhållfastheten är uppmätt i fem borrhål inom försöksområdet och är ca 17 kPa ner till ca 8 meters djup, därefter ökande med ca 1 kPa per meter till berget, se Bilaga C.



Figur 3.1 Tvärsektion med lerlager och skjuvhållfasthet, Försök 1

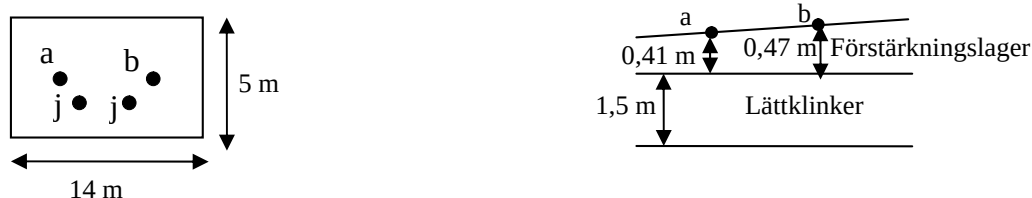
3.2 Försökssträckornas uppbyggnad

Fältförsöken inleddes med en Förberedande Provyta som hade till syfte att utvärdera valda mätmetoder och förebygga oförutsedda problem för de följande sträckorna. Studien fortsatte därefter med Försök 1 där Provyta 1 till 4 uppfördes. När Försök 1 var slutfört revs Provyta 1 till 4 och Försök 2 med provyta 5 till 8 byggdes upp på samma lerterrass.

Förberedande provytan och Försök 1 byggdes upp med lättklinker vilande på lerterrass som underbyggnad. Lättklinkern, sortering 8-20, kom från Svensk Leca i Linköping. Den packades inte utan all packning utfördes på förstärkningslagrets överyta. På underbyggnaden lades förstärkningslager ut, bestående av certifierad bergkross (0-90) från Glimmingen bergtäkt. Vid uppbyggnaden av provsträckorna installerades deformationsmätare och jordtrycksmätare i överbyggnaden. Deformationsmätarna placerades i mätpunkt a och b medan jordtrycksmätarnas placerades i mätpunkt j, se Figur 3.2.

3.2.1 Förberedande Provytan

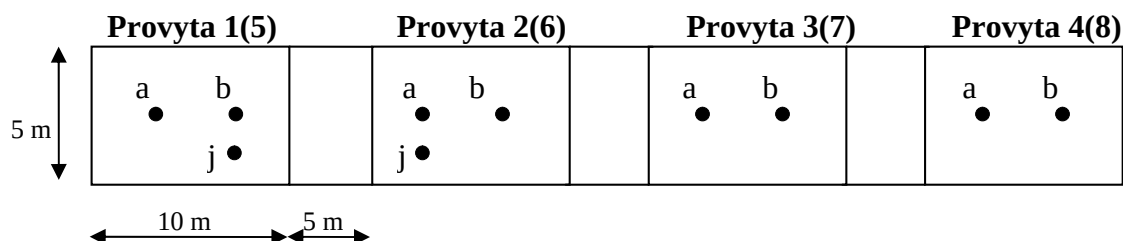
Den Förberedande Provytan var ca 14 m lång och ca 5 m bred, se Figur 3.2. Fyllnadsmaterialet i underbyggnaden bestod av ett ca 1,5 m mäktigt lättklinkerlager. Förstärkningslagret lades ut med grävmaskin för att undvika förpackning. Provytan byggdes med lutande yta vilket gav varierande förstärkningslager. Förstärkningslagret i mätpunkt a och b var innan packning ca 0,5 m respektive ca 0,6 m. I Figur 3.2 visas tjockleken efter utförd packning.



Figur 3.2 Förberedande provyta i plan och sektion

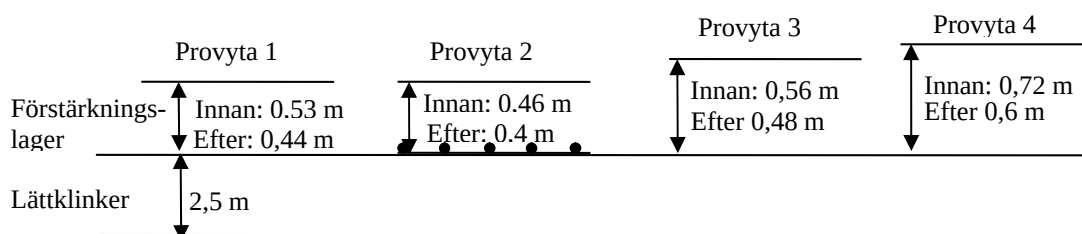
3.2.2 Försök 1 och 2

Försök 1 och 2 bestod av vardera fyra provytor, enligt Figur 3.3. Varje delsträcka var ca 10x5 m med fem meters mellanrum.



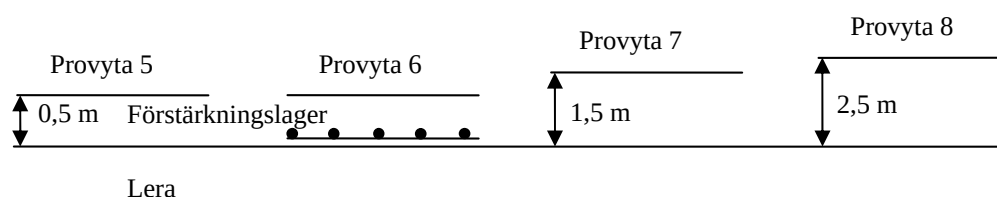
Figur 3.3 Provyta 1-4, Försök 1 och Provyta 5-8, Försök 2

Försök 1 hade genomgående ett 2,5 m mäktigt lättklinkerlager på lerterrassen, Figur 3.4 Förstärkningslagret fördes ut med en hjullastare med början på Provyta 1 i riktning mot Provyta 4. Vilket ledde till en viss förpackning av framförallt Provyta 1 och 2. Förstärkningslagrets mäktighet varierades för de olika provytorna. I underkanten av förstärkningslagret på Provyta 2 lades ut ett armeringsnät av stålqualität B500A och dimension Ø10 200x200, se Figur 3.4.



Figur 3.4 Försök 1 i profil med lagertjocklekar före och efter packning

I försök 2 lades förstärkningslager, (0-90), ut i olika tjocklekar på lerterrassen, se Figur 3.5. Provyta 8 utfördes som referensyta med ett förstärkningslager på 2,5 m som skulle efterlikna en fast undergrund och minimera den lösa undergrundens inverkan.

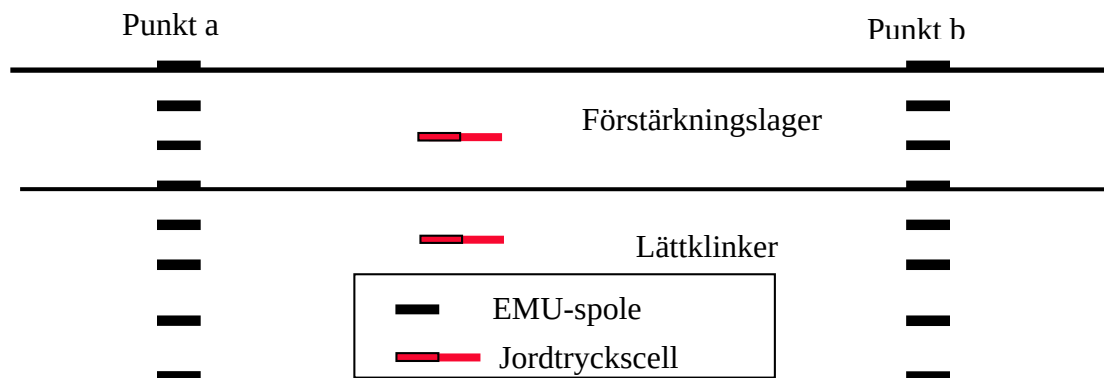


Figur 3.5 Försök 2 i profil med ungefärliga lagertjocklekar

3.2.3 Instrumentering

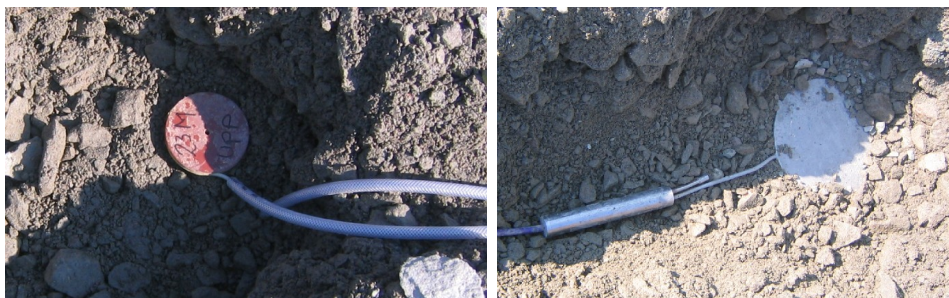
Deformationsmätningarna gjordes med så kallade EMU-spolar och jordtrycket mättes med jordtrycksceller.

EMU-spolar installerades på avståndet 15 till 20 cm genom konstruktionen, se Figur 3.6. Avståndet mellan spolarna mättes genom att styrkan på det magnetfält som induceras över spolarna registrerades. När avståndet mellan spolarna minskade så ökade magnetfältets styrka och tvärtom vid ökat avstånd. Spolarna är 100 mm i diameter och 8 mm tjocka, Figur 3.7 De har en lång livslängd och man kan därför följa deformationsutvecklingen under en längre tidsperiod.



Figur 3.6 Instrumentering profilsnitt

Jordtryckscellerna placerades på olika djup i konstruktionen på Förberedande Provytan, Provyta 1 och 2, dels i förstärkningslagret och dels i lättklinkern, se Figur 3.7. De användes för att registrera den dynamiska tillskottsspänning som uppstod när välten passerade.



Figur 3.7 (tv)-EMU-spole, (th)-jordtryckscell

3.3 Försöksförfarande

Avsnittet redogör för de packningsförfaranden och de mätningar som utfördes under Försök 1 och 2.

3.3.1 Packning

Under försöksförfarandet packades provytorna med olika inställning på frekvens och amplitud. Välten som användes var en Dynapac CA302 vilken har en linjelast på 38 kg/cm, se Bilaga D. Välten framfördes med en konstant hastighet av 1 m/s. Allteftersom provytorna packades mättes de vertikala deformationerna och spänningarna i väggkroppen.

Sambandet ger, med aktuella inställningar på amplitud och frekvens, krafter enligt Tabell 3.1.

Tabell 3.1 Centrifugalkraft vid använda vältinställningar för Dynapac CA302

Amplitud hög/låg	Frekvens (Hz)	Centrifugalkraft (kN)
Låg	20	54
Låg	25	84
Låg	30	121
Hög	25	172
Hög	30	248
Hög	35	337

På den Förberedande Provytan användes en låg packningsenergi för de första överfarterna som sedan successivt ökades. Detta förfaringssätt valdes för att kontrollera att instrumentering inte förstördes och att krossning av lättklinker inte uppstod.

På Provyta 1 till 4 användes största möjliga packningsenergi initialt för att uppnå packning av konstruktionen nerifrån och upp. Vid deformationsavtagande sänktes packningsenergin successivt för att packa konstruktionens övre lager

Packningen utfördes i tre stråk över provytorna. Varje stråk vältades med två överfarter åt gången. Stråken vältades i ordningsföljden 1,3 och 2, se Figur 3.8, för att minska inverkan av överbyggnadens slänter. All instrumentering var placerades i mittenstråket.

	Provyta 1 (5)	Provyta 2 (6)	Provyta 3 (7)	Provyta 4 (8)
Stråk 1				
Stråk 2				
Stråk 3				

Figur 3.8 Skiss över provsträckans packningsstråk

3.3.2 Mätning

Mätningar utfördes under pågående packning, mellan överfarter och efter avslutad packning. De mätningar som utfördes var:

- SPB – Statisk plattbelastning utfördes på mätpunkterna a och b
- FWD – Tung Fallvikt som genomfördes i mitten av stråk 1 och 2 med 2 meters mellanrum
- YPK – Yttäckande packningskontroll som registrerades för varje stråk och överfart

- Deformationsmätningar med EMU-spolar under mätpunkterna a och b på de olika provytorna
- Jordtryck som mättes med jordtrycksceller på olika djup i Förberedande Provytan, Provyta 1 och Provyta 2
- Lättklinkerprov togs före och efter packning från Provyta 1 och 3 och på dessa utfördes analyser av fuktkvot, densitet och kornstorleksfördelning.

3.3.2.1 Mätschema och vältinställning

Mättingsförfarandet med vältinställningar följde för den Förberedande Provytan och för Försök 1 enligt scheman i Bilaga B.

4 Resultat

I detta avsnittet redovisas representativa resultat i första hand från Försök 1. Den Förberedande Provytan berörs vid resultaten från deformationsmätningarna eftersom dessa resultat var intressanta med avseende på packningsförfarandet. För fullständig resultatredovisning se Bilaga E-K. På den Förberedande Provytan uppstod ingen betydande nedkrossning av materialen och all instrumentering var oförstörd efter packningen.

4.1 Deformationsmätningar

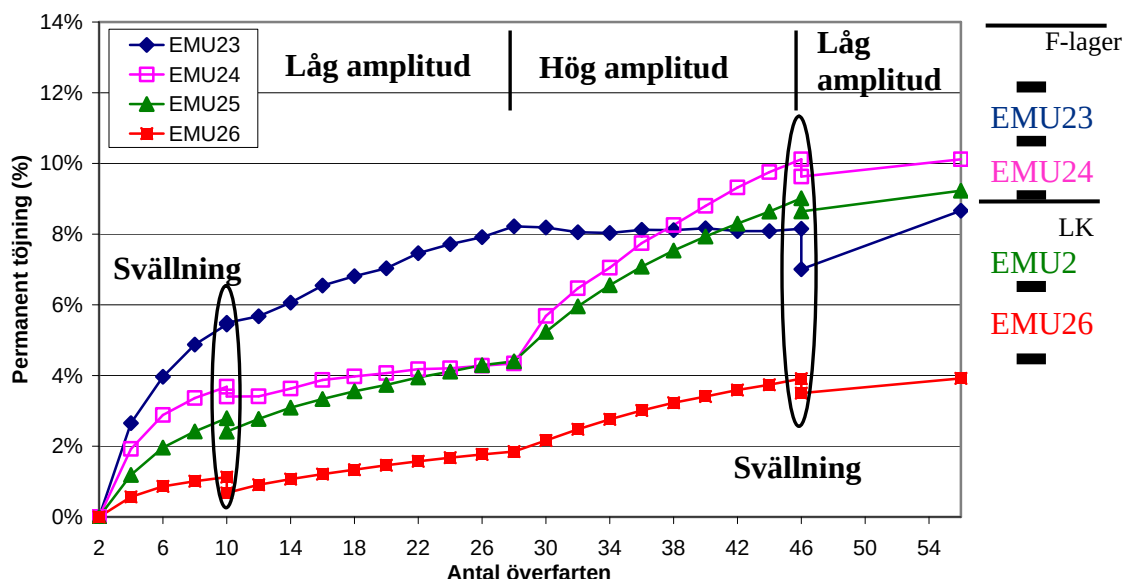
Deformationerna för samtliga provtytor redovisas i Bilaga J.

4.1.1 Förberedande Provytan

I Figur 4.1 visas hur den permanenta töjningen förändrades med antalet överfarter. Permanenta töjningarna redovisas efter den andra överfarten, eftersom den töjning som inledningsvis skedde i hög grad påverkades av installation och packning vid utläggning.

I figuren ses tydliga skillnader vid ändrad packningsenergi. Efter de första 10 överfarterna har ca hälften av den permanenta töjningen utbildats. Därefter avtar töjningsdifferensen och utvecklas linjärt fram till ca 28 överfarter då den avtar i toppen och ökar längre ner i konstruktionen. Töjningsutvecklingen är snarlik för båda mätpunkterna a och b på den Förberedande Provytan.

Vid 10 och 46 överfarter syns en tydlig tillbakagång av den permanenta töjningen. Vid dessa tillfällen upphörde packningsarbetet med en natts eller helgs mellanrum och konstruktionen svällde då en aning. De permanenta töjningarna mättes två gånger med en natts eller en helgs mellanrum innan ytterligare packning utfördes.



Figur 4.1 Permanent töjning som funktion av antalet överfarter, Förberedande Provyta mätpunkt a

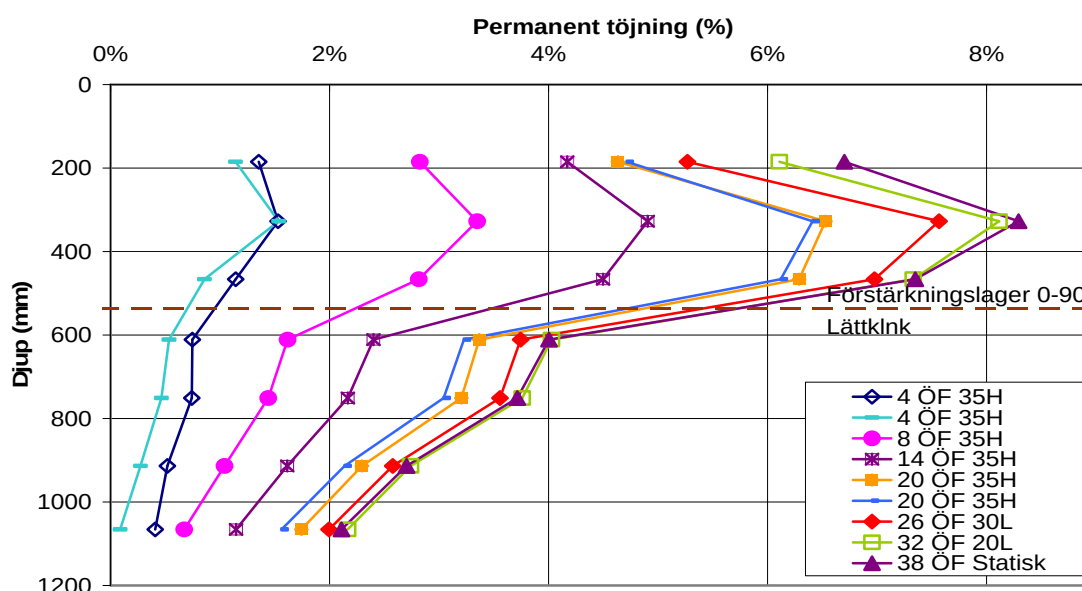
4.1.2 Försök 1

I Figur 4.2 nedan visas hur den permanenta töjningen varierar mot djupet i mätpunkt a för Provyta 3. Figuren visar även här de permanenta töjningarna som sker efter andra överfarten.

Det sker en tydlig töjningsminskning i övergången från förstärkningslager till lättklinker, vilket tyder på att lättklinkern deformeras i mindre utsträckning än förstärkningslagret. Detta är återkommande för samtliga provtytor.

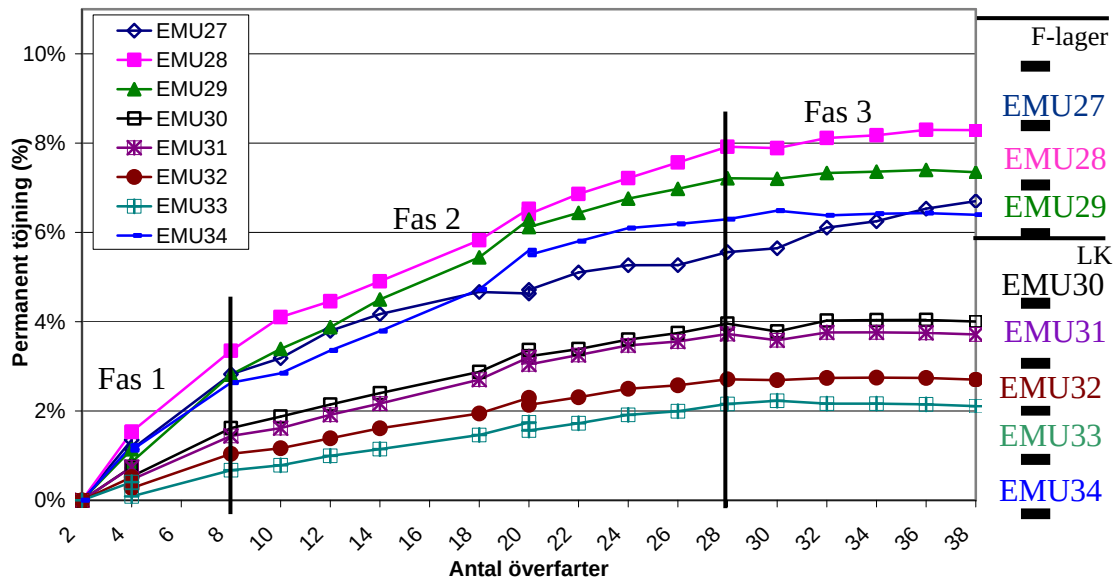
Vid den avslutande statiska packningen sker töjningarna endast i toppen av profilen.

Vid fjärde och tjugonde överfarten genomfördes två mätningar med en natts eller en helgs mellanrum. Här syns en tydlig tillbakagång av töjningen från den första mätningen till den andra. Det går inte att se några inbördes skillnader i hur mycket krossmaterialet och lättklinkern sväller, se Figur 4.2 och i Figur 4.3.



Figur 4.2 Permanent töjning som funktion av djupet, Provyta 3 mätpunkt a

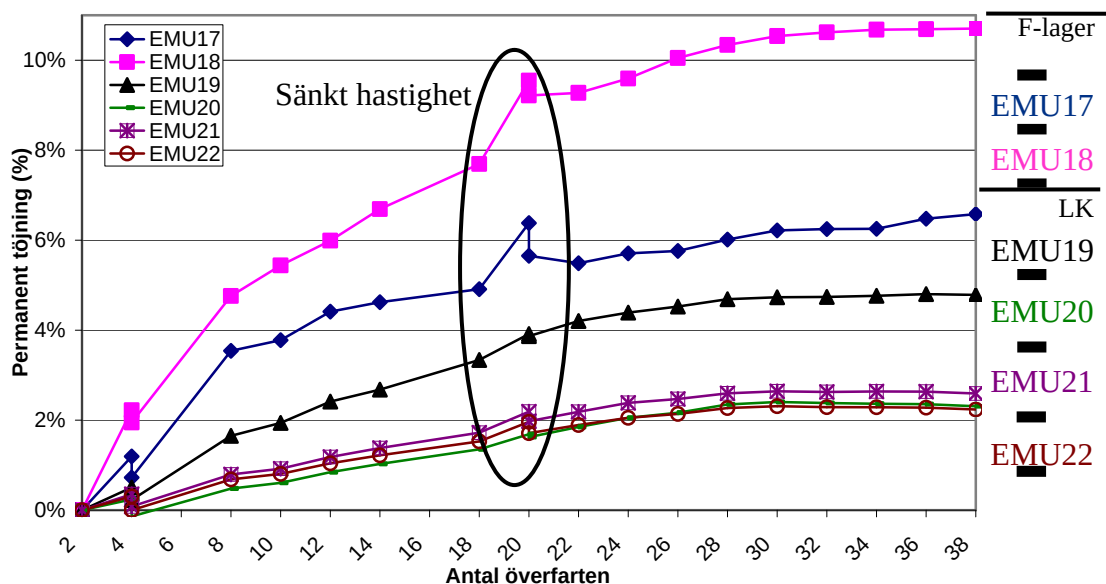
I Figur 4.3 ses den permanenta töjningens utvecklingen mot antalet överfarter. Förenklat kan man se den permanenta töjningsförändringen som tre faser. Efter de första 8 överfarterna sker ca hälften av den permanenta töjningen. Därefter avtar töjningsdifferensen och fortsätter i samma takt fram till ca 28 överfarter. Mellan 28 och 38 överfarter avstannar den permanenta töjningen i stort sett helt förutom i toppen av förstärkningslagret.



Figur 4.3 Permanent töjning som funktion av antalet överfarter, Provyta 3 punkt a

I Figur 4.4 redovisas den permanenta töjningens utveckling för Provyta 2, som hade ett armeringsnät ovanpå lagret av lättklinker. Deformationsutvecklingen liknade de för de övriga provytorna förutom i det skikt där armeringsnätet var placerat. Där blev de permanenta töjningarna större än för motsvarande skikt på övriga provytor, jämför EMU 18 i Figur 4.4 med EMU 29 i Figur 4.3.

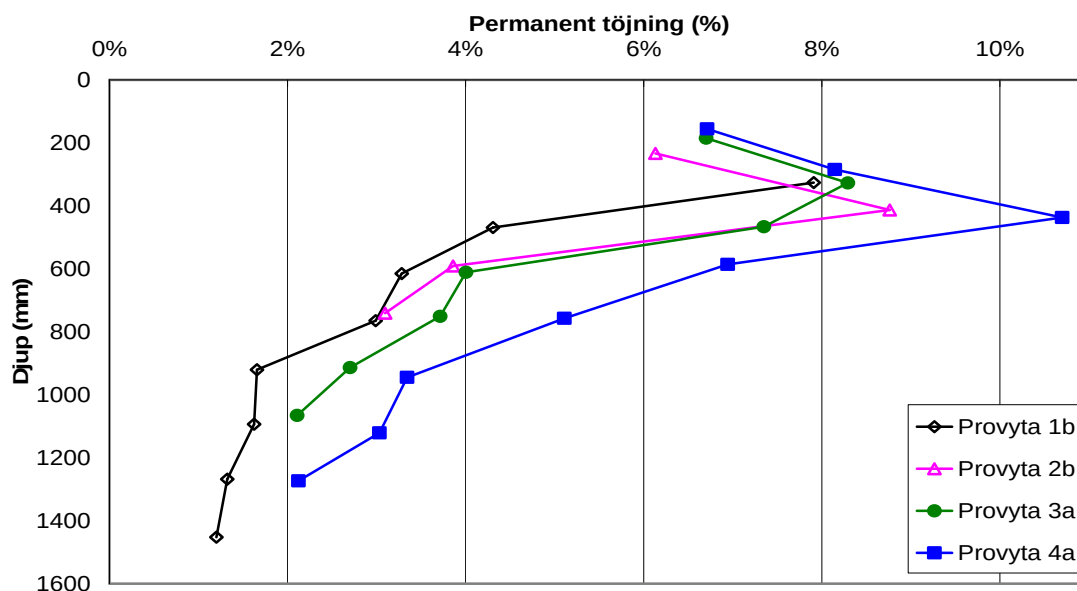
Under överfarterna 19 och 20 framfördes välten med betydligt lägre hastighet, för att undersöka hastighetens inverkan på packningen, vilket resulterade i ökad töjningsdifferens för dessa överfarter. Detta åskådliggörs tydligt i Figur 4.4 genom kraftigt ökande permanent töjning vid dessa överfarter. Samma tendens går även att se för de övriga mätpunkterna i Bilaga J.



Figur 4.4 Permanent töjning som funktion av antalet överfarter, Provyta 2 mätpunkt a

I Figur 4.5 nedan visas den totala töjningen efter packning för några punkter på provytorna 1 till 4. Figuren antyder att töjningen ökar gradvis från Provyta 1 till Provyta 4. Töjningsskillnaden mellan provytorna kan förklaras av den förpackning som uppstod när förstärkningslagret lades ut.

På samtliga provytor uppgick den permanenta töjningen till omkring 8 % i förstärkningslagret och omkring 3 % i lättklinkern efter försöken. Den permanenta töjningen i lättklinkern avtog något mot djupet.



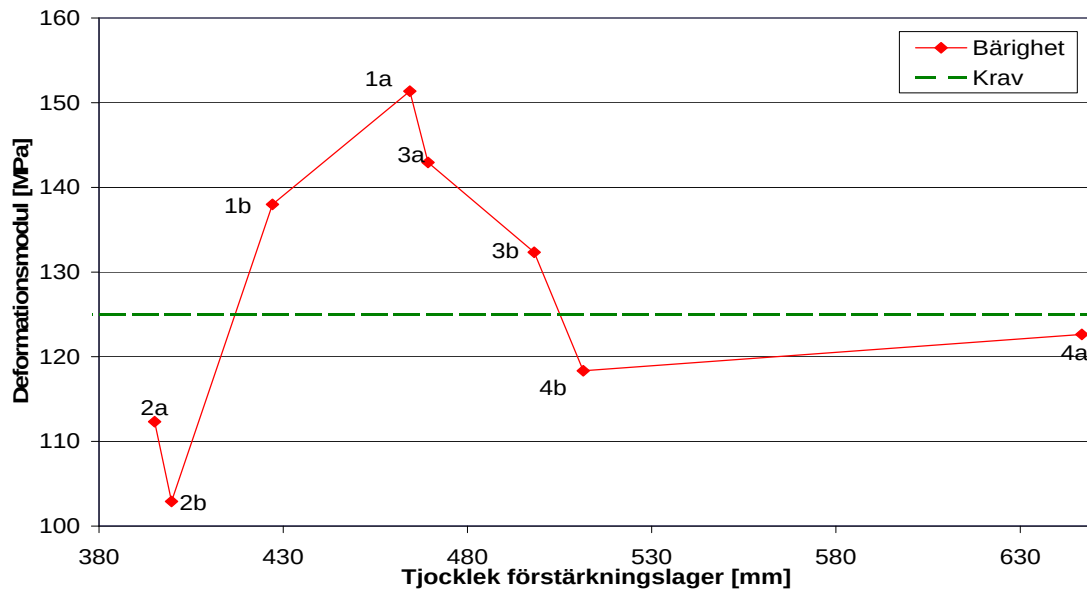
Figur 4.5 Permanent töjning som funktion av djupet, Provyta 1 till 4

4.2 Bärighetsmätningar

Resultatet av bärighetsmätningarna redovisas i detta avsnitt för respektive mätmetod.

4.2.1 Statisk Plattbelastning, (SPB)

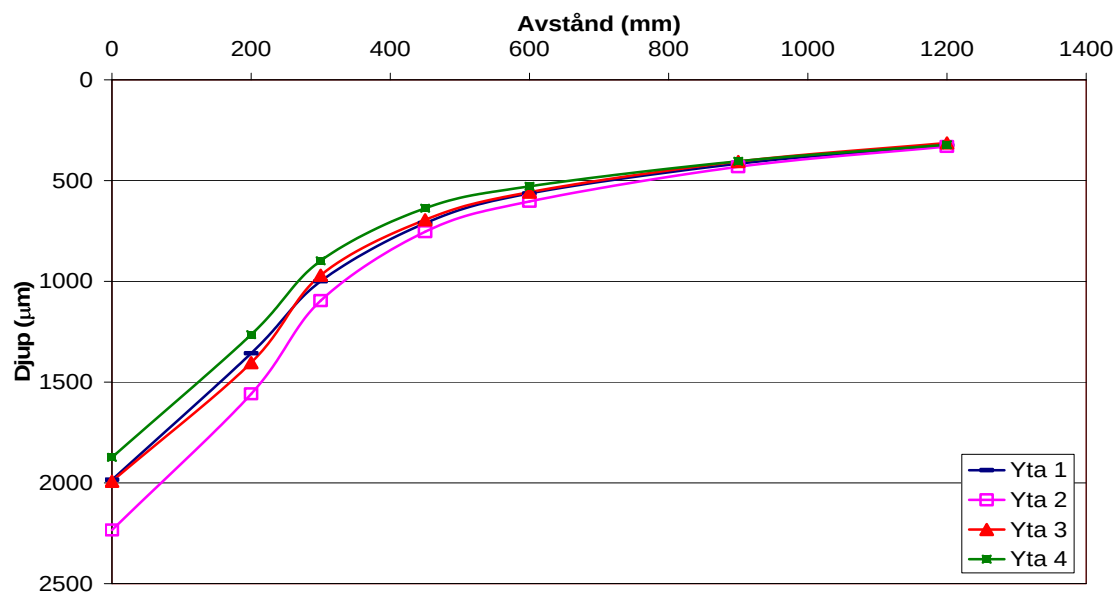
Provytornas bärighet, E_{v2} , redovisas i Figur 4.6 mot förstärkningslagrets tjocklek. ATB Vägs krav på 125 MPa vid yttre packningskontroll uppfylls för Provyta 1 och 3 medan Provyta 2 och 4 uppnår en bärighet strax under ställda krav. Det går att utläsa ett intervall mellan en tjocklek på ca 430 till 500 mm där bärigheten ligger över ATB Vägs krav medan tjocklekarna som ligger utanför inte klarar kravet. Att de överbyggnader med tunnare förstärkningslager har lägre bärighet är väntat medan den låga bärigheten på provyta 4 är oväntad och svårförklarlig.



Figur 4.6 Deformationsmodul, Ev2 för Provyta 1 till 4

4.2.2 Falling Weight Deflectometer, (FWD)

Resultatet från FWD efter alla överfarter redovisas i form av sjunktrattar i Figur 4.7. Deformationen från det 3:e och 6:e slaget normerades till 50 kN för att möjliggöra jämförelse mellan de olika lastnivåerna. Deformationerna är störst på Provyta 2 och minst på Provyta 4 vilket betyder att Provyta 4 har hög bärighet och Provyta 2 har lägst. Bärigheten är beroende av förstärkningslagrets tjocklek.

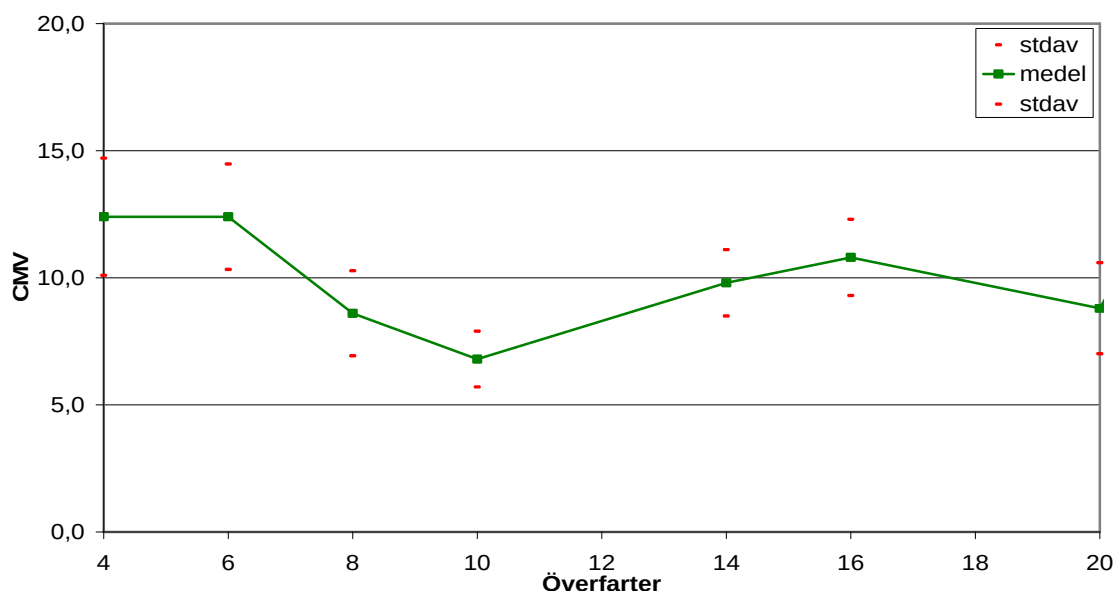


Figur 4.7 Sjunktrattar från FWD för Provyta 1 till 4 efter packning

4.2.3 Yttäckande packningskontroll, (YPK)

Resultatet från vältens kontinuerliga bärighetsmätningar, CMV, från provyta 1 redovisas i Figur 4.8. Provyta 2 till 4 redovisas i Bilaga G. Överfart 4 till 20 redovisas

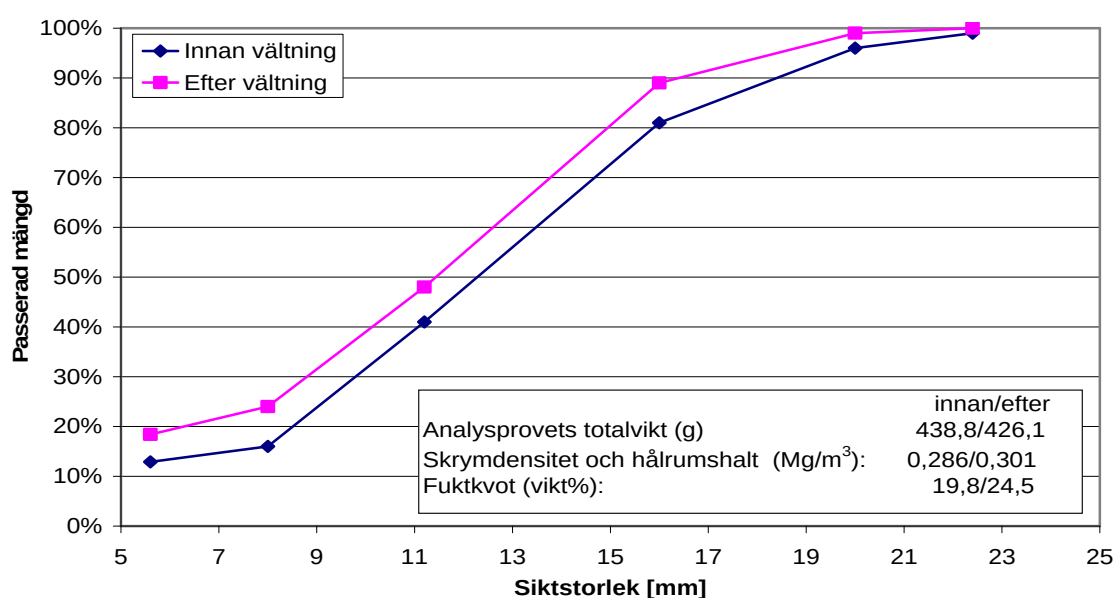
eftersom dessa hade samma vältinställning, se Bilaga B. Mätningen visar inget tydligt samband mellan antalet överfarter och ökad bärighet för Försök 1. Detta indikerar att mätmetoden inte är tillämpbar på denna typ av konstruktion.



Figur 4.8 CMV-värden för överfarterna 1 – 20, Provyta 1

4.3 Laboratieförsök av lättklinker

För att säkerställa materialkvaliteten och kontrollera packningens påverkan togs prover på lättklinkern innan och efter vältning från Provyta 1 och 3. Kvalitetskontrollen utfördes av NCC Roads ackrediterade laboratorium i Hisings Kärra och resultaten redovisas i Bilaga I. Lättklinkern under Provyta 1 uppvisar en nedkrossning genom en klart finare kornstorleksfördelning efter packning, se Figur 4.9. Under Provyta 3 har däremot inte lättklinkerns kornstorleksfördelning förändrats nämnvärt, se Bilaga I.



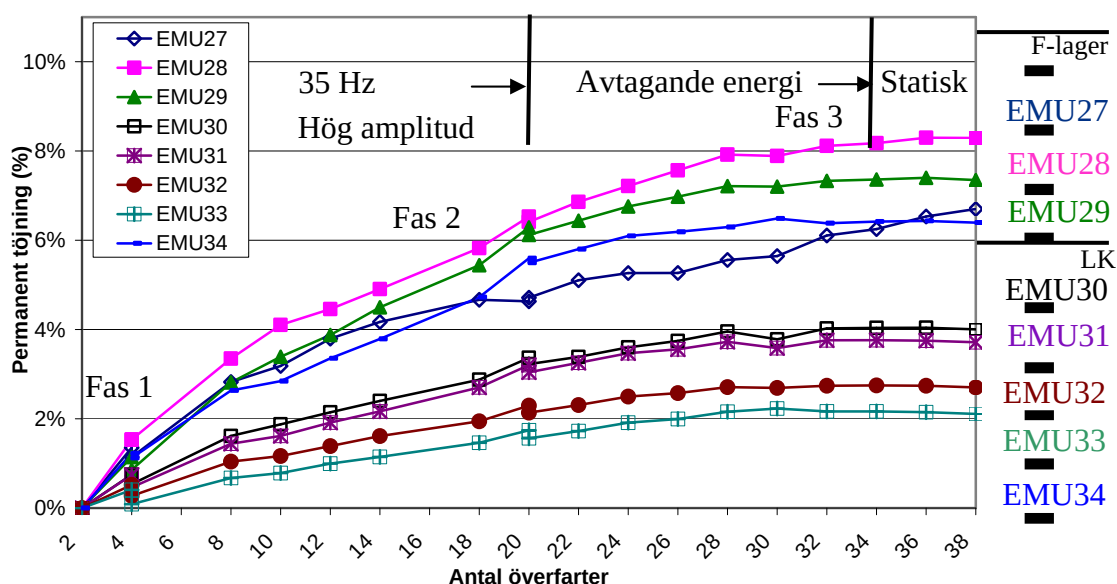
Figur 4.9 Kornstorleksfördelning innan och efter vältning, Provyta 1

5 Analys av resultaten

5.1 Packningsproceduren

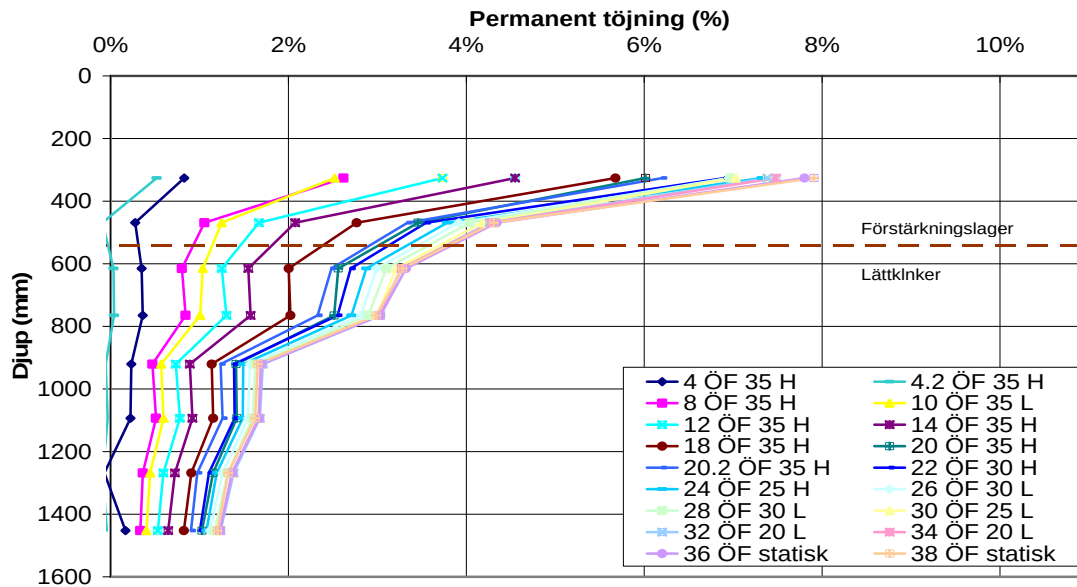
Under packningsprocedurens första skede vid Försök 1 användes högsta möjliga frekvens- och amplitudinställning på välten. Packningen orsakade under de första 8 överfarterna konstant deformationsutveckling i hela profilen. Därefter avtog deformationsutvecklingen men med fortsatt konstant hastighet. Efter 20 överfarter sänktes frekvensen med minskad packningsenergi som följd. Sänkningen gjordes av tidsskäl och inte på grund av deformationsavtagande som var den ursprungliga avsikten. Deformationsutvecklingen fortsatte, trots stegvis minskad packningsenergi, med näst intill oförändrad hastighet upp till 28 överfarter, se Figur 5.1. Detta tyder på större deformationer vid fortsatt packning med höga vältinställningar och därmed troligtvis förbättrad bärighet.

Efter 8 överfarter avtar töjningsförändringen markant utan att vältinställningarna förändrats. Detta fenomen återkommer på samtliga provvytor och är svårförklarligt.



Figur 5.1 Permanent töjning som funktion av antalet överfarter, Provyta 3 mät punkt a

Deformationerna uppmättes ca 1 m ner i lättklinkern som längst. I Figur 5.2 ses utvecklingen av den permanenta töjningen för Provyta 1. Figuren visar att töjningen är i stort sett konstant mot djupet från 300 mm och neråt, vilket indikerar att packningen har gett deformationer i hela lättklinkerlagret.



Figur 2.2 Permanent töjning som funktion av djupet, Provyta 3 mät punkt a

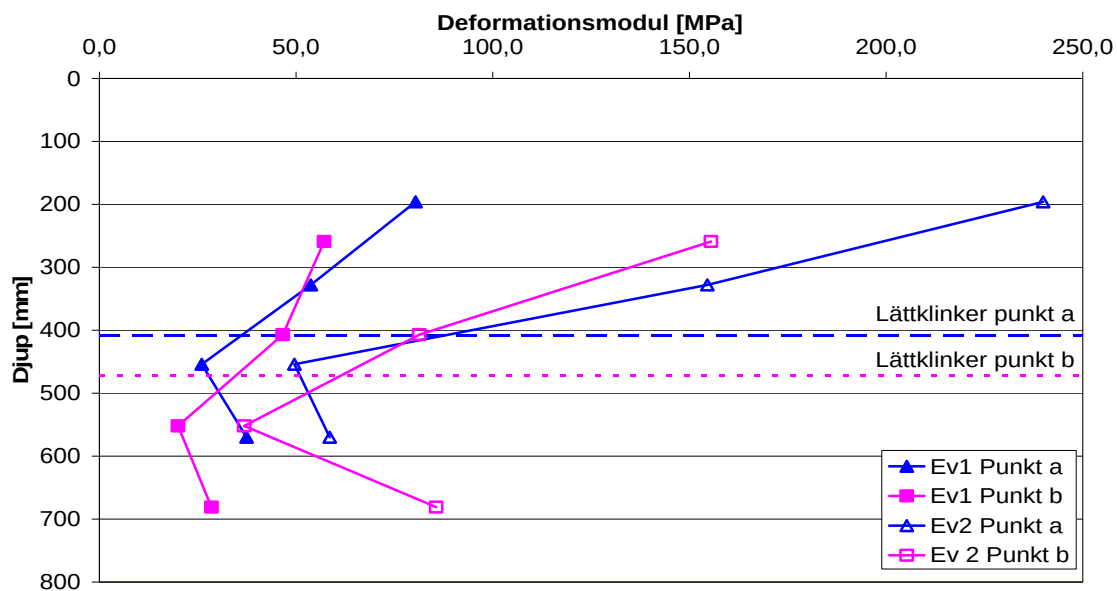
5.2 Lättklinker som underbyggnad

Utifrån jordtrycksmätningarna gjorda på provyta 1 har lasten på lättklinkerytan beräknats med hjälp av 2:1 metoden för Provyta 1 och 3. Då nedkrossning skedde på Provyta 1 men inte på Provyta 3 så kan gränslasten för lättklinkern uppskattas. Gränslasten beräknades till ca 96 kPa. Enligt triaxialförsök utförda av Dongmo-Engeland B. (2006) är gränslasten ca 90 kPa vid en horisontal inspänning mellan 40 och 80 kPa. Försöken visar således att lättklinkern inte nedkrossas när förstärkningslagret är över 500 mm.

5.3 Deformationsegenskaper

På den Förberedande Provytan gjordes plattbelastningsförsöken över EMU-spolarerna i punkt a och b samtidigt som deformationerna registrerades för de olika laststegen.

Med de uppmätta deformationerna och beräknade spänningar, ekvation 2.5 i avsnitt 2.5.1.1, kan en enkel deformationsmodul bestämmas med hjälp av Hookes lag ($\sigma = E \times \varepsilon$). Resultatet redovisas i Figur 5.3.



Figur 5.3 Deformationsmoduler på olika djup, Förberedande Provytan

Deformationsmodulen i förstärkningslagret avtar tydligt mot djupet i konstruktionen. I lättklinkern har modulen en genomgående tendens att öka mot djupet vilket kan bero på nedkrossning i det översta skiktet. De jordtrycksmätningar som gjordes visar på en avsevärt högre tillskottsspänning än den beräknade gränslasten, vilket styrker teorin om att lättklinkern nedkrossats.

Vid dimensionering av vägkonstruktioner med Vägverkets dimensioneringsprogram, PMS Objekt, använder man deformationsmodulen 40 MPa för lättklinker och 450 MPa för krossat förstärkningsmaterial. De deformationsmoduler som framräknats vid det här försöket visar att 450 MPa kan vara en kraftig överskattning. Modulen som används för lättklinker överensstämmer relativt bra med de värden som framräknats i den här studien om nedkrossning undviks.

Om lättklinkerns deformationsmodul ökar från 40 MPa till 50 MPa så skulle vägen klara 2,4 gånger fler standardaxlar enligt undergrundskriteriet, Ekvation 2.2. Detta indikerar att även små förändringar på den dimensionerande deformationsmodulen har stor betydelse för vägens beräknade livslängd när undergrundskriteriet är dimensionerande. Vid dimensionering av en vägkonstruktion är det dock oftast asfaltkriteriet, Ekvation 2.1, som är dimensionerande. En ökning av modulen i lättklinkern har därför oftast ingen betydelse för vägens livslängd.

5.4 Bärighet

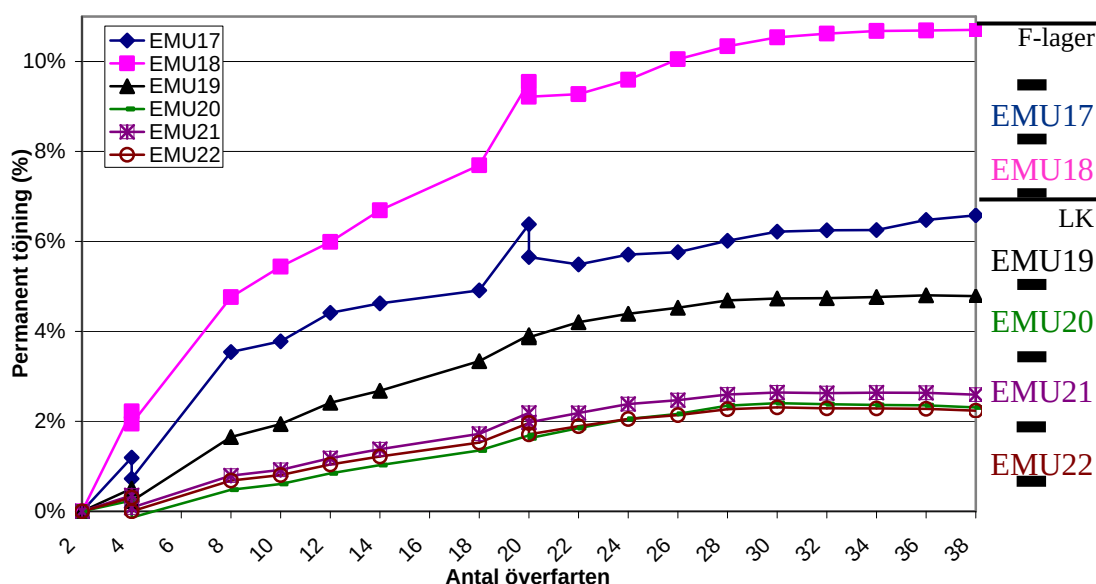
Det kan konstateras att SPB-resultaten för samtliga provytor har uppnått värden omkring kravet i ATB Väg 2005.

SPB och FWD visar båda att tunnaste förstärkningslagret ger lägst bärighet. Fallvikten visar att den tjockare överbyggnaden har en bättre bärighet, medan SPB inte bekräftar detta samband. Mätningarna med yttäckande packningskontroll gav ingen indikation på provytornas bärighet.

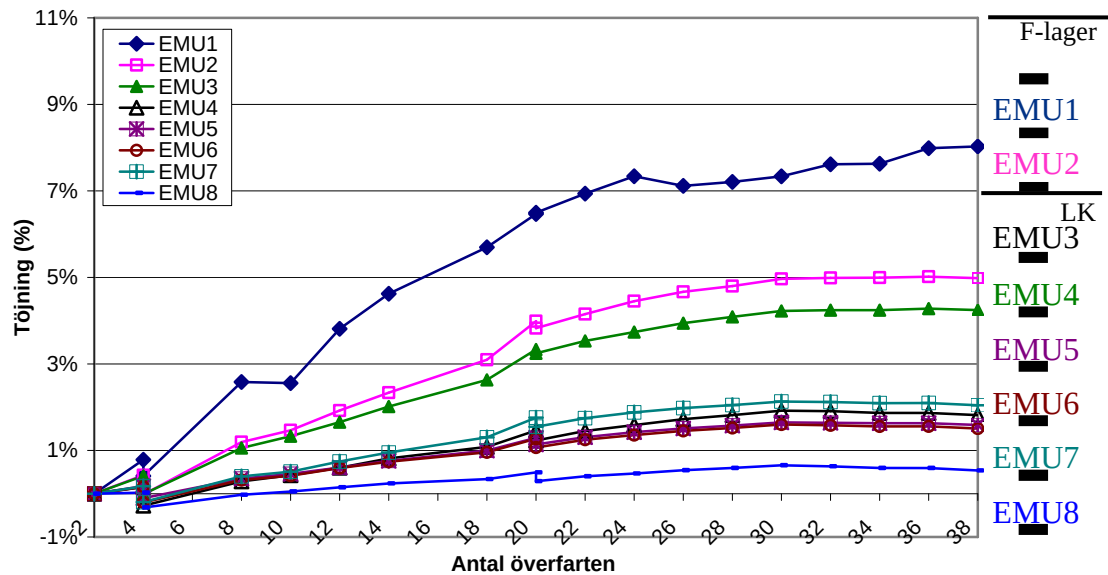
På grund av oklara resultat kan inga definitiva slutsatser angående bärigheten dras. Plattbelastningsmätningar gjordes i två punkter på varje provyta. Resultaten från mätningarna var inte entydiga och för att erhålla mer tillförlitliga resultat hade det krävts fler mätpunkter. Mycket tyder dock på att bärigheten är beroende av tjockleken på förstärkningslagret. Mätresultaten indikerar att förstärkningslager med tjocklek över 400 mm uppfyller kraven i ATB Väg.

5.5 Armeringsnät

Armeringsnätet har inte inneburit någon uppenbar skillnad i mätresultatet, förutom i skiktet strax ovanför armeringsnätet. Den permanenta töjningen där är näst intill dubbelt så stor som motsvarande skikt på Provyta 1 punkt a, se Figur 5.4 EMU 18 och 5.5 EMU 2. En orsak till de större permanenta töjningarna kan vara att materialet hade en lägre densitet från start omkring armeringsnätet. Den lägre densiteten kan bero på att nätet kan ha orsakat hålrum i förstärkningslagret vid utläggningen. När sedan packningen och vibrationerna har startat så har hålrummen fyllts igen. Detta styrks av att den största skillnaden i deformationerna bildas i början av packningsförfarandet.



Figur 5.4 Permanent töjning som funktion av antalet överfarter, Provyta 2 mät punkt a



Figur 5.5 Permanent töjning som funktion av antalet överfarter, Provyta 1 mätpunkt a

Bärigheten på Provyta 2 med armering är lägre än på de övriga provytorna. Skillnaden beror sannolikt på att denna yta hade ett något tunnare förstärkningslager. Hypotesen om att armeringen skulle ta upp dragspänningar i underkant på förstärkningslagret och därigenom förbättra bärigheten och packningseffekten kan inte bekräftas i denna studie.

6 Slutsatser

Fältförsöken kan sammanfattas i följande slutsatser.

Fortsatt packning hade gett större deformationer och därmed troligtvis förbättrad bärighet. Eftersom deformationerna fortsatte att utvecklas innan packningsenergin sänktes markant.

Lättklinkern har inte nedkrossats i någon större utsträckning vid Försök 1 när överbyggnadstjockleken översteg ca 500 mm.

Lättklinkern nedkrossades vid ca 100 kPa i tillskottslast från välten i försöken vilket överensstämmer bra med triaxialförsök.

Lättklinkern komprimerades ca 3 %

Lättklinkern packades till minst 2,5 m djup

Deformationsmodulen som används vid dimensionering med lättklinker, 40 MPa, stämmer bra överens med de värden som framräknats i den här studien. Resultaten tyder på att en högre deformationsmodul har uppnåtts för den okrossade lättklinkern på den Förberedande Provytan, vilket tyder på att det finns möjlighet att använda en högre deformationsmodul vid vägdimensionering.

Bärigheten är beroende av tjockleken på förstärkningslagret. Mätresultaten indikerar att tjocklekar över 400 mm klarar kraven i ATB Väg.

De försök som genomfördes med armeringsnät i förstärkningslagret gav inte några indikationer på förbättrade egenskaper för vägkonstruktionen. Hypotesen att armeringen skulle ta upp dragspänningar i underkant på förstärkningslagret och förbättra resultatet kan inte bekräftas i denna studie.

6.1 Framtida forskning och rekommendationer

Det rekommenderas ytterligare forskning inom följande områden.

- För att erhålla statistiskt sambestämda resultat så bör fler mätningar och försök utföras.
- Mer specifika försök där man utvärderar en parameter, till exempel att enbart jämföra olika packningsmetoder.
- Undersökningar som utvärderar bärighetsmätningssmetoderna därför att resultaten ifrågasätter om bärighetsmetoderna verkligen verifierar produktens kvalitet.

7 Referenser

Johansson B, Kennedy H, (2007): *Bärighet på väg – via förbättrad packning Fullskaleförsök med lera som undergrund*, Rapport 2007:7 ISSN 1652-9162, Chalmers Tekniska Högskola, 2007

FAS Asfaltbok, (2002): Föreningen för asfaltbeläggningar i Sverige – FAS, 2002

Vägverket (2003): *Lättklinker i Vägkonstruktioner* (2003), ATB Väg 2003, <http://www.vv.se/filer/publikationer/ATB-L-K.pdf>, 2006-08-10, Publ. 2003:1

Vägverket (2005): *Dimensionering*, ATB Väg 2005, kap C, VV, Publ 2005:112, 2007-01-11

Djärf, Wiman, Carlsson. (1996): *Dimensionering vid nybyggnad*, VTI, VTI meddelande Nr 778, Linköping, 1996

Svenska Kommunförbundet (2003): *Bära eller brista, handbok i tillståndsbedömning av belagda gator och vägar*, Svenska Kommunförbundet, Väg och Trafikinstitutet och Vägverket, Stockholm

Forssblad L. (2000): *Packning*. Svensk byggtjänst, Stockholm

Johansson B. (2001): *Rockfill pavements on soft subsoil – construction and compaction*. Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2001.

Vägverket (1993): *Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning*, VV publ. Nr.1993:19, 1993

Hansbo S: *Jordförstärkning*, Chalmers Tekniska Högskola.

Vägeverket (1998): *Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat*, Metodbeskrivning 112:2998, <http://www.vv.se/filer/publikationer/vvmb112.pdf>, Publ 1998:80, 2006-08-11

Dynapac (2001): *Packning och utläggning, teori och praktik*, Sverige 2001

Dongmo-Engeland B. (2006): *Strength properties of Light Weight Aggregates (LWA)*, SINTEF Building and Infrastructure, Trondheim, Norway, 2006.

Internetkällor

CIMA (1994): *Vibratory roller handbook*, <http://www.aem.org/CBC/ProdSpec/BAEB/PDF/VibratoryRollerHandbook.pdf>, 2007-01-09

Hamm AG (2006): *Oscillation Information*, <http://www.hammag.com/english/pages/quicklinks/oszillation/oscillations3eng.pdf>, 2006-08-11

Maxit (2007), *Lättklinker i genomskärning*, <http://www.maxit.se/2148/>, 2007-01-09

Examensarbeten

Bergman E. Genberg C. (2005): *Packningsegenskaper och hållfasthet för moränjordar*, Institutionen för bygg- och miljöteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Examensarbete 2005:78

Rimstedt M. (2006): *Uppföljning av bärighet och deformationsutveckling av terminalytor vid inventering och nybyggnad i Göteborgs hamn*, Institutionen för bygg- och miljöteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Examensarbete 2006:31

Bilagor

Bilaga A: Profilskisser över provytorna

Bilaga B: Vält- och mätningsschema

Bilaga C: Skjuvhållfasthet

Bilaga D: Teknisk beskrivning av vält

Bilaga E: Plattbelastningsresultat

Bilaga F: Fallviktsmätning

Bilaga G: CMV-värden

Bilaga H: Emu-töjning under SPB, förberedande provyta

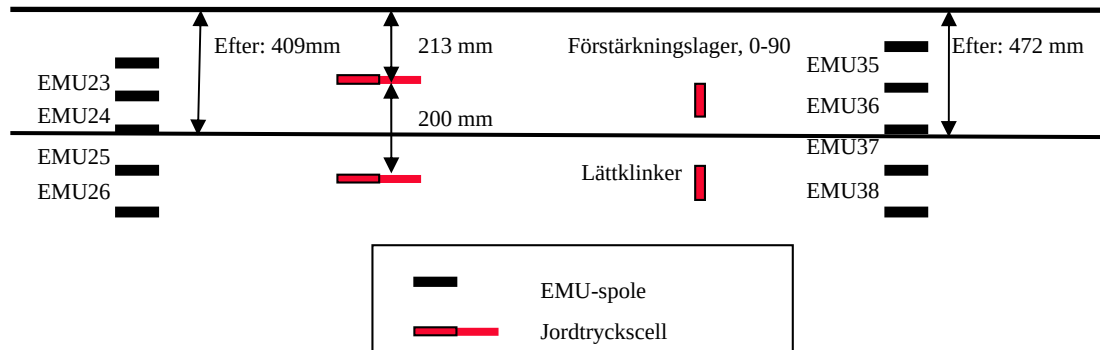
Bilaga I: Kvalitetskontroll av lättklinker, siktanalys

Bilaga J: Töjningsdiagram

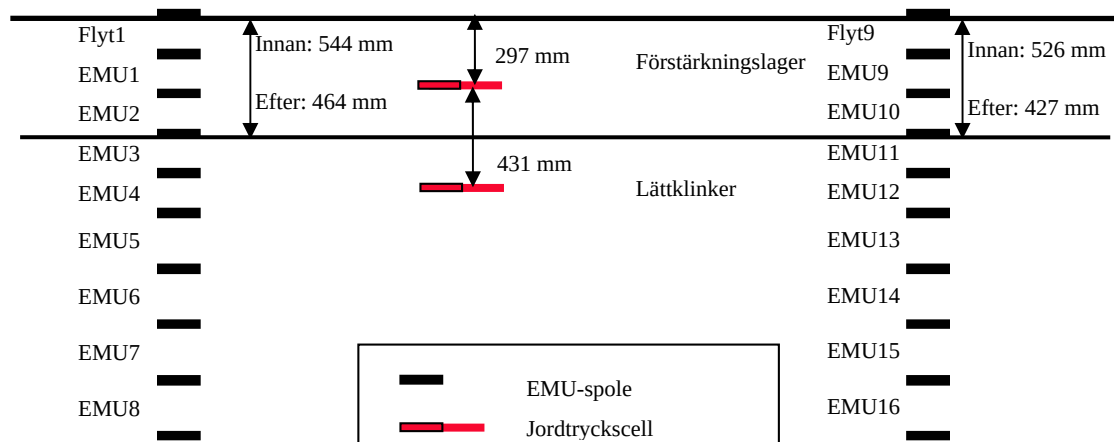
Bilaga K: Jordtrycksmätning vid överfart

Bilaga A: Profilskisser över provytorna

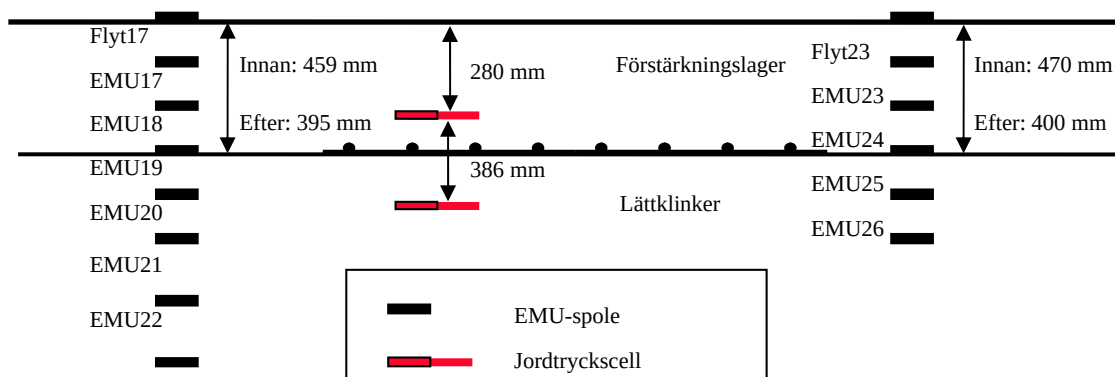
Förberedande provyta



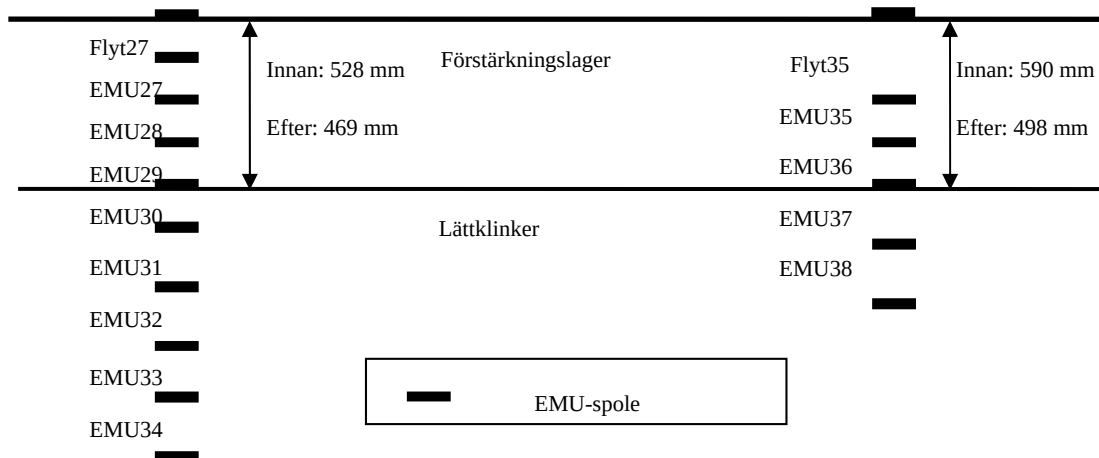
Provyta 1



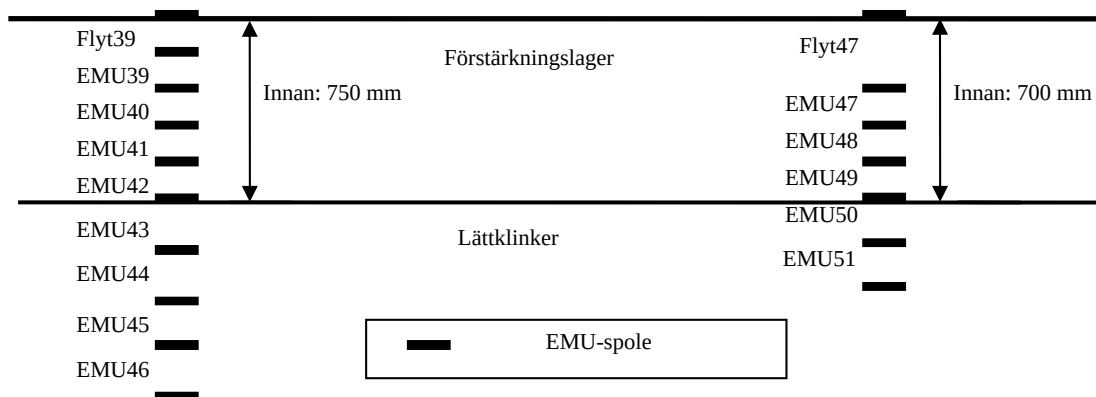
Provyta 2



Provyta 3



Provyta 4



Bilaga B: Vält- och mätningsschema

Vältens amplitud var vid inställning hög ca 1,7 mm och vid låg ca 0,8 mm. Varje mätning markeras med ett kryss i tabellen. SPB står för statisk plattbelastning och FWD för tung fallvikt.

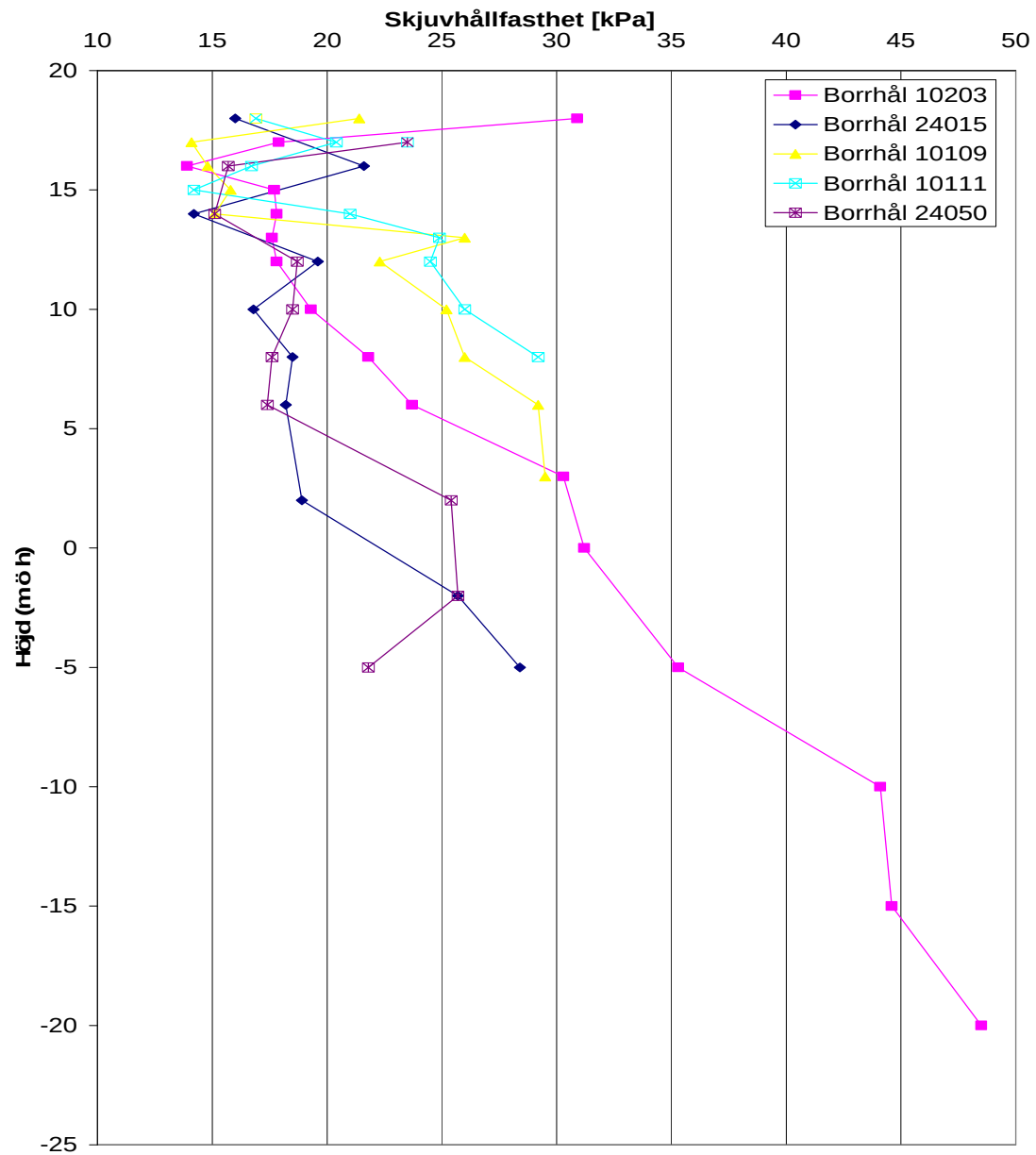
Förberedande Provyta

Överfart	Frekvens [Hz]	Amplitud	EMU	Jordtryck	SPB
1-2	20	Låg	x	x	
3-4	20	Låg	x		
5-6	20	Låg	x	x	
7-8	20	Låg	x	x	
9-10	20	Låg	x x	x	
11-12	25	Låg	x	x	
13-14	25	Låg	x	x	
15-16	25	Låg	x	x	
17-18	30	Låg	x	x	
19-20	30	Låg	x	x	
21-22	30	Låg	x	x	
23-24	35	Låg	x	x	
25-26	35	Låg	x	x	
27-28	35	Låg	x	x	
29-30	25	Hög	x	x	
31-32	25	Hög	x	x	
33-34	25	Hög	x	x	
35-36	30	Hög	x	x	
37-38	30	Hög	x	x	
39-40	30	Hög	x	x	
41-42	35	Hög	x	x	
43-44	35	Hög	x	x	
45-46	35	Hög	x x	x	x
47-48	25	Låg			
49-50	25	Låg			
51-52	25	Låg			
53-54	Statisk	-			
55-56	Statisk	-	x		x

Provyta 1-4

Överfarter	Frekvens [Hz]	Amplitud	EMU	Jordtryck	SPB	FWD
1-2	35	Hög	x			
3-4	35	Hög	x x	x		
5-6	35	Hög	x			
7-8	35	Hög	x	x		
9-10	35	Låg	x	x		
11-12	35	Hög	x			
13-14	35	Hög	x	x		
15-16	35	Hög	x			
17-18	35	Hög	x			
19-20	35	Hög	x x		x	
21-22	30	Hög	x	x		
23-24	25	Hög	x	x		
25-26	30	Låg	x	x		
27-28	30	Låg	x	x		
29-30	25	Låg	x	x		
31-32	20	Låg	x	x		
33-34	20	Låg	x			
35-36	Statisk	-		x		
37-38	Statisk	-	x		x	x

Bilaga C: Skjuvhållfasthet



Bilaga D: Teknisk beskrivning av vält

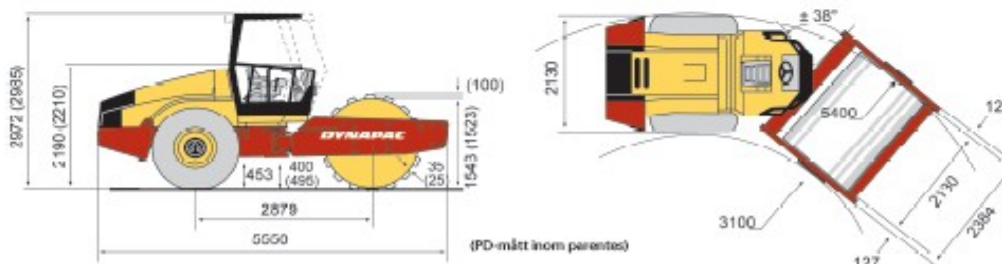
DYNAPAC

CA302

Vibrerande
Jordpackningsvält



Tekniska data



Vikter (kg)	
Max. arbetsvikt	14900
Arbetsvikt (inkl. ROPS)	12700
Valsmodulvikt	8100
Traktormodulvikt	4600
Framkomlighet	
Arbets hastighet (km/h)	0 - 9
Antal pads	-
Padyta (cm ²)	-
Snedställning av vals (°)	±9
Däckdimensioner (8 ply)	23,1x26
Teoretisk backtagtningsförmåga (%)	55
Packningsdata	
Statisk linjelast (kg/cm)	38
Nominell amplitud, hög/låg (mm)	1,7/0,8
Vibrationsfrekvens, vid hög/låg amplitud (Hz)	33/33
Centrifugalkraft, vid hög/låg amplitud (kN)	300/146
Motor	
Modell	Deutz BF-4M2012C
Typ	Vattenkyld Turbo Diesel med After Cooler
Max effekt, SAE J1995, vid 2200 rpm, kW (hp)	93 (125)
Bränsletank (l)	250
Hydraulsystem	
Drivning	Axialkolvpump med variabelt displacement Axialkolvmotor med variabelt displacement Axialkolvmotor med konstant displacement
Vibration	Axialkolvpump med variabelt displacement Axialkolvmotor med konstant displacement Kugghjulpump med konstant displacement
Styrning	Hydrostatisk i fram & backreglage
Färd broms	Felsäker flerlamellbroms på växellåda och bakaxeln
Parkering/Nödbroms	

Bilaga E: Plattbelastningsresultat

Förberedande provyta

Punkt a	46 Överfarter	56 Överfarter
Belastning 1 (Ev1) [Mpa]	16	33
Belastning 2 (Ev2) [Mpa]	82	93
Kvot (Ev2/Ev1)	5	3
Mellan a och b		
Belastning 1 (Ev1) [Mpa]	20	30
Belastning 2 (Ev2) [Mpa]	100	105
Kvot (Ev2/Ev1)	5	3
Punkt b		
Belastning 1 (Ev1) [Mpa]	15	41
Belastning 2 (Ev2) [Mpa]	92	110
Kvot (Ev2/Ev1)	6	3

Provyta 1 till 4

Efter 20 Överfarter

Punkt a	Provyta 1	Provyta 2	Provyta 3	Provyta 4
Belastning 1 (Ev1) [Mpa]	23	18	24	18
Belastning 2 (Ev2) [Mpa]	116	101	118	100
Kvot (Ev2/Ev1)	5	6	5	6
Punkt b				
Belastning 1 (Ev1) [Mpa]	15	17	14	15
Belastning 2 (Ev2) [Mpa]	111	95	104	106
Kvot (Ev2/Ev1)	7	6	7	7

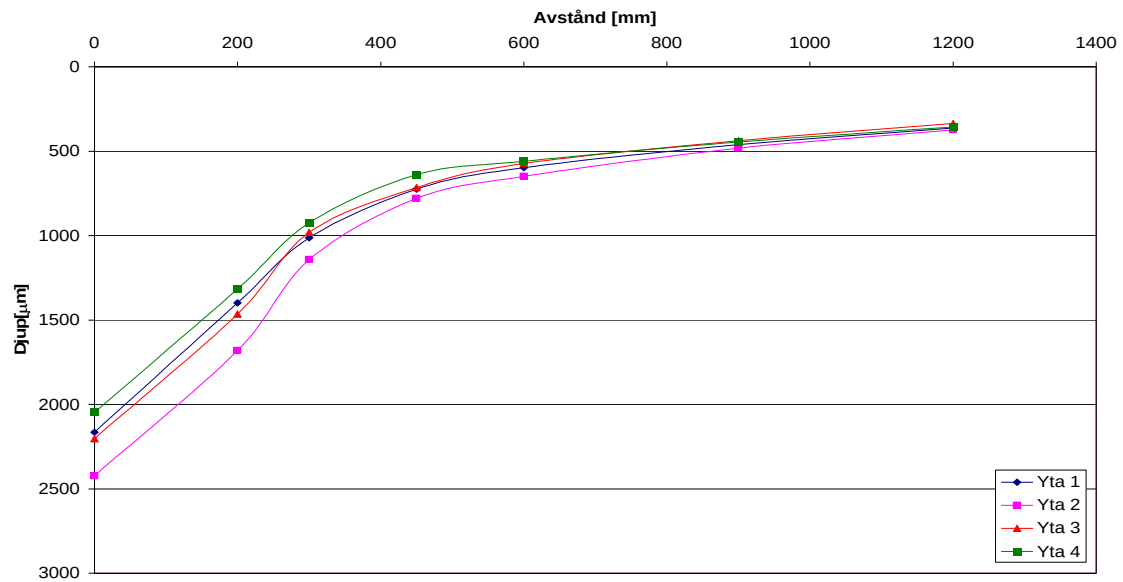
Efter 38 Överfarter

Punkt a	Provyta 1	Provyta 2	Provyta 3	Provyta 4
Belastning 1 (Ev1) [MPa]	68	36	50	39
Belastning 2 (Ev2) [MPa]	151	112	143	123
Kvot (Ev2/Ev1)	2	3	3	3
Punkt b				
Belastning 1 (Ev1) [Mpa]	59	17	66	40
Belastning 2 (Ev2) [Mpa]	138	103	132	118
Kvot (Ev2/Ev1)	2	6	2	3

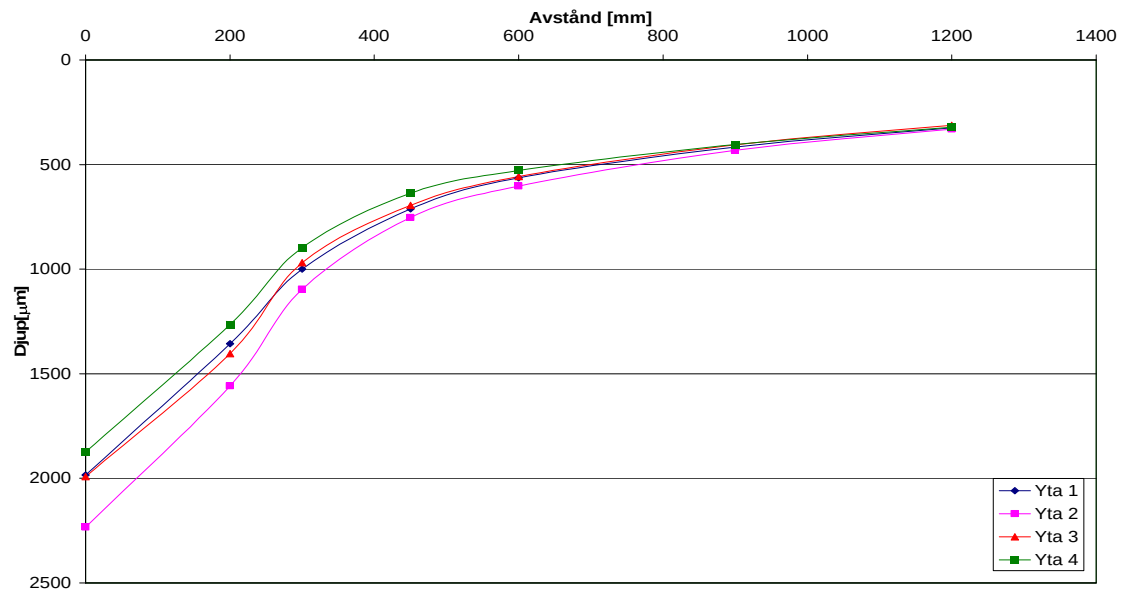
Bilaga F: Fallviktsmätning

Provyta 1-4

(ca30kN normerad till50kN)

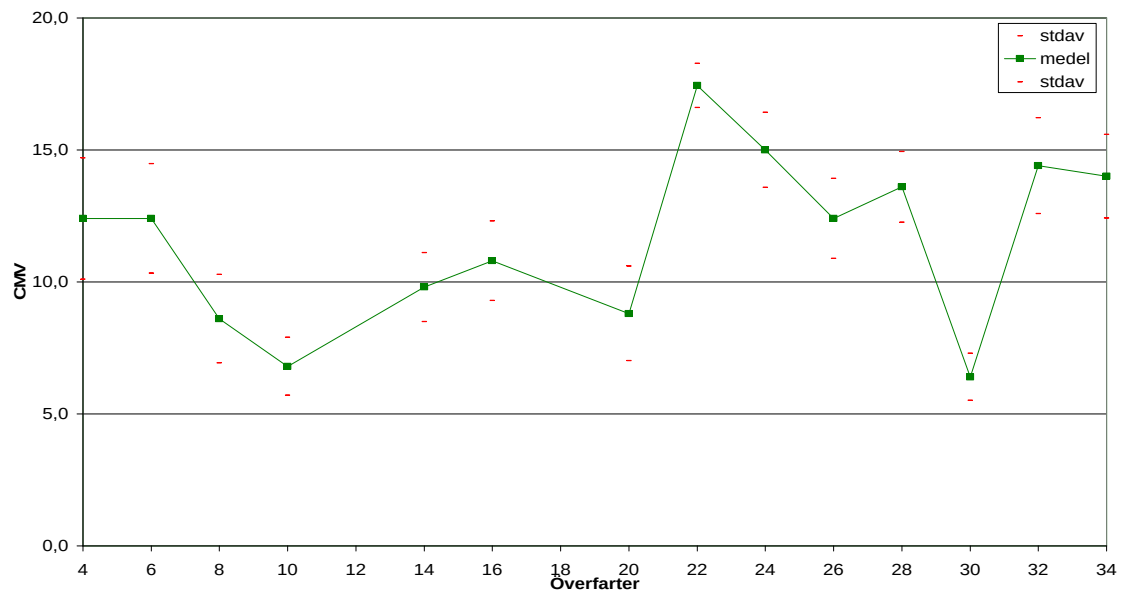


(ca50kN normerad till50kN)

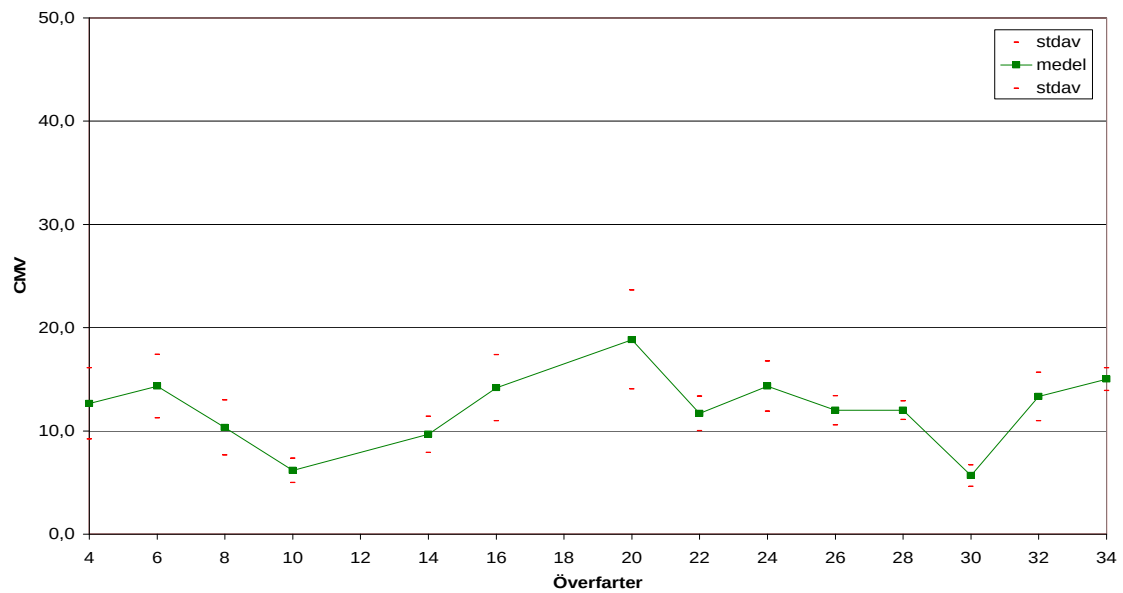


Bilaga G: CMV-värden

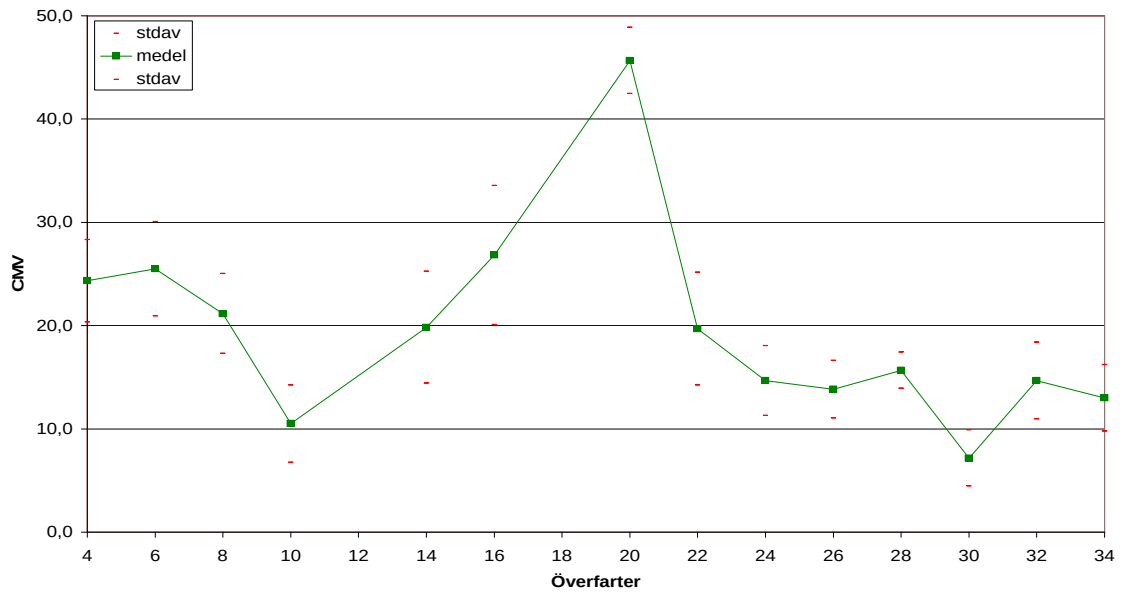
Yta 1



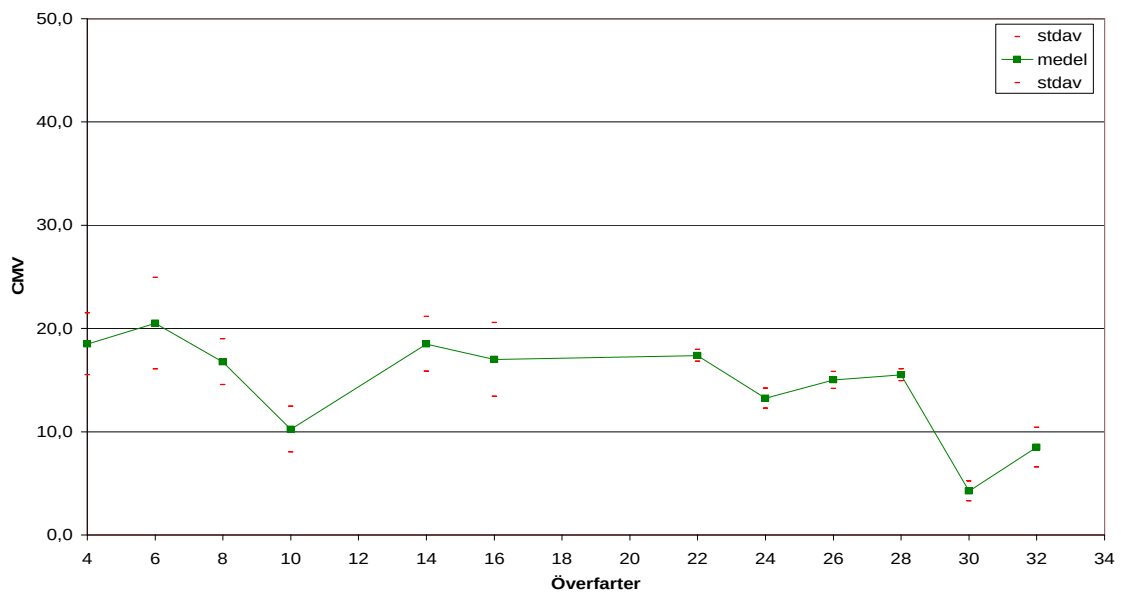
Yta 2



Yta 3



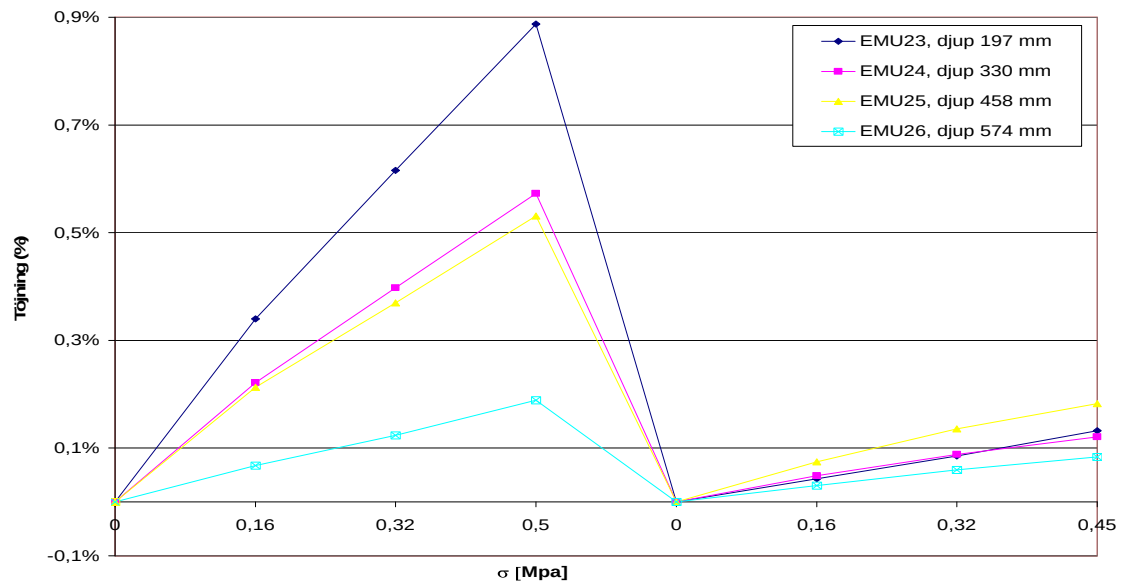
Yta 4



Bilaga H: Emu-töjning under SPB, förberedande provyta

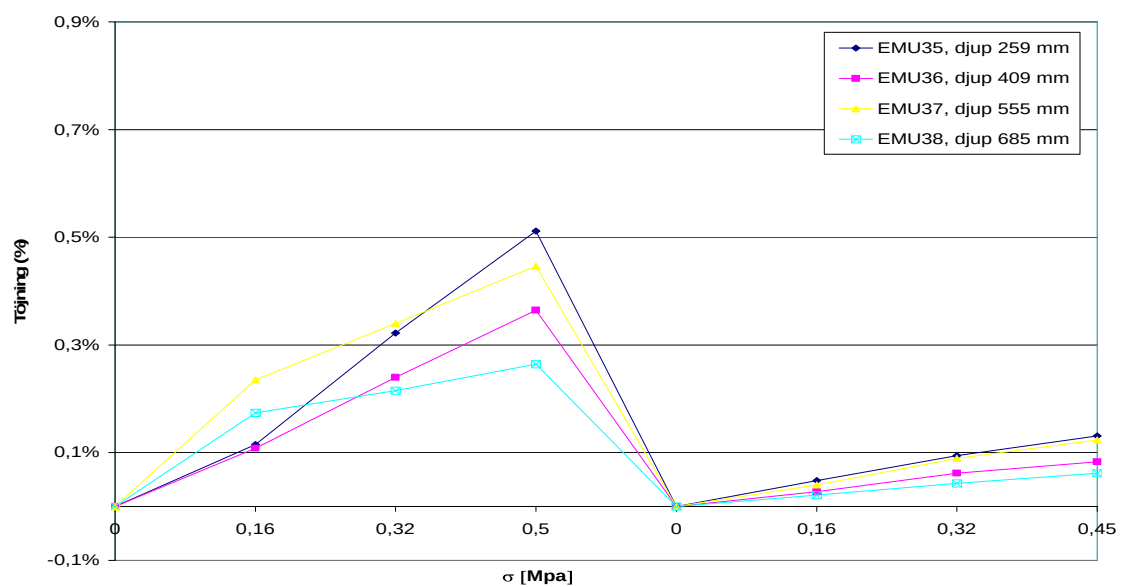
Efter 46 överfarter

Punkt a



Permanent töjningen som funktion av pålagd spänning

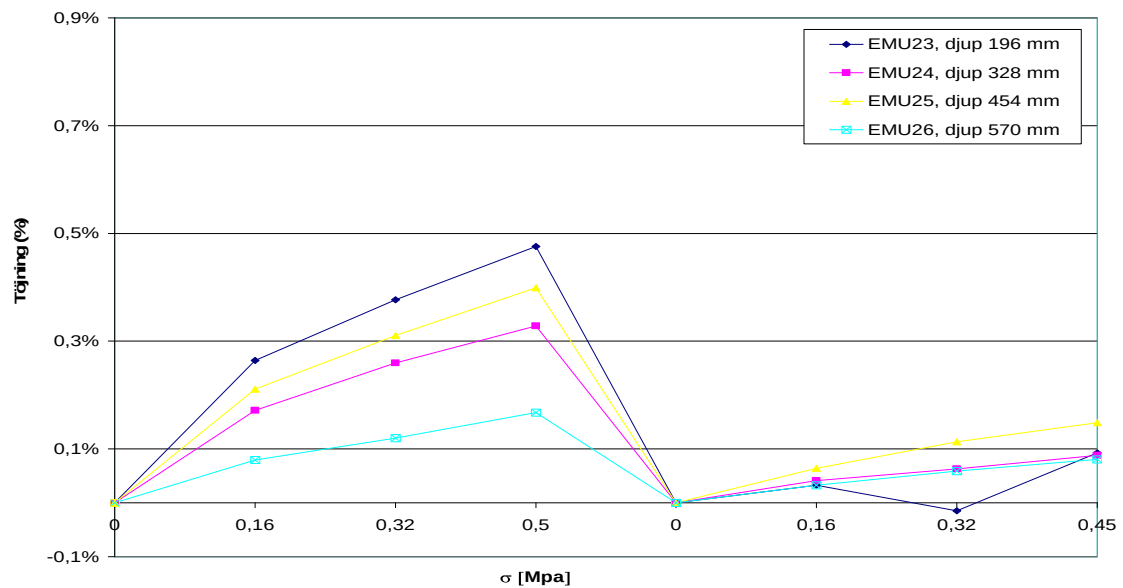
Punkt b



Permanent töjningen som funktion av pålagd spänning

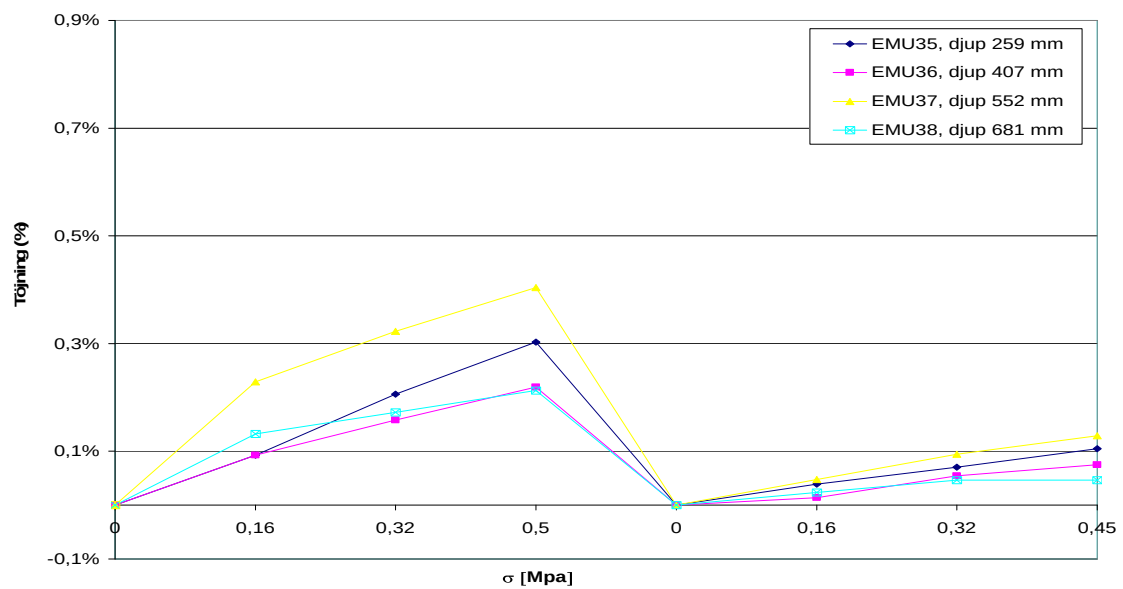
Efter 56 överfarter

Punkt a



Permanent töjningen som funktion av pålagd spänning

Punkt b

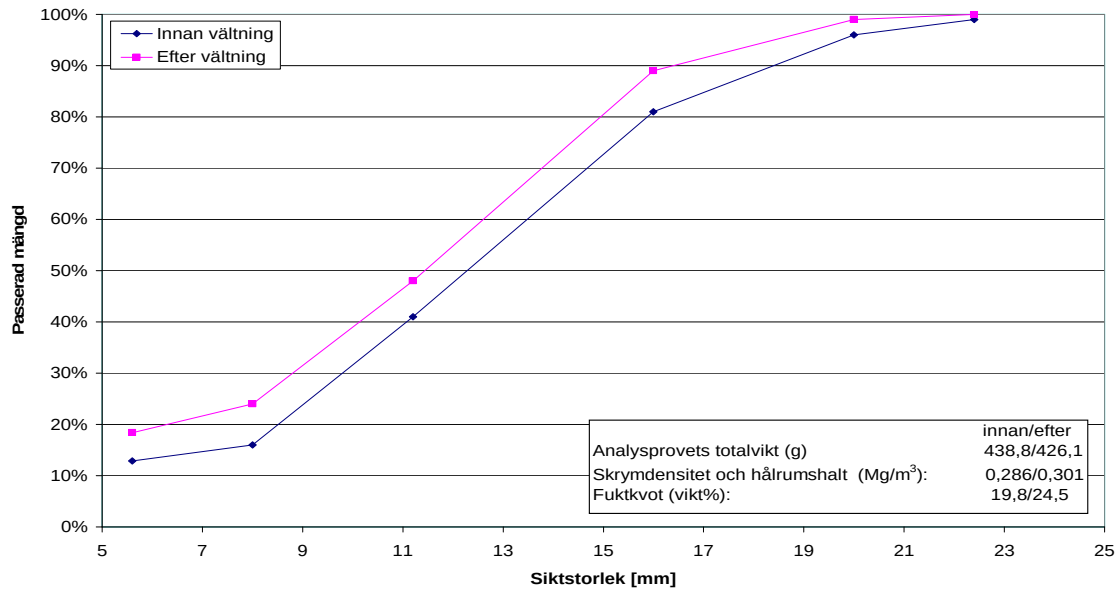


Permanent töjningen som funktion av pålagd spänning

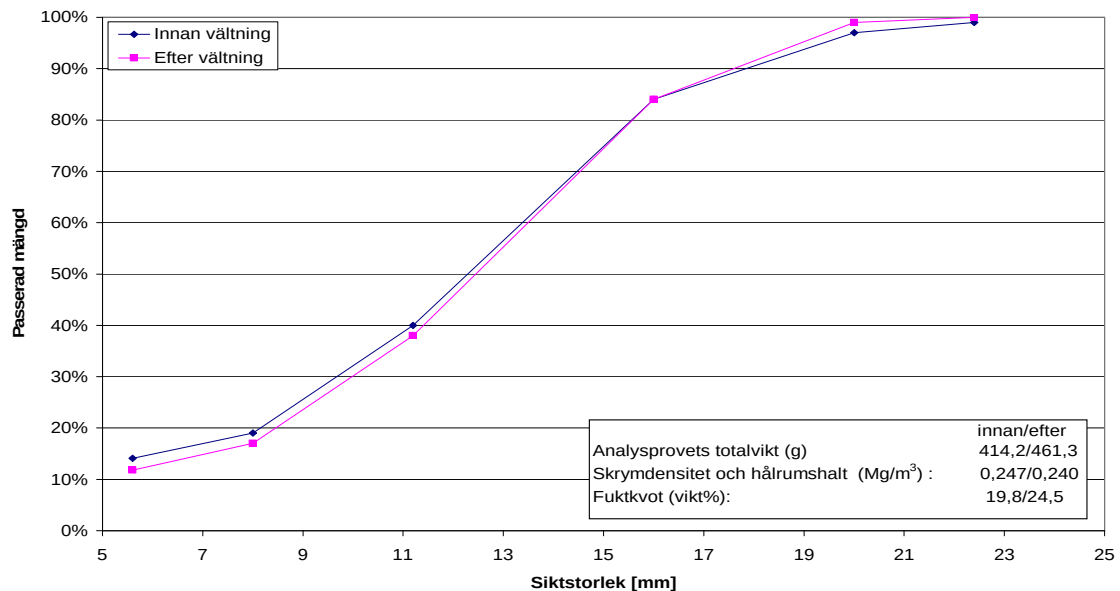
Bilaga I: Kvalitetskontroll av lättklinker, siktanalys

Kvalitetskontrollen av lättklinkern är utförd på Ncc Roads ackrediterade laboratorium i Hisings Kärra 2006-11-29. Proverna har tagits innan och efter vältning från Provyta 1 och Provyta 3.

Provyta 1

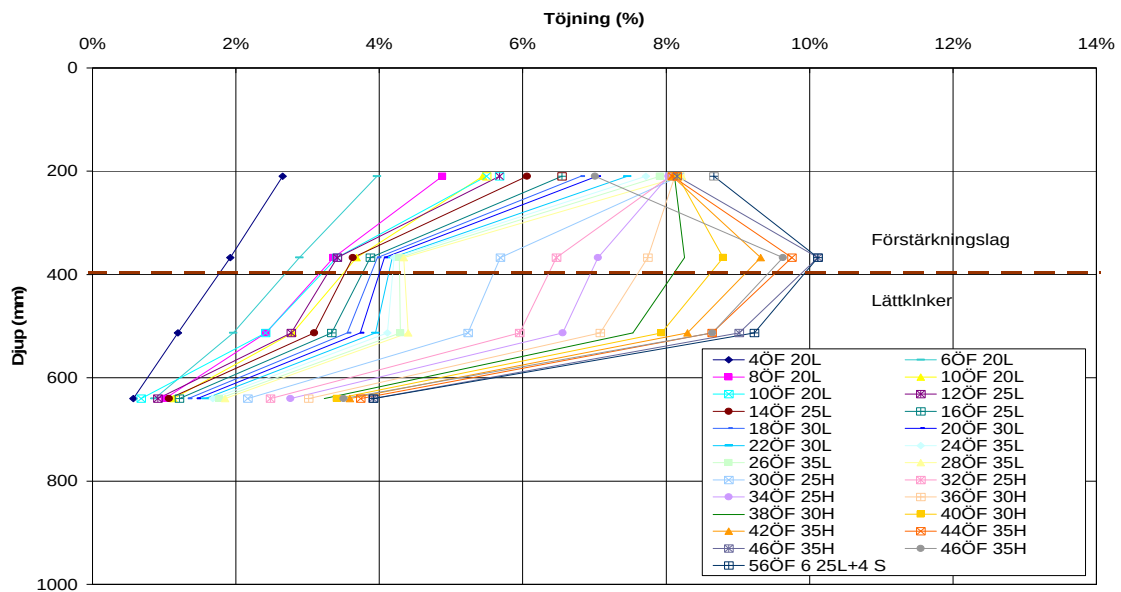


Provyta 3

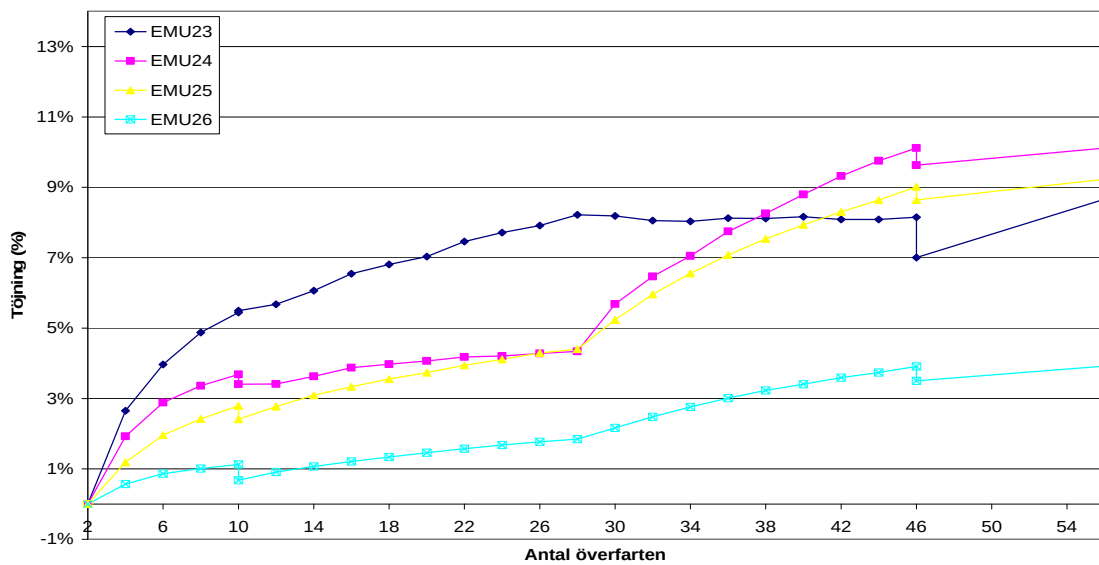


Bilaga J: Töjningsdiagram

Förberedande provyta, punkt a

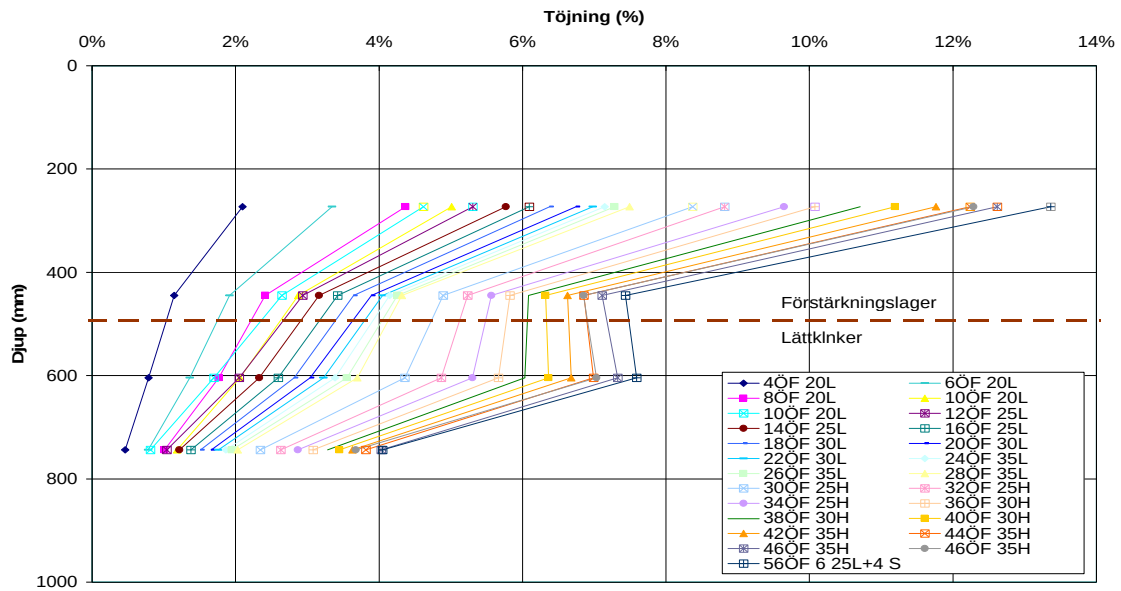


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

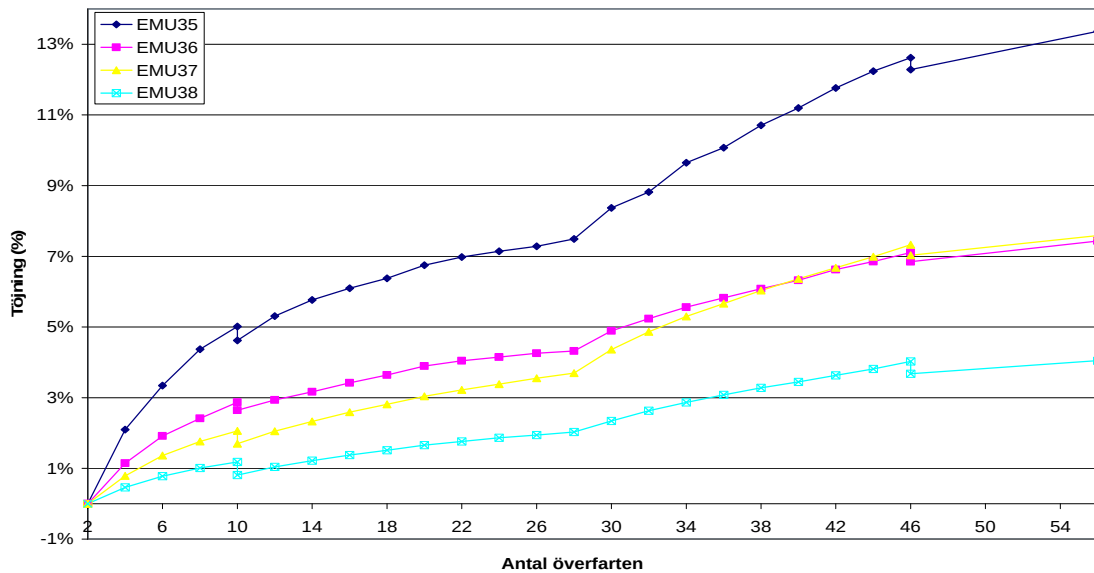


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

Förberedande provyta, punkt b

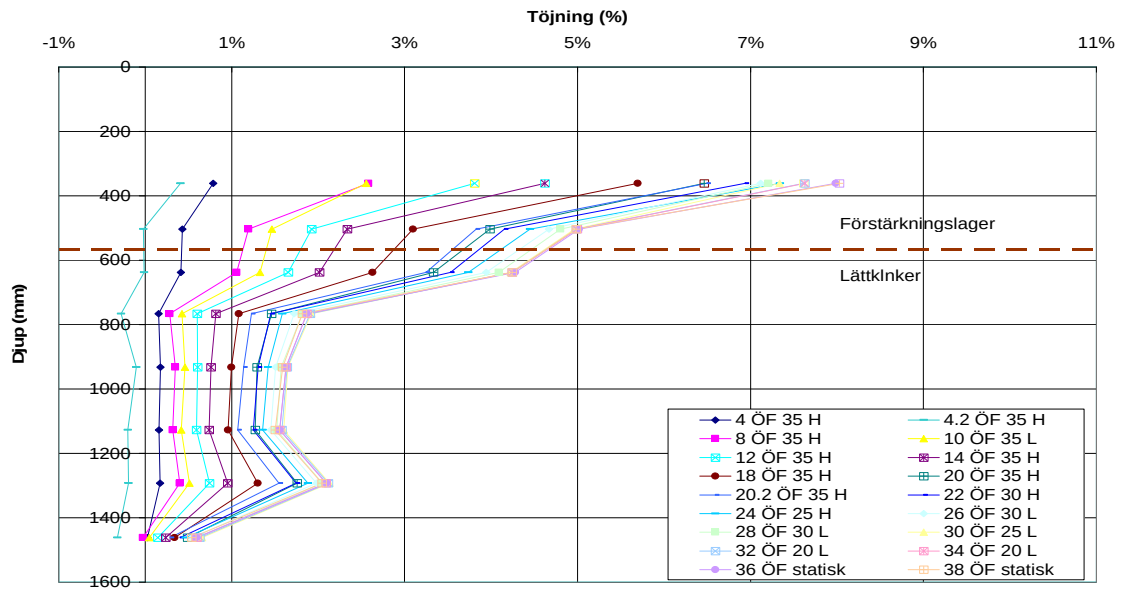


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

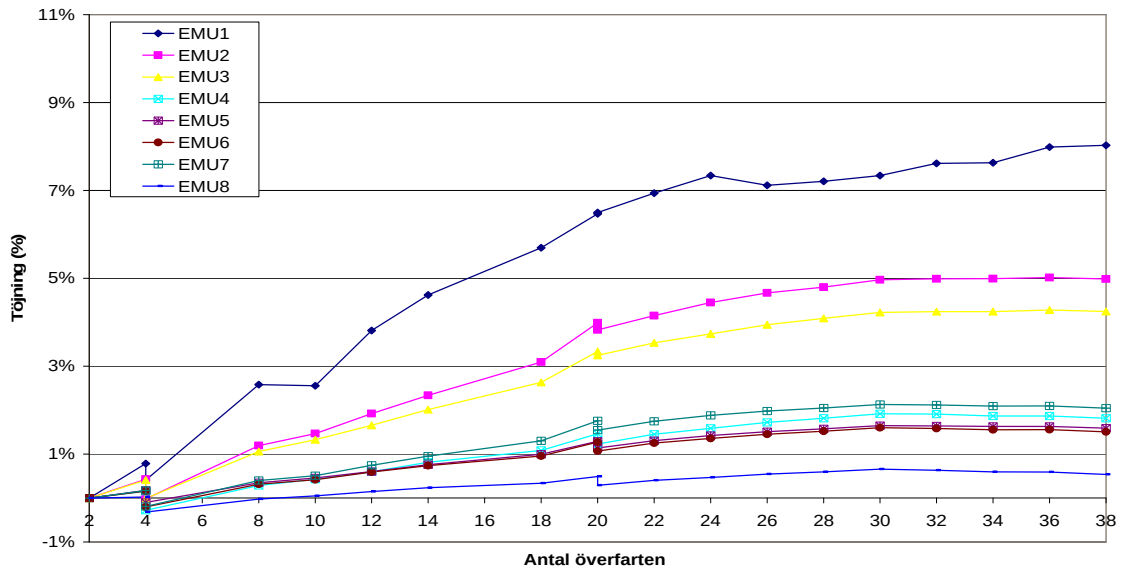


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

Provyta 1, punkt a

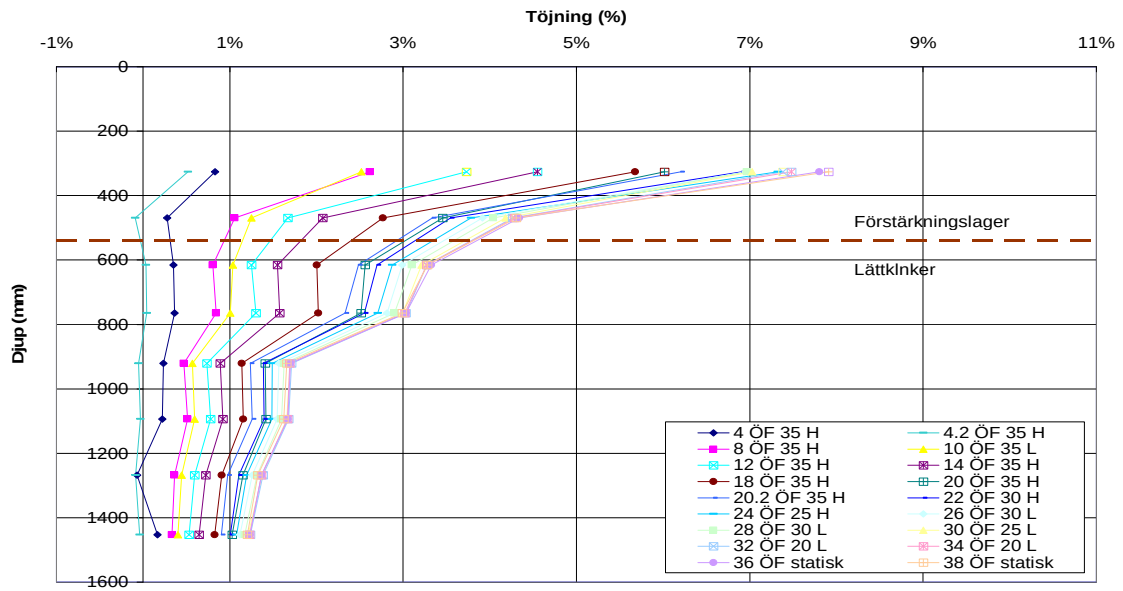


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

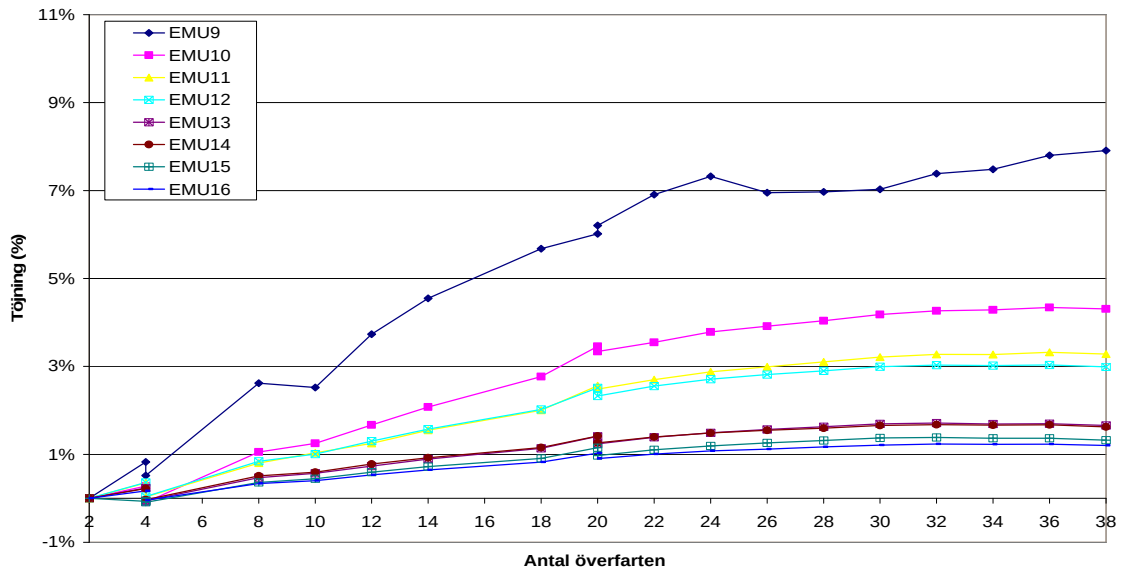


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

Provyta 1, punkt b

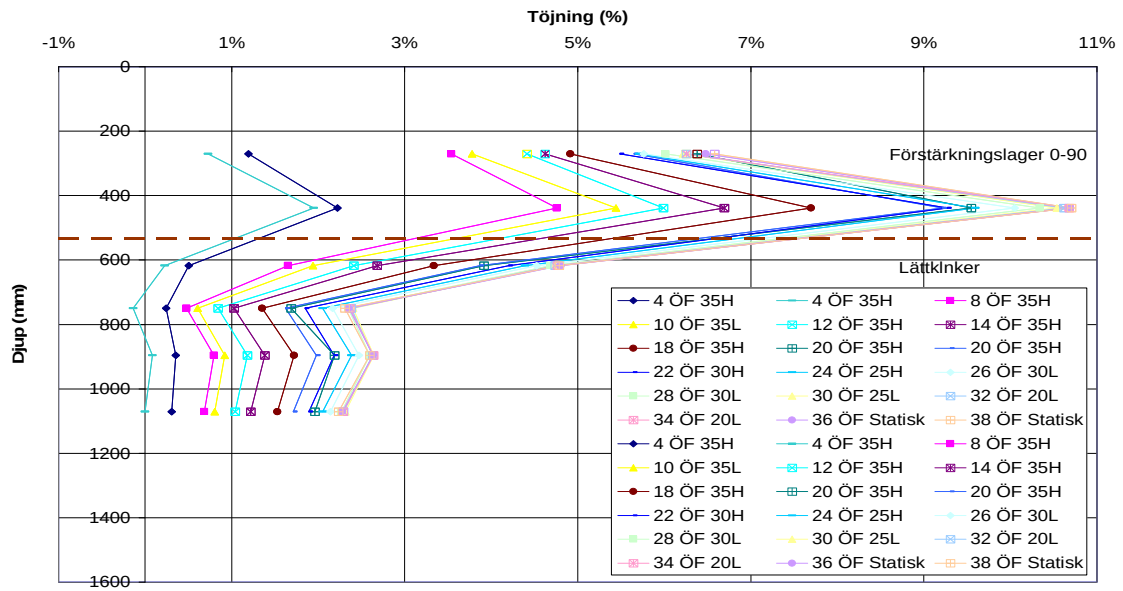


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

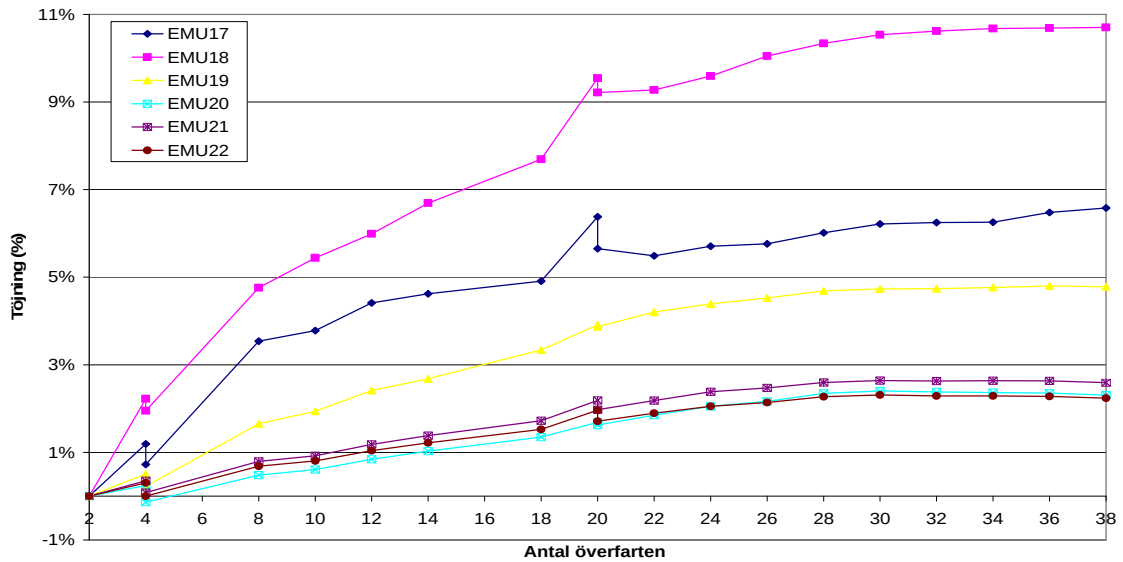


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

Provyta 2, punkt a

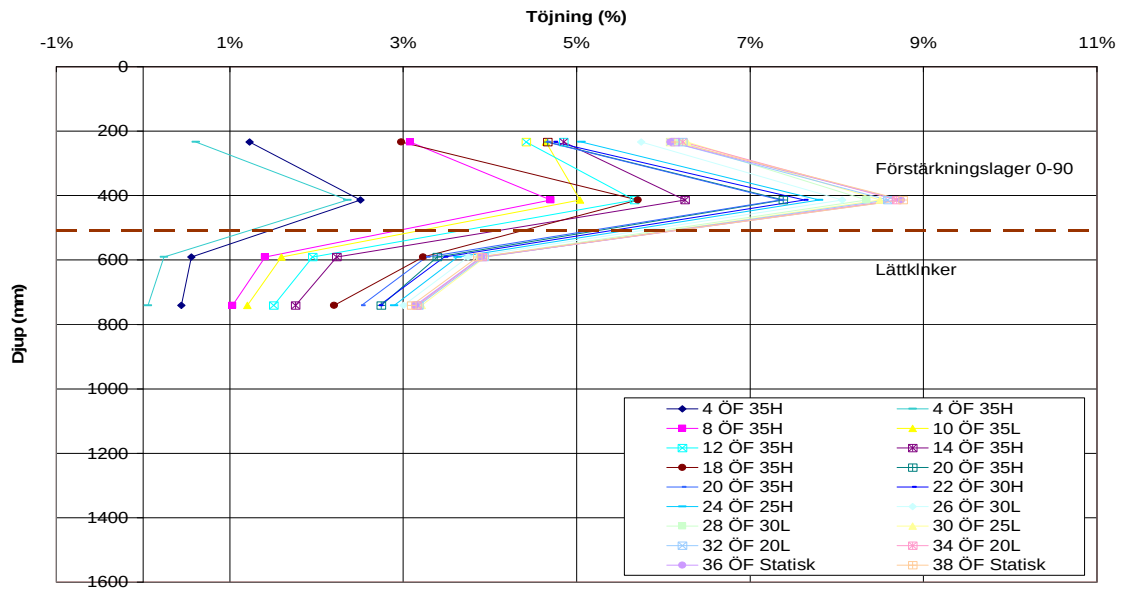


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

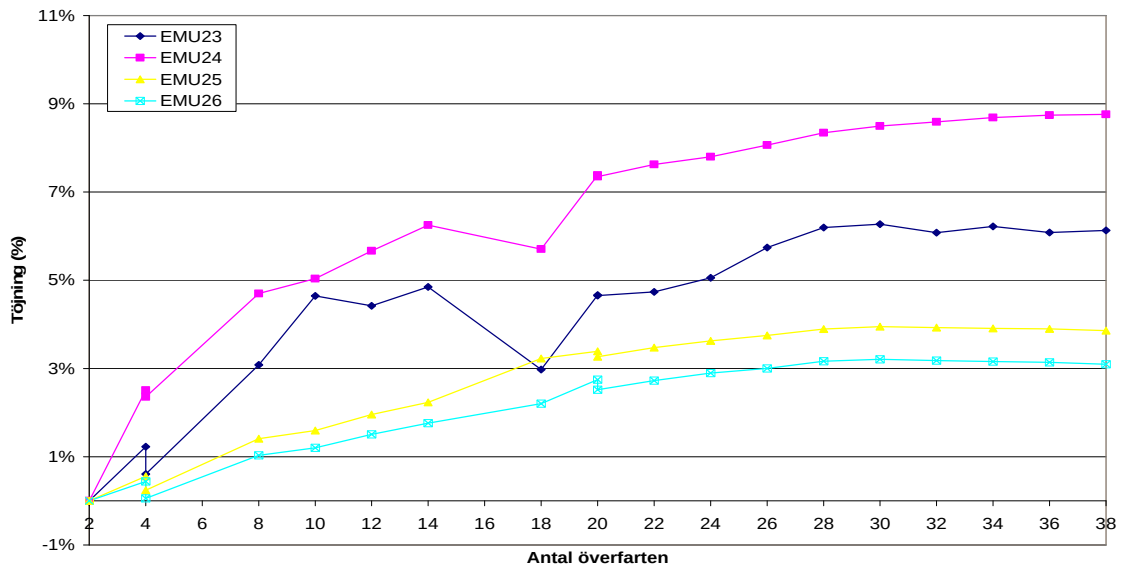


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

Provyta 2, punkt b

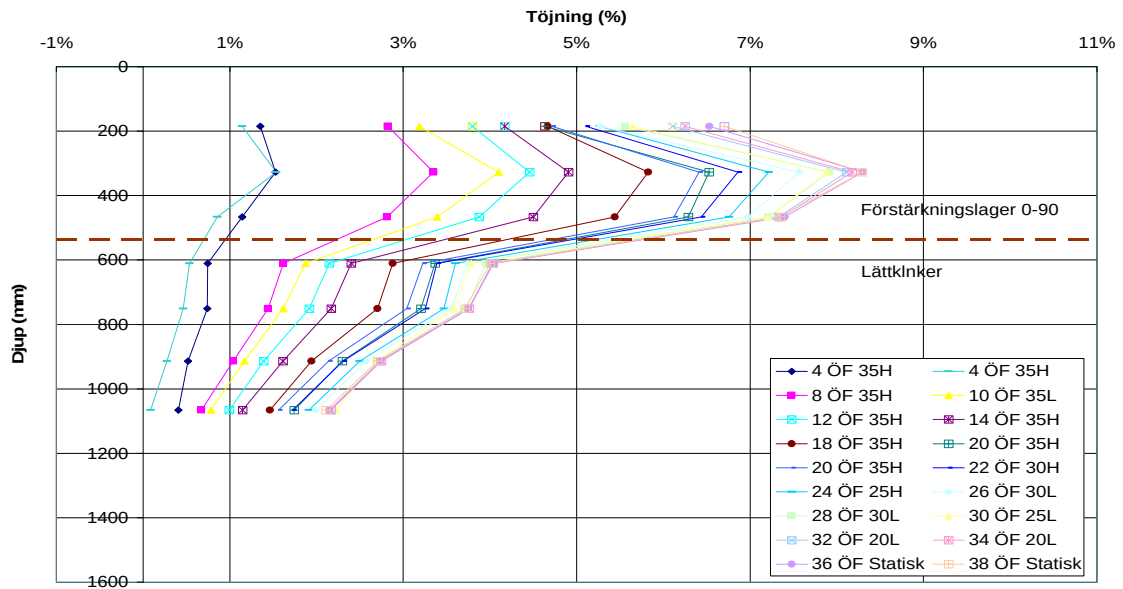


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

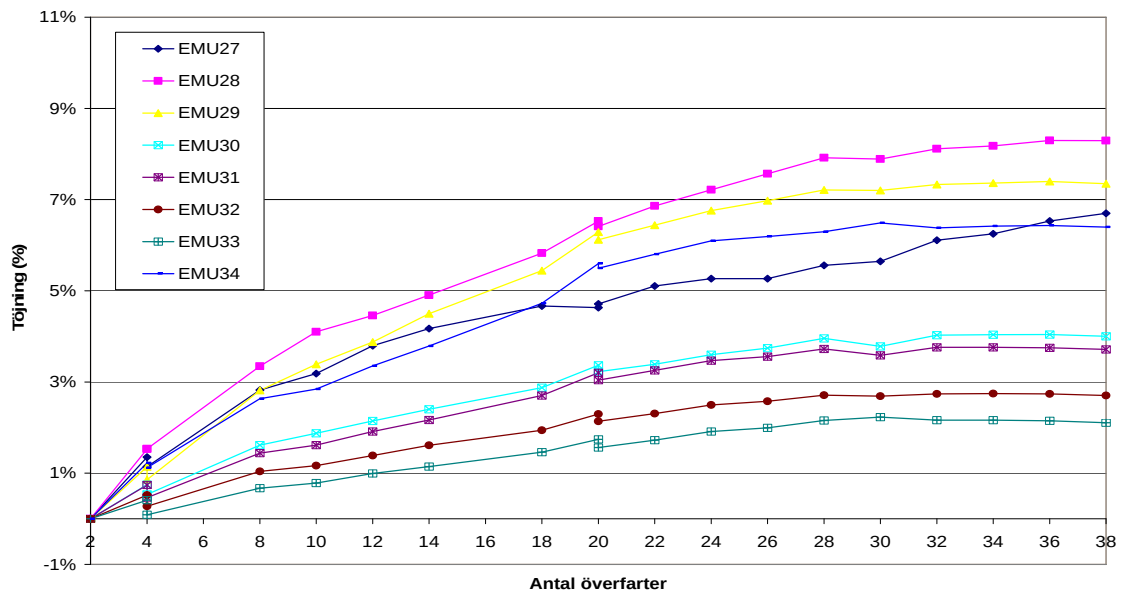


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

Provyta 3, punkt a

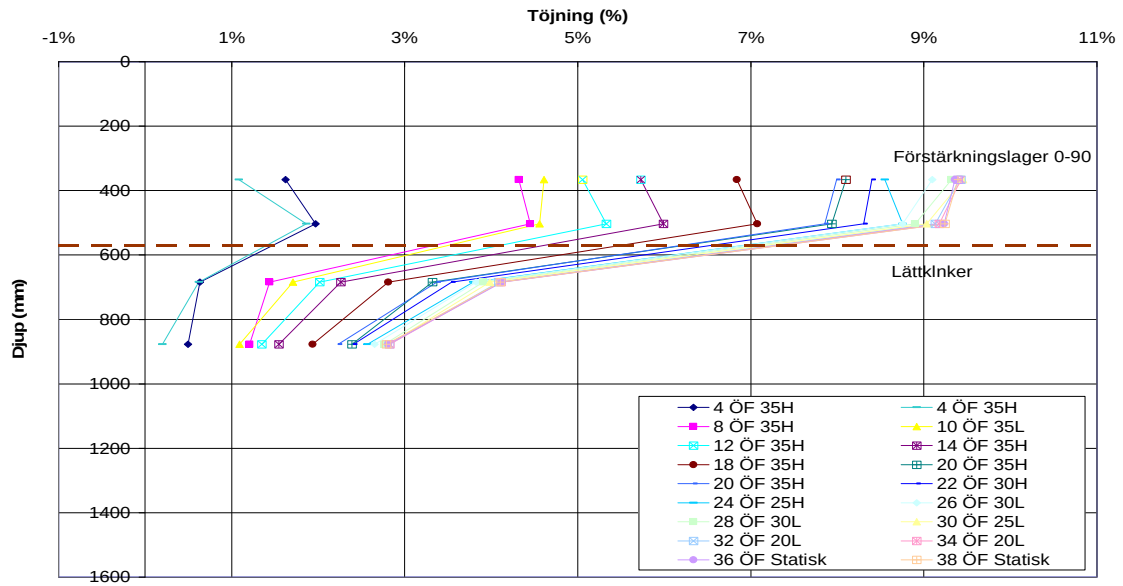


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

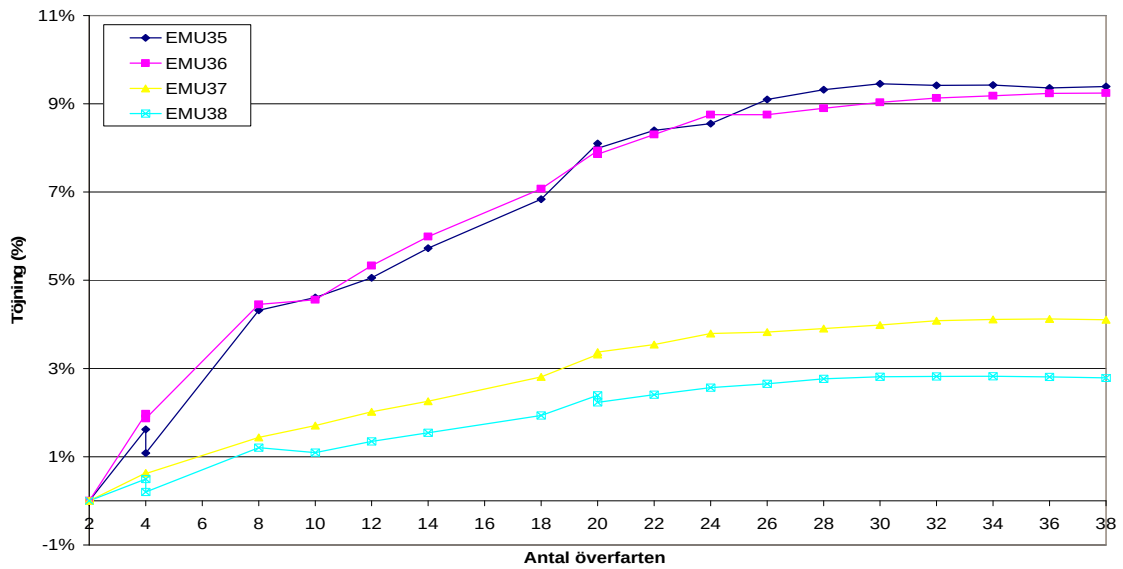


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

Provyta 3, punkt b

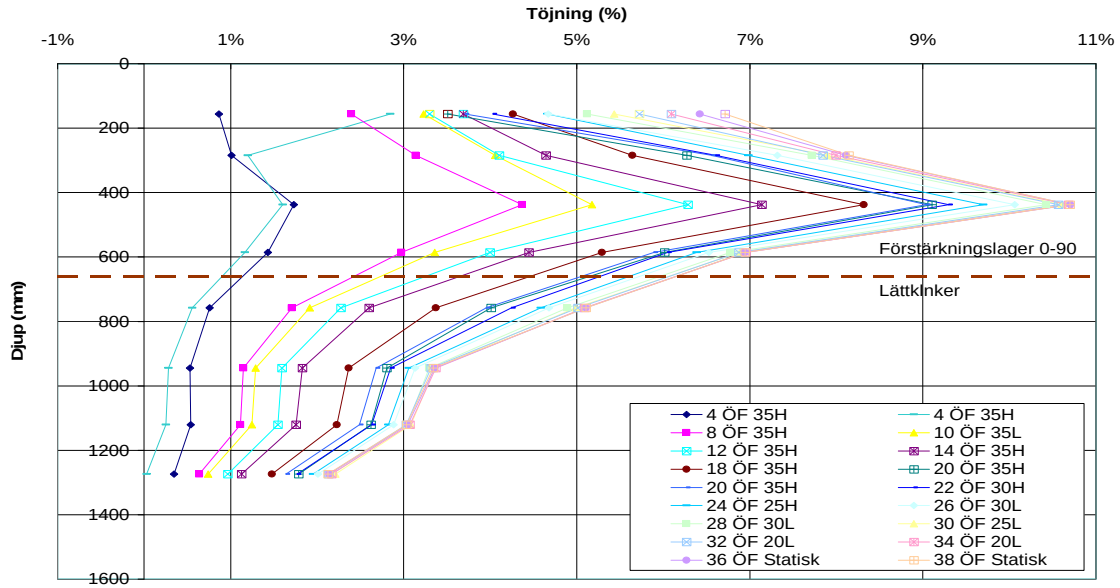


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

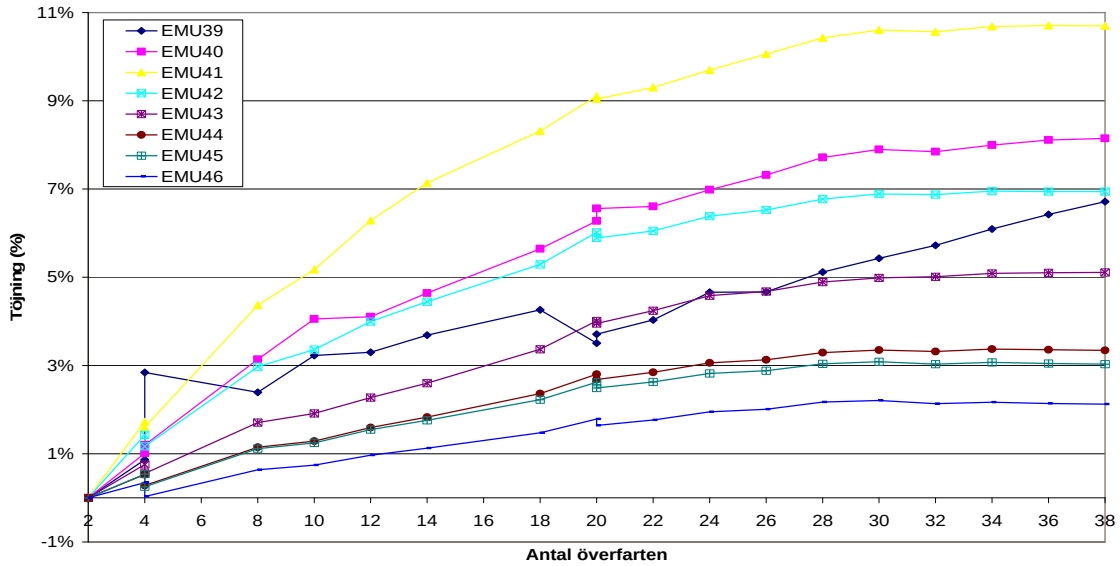


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

Provyta 4, punkt a

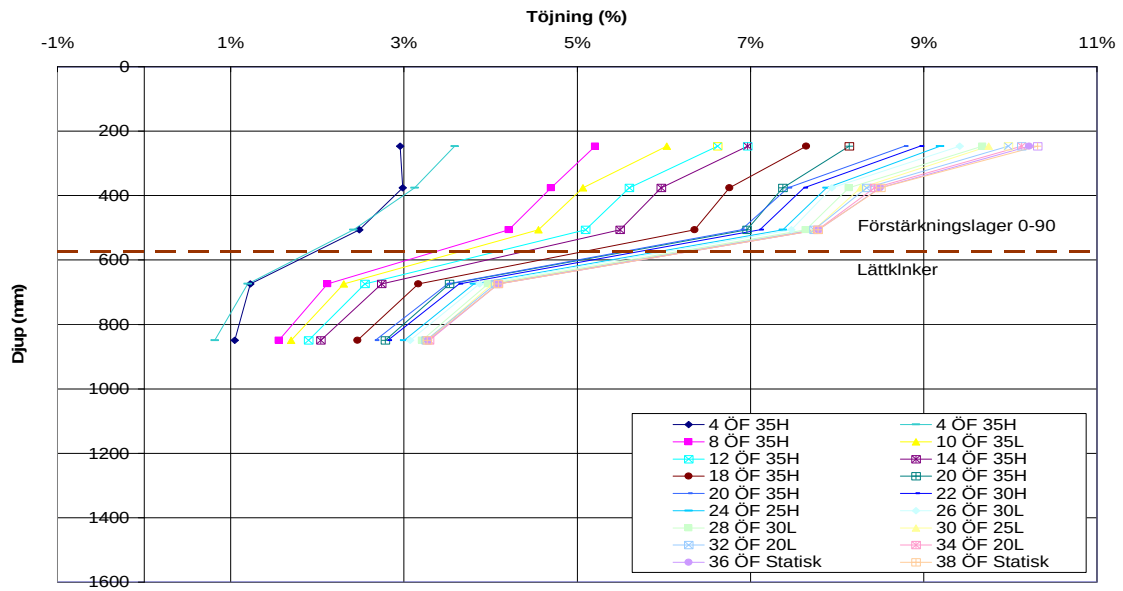


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

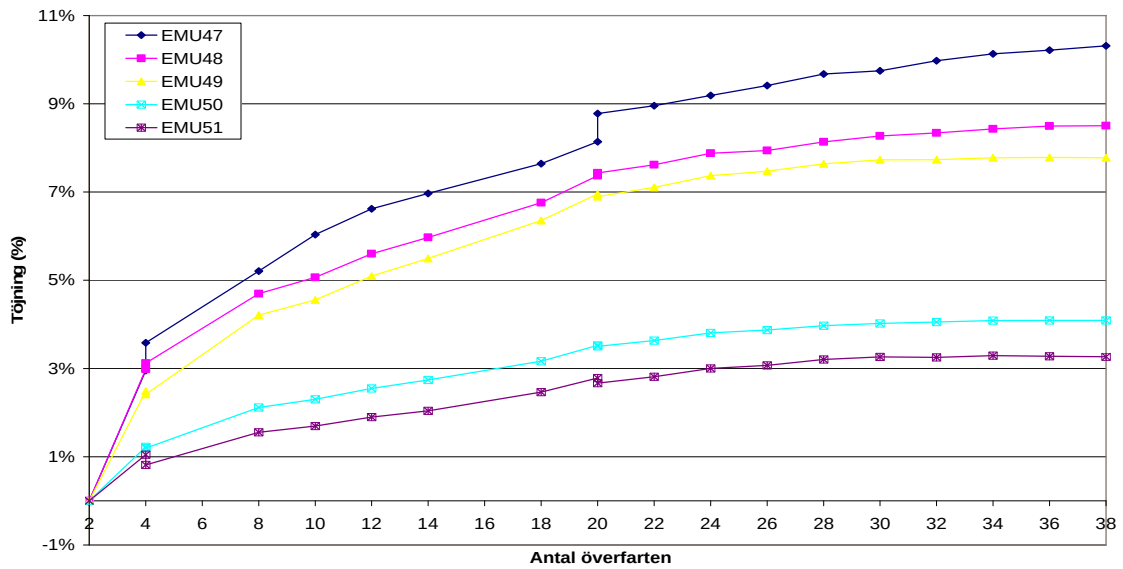


Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

Provyta 4, punkt b



Permanent töjning som funktion av antalet överfarter



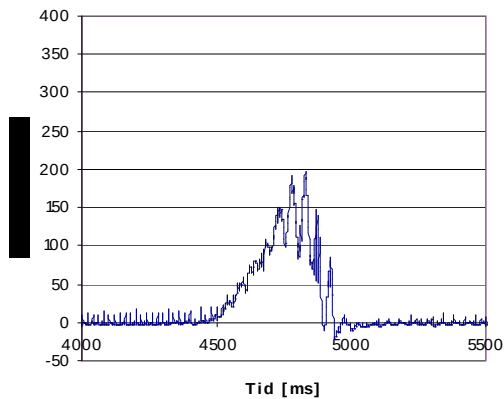
Permanent töjning som funktion av antalet överfarter

Bilaga K: Jordtrycksmätning vid överfart

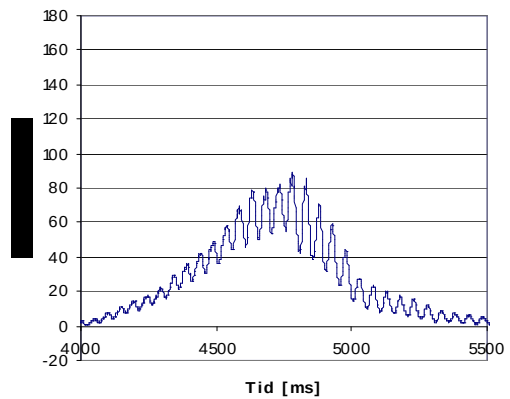
Förberedande provyta

Graferna visar jordtrycket på två olika djup för varje överfart. Jordtrycksmätare SPC00238 ligger **213 mm** från ytan och SPC00247 ligger **550 mm** från ytan.

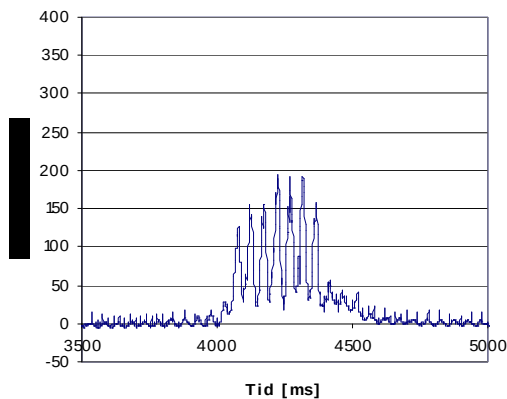
SPC00238 öf 1 20L



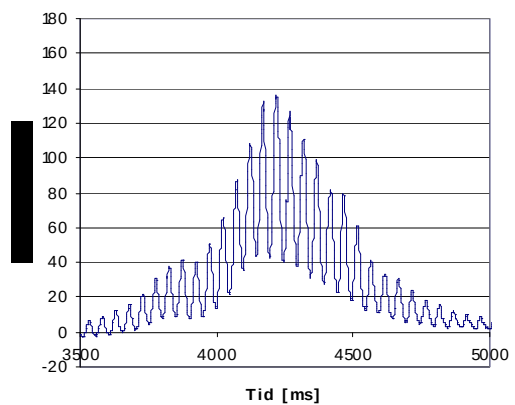
SPC00247 öf 1 20L



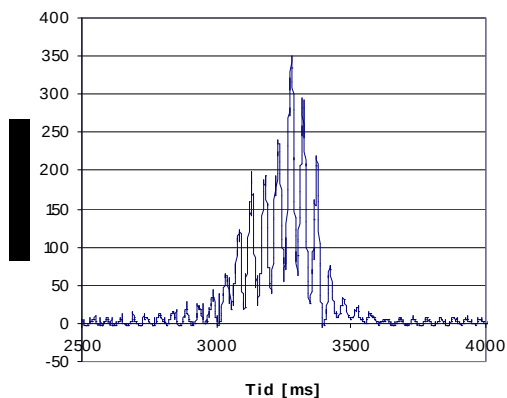
SPC00238 öf 5 20L



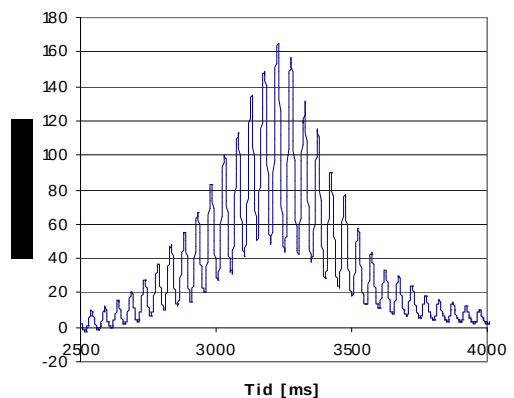
SPC00247 öf 5 20L



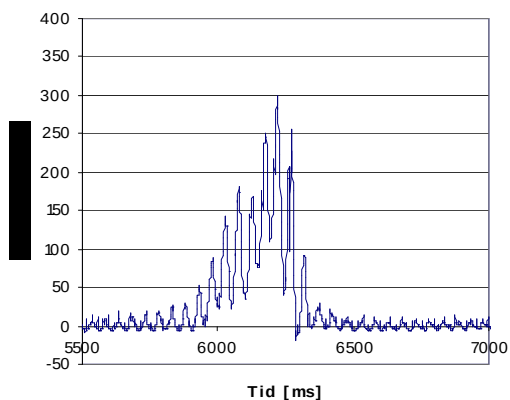
SPC00238 öf 7 20L



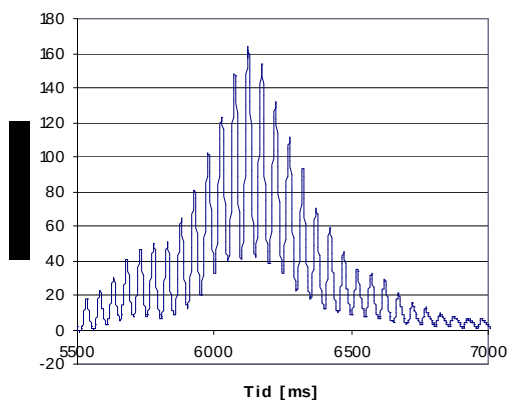
SPC00247 öf 7 20L



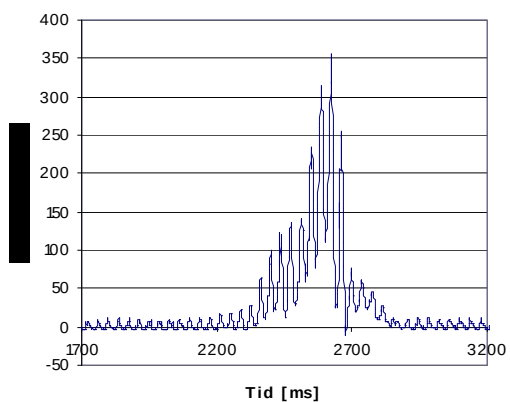
SPC00238 öf 9 20L



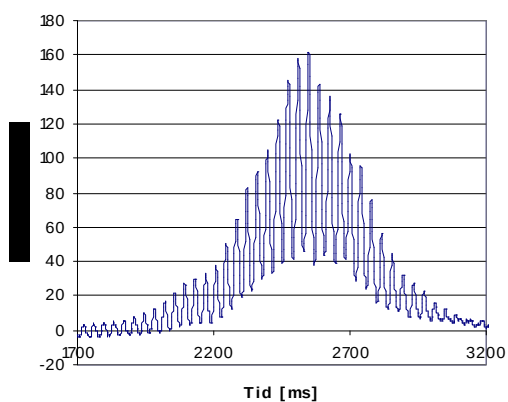
SPC00247 öf 9 20L



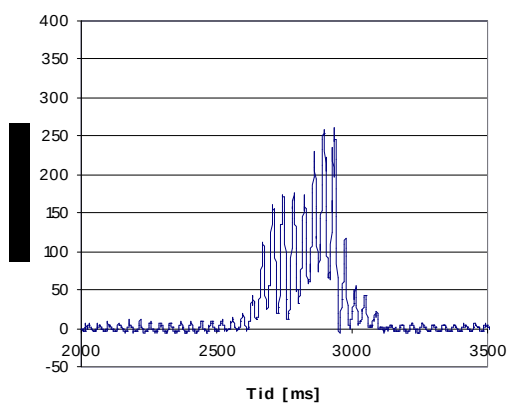
SPC00238 öf 11 25L



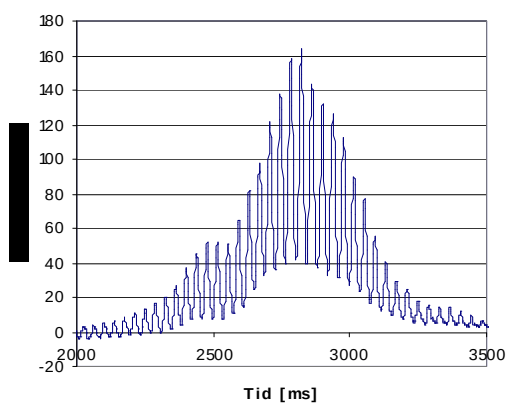
SPC00247 öf 11 25L



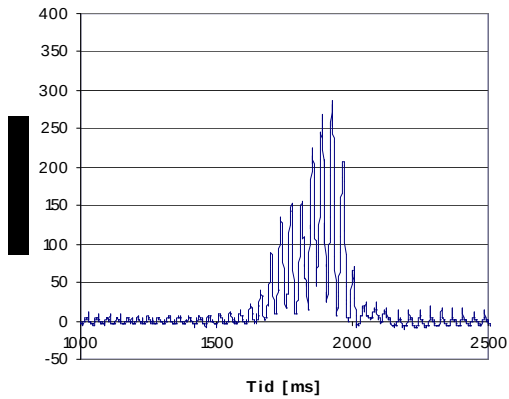
SPC00238 öf 13 25L



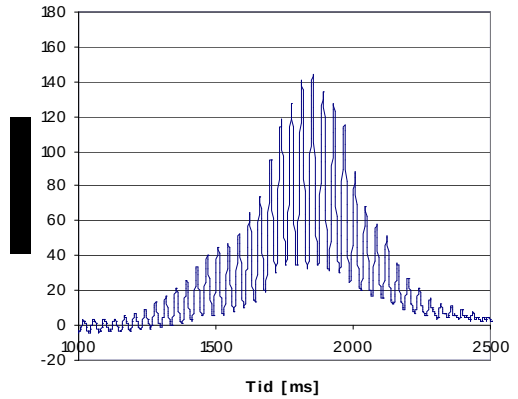
SPC00247 öf 13 25L



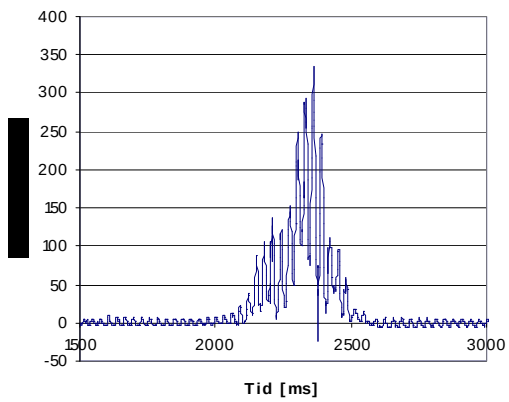
SPC00238 öf 15 25L



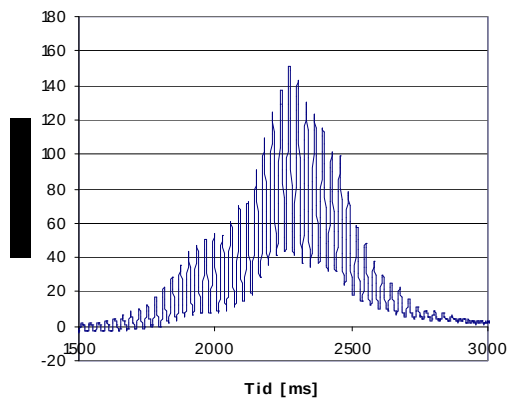
SPC00247 öf 15 25L



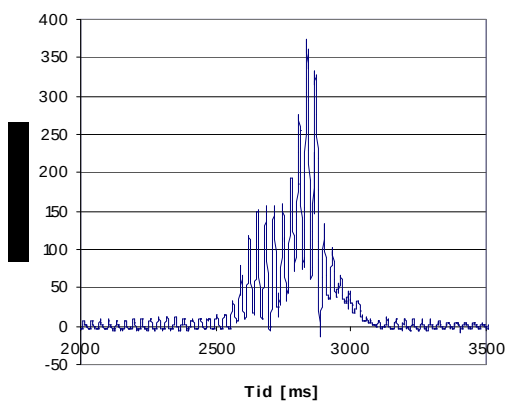
SPC00238 öf 17 30L



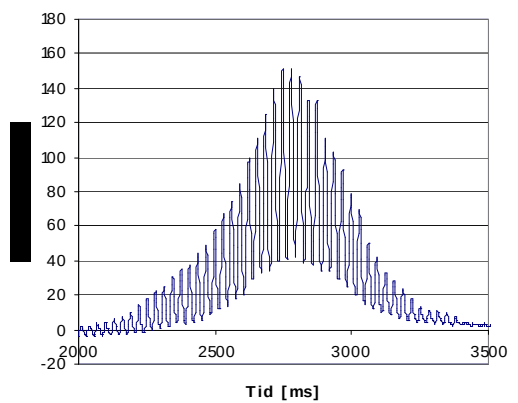
SPC00247 öf 17 30L



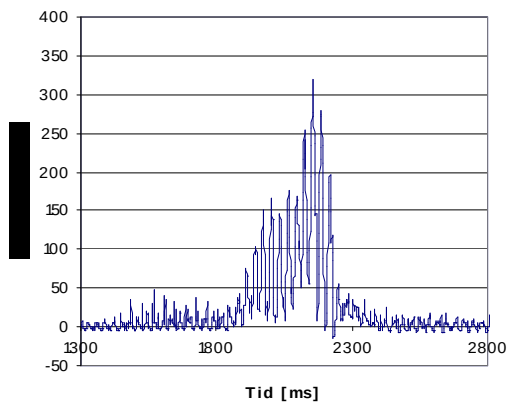
SPC00238 öf 19 30L



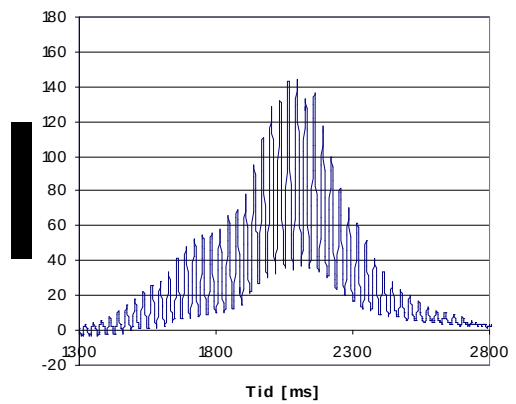
SPC00247 öf 19 30L



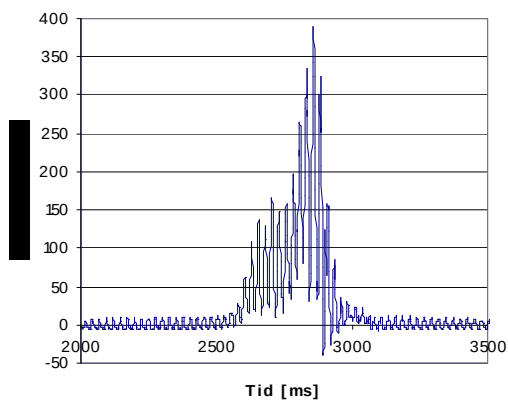
SPC00238 öf 21 30L



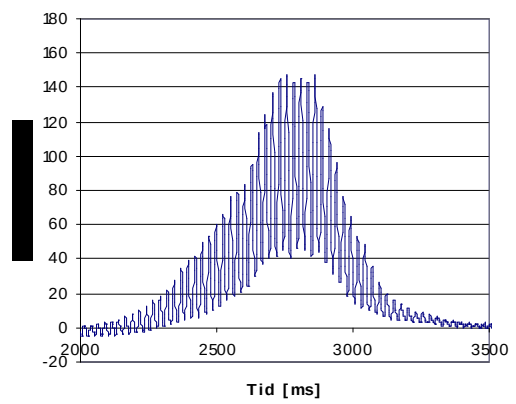
SPC00247 öf 21 30L



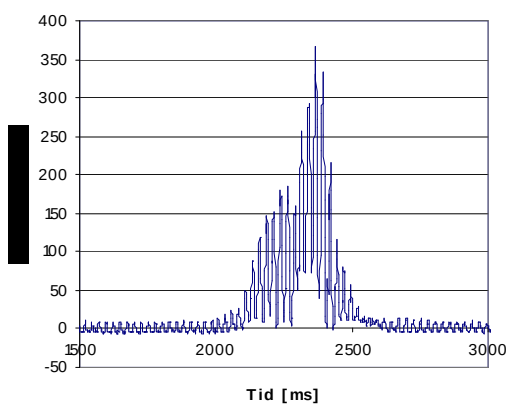
SPC00238 öf 23 35L



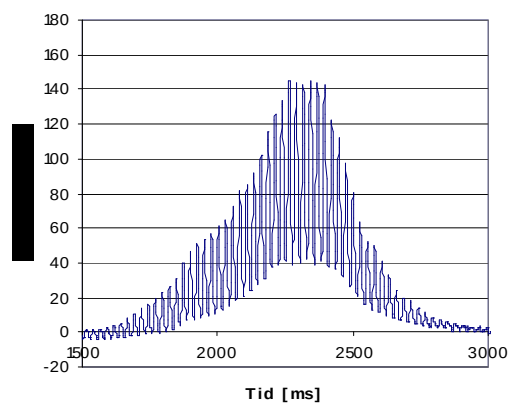
SPC00247 öf 23 35L



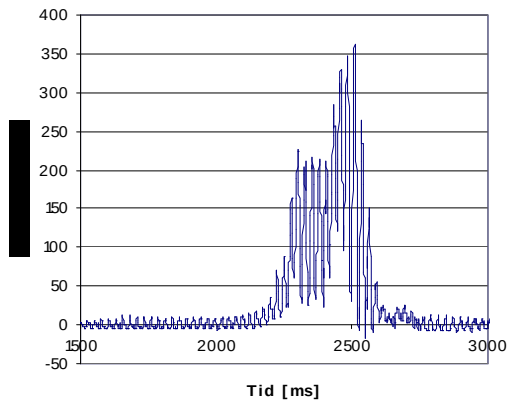
SPC00238 öf 25 35L



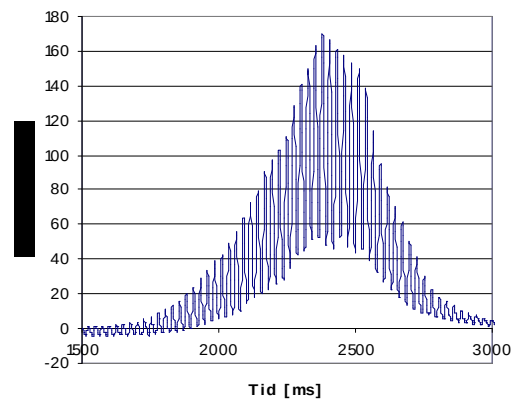
SPC00247 öf 25 35L



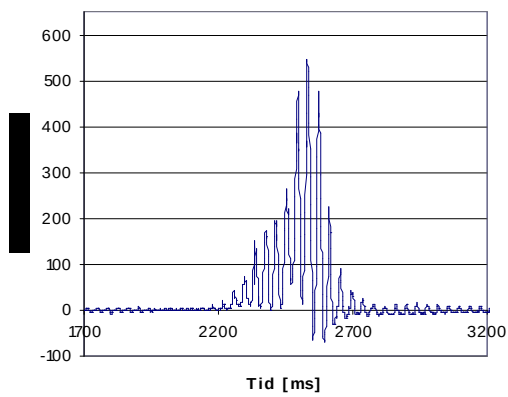
SPC00238 öf 27 35L



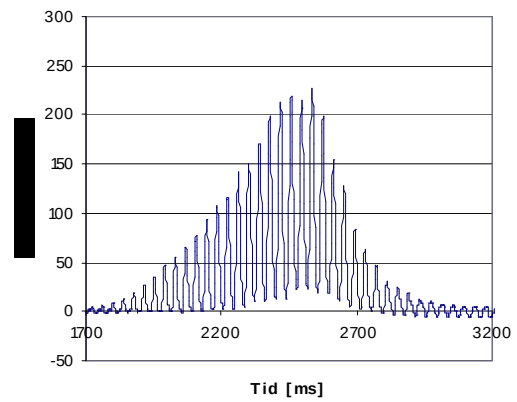
SPC00247 öf 27 35L



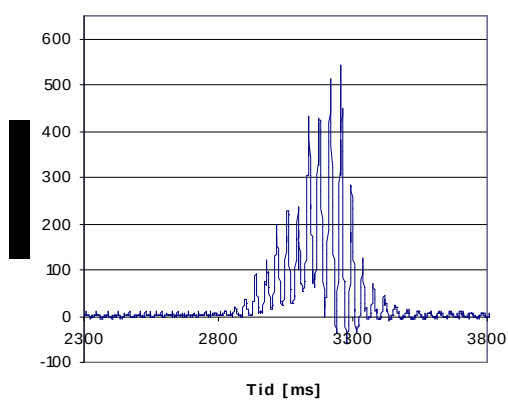
SPC00238 öf 29 25H



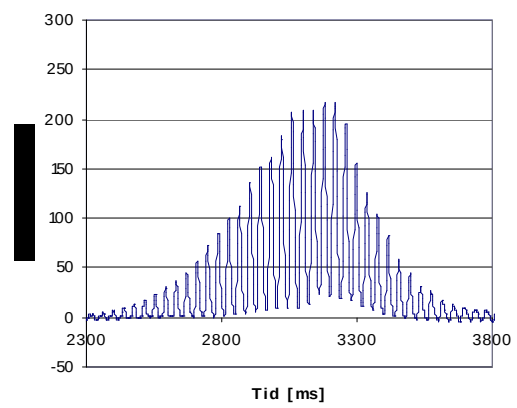
SPC00247 öf 29 25H



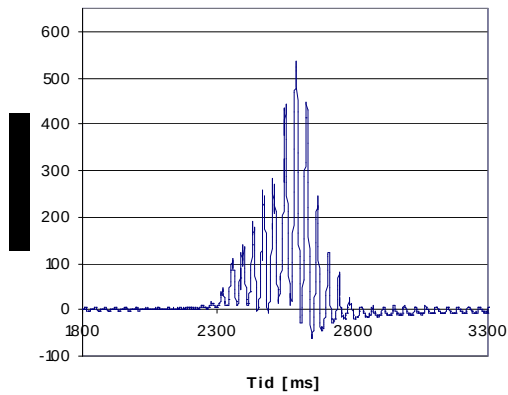
SPC00238 öf 31 25H



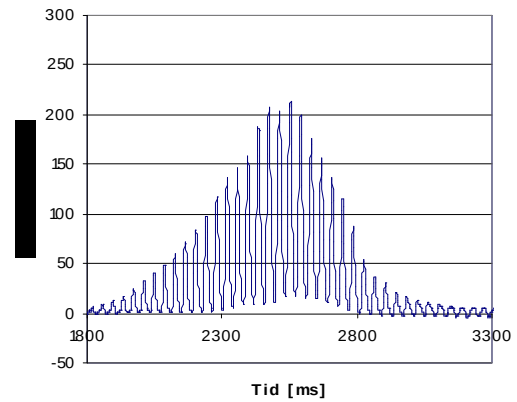
SPC00247 öf 31 25H



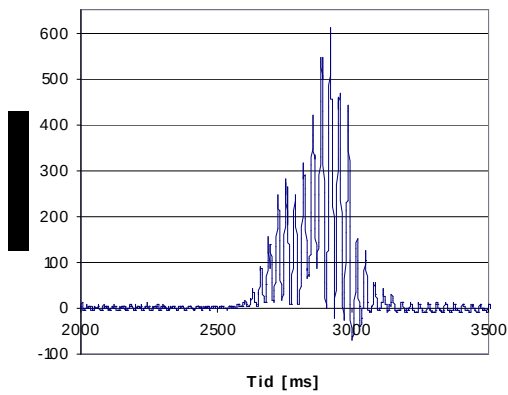
SPC00238 öf 33 25H



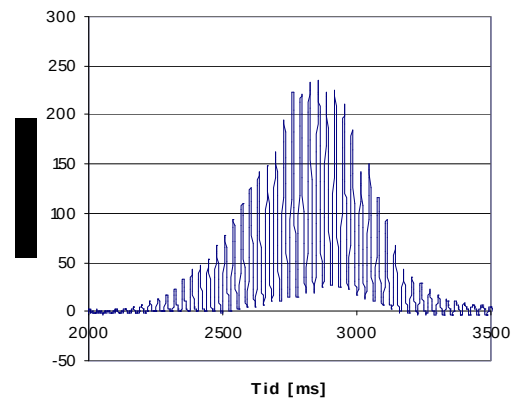
SPC00247 öf 33 25H



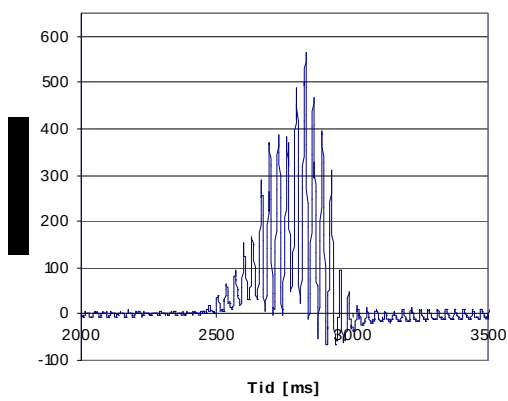
SPC00238 öf 35 30H



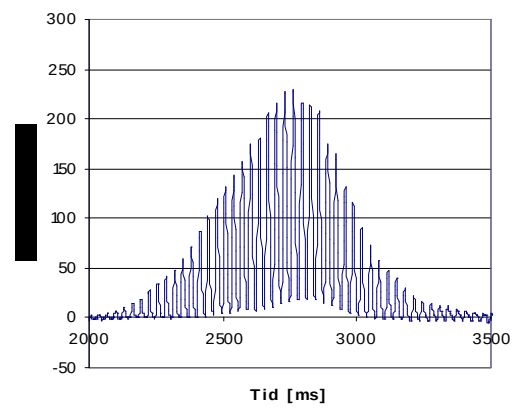
SPC00247 öf 35 30H



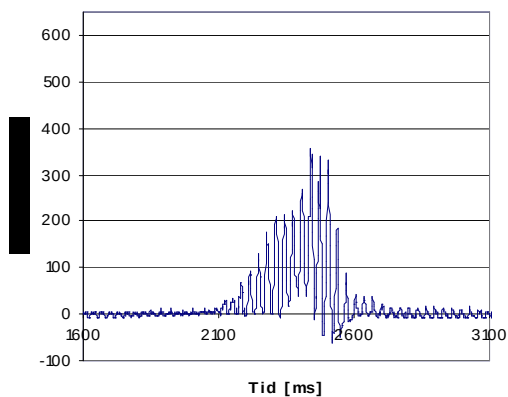
SPC00238 öf 37 30H



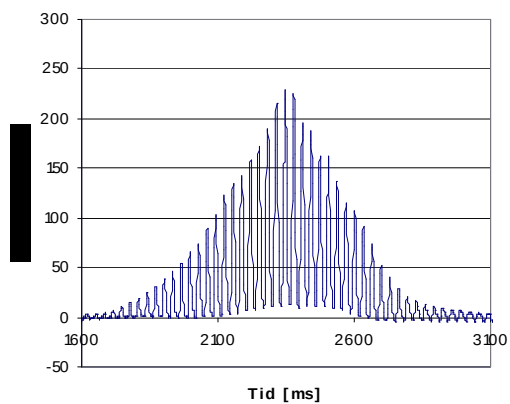
SPC00247 öf 37 30H



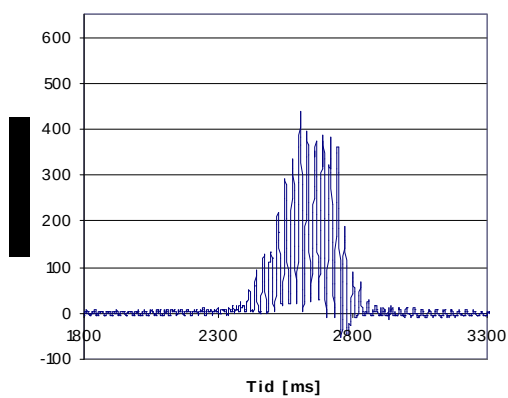
SPC00238 öf 39 30H



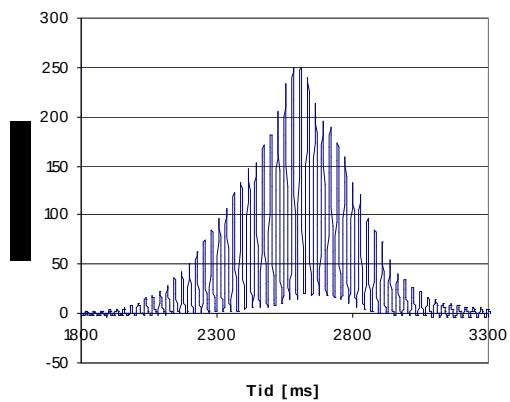
SPC00247 öf 39 30H



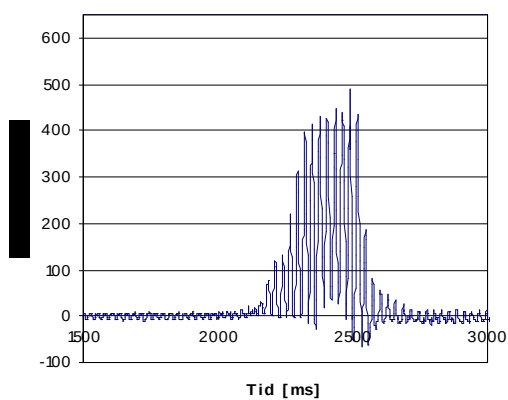
SPC00238 öf 41 35H



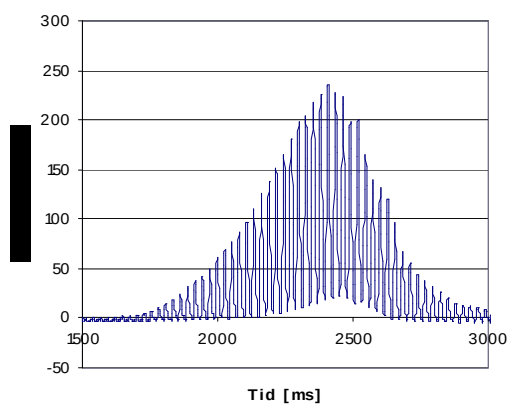
SPC00247 öf 41 35H



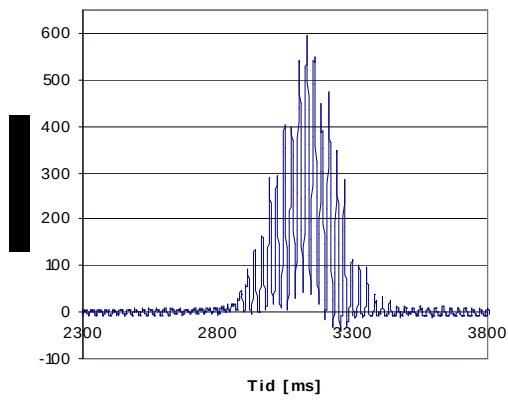
SPC00238 öf 43 35H



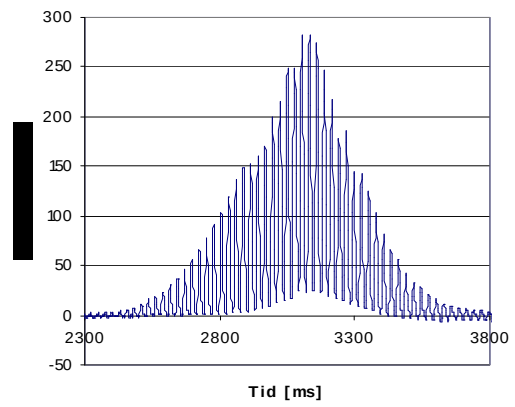
SPC00247 öf 43 35H



SPC00238 öf 45 35H



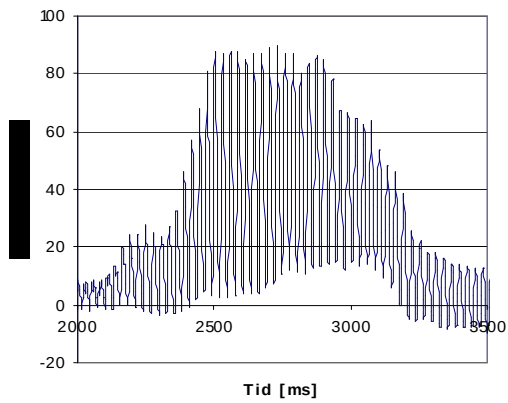
SPC00247 öf 45 35H



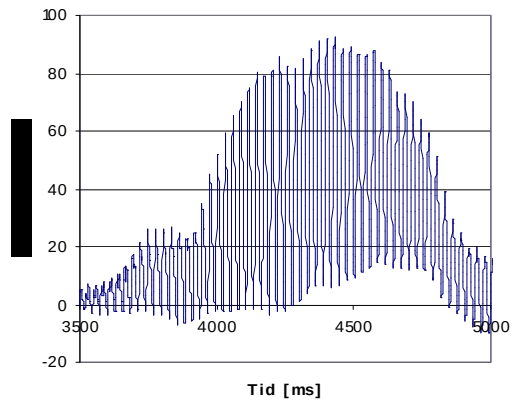
Provyta 1

Djup 728 mm

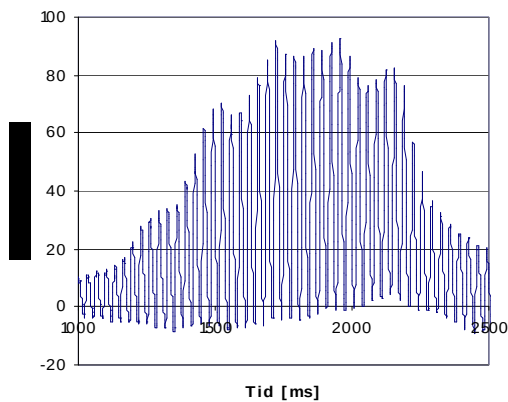
SPC00230 öf 3 35H



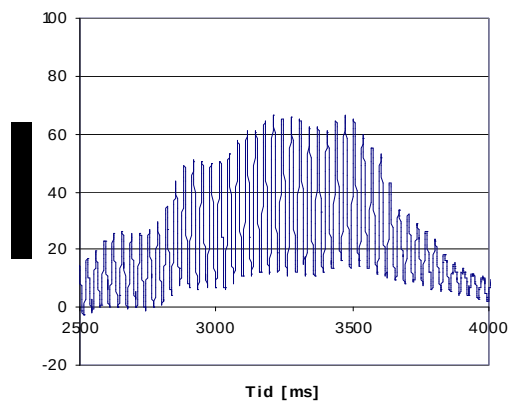
SPC00230 öf 7 35H



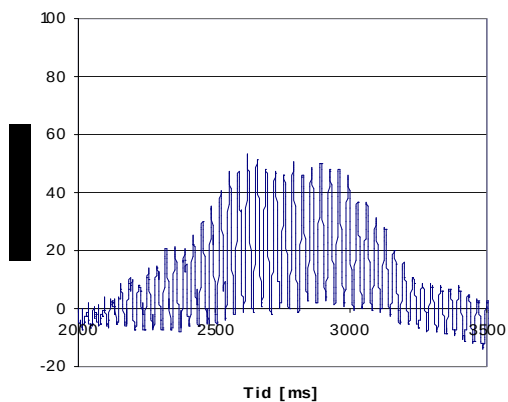
SPC00230 öf 21 30H



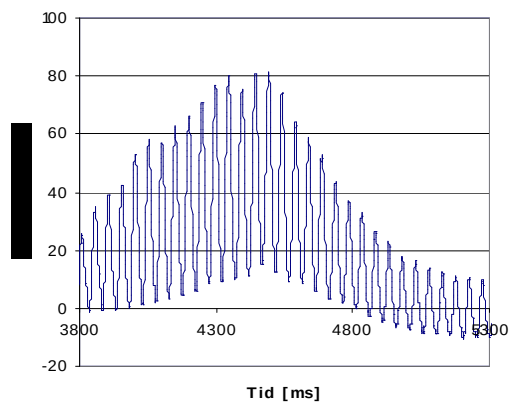
SPC00230 öf 27 30L



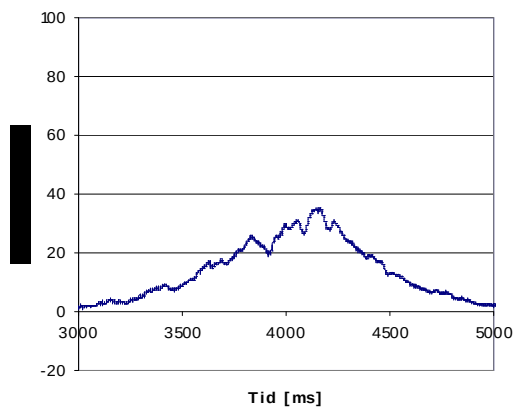
SPC00230 öf 28 30L



SPC00230 öf 32 20L

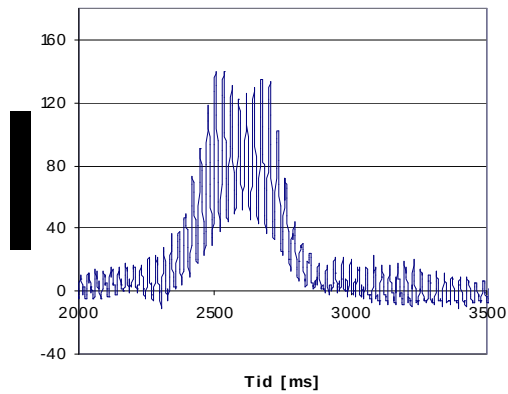


SPC00230 öf 36 statisk

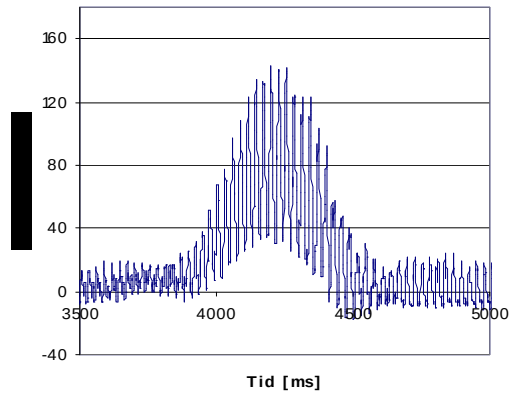


Djup 297 mm

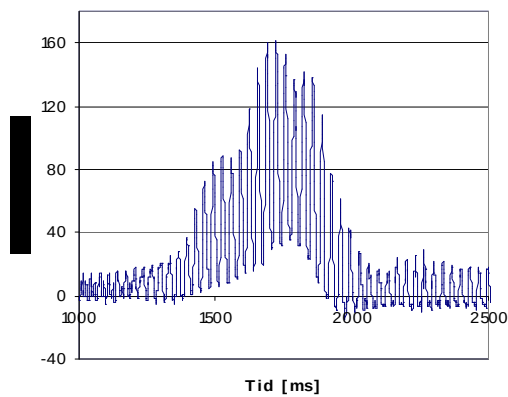
SPC00244 öf 3 35H



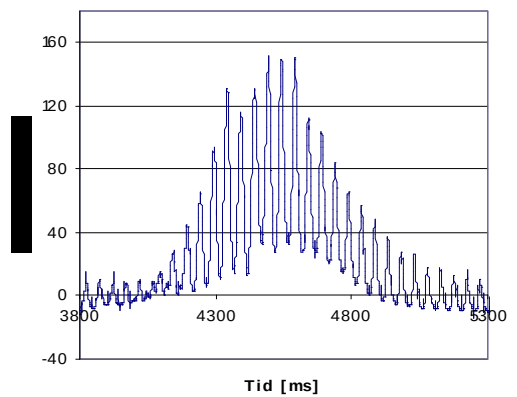
SPC00244 öf 7 35H



SPC00244 öf 21 30H



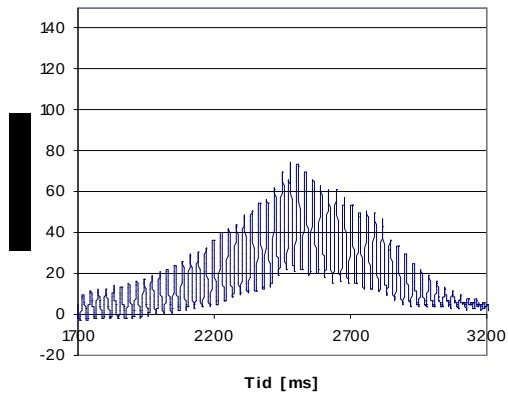
SPC00244 öf 32 20L



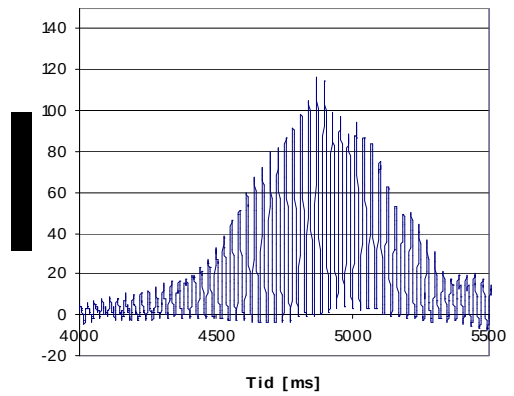
Provyta 2

Djup 666 mm

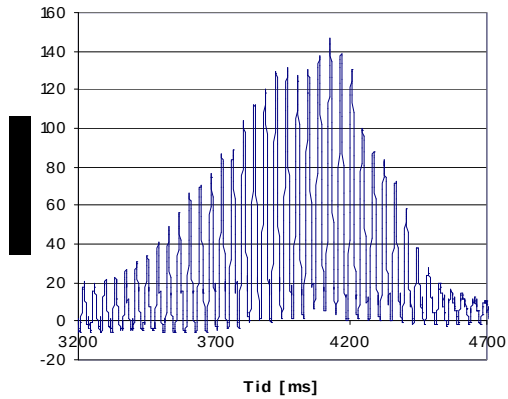
SPC00247 öf 9 35H



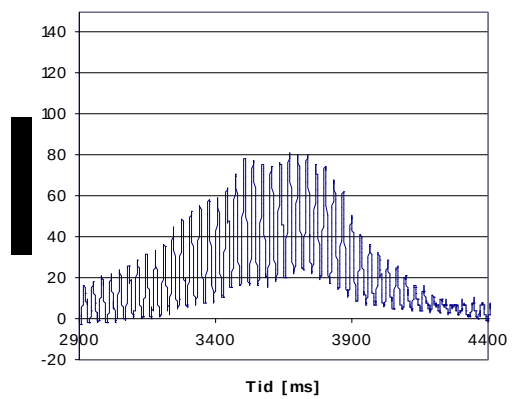
SPC00247 öf 13 35H



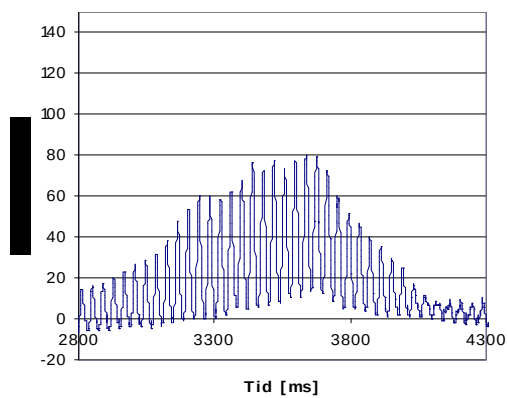
SPC00247 öf 24 25H



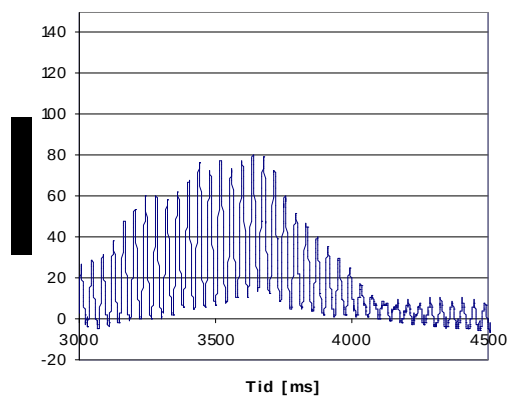
SPC00247 öf 25 30L



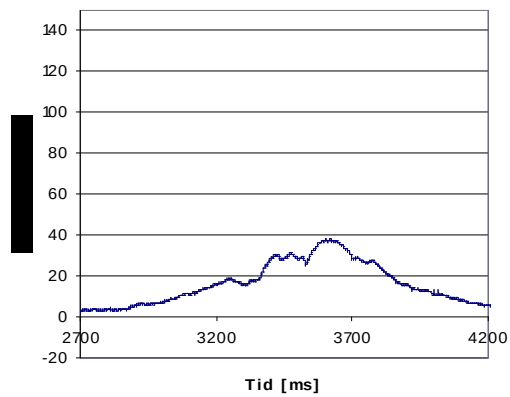
SPC00247 öf 29 25L



SPC00247 öf 31 20L

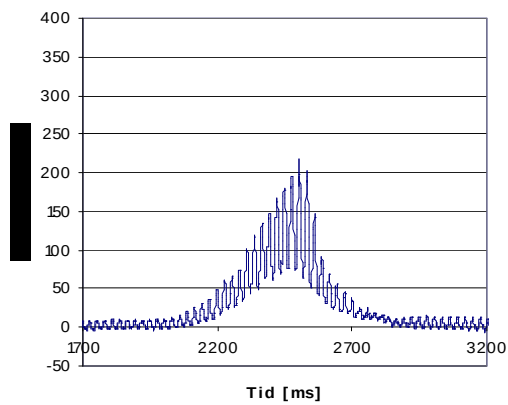


SPC00247 öf 35 statisk

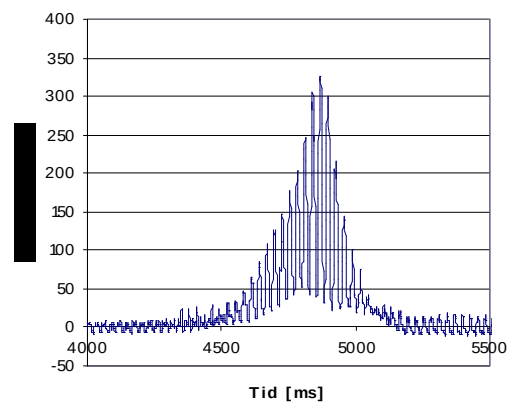


Djup 280 mm

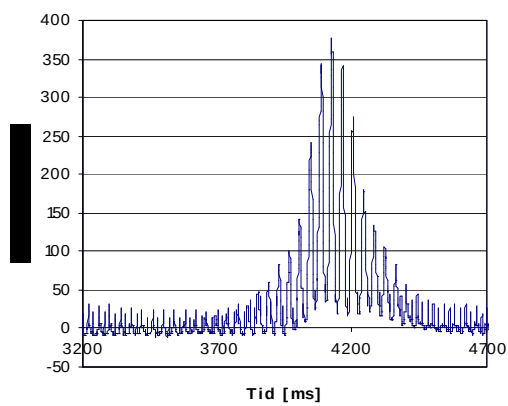
SPC00238 öf 9 35H



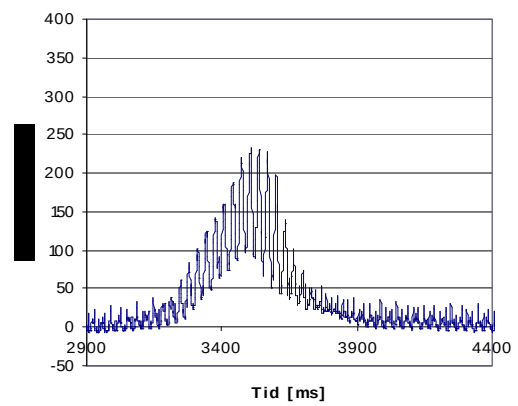
SPC00238 öf 13 35H



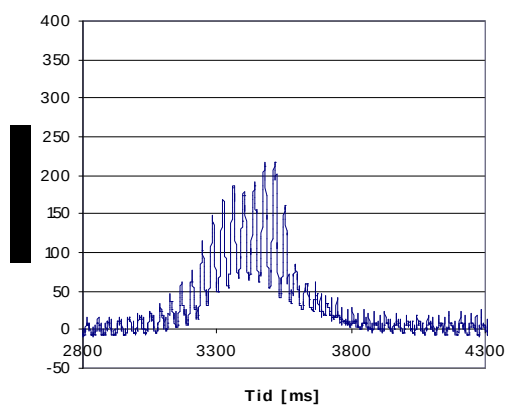
SPC00238 öf 24 25H



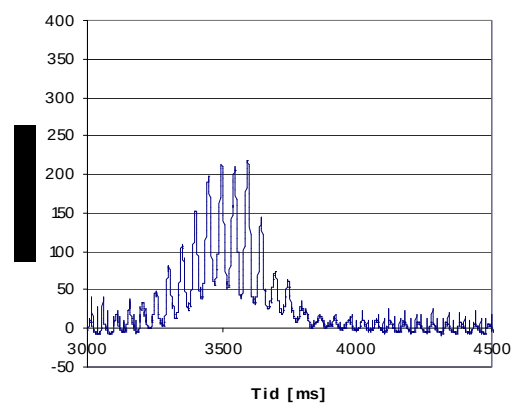
SPC00238 öf 25 30L



SPC00238 öf 29 25L



SPC00238 öf 31 20L



SPC00238 öf 35 statisk

