



# **Packningsförsök vid Kardonbanan**

## **Resultat från Etapp 1**

### **Slutrapport**

Datum: 2018-05-28

Upprättad av: Carl Wersäll, KTH Avd. Jord- och Bergmekanik

Granskad av: Stefan Larsson, KTH Avd. Jord- och Bergmekanik

## Sammanfattning

Packningsförsök utfördes under hösten 2017 på Malmölandet, Norrköping, i anslutning till Kardonbanan. Det huvudsakliga syftet med försöken var att studera inverkan av frekvensstyrning (AFC), lagertjocklek och materialfraktion som ett steg i processen att bestämma optimal bankuppbyggnad för framtida höghastighetsjärnväg. Frekvensstyrning avser en ny metod i vilken vältens vibrationsfrekvens automatiskt justeras för att utnyttja resonansförstärkning i vält-jord systemet. Försöken utfördes med en prototypvält med linjelast 65 kg/cm. Två krossmaterial med materialfraktionerna 0/150 mm respektive 0/250 mm samt ett moränmaterial användes till provytorna som hade lagertjocklekarna 30 cm, 50 cm och 100 cm.

Försöken försvärades av mycket stora regnmängder som främst påverkade den siltiga moränterrassen. De största osäkerheterna utgjordes av terrassens låga och varierande styvhet i kombination med att provytorna anlades i endast ett skikt samt svårigheten att erhålla jämna initialförhållanden i fält. Tack vare en sammanvägd utvärdering av ett stort antal mätmetoder kunde dock inverkan av olika parametrar studeras med relativt stor tillförlitlighet. Den samlade bedömningen utifrån alla mätresultat var att lagertjockleken 50 cm lämpligen packas i 12-16 överfarter och tjockleken 100 cm i 20-24 överfarter. Vid konventionell packning med fast frekvens kan dock begränsning i lagertjocklek krävas för att undvika uppluckring. Materialfraktionen 0/150 mm erhåller en bättre packning och en högre styvhet än fraktionen 0/250 mm, vilket kan bero på en mer gynnsam kornstorleksfördelning. Moränmaterialet som användes var inte möjligt att vibrationspacka pga. en oacceptabelt hög finjordshalt, cirka 15-20 %, och är olämpligt som bankmaterial till höghastighetsjärnväg.

Automatisk frekvensstyrning ger en betydligt förbättrad packning i ytan och undviker ytuppluckring samt ger en högre styvhet på överytan men ger en något sämre djupverkan. Sett över hela skiktet blir packningen något bättre och mer homogen, samtidigt som behovet av avslutande statiska överfarter kan elimineras. Utöver den potentiella tidsbesparingen fås en signifikant minskad energi- och bränsleförbrukning samt lägre maskinslitage.

Den mest tillförlitliga mätmetoden av överytans styvhet är statisk plattbelastning som dock är mycket tidsödande. Provbekastning med fallviktsapparat kan med fördel komplettera plattbelastning då metoden är mycket mer tidseffektiv och i dessa försök gav en mycket god korrelation till statiska försök. Av de integrerade vältmätningarna bedöms Evib2 (avlastningsmodul) vara mest pålitlig för att indikera styvhetstillväxt under packningsförloppet.

Det rekommenderas att resultaten i denna rapport verifieras i ytterligare försök vid realistisk bankuppbyggnad.

## Innehållsförteckning

1	Bakgrund och syfte .....	5
2	Material och packningsutrustning .....	6
2.1	Terrass.....	6
2.2	Provytor.....	6
2.3	Packningsutrustning.....	6
3	Genomförande .....	8
3.1	Försöksplats .....	8
3.2	Försöksuppställning .....	8
3.3	Terrass.....	10
3.4	Utläggning.....	11
3.5	Installation av EMU-spolar .....	12
3.6	Packning och mätning .....	12
4	Mät- och utvärderingsmetoder.....	15
4.1	Sättning .....	15
4.2	EMU-spolar.....	15
4.3	Statisk plattbelastning .....	16
4.4	Integrerade vältmätningar.....	17
4.5	Acceleration.....	18
4.6	Fallviktsapparat .....	18
4.7	Seismiska mätningar.....	18
5	Resultat .....	20
5.1	Materialtjocklek .....	20
5.2	Sättningar.....	21
5.2.1	Inverkan av materialutläggning .....	22
5.3	EMU-spolar.....	24
5.3.1	Komprimering i överfart 3-32 .....	28
5.4	Sättning av terrass .....	30
5.5	Plattbelastningsförsök .....	32
5.5.1	Terrass.....	32
5.5.2	Överyta.....	33
5.6	Integrerade vältmätningar.....	34
5.6.1	Terrass.....	34
5.6.2	Överyta.....	35
5.7	Accelerometermätningar .....	39
5.8	Fallviktsapparat .....	43
5.9	Seismiska mätningar.....	47
5.10	Jämförelse styvhetsmätningar.....	51

6	Diskussion.....	56
6.1	Dynamiska parametrar .....	56
6.2	Komprimering/sättning.....	58
6.3	Styvhet.....	59
6.4	Frekvensstyrning .....	63
6.5	Lagertjocklek och överfarter .....	64
6.6	Bankmaterial.....	64
6.7	Rekommendationer för etapp 2.....	65
7	Slutsatser.....	66
	Referenser .....	68
	Bilagor .....	70

## 1 Bakgrund och syfte

Denna rapport presenterar resultat från packningsförsök som ingår i projektet "Packning av bank för höghastighetsjärnväg vid varierande grundförhållanden". Forskningsprojektet finansieras av Trafikverket genom Branschsamverkan i Grunden (BIG A2016-3), Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF 13317), PEAB AB och Kungliga Tekniska Högskolan (KTH). Fältförsöken utfördes i anslutning till Kardonbanan i Norrköping under hösten 2017 och finansierades av Trafikverket och Dynapac Compaction Equipment AB.

Projektet har till syfte att utveckla riktlinjer för hur bergbankar ska packas vid utbyggnad av höghastighetsjärnväg, där strikta sättningskrav ställer stora krav på packningsarbetet för att minska omlagring och nedbrytning av materialet. En potentiell effektivisering av packningsprocessen kan fås genom justering av vältens vibrationsfrekvens, vilket nyligen har presenterats i ett antal artiklar (Wersäll & Larsson, 2013; Wersäll et al. 2014; Wersäll et al., 2015; Wersäll & Larsson, 2016; Wersäll et al., 2017; Wersäll et al. 2018). De tidigare studierna har visat att ett bättre packningsresultat kan erhållas till en lägre energiförbrukning med en lägre vibrationsfrekvens som utnyttjar resonans i vält-jord-systemet. Med detta som grund har Dynapac utvecklat en prototypvält som automatisk justerar frekvensen till något högre än resonansfrekvensen, men som även kan packa på konventionellt sätt med fast frekvens. Den automatiska frekvensjusteringen benämns frekvensstyrning eller AFC (Automatic Frequency Control) i denna rapport.

Försöken hade som målsättning att ge en antydning om optimalt packningsförfarande genom variation av vissa parametrar. Detta förfarande planeras sedan att användas i fortsatta packningsförsök (etapp 2), som ingår i samma forskningsprojekt och där det bedömda optimala förfarandet från etapp 1 tillämpas vid bankuppbyggnad under realistiska förhållanden. Specifikt studerades följande:

- Inverkan av frekvensstyrning jämfört med konventionell packning med fast frekvens.
- Packningens beroende av materialtjockleken och optimal lagertjocklek.
- Betydelsen av bankmaterial, där två krossade bergmaterial med olika fraktioner och ett moränmaterial studerades.

Försöken förväntades också ge en bild av hur en provpackning bör utföras och vilka mät- och kontrollparametrar som är lämpliga att observera.

För att studera inverkan av ovan nämnda parametrar anlades provtytor med 14 kombinationer av lagertjocklek, material och packningsförfarande. Dessa packades i ett centrerat stråk med 32 överfarer. Försöksgenomförandet med provtytor har tidigare tillämpats av t.ex. Johansson & Kennedy (2007) med goda resultat. En stor mängd mätmetoder tillämpades som tillsammans resulterade i slutsatser avseende optimalt packningsförfarande. Dessa resultat kommer senare att användas i etapp 2 för att bekräfta slutsatserna vid realistisk bankuppbyggnad.

Försök i fält präglas alltid av stora osäkerheter, som är betydligt högre än i kontrollerad miljö. Dessutom förekom, under hösten 2017, stora mängder nederbörd i Norrköping, vilket försvårade genomförandet av försöken och gav större osäkerheter. Tack vare en stor mängd mätningar och en noggrann utvärdering kunde dock ett antal slutsatser dras med acceptabel tillförlitlighet.

## **2 Material och packningsutrustning**

### **2.1 Terrass**

Terrassen bestod främst av grusig siltig morän och sandig siltig morän med en finjordshalt runt 30 %. Ett antal provgropar gjordes i försöksområdet, vilka presenteras i Bilaga A och Bilaga B. På grund av det höga siltinnehållet var materialet mycket fuktkänsligt, vilket innebar att de stora regnmängderna under hösten 2017 påverkade försöken negativt. Detta yttrade sig framförallt som en låg och varierad styvhet på terrassen.

### **2.2 Provytor**

För att studera packbarheten av olika material byggdes provytorna upp av tre olika bankmaterial. Dels användes DCH.15, underballast för förstärkning enligt AMA Anläggning 13 (Svensk Byggtjänst, 2014) med fraktion 0/150 mm, vars siktkurva redovisas i Bilaga C. Det andra krossmaterialet hade kornstorlek 0/250 mm och föll inom ramen för fyllning med grovkrossad sprängsten i AMA Anläggning 13 enligt tabell AMA CEB.11113/1 med tillägget att största stenstorlek inte fick vara större än 250 mm. Siktkurva för 0/250 presenteras i Bilaga D. Båda krossmaterialen hämtades från bergtäkten Skärlunda i Norrköping.

Vidare användes ett moränmaterial för att undersöka om detta kan vara ett lämpligt bankmaterial. Då den befintliga moränen på platsen hade mycket hög finjordshalt hämtades avtäckningsmassor från Landsjö nära Kimstad, inledningsvis identifierade från provtagning som grusmorän med cirka 10 % finjordshalt. Det levererade materialet visade sig dock ha en påtagligt högre finjordshalt, ca 15-20 %, varav mestadels silt, vilket orsakade stor fuktkänslighet och svårigheter vid packningen.

Jordprovsanalys från provtagning i moränbankarna presenteras i Bilaga E. Vid provtagningstillfället hade materialet en vattenkvot mellan 8 % och 12 %. Vattenkvoten kontrollerades vid två tillfällen under packningsförsöken och hade då en vattenkvot på 4,2-7,2 % med ett medianvärde på 6,2 %.

### **2.3 Packningsutrustning**

Terrassen packades med en Dynapac CA1500D som har en totalvikt på 7200 kg, en valsmodulvikt på 3600 kg och en statisk linjelast på 21 kg/cm. Packning av provytorna utfördes med en prototypvält med automatisk frekvensstyrning, baserad på Dynapac CA6500D (Figur 1). Vältens egenskaper listas i Tabell 1.



**Figur 1. Dynapac CA6500D med frekvensstyrning.**

**Tabell 1. Valtegenskaper.**

Modell:	Dynapac CA6500D
Typ:	Enkelvalsvalt
Arbetsvikt:	20 900 kg
Valsmodulvikt:	13 950 kg
Statisk linjelast:	65 kg/cm
Nominell amplitud, hog:	2,1 mm
Nominell amplitud, lag:	0,8 mm
Fast vibrationsfrekvens, hog amplitud:	28 Hz
Fast vibrationsfrekvens, lag amplitud:	30 Hz
Centrifugalkraft, fast frekvens, hog amplitud:	360 kN
Centrifugalkraft, fast frekvens, lag amplitud:	150 kN
Frekvensspann, AFC, hog amplitud:	17-28 Hz
Frekvensspann, AFC, lag amplitud:	17-33 Hz

### 3 Genomförande

#### 3.1 Försöksplats

Försöken utfördes i anslutning till den kommande Kardonbanan i Norrköping som ingår i projekt Ostlänken. Själva försöksplatsen var placerad så att provytorna anlades på den moränrygg som går genom området och visas i Figur 2.



**Figur 2. Försöksplatsen på Malmölandet, Norrköping.**

#### 3.2 Försöksuppställning

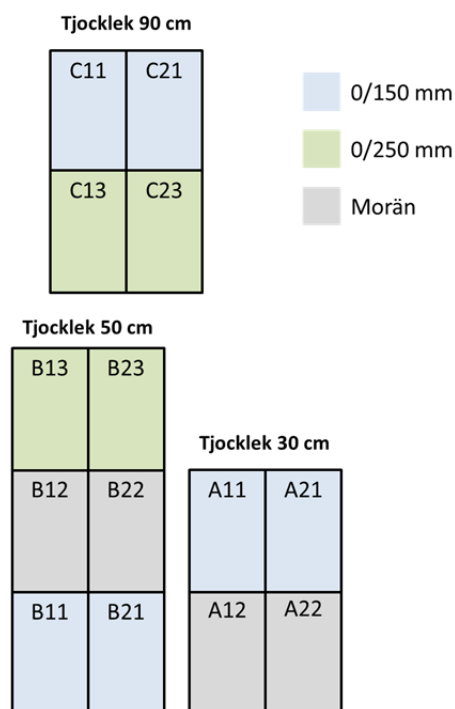
Försöket utfördes genom att anlägga tre provytor med totalt 14 delytor där material, lagertjocklek och packningsförfarande varierades. De nominella lagertjocklekarna var 30 cm (A), 50 cm (B) respektive 90 cm (C). De faktiska lagertjocklekarna blev något annorlunda på grund av svårigheten att förutsäga komprimeringen till följd av byggtrafik och yta C fick en tjocklek närmare 100 cm (Avsnitt 5.1). Den grövsta materialfraktionen, 0/250 mm, uteslöts från den tunnaste ytan och morän uteslöts från den tjockaste ytan. Överytorna packades var och en i ett skikt med 32 vältöverfarer. Ytorna betecknades med A, B eller C beroende på lagertjocklek samt två siffror där den första anger frekvensinställning och den andra anger material enligt följande:

- A11: 30 cm, frekvensstyrning, 0/150 mm
- A12: 30 cm, frekvensstyrning, morän
- A21: 30 cm, fast frekvens, 0/150 mm
- A22: 30 cm, fast frekvens, morän
- B11: 50 cm, frekvensstyrning, 0/150 mm

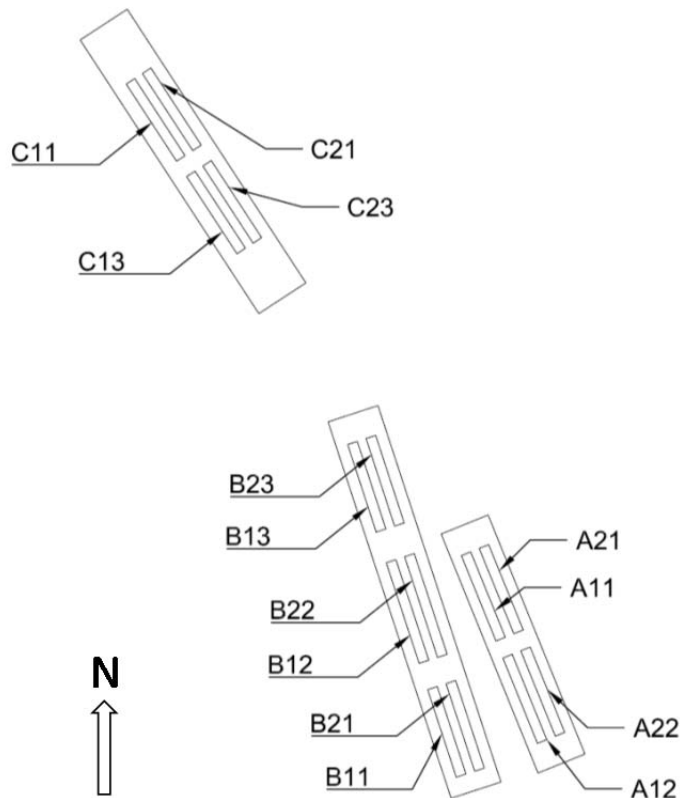


- B12: 50 cm, frekvensstyrning, morän
- B13, 50 cm, frekvensstyrning, 0/250 mm
- B21: 50 cm, fast frekvens, 0/150 mm
- B22: 50 cm, fast frekvens, morän
- B23: 50 cm, fast frekvens, 0/250 mm
- C11: 90 cm, frekvensstyrning, 0/150 mm
- C13: 90 cm, frekvensstyrning, 0/250 mm
- C21: 90 cm, fast frekvens, 0/150 mm
- C23: 90 cm, fast frekvens, 0/250 mm

I denna rapport används begreppen yta eller provyta för en sammanhängande konstruktion med samma lagertjocklek (A, B eller C) och delyta för en variation av lagertjocklek, material och frekvensinställning (totalt 14 st). Centrerat på varje delyta var ett 20 m långt packningsstråk där mätningar utfördes. Delytorna B12 och B22 förlängdes dock till 23 m. Avståndet i sidled, från kant till kant, mellan olika packningsstråk var 2 m och 4 m i längsled. Avståndet från ytterkanten av varje vältstråk till bankkrönet var minst 2 m men, i det flesta fall, betydligt större. Avstånden bedömdes vara tillräckliga för att packningen inte skulle påverkas av övriga delytor eller av bankkrönet, särskilt med tanke på den begränsade lagertjockleken. En schematisk skiss över provytorna visas i Figur 3 och dess placering visas i Figur 4.



**Figur 3. Indelning av material och lagertjocklekar.**



**Figur 4. Placering av provytor i plan. Varje delyta har ett packningsstråk med längden 20 m (B12 och B22: 23 m).**

### 3.3 Terrass

Terrassen förbereddes genom avlägsnande av de översta ca 20 cm material och därefter packning i minst 12 överfarter till dess att ingen tillväxt i packmätarvärdet (CMV) erhöles, och avslutades med fyra statiska överfarter. Under förberedelse av terrassen kom stora regnmängder, upp till 40 mm på en dag (Figur 5). Ytterligare material fick då avlägsnas före packning. Dock fanns kvarvarande fukt i materialet som, på grund av dess höga siltinnehåll, fick en lägre styvhet än förutsett. Resterande tiden av försöken präglades av mycket nederbörd. Därför täcktes både terrass och överytor av plast vid nederbörd men viss fuktinträngning, framförallt provytornas ändar, var ofrånkomlig. Figur 6 visar terrassen under yta C (100 cm) efter packning.



**Figur 5. Terrass efter stora regnmängder.**



**Figur 6. Terrass efter packning.**

### **3.4 Utläggning**

Traktorutbredning med bandtraktor enligt AMA Anläggning 13 CE/1 tillämpades för utläggning av bankmaterialet. Maskinstyrning med GPS användes för överytans läge och nivå. Då bandtraktorn hade en totalvikt på 22 ton orsakade byggtrafiken vissa ojämnheter i initial packning och styvhet. Ytorna A (30 cm) och B (50 cm) fylldes från två håll och där blev styvheten högre i vardera änden och något större mängd trafik på B11 och B21 (0/150 mm) gav högre initial packning på dessa delar än B13 och B23 (0/250 mm). Yta C (100 cm) fylldes från endast ett håll och fick då högst styvhet i södra änden av C13/C23 (0/250 mm) och lägst i norra änden av C11/C21 (0/150 mm). Dessa styvhetsvariationer påverkade sättningarna under packningen i viss utsträckning men tack vare ett stort antal överfarter minimerades inverkan av initiala förhållanden.



**Figur 7. Utläggning av material.**

### 3.5 Installation av EMU-spolar

Efter utläggning av material installerades lägesgivare i form av så kallade EMU-spolar (avsnitt 4.2) genom uppgrävning och återfyllnad (Figur 8). Ytorna A (30 cm) och B (50 cm) utlades till full höjd varefter spolarna installerades. Yta C (100 cm) utlades till halva höjden och de nedre spolarna installerades, följt av utläggning till full höjd och sedan installation av resterande givare.



**Figur 8. Installation av EMU-spolar.**

### 3.6 Packning och mätning

Efter utläggning packades ytorna i två statiska överfarter för att minska variationer i initiala förhållanden, varefter nivåmätning av överytan och nollmätning av EMU-spolarna utfördes. Efter detta påbörjades vibrationspackning och mätning enligt följande förfarande:

1. Överfart 1-2:
  - a. Packning

- b. Sättningsmätning
  - c. Avläsning EMU-spolar
- 2. Överfart 3-4:
  - a. Packning
  - b. Sättningsmätning
  - c. Avläsning EMU-spolar
- 3. Överfart 5-8:
  - a. Packning
  - b. Sättningsmätning
  - c. Avläsning EMU-spolar
  - d. Plattbelastningsförsök
  - e. Seismiska försök
- 4. Överfart 9-12:
  - a. Packning
  - b. Sättningsmätning
  - c. Avläsning EMU-spolar
- 5. Överfart 13-16:
  - a. Packning
  - b. Sättningsmätning
  - c. Avläsning EMU-spolar
- 6. Överfart 17-20:
  - a. Packning
  - b. Sättningsmätning
  - c. Avläsning EMU-spolar
- 7. Överfart 21-24:
  - a. Packning

- b. Sättningsmätning
  - c. Avläsning EMU-spolar
8. Överfart 25-32:
- a. Packning
  - b. Sättningsmätning
  - c. Avläsning EMU-spolar
  - d. Plattbelastningsförsök
  - e. Seismiska försök
  - f. Tungt fallviktsförsök

Integrerade vältmätningar och accelerationsmätning gjordes kontinuerligt i alla överfarter. De färdiga ytorna (efter packning) visas i Figur 9.



**Figur 9. Färdiga provytor. I förgrunden, plattbelastningsförsök på yta C21 (100 cm).**

## 4 Mät- och utvärderingsmetoder

För att kvantifiera resultatet från packningen tillämpades en kombination av ett antal mätmetoder. De olika metoderna beskrivs kortfattat i detta avsnitt.

### 4.1 Sättning

Nivåer och sättningar mättes av Hedlund Mät och Beräkning AB med en totalstation Leica TS30 med vinkelnoggrannheten 0,5". Dels gjordes en avvägning av terrassen i ett rutnät av 5 m x 5 m för att få den ursprungliga nivån. Efter utläggning och två statiska överfarter gjordes nivåmätning av överytan. Tre mätpunkter var placerade varje meter längs vältstråken, centrerat i stråket och 0,5 m i sidled åt vardera hållet. För delytorna B12 och B22 (50 cm, morän) resulterade det i 72 mätpunkter per delyta och, för övriga delytor, 63 punkter. Totalt var antalet mätpunkter 900 på överytan. Efter 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 respektive 32 överfarter mättes sättningarna i samma 900 punkter.

### 4.2 EMU-spolar

EMU-spolar (Janoo et al., 1999) installeras i bankmaterialet och består av koppartråd som träs många varv runt en cirkulär disk. Genom att inducera en elektrisk spänning bildas ett magnetfält som ger upphov till en spänning i närliggande spolar. Spänningens storlek beror på avståndet mellan givarna och ger därför ett mått på hur avståndet mellan dem förändras, vilket i sin tur ger komprimeringen av bankmaterialet. Således fås som resultat den relativa sättningen på olika djup i vilket kan användas för att studera packningens djupverkan och komprimering utan inverkan från sättningen av terrassen eller underliggande material.

Givarna kalibreras parvis och placeras i en stapel i bankmaterialet med hjälp av inmätning. Den understa spolen placeras på terrassen och ansluts till en styrpinne för att inte erhålla sidoförskjutning av övriga givare (Figur 10). Nästa spole träs sedan på styrpinnen och placeras cirka 100-200 mm över den underliggande. Detta upprepas till dess att den sista är placerad 30-50 mm under överytan. Återfyllning sker successivt allteftersom stapeln placeras. När alla givare är placerade avlägsnas styrpinnen och en mätstapel erhålls där avståndsförändringen mellan varje spolpar kan mätas genom att inducera en elektrisk spänning och avläsa den resulterande spänningen i över- eller underliggande spole. I yta A (30 cm) bestod varje stapel av tre givare (två mätavstånd), i yta B (50 cm) fyra givare (tre mätavstånd) och i yta C (100 cm) sex givare (fem mätavstånd).

Eftersom tillverkningen och installationen av EMU-spolar är tids- och kostnadskrävande instrumenterades endast vissa delytor som valdes ut så att skillnader mellan lagertjocklek, material och frekvensinställning kunde analyseras. Dessa var A11 (30 cm, 0/150 mm, AFC), B11 (50 cm, 0/150 mm, AFC), B12 (50 cm, morän, AFC), B13 (50 cm, 0/250 mm, AFC), C11 (100 cm, 0/150 mm, AFC) och C21 (100 cm, 0/150 mm, fast frekvens). I varje instrumenterad delyta installerades två staplar, vilket gav ett mer tillförlitligt mätresultat. Figur 10 visar en EMU-spole under installation, styrpinne och kablage. Avläsning gjordes före packning samt efter 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 och 32 överfarter. Installation, avläsning och databehandling utfördes av Statens Väg- och Transportforskningsinstitut (VTI).



**Figur 10. Placering av EMU-spolar.**

### 4.3 Statisk plattbelastning

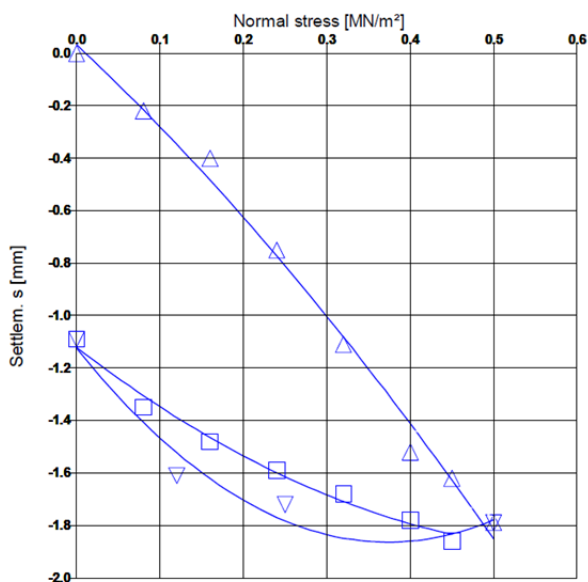
Statisk plattbelastning (plattbelastningsförsök) utfördes enligt TDOK 2014:0141 (Trafikverket, 2014). En cirkulär platta med diametern 300 mm belastas statiskt stegvis upp till spänningen  $0,5 \text{ MN/m}^2$  och avlastas sedan till spänningen noll för att sedan åter belastas upp till  $0,45 \text{ MN/m}^2$ . Under belastningen registreras plattans sättning och andragskurvor anpassas till uppmätta datapunkter för första och andra belastningscykeln. Slutligen beräknas en deformationsmodul för första belastningscykeln,  $Ev_1$ , och för andra belastningscykeln,  $Ev_2$ . Första cykeln innebär till stor del en initialisering av kontakt mellan plattan och underlaget och medan  $Ev_2$  anses vara den modul som är mest relaterad till ytans styvhet. Acceptenskriterier är därför alltid uttryckta i  $Ev_2$ -modul. I många fall presenteras kvoten  $Ev_2/Ev_1$  som ett mått på kvarstående packningspotential men denna bör tolkas med försiktighet med tanke på osäkerheten kring första belastningscykelns korrelation med faktisk styvhet i underlaget. Som mothåll i alla tester användes en traktorgrävare.

På terrassen utfördes totalt 10 plattbelastningsförsök. På överytan gjordes försök efter 8 och 32 överfarter. De delytor som valdes ut för plattbelastning var, för att få korrelation mellan olika mätmetoder, samma som de där EMU-spolar installerades. De delytor av krossmaterial som testades var A11, B11, B13, C11 och C21. På dessa gjordes försök i 8 belastningspunkter per delyta. De stora regnmängderna försvårade mätningar på delytor av morän eftersom traktorgrävaren som användes som mothåll inte kunde framföras på de fuktiga och lösa moränytorna efter åtta överfarter. Det resulterade i två mätpunkter på A12, två på A22, en på B12 och en på B22 efter åtta överfarter och åtta mätpunkter på B12 efter 32 överfarter. Figur 11 visar ett plattbelastningsförsök under genomförande och ett exempel på resulterande spänning-sättningsdiagram visas i Figur 12.





**Figur 11. Plattbelastningsförsök.**



**Figur 12. Exempel på spänning-sättningsdiagram för statisk plattbelastning.**

#### 4.4 Integrerade vältmätningar

Välten registrerar kontinuerligt ett antal parametrar med den integrerade så kallade packmätaren, vilken idag är standard på i stort sett alla vibrationsvältar i Europa. I andra delar av världen är det dock fortfarande vanligt med vältar utan packmätare. Huvudkomponenten är en accelerometer som mäter och analyserar valsens acceleration. Denna ligger sedan till grund för olika former av så kallat packmätarvärde, som Compactometervärde (CMV) och Evib och vars förändring under packningen ger ett mått på styvhetstillväxten. Dessa används därför ofta som en indikation på när tillräcklig packning skett. Accelerometern ger också grundläggande dynamiska parametrar som frekvens och förskjutningsamplitud.

CMV, som är det tidigast utvecklade packmätarvärdet (Thurner & Sandström, 1980; Forssblad, 1980), beräknas från en frekvensanalys av accelerationssignalen genom att dividera amplituden vid dubbla exciteringsfrekvensen men den vid grundfrekvensen. Evib är ett mer sofistikerat sätt att beräkna

styvheten vid valsens belastning av underlaget. Genom att använda metodiken utvecklad av Yoo & Selig (1979) som tar hänsyn till bl.a. valsens och ramens massor kan ett last-förskjutningsförhållande beräknas. Utifrån detta fås en pålastningsmodul, här kallad Evib1. En utveckling av denna metod, framtagen av Dynapac, är att även beräkna avlastningsmodulen, Evib2, som har en större koppling till den elastiska styvheten. Beräkningsmetodiken ger också den maximala kontakraften i varje belastningscykel. Ytterligare en parameter som fås från packmätaren är det så kallade RMV (Resonance Meter Value) som indikerar förekomst av dubbelhopp, dvs. bristande kontakt mellan valsens och underlaget, och som beräknas genom att dividera amplituden vid halva exciteringsfrekvensen med den vid grundfrekvensen (Adam & Kopf, 2000). För mer information om dynamisk analys och packmätarvärden hänvisas till Anderegg & Kaufmann (2004) och Briaud (2003).

#### **4.5 Acceleration**

Eftersom vältens integrerade accelerometer användes till frekvensstyrning och andra integrerade system monterades ytterligare en accelerometer på valsens för att ha möjlighet att analysera valsens vibrationer. Genom att integrera accelerationssignalen kunde också svängningshastigheten och den dynamiska förskjutningen erhållas.

#### **4.6 Fallviktsapparat**

Provbekastning med tung fallviktsapparat utfördes av VTI enligt TRVMB 112 (Trafikverket, 2012). Metoden innebär att inducera en belastning på överytan genom en fallande vikt på en belastningsplatta. Belastningen är vanligtvis 50 kN men även andra belastningar kan tillämpas. I dessa mätningar gjordes försök vid 50 kN och 30 kN. I samband med att vikten faller på belastningsplattan, 300 mm i diameter, mäts plattans deflektion. Förhållandet mellan belastning och deflektion ger en styvhet, kallad ytmodul, som ger ett mått på styvheten i hela konstruktionen. Vidare mäts deflektionen på olika avstånd från belastningscentrum, vilket ger ett mått på medelmodulen från ytan ner till samma djup som givaravståndet. Denna är dock mer osäker än ytmodulen. Fallviktsförsök utfördes efter 32 överfarter på fyra mätpunkter i varje delyta.

#### **4.7 Seismiska mätningar**

Seismiska försök utfördes av Peab Asfalt AB på alla delytor efter 8 och 32 överfarter. Mätningar gjordes i 1-2 st 3 m långa mätlinjer på varje delyta. Försöken innebär att med en hammare inducera seismiska vågor på olika avstånd från en accelerometer. Belastningen ger upphov till seismiska vågor i bankmaterialet, varav två vågtyper analyseras. Dels utvärderas P-vågen (kompressionsvågen) som propagerar direkt från exciteringspunkten till accelerometern. P-vågens hastighet beror på materialets inspända modul (odränerad ödometermodul) och korrelerar därför till kompressionsstyvheten. Rayleighvågen (ytvågen) analyseras med hjälp av så kallade dispersionsdiagram som bygger på att ytvågen propagerar med olika hastighet beroende på dess våglängd, vilken i viss mån är kopplad till djupet. Dispersionsdiagrammet ger en ytvågshastighet för aktuella våglängder, som beror på bankmaterialets skjuvmodul.



**Figur 13. Seismiska mätningar.**

## 5 Resultat

I detta kapitel redovisas utvalda resultat från alla mätningar på de två krossmaterialen samt vissa mätningar från moränytorna. På grund av det höga siltinnehållet i moränmaterialen och de stora regnmängderna under försöken var det svårt att kvantifiera packningen i detta material eftersom sidoflyttningen blev påtagligt större än sättningen/komprimeringen. Baserat på dessa försök är det uppenbart att ett moränmaterial med finjordshalt på 15-20 % inte är lämpligt som bankmaterial. Alla resultat redovisas i bilagorna. Försöksförutsättningar och antal mätpunkter sammanfattas i Tabell 2. Alla ytor packades med hög amplitud förutom yta A (30 cm) som packades med låg amplitud i de första 8 överfarterna och därefter hög amplitud.

**Tabell 2. Summering av delytor och antalet mätpunkter.**

Delyta	Nominell tjocklek (cm)	Material	Längd (m)	Frekvensstyrning	Amplitud	Avvägning/sättning	EMU-spolar	Plattbelastning	Vältningsvinkel	Välsacceleration	Fallvikt 30 kN	Fallvikt 50 kN	Slagsmik
Terrass			Nej	Hög <sup>1</sup>	150		18	k <sup>3,9</sup>					
A11	30	0/150	20	Ja	Låg/hög <sup>5</sup>	63	2 <sup>6</sup>	8	k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	4	4	2/1 <sup>2,4</sup>
A12	30	Morän	20	Ja	Låg/hög <sup>5</sup>	63		2/0 <sup>2</sup>	k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	3	3	0/1 <sup>2,4</sup>
A21	30	0/150	20	Nej	Låg/hög <sup>5</sup>	63			k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	4	4	2/1 <sup>2,4</sup>
A22	30	Morän	20	Nej	Låg/hög <sup>5</sup>	63		2/0 <sup>2</sup>	k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	3	3	0/1 <sup>2,4</sup>
B11	50	0/150	20	Ja	Hög	63	2 <sup>6</sup>	8	k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	4	4	2/1 <sup>2,4</sup>
B12	50	Morän	23	Ja	Hög	72	2 <sup>6</sup>	1/8 <sup>2</sup>	k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	5	5	1 <sup>4</sup>
B13	50	0/250	20	Ja	Hög	63	2 <sup>6</sup>	8	k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	4	4	2/1 <sup>2,4</sup>
B21	50	0/150	20	Nej	Hög	63			k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	4	4	2/1 <sup>2,4</sup>
B22	50	Morän	23	Nej	Hög	72		1/0 <sup>2</sup>	k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	5	5	1 <sup>4</sup>
B23	50	0/250	20	Nej	Hög	63			k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	4	4	2/1 <sup>2,4</sup>
C11	90	0/150	20	Ja	Hög	63	2 <sup>6</sup>	8	k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	4	4	2 <sup>4</sup>
C13	90	0/250	20	Ja	Hög	63			k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	4	4	1 <sup>4</sup>
C21	90	0/150	20	Nej	Hög	63	2 <sup>6</sup>	8	k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	4	4	2 <sup>4</sup>
C23	90	0/250	20	Nej	Hög	63			k <sup>3</sup>	k <sup>3</sup>	4	4	1 <sup>4</sup>
<b>Summa</b>						<b>150/900<sup>7</sup></b>	<b>12</b>	<b>18/46/48<sup>8</sup></b>			<b>56</b>	<b>56</b>	<b>20/16<sup>2</sup></b>
Mätning vid överfart nr. <sup>10</sup>						0, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 32	0, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 32	8, 32	1-32	1-32	32	32	8, 32

<sup>1</sup> Mindre vält (CA1500D)

<sup>2</sup> Efter 8 resp. 32 överfarter

<sup>3</sup> Kontinuerligt

<sup>4</sup> Antal mätlinjer, 30 mätpunkter per linje

<sup>5</sup> Låg amplitud första 8 överfarterna, därefter hög amplitud

<sup>6</sup> Antal staplar, 3-6 spolar per stapel

<sup>7</sup> Terrass resp. överyta

<sup>8</sup> Terrass/överyta 8 överfarter/överyta 32 överfarter

<sup>9</sup> Endast CMV

<sup>10</sup> Avser överyta

### 5.1 Materialtjocklek

Nivåmätning av terrassen gjordes i ett rutnät av 5 m x 5 m. Genom att jämföra nivåmätningarna på överytan efter 32 överfarter med respektive närmaste avvägningsspunkt på terrassen fås en uppskattning om lagrens slutgiltiga tjocklek. Detta tar dock inte hänsyn till sättning av terrassen. Överytan höjdes för att de färdiga lagertjocklekarna skulle vara nära de nominella värdena på 30 cm (A), 50 cm (B) respektive 90 cm (C) efter packning. På grund av svårigheter att bedöma påverkan av byggtrafik uppstod dock avvikelser från de nominella tjocklekarna. Tabell 3 visar medelvärden och standardavvikelser för de uppskattade materialtjocklekarna. Den slutgiltiga tjockleken av Provyta A blev något lägre än den nominella medan Provyta B hade en tjocklek nära den nominella och en större tjocklek för Provyta C. Fördelningar för alla delytor redovisas i Bilaga G.

**Tabell 3. Beräknade materialtjocklekar.**

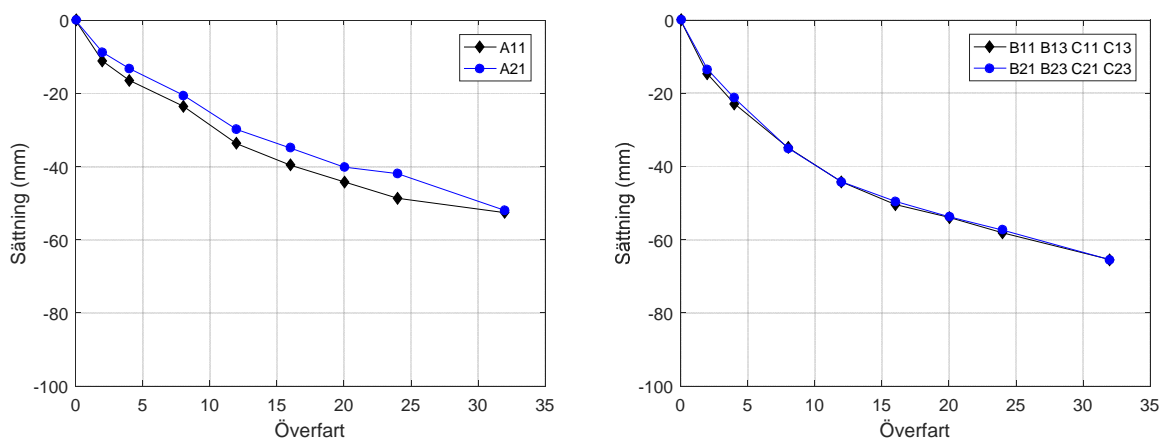
Yta	Material	Tjocklek (cm)	Standardavvikelse (cm)
A11	0/150	25,3	2,88
A21	0/150	25,3	3,19
A12	Morän	28,5	5,65
A22	Morän	24,3	5,15
B11	0/150	49,5	2,19
B21	0/150	47,5	1,42
B12	Morän	52,4	3,02
B22	Morän	51,4	5,14
B13	0/250	44,3	3,22
B23	0/250	45,9	2,69
C11	0/150	100,5	4,48
C21	0/150	102,5	6,15
C13	0/250	96	5,13
C23	0/250	95,8	5,26

## 5.2 Sättningar

Tidigare mätningar har visat att sättningen är nära relaterad till packningen i underliggande material (Wersäll & Larsson, 2013; Wersäll et al., 2015). En del av sättningen är ett resultat av horisontell förskjutning, särskilt då banken packas i ett vältstråk, i motsats till att packas över hela ytan. Dock är sättningen lämplig att analysera som ett relativt mått på packningen vid jämförelse av inverkan av enskilda parametrar. Sättningarna uppvisade relativt stora variationer, dels på grund av varierande initial lagringstäthet och dels från punkt till punkt beroende på den grova fraktionen, men kunde jämföras tack vare ett mycket stort antal sättningsmätningar på varje delyta.

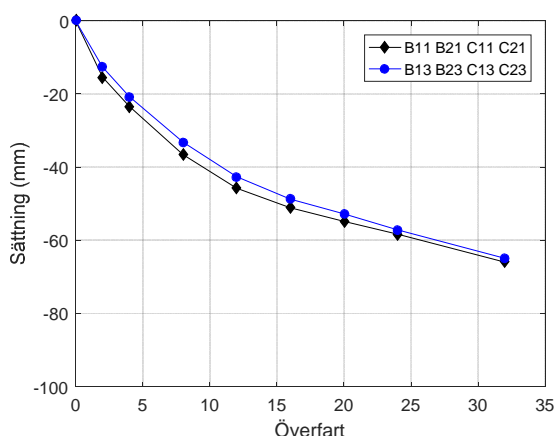
Sättningarna ger även ett mått på hur stor del av packningspotentialen som har uppnåtts genom att observera hur sättningarna avtar och kan därför användas som kriterium för när erforderlig packning har uppnåtts. I dessa försök påverkas dock sättningarna, särskilt vid ett högre antal överfarer, dels av sidoförskjutning och dels av sättningar i den relativt eftergivliga terrassen. Det gör att sättningarna inte avtar i lika stor utsträckning och att en del av sättningsökningen beror på andra faktorer än packning. I viss utsträckning kan sättningen också påverkas av materialnedbrytning nära ytan till följd av packningen.

I Figur 14 visas en jämförelse av sättningen av krossmaterial då packning skett med frekvensstyrning respektive med konventionell fast frekvens. Den variabla frekvensen var generellt mellan 18 Hz och 20 Hz medan den fasta frekvensen var 28 Hz för hög amplitud och 30 Hz för låg amplitud, vilket redovisas i avsnitt 5.6.2. Den vänstra figuren visar sättningen av provytan med 30 cm tjocklek, där delyta A11 är med frekvensstyrning och A21 är utan frekvensstyrning. Provytorna B och C, med tjockleken 50 cm respektive 90 cm visas i den högra figuren där "B11 B13 C11 C13" har packats med frekvensstyrning och "B21 C23 C21 C23" med fast frekvens. Skillnaden i sättning mellan den variabla och fasta frekvensinställningen är mycket liten och i princip försumbar. Det indikerar att den totala komprimeringen i skiktet är likvärdig men säger ingenting om fördelningen med djupet eller terrassens sättning. Med hänsyn till total packning är därför frekvensstyrningen mer gynnsam eftersom komprimeringen inte påverkas och frekvensstyrning har maskinrelaterade fördelar, se kapitel 6. Dessutom antyder övriga mätningar att sättning av terrassen är större vid fast frekvens och således att en mindre del av överytans sättning är kopplad till krossmaterialets komprimering (avsnitt 5.3).



**Figur 14. Inverkan av frekvensstyrning (svart: frekvensstyrning, blå: fast frekvens), vänster: 30 cm, höger: 50/100 cm.**

Inverkan av lagertjocklek redovisas i Bilaga H. Sättningarna blir, som förväntat, generellt större för större lagertjocklek men eftersom både mängden byggtrafik samt sättningarna i terrassen vid de olika provytorna varierar kan resultaten inte jämföras direkt. Figur 15 visar inverkan av fraktion för krossmaterialet där "B11 B21 C11 C21" motsvarar 0/150 mm och "B13 B23 C13 C23" motsvarar 0/250 mm. Skillnaden mellan de två materialfraktionerna är princip försumbar vilket antyder att fraktionen har mycket liten inverkan på packningsresultatet om hänsyn ej tas till terrassens sättning eller djupberoende komprimering.



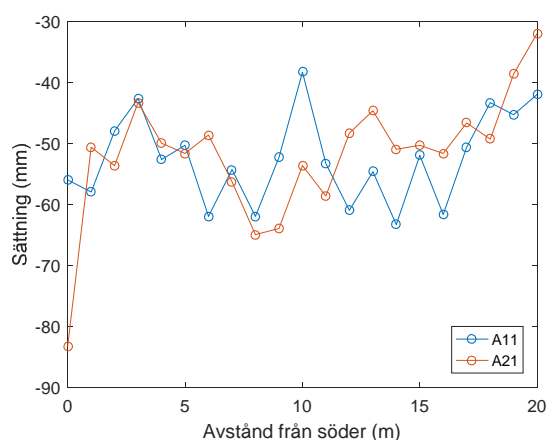
**Figur 15. Inverkan av materialfraktion (svart: 0/150 mm, blå: 0/250 mm).**

### 5.2.1 Inverkan av materialutläggning

Utläggningen av material ledde till vissa initiala variationer i densitet och styvhet (avsnitt 3.4). Ytornas placering (Figur 4) gjorde att en varierande mängd tung byggtrafik framfördes på ytorna före påbörjat packningsarbete. Genom att observera hur sättningen varierar längs delytorna kan den initiala packningen analyseras. En högre initial packning innebär att sättningen som orsakas av välten blir lägre. Variationer i sättning av terrassen förekommer också på grund av dess varierande styvhet men den allmänna trenden kan observeras i nedanstående figurer. I varje figur visas sättningen efter 32 överfarter längs varje meter från den södra änden av respektive delyta som ett medelvärde av de tre

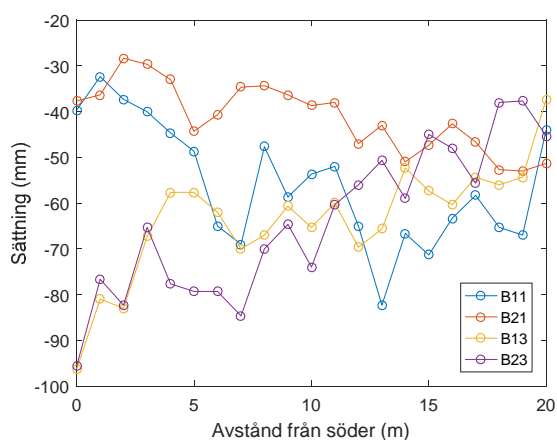
sättningsmätningarna i den sektionen. Eftersom sättningarna av moränytorna till stor del är ett resultat av undanträngning visas i detta avsnitt endast de ytor bestående av krossmaterial.

Figur 16 visar sättningen efter 32 överfarter av delytorna A11 och A21 (30 cm, 0/150 mm). Dessa fylldes från norr medan de anliggande moränytorna fylldes från söder. Det är således ingen annan trafik än den som krävdes för att fylla dessa ytor som har framförts på krossmaterialet. Sättningen visar att den initiala packningen är störst i den norra änden som har haft mest byggtrafik och minskar mot söder. Dock ger den tunna lagertjockleken en stor inverkan av terrassens styvhet vilket yttrar sig i stora variationer i den resulterande sättningen. Delytorna A11 och A21 ger liknande sättningvariationer vilket tyder på att den initiala packningen och terrassens styvhet är likvärdig för de båda ytorna.



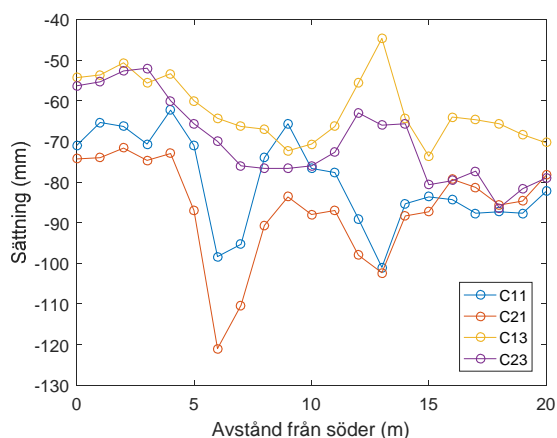
**Figur 16. Sättningar längs delytor med lagertjocklek 30 cm och materialfraktion 0/150 mm: A11 (AFC) och A21 (fast frekvens).**

Sättningarna efter 32 överfarter längs krossytorna B11, B21, B13 och B23 (50 cm) visas i Figur 17. B11/B21 (0/150 mm) fylldes från söder och B13/B23 (0/250 mm) från norr. De mellanliggande moränytorna fylldes både från söder och från norr, dvs. byggtrafiken har framförts över alla krossytor för utläggning av morän. Den största delen av moränutläggning skedde dock från söder, dvs. över B11 och B21 (0/150 mm), vilket visar sig genom lägre sättning på dessa ytor än på B13 och B23 (0/250 mm). Det betyder att B11/B21 har högre initial packning än B13/B23. Den varierande trafiken längs ytan visar sig också genom högre styvhet i södra änden av B11/B21 som minskar mot norr och det motsatta förhållandet för B13/B23. Resultaten visar även att B13 och B23 har liknande sättning medan sättningen är högre för B11 än för B21. Det betyder att den framförda byggtrafiken och den initiala packningen är högre för B21 (fast frekvens). EMU-spolar installerades efter färdigställd utläggning i delytorna B11 och B13 (AFC) på avstånden 7 m och 13 m. Det är sannolikt att den förstärkta sättningen på dessa avstånd på B11 är ett resultat av installationen av spolarna och avsaknaden av byggtrafik på de återfyllda groparna. För B13 är effekten inte lika påtaglig.



**Figur 17. Sättningar längs delytor med 50 cm lagertjocklek: B11 (0/150 mm, AFC), B21 (0/150 mm, 28 Hz), B13 (0/250 mm, AFC) och B23 (0/250 mm, 28 Hz).**

Figur 18 visar sättningarna för delytorna C11, C21, C13 och C23 (100 cm). Alla dessa fylldes från söder, vilket innebär att utläggning av C11/C21 (0/150 mm) gjordes via C13/C23 (0/250 mm) och att mängden trafik således var påtagligt större på de sistnämnda delytorna. På grund av detta är sättningarna något högre på C11 och C21 och de ökar mot norr. Dock är variationerna mindre än för yta B (50 cm). Sättningarna är likvärdiga för C11 (AFC) och C21 (28 Hz) samt för C13 (AFC) och C23 (28 Hz) även om C11 har något högre initial packning än C21. De påtagliga sättningsökningarna runt avstånden 7 m och 13 m på C11 och C21 är troligtvis orsakad av installation av EMU-spolar i dessa sektioner.



**Figur 18. Sättningar längs delytor med lagertjocklek 100 cm: C11 (0/150 mm, AFC), C21 (0/150 mm, 28 Hz), C13 (0/250 mm, AFC) och C23 (0/250 mm, 28 Hz).**

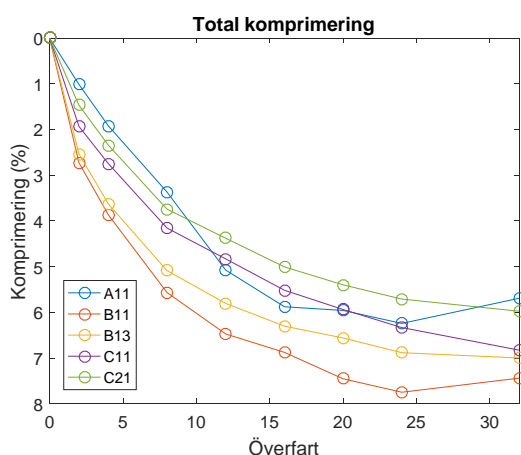
### 5.3 EMU-spolar

Resultaten från EMU-spolorna kan användas för att utvärdera komprimeringen på olika djup. I alla instrumenterade ytor ligger den understa spolen i nivå med terrassen medan den översta spolen ligger 30-50 mm under överytan, vilket gör att komprimeringen i hela skiktet förutom i de översta 30-50 mm kan undersökas. Ytterligare en fördel med EMU-spolorna är att de eliminerar inverkan av sättning i terrassen och enbart visar komprimeringen av bankmaterialet. Spolorna som var installerade i moräntan B12 uppvisade negativ komprimering eftersom sidoflyttningen var betydligt större än

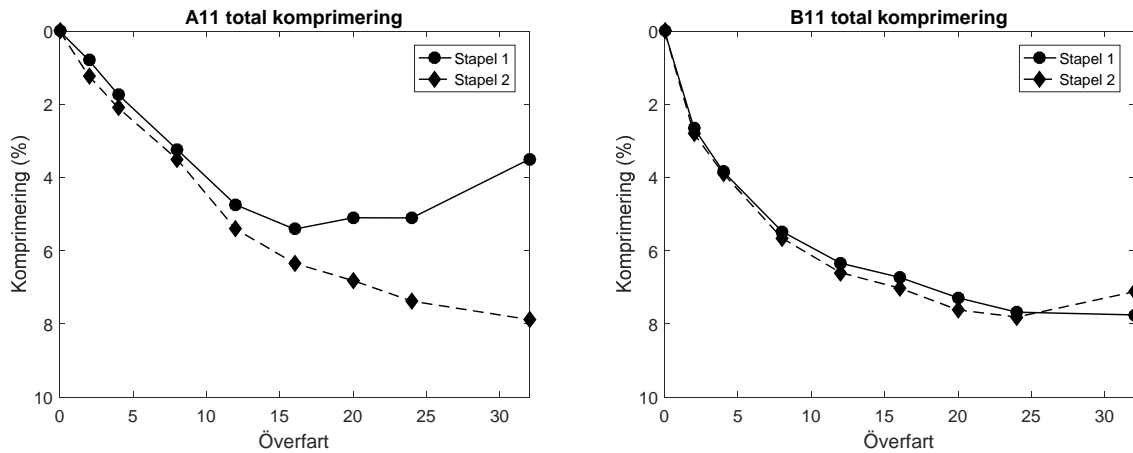


sättningen och avstånden mellan dem därför ökade. Dessa mätningar avbröts därför efter 8 överfarter men en slutmätning gjordes efter 32 överfarter (Bilaga I). Mätningarna i moränytan kan således inte utvärderas och i detta avsnitt presenteras endast krossmaterial.

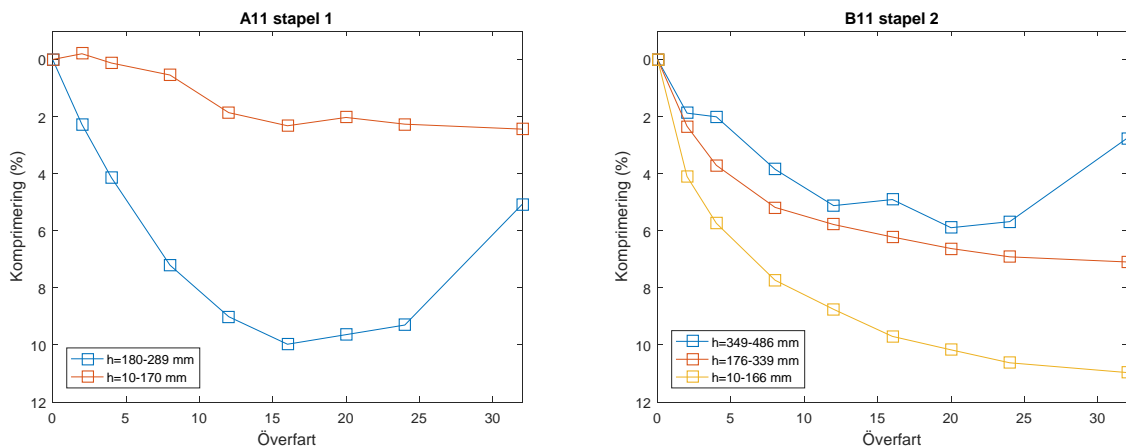
Figur 19 visar den totala komprimeringen för respektive instrumenterad delyta som funktion av antalet överfarter, där varje kurva är medelvärde av de två staplarna i respektive yta. Komprimeringen efter 32 överfarter varierar mellan cirka 5,5 % och 7,5 %. Störst slutgiltig komprimering fås för provyta B (50 cm tjocklek), följt av provyta C (100 cm tjocklek) och därefter provyta A (30 cm tjocklek). Dock ses en negativ komprimering mellan överfarter 24 och 32 för delytor A11 (0/150 mm, AFC) och B11 (0/150 mm, AFC), dvs. en volymökning (Figur 20). Vidare inspektion av de två staplarna i respektive delyta visar att det är en avvikelse endast i en stapel per yta samt endast i det översta spolparet (Figur 21 samt Bilaga I). Fenomenet kan också observeras i B13 (0/250 mm, AFC) och C21 (0/150 mm, 28 Hz), Bilaga I, men volymökningen är där inte tillräckligt kraftig för att ge en negativ total komprimering. Detta kan bero på överpackning av materialet som ger uppluckring i det översta skiktet, eller på att den översta spolen har förflyttat sig och ger större och större avvikelse efter varje överfart. Särskilt om avvikelsen börjar sent i packningsförloppet kan uppluckring misstänkas. I detta fall börjar volymökningen vid olika skeden i packningen för olika delytor, vilket illustreras i Figur 21, där komprimeringen i det översta spolparet är negativ efter 16 överfarter i delyta A11 (0/150 mm, AFC) och efter 24 överfarter i B11 (0/150 mm, AFC). Eftersom avvikelsen endast uppstår i ena stapeln och eftersom sättningen inte visar på någon total volymökning i någon delyta är det inte sannolikt att hela ytan har luckrats upp kraftigt. Det är dock troligt att viss uppluckring har skett med tanke på det höga antalet överfarter. Mest sannolikt är att viss uppluckring har skett runt den översta spolen och att detta i sin tur orsakat en förflyttning eller rotation som har förstärkts vid efterföljande överfarter. Det skulle innebära att den volymökning som kan observeras, till viss del, motsvarar en verklig materialuppluckring men inte i den utsträckning som mätningarna antyder. Om hänsyn tas till enbart staplarna som visar kontinuerlig volymminskning fås en komprimering av cirka 8 % i både A11 och B11. Om den slutgiltiga komprimeringen i Figur 19 ersätts med 8 % för yta A11 och B11 fås en tydligare bild av komprimeringen som funktion av lagertjockleken. Hänsyn skall också tas till att de första överfarterna på provyta A gjordes med låg amplitud och att komprimering därav sannolikt blivit mindre än om alla överfarter utförts med hög amplitud. Sammanfattningsvis indikerar resultaten från EMU-spolorna att komprimeringen är högre vid lägre lagertjocklek men antyder också att uppluckring sker vid högre antal överfarter, särskilt i de tunnare skikten.



**Figur 19. Total komprimering, EMU-spolar: A11 (30 cm, 0/150 mm, AFC), B11 (50 cm, 0/150 mm, AFC), B13 (50 cm, 0/250 mm, AFC), C11 (100 cm, 0/150 mm, AFC) och C21 (100 cm, 0/150 mm, 28 Hz).**



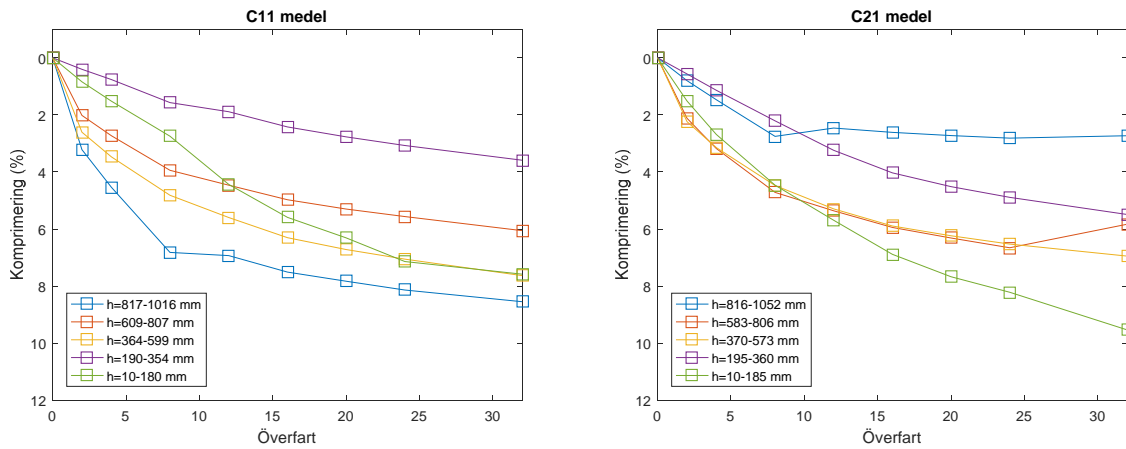
Figur 20. Total komprimering i delyta A11 (vänster, 30 cm, 0/150 mm, AFC) respektive B11 (höger, 50 cm, 0/150 mm, AFC).



Figur 21. Komprimering av enskilda spolpar visar volymökning i övre delen av banken.

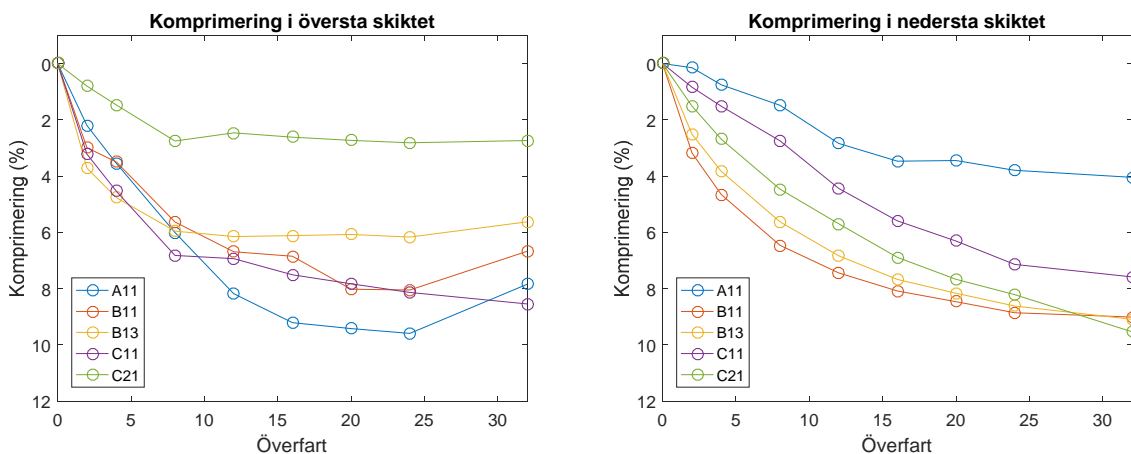
Komprimeringen är högre i yta B11 (0/150) än i yta B13 (0/250), särskilt om uppluckringen i B11 bortses ifrån. Vissa initiala variationer på grund av något varierande byggtrafik kan förväntas. Dock ökar skillnaden mellan de två materialen efter varje överfart, vilket antyder att den mindre fraktionen på bankmaterial kan vara mer gynnsam.

Vidare visar Figur 19 att den totala komprimeringen är högre vid användande av frekvensstyrning (C11 jämförd med C21). Dessa två ytor har haft likvärdig byggtrafik och kan därför jämföras. Det visar på en positiv inverkan av frekvensstyrning. Genom att observera komprimeringen i enskilda spolpar, som i Figur 22, kan det konstateras att båda frekvensinställningarna ger en likvärdig packning i mitten av skiktet, dock en något större komprimering med frekvensstyrning, medan botten av lagret uppvisar en högre packningseffekt utan frekvensstyrning. Skillnaden mätresultat i botten av skiktet kan dock till viss del bero på skillnad i sättning av olika delar av terrassen. I den övre delen av skiktet fås uppluckring på yta C21 som packades utan frekvensstyrning och uppstår i de två övre spolparen, vilka innefattar drygt halva skiktets tjocklek. Ingen uppluckring kan observeras i delytan som är packad med frekvensstyrning. Sammantaget visar resultaten att konventionell packning ger bättre djupverkan men att uppluckring kan undvikas med frekvensstyrning och att packningen blir påtagligt bättre i övre delen av skiktet, vilket även har observerats av Wersäll et al. (2017).



**Figur 22. Komprimering av enskilda spolpar (medelvärde av båda staplar) för C11 och C21, med respektive utan frekvensstyrning.**

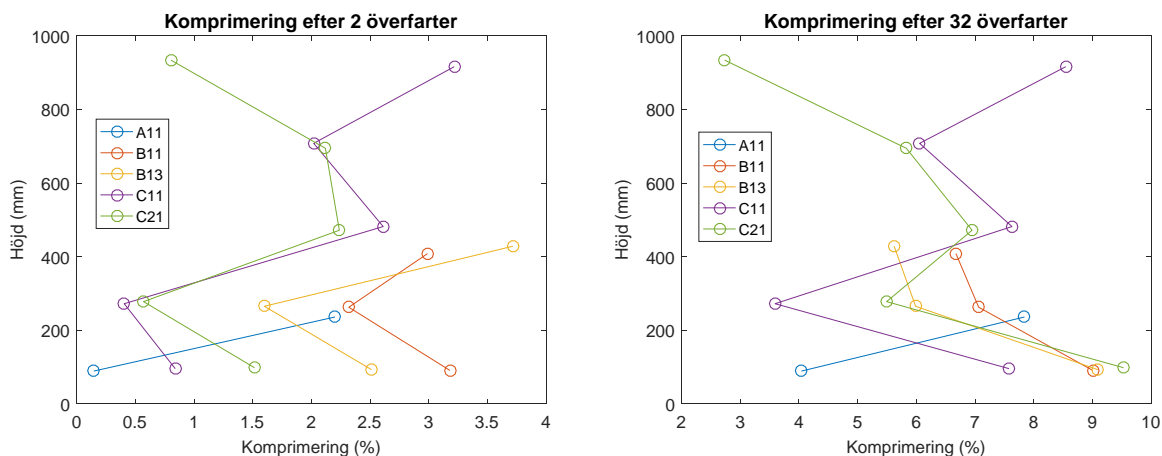
Figur 23 visar komprimering i översta respektive nedersta spolparet för alla instrumenterade delytor. Den ineffektiva packningen i övre delen av lagret vid konventionell packning med fast frekvens syns tydligt i yta C21, medan övriga ytor är packade med frekvensstyrning och uppvisar en komprimering i samma storleksordning. Uppluckring kan observeras i alla ytor som har en tjocklek på 30 eller 50 cm. I nedersta spolparet syns den något större djupverkan av konventionell packning (C21, jämfört med C11) medan ytorna B11 (0/150 mm) och B13 (0/250 mm) har en slutlig komprimering som är identisk, även om packningsförloppet antyder en något större komprimering i B11, vilket dock kan bero på varierande initialförhållanden. I delyta A11 (30 cm) sker merparten av komprimeringen i det översta skiktet, vilket kan bero på närheten till den eftergivliga terrassen.



**Figur 23. Komprimering i översta respektive nedersta skiktet, EMU-spolar: A11 (30 cm, 0/150 mm, AFC), B11 (50 cm, 0/150 mm, AFC), B13 (50 cm, 0/250 mm, AFC), C11 (100 cm, 0/150 mm, AFC) och C21 (100 cm, 0/150 mm, 28 Hz).**

Figur 24 visar komprimeringsprofilen efter 2 respektive 32 överfarter, i relation till initialförhållanden, vilket visar hur packningseffektiviteten varierar med djupet. För delyta A11 (30 cm) sker packningen nästan uteslutande i det övre skiktet och mycket liten effekt fås nära terrassen, vilket gäller både i början och i slutet av packningsförloppet. För B11 och B13 (50 cm), som båda är packade med frekvensstyrning men med olika materialfraktion, fås störst komprimering i översta och nedersta

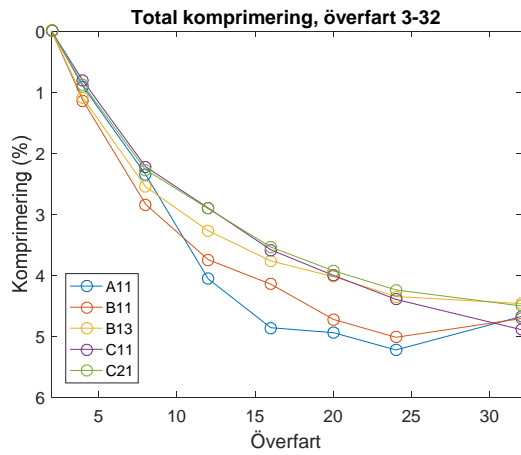
skikten efter 2 överfarter. Efter 32 överfarter har detta förhållande förändrats så att packningen har ökat med djupet i de tre mätskikten. I ytorna C11 (AFC) och C21 (28 Hz) är det tydligt att frekvensstyrningen har en mycket positiv inverkan på packningen i övre skiktet men att fast frekvens ger en något bättre djupverkan. Den betydligt lägre packningen i det näst nedersta mätskiktet är sannolikt en konselvans av utläggningsproceduren, där yta C placerades i två skikt. Det betyder att viss komprimering av materialet skedde i den nedre delen av banken till följd av byggtrafik på halva ytans tjocklek.



**Figur 24. Komprimeringsprofil efter 2 respektive 32 överfarter, EMU-spolar: A11 (30 cm, 0/150 mm, AFC), B11 (50 cm, 0/150 mm, AFC), B13 (50 cm, 0/250 mm, AFC), C11 (100 cm, 0/150 mm, AFC) och C21 (100 cm, 0/150 mm, 28 Hz).**

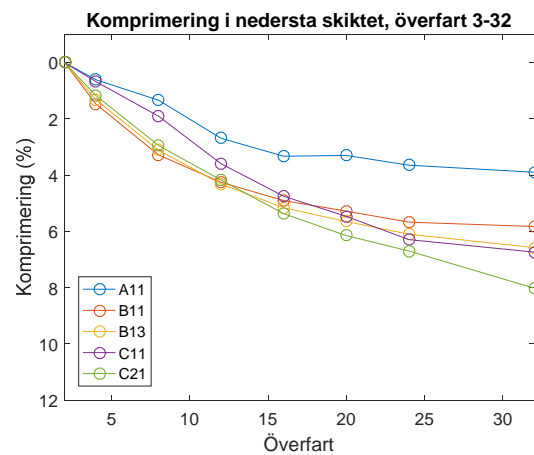
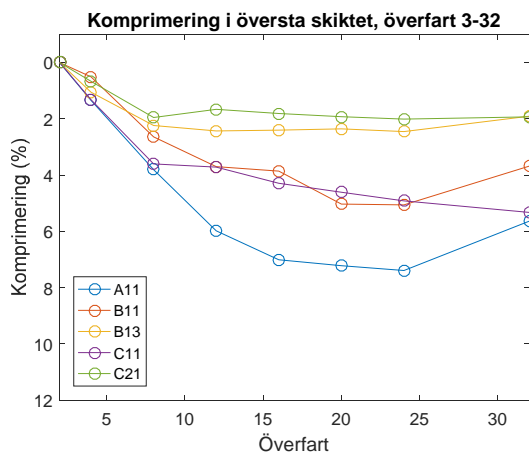
### 5.3.1 Komprimering i överfart 3-32

En annan bild av packningsförloppet kan fås genom att bortse från de två första överfarterna och studera överfart 3-32. Ett liknande förlopp som för alla överfarter säkerställer att variationer i installationen av instrumenteringen inte har haft påverkan på resultaten. Vidare fås en jämförelse på hur olika förfaranden påverkar löst respektive packat material. Figur 25 visar den totala komprimeringen i överfart 3-32, att jämföra med Figur 19. Den slutgiltiga komprimeringen är här mycket likvärdig för alla instrumenterade ytor, vilket antyder att de skillnader som observerats ovan mest sker i de två första överfarterna. Dock ger de tunnare skikten bättre packning tidigt i packningsförloppet men större uppluckring vid högre antal överfarter. Även här är B11 den delyta med störst komprimering.

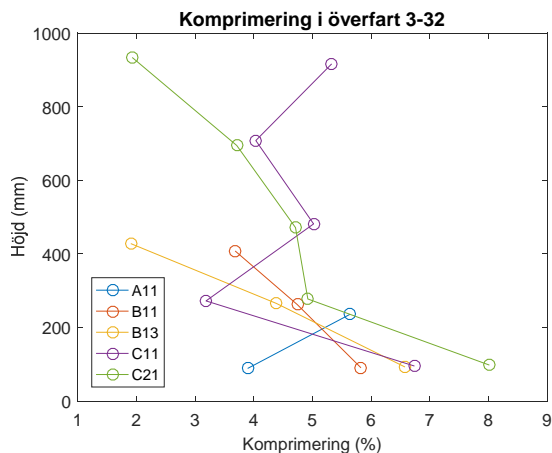


**Figur 25. Total komprimering i överfart 3-32.**

Figur 26 visar komprimeringen i översta respektive nedersta skiktet för överfart 3-32. Återigen fås ett liknande förlopp som när hela packningsförloppet observeras (Figur 23), vilket bekräftas av komprimeringsprofilen i Figur 27 (jämförd med Figur 24). Det visar att de effekter som påverkas av olika försöksparametrar utvecklas under hela packningsförloppet.



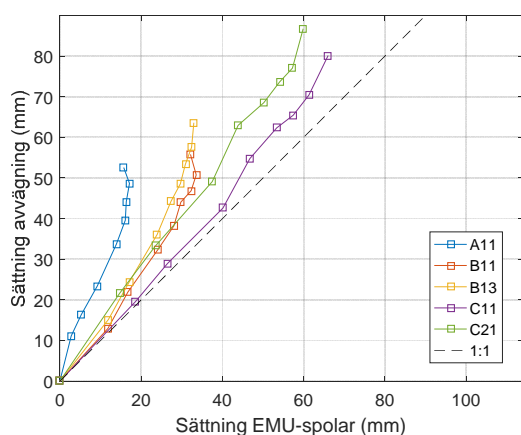
**Figur 26. Komprimering i översta respektive nedersta skiktet för överfart 3-32.**



Figur 27. Komprimeringsprofil för överfart 3-32.

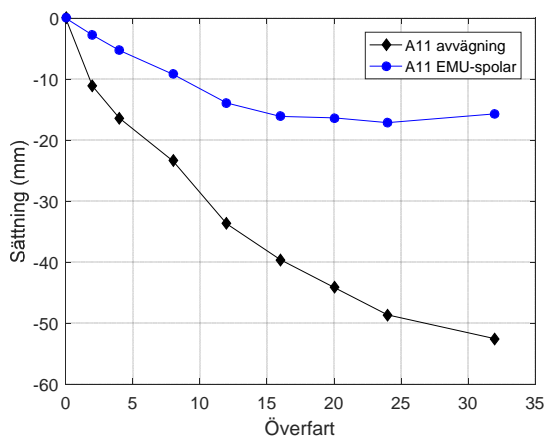
#### 5.4 Sättning av terrass

På grund av den kraftiga nederbörden under försöken och således den eftergivliga terrassen är det rimligt att anta sättningar i terrassen. Sättningarna som mättes på överytan är summan av sättningarna i bankmaterialet och i terrassen, medan EMU-spolorna endast reflekterar sättningar i bankmaterialet. Genom att jämföra dessa fås en uppskattning av terrassens sättning. Dock visar inte EMU-spolorna sättningen av hela skiktet eftersom de översta 30-50 mm i varje yta inte är instrumenterade och eftersom de inte heller mäter komprimering längs spolarnas tjocklek (totalt 30-60 mm per yta). Jämförelsen ger därför en överskattning av sättningarna i terrassen. Figur 28 visar genomsnittet av sättningen på överytan jämfört med genomsnittet av sättningen uppmätt med EMU-spolar för alla instrumenterade ytor och överfarter.



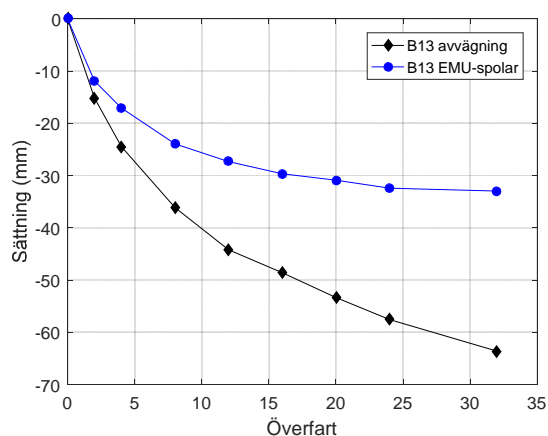
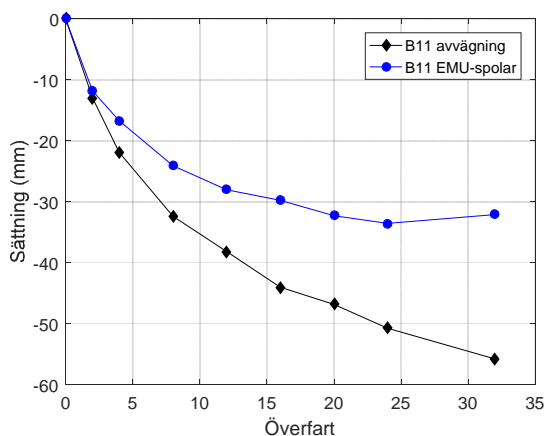
Figur 28. Jämförelse sättningsavvägning och EMU-spolar.

Jämförelse mellan avvägning och EMU-spolar för det 30 cm tjocka lagret visas i Figur 29, där skillnaden mellan avvägning och spolar representerar terrassen. Figuren antyder att sättningen av terrassen kan uppgå till så mycket som 35 mm men eftersom den övre icke instrumenterade delen av skiktet närmast ytan får större relativ inverkan är den faktiska sättningen troligtvis påtagligt lägre.

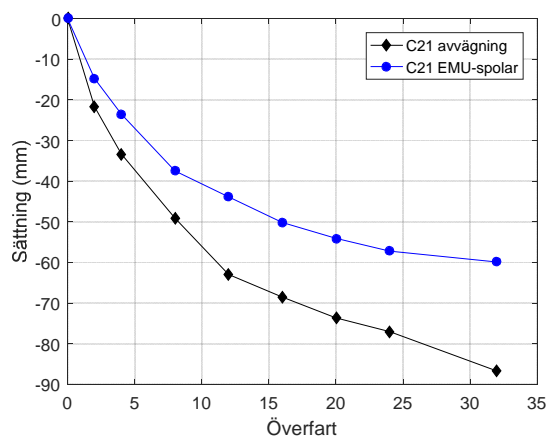
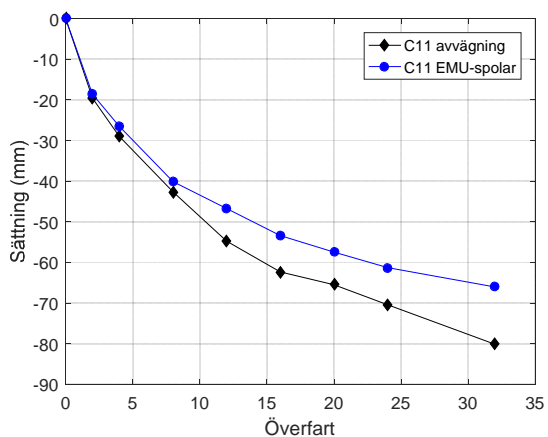


**Figur 29. Jämförelse sättningsavvägning och EMU-spolar, 30 cm lagertjocklek.**

Figur 30 visar jämförelsen för ytorna med 50 cm lagertjocklek. Sättningen av terrassen är här upp till cirka 30 mm. För yta C, med 100 mm lagertjocklek är terrassens sättning upp till cirka 25 mm. Dessa sättningar är mycket osäkra men ger ändå en fingervisning om att terrassens inverkan är betydande.



**Figur 30. Jämförelse sättningsavvägning och EMU-spolar, 50 cm lagertjocklek. Vänster: 0/150 mm, höger: 0/250 mm.**



**Figur 31. Jämförelse sättningsavvägning och EMU-spolar, 90 cm lagertjocklek. Vänster: AFC, höger: 28 Hz.**

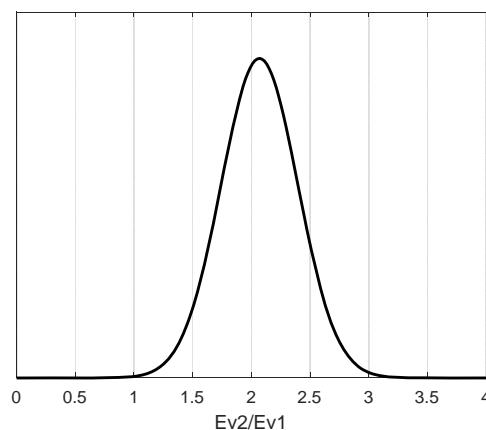
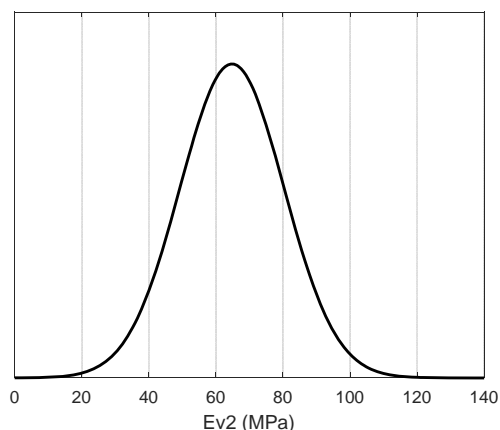
## 5.5 Plattbelastningsförsök

### 5.5.1 Terrass

På terrassen, bestående av siltmorän, utfördes 10 st plattbelastningsförsök under yta B och 8 st under yta C. På grund av väderlek kunde inga försök göras under yta A. Resultaten från försöken visas i Tabell 4 och Figur 32. Ytmodulen  $E_{v2}$  hade ett medelvärde på 64,8 MPa och kvoten  $E_{v2}/E_{v1}$  ett medelvärde på 2,1. Enligt krav för höghastighetsbanor (Trafikverket, 2016) ska  $E_{v2}$  på terrassen vara minst 60 MPa, dvs. mycket nära medelvärdet som uppnåddes på den packade terrassen, medan många försökspunkter hade en lägre modul. Den låga styvheten var ett resultat av de stora regnmängderna och moränmaterialets höga silthalt, vilket ledde till icke-acceptabla  $E_{v2}$ -värden. Detta påverkade också försöken eftersom bankmaterialet lades ut endast i ett skikt. Packningen påverkades därför av det underliggande materialet och det blev svårare att uppnå en tillräcklig styvhet på överytan.

**Tabell 4. Plattbelastningsförsök på terrass.**

Punkt nr	Yta	$E_{v1}$ (MPa)	$E_{v2}$ (MPa)	$E_{v2}/E_{v1}$
1	C	44,5	68,6	1,54
2	C	62,3	92,5	1,48
3	C	34,0	66,3	1,95
4	C	27,7	51,7	1,87
5	C	30,1	52,4	1,74
6	C	31,1	73,5	2,36
7	C	38,1	83,4	2,19
8	C	30,4	69,3	2,28
9	B	25,0	47,8	1,91
10	B	18,9	46,0	2,43
11	B	36,1	61,4	1,70
12	B	23,5	59,7	2,54
14	B	44,5	97,3	2,19
15	B	33,0	73,5	2,23
16	B	23,9	47,8	2,00
17	B	23,7	53,8	2,27
18	B	22,8	56,7	2,49
<b>Medelvärde</b>		<b>32,3</b>	<b>64,8</b>	<b>2,1</b>

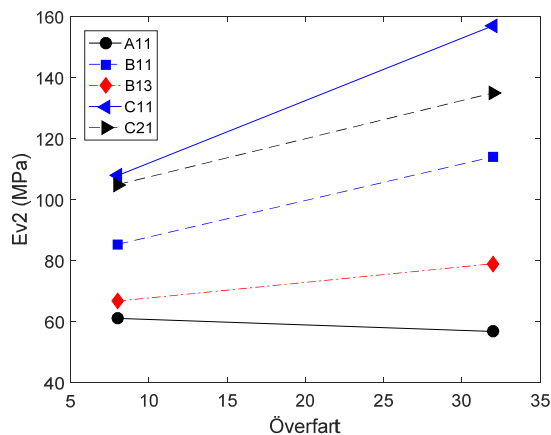


**Figur 32. Sannolikhetsfördelning, plattbelastningsförsök på terrass.**



### 5.5.2 Överyta

Figur 33 visar medelvärdet av kompressionsmodulen  $E_{v2}$  efter 8 respektive 32 överfarter för de krossytor där plattbelastningsförsök har utförts. Varje punkt är medelvärdet av 8 försök. Spridningen inom delytorna presenteras i Bilaga J. Yta A11 (30 cm, AFC) har initialt en mycket låg styvhet efter 8 överfarter, i samma storleksordning som på terrassen. Dessutom är styvheten efter 32 överfarter lägre än efter 8 överfarter. Inspektion av enskilda punkter i Bilaga J visar att det framförallt är spridningen som har ökat, vilket sannolikt beror på uppluckring av materialet. Anledningen till den låga styvheten är troligtvis närheten till terrassen och det stora fukttinnehållet i siltmoränen, särskilt vid yta A.

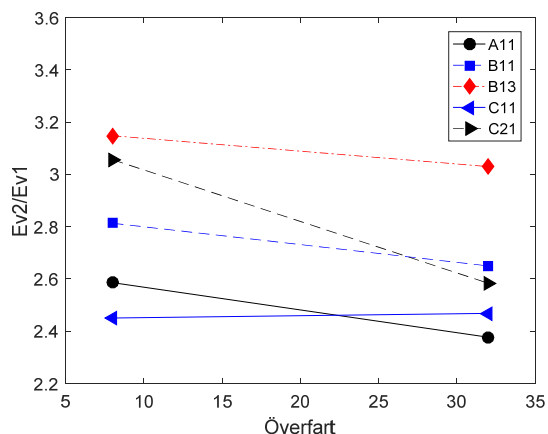


**Figur 33. Medelvärde av kompressionsmodul  $E_{v2}$  för krossmaterial: A11 (30 cm, 0/150 mm, AFC), B11 (50 cm, 0/150 mm, AFC), B13 (50 cm, 0/250 mm, AFC), C11 (100 cm, 0/150 mm, AFC) och C21 (100 cm, 0/150 mm, 28 Hz).**

Yta B11 och B13 (50 cm, AFC) visar också en låg styvhet efter 8 överfarter men en svag ökning efter 32 överfarter. Både den initiala styvheten och ökningen är större för yta B11 (0/150 mm) än för B13 (0/250 mm). Yta C (100 cm), där C11 är med frekvensstyrning och C21 är med konventionell packning, visar högre och likvärdig  $E_{v2}$ -modul efter 8 överfarter. Efter 32 överfarter har dock C11 en påtagligt högre styvhet än C21. Den slutgiltiga modulen är ändå relativt låg med tanke på det höga antalet överfarter, vilket återigen kan härledas ytornas begränsade tjocklek och terrassens inverkan. Det begränsade sidomotståndet kan också påverka eftersom packning har utförts endast i ett centrerat stråk över delytorna. Sammanfattningsvis ger den tunna lagertjockleken och det låga sidomotståndet inte tillräcklig styvhet på överytorna men större tjocklek har, som förväntat, en positiv inverkan och frekvensstyrning ger en bättre styvhet i ytan tack vare den förbättrade packningen högt upp i skiktet. Den konventionella packningen ger däremot en uppkuckring i ytan, vilket påverkar  $E_{v2}$ -modulen negativt. Enligt teknisk systemstandard för höghastighetsbanor (Trafikverket, 2016) ska  $E_{v2}$ -modulen på frostisoleringslagars överyta vara minst 120 MPa, vilket inte uppnås på någon delyta efter 8 överfarter och endast på yta C efter 32 överfarter.

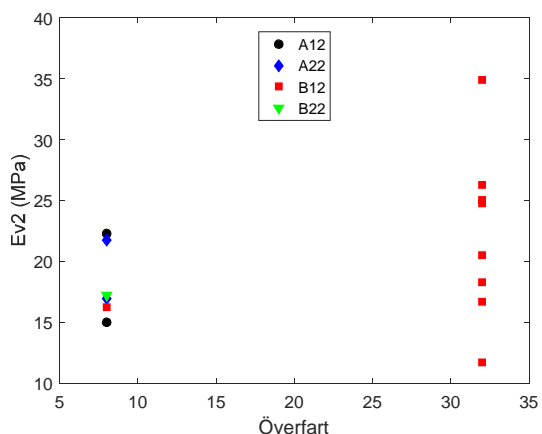
Kvoten mellan modulerna för andra och första belastningscykeln,  $E_{v2}/E_{v1}$ , kan ge ett mått på hur mycket packningspotential som återstår i materialet. Ju lägre denna kvot är, desto mindre packningspotential kvarstår och packningen anses således vara bättre. Denna tolkning är dock omstridd och bör göras med försiktighet eftersom den första belastningscykeln till stor del innebär initialisering av kontakt mellan plattan och jorden. Ojämnheter i underlaget får därför en stor inverkan. Detta gäller särskilt vid grovkorniga material. I dessa försök var den största stenstorleken i samma storleksordning som plattans diameter vilket gör att osäkerheten i kvoten blir stor. Eftersom  $E_{v2}/E_{v1}$  är en vanligt redovisat parameter visas den dock här (Figur 34). Kvoten sjunker något mellan

8 och 32 överfarter för de flesta ytor som förväntat men jämförelse mellan de olika ytorna är osäker på grund av ovan nämnda anledningar.



**Figur 34. Medelvärde av kvoten  $E_{v2}/E_{v1}$  för krossmaterial: A11 (30 cm, 0/150 mm, AFC), B11 (50 cm, 0/150 mm, AFC), B13 (50 cm, 0/250 mm, AFC), C11 (100 cm, 0/150 mm, AFC) och C21 (100 cm, 0/150 mm, 28 Hz).**

Plattbelastningsförsök på moränytorna kunde, efter 8 överfarter, inte utföras längs hela delytorna eftersom ytorna var så pass lösa att mothållet i form av en traktorgrävare skulle förstöra dessa. Försök gjordes därför endast i moränytornas ytterkanter. Efter 32 överfarter var dock packningen avslutat och traktorgrävaren kunde därför förflyttas längs hela ytorna. Försöken gjordes på yta B12 (50 cm, AFC). Figur 35 visar  $E_{v2}$ -modul uppmätt på moränytorna. Resultaten visar på stor spridning och mycket låga styvhetsvärden, beroende på det höga fukttinnehållet, vilket bekräftar att detta material är mycket olämpligt att användas som bankmaterial.



**Figur 35. Kompressionsmodul  $E_{v2}$  för morän.**

## 5.6 Integrerade välmätningar

### 5.6.1 Terrass

Compactometervärde (CMV) uppmätt under packning av terrassen visas i Tabell 5, där CMV-data för dubbelhopp har uteslutits. Cirka hälften av CMV-värdena ligger i intervallet 25-50 med något fler värden över detta intervall än under. Det är svårt att dra slutsatser om absolut styvhet i terrassen utifrån CMV. Dock kan värdena sägas återspegla en mätlig styvhet, i enlighet med

plattbelastningsförsöken, och de kan dessutom användas för att bedöma relativ styvhet och spridning. Denna spridning är stor, vilket också observerats i plattbelastningsförsök och bekräftar en varierande styvhet över terrassen. Alla CMV-mätningar redovisas i Bilaga F.

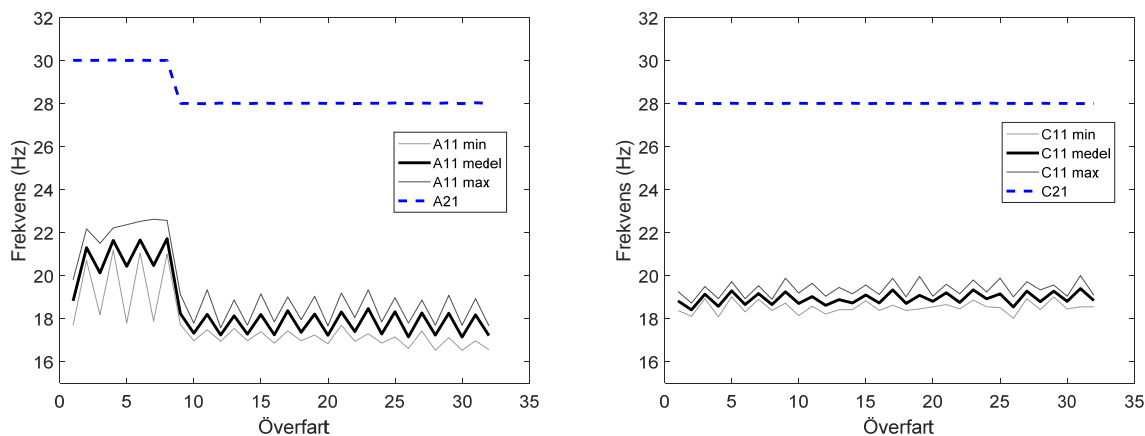
**Tabell 5. Compactometervärde på terrass.**

Provyta	CMV 0-25	CMV 25-50	CMV 50-75	CMV 75-100
A	18%	45%	35%	2%
B	19%	59%	20%	1%
C	30%	45%	22%	4%

### 5.6.2 Överyta

I detta avsnitt presenteras utvalda mätningar från vältens packmätare och övriga instrument som registrerar maskinparametrar. Alla mätningar visas i Bilaga K. I figurerna nedan jämförs delytorna i par med och utan frekvensstyrning. Det taggiga utseendet på kurvorna beror på att de integrerade vältmätningarna påverkas något av om vältens framför framåt (udda överfarter) eller bakåt (jämma överfarter). Vid hög amplitud sammanfaller excenterns rotationsriktning med valsens rotationsriktning när välten körs framåt. Amplituden förändras genom att byta rotationsriktning och vid låg amplitud sammanfaller därför excenterns och valsens rotationsriktningar vid körning bakåt. När rotationerna sammanfaller fås ett något större motstånd från underlaget mot valsen, vilket tolkas av välten som en högre styvhet och därför påverkar både den automatiska frekvensjusteringen och uppmätta parametrar.

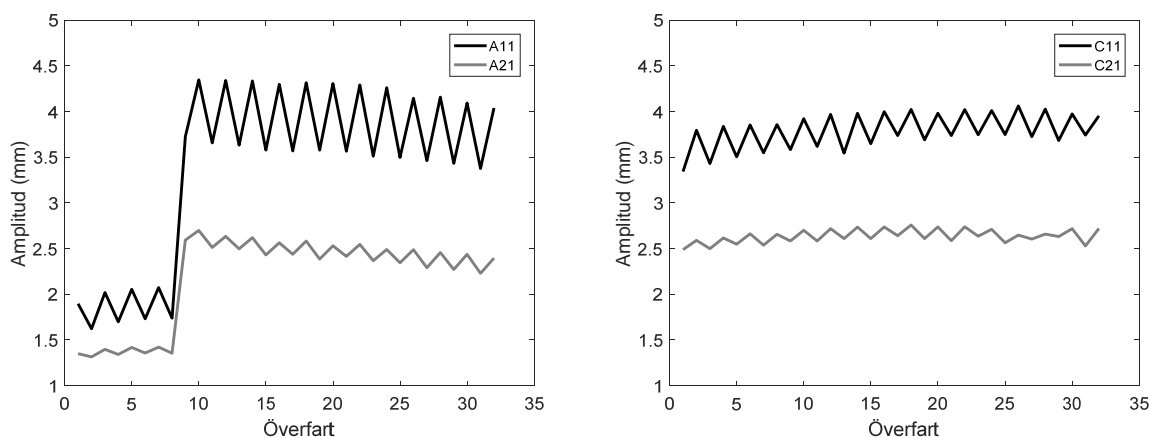
Figur 36 visar vibrationsfrekvensen för delytorna A11/A21 (30 cm, 0/150 mm) och C11/C21 (100 cm, 0/150 mm). På yta A användes låg amplitud i de 8 första överfarterna och därefter hög amplitud. Alla övriga ytor packades enbart med hög amplitud. Vid konventionell packning är den fasta frekvensen 28 Hz med hög amplitud och 30 Hz med låg amplitud. Vid frekvensstyrning varierar frekvensen så att den är något högre än resonansfrekvensen, vilken i sin tur är påtagligt lägre än standardfrekvensen. Resonansfrekvensen påverkas av styvheten i underlaget vid den aktuella töjningsnivån. På yta A11 ger frekvensstyrningen cirka 21 Hz vid låg amplitud och 17-18 Hz vid hög amplitud. Eftersom den lägsta arbetsfrekvensen för välten är 17 Hz antyder detta att resonansfrekvensen vid hög amplitud på yta A är något under arbetsområdet. Orsaken till att frekvensen är lägre vid högre amplitud är att töjningen i underlaget blir större och att jordmaterialet då, på grund av dess icke-linjäritet, får en betydligt lägre styvhet (sekantmodul).



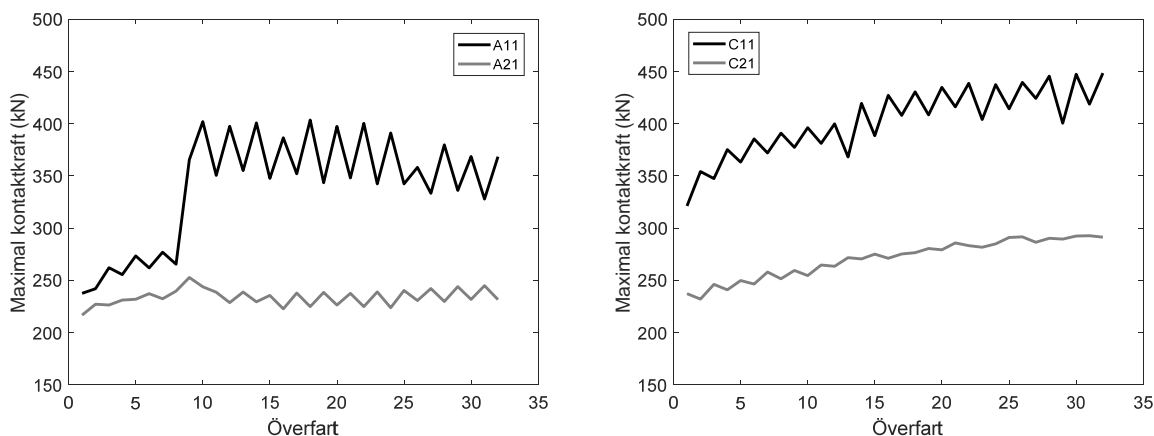
**Figur 36. Frekvens, A11/A21 (30 cm, 0/150 mm) och C11/C21 (100 cm, 0/150 mm).**

På yta C11 ger frekvensstyrningen cirka 19 Hz, dvs. något högre än A11. Övriga ytor ger cirka 18 Hz för B11 och B13 (50 cm) samt 19 Hz för C13 (100 cm), Bilaga K. Det betyder att frekvensen blir högre ju större lagertjockleken är, vilket beror på att krossmaterialet är styvare än undergrunden och att en större del av det material som påverkar resonansfrekvensen således består av krossmaterial. För moränytorna ger frekvensstyrningen 17-19 Hz på A12 (30 cm) vid låg amplitud och 17 Hz vid hög amplitud för både A12 och B12 (50 cm). En viktigt iakttagande är att frekvensen inte ökar nämnvärt med antal överfarter på någon yta. Eftersom styvheten ökar i bankmaterialet vid packning skulle det förväntas att detta återspeglas i resonansfrekvensen, som till största del beror på styvhet. Det innebär att resonansfrekvensen påverkas avsevärt av styvheten i undergrunden, vilket beror på packmätarens stora mätdjup och den begränsade tjockleken av bankmaterialet. Det är viktigt att skilja på packningsdjupet, dvs. den lagertjocklek som välten kan packa effektivt, och mätdjupet, dvs. det djup till vilket jordens egenskaper ger påverkan på mätvärden. Rinehart & Mooney (2009) fann att mätdjupet för två betydligt mindre vältar (31,5 och 42,4 kg/cm linjelast) hade ett mätdjup mellan 0,9 och 1,2 m. Välten som användes i detta projekt var betydligt större (65 kg/cm linjelast) och torde ge ett betydligt större mätdjup. Dock är det inte resonans i det skikt som packas som är avgörande, utan en maximal förstärkning av vibrationerna. Det är därför inte av betydelse om resonansen främst sker i bankmaterialet eller i undergrunden så länge maximal töjning uppnås i banken.

Figur 37 visar amplituden med och utan frekvensstyrning för ytorna A11/A21 (30 cm, 0/150 mm) och C11/C21 (100 cm, 0/150 mm). I varje överfart visas medelvärdet för hela överfarten över delytan. Fast frekvens ger en amplitud på ca 1,3 mm vid låg amplitudinställning och 2,5 mm vid hög. Frekvensstyrning ger en låg amplitud på mellan 1,5 och 2 mm och en hög amplitud på cirka 3,5 mm till 4,5 mm. Det uppenbart att amplituden är påtagligt högre med frekvensstyrning trots att frekvensen är betydligt lägre. Eftersom centrifugalkraften från excentermassan är proportionell mot kvadraten på frekvensen innebär det att högre amplitud åstadkoms vid en mycket lägre centrifugalkraft. Detta beror på att valsen svänger optimalt i fas med underlaget (fasvinkeln vid resonans är 90°) och resonanseffekten då förstärker vibrationerna. Vid en högre frekvens svänger valsen och banken i motfas, vilket gör att de motverkar varandras rörelser, vilket förbrukar en stor del av packningsenergin. Detta bekräftas av den maximala kontaktkraften, Figur 38, som beräknas utifrån uppmätta vältparametrar. Parametern relaterar till den maximala kraften i en belastningscykel och det presenterade värdet nedan består av genomsnittet av den maximala kontaktkraften över hela respektive överfart. Trots att valsens centrifugalkraft är högre vid fast (hög) frekvens blir kontaktkraften lägre. Medan amplituden är relativt konstant ökar kontaktkraften med antal överfarter på grund av den ökade styvheten i ytan. Figurerna visar också att frekvensstyrningen får störst inverkan vid hög amplitudinställning.

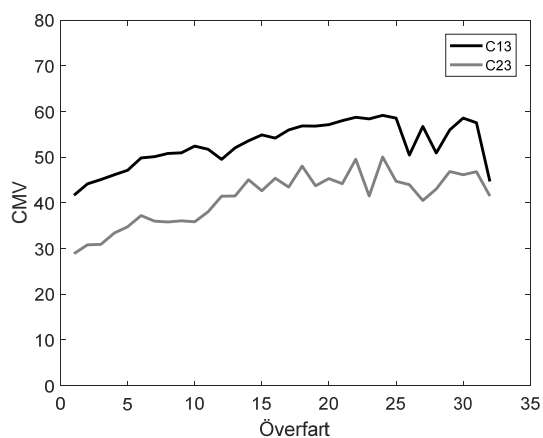
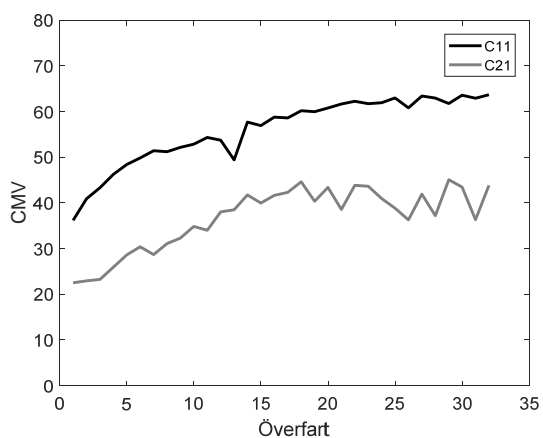


**Figur 37. Förskjutningsamplitud, A11/A21 (30 cm, 0/150 mm) och C11/C21 (100 cm, 0/150 mm).**

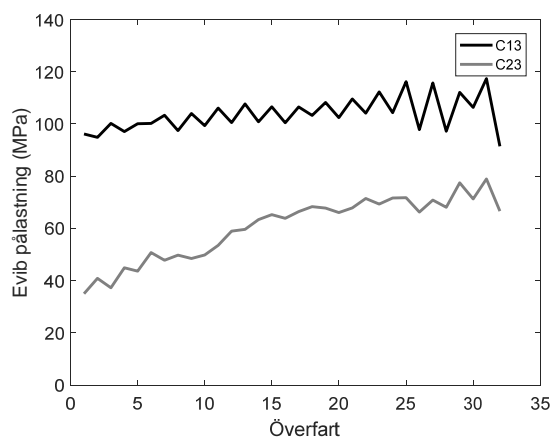
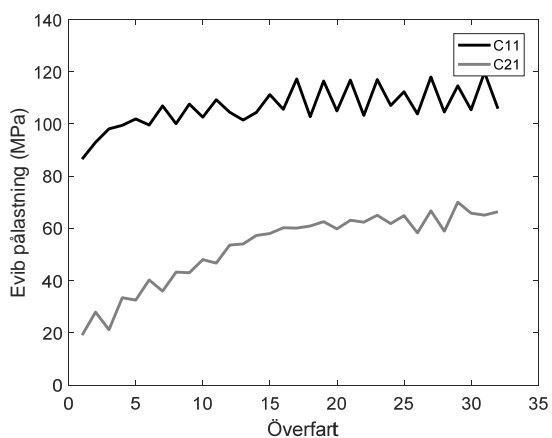


**Figur 38. Maximal kontaktkraft, A11/A21 (30 cm, 0/150 mm) och C11/C21 (100 cm, 0/150 mm).**

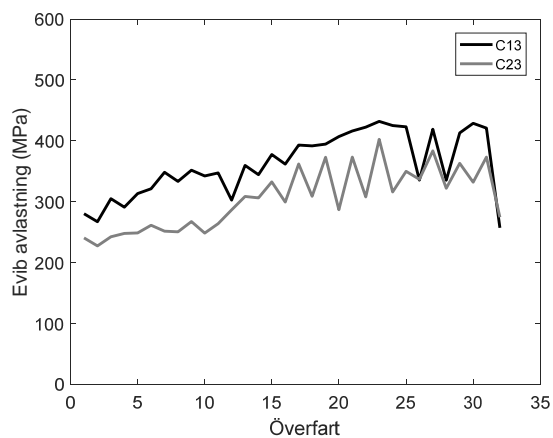
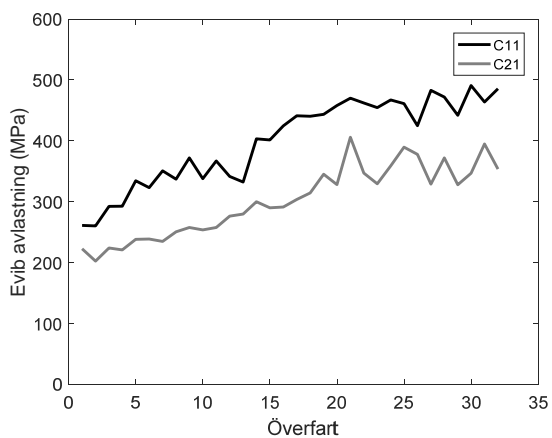
Compactometervärdet ger ett visst mått på styvheten i underlaget, men beror delvis på amplitud och andra parametrar, vilket gör det opålitligt för absoluta jämförelser. Dock kan de relativa CMV-värdena jämföras för att få en uppfattning av styvhetstillväxt. I dessa försök, där ett relativt tunt skikt är placerad direkt på undergrunden, fås påverkan från den underliggande moränen på de dynamiska mätningarna och således på packmätarvärdet. Därför redovisas här endast de ytorna med störst lagertjocklek (C). Alla mätningar presenteras i Bilaga K. Figur 39 visar genomsnittligt CMV i varje överfart för delytorna C11/C21 (0/150 mm) och C13/C23 (0/250 mm). Värdet ökar med ökande antal överfarter men avstannar något efter 20-25 överfarter, vilket tyder på att styvheten då inte längre ökar nämnvärt. Frekvensstyrningen ger betydligt högre CMV, även om jämförelse skall göras med försiktighet på grund av de skilda amplituderna. Evib ger en något mer sofistikerad bedömning av styvheten då det baseras på beräkning av valsens belastningskurva. Figur 40 presenterar medelvärdet av Evib för pålastningscykeln och Figur 41 för avlastningscykeln. Både dessa visar på ett liknande beteende som för CMV.



**Figur 39. Compactometervärde i C11/C21 (0/150 mm) och C13/C23 (0/250 mm), svart: AFC, grå: 28 Hz.**

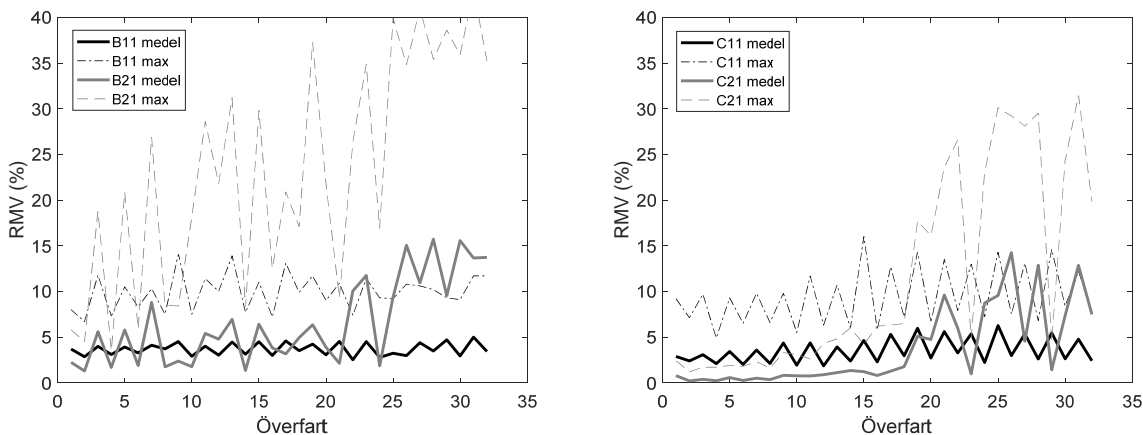


**Figur 40. Evib i pålastningscykeln, C11/C21 (0/150 mm) och C13/C23 (0/250 mm), svart: AFC, grå: 28 Hz.**



**Figur 41. Evib i avlastningscykeln, C11/C21 (0/150 mm) och C13/C23 (0/250 mm), svart: AFC, grå: 28 Hz.**

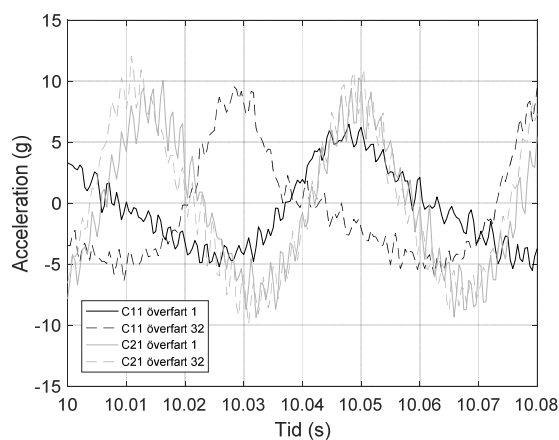
Parametern RMV (Resonance Meter Value) beräknas genom att ta kvoten mellan den uppmätta valsaccelerationen vid halva exciteringsfrekvensen och valsaccelerationen vid exciteringsfrekvensen. Förekomst av vibrationer vid halva frekvensen är ett tecken på att dubbelhopp förekommer. Ju större denna kvot är, desto mer kraftigt dubbelhopp upplever välten. Detta bör undvikas eftersom det påverkar både välten och packningen negativt och kan detekteras genom storleken på RMV-värdet. Figur 42 visar RMV för B11/B21 (50 cm, 0/150 mm) och C11/C21 (100 cm, 0/150 mm). Vid konventionell packning med fast frekvens finns viss antydning till dubbelhopp tidigt i packningsförloppet för lagertjockleken 50 cm, men inte för 100 cm, och efter cirka 20 överarter fås en tydlig ökning av RMV i båda figurerna. Observera att detta sammanfaller med avtagande styvhetstillväxt i packmätarvärdena ovan. Med frekvensstyrning, däremot, fås ingen tydlig ökning av RMV med antalet överarter. Värdet ligger dock på några procent under hela packningsförloppet, något högre än det initiala värdet för fast frekvens, vilket dock sannolikt inte beror på faktiskt dubbelhopp utan på frekvensstyrningen i sig. Sammantaget visar mätningarna att dubbelhopp kan undvikas genom att använda frekvensstyrning, vilket beror på den lägre frekvensen eftersom dubbelhopp uppstår vid hög styvhet och hög frekvens.



**Figur 42. RMV för B11/B21 (50 cm, 0/150 mm) och C11/C21 (100 cm, 0/150 mm), svart: AFC, grå: 28 Hz.**

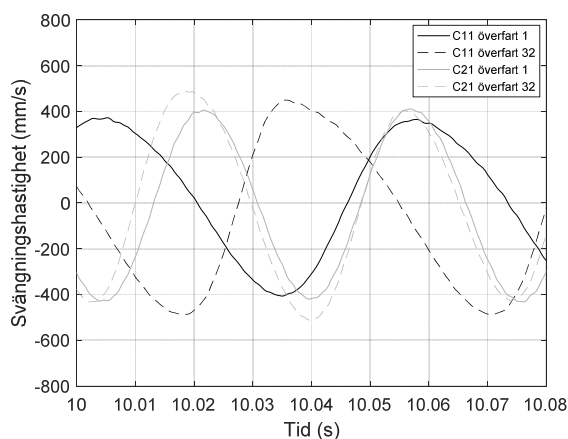
### 5.7 Accelerometermätningar

Acceleration mättes med en accelerometer som monterades på valsen och mätte kontinuerligt i varje överfart. Liksom för de integrerade vältmätningarna visas utvalda resultat här i par av deltytor, med och utan frekvensstyrning. Alla resultat presenteras i Bilaga L. Figur 43 visar ett exempel på 0,08 s av uppmätta accelerationssignaler för deltyorna C11 (AFC) och C21 (28 Hz) vid överfart nr 1 respektive 32. Den lägre grundfrekvensen vid frekvensstyrning syns genom en större tidsåtgång för varje cykel. Det taggiga utseendet beror på förekomst av högre frekvenser än grundtonen. Dessa förekommer i högre grad vid konventionell packning vilket sannolikt beror på det mindre skonsamma packningsarbetet. Accelerationen vid fast frekvens är större än vid frekvensstyrning.



**Figur 43. Exempel på tidssignal för acceleration.**

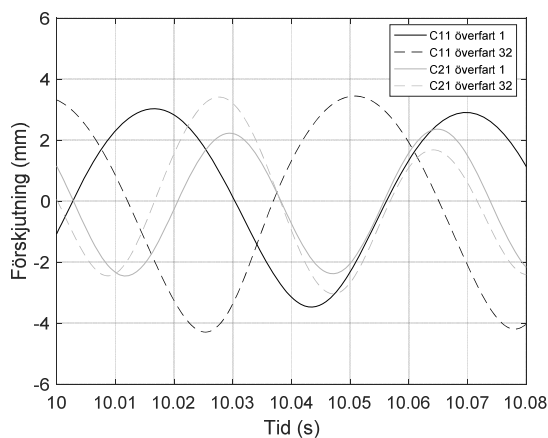
Genom att integrera accelerationssignalen fås svängningshastigheten. Denna visas Figur 44 och påverkas i betydligt mindre grad av högre frekvenser. Amplituden av svängningshastigheten är likvärdig för de två packningsprocedurerna.



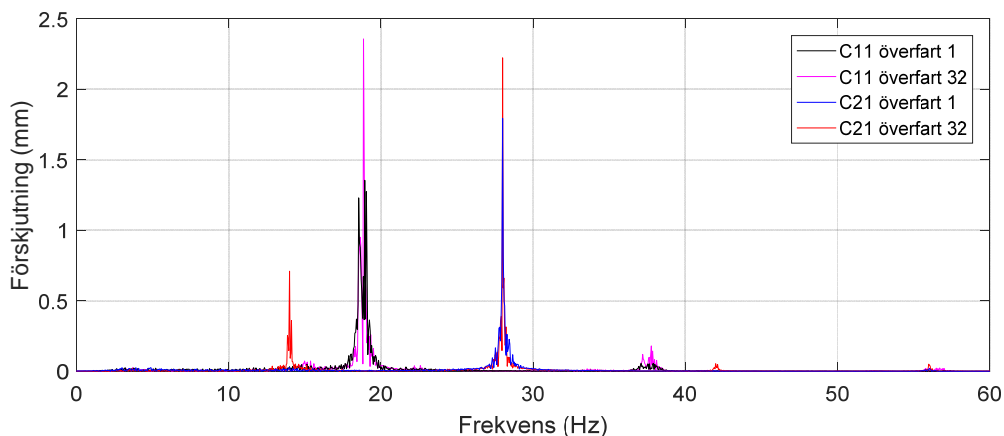
**Figur 44. Exempel på tidssignal för svängningshastighet.**

När tidssignalerna för svängningshastighet integreras fås förskjutningen, vilken presenteras i Figur 45. Förskjutningsamplitud, dvs. maximalvärdet av respektive kurva, är det som vanligtvis benämns endast amplitud. Denna är högre med frekvensstyrning än vid fast frekvens, vilket har diskuterats i avsnitt 5.6.2. Figur 46 visar frekvensspektra för hela tidssignalerna i överfart 1 och 32 på delytorna C11 (AFC) och C21 (28 Hz). Grundfrekvensen är 28 Hz vid fast frekvens och cirka 19 Hz med frekvensstyrning. Alla spektra visar en liten inverkan av övertoner. Med frekvensstyrning är toppen runt grundfrekvensen bredare vid första överfarten, vilket beror på att initiala variationer ger större variationer i den automatiskt justerade frekvensen, medan homogenisering av styvheten längs ytan minskar frekvensvariationen till överfart 32. Konventionell packning ger en tydlig signal vid den fasta grundfrekvensen 28 Hz. I överfart 32 syns dock en betydande bidrag vid halva grundfrekvensen, 14 Hz, vilket beror på dubbelhopp, som i sin tur orsakas av högre styvhet i underlaget. Detta förekommer endast vid ett högre antal överfarter. Parametern RMV, som presenterades i avsnitt 5.6.2, är kvoten av spektralvärdet vid halva grundfrekvensen och det vid grundfrekvensen.



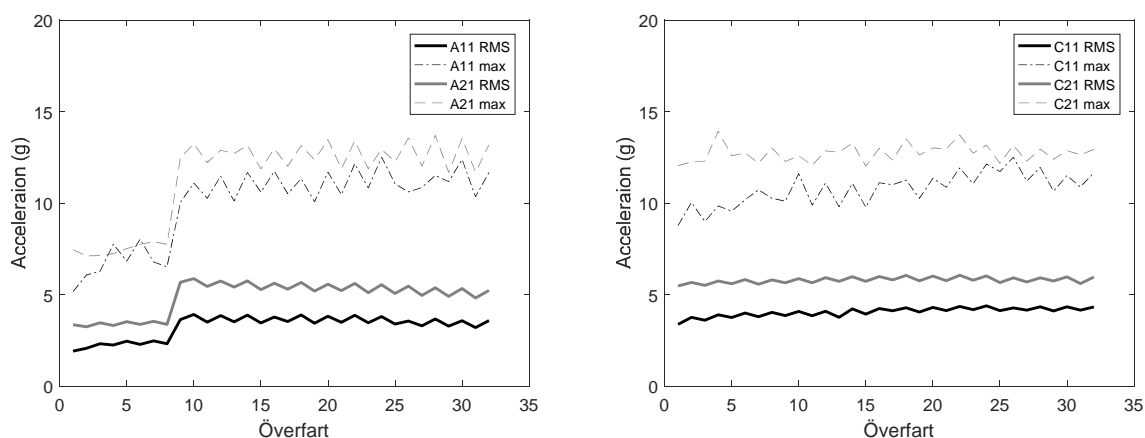


**Figur 45. Exempel på tidssignal för förskjutning.**



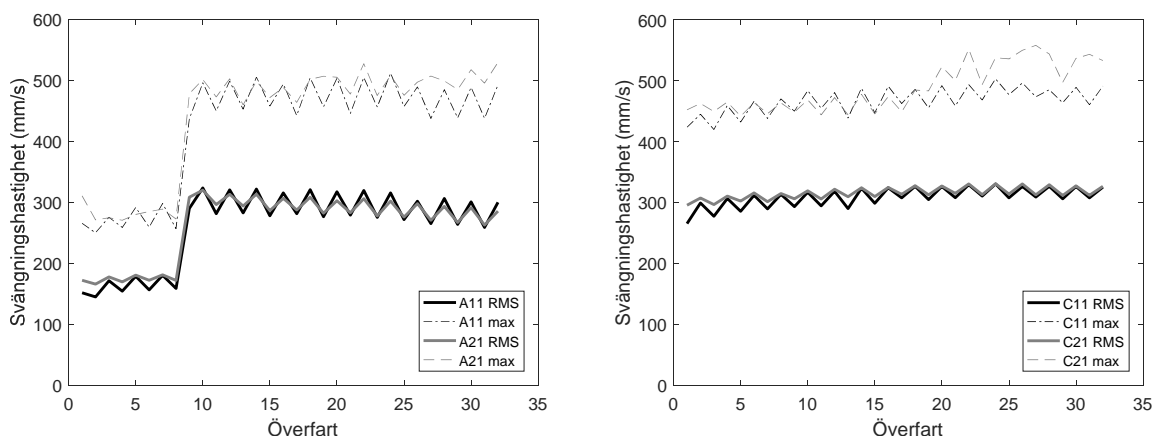
**Figur 46. Exempel på frekvensspektra, C11 (AFC) och C21 (28 Hz).**

Vid jämförelse av valsaccelerationen vid olika material, packningsförfaranden och överfarter finns olika sätt att representera accelerationsamplituden som ett värde för en hel överfart. Ett alternativ är att redovisa signalens maxvärde, vilket ger en korrekt mått på accelerationen men som kan påverkas av enskilda spikar och områden med högre acceleration. Ett bättre relativt mått att jämföra kan då vara RMS-värdet (Root Mean Square) som beräknas som en form av genomsnitt av accelerationsnivån över hela signalen (överfarten). Både maxvärde och RMS-värde visas för A11/A21 (30 cm) och C11/C21 (100 cm) i Figur 47. Accelerationen blir högre vid fast frekvens och inspektion av accelerationsamplituden för alla delytor (Bilaga L) visar att den inte varierar med lagertjocklek eller materialfraktion. Inte heller ser någon nämnvärd förändring med antalet överfarter. Dock är accelerationen lägre då morän använts som bankmaterial. Att accelerationen blir större vid konventionell packning beror på den högre frekvensen och den större genererade centrifugalkraften i valse. Amplitudinställningen får, som förväntat, stor inverkan på accelerationen, vilket kan ses på ytorna A11/A21 där de första 8 överfarterna packades med låg och de övriga med hög amplitud.



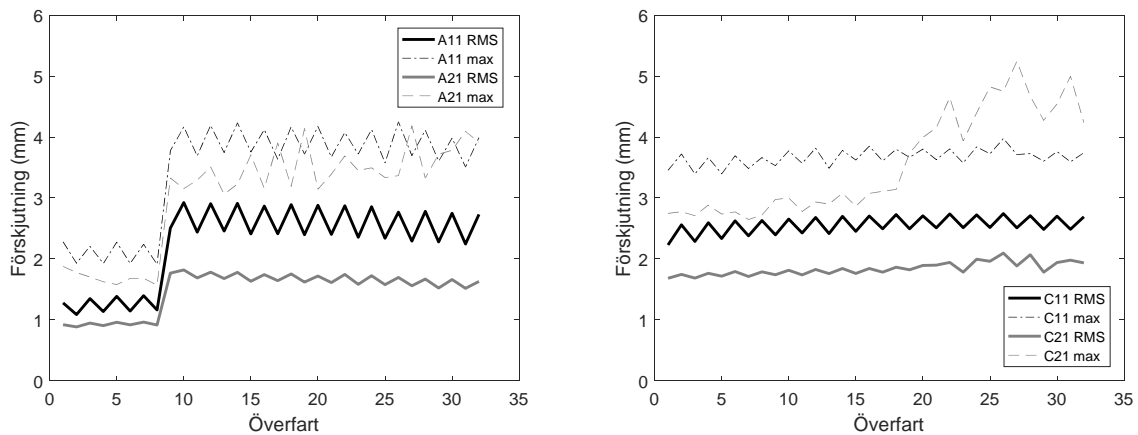
**Figur 47. Valsacceleration för A11/A21 (30 cm) och C11/C21 (100 cm), RMS- och maxvärden, svart: AFC, grå: fast frekvens.**

Svängningshastigheten, som beräknas genom integrering av accelerationssignalen, visas i Figur 48 som RMS-värde och maxvärde för varje överfart. Liksom för accelerationen visar alla figurer i Bilaga L att svängningshastigheten på krossmaterialet inte påverkas av lagertjocklek eller materialfraktion. Dessutom är den nästan identisk med och utan frekvensstyrning. För morän är den dock lägre och minskar också med frekvensstyrning. Vid låg amplitud är svängningshastighetsamplitudens maxvärde på valsen cirka 300 mm/s och vid hög amplitud 500 mm/s. Efter cirka 18 överfarter kan dubbelhopp urskiljas i maxvärdet för fast frekvens men inte med frekvensstyrning medan RMS-värdet inte påverkas.



**Figur 48. Valsens svängningshastighet för A11/A21 (30 cm) och C11/C21 (100 cm), RMS- och maxvärden, svart: AFC, grå: fast frekvens.**

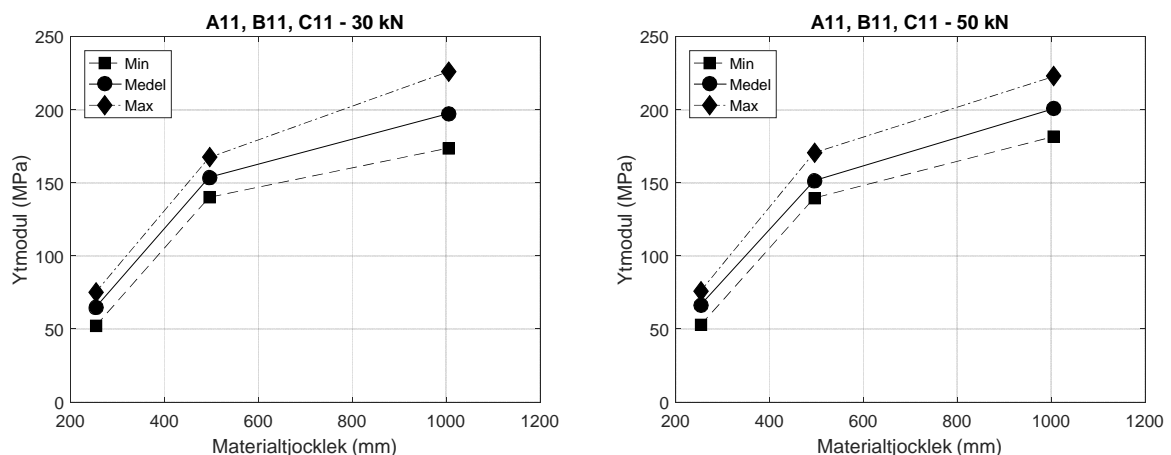
Valsens förskjutningsamplitud visas i Figur 49 för delytor A11/A21 (30 cm) och C11/C21 (100 cm). Återigen är RMS-värdet konstant för de olika krossytorna och lägre på moränytorna. Dubbelhopp kan observeras tydligt i maxvärdet efter 18 överfarter, men syns inte i RMS-värdet. I de överfarter där dubbelhopp inte förekommer överensstämmer maxvärdet med amplituden som registreras av den integrerade packmätaren (Figur 37). Dock sammanfaller de inte vid dubbelhopp. Det beror på att packmätaren enbart beräknar amplituden vid grundfrekvensen och inte tar hänsyn till andra frekvenser. Vid dubbelhopp finns ett signifikant bidrag från halva grundfrekvensen som påverkar accelerometermätningarna (Figur 46).



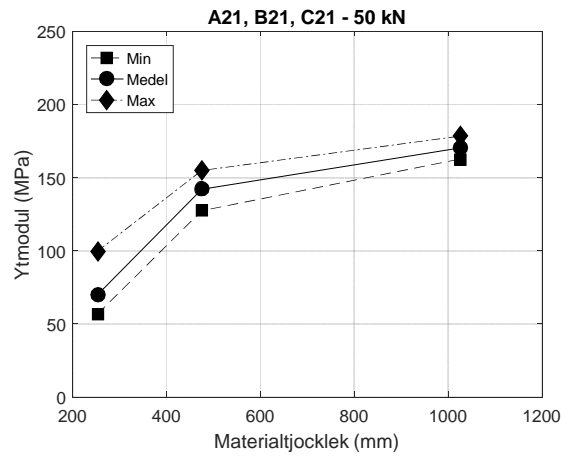
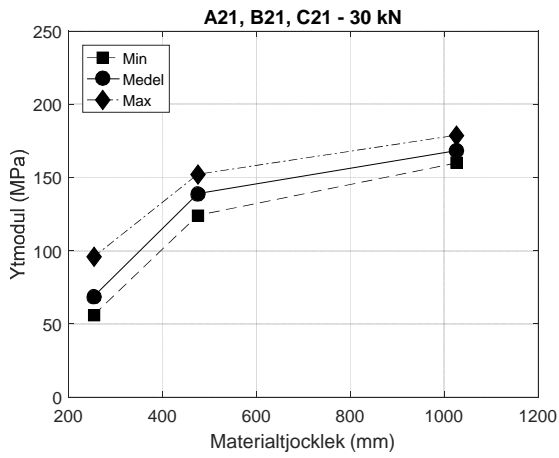
**Figur 49. Valsens förskjutningsamplitud för A11/A21 (30 cm) och C11/C21 (100 cm), RMS- och maxvärden, svart: AFC, grå: fast frekvens.**

### 5.8 Fallviktsapparat

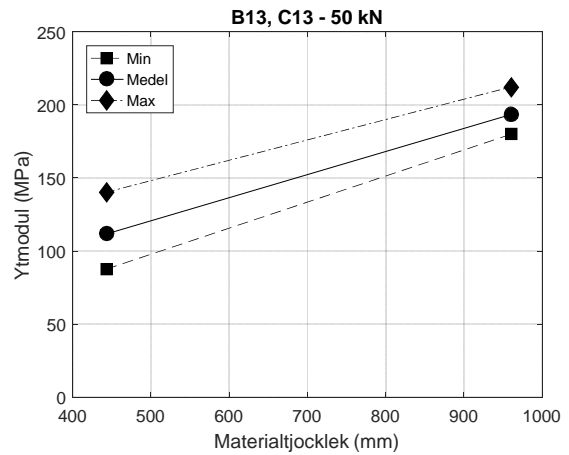
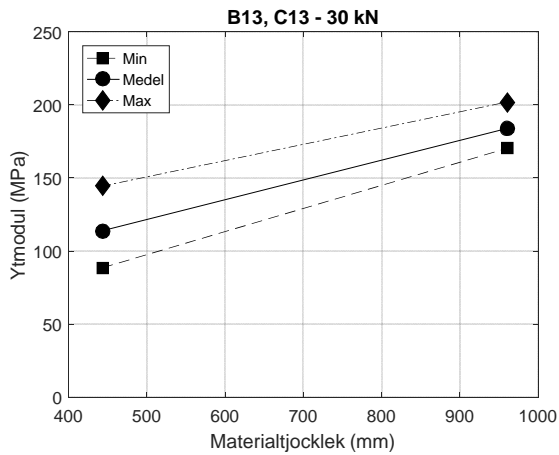
Tung fallviktsmätning utfördes på alla delar, vilket ger ett antal moduler beroende på deflektionen orsakad av en fallvikt som släpps på överytan. I detta avsnitt presenteras mätningar med både 30 kN och 50 kN belastning. Den mest representativa modulen är ytmodulen som beskriver deflektionen i belastningscentrum och som ger ett mått på styvheten i hela konstruktionen. Deflektionen mäts också i givare på olika avstånd från centrum och den resulterande medelmodulen anses vara en ett slags medelvärde från ytan ner till djupet som är lika med det radiella givaravståndet. På varje delyta utfördes fyra försök. För ytmodulen presenteras medelvärde samt min- och maxvärde av dessa mätningar och för medelmodulen, där enskilda starkt avvikande resultat uppmättes, visas medianvärdet. Ytmodulen visas för 0/150 mm krossmaterial i Figur 50 med frekvensstyrning och i Figur 51 utan frekvensstyrning. För 0/250 mm visas ytmodulen i Figur 52 med frekvensstyrning och i Figur 53 utan frekvensstyrning. Mätningarna på moräntorna är svårtolkade och har utelämnats ur detta avsnitt. Alla mätningar visas dock i Bilaga M.



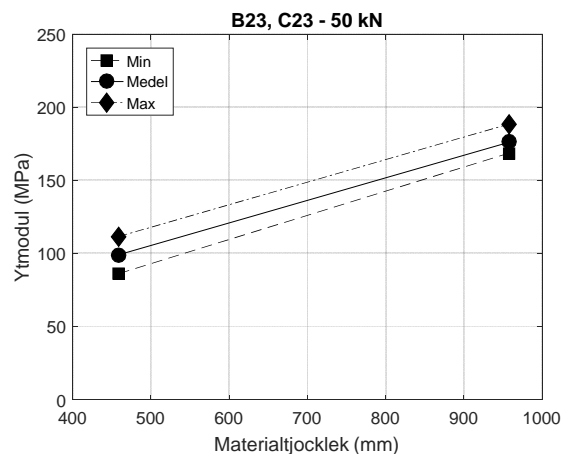
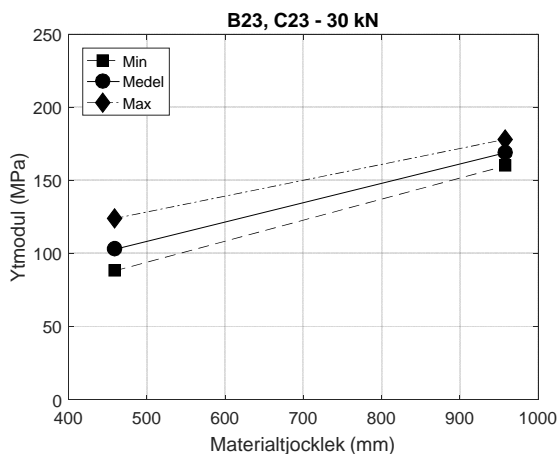
**Figur 50. Ytmodul för 0/150 mm med frekvensstyrning.**



**Figur 51. Ytmodul för 0/150 mm utan frekvensstyrning.**



**Figur 52. Ytmodul för 0/250 med frekvensstyrning.**



**Figur 53. Ytmodul för 0/250 utan frekvensstyrning.**

Jämförelse mellan ytor med och utan frekvensstyrning visar medelvärden enligt Tabell 6 (morän utelämnas med återfinns i Bilaga M). De deltor som packats med frekvensstyrning uppvisar generellt en högre ytmodul än de ytor som packats med fast frekvens, vilket tyder på att styvheten är högre i

bankmaterialet och således bättre packat. Vidare är ytmodulen högre vid större lagertjocklek (Figur 50 till Figur 53) som dock delvis kan härledas till mindre inflytande från terrassens styvhet. Tabell 7 sammanställer inverkan av bankmaterial och visar att betydligt högre styvhet uppnås på 0/150 mm än på 0/250 mm. Det finns dock risk att misstänka att utläggningsprocessen kan vara en del av orsaken till detta på ytorna med 50 cm lagertjocklek pga. något mer byggtrafik på 0/150. För yta C (100 cm), däremot, har byggtrafiken varit mer omfattande på 0/250 mm än på 0/150 mm och den slutgiltiga ytmodulen är trots det högre på det sistnämnda materialet. Det tyder på att bättre packning uppnås i materialet med mindre stenstorlek. På moränytorna blir styvheten mycket låg och visar på ej fullgod packning.

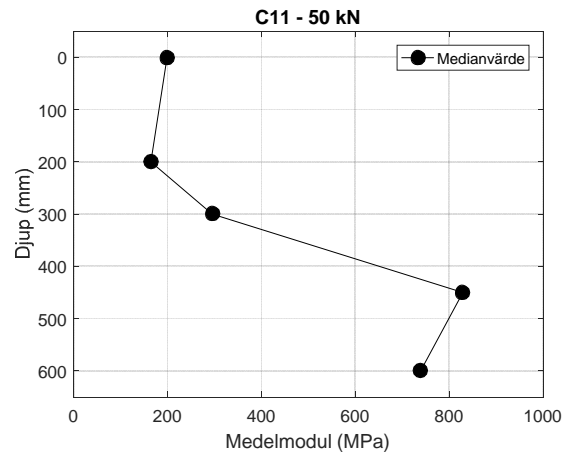
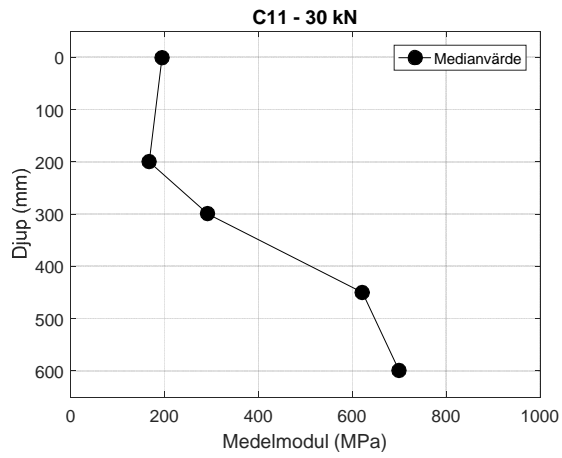
**Tabell 6. Fallviktsapparat, inverkan av frekvensstyrning.**

Lagertjocklek, material	Ytmodul med frekvensstyrning (MPa)	Ytmodul med fast frekvens (MPa)
30 cm, 0/150 mm	66	69
50 cm, 0/150 mm	153	141
50 cm, 0/250 mm	113	101
100 cm, 0/150 mm	199	169
100 cm, 0/250 mm	189	172
<b>Medel:</b>	<b>144</b>	<b>131</b>

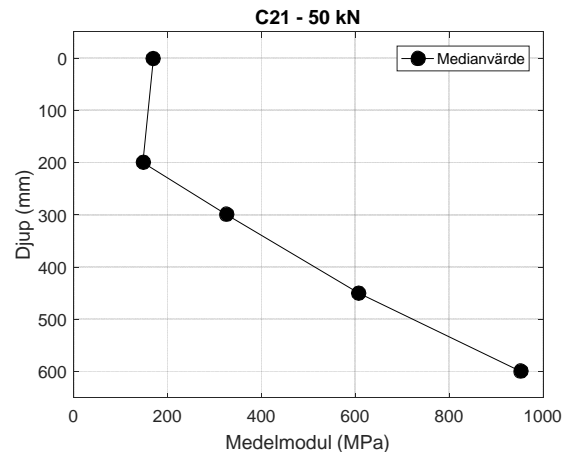
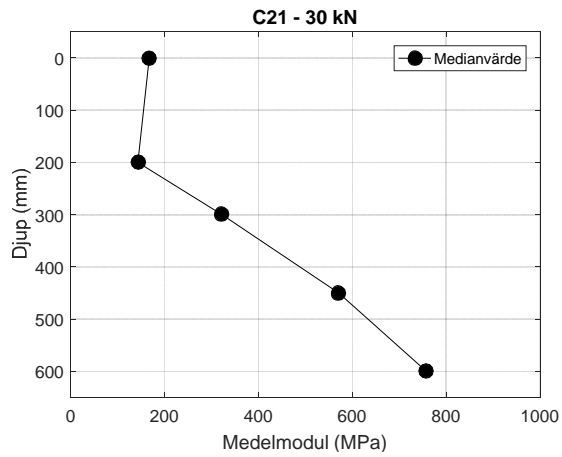
**Tabell 7. Fallviktsapparat, inverkan av bankmaterial.**

Lagertjocklek, frekvens	Ytmodul 0/150 mm (MPa)	Ytmodul 0/250 mm (MPa)	Ytmodul morän (MPa)
50 cm, variabel	153	113	28
50 cm, fast	141	101	25
100 cm, variabel	199	189	
100 cm, fast	169	172	
<b>Medel:</b>	<b>165</b>	<b>144</b>	<b>26</b>

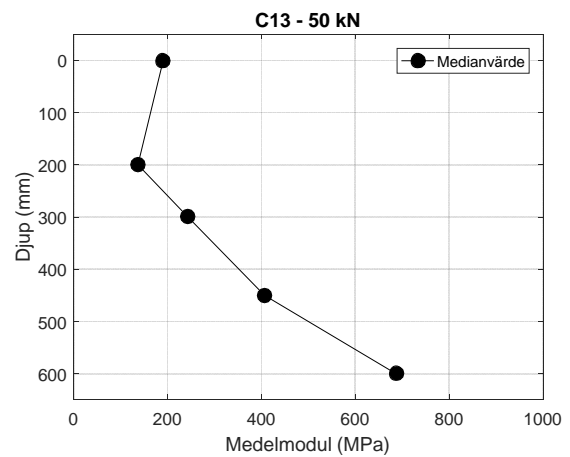
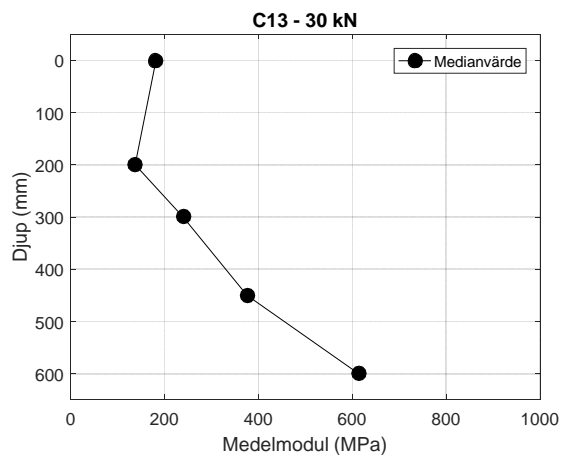
Vid analys av medelmodulen är yta C (100 cm) mest lämplig då inverkan från undergrunden har minst påverkan och modulen i spannet 0-600 mm anses relativt representativa för bankmaterialet. Medelmodulens variation med djupet visas i Figur 54 för delyta C11 (0/150 mm, AFC), i Figur 55 för C21 (0/150 mm, 28 Hz), i Figur 56 för C13 (0/250 mm, AFC) och i Figur 57 för C23 (0/250 mm, 28 Hz). Jämförelse av C11 och C21 visar att C11 har något högre styvhet i övre delen av skiktet medan C21 har högre modul i nedre delen av skiktet. Detsamma gäller för C13 i jämförelse med C23, vilket bekräftar att frekvensstyrningen ger bättre packning i ytan medan fast frekvens ger bättre djupverkan som även observerats i resultaten från mätningarna med EMU-spolar. Dock är det större spridning i de djupare modulerna mellan 30 kN och 50 kN belastning vilket antyder att tillförlitligheten av dessa är lägre. Vid observation av yta B (Bilaga M) kan ses att den djupaste modulen är i samma storleksordning, eller högre, vid frekvensstyrning jämfört med fast frekvens då lagertjockleken är 50 cm. Således är det endast djup större än 50 cm där en högre frekvens har positiv inverkan. Jämförelse av C11 och C13 visar en högre styvhet för C11 i hela skiktet. Med undantag för enskilda punkter vid 50 kN belastning är trenden densamma för C13 i jämförelse med C23, vilket indikerar att materialfraktionen 0/150 mm har en högre styvhet än 0/250 m, både vid ytan och längre ner i skiktet.



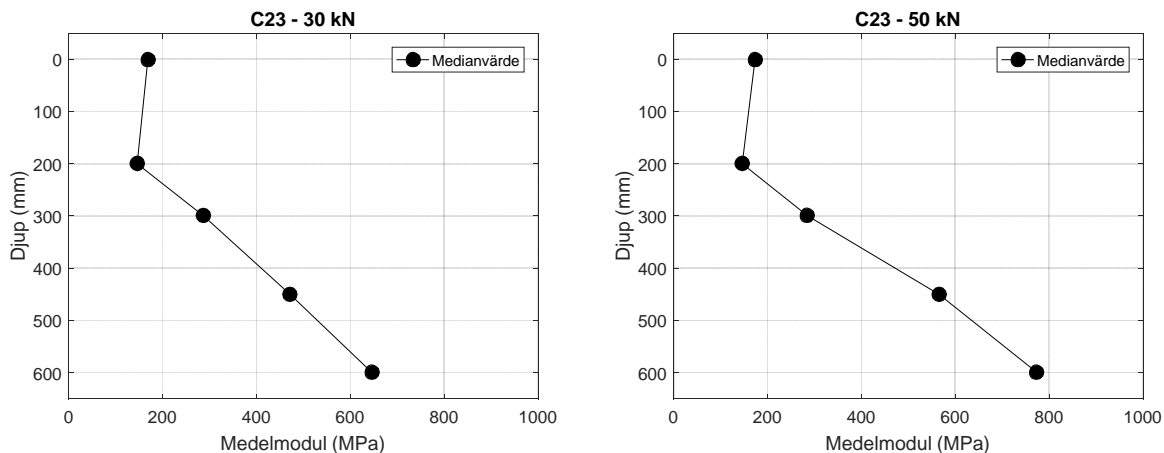
**Figur 54. Medelmodul C11 (0/150 mm, AFC).**



**Figur 55. Medelmodul C21 (0/150 mm, 28 Hz).**



**Figur 56. Medelmodul C13 (0/250 mm, AFC).**

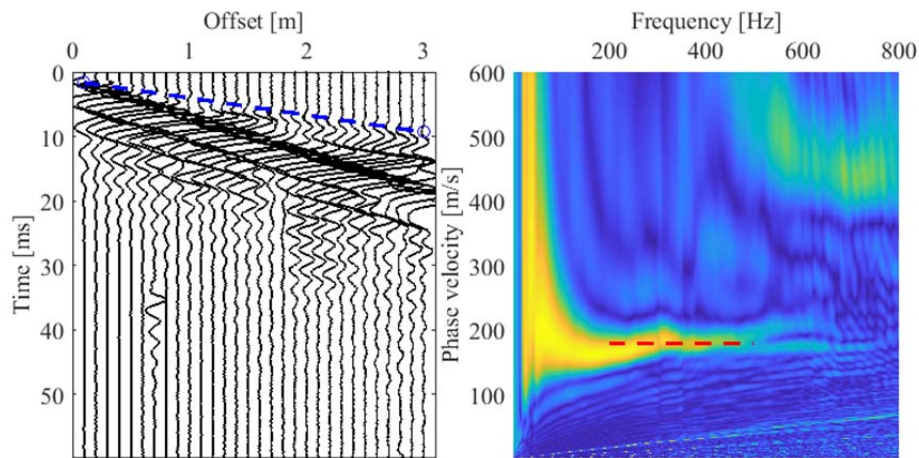


**Figur 57. Medelmodul C23 (0/250 mm, 28 Hz).**

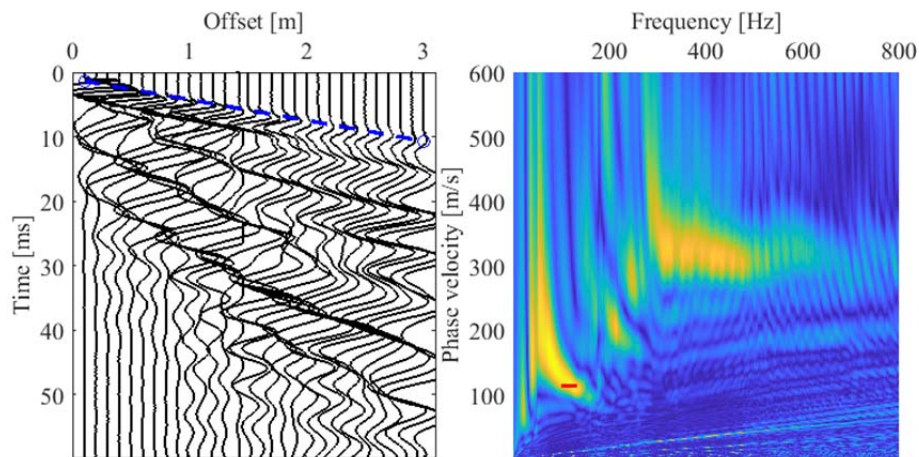
### 5.9 Seismiska mätningar

Seismiska mätningar av våghastigheter utfördes efter 8 och 32 överfarter av Peab Asfalt. Resultaten presenteras i detalj i rapporten i Bilaga N och sammanfattas i detta avsnitt. Mätningar gjordes av dels P-vågshastigheten från av den direkta vägen mellan källa och givare och dels av ytvågshastigheten med hjälp av ytvågsseismik. Dessvärre var det inte möjligt att mäta ytvågshastigheten på ytorna A och B (30 cm respektive 50 cm lagertjocklek) för de våglängder som motsvarade ytornas tjocklek. De våglängder som uppmättes var betydligt större vilket betyder att vägen till stor del propagerade genom undergrunden och de uppmätta egenskaperna främst härrör från terrassens egenskaper. För yta C (100 cm) var det dock möjligt att mäta ytvågshastighet för aktuella våglängder i förhållande till lagertjockleken.

Figur 1 visar ett exempel på en mätning där resultaten är lätta att utläsa (C11, 8 överfarter). Den vänstra figuren visar bestämningen av P-vågshastighet och den högra visar dispersionsdiagram där den bedömda ytvågshastigheten (fashastighet) markeras med en streckad linje. En mer svårbedömd mätning visas i Figur 59 (C13, 8 överfarter) men där ändå en ytvågshastighet har kunnat uppskattas. De flesta mätlinjer på yta C ger dispersionsdiagram som i Figur 58 medan vissa ger mer svårtolkade resultat som i Figur 59. De senare kan vara resultatet av inhomogeniteter som förekommer pga. den grova materialfraktionen.



**Figur 58. P-vågshastighet (vänster) och ytvågshastighet (höger) för C11 (0/150 mm, AFC), 8 överfarter, mätlinje 1.**



**Figur 59. P-vågshastighet (vänster) och ytvågshastighet (höger) för C13 (0/250 mm, AFC), 8 överfarter, mätlinje 1.**

På yta C, där både ytvågsmätningar och P-vågsmätningar gav analyserbara resultat kan en uppskattning av Poissons tal (tvärkontraktionstalet),  $\nu$ , göras utifrån kvoten mellan dessa. Den uppmätta direkta vägen ger P-vågshastigheten,  $c_P$ , och ytvågsmätningen ger ytvågshastigheten (Rayleighvågshastigheten),  $c_R$ . Ytvågshastigheten och skjuvvågshastigheten,  $c_S$ , förhåller sig till varandra enligt Ekvation (1).

$$\frac{c_R}{c_S} = \frac{0,87+1,12\nu}{1+\nu} \quad (1)$$

Skjuvvågshastigheten förhåller sig till P-vågshastigheten enligt Ekvation (2).

$$\frac{c_P}{c_S} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad (2)$$

Genom att kombinera ovanstående ekvationer fås förhållandet mellan ytvågshastighet, P-vågshastighet och Poissons tal enligt Ekvation (3).



$$\frac{c_P}{c_R} = \frac{1+\nu}{0,87+1,12\nu} \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad (3)$$

Med Ekvation (3) kan Poissons tal beräknas utifrån kvoten mellan P-vågshastighet och ytvågshastighet. Med Poissons tal kan också uppmätta våghastigheter omvandlas till deformationsmoduler för små töjningar ("dynamisk modul"). Skjuvmodulen beräknas enligt Ekvation (4), där  $\rho$  är materialets densitet.

$$G = \rho c_S^2 \quad (4)$$

Densiteten måste antas för det packade materialet men får mycket liten inverkan på den beräknade modulen i förhållande till övriga osäkerheter. Ett antagande på  $\rho = 2100 \text{ kg/m}^3$  har använts i nedanstående beräkningar. Elasticitetsmodulen beräknas med Ekvation (5).

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (5)$$

Slutligen fås, genom att kombinera Ekvationer (1), (4) och (5), ett uttryck för E-modulen beroende på ytvågshastigheten och Poissons tal enligt Ekvation (6).

$$E = 2\rho \left( c_R \frac{1+\nu}{0,87+1,12\nu} \right)^2 (1 + \nu) \quad (6)$$

Tabell 8 visar beräkning av Poissons tal för varje mätning på yta C enligt beräkningsmetodikerna ovan. Vidare presenteras också E-modulen som erhålls genom ytvågshastigheten och det beräknade Poissons tal. Det bör påpekas att vissa mätningar är osäkra samt att beräkningarna bygger på att materialet är isotropt, vilket inte är fallet efter packning, vilket ger en relativt osäker bedömning av både Poissons tal och E-modul. Den stora variationen styrker denna osäkerhet och, för att osäkerheten i beräkningsmetodikerna inte ska påverka jämförelsen mellan olika ytor, används medelvärdet av Poissons tal,  $\nu = 0,33$ , för vidare analys.

**Tabell 8. Beräkning av Poissons tal och E-modul från ytvåg.**

Överfart, delyta, mätlinje	$c_p$ (m/s)	$c_r$ (m/s)	$c_p/c_r$	Poissons tal	E (MPa) från ytvåg
8, C11, 1	378	179	2,11	0,33	205
8, C11, 1	378	176	2,15	0,33	200
8, C11, 2	355	170	2,09	0,32	185
8, C21, 1	353	175	2,02	0,30	193
8, C21, 2	325	158	2,06	0,31	159
8, C13, 1	312	114	2,74	0,41	89
8, C13, 1	318	115	2,77	0,41	90
8, C23, 1	287	104	2,76	0,41	74
32, C11, 1	453	223	2,03	0,31	314
32, C11, 2	311	177	1,76	0,20	182
32, C21, 1	446	229	1,95	0,28	325
32, C21, 2	399	190	2,10	0,32	231
32, C13, 1	333	149	2,23	0,35	145
32, C23, 1	313	150	2,09	0,32	144
Medel 8 ÖF:				0,35	
Medel 32 ÖF:				0,30	
Medel:				<b>0,33</b>	

Resultat från de seismiska försöken sammanfattas i Tabell 9, där både P-vågsmätningar och ytvågsmätningar har analyserats på yta C och endast P-vågsmätningar på ytor A och B. För varje delyta har upp till tre mätningar gjorts i upp till två mätlinjer. Moränytorna (A12, A22, B12, B22) uppvisar orealistisk höga värden med tanke på det lösa materialet, vilket kan bero exempelvis på materialets höga fukttinhåll. Dessa resultat bedöms därför inte representativa för moränytornas styvhet. Genom att tillämpa medelvärdet av Poissons tal enligt Tabell 8 kan E-modulen uppskattas från P-vågshastigheten enligt Ekvation (7).

$$E = \rho c_p^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (7)$$

Den beräknade modulen redovisas i Tabell 9. Notera att E-modulen är proportionell mot kvadraten på våghastigheten, vilket innebär att små variationer i våghastighet kan ge stora variationer i modul.

**Tabell 9. Resultat från seismiska mätningar.**

Delyta	Ytvågshastighet/fashastighet (m/s)								P-vågshastighet (m/s)								E (MPa) från P-våg	
	8 Överfarter				32 Överfarter				8 Överfarter				32 Överfarter				8 ÖF	32 ÖF
	1	2	3	Medel	1	2	3	Medel	1	2	3	Medel	1	2	3	Medel		
A11									320	334		327	295			295	152	124
A12													408			408		236
A21									329	309		319	330			330	144	155
A22													405			405		233
B11									331	352		342	292			292	166	121
B12									380			380	374			374	205	199
B13									325	281		303	325			325	130	150
B21									349	350		350	307			307	173	134
B22									390			390	349			349	216	173
B23									268	290		279	300			300	111	128
C11	177	174	170	174	223	177		200	378	378	355	370	453	311		382	195	207
C13	107	107		107	149			149	312	318		315	333			333	141	157
C21	158	175		167	228	190		209	325	353		339	446	399		423	163	253
C23	103			103	150			150	287			287	313			313	117	139

Tabell 10 visar inverkan av frekvensstyrning på den beräknade E-modulen från ytvågen respektive P-vågen. Frekvensstyrningen ger högre beräknad styvhet efter 8 överfarter medan resultaten visar motsatsen efter 32 överfarter. Dock är det stora variationer i modulerna och resultaten ska tolkas med försiktighet pga. svårigheten i att utföra seismiska försök på mycket grovkornigt material, särskilt i tunna skikt på lös undergrund. Som jämförelse kan resultaten från ytorna C11 och C21 (100 cm, 0/150 mm) ställas mot plattbelastningsförsök på samma ytor (Figur 33) som visar ett motsatt förhållande med relativt liten spridning. Inverkan av lagertjocklek på E-modul (från P-våg) presenteras i Tabell 11. Efter 8 överfarter är modulen i samma storleksordning på alla tjocklekar, dock något högre på yta C. Efter 32 överfarter har styvheten minskat något på yta A och B och ökat betydligt på yta C. Tabell 12 visar att den uppmätta styvheten är påtagligt högre på den mindre materialfraktionen, 0/150 mm, är på det grövre materialet, 0/250 mm. Notera dock den stora skillnaden mellan E-modul beräknad från ytvåg respektive P-våg, vilket ger en antydning om osäkerheterna av dessa mätningar.

**Tabell 10. Inverkan av frekvensstyrning på beräknad E-modul från seismiska mätningar.**

Våg, lagertjocklek, material	E-modul (MPa)			
	8 överfarter		32 överfarter	
	Frekvensstyrning	Fast frekvens	Frekvensstyrning	Fast frekvens
Ytvåg, 100 cm, 0/150	197	176	248	278
Ytvåg, 100 cm, 0/250	89	74	145	144
<b>Medel:</b>	<b>143</b>	<b>125</b>	<b>197</b>	<b>211</b>
P-våg, 30 cm, 0/150	152	144	124	155
P-våg, 50 cm, 0/150	166	173	121	134
P-våg, 50 cm, 0/250	130	111	150	128
P-våg, 100 cm, 0/150	195	163	207	253
P-våg, 100 cm, 0/250	141	117	157	139
<b>Medel:</b>	<b>157</b>	<b>142</b>	<b>152</b>	<b>162</b>

**Tabell 11. Inverkan av lagertjocklek på beräknad E-modul från seismiska mätningar.**

Material, frekvens	E-modul (MPa)					
	8 överfarter			32 överfarter		
	30 cm	50 cm	100 cm	30 cm	50 cm	100 cm
0/150, variabel	152	166	195	124	121	207
0/150, fast	144	173	163	155	134	253
0/250, variabel		130	141		150	157
0/250, fast		111	117		128	139
<b>Medel:</b>	<b>148</b>	<b>145</b>	<b>154</b>	<b>139</b>	<b>133</b>	<b>189</b>

**Tabell 12. Inverkan av materialfraktion på beräknad E-modul från seismiska mätningar.**

Våg, lagertjocklek, frekvens	E-modul (MPa)			
	8 överfarter		32 överfarter	
	0/150	0/250	0/150	0/250
Ytvåg, 100 cm, variabel	197	89	248	145
Ytvåg, 100 cm, fast	176	74	278	144
<b>Medel:</b>	<b>186</b>	<b>82</b>	<b>263</b>	<b>144</b>
P-våg, 50 cm, variabel	166	130	121	150
P-våg, 50 cm, fast	173	111	134	128
P-våg, 100 cm, variabel	195	141	207	157
P-våg, 100 cm, fast	163	117	253	139
<b>Medel:</b>	<b>174</b>	<b>125</b>	<b>179</b>	<b>144</b>

### 5.10 Jämförelse styvhetsmätningar

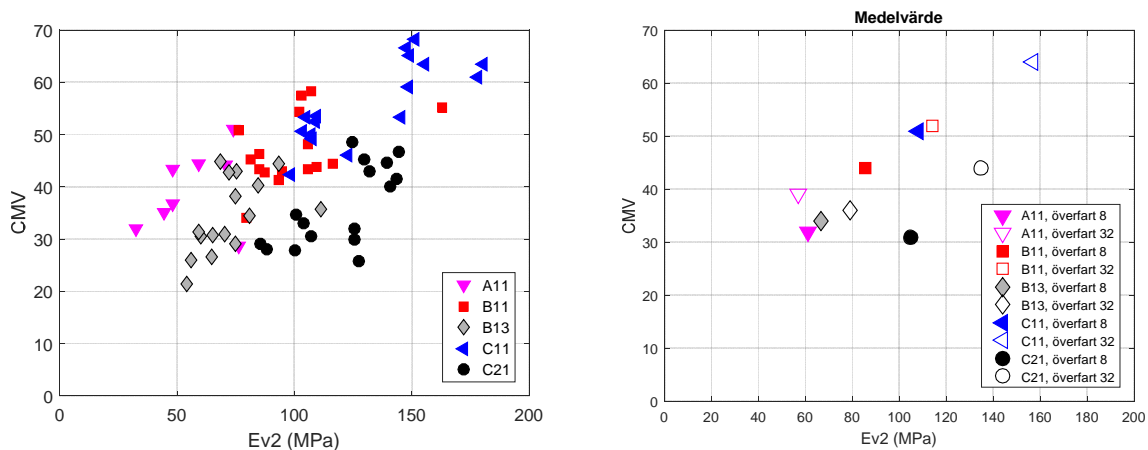
Ett antal olika mätmetoder som har tillämpats i försöken relaterar till styvheten av överytan. Dessa består av följande:

- Plattbelastningsförsök
- Integrerade vältmätningar:
  - Compactometervärde
  - Evib, pålastningsmodul
  - Evib, avlastningsmodul
- Tung fallvikt
- Seismiska försök:

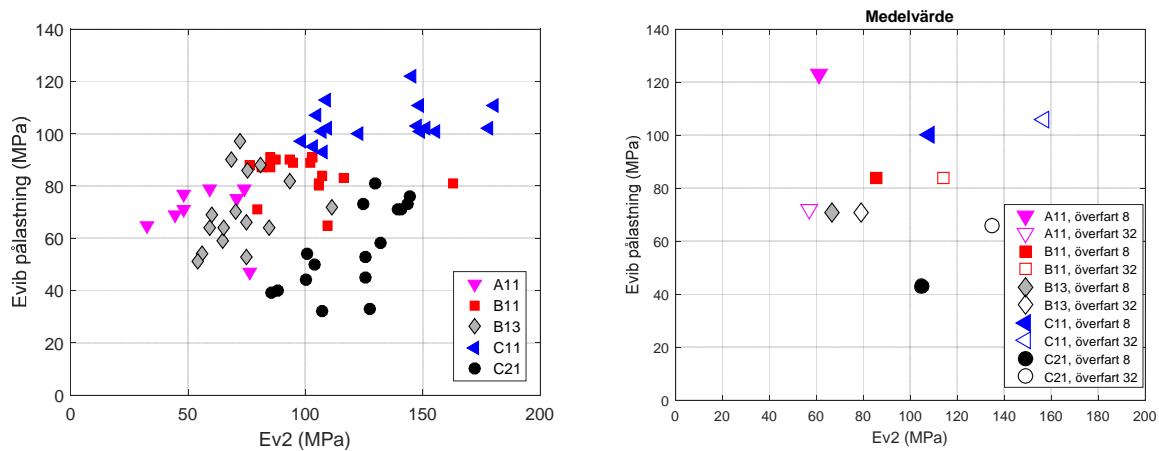
- Ytvågsmätning
- P-vågsmätning

I detta avsnitt jämförs resultat från dessa olika mätmetoder. Plattbelastningsförsök anses vara den mest pålitliga metoden eftersom den mäter den statiska styvheten direkt genom belastningsmodulen Ev2. Dock ger metoden relativt stor spridning pga. lokala variationer i styvhet och försöksförutsättningar, särskilt vid mycket grovkornigt material som i detta fall. De åtta försök som utfördes på varje delyta får anses minimum antal provpunkter för att få ett realistiskt mått på den genomsnittliga styvheten. De olika metoderna jämförs nedan med Ev2 från plattbelastningsförsök som referens.

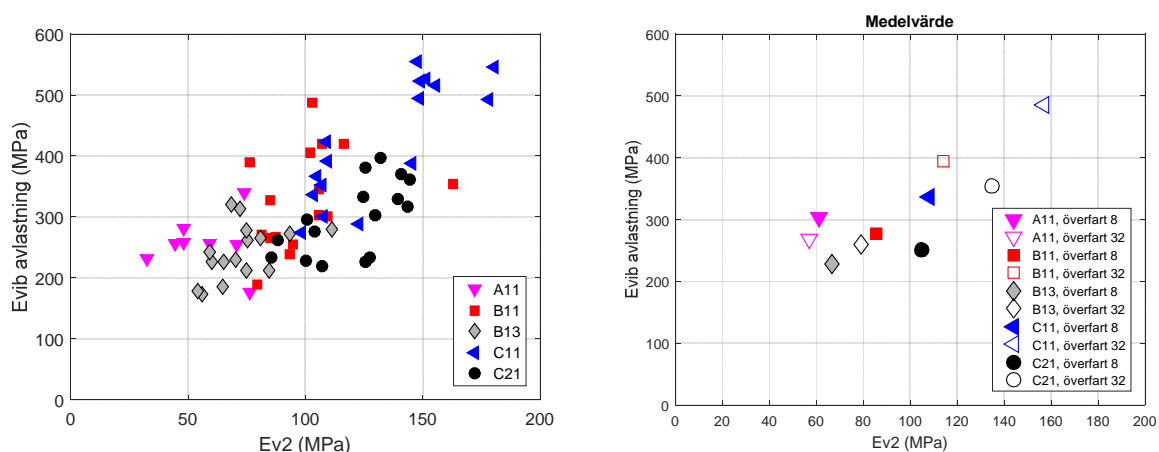
Alla packmätarvärden uppvisar skillnader mot plattbelastningsförsök som beror på att mätdjupet skiljer sig markant. Dock kan en relativt god korrelation erhållas för vissa av värdena. Figur 60 presenterar CMV i förhållande till Ev2. Den vänstra figuren visar CMV-värdet i överfarterna 8 och 32 då välden passerar respektive plattbelastningspunkt. I den högra figuren visas medelvärdet av CMV över hela respektive delyta mot medelvärdet av de åtta plattbelastningsförsöken. Motsvarande diagram visas i Figur 61 för Evib pålastningsmodul och i Figur 62 för Evib avlastningsmodul. Sämst korrelation fås för pålastningsmodulen. CMV ger en någorlunda god korrelation och avlastningsmodulen ger ett relativt bra samband. Dessa mätningar tyder alltså på att, av de integrerade välmätningarna, ger avlastningsmodulen det bästa måttet på materialets styvhet. CMV-värdet ger också tillräckligt goda resultat för att det ska kunna anses styvhetsberoende. Dock bör inte pålastningsmodulen användas för de resultat som presenteras i denna rapport. I alla integrerade välmätningar kan det observeras att C21 (28 Hz) ger lägre packmätarvärde än C11 och övriga delytor (AFC), vilket antyder att frekvensstyrningen, som förväntat, har en inverkan. Detta beror på skillnaden i frekvens och amplitud.



**Figur 60. Jämförelse av Ev2 och CMV. Vänster: alla mätningar, höger: medelvärde.**

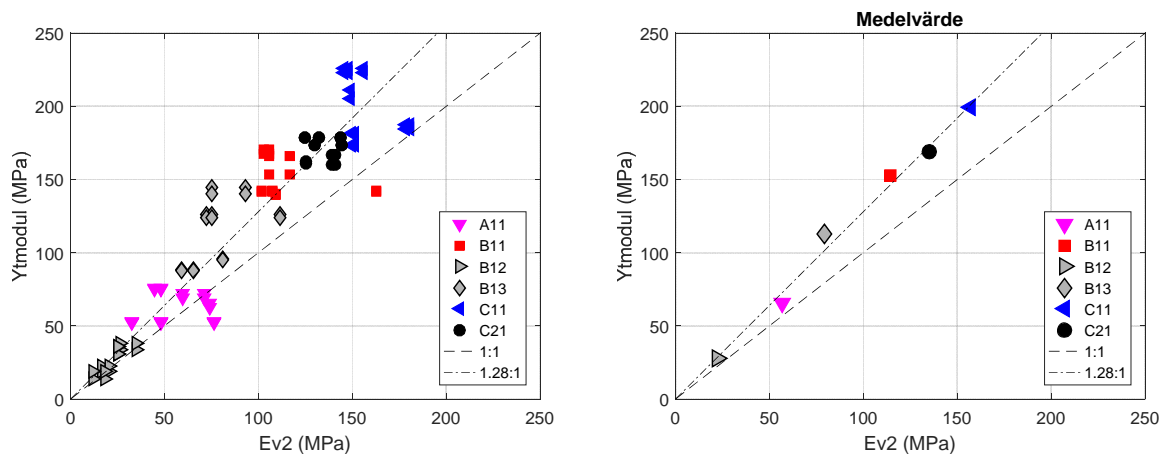


**Figur 61. Jämförelse av Ev2 och Evib pålastningsmodul. Vänster: alla mätningar, höger: medelvärde.**



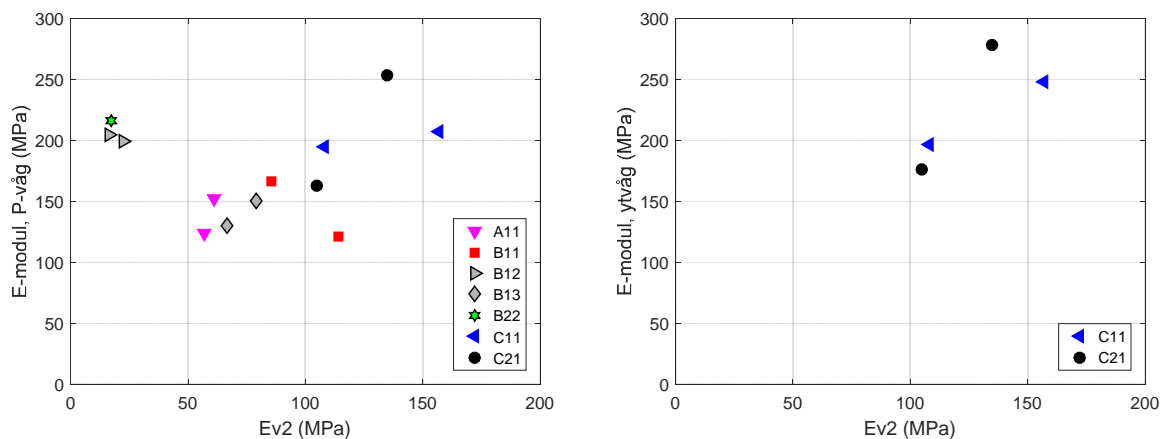
**Figur 62. Jämförelse av Ev2 och Evib avlastningsmodul. Vänster: alla mätningar, höger: medelvärde.**

Fallviktsförsök utfördes efter 32 överfarter och ytmodulen från dessa jämförs med plattbelastningsförsök efter 32 överfarter i Figur 63. Diagrammen visar en mycket god korrelation mellan Ev2 och ytmodul. Detsamma har funnits i andra studier, vilket har diskuterats av Vennapusa & White (2009). Detta stärker resultaten från båda dessa typer av försök. Dessutom är det mycket liten skillnad på Ev2 och ytmodulens absoluta värden, där fallviktsförsöken i snitt ger en modul som är 28 procent högre än Ev2.

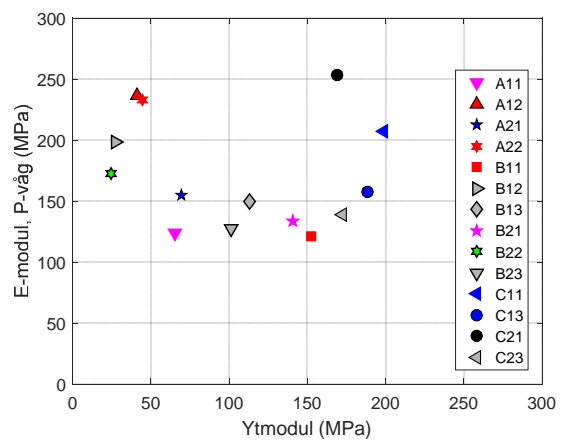


**Figur 63. Jämförelse av Ev2 och ytmodul från fallviktsförsök. Vänster: alla mätningar, höger: medelvärde.**

Jämförelse mellan Ev2 från plattbelastningsförsök och E-modul beräknad från seismiska försök visas i Figur 64 för 8 och 32 överfarter. Den vänstra figuren presenterar P-vågsmätningarna och den högra ytvågsmätningarna. Styvheten har beräknats som medelvärdet av alla mätningar i respektive delyta och överfart. Om mätningarna på moränytorna ( $Ev2 < 50$  MPa) bortses ifrån fås en någorlunda god korrelation. Eftersom fallviktsmätningarna korrelerar väl med plattbelastningsförsöken och dessa utfördes på alla delytor visas också E-modulen från P-vågsmätningarna efter 32 överfarter mot ytmodulen från fallviktsförsöken i Figur 65. Om man återigen bortser från moränytorna ( $ytmodul < 50$  MPa) finns det en korrelation. Denna är dock ej tillfredställande. Således föreligger en påtaglig osäkerhet i de seismiska mätningarna, vilket också har diskuterats i avsnitt 5.9. Sammantaget visar resultaten i detta avsnitt att de mest pålitliga styvhetsmätningarna är Ev2 från plattbelastningsförsök och ytmodul från tunga fallviktsförsök.



**Figur 64. Jämförelse av Ev2 och seismisk modul.**



**Figur 65. Jämförelse av ytmodul från fallviktsförsök och seismisk modul.**

## 6 Diskussion

En stor mängd mätningar har utförts, vilka sammanfattas i Tabell 2. I detta kapitel sammanvägs resultaten från dessa och deras betydelse diskuteras i relation till optimalt packningsförande, lagertjocklek, materiafraktion och antal överfarter. Ett antal omständigheter förelåg som orsakade svårigheter i tolkningen av mätresultat. Dessa var främst:

- Undergrundens höga siltinnehåll i kombination med mycket stora regnmängder som gav en låg och varierande styvhet av terrassen och som påverkade packningen och mätningarna på överytan pga. den tunna lagertjockleken.
- Ojämn mängd byggtrafik på olika delytor i samband med materialutläggning som resulterade i variationer i initiala förhållanden.
- Det höga siltinnehållet i den morän som användes som bankmaterial i kombination med stora regnmängder.

Den sistnämnda punkten gjorde att stora svårigheter förelåg för packningsförsök på de ytor som bestod av morän. Det berodde på att materialet var mycket svärpackat vilket gav stor jordundanträngning istället för packning. Detta påverkade också mätningarna som inte blev pålitliga. Orsaken var moränens höga finjordshalt, cirka 15-20 %, där merparten bestod av silt. Materialet blev således mycket fukt känsligt och de stora regnmängderna hade stor påverkan på packbarheten. Det kan konstateras att detta material är olämpligt för uppbyggnad av bank och denna rapport fokuserar på försöken med de material som är aktuella för bankuppbyggnad, dvs. de två krossmaterialen. Dessa kan analyseras, trots osäkerheterna, tack vare det stora antalet mätningar och slutsatser om inverkan av packningsparametrar kan dras med acceptabel tillförlitlighet.

Plattbelastningsförsök kvantifierade terrassens låga styvhet och den stora variationen, där variationen bekräftades av Compactometervärdet vid packning av terrassen. I flertalet mätpunkter understeg Ev2-modulen de 60 MPa som specificeras som den lägsta acceptabla styvheten av terrassen i krav för höghastighetsbanor (Trafikverket, 2016). Den låga styvheten ledde till betydande sättning av terrassen, vilket har visats i avsnitt 5.4. För den minsta lagertjockleken var terrassens sättning flera gånger större än bankmaterialets komprimering medan skillnaden minskade med ökande lagertjocklek. För den tjockaste ytan hade terrassen en viss inverkan.

De nominella materialtjocklekarna efter packning var 30 cm för yta A, 50 cm för yta B och 90 cm på yta C. Nivåmätning av terrassen och överytan visade att lagertjocklekarna för yta A och B var mycket nära de nominella medan yta C fick en slutgiltig tjocklek på cirka 100 cm. Avvikelsen berodde på svårigheten i att bedöma hur stor del av sättningspotentialen som mobiliserades från byggtrafiken.

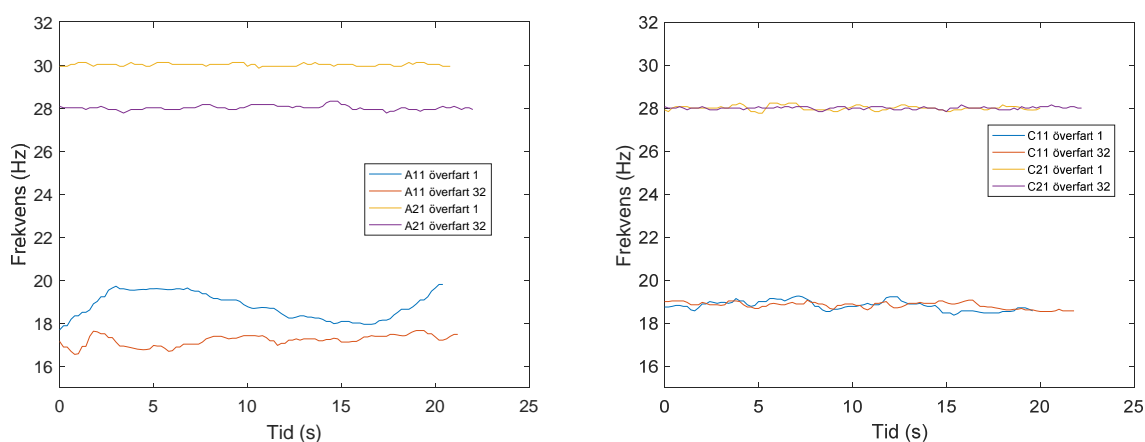
### 6.1 Dynamiska parametrar

I detta avsnitt diskuteras de dynamiska mätningar som registrerades på vältens vals kontinuerligt, förutom packmätarvärdena Evib och CMV, som tas upp i avsnitt 6.3. Försöken utfördes med två packningsmetoder:

- Konventionell packning med fast frekvens.
- En ny metod med automatisk frekvensstyrning som utnyttjar resonansförstärkning i underlaget.



Figur 66 visar exempel på hur frekvensen varierar i enskilda överfarter. Vid konventionell packning fås en fast frekvens på 28 Hz vid hög amplitud och 30 Hz vid låg amplitud. Med automatisk justering fås en mycket lägre frekvens som ligger nära resonans och som varierar under packningsförloppet. Exemplen nedan visar frekvensstyrning på den tunnaste ytan, vid hög amplitud, ger en frekvens som är mycket nära den lägsta arbetsfrekvensen, 17 Hz, vilket beror på terrassens låga styvhet. Vid låg amplitud är frekvensen något högre, vilket är ett resultat av den lägre töjningsnivån (avsnitt 5.6.2). Den lösa terrassen är sannolikt också orsaken till de större frekvensvariationerna på yta A (30 cm tjocklek) jämfört med yta C (100 cm tjocklek). Vidare visar resultaten att resonansfrekvensen ökar endast marginellt som resultat av packningen, vilket innebär att denna inte kan användas för kvantifiering av packning.



**Figur 66. Exempel på frekvensvariation i enskilda överfarter, 0/150 mm: A11 (30 cm, AFC), A21 (30 cm, fast frekvens), C11 (100 cm, AFC) och C21 (100 cm, fast frekvens).**

En betydelsefull observation är att valsens förskjutningsamplitud är påtagligt högre med frekvensstyrning, trots att frekvensen är mycket lägre. Eftersom centrifugalkraften är proportionell mot kvadraten av frekvensen innebär det att en betydligt högre amplitud fås med en mycket lägre centrifugalkraft. Det resulterar i en signifikant ökning av energieffektiviteten. Detsamma gäller kontaktkraften mellan valsens och underlaget, där en kraftig förstärkning fås vid resonans trots en lägre centrifugalkraft. Resultaten visar också att kontaktkraften ökar med ökande styvhet (packning) medan amplituden är relativt konstant.

Parametern RMV, som signalerar förekomst av dubbelhopp, visar ytterligare en fördel med frekvensstyrning. Dubbelhopp innebär att valsens inte har tillräcklig kontakt med underlaget. Detta påverkar packningen negativt och ökar kraftigt slitaget av vältens. Vid konventionell packning uppstår dubbelhopp mot slutet av packningsförloppet på de flesta ytor, vilket beror på hög frekvens och hög styvhet i underlaget. Med frekvensstyrning kan inget dubbelhopp observeras. Det är ett resultat av den lägre frekvensen och minskar betydligt risken för ineffektiv packning och onödigt maskinslitage. Detsamma har observerats i tidigare försök (Wersäll et al., 2017).

Mätningarna från den accelerometer som var monterad på valsens visar att accelerationen är högre vid fast (hög) frekvens än med automatisk (låg) frekvens medan svängningshastigheten är i samma storleksordning och förskjutningen är lägre. Den integrerade packmätaren visade samma inverkan av frekvens på förskjutningsamplituden, vilket har diskuterats ovan, men beräknar endast amplituden för grundfrekvensen. Accelerometermätningarna däremot tar hänsyn till alla frekvenser och därför också dubbelhopp. Dessa visar att dubbelhopp inte påverkar accelerationen eller svängningshastigheten

nämnvärt, medan förskjutningen uppvisar en kraftig förstärkning av amplituden. Förstärkningen ger dock inte upphov till någon förbättrad packning utan ökar endast maskinslitage och uppluckring.

## 6.2 Komprimering/sättning

Mätningarna av sättning gav stora variationer från punkt till punkt på grund av det mycket grovkorniga materialet men också på grund av andra aspekter, såsom terrassens stora och varierande sättningar. Den sistnämnda aspekten gjorde också att sättningarna på överytan inte avtog som de skulle gjort med en styv terrass och en påtaglig sättningstillväxt erhöles även i de sista överfarterna. Detta kan också ha påverkats av det låga sidomotståndet som var ett resultat av att packning skedde endast i ett vältstråk. Det var därför inte möjligt att få en korrelation mellan sättningarnas avtagande och packningsgraden. Genom sättningsmätningarna kunde variationerna i initial packning mellan de olika delytorna kvantifieras, vilket visade att skillnader i mängden byggttrafik hade gett en påtaglig skillnad. De stora variationerna, dels från punkt till punkt och dels mellan delytorna, ledde också till svårigheter i jämförelser i liten skala. Tack vare ett stort antal sättningspunkter, totalt 900 st på överytan, kunde dock jämförelse av medelvärden göras för olika parametrar. Resultaten visade följande:

- Skillnaden i de totala sättningarna med och utan frekvensstyrning var i praktiken försumbar vilket betyder att metoderna är likvärdiga om man ser till sättning av hela skiktet samt terrassen.
- Sättningarna blev som förväntat större vid större lagertjocklek vilket berodde på en större mängd komprimerbart material.
- Inverkan av materialfraktion, 0/150 mm eller 0/250 mm, var mycket liten.

Dessa mätningar visar alltså att sättningen på överytan var i princip oberoende av materialfraktion och packningsmetod. Dock säger de ingenting om hur komprimeringen varierar inom skiktet. De tar heller inte hänsyn till initial packning eller terrassens sättning, vilket gör att dessa mätningar bör tolkas med försiktighet. EMU-spolorna, däremot, ger komprimeringen inom skiktet och de olika styvhetsmätningarna ger en acceptanskontroll som relaterar till den färdiga produkten.

Med resultat från EMU-spolorna kan komprimeringsförloppet på olika djup analyseras och information fås även om materialuppluckring till följd av överpackning. Komprimeringen i hela skiktet kan också studeras mer tillförlitligt än med sättningsmätningarna eftersom inverkan från sättningar i terrassen elimineras. Störst total komprimering fås i B11 med tjockleken 50 cm och materialfraktionen 0/150 mm. Delyta B13 med samma tjocklek och materialfraktionen 0/250 uppvisade mindre komprimering trots att den hade lägre initial packning och således högre komprimeringspotential. Dock var den initiala packningen runt sektionerna för EMU-spolar relativt likvärdig (Figur 17). Den påtagligt större komprimeringen för B11 tyder ändå på att 0/150 mm är en mer lämplig materialfraktion.

Uppluckring kan observeras i varierande grad i flera delytor, vilket har diskuterats i avsnitt 5.3. Jämförelse mellan C11 och C21, med 100 cm lagertjocklek, visar att frekvensstyrningen ger mindre uppluckring än med fast frekvens, vilket är i linje med tidigare observationer. Det är därför sannolikt att uppluckringen är större i de delytor som packades med fast frekvens och inte instrumenterades med EMU-spolar (A21, B21 respektive B23) än motsvarande delytor som packades med frekvensstyrning (A11, B11 respektive B13). I delyta A11 (30 cm) fås påtaglig uppluckring som börjar redan efter 16 överfarter och det finns anledning att tro att denna är större för A21. Även i B11 (50 cm) fås en stor volymökning som börjar efter 24 överfarter och vilken troligtvis är större för B21. Viss uppluckring kan observeras i yta C21 men endast en försumbar sådan i C11, vilket visar en fördel med frekvensstyrning.

Inverkan av tjocklek är svår att jämföra mellan ytorna A (30 cm) och B (50 cm) eftersom den förstnämnda packades med låg amplitud de 8 första överfarterna och med hög amplitud den nästkommande 24 överfarterna medan ytorna B (50 cm) och C (100 cm) endast packades med hög amplitud. Dock antyder EMU-spolarerna att packningen är effektiv i A11 upp till cirka 16 överfarter, varefter påtaglig uppluckring påbörjas. B11 och B13 visar större komprimering än C11 och C21. Det kan konstateras att packningen blir mer effektiv vid tunnare lagertjocklek men att risken för uppluckring är mer påtaglig vid tunna skikt. För yta C fås en lägre komprimering i näst nedersta mätskiktet som sannolikt beror på utläggningsprocessen (2 skikt). Det nedersta skiktet uppnår god packning men det krävs ett stort antal överfarter.

Inverkan av frekvensstyrning kan jämföras genom C11 (frekvensstyrning) och C21 (fast frekvens). Dessa har haft en likvärdig byggtrafik och därför liknande initialförhållanden. En liten skillnad ses i total kompression där C11 är något bättre men skillnaden blir påtaglig vid analys av komprimeringsprofilen. Medan djupverkan blir något bättre med fast frekvens fås en mycket bättre packning i ytan med frekvensstyrning som till stor del beror på avsaknad av uppluckring.

En analys av komprimeringen i överfarterna 3-32 visar att de största skillnaderna mellan de olika delytorna, med hänsyn till total komprimering, sker i de två första överfarterna. Dock fås även här störst komprimering i yta B11, vilket tyder på att lagertjockleken 50 cm och materialfraktionen 0/150 mm är den mest optimala kombinationen.

### 6.3 Styvhet

En stor del av de mätmetoder som tillämpades är relaterade till överytans styvhet. Med tanke på det stora antalet överfarter och att överpackning observerades i mätningarna med EMU-spolar kan det antas att packningsarbetet var tillräckligt omfattande för att eliminera variationer i initialförhållanden. De variationer som uppkom i styvhetsmätningarna anses därför härröra från terrassens styvhet, som dels påverkade packningsarbetet och dels mätningarna i sig, samt från mätmetodernas inneboende osäkerheter. Med mätningarna fås en kontroll av den färdiga produkten som kan relateras acceptanskriterier, vilka oftast är uttryckta i Ev2-moduler från plattbelastningsförsök.

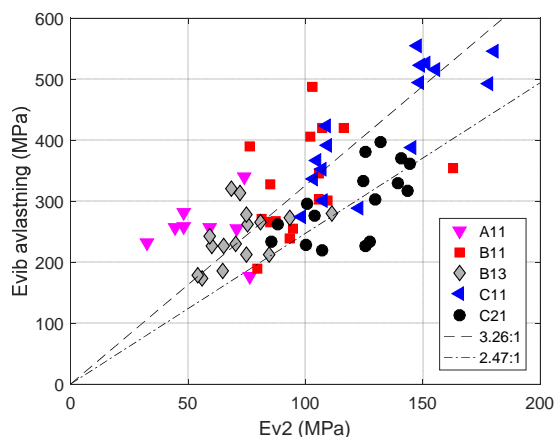
Med en jämförelse av resultaten kan de olika metodernas pålitlighet jämföras genom att studera deras korrelation till varandra. Plattbelastningsförsök anses vara den mest tillförlitliga metoden då styvheten mäts direkt med statisk belastning men dessa gjordes bara på vissa delytor pga. den stora tidsåtgången. Jämförelse av resultaten visar att korrelationen mellan plattbelastningsförsök och ytmodulen från tungt fallviktsförsök är mycket bra och fallviktsmätningarna kan därför användas för att utvärdera styvheten på de ytor där ingen plattbelastning gjordes. Eftersom tung fallvikt användes efter endast 32 överfarter måste andra metoder analyseras för att få en bild av hur styvheten utvecklas under packningsprocessen. Plattbelastningsförsök och seismiska mätningar gjordes efter 8 och 32 överfarter medan vältens packmätare registrerade Evib och CMV kontinuerligt i varje överfart. Av de integrerade vältmätningarna är Evib avlastningsmodul den som bäst korrelerar med plattbelastningsförsök och antas därför mest tillförlitlig. E-modulen från de seismiska P-vägs mätningarna ger en någorlunda acceptabel korrelation med övriga mätningar, om moränytorna utesluts, medan styvheten från ytvägs mätningarna har för få lyckade mätningar för att studera korrelationen.

Deformationsmodulen Ev2 från plattbelastningsförsök (Figur 33) visar att styvheten inte blir tillräcklig på delyta A11 (30 cm, 0/150 mm, AFC) och att den dessutom är lägre efter 32 överfarter än efter 8 överfarter. Detta beror sannolikt på ett starkt inflytande av den lösa terrassen då lagertjockleken är endast 30 cm. Även för B11 och B13, med 50 cm lagertjocklek, blir styvheten relativt låg som även här antas bero på terrassen. Delyta B11 (0/150 mm) har en påtagligt högre styvhet än B13 (0/250 mm) vilket antyder att materialfraktionen 0/150 mm ger en bättre packad överyta än 0/250 mm. C11 (AFC)

och C21 (28 Hz) har en likvärdig Ev2-modul efter 8 överfarter medan den är betydligt högre för C11 efter 32 överfarter, vilket visar att frekvensstyrningen har en positiv inverkan. Skillnaden är sannolikt ett resultat av mindre uppluckring och en bättre packning i ytan. Att styvheten är densamma efter 8 överfarter för att sedan avvika från varandra stärker denna tes. Generellt är dock styvheten låg för alla ytor, men ökar med lagertjocklek, och det är endast yta C efter 32 överfarter som uppnår acceptabel styvhet enligt teknisk systemstandard för höghastighetsbanor, 120 MPa (Trafikverket, 2016). De främsta orsakerna till detta bedöms vara ytornas begränsade tjocklek, terrassens inverkan och packning endast i ett centrerat stråk.

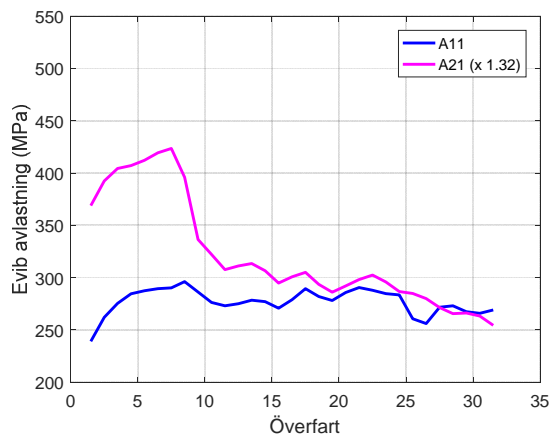
Ytmodulen från fallviktsmätningarna kan komplettera plattbelastningsförsöken efter 32 överfarter eftersom de utfördes på alla delytor. Denna visar på en högre styvhet med frekvensstyrning än med fast frekvens för alla lagertjocklekar och material förutom för den tunnaste ytan där modulen var mer eller mindre identisk. Övriga lagertjocklekar och material ger en ytmodul som är 8-18 % högre med frekvensstyrning. Även bankmaterialet har en inverkan där fraktionen 0/150 mm ger en ytmodul som är 5-40 % högre än 0/250 mm, bortsett från ytorna med 100 cm lagertjocklek som är packade med fast frekvens där styvheten är likvärdig. Den djupberoende medelmodulen bekräftar att frekvensstyrning ger högre styvhet i ytan och att materialfraktionen 0/150 mm ger en högre styvhet i hela skiktet än 0/250 mm. Den djupberoende modulen antyder att packningen är bättre på större djup än 50 cm med fast frekvens men dessa resultat är något osäkra.

Den dynamiska avlastningsmodulen från den integrerade packmätaren (Evib2) gav en relativt god korrelation med Ev2 men sambandet beror på amplituden som i sin tur påverkas av frekvensen. Det betyder att korrelationen påverkas av om packning skett med frekvensstyrning eller med fast frekvens. Figur 67 visar kurvanpassning för frekvensstyrning,  $E_{vib2} = 3,26E_{v2}$ , och för fast frekvens,  $E_{vib2} = 2,47E_{v2}$ . Genom att dividera dessa fås att frekvensstyrningen i snitt ger en avlastningsmodul som är 1,32 gånger högre än den vid fast frekvens. I kommande figurer i detta avsnitt multipliceras därför avlastningsmodulen för fast frekvens med 1,32 för att resultaten ska bli mer jämförbara. Dock är osäkerheterna för stora för att jämföra delytor med olika packningsmetod och dra slutsatser om skillnader i styvhet. Plattbelastningsförsök och tung fallvikt är betydligt mer pålitliga mätningar för det ändamålet men Evib2 är användbart för att studera hur styvheten varierar under packningsförloppet. I figurerna tas genomsnittet av avlastningsmodulen över två på varandra följande överfarter eftersom det beräknade värdet påverkas av vältens färdriktning (genom att ta medelvärdet av när vältens körs framåt och bakåt undviks kurvornas taggiga utseende som kan ses i avsnitt 5.6.2).



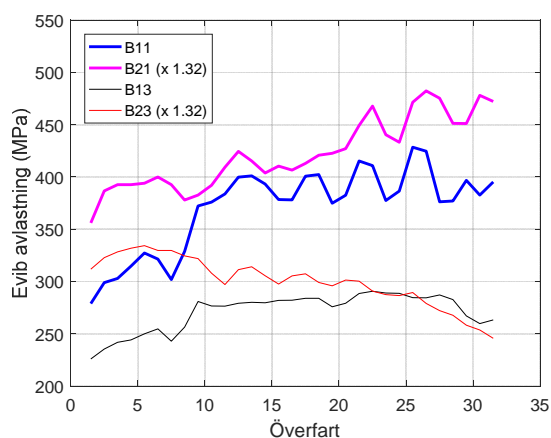
**Figur 67. Jämförelse mellan dynamisk avlastningsmodul och Ev2 samt kurvanpassning för frekvensstyrning respektive fast frekvens.**

I Figur 68 visas avlastningsmodulen för lagertjockleken 30 cm. Eftersom yta A (30 cm) packades med olika amplitudinställning fås stora variationer i Evib2, som är amplitudberoende. De första 8 överfarterna, som kördes med låg amplitud, uppvisar ett mycket högre värde vid fast frekvens än de efterföljande överfarterna medan amplitudinställningen inte får någon påtaglig inverkan med frekvensstyrning. Evib2 ökar under de första överfarterna och minskar i slutet av förloppet och kurvorna tyder på att mycket liten, om någon, styvhetstillväxt fås efter 8 överfarter, medan EMU-spolorna antydde en komprimering upp till 16 överfarter (avsnitt 6.2). Plattbelastningsförsök visade en minskad styvhet på A11 (AFC) efter 32 överfarter, jämfört med efter 8 överfarter. Evib2 uppvisar samma beteende och visar att detsamma gäller yta A21 (fast frekvens). Den största styvhetsminskningen fås i slutet av packningsförloppet och sammanfaller med volymökningen som kan observeras i resultaten från EMU-spolorna. Det finns således starka bevis för att packningen i det tunna skiktet blir sämre efter cirka 16 överfarter, bl.a. pga. materialuppluckring i ytan.



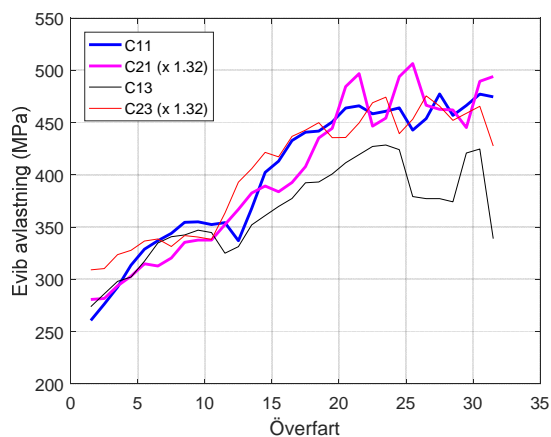
**Figur 68. Dynamisk avlastningsmodul för lagertjockleken 30 cm: A11 (AFC) och A21 (fast frekvens).**

Avlastningsmodulen för lagertjockleken 50 cm visas i Figur 69. I de första överfarterna fås ett annorlunda beteende med respektive utan frekvensstyrning, som kan bero på variationer i initiala förhållanden. Efter 8 överfarter fås ett liknande förlopp för de två packningsmetoderna. Dock syns stora skillnader mellan de två krossmaterialen. Avlastningsmodulen för fraktionen 0/150 mm ökar mer eller mindre kontinuerligt under alla överfarter medan 0/250 mm är i princip konstant för att sedan minska i de sista överfarterna. Skillnaden ligger i linje med övriga mätningar som visar att styvheten är lägre för det grövre materialet men Evib2 stämmer inte överens med Ev2 från plattbelastningsförsök som visade en något ökande styvhet för 0/250 mm mellan 8 och 32 överfarter. EMU-spolorna redovisade ingen betydande volymökning i B13 men däremot en avstannad komprimering i det översta skiktet efter 8 överfarter. Detta kan härröra från en viss materialuppluckring som också stärks av att Evib2 för B23 minskar mer än för B13 (fast frekvens ger större uppluckring) men som inte kan bekräftas. Bortsett från B21, vars avlastningsmodul ökar under hela packningsförloppet, antyder kurvorna att i princip ingen styvhetstillväxt fås efter cirka 12 överfarter.



**Figur 69. Dynamisk avlastningsmodul för lagertjockleken 50 cm: B11 (0/150 mm, AFC), B21 (0/150 mm, 28 Hz), B13 (0/250 mm, AFC) och B23 (0/250 mm, 28 Hz).**

Figur 70 visar avlastningsmodulen för lagertjockleken 100 cm. Alla ytor visar på en ökande styvhet upp till cirka 22 överfarter och därefter ingen styvhetstillväxt. Delyta C13 visar en mindre ökning av Evib2 än övriga delytor vilket kan bero på mätosäkerheter men som också kan vara en lägre packningspotential för den grövre materialfraktionen. Det lägre styvheten från fallviktsmätningarna stärker den senare tesen men däremot syns i princip ingen skillnad i avlastningsmodul mellan C23 och C21.



**Figur 70. Dynamisk avlastningsmodul för lagertjockleken 100 cm: C11 (0/150 mm, AFC), C21 (0/150 mm, 28 Hz), C13 (0/250 mm, AFC) och C23 (0/250 mm, 28 Hz).**

De seismiska försöken anses mindre tillförlitliga än avlastningsmodulen (Evib2), plattbelastningsförsök och tung fallvikt men mer än Evib pålastningsmodul och CMV. Följande tre aspekter gav upphov till osäkerheterna i mätresultaten:

- Metodens inneboende osäkerhet.
- Ett tunt lager styvt material som underlagras av en lös terrass (omvänd styvhetsprofil).
- Det mycket grovkorniga materialet.

Variationerna i mätresultat antas i de flesta fall vara i samma storleksordning som, eller mindre än, osäkerheterna. I två resultat är dock skillnaderna så stora att de sannolikt beror på en verklig styvhetsvariation:

- Lagertjockleken 100 cm gav en betydligt högre styvhet efter 32 överfarter än övriga lagertjocklekar.
- Materialfraktionen 0/150 mm visade en påtagligt högre styvhet än 0/250 mm i 11 av 12 fall.

Både dessa observationer ligger i linje övriga resultat och ger ytterligare bevis för tidigare slutsatser.

#### 6.4 Frekvensstyrning

Resultaten visar att automatisk frekvensstyrning ger en något sämre djupverkan men en kraftig förbättring av packningen i ytan och en minskad ytuppluckring. Det finns också starka bevis för att detta ger en betydande styvhetsförbättring, vilket innebär att den färdiga produkten blir bättre. Uppluckring i ytan kan, vid konventionell packning, åtgärdas genom avlutande överfarter med låg eller statisk amplitud. Detta studerades inte i dessa försök men det är uppenbart att frekvensstyrning kan eliminera behovet av sådana överfarter. Orsaken till den förbättrade packningen i ytan bedöms ha två orsaker:

- Vid resonans rör sig valsem i nära fas med underlagets naturliga svängningsrörelse, vilket betyder att packningsenergin går åt till att förstärka rörelsen orsakad av den tidigare svängningscykeln. Vid en frekvens som är långt över resonans, däremot, svänger valsem med en högre frekvens än underlaget och de får därför motverkande svängningsrörelser. Det betyder att en stor del av packningsenergin går åt till att hindra underlagets rörelse orsakad av tidigare cykler. Denna energi förvandlas därför delvis till friktion och värme istället för förskjutning av ytan som ger upphov till töjning och därmed packning. Denna tes stärks av att både amplitud och kontaktkraft ökar vid frekvensstyrning trots lägre centrifugalkraft.
- Dubbelhopp förekommer vid fast frekvens men inte vid frekvensstyrning. Då styvheten ökar i underlaget vid ett högre antal överfarter ökar risken för dubbelhopp men beror också mycket på exciteringsfrekvensen. Eftersom risken är mycket högre vid fast frekvens är således också dubbelhopp vanligt förekommande. Detta får ungefär samma effekt som föregående punkt, dvs. att underlagets rörelse motverkas och att packningsenergin omvandlas till friktion i underlaget. Det ger också ökade krafter i välten som i sin tur ökar maskinlitaget.

Frekvensstyrning ger upphov till samma sättningar på överytan som vid fast frekvens men den totala komprimeringen av materialet är större, vilket har observerats i resultat från EMU-spolarna. Djupverkan och packningen längst ner skiktet är dock något större vid konventionell packning. Dessa aspekter antyder att sättningen i terrassen är högre för fast frekvens. Vid lagervis bankuppbyggnad får det följden att det underliggande, redan packade, lagret fortsätter att packas vid konventionellt förfarande medan packningsenergin koncentreras i det lager som packas vid frekvensstyrning.

Utöver det förbättrade packningsresultat som mätningarna i dessa försök visar på finns maskintekniska fördelar med frekvensstyrningen som främst härrör från den kraftigt minskade frekvensen. Eftersom energieffektiviteten är betydligt högre och en lägre frekvens förbrukar mycket mindre energi minskar också bränsleförbrukningen och således också miljöpåverkan. Om dessutom avslutande överfarter kan sparas genom minskad ytuppluckring fås ytterligare en minskning av bränsleförbrukningen. Den lägre frekvensen, den skonsammare packningen (när valsem och underlaget

inte rör sig i motfas) och den mer effektiva omsättningen av packningsenergi till töjning av underlaget ger alla lägre krafter i maskinkomponenter vilket minskar slitaget och ökar vältens livslängd.

Resultat från tidigare studier visade under kontrollerade förhållanden att en lägre frekvens var mer fördelaktig ur packningssynpunkt. Denna studie bekräftar en mer effektiv packning med automatisk frekvensstyrning i fält som kan minska tidsåtgången för packningen, ge ett mer homogent packat material, minska bränsleförbrukningen och öka vältens livslängd. Dessa resultat bör bekräftas under en realistisk bankuppbyggnad.

### 6.5 Lagertjocklek och överfarter

Packningen var som förväntat starkt beroende av lagertjockleken. En svårighet vid utvärdering av försöken var terrassens låga styvhet som t.ex. gav upphov till stora sättningar. Sättningen av terrassen var betydligt större vid tunnare lagertjocklek. Terrassen påverkade också packningsarbetet eftersom en låg styvhet i undergrunden har negativ inverkan på packningen (Johansson, 2001) och hade dessutom en inverkan på styvhetsmätningarna på överytan. Ett resultat av detta blev att tillräcklig styvhet inte uppnåddes på varken lagertjockleken 30 cm eller 50 cm. Dock kunde komprimering och uppluckring samt jämförelse mellan materialfraktioner (avsnitt 6.6) studeras i tunnare ytorna.

Minskad lagertjocklek gav en bättre komprimering men risken för uppluckring ökade påtagligt med tunnare ytor. Det antas att denna risk ökar vid ett styvt underlag. Lagertjockleken 30 cm visar en komprimering som ökar under de 16 första överfarterna medan styvhetstillväxten avstannar redan efter cirka 8 överfarter. För övriga ytor ökar den totala komprimeringen under i princip hela packningsförloppet men viss uppluckring kan ses i enskilda punkter. Styvhetstillväxten för lagertjockleken 50 cm avstannar efter cirka 12 överfarter och för 100 cm efter cirka 22 överfarter.

Den minsta lagertjockleken får alltså bäst packning men risken för uppluckring gör att antalet överfarter måste begränsas, medan många överfarter krävs för att uppnå tillräcklig packning i det tjockaste skiktet. Utifrån resultaten i denna studie konstateras att för en vält med linjelast 65 kg/cm fas en bra komprimering i banken om lagertjockleken 50 cm packas i cirka 12-16 överfarter eller om 100 cm packas i 20-24 överfarter. Dock uppstår svårigheten med fast frekvens att det höga antalet överfarter som krävs för att ge tillräcklig packning i botten av skiktet ger uppluckring nära ytan. Med frekvensstyrning undviks det problemet. Således finns det anledning att begränsa lagertjockleken vid konventionell packning medan större tjocklek kan användas med frekvensstyrning. Det bör också vara möjligt att återställa uppluckringen i avslutande överfarter med låg eller statisk amplitud.

### 6.6 Bankmaterial

Tre olika bankmaterial jämfördes i denna studie:

- Siltig morän (Bilaga E)
- DCH.15, underballast för förstärkning enligt AMA Anläggning 13 med fraktion 0/150 mm (Bilaga C)
- Krossmaterial med fraktionen 0/250 mm som faller inom ramen för fyllning med grovkrossad sprängsten i AMA Anläggning 13 enligt tabell AMA CEB.11113/1 med tillägget att största stenstorlek inte får vara större än 250 mm (Bilaga D)

Moränmaterialet visade sig vara i princip omöjligt att vibrationspacka och mycket olämpligt som bankmaterial, främst på grund av den höga finjordshalten (15-20%).



Fraktionen 0/150 mm uppvisade större komprimering än 0/250 mm och det finns överväldigande bevis från i princip alla mätmetoder att styvheten på den packade överytan blir betydligt högre, även i de fall där mängden byggtrafik har varit mindre än på det grövre materialet. Resultat från packmätaren antyder också att materialfraktionen 0/150 mm får en konstant eller något ökande styvhetstillväxt i slutet av packningsförloppet medan fraktionen 0/250 mm ger en minskande styvhet i de 8 sista överfarterna. Resultaten visar alltså på en lägre packningspotential för den grövre fraktionen. Detta kan bero på att en större mängd energi krävs för att packa större stenar eller att den mindre fraktionen innehöll en något större mängd små partiklar vilket gav en mer gynnsam kornstorleksfördelning.

### **6.7 Rekommendationer för etapp 2**

För att bekräfta resultaten från dessa försök rekommenderas ytterligare försök med en realistisk bankuppbyggnad i flera skikt. Bankens totala höjd bör vara minst 2 m och packas över hela ytan (till skillnad från ett stråk). De förutsättningar som bedöms mest gynnsamma kan väljas med stöd från resultaten i denna rapport och antalet försöksparametrar kan på så sätt minimeras. Dock bör packningen ske både med och utan frekvensstyrning för att utreda inverkan av den nya metoden på färdig bank. Företrädevis anläggs banken i 2-3 skikt med lagertjockleken 100 cm och materialet DCH.15. Utvärdering av packningen bör göras med hjälp av statisk plattbelastning, tung fallvikt, sättning och EMU-spolar.

## 7 Slutsatser

Packningsförsök har utförts för att studera tillämpbarheten av en ny metod med automatisk frekvensstyrning samt inverkan av lagertjocklekar och bankmaterial som kan bli aktuella vid bankuppbyggnad för höghastighetsjärnväg. Trots svårigheter med stora regnmängder som kraftigt påverkade terrassen av siltig morän och andra osäkerheter relaterade till fältförhållanden kunde inverkan av packningsparametrar studeras genom att väga samman resultaten från ett stort antal mätmetoder. Utifrån analysen av mätresultat kan följande slutsatser dras:

- Automatisk frekvensstyrning ger en något sämre djupverkan (>50 cm) men en betydligt bättre packning i ytan medan konventionell packning ger en påtaglig ytuppluckring. Den totala packningseffekten sett över hela skiktet blir bättre och mer homogen och eliminerar behovet av avslutande överfarer med statisk packning eller packning vid låg amplitud.
- Frekvensstyrning ger en påtagligt högre styvhet på överytan.
- Vid konventionell packning utnyttjas en betydande del av packningsenergin till komprimering av det underliggande lagret (eller terrassen om materialet är placerat direkt på terrass) medan frekvensstyrning koncentrerar packningsenergin till det lager som packas.
- Frekvensstyrning kan ge en minskad tidsåtgång och ger dessutom en lägre bränsleförbrukning och mindre maskinslitage.
- Minskad lagertjocklek ger en bättre packning vid få antal överfarer men en ökad uppluckring tidigare i packningsförloppet.
- För tunna lager måste antalet överfarer begränsas för att undvika överpackning medan ett stort antal överfarer krävs för att packa tjocka lager.
- Styvhetstillväxten avstannade efter 8 överfarer för lagertjockleken 30 cm, efter 12 överfarer för 50 cm och efter 22 överfarer för 100 cm.
- För en vält med linjelast 65 kg/cm fås en bra avvägning mellan komprimering och risk för uppluckring om lagertjockleken 50 cm packas i cirka 12-16 överfarer eller om 100 cm packas i 20-24 överfarer.
- Det antal överfarer som krävs för att få en tillräcklig packning i botten av skiktet ger uppluckring i ytan vid konventionell packning med fast frekvens. Frekvensstyrning eller avslutande överfarer med låg eller statisk amplitud kan åtgärda det problemet.
- Moränmaterial med hög finjordshalt (i detta fall >15%) är mycket olämpliga för uppbyggnad av bank till höghastighetsjärnväg.
- Både den packningsinducerade komprimeringen och styvheten på den packade överytan beror på materialfraktionen för krossmaterial.
- Fraktionen 0/150 mm (DCH.15) gav en större komprimering och en betydligt högre styvhet än fraktionen 0/250 mm och är således mer lämpligt att använda som bankmaterial. Dock kan detta bero på skillnaden i de två materialens kornstorleksfördelning.

- De tydliga resultaten som erhöles trots svåra fältförhållanden visar att provpackning kan vara effektiv så länge mätmetoder väljs med omsorg.
- Det var inte möjligt att relatera sättningsförloppet avtagande till packningsförloppet på grund av terrassens sättning.
- Packmätarvärdet Evib2 (avlastningsmodul) korrelerade relativt väl med överytans styvhet och kunde användas för att bedöma styvhetstillväxt.
- Tung fallviktsmätning gav en mycket god korrelation till plattbelastningsförsök och kan med fördel användas som komplement till den betydligt mer tidskrävande plattbelastningen.
- Ytterligare försök krävs för att verifiera resultaten under realistisk bankuppbyggnad.

## Referenser

- Adam, D. & Kopf F. (2000), Sophisticated Compaction Technologies and Continuous Compaction Control, *Proceedings of European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials*, Presses Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Anderegg, R. and Kaufmann, K. (2004), "Intelligent Compaction with Vibratory Rollers, *Transportation Research Record. 1868*, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 124–134.
- Briaud, J. L., & Seo, J. (2003), *Intelligent compaction: overview and research needs*, Texas A&M University, College Station, 84 p.
- Forssblad, L. (1980), Compaction Meter on Vibrating Rollers for Improved Compaction Control, *Proceedings of International Conference on Compaction*, Vol. 2, Paris, France, pp. 541–546.
- Janoo, V., Irwin, L., Knuth, K., Dawson, A., & Eaton, R. (1999). Use of inductive coils to measure dynamic and permanent pavement strains. In *Proceedings of the 1st International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno, Nev.*, pp. 18-20.
- Johansson, B. (2001), *Rockfill pavements on soft subsoil – construction and compaction*, Doctoral Thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Johansson, B. & Kennedy, H. (2007), *Bärighet på väg – via förbättrad packning - fullskaleförsök med lättklinker och lera som undergrund*, Rapport 2007:7, Avdelningen för Geologi och Geoteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Rinehart, R. V., & Mooney, M. A. (2009), Measurement depth of vibratory roller-measured soil stiffness. *Geotechnique*, Vol. 59, No. 7, pp. 609-619.
- Svensk Byggtjänst (2014), *AMA Anläggning 13. Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten*.
- Turner, H. & Sandström, Å. (1980), A New Device for Instant Compaction Control, *Proceedings of International Conference on Compaction*, Vol. 2, Paris, France, pp. 611–614.
- Trafikverket (2012), TRVMB 112, *Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat*, TRV 2012:050.
- Trafikverket (2014), *Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning*, TDOK 2014:0141.
- Trafikverket (2016), *Teknisk systemstandard för höghastighetsbanor, krav, version 2.2*.
- Vennapusa, P. K., & White, D. J. (2009), Comparison of light weight deflectometer measurements for pavement foundation materials. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 32, No. 3, pp. 1-13.
- Wersäll, C. & Larsson, S. (2013), Small-Scale Testing of Frequency-Dependent Compaction of Sand Using a Vertically Vibrating Plate, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 36, No. 3, pp. 1-10.

Wersäll, C., Larsson, S. & Bodare, A. (2014), Dynamic Response of Vertically Oscillating Foundations at Large Strain, *Proceedings of the 14th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Kyoto, Japan, 22-25 September 2014, pp. 643-647.

Wersäll, C., Larsson, S., Rydén, N. & Nordfelt, I., (2015), Frequency Variable Surface Compaction of Sand Using Rotating Mass Oscillators, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 38, No. 2, 2015, pp. 1–10.

Wersäll, C. & Larsson, S. (2016), Influence of force ratio and frequency on vibratory surface compaction, *Proceedings of Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development - Geotec Hanoi 2016*, Hanoi, Vietnam, 24-25 November 2016, pp. 841-846.

Wersäll, C., Nordfelt, I. & Larsson, S. (2017), Soil compaction by vibratory roller with variable frequency, *Géotechnique*, Vol. 67, No. 3, pp. 272-278.

Wersäll, C., Nordfelt, I., & Larsson, S. (2018), Resonant roller compaction of gravel in full-scale tests. *Transportation Geotechnics*, Vol. 14, pp. 93-97.

Yoo, T-S. & Selig, E. T. (1979), Dynamics of Vibratory-Roller Compaction, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 105, No. 10, pp. 1211–1231.

## **Bilagor**

Bilaga A: PM Provgropsgrävning

Bilaga B: Jordprovsanalys provgropar

Bilaga C: Siktanalys 0/150 mm

Bilaga D: Siktanalys 0/250 mm

Bilaga E: Siktanalys morän

Bilaga F: Packmätarvärde terrass

Bilaga G: Materialtjocklek

Bilaga H: Sättningsmätningar

Bilaga I: Resultat från EMU-spolar

Bilaga J: Resultat från plattbelastningsförsök

Bilaga K: Integrerade vältmätningar

Bilaga L: Accelerometermätningar

Bilaga M: Resultat från tung fallvikt

Bilaga N: Rapport seismiska mätningar

**Bilaga A**

**PM provgropsgrävning**

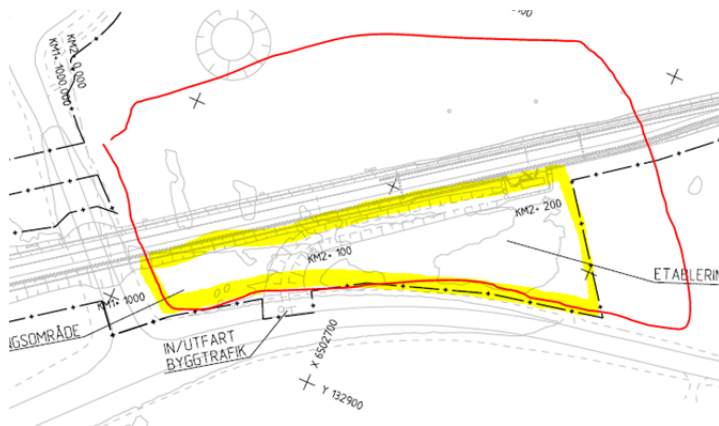
Projekt:	Packning av bank för höghastighetsjärnväg vid varierade grundläggningsförhållanden
Delprojekt:	Etapp 1 - provyta
BIG projektnummer:	A2016:03
Upprättat av:	Carl Wersäll
Datum:	2017-04-20

## PM sammanfattning av provgrävning

Packningsförsök som ska utföras i anslutning till Kardonbanan har beskrivits i rapport "Översikligt försöksprogram, 2017-02-15, rev. 1". Detta PM beskriver resultat från grävning av provgropar den 18 april 2017.

### Försöksområde

Det gula området i figuren nedan visar det föreslagna försöksområdet. Området begränsas i väster Bravikenvägen, i norr av Östra Bravikenvägen, i öster av centrumlinjen för Kardonbanan och söder av det område där arkeologiska undersökningar ej ännu utförts. Alla provytor bör anläggas inom det markerade området. Dock kan upplagsytor, etablering, förvaring, arbetsvägar, vändplaner etc. placeras öster om centrumlinjen för Kardonbanan.



I figuren nedan visas försöksområdet. Den övre bilden visar den södra delen av området, fotograferat från norr, och den nedre bilden visar den norra delen av området från norr. Inom försöksområdet finns jordvallar som är rester från de arkeologiska undersökningarna. Längs Bravikenvägen finns också ett större stenröse. Provyornas placering bör, i den utsträckning det går, inte sammanfalla med den större jordvall som löper genom den norra delen av området eller med stenröset för att undvika större



schaktningsarbeten. De rödmarkerade linjerna bör därför mätas in och placeras på en ritning. Vidare bör provgroparnas lägen mätas in så att dessa kan undvikas som underlag för provytor.



## Resultat från provgropar

Den 18 april grävdes 12 provgropar i området. Syftet var att få en överblick över jordförhållandena och därefter bedöma om tillräckligt hög och tillräckligt jämn styvhet kan uppnås som underlag för provytorna. En preliminär bedömning är att underlaget duger för försöken med vissa föreberedande åtgärder, se nedan. Dock finns ett område med varvig glacial silt eller lera i de översta 0,5-1 m längs Bravikenvägen som ska undvikas. Detta område kan lätt identifieras eftersom materialet är synligt i markytan. Vidare inväntas resultat från provtagningar som har lämnats till Sweco Geolab för jordartbestämning och siktning.

Markförhållandena bedöms likvärdiga i stort sett över hela området. Mycket fast botten nåddes vid 1,4-1,75 m och grävmaskinen (5 ton) kunde inte schakta djupare. Större delen av området består av en rostfärgad vattengenomsläpplig sandig morän, i vissa fall något siltig och mer stenig i norra delen av området. Under den sandiga moränen kan en mycket fast grå siltig morän observeras. Närmast Bravikenvägen finns ett område med varvig glacial silt eller lera. I de flesta provgropar kan vatteninträngning observeras på ett djup av 0,5-1 m, vilket dock bedöms vara ytvatten. Nedan sammanfattas observationer från respektive provgrop.

### KTH1PG1



Sandig morän ner till 1,5 m, därefter siltig morän. Stopp vid 1,6 m. Vatteninträngning på ca 1,25 m djup. Två provtagningar på 0,6 resp. 1,5 m djup.

### KTH1PG2



Sandig morän till 1,7 m djup, sedan stopp. Vatteninträngning vid 0,5 m djup.

**KTH1PG3**



Sandig morän till 1,7 m djup, sedan stopp. Sten upp till ca 20 cm diameter. Vatteninträngning på ca 0,5 m djup. Provtagning i morän.

**KTH1PG4**



Sandig morän med innehåll av silt eller finsand. Stopp vid 1,75 m. Sten upp till ca 50 cm diameter. Vatteninträngning 0,7-0,8 m under markytan. Provtagning i morän.

### KTH1PG5



Sandig morän till 1,5 m djup, sedan stopp. Sten upp till 40 cm diameter. Vatteninträngning på 0,6-0,7 m djup.

### KTH1PG6



Sandig, något siltig, morän. Stopp vid 1,6 m djup. Lite mer stenigt än övriga provgropar. Sten upp till 50 cm diameter. Provtagning i morän.

### KTH1PG7



Sandig morän till 1,4 m djup, sedan stopp. Stenigt. Sten upp till 50 cm diameter. Viss organisk jord synbar i övre 0,3 m. Vatteninträngning på 0,5 m djup. Provtagning i morän med organiskt inslag.

### KTH1PG8



Mot Bravikenvägen, varvig glacial silt eller lera översta 0,4-0,5 m. Mot Rusta, sandig rostfärgad morän översta ca 0,7 m. Silt/lera och sandig morän underlagras av mycket fast grå siltig eller sandig morän. Stopp vid 1,4 m. Vatteninträngning ca 0,7 m under markytan. Två provtagningar, sandig morän på 0,5 m djup och varvig silt/lera på 0,3 m djup.

### KTH1PG9



Sandig morän ner till ca 0,5 m djup, sedan mycket fast grå siltig morän. Stopp vid 1,4 m. Vatteninträngning ca 0,5 m under markytan.

### KTH1PG10



Matjord översta 0,3 m, sedan sandig morän. Stopp vid 1,7 m. Viss vatteninträngning.

### KTH1PG11



Sandig morän till 1,5 m djup, sedan stopp. Vatteninträngning på ca 0,5 m djup.

### KTH1PG12



Varvig glacial silt eller lera i de översta 0,5 m, underlagat av sandig morän. Stopp vid 1,5 m. Silt/lera utbreder sig ytterligare ca 1 m från provgropen mot Rusta. Provtagning i morän.

## **Förberedande arbeten**

Försöksområdet bedöms lämpligt för försöken. Dock bör förberedande arbeten utföras, bestående av schaktning av de översta 10-20 cm jordmaterial samt packning av terrassen.

## **Fortsatta aktiviteter**

Följande aktiviteter bör utföras inom de närmaste veckorna:

- Inmätning av provgropar (Krister/Henrik)
- Inmätning av jordvallar och stenröse (Krister/Henrik)
- Jordartsbenämning och siktning (Sweco Geolab)
- Uppdatering av detta PM efter ovanstående punkter är avklarade (Calle)
- Utplacering av provytor inom försöksområdet på en ritning (Calle)
- Uppdaterat försökprogram (Calle)
- Tidplan och budget (Calle)



## **Bilaga B**

### **Jordprovsanalys provgröpar**

## Jordprovsanalys

<b>Projekt Ostlänken jvg, Norrköping</b>				
<i>Uppdragsnummer</i>	<i>Uppdragsgivare</i>	<i>Gransk./Tabell</i>		
D7669	KTH, Stockholm	<i>Löp-nr</i>	31668	
<i>Provtagningsdatum</i>	<i>Provtagningsredskap / Analysmetod</i>	<i>Datum/Sign</i>	2017-06-14	
		<i>Undersökningsdatum</i>	2017-05-29 - 2017-06-14	

<b>Borrhål/ Sektion</b>	<b>Djup [m]</b>	<b>Benämning/ (okulär jordartsklassning SS-EN ISO 14688-1+2) Jordartsförkortning (enl. IEG 2011-05-08)</b>	<b>Mtrl typ/ tjäl. klass<sup>1)</sup></b>	<b>Anm.</b>
PG 1		Prov 1: Brungrå sandig siltig MORÄN, sasiTi Prov 2: Gråbrun sandig grusig siltig MORÄN, sagrsiTi	3B/2 3B/2	Sikt
PG 3		Gråbrun något grusig sandig siltig MORÄN, (gr)sasiTi	4A/3	
PG 4		Gråbrun grusig sandig lerig MORÄN, grsaciTi	4A/3	
PG 6		Gråbrun sandig siltig MORÄN, sasiTi	4A/3	Sikt
PG 7		Brungrå sandig grusig siltig MORÄN, sagrsiTi	3B/2	
PG 8		Prov 1: Gråbrun grusig lerig SAND, moränliknande, grclSa Prov 2: Brungrå rostfläckig varvig TORRSKORPELERA med tunna siltskikt, vClde (sj)	4A/3 4B/3	
PG12		Gråbrun sandig grusig siltig MORÄN, sagrsiTi	3B/2	

1) Klassning enl. AMA Anläggning 13

P:\2172\Uppdrag 2017\31668\{Provtabell Pg1-12 170614.xlsx}



Projekt: **Ostänken jvg, Norrköping**

Datum: 2017-06-14

Uppdragsnr: D7669

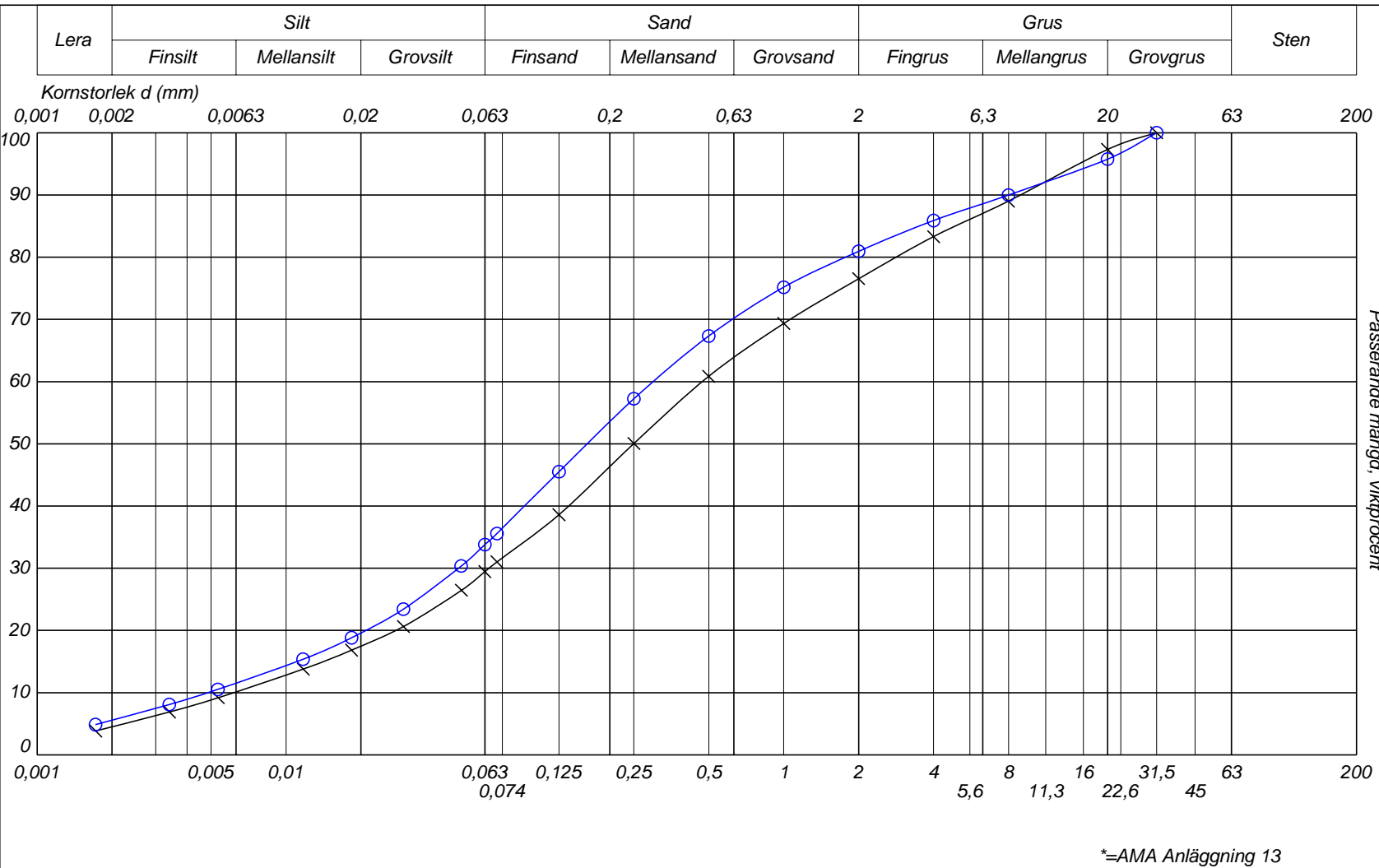
Provtagningsdatum:

Löp-nr: 31668

Uppdragsgivare: KTH, Stockholm

Gransk./Sign:

Passerande mängd, viktprocent



Sektion	Prov-beteckning	Djup (m)	Gäller mellan (m)	Benämning	Siktat Prov (g)	Glödgn.-förlust %	Mtrl % > mm	Tjäl-farlighet	d10	d60	d90
Borrhål											
PG 1	—x—			Prov 1: Brunrå sandig siltig MORÄN	1083			3B/2*	0,006	0,473	8,921
PG 6	—○—			Gråbrun sandig siltig MORÄN	1417			4A/3*	0,005	0,302	8,027

**Bilaga C**

**Siktanalys 0/150 mm**

## TILLVERKNINGSKONTROLL Stenmaterial

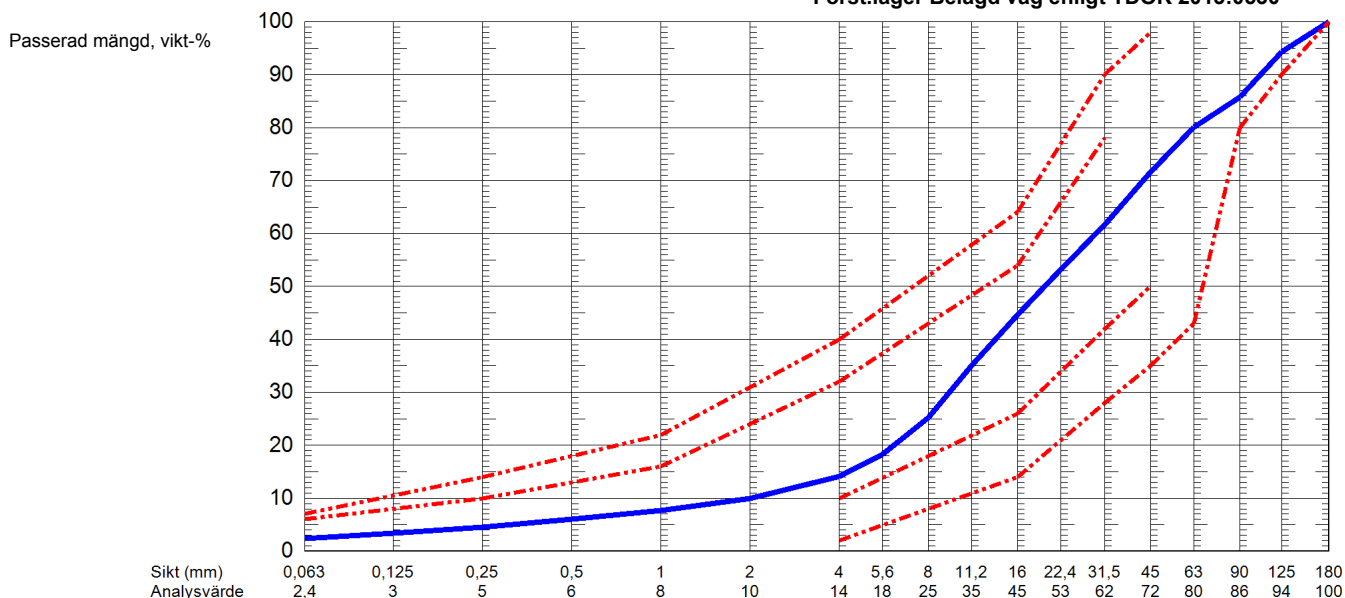
Sidan 1 av 1

Beställare <b>NCC INDUSTRY AB</b>	Provtagningsdatum <b>2017-09-18</b>	Analys start <b>2017-09-18</b>
	Ankomstdatum <b>2017-09-18</b>	Analys slut <b>2017-09-19</b>
Produkt <b>0/150</b>	Referens nr <b>69402118</b>	Id-nummer
Leverantör <b>NCC INDUSTRY SKÄRLUNDA</b>	Provtagningsplats	
Entreprenör	Provtagare <b>TOMAS SJÖBERG</b>	
Objekt	Märkning	

### Kornstorleksfördelning SS-EN 933-1

Gränslinje

Först.lager Belagd väg enligt TDOK 2013:0530



Provresultat Kommentar	Medel- värde	Fraktion (mm)	Notering
SS-EN 933-1 Kornstorleksfördelning Tvättning och siktning			Ort och datum <b>LINKÖPING 2017-09-19</b> 
<p><i>Provresultatet avser endast till laboratoriet inkommit prov. (EA) = Ej ackrediterad metod. (E) = Enkelprov. Denna rapport får endast återges i sin helhet. Kundbilaga finns på <a href="http://www.ncc.se/lab/">www.ncc.se/lab/</a></i></p>			<p><b>LEIF SÖDERBERG, LAB CHEF</b> Digitalt utfärdad signatur</p>

**Bilaga D**

**Siktanalys 0/250 mm**

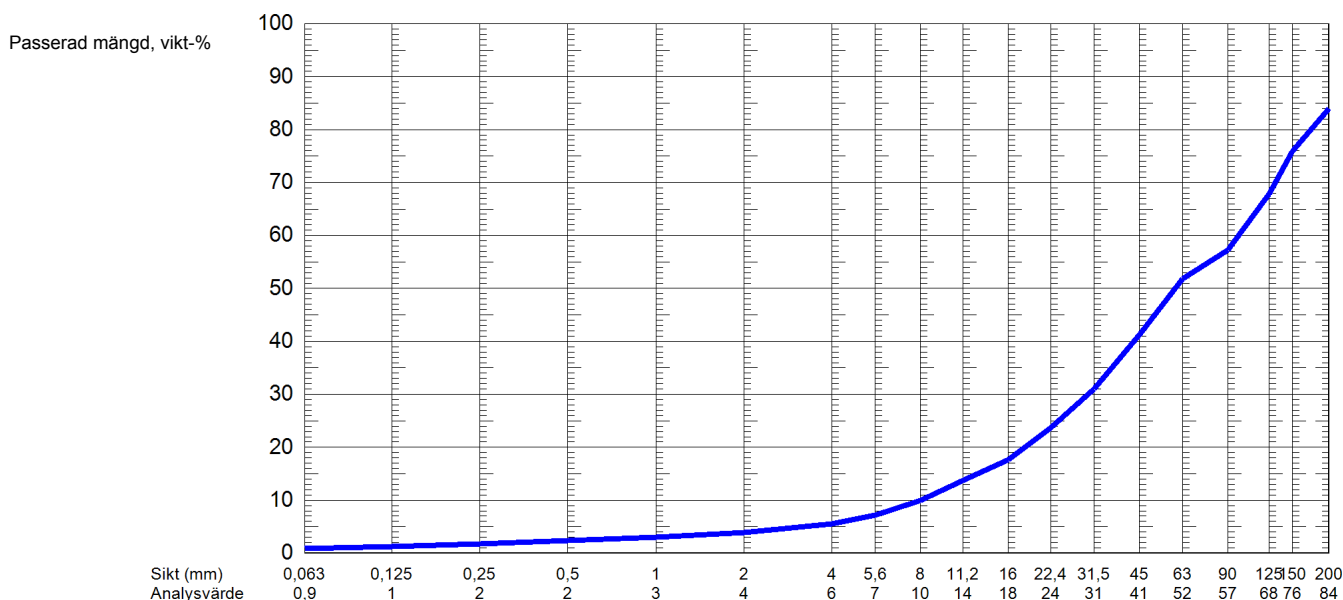
## TILLVERKNINGSKONTROLL Stenmaterial

Sidan 1 av 1

Beställare <b>NCC INDUSTRY AB</b>	Provtagningsdatum <b>2017-09-18</b>	Analys start <b>2017-09-18</b>
	Ankomstdatum <b>2017-09-18</b>	Analys slut <b>2017-09-19</b>
Produkt <b>0/250</b>	Referens nr <b>69402118</b>	Id-nummer
Leverantör <b>NCC INDUSTRY SKÄRLUNDA</b>	Provtagningsplats	
Entreprenör	Provtagare <b>TOMAS SJÖBERG</b>	
Objekt	Märkning	

### Kornstorleksfördelning SS-EN 933-1

Gränslinje



Provresultat Kommentar	Medel- värde	Fraktion (mm)	Notering
SS-EN 933-1 Kornstorleksfördelning Tvättning och siktning			<p>Ort och datum <b>LINKÖPING 2017-09-19</b></p> <p><b>LEIF SÖDERBERG, LAB CHEF</b> Digitalt utfärdad signatur</p>
<p><i>Provresultatet avser endast till laboratoriet inkommit prov. (EA) = Ej ackrediterad metod. (E) = Enkelprov. Denna rapport får endast återges i sin helhet. Kundbilaga finns på <a href="http://www.ncc.se/lab/">www.ncc.se/lab/</a></i></p>			

**Bilaga E**

**Siktanalys morän**



Projekt: **Ostänken jvg, Norrköping**

Datum: 2017-09-29

Uppdragsnr: D7669

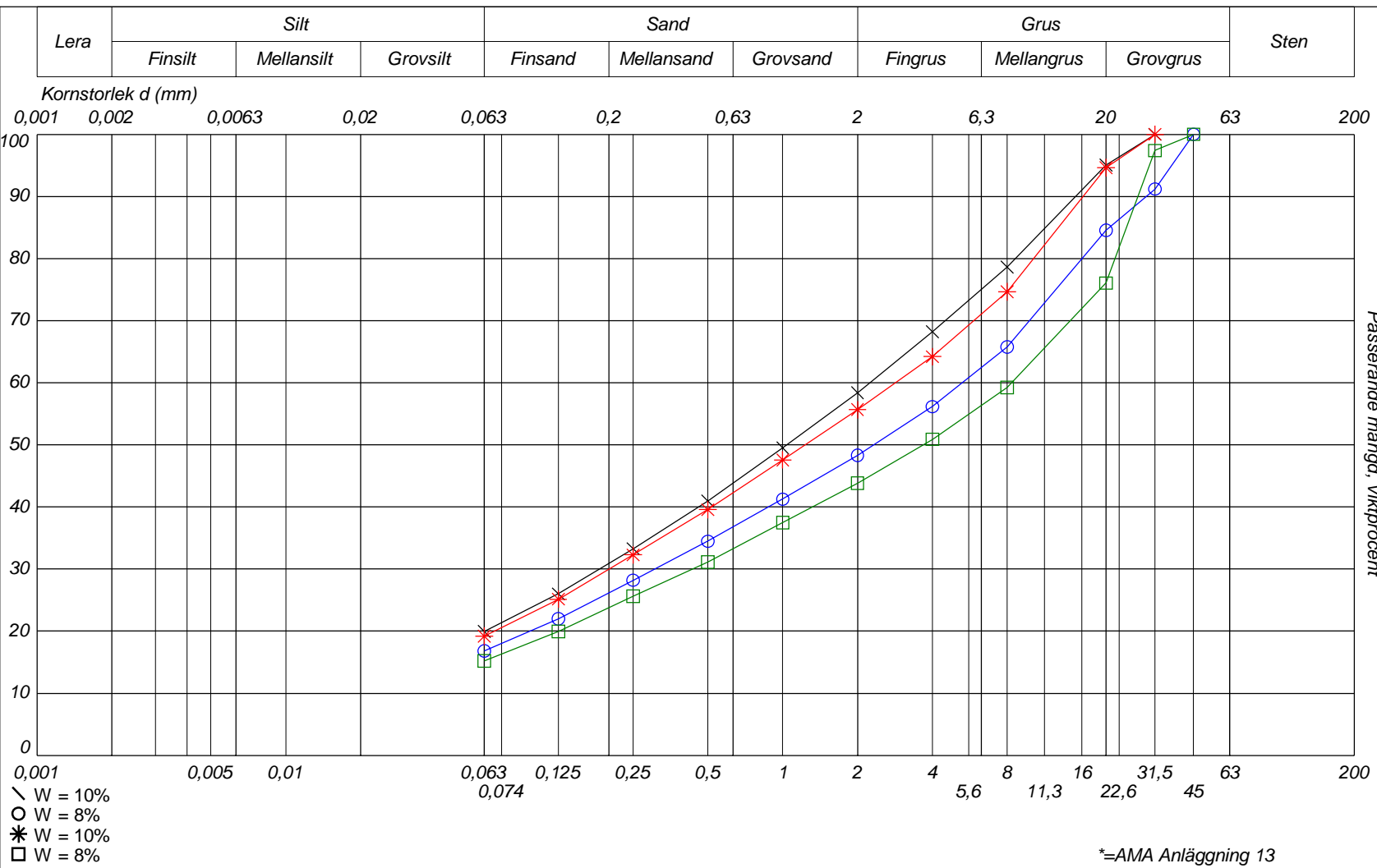
Provtagningsdatum:

Löp-nr: 31668

Uppdragsgivare: KTH, Stockholm

Gransk./Sign: *Bolv*

Passerande mängd, vikprocent



Sektion	Prov-beteckning	Djup (m)	Gäller mellan (m)	Benämning	Siktat Prov (g)	Glödgn.-förlust %	Mtrl % > mm	Tjäl-farlighet	d10	d60	d90
A121				Sandig grusig siltig MORÄN	1334			3B/2*	2,240	15,085	
A122				Sandig siltig GRUSMORÄN	1578			3B/2*	5,278	29,039	
A221				Sandig grusig siltig MORÄN	1360			3B/2*	2,845	16,176	
A222				Sandig siltig GRUSMORÄN	1908			3B/2*	8,345	26,919	

Projekt: **Ostänken jvg, Norrköping**

Datum: 2017-09-29

Uppdragsnr: D7669

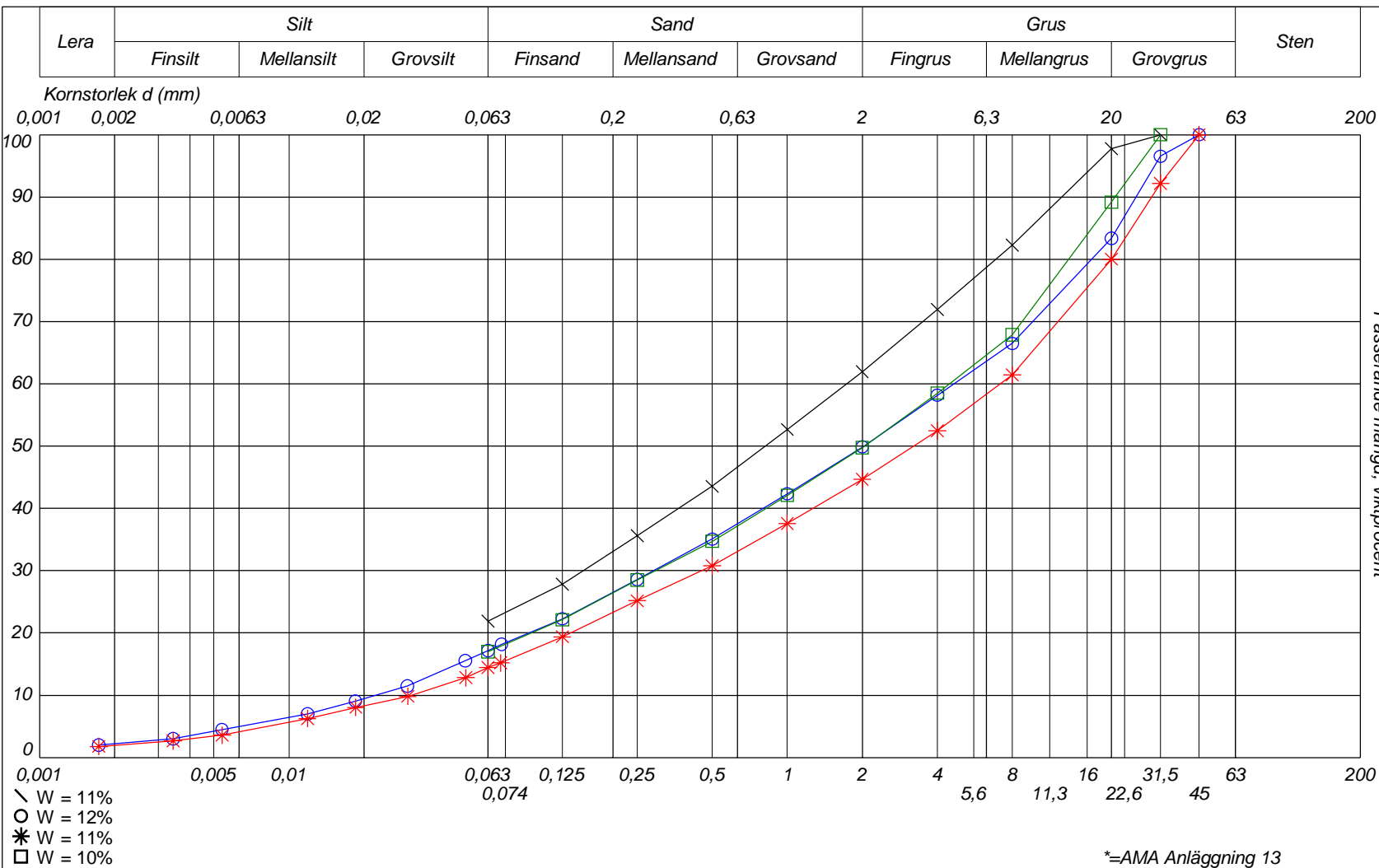
Provtagningsdatum:

Löp-nr: 31668

Uppdragsgivare: KTH, Stockholm

Gransk./Sign:

Passerande mängd, vikprocent



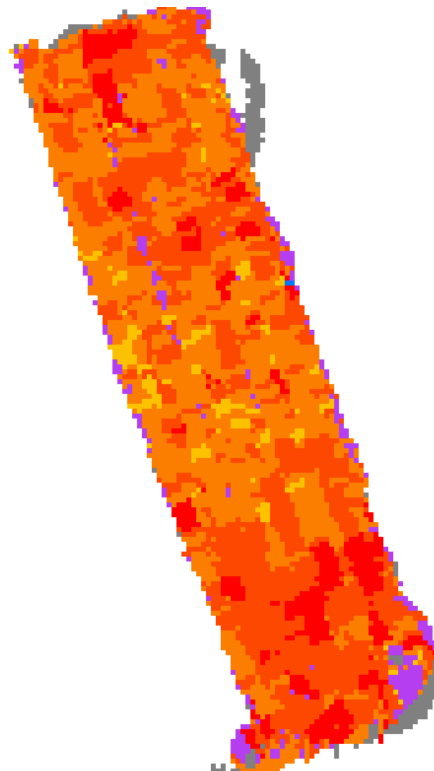
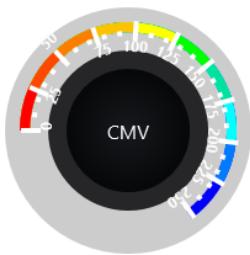
Sektion Borrhål	Prov- beteckning	Djup (m)	Gäller mellan (m)	Benämning	Siktat Prov (g)	Glödgn.- förlust %	Mtrl % > mm	Tjäl- farlighet	d10	d60	d90
B121	\			Grusig sandig siltig MORÄN	1348			3B/2*		1,730	12,632
B122	○			Sandig siltig GRUSMORÄN	1939			3B/2*	0,022	4,659	25,149
B221	*			Sandig GRUSMORÄN	2361			2/1*	0,031	7,169	29,053
B222	□			Sandig siltig GRUSMORÄN	2319			3B/2*		4,465	20,703

**Bilaga F**

**Packmätarvärde terrass**

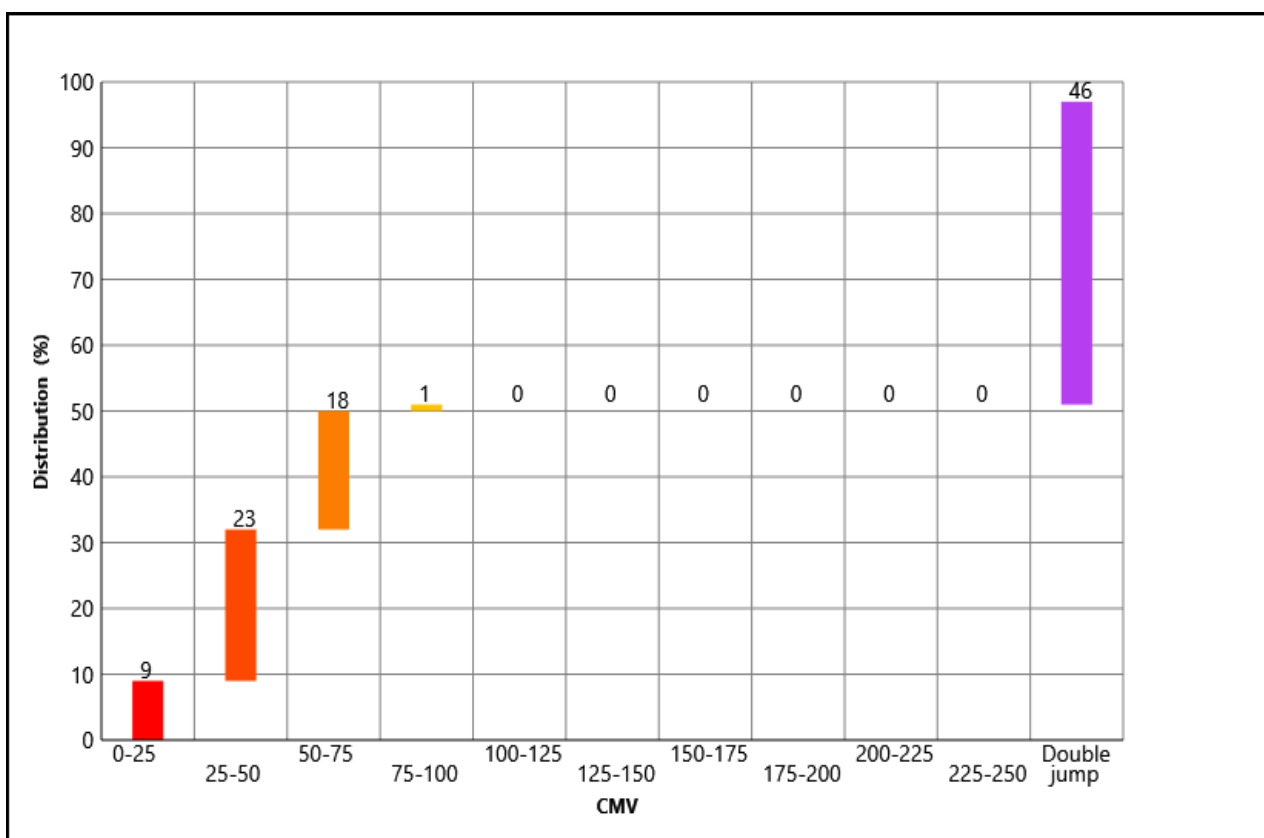
<i>Nord-koordinat, m</i> 6502616 - 6502676	<i>Ost-koordinat, m</i> 132992.4 - 133027.2	<i>Area, m<sup>2</sup></i> 988
<i>Material</i> Soil	<i>Nivå under färdig yta, m</i> 0	<i>Datum</i> 2017-09-07 / 2017-09-07
<i>Maskin</i> Dynapac CA1500D - 018507	<i>Amplitudinställning (High)</i> Statisk 91%, Hög 9%	<i>Frekvens, Hz (-)</i> Medel 24, Omfång 0-29
<i>Positionsnoggrannhet, m</i> Medel 0.91, Omfång 0.8-1.5	<i>Välthastighet, km/h (2)</i> Medel 5.3, Omfång 0.5-25.0	<i>Körriktning, %</i> Framåt 46, Bakåt 52

### Mapping av yta



Nord-koordinat, m 6502616 - 6502676	Ost-koordinat, m 132992.4 - 133027.2	Area, m <sup>2</sup> 988
Material Soil	Nivå under färdig yta, m 0	Datum 2017-09-07 / 2017-09-07
Maskin Dynapac CA1500D - 018507	Amplitudinställning (High) Statisk 91%, Hög 9%	Frekvens, Hz (-) Medel 24, Omfång 0-29
Positionsnoggrannhet, m Medel 0.91, Omfång 0.8-1.5	Välthastighet, km/h (2) Medel 5.3, Omfång 0.5-25.0	Körriktning, % Framåt 46, Bakåt 52

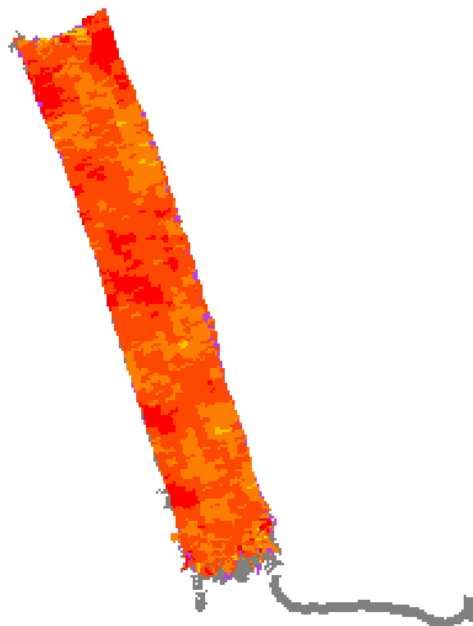
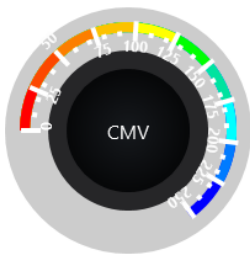
### Fördelning och statistik



	Medel, krav	Medel	Standardavvikelse	Medel-1.00stdev	Medel-1.28stdev	Medel-1.64stdev
CMV	-	0	-25	25	20	13

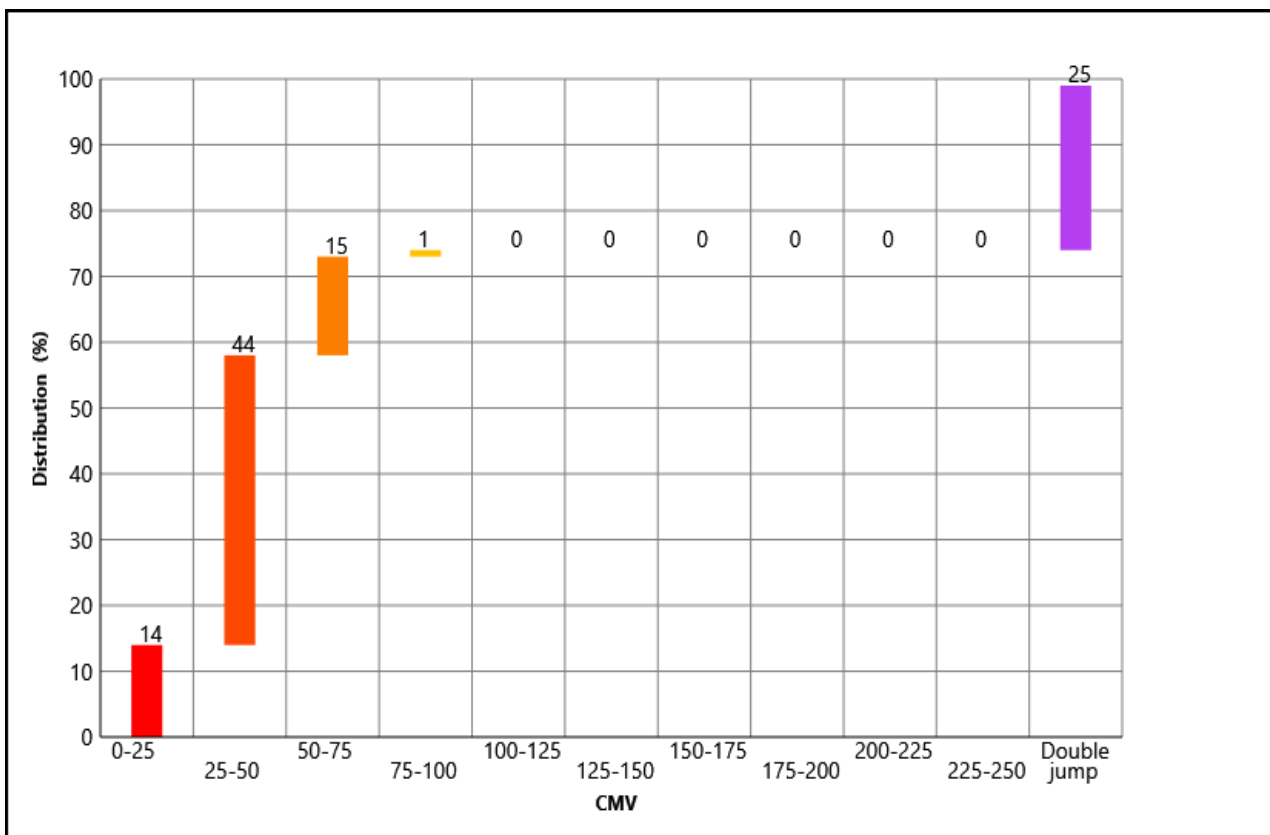
<i>Nord-koordinat, m</i> 6502601.2 - 6502701.2	<i>Ost-koordinat, m</i> 132964 - 133040	<i>Area, m<sup>2</sup></i> 1499
<i>Material</i> Soil	<i>Nivå under färdig yta, m</i> 0	<i>Datum</i> 2017-09-06 / 2017-09-07
<i>Maskin</i> Dynapac CA1500D - 018507	<i>Amplitudinställning (High)</i> Statisk 93%, Hög 7%	<i>Frekvens, Hz (-)</i> Medel 24, Omfång 0-31
<i>Positionsnoggrannhet, m</i> Medel 1.18, Omfång 0.8-4.0	<i>Välthastighet, km/h (2)</i> Medel 4.4, Omfång 0.5-7.0	<i>Körriktning, %</i> Framåt 47, Bakåt 51

### Mapping av yta



Nord-koordinat, m 6502601.2 - 6502701.2	Ost-koordinat, m 132964 - 133040	Area, m <sup>2</sup> 1499
Material Soil	Nivå under färdig yta, m 0	Datum 2017-09-06 / 2017-09-07
Maskin Dynapac CA1500D - 018507	Amplitudinställning (High) Statisk 93%, Hög 7%	Frekvens, Hz (-) Medel 24, Omfång 0-31
Positionsnoggrannhet, m Medel 1.18, Omfång 0.8-4.0	Välthastighet, km/h (2) Medel 4.4, Omfång 0.5-7.0	Körriktning, % Framåt 47, Bakåt 51

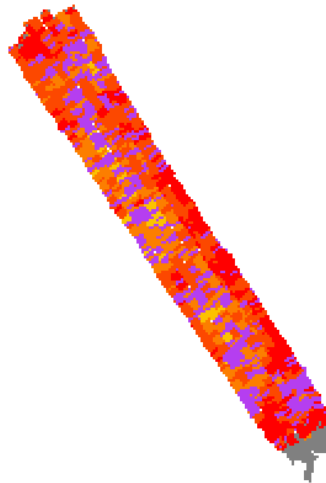
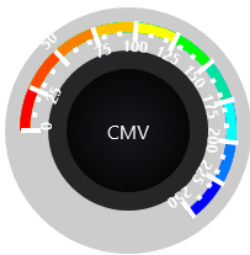
### Fördelning och statistik



	Medel, krav	Medel	Standardavvikelse	Medel-1.00stdev	Medel-1.28stdev	Medel-1.64stdev
CMV	-	0	-24	24	20	14

<i>Nord-koordinat, m</i> 6502707.2 - 6502784.4	<i>Ost-koordinat, m</i> 132919.2 - 132971.6	<i>Area, m<sup>2</sup></i> 964
<i>Material</i> Soil	<i>Nivå under färdig yta, m</i> -0.9	<i>Datum</i> 2017-09-08 / 2017-09-08
<i>Maskin</i> Dynapac CA1500D - 018507	<i>Amplitudinställning (High)</i> Statisk 6%, Låg 94%	<i>Frekvens, Hz (-)</i> Medel 24, Omfång 0-41
<i>Positionsnoggrannhet, m</i> Medel 0.67, Omfång 0.6-0.7	<i>Välthastighet, km/h (2)</i> Medel 3.6, Omfång 0.5-5.4	<i>Körriktning, %</i> Framåt 9, Bakåt 89

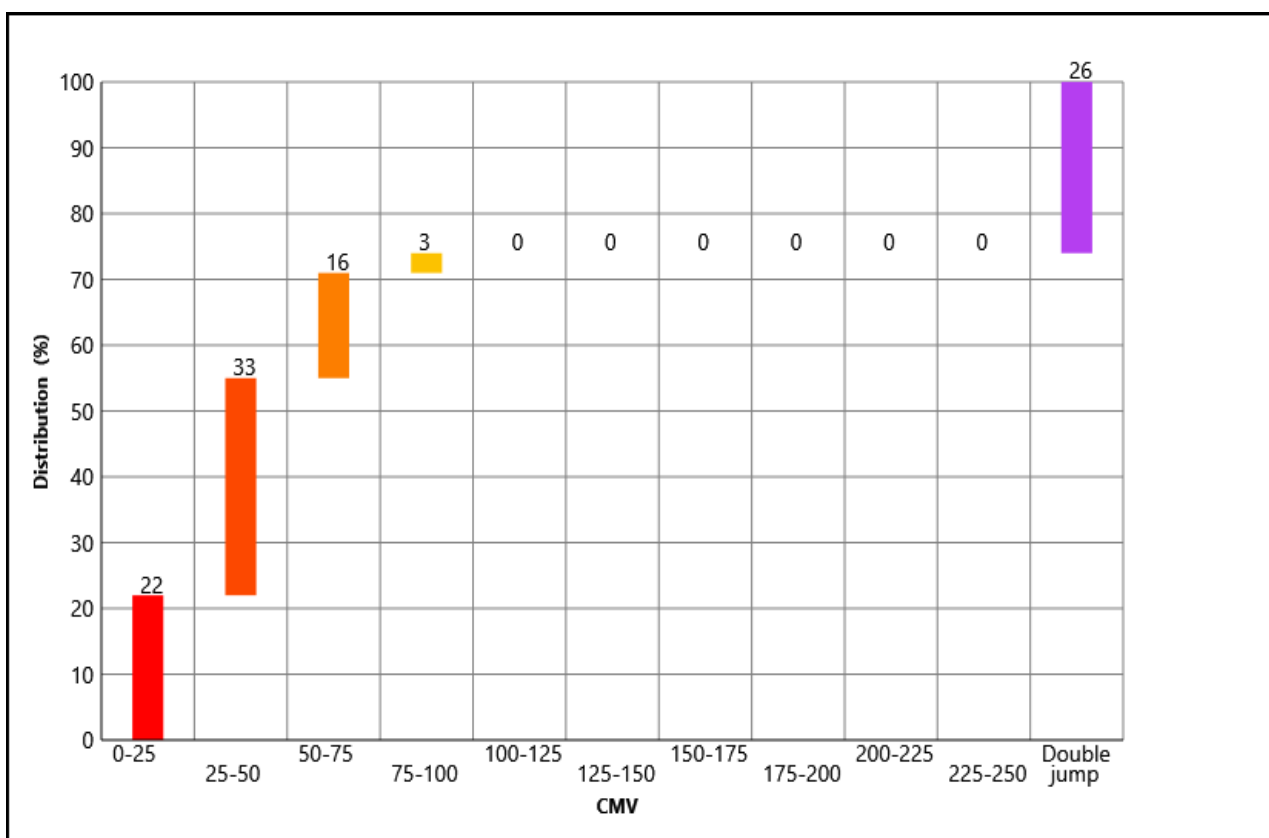
### Mappning av yta





Nord-koordinat, m 6502707.2 - 6502784.4	Ost-koordinat, m 132919.2 - 132971.6	Area, m <sup>2</sup> 964
Material Soil	Nivå under färdig yta, m -0.9	Datum 2017-09-08 / 2017-09-08
Maskin Dynapac CA1500D - 018507	Amplitudinställning (High) Statisk 6%, Låg 94%	Frekvens, Hz (-) Medel 24, Omfång 0-41
Positionsnoggrannhet, m Medel 0.67, Omfång 0.6-0.7	Välthastighet, km/h (2) Medel 3.6, Omfång 0.5-5.4	Körriktning, % Framåt 9, Bakåt 89

### Fördelning och statistik



	Medel, krav	Medel	Standardavvikelse	Medel-1.00stdev	Medel-1.28stdev	Medel-1.64stdev
CMV	-	0	-18	18	12	5

## Bilaga G

### Materialtjocklek

Tjocklek beräknad från närmaste inmätning på terrassyta (0-5 m avstånd från respektive sättningspunkt)

Tjocklek efter 32 överfarter

Yta	Material	Tjocklek (cm)	Standardavvikelse (cm)
A11	0/150	25,3	2,88
A21	0/150	25,3	3,19
A12	Morän	28,5	5,65
A22	Morän	24,3	5,15
B11	0/150	49,5	2,19
B21	0/150	47,5	1,42
B12	Morän	52,4	3,02
B22	Morän	51,4	5,14
B13	0/250	44,3	3,22
B23	0/250	45,9	2,69
C11	0/150	100,5	4,48
C21	0/150	102,5	6,15
C13	0/250	96	5,13
C23	0/250	95,8	5,26

<i>Med frekvensstyrning</i>		Tjocklek (cm)		
Nominell tjocklek:		30	50	90
Material				
0/150		25,3	49,5	100,5
0/250			44,3	96
Morän		28,5	52,4	

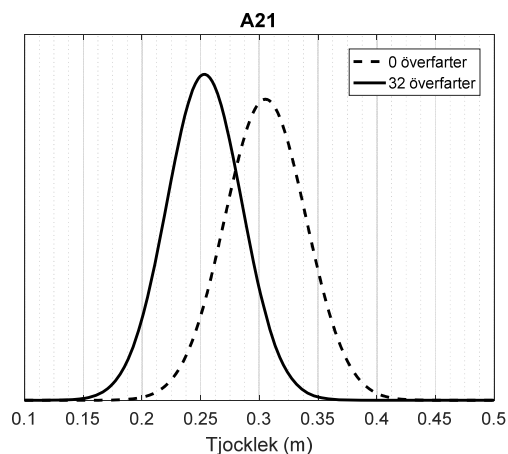
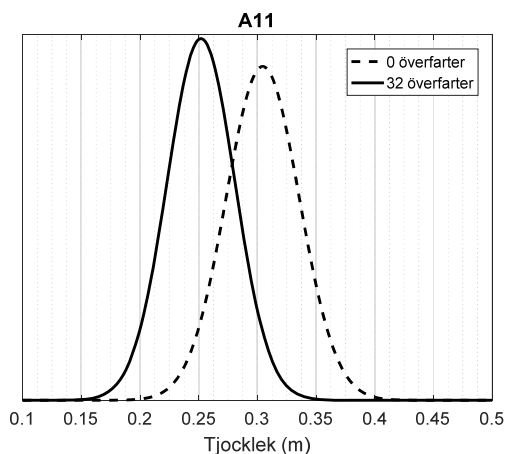
<i>Utan frekvensstyrning</i>		Tjocklek (cm)		
Nominell tjocklek:		30	50	90
Material				
0/150		25,3	47,5	102,5
0/250			45,9	95,8
Morän		24,3	51,4	

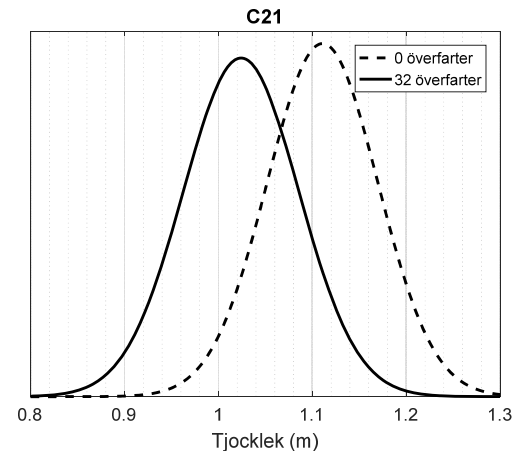
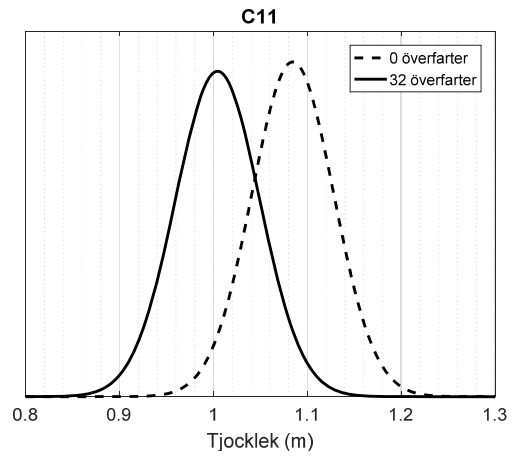
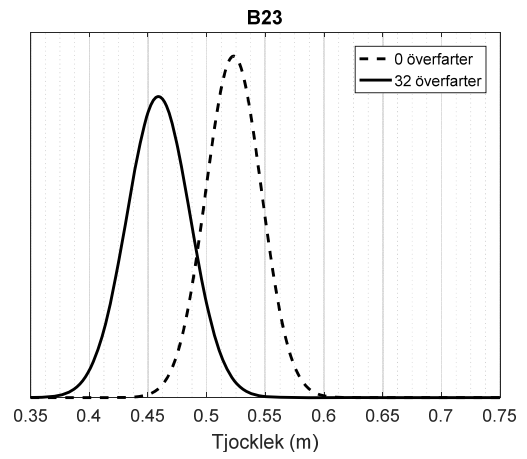
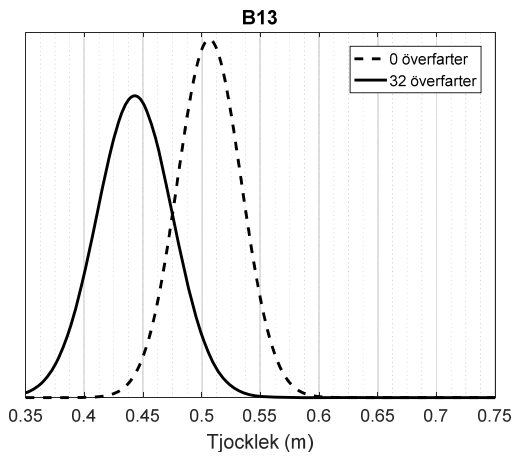
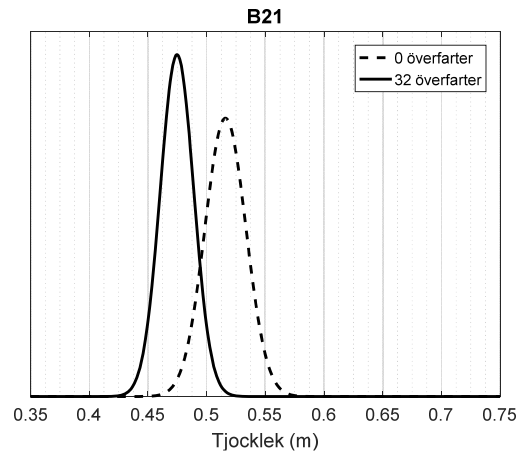
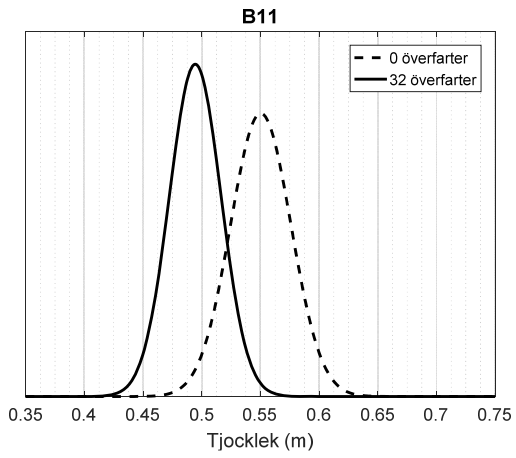
Medelvärde krossmaterial 25,3 46,8 98,7

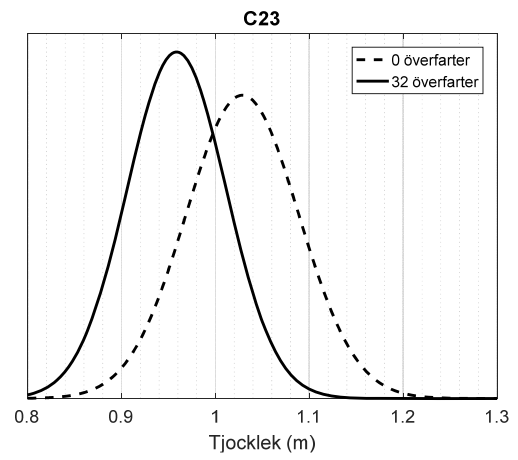
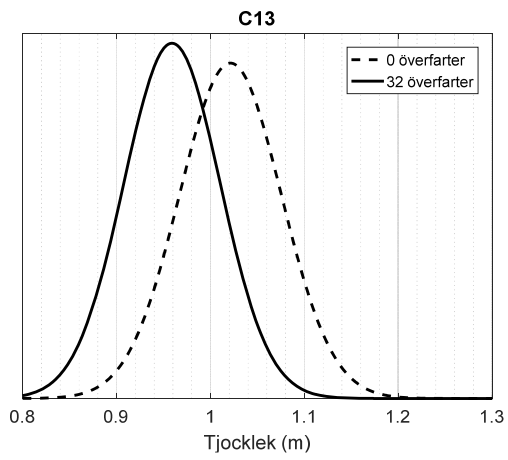
Nominell tjocklek (cm):		30	50	90
<i>Med frekvensstyrning</i>				
Material	Standardavvikelse (cm)			
0/150	2,88	2,19	4,48	
0/250		3,22	5,13	
Morän	5,65	3,02		

Nominell tjocklek (cm):		30	50	90
<i>Utan frekvensstyrning</i>				
Material	Standardavvikelse (cm)			
0/150	3,19	1,42	6,15	
0/250		2,69	5,26	
Morän	5,15	5,14		

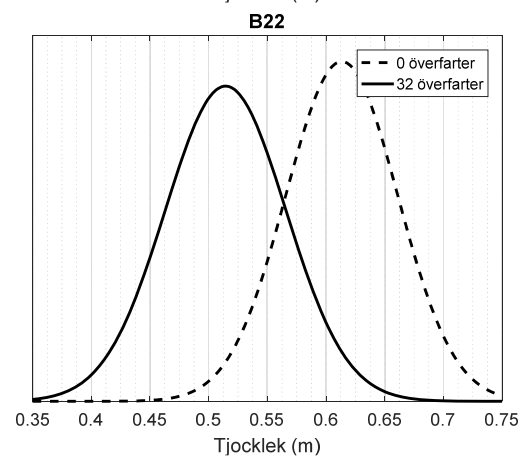
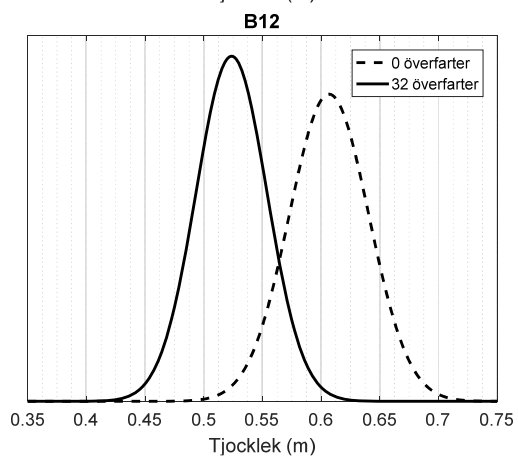
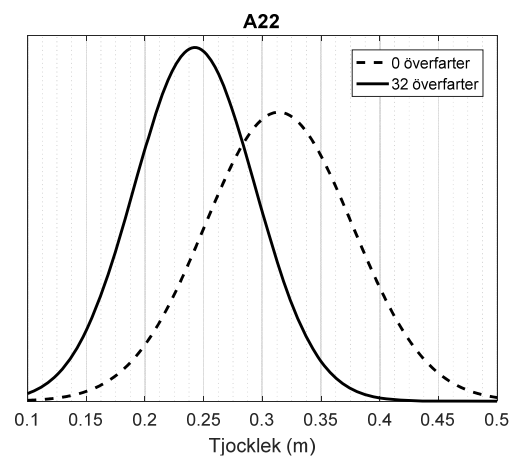
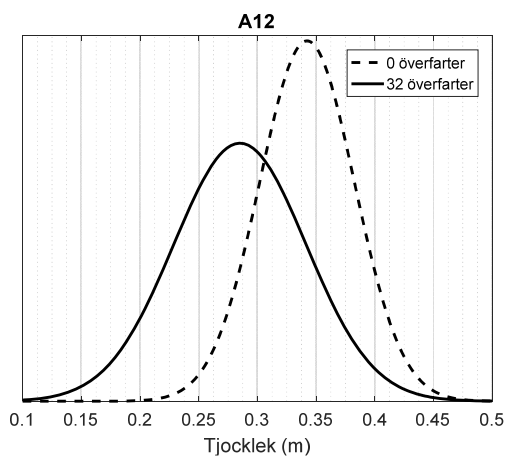
### Krossmaterial







## Morän

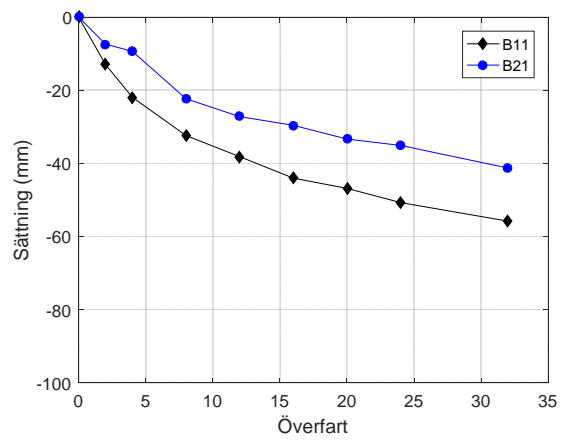
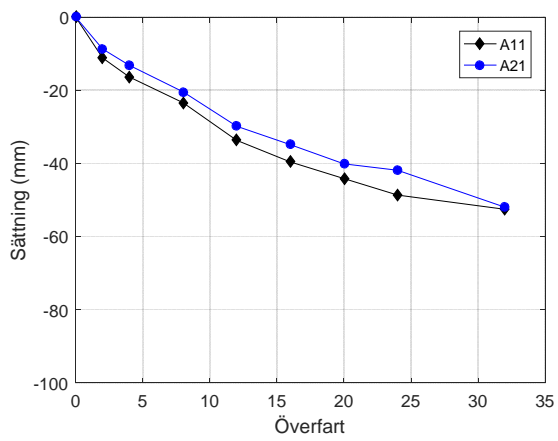
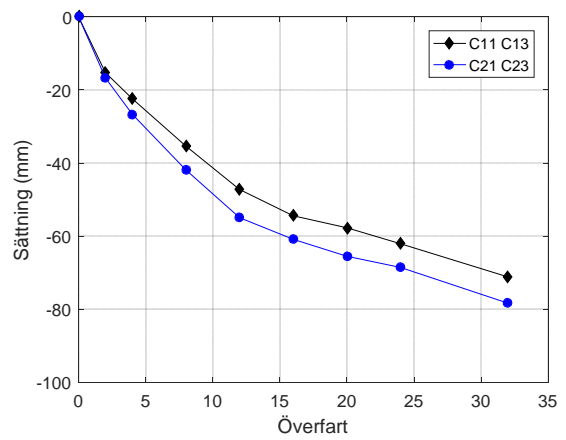
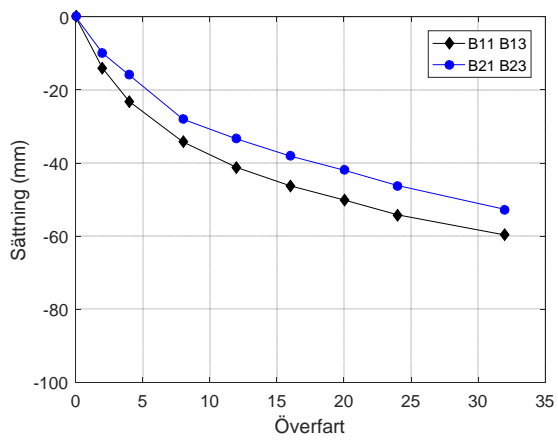
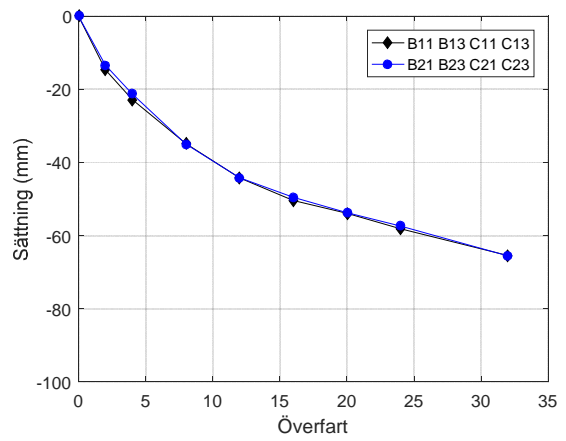
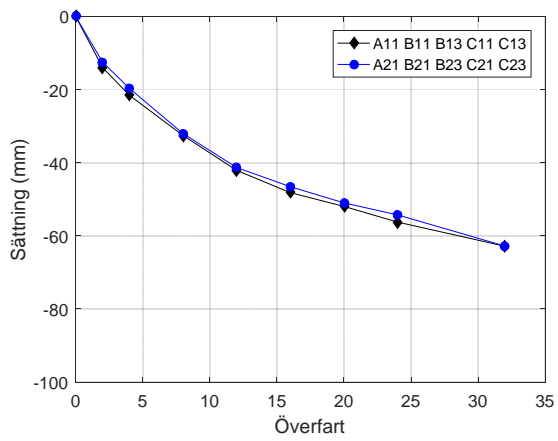


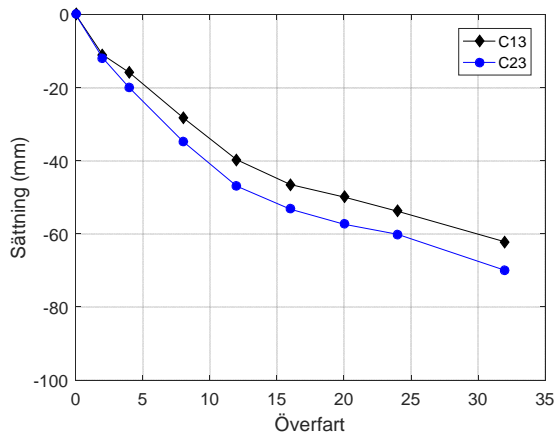
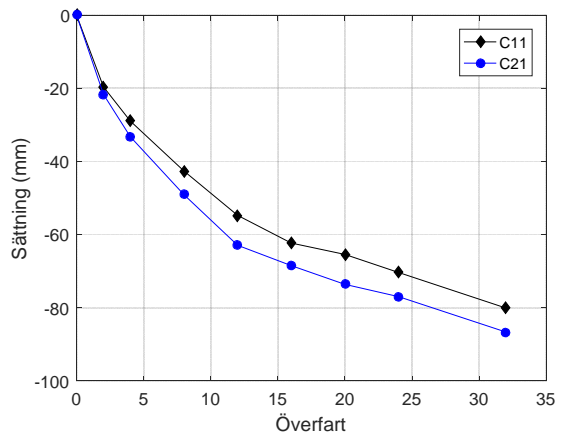
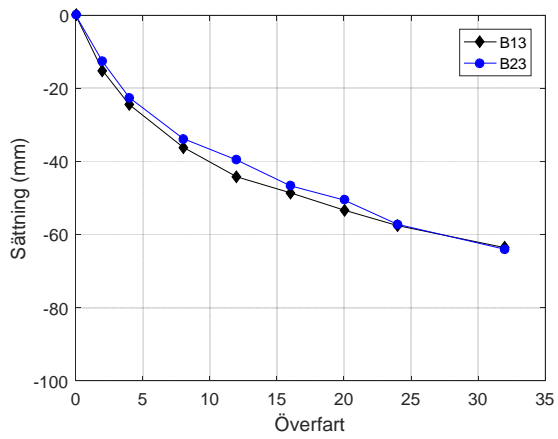
# Bilaga H

## Sättningsmätningar

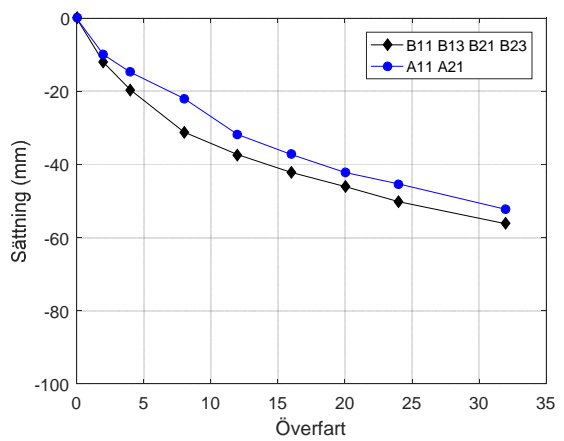
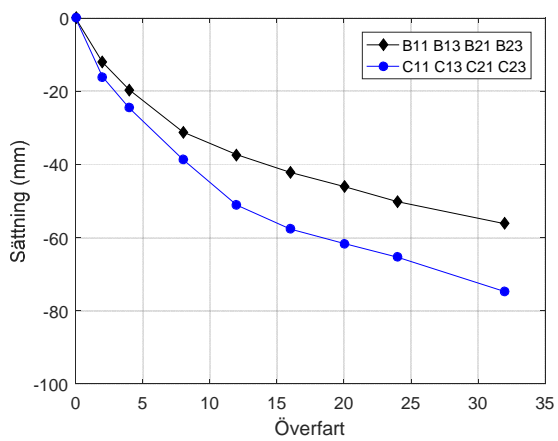
### Krossmaterial

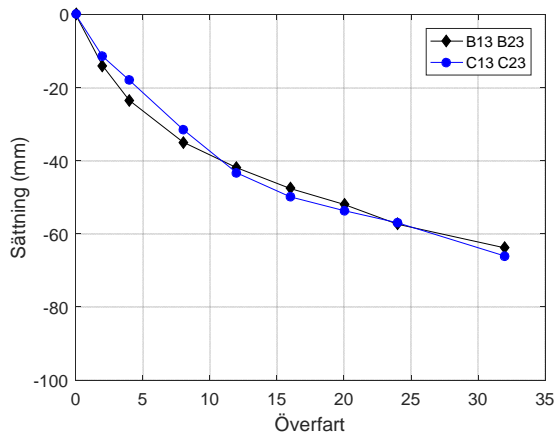
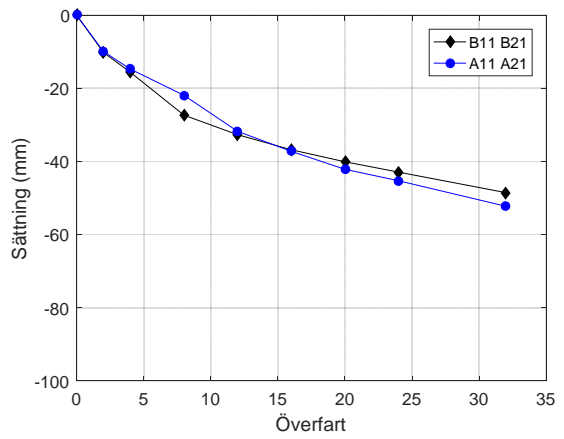
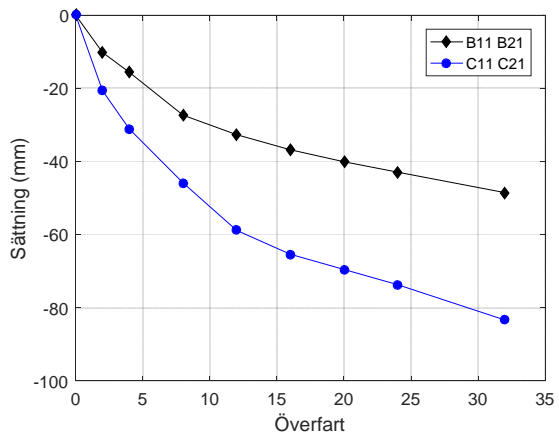
#### Inverkan av frekvensstyrning



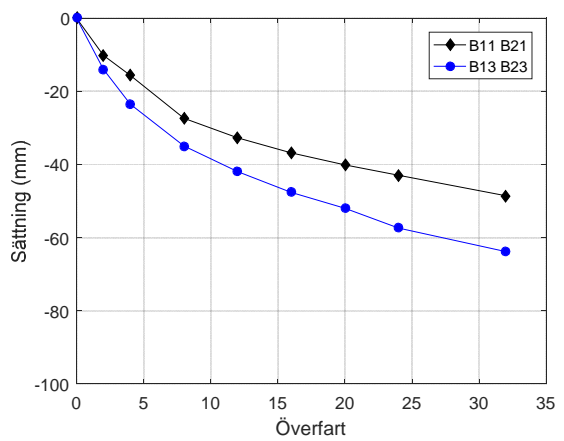
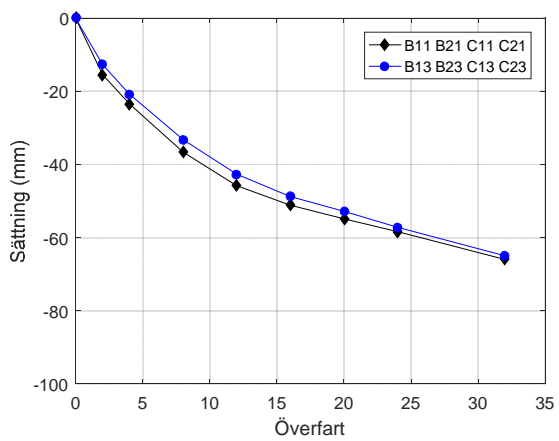


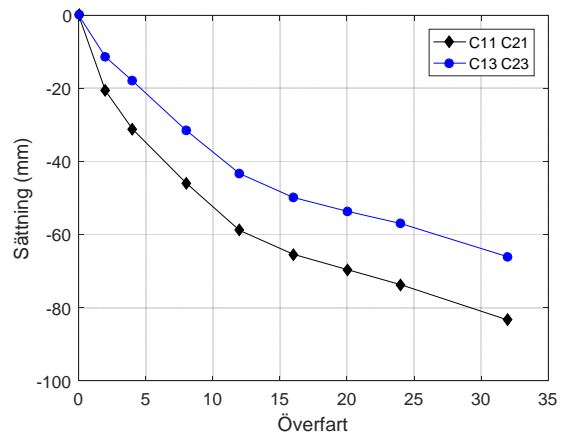
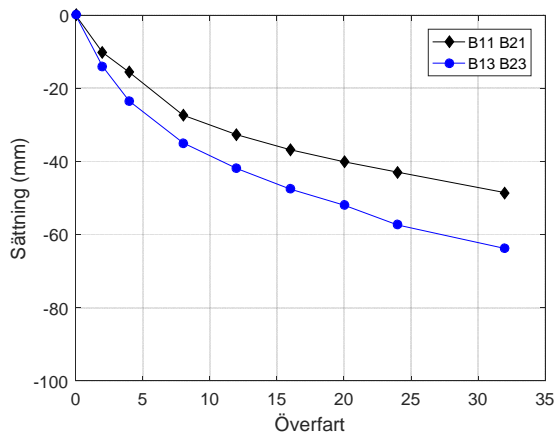
### Inverkan av lagertjocklek



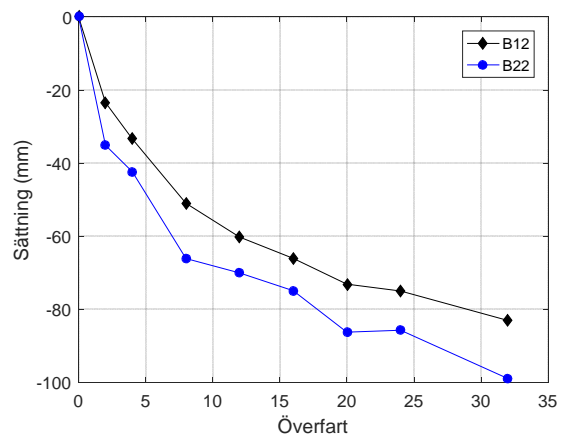
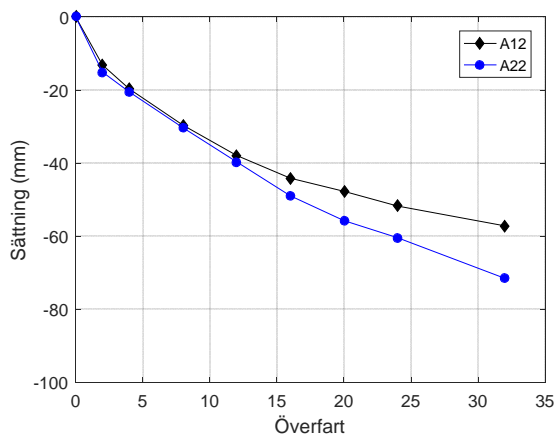


### Inverkan av materialfraktion





## Morän



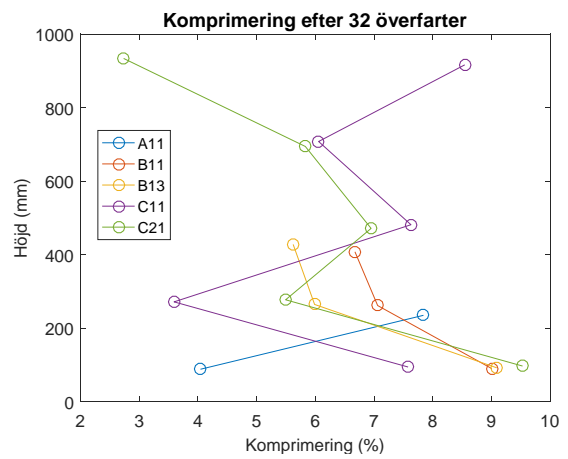
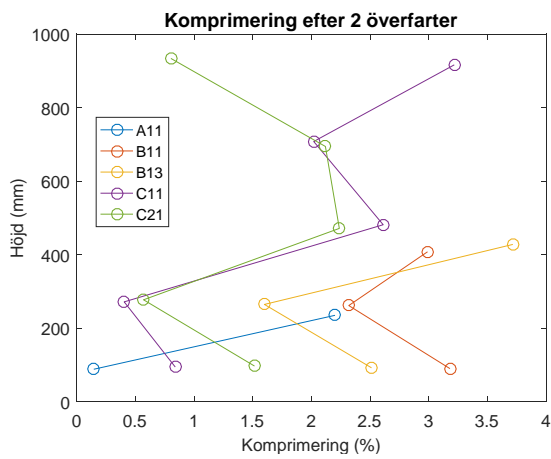
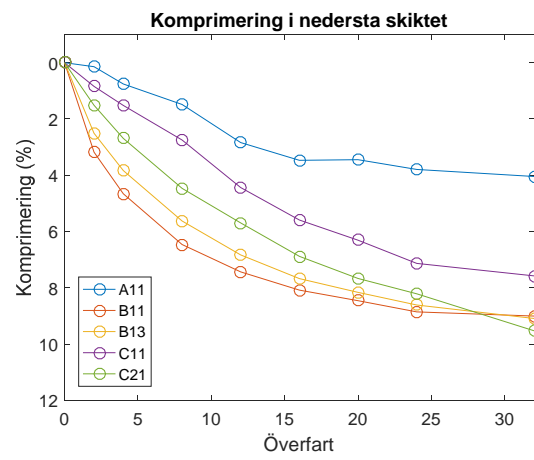
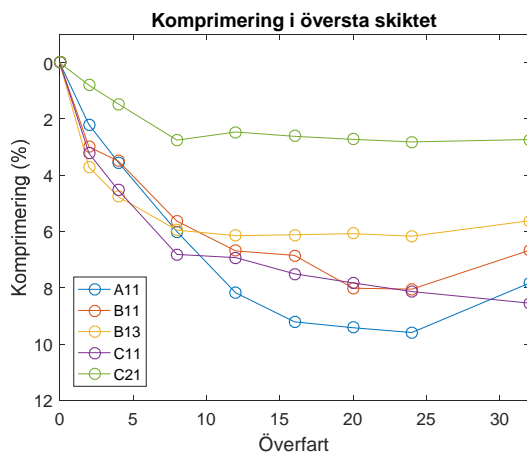
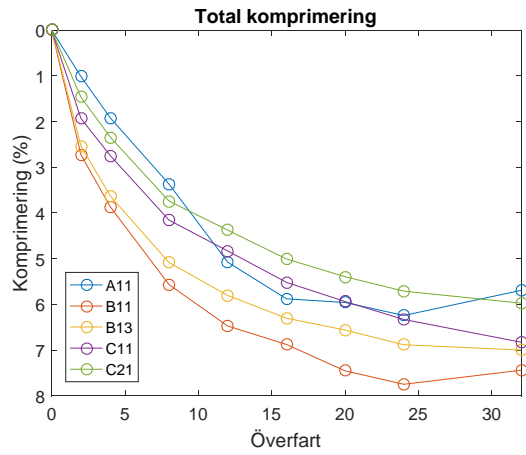


# Bilaga I

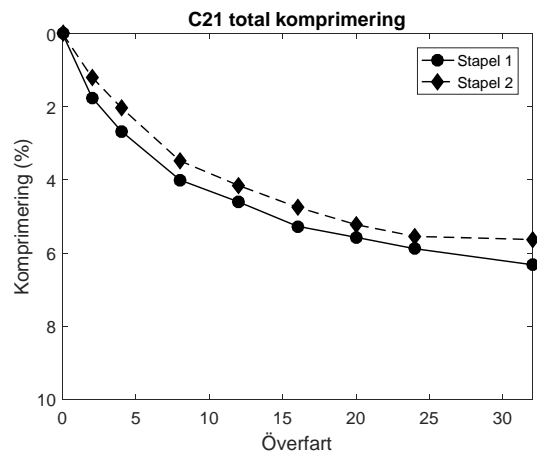
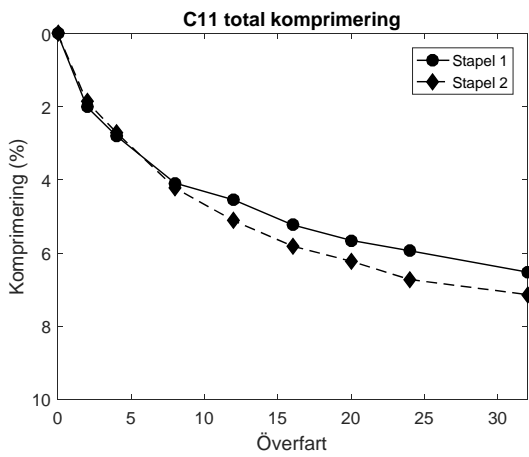
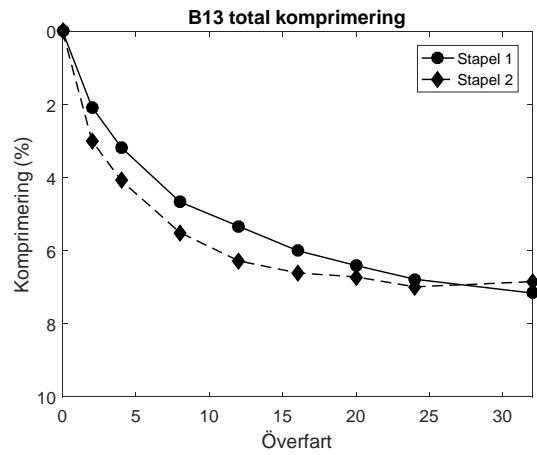
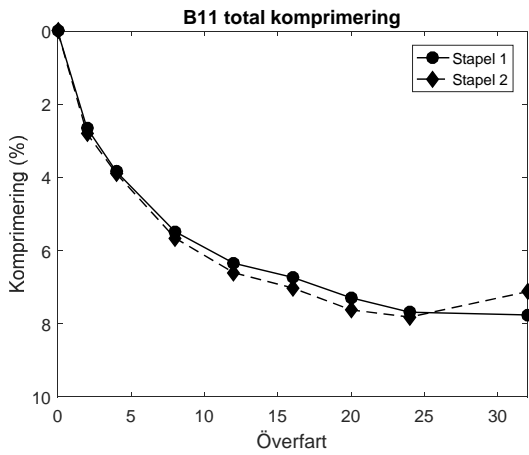
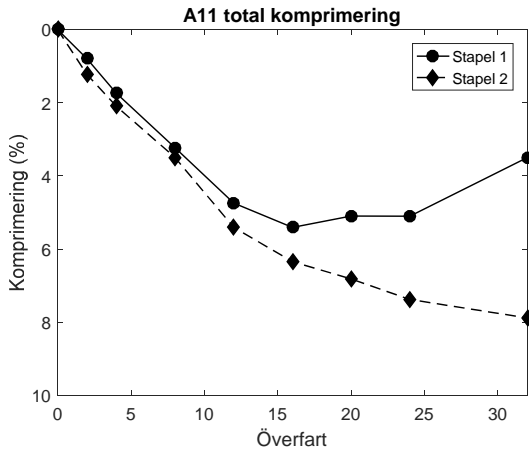
## Resultat från EMU-spolar

### Krossmaterial

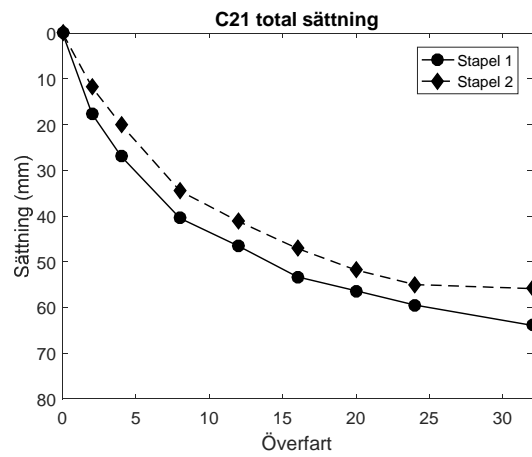
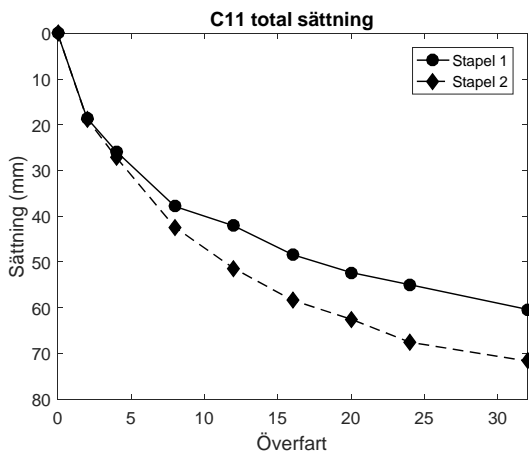
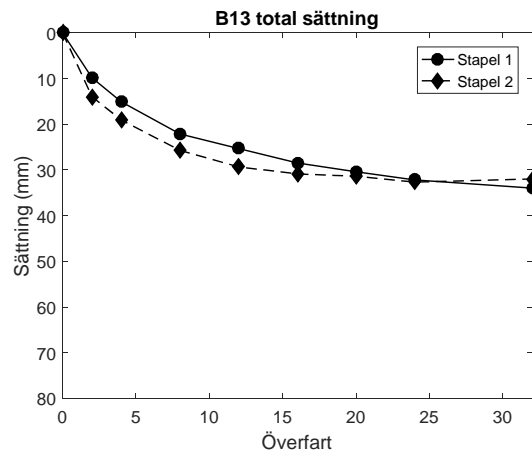
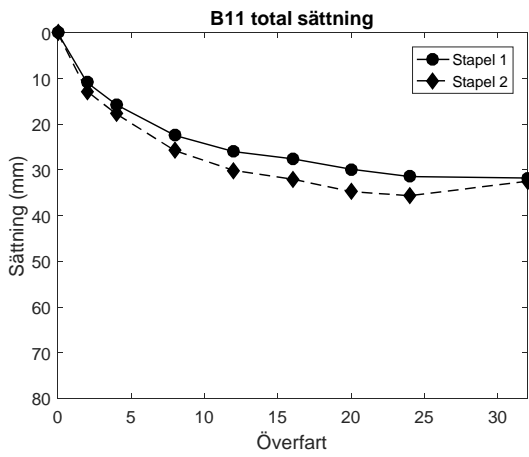
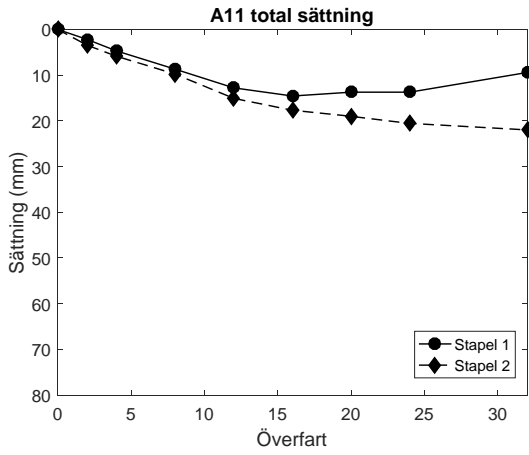
#### Alla ytor



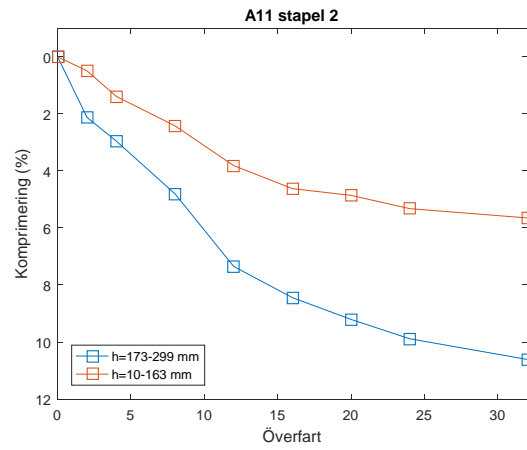
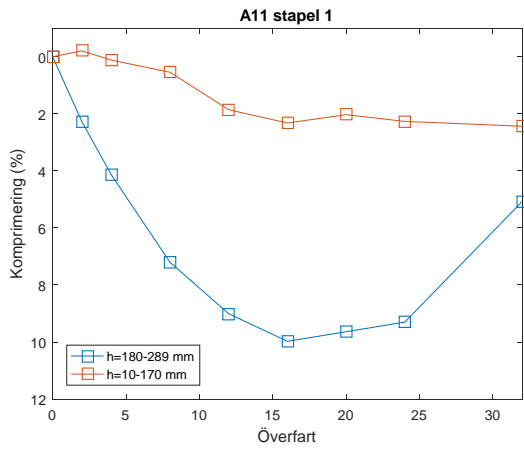
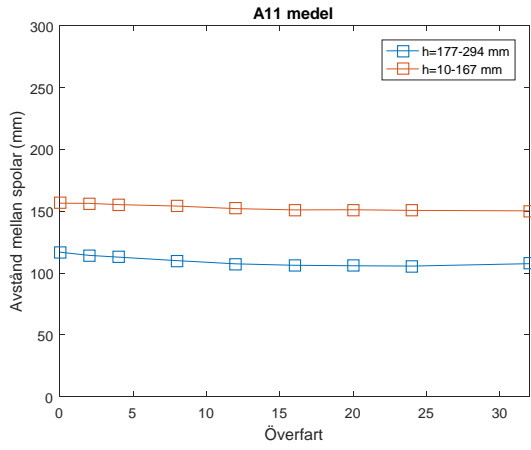
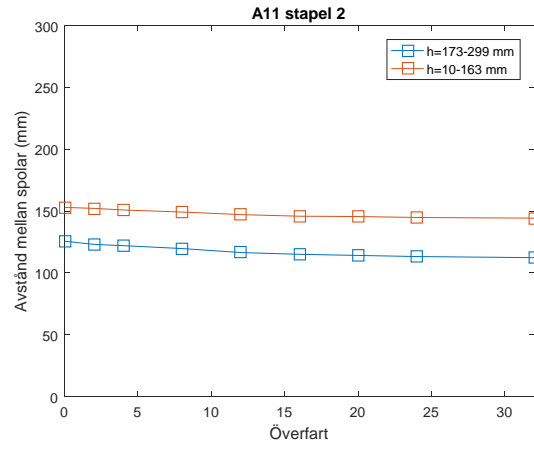
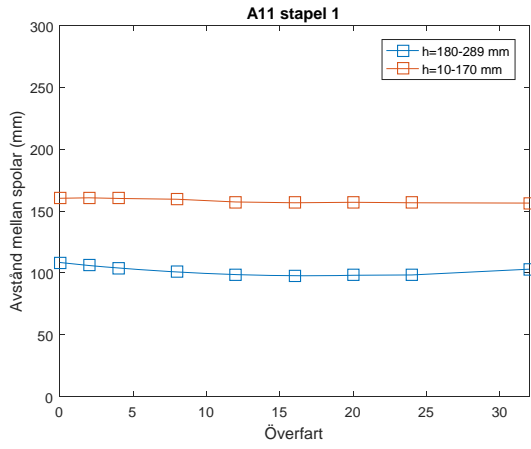
# Total komprimering

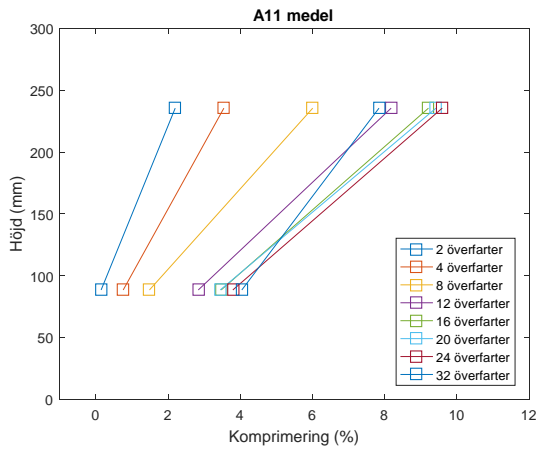
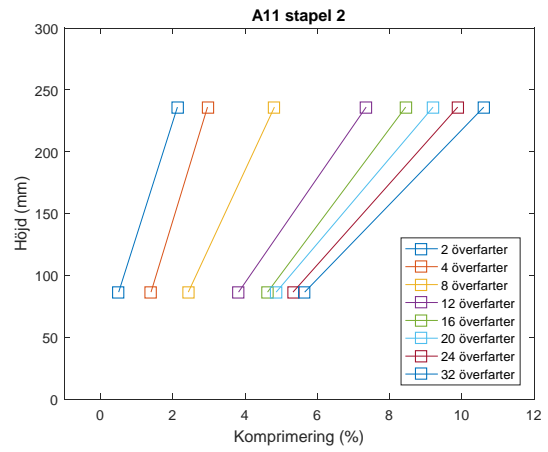
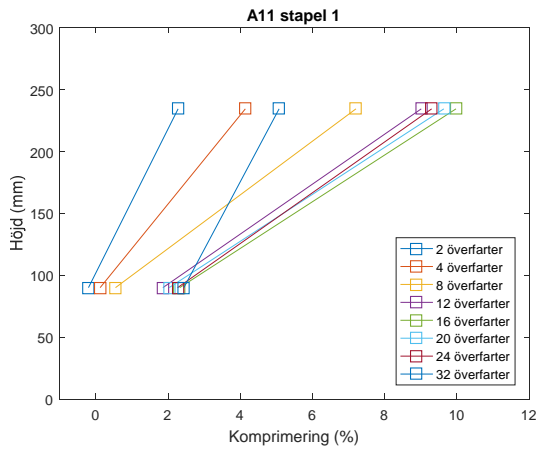
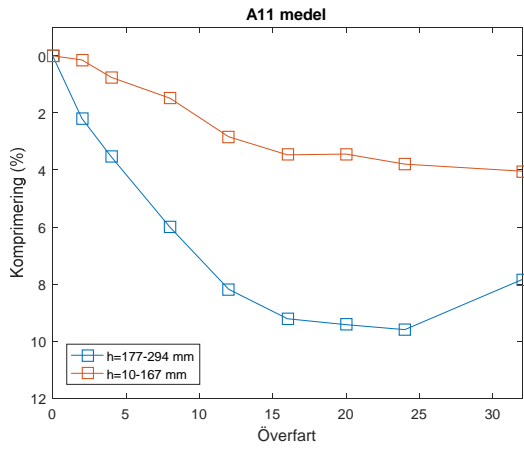


# Total sättning

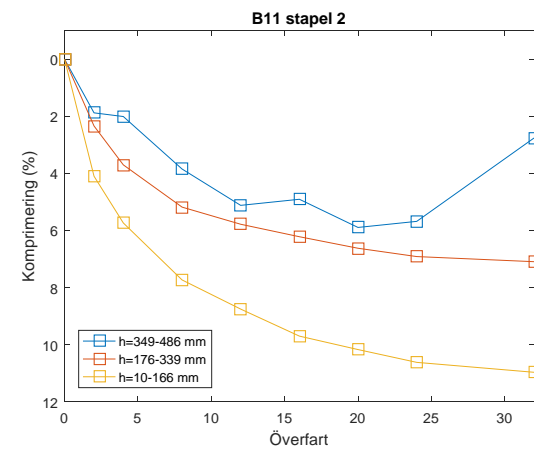
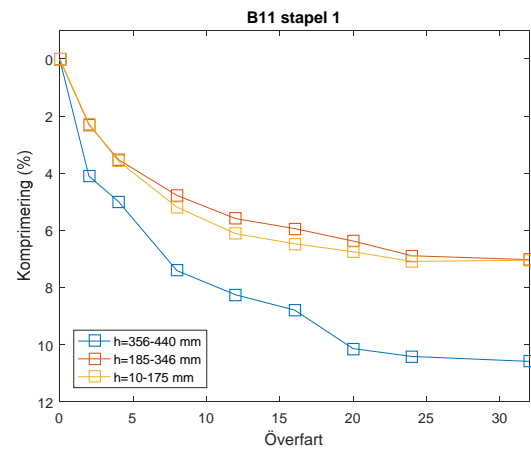
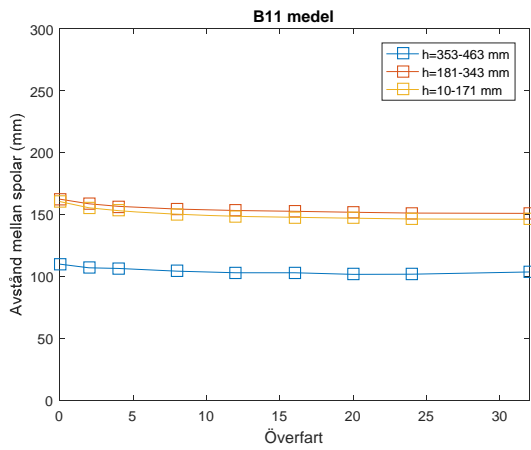
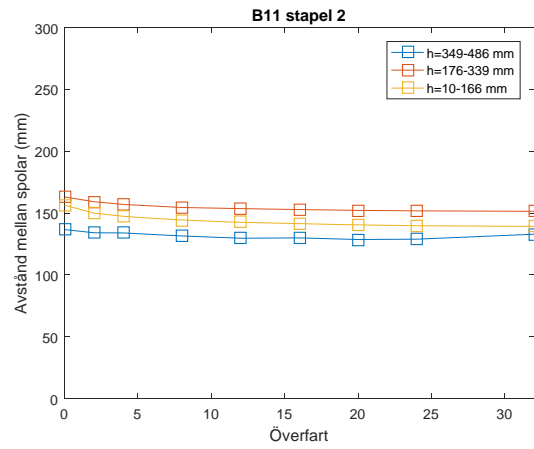
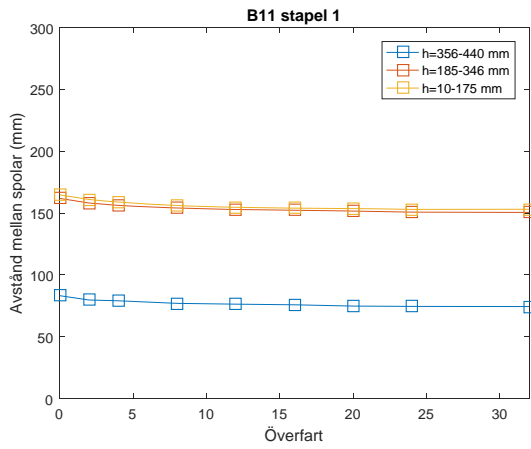


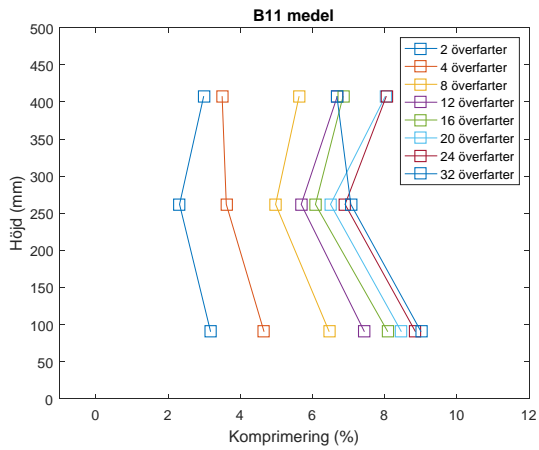
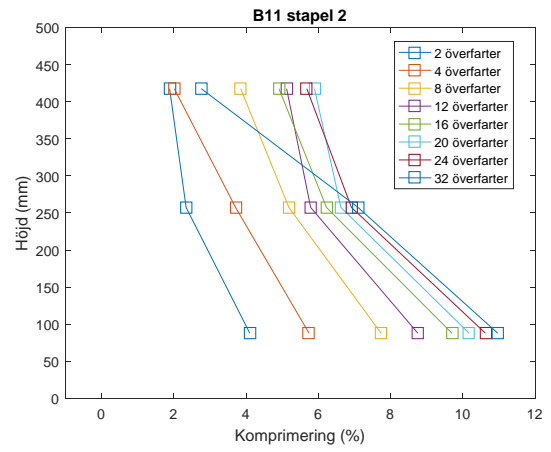
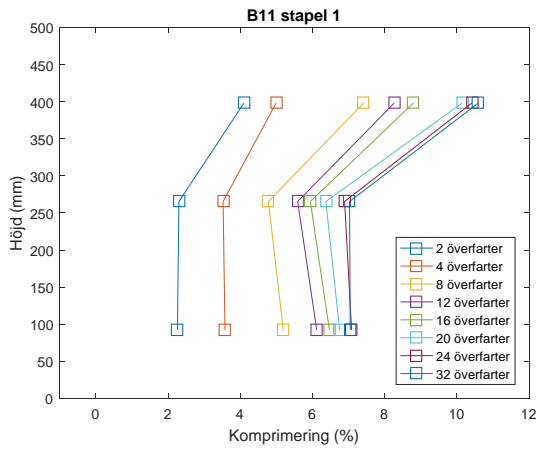
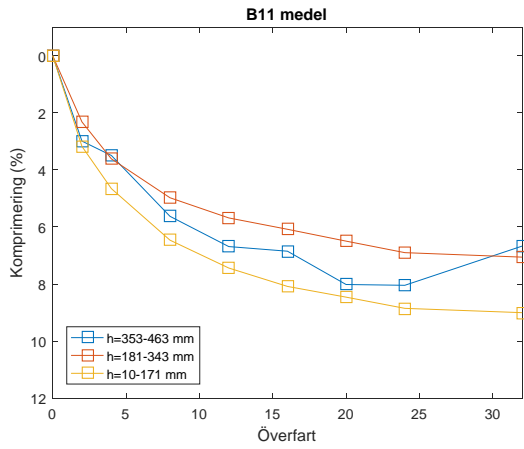
# A11



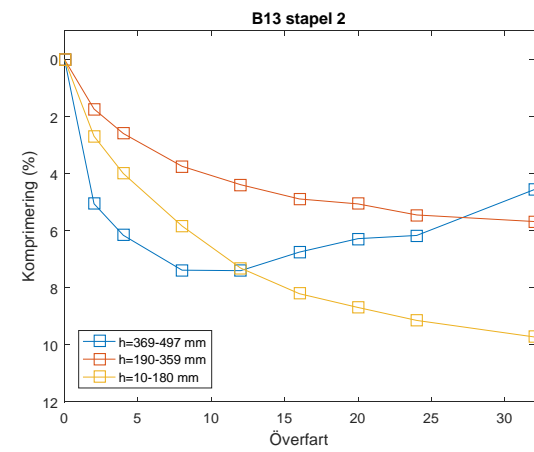
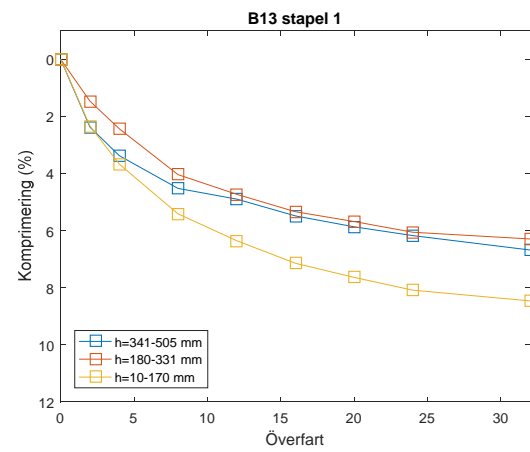
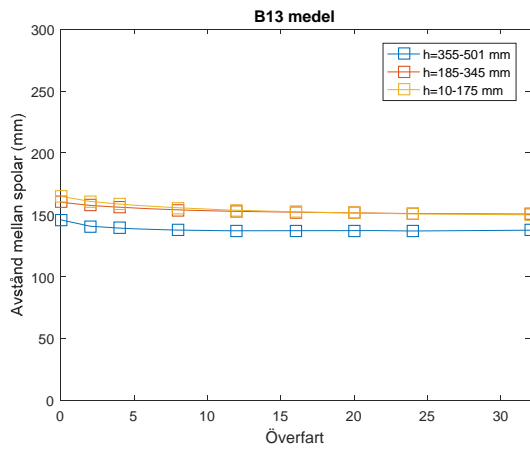
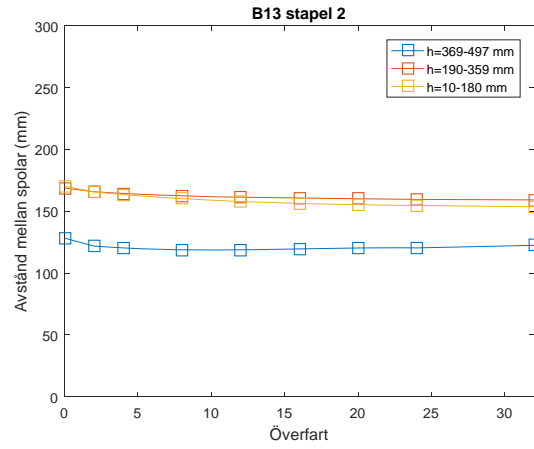
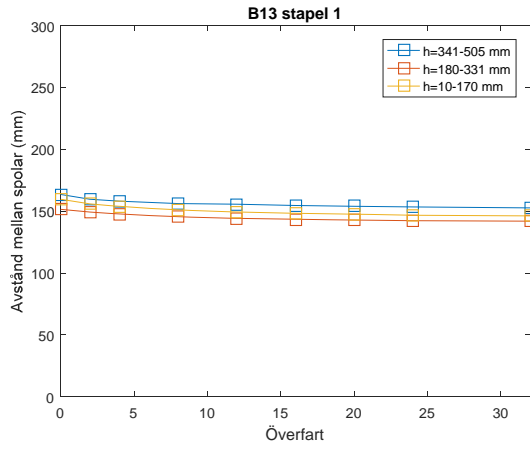


# B11





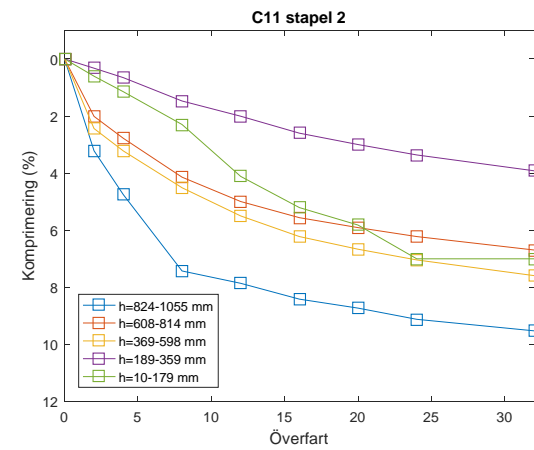
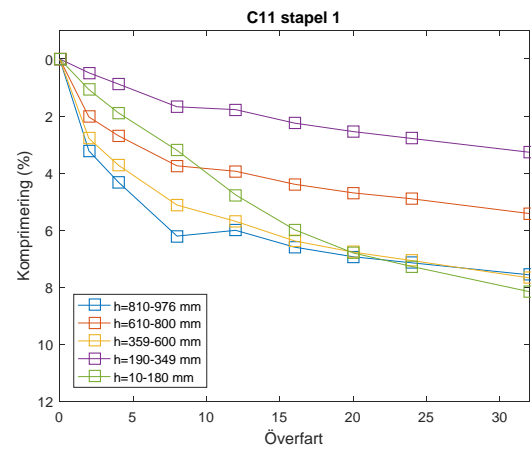
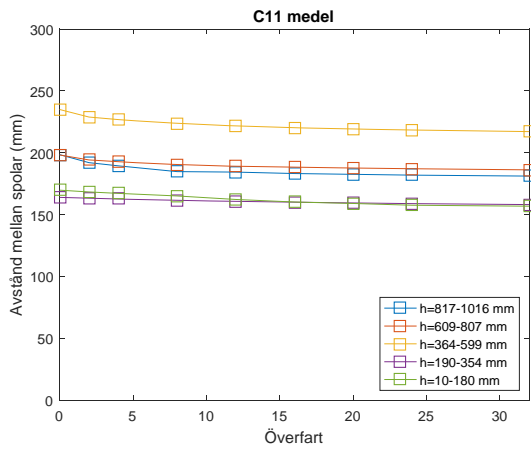
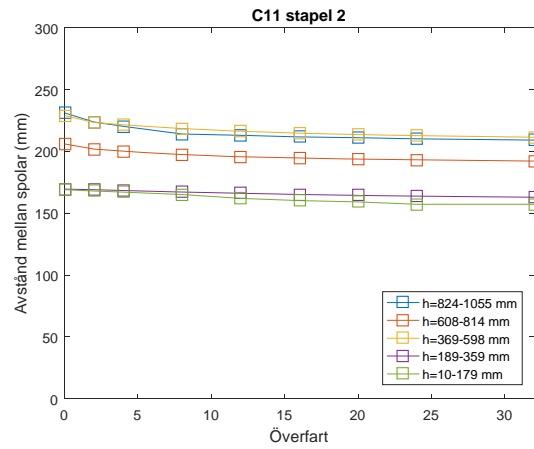
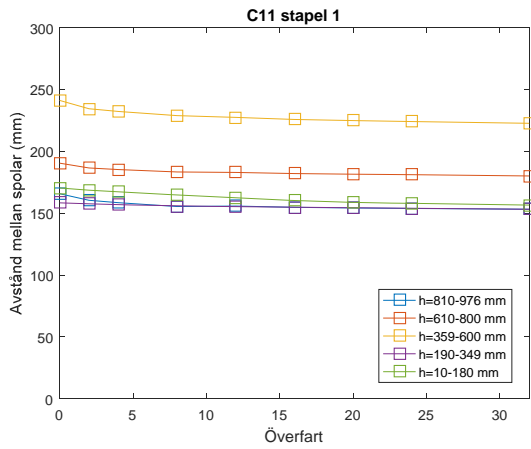
# B13

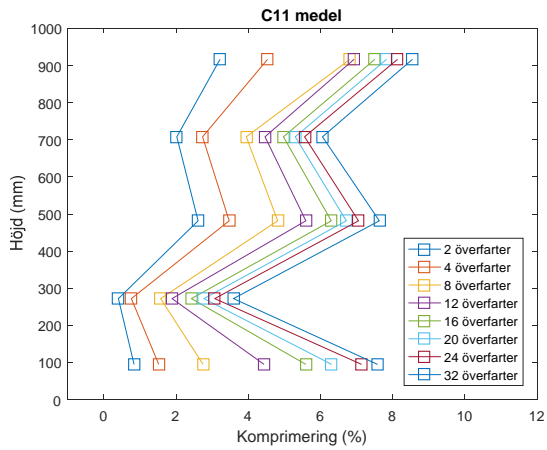
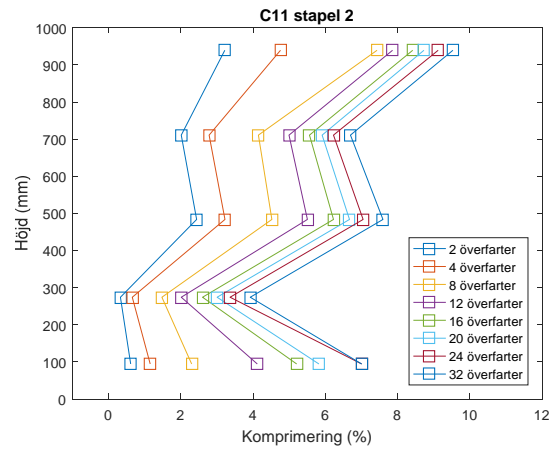
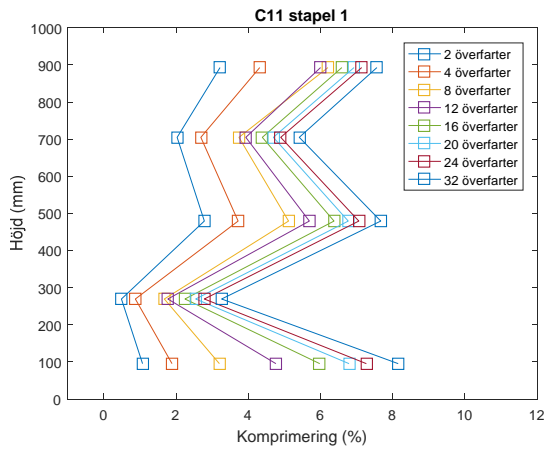
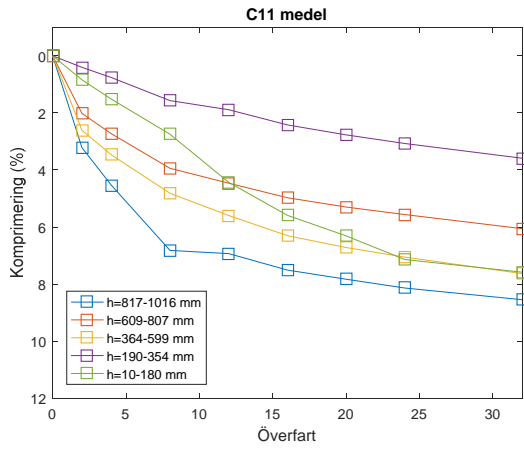




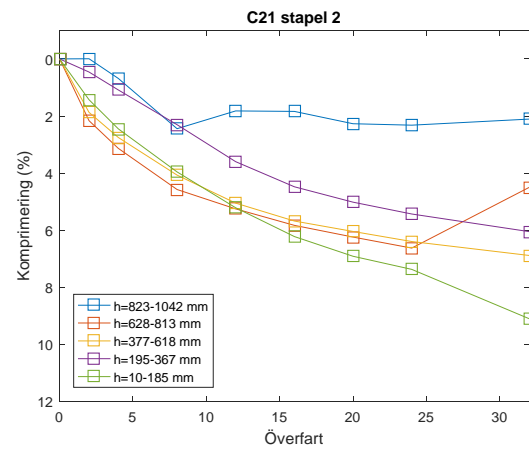
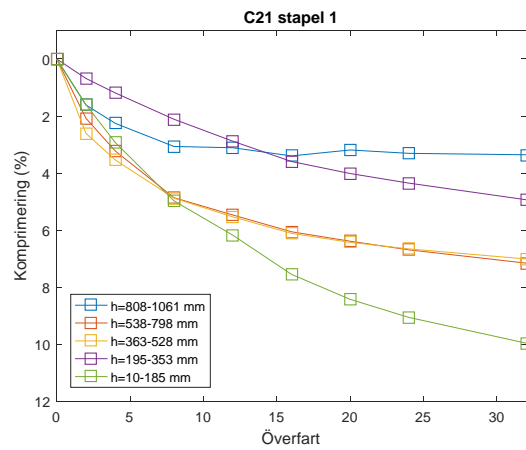
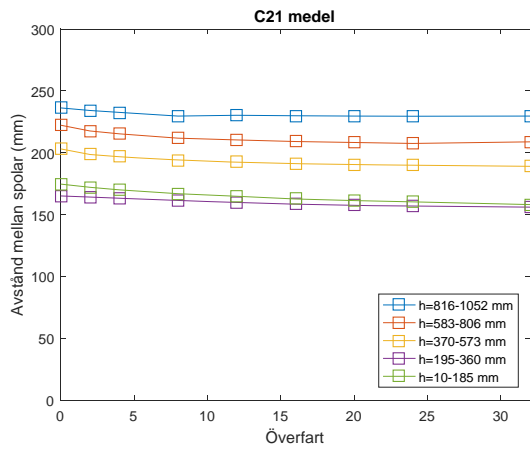
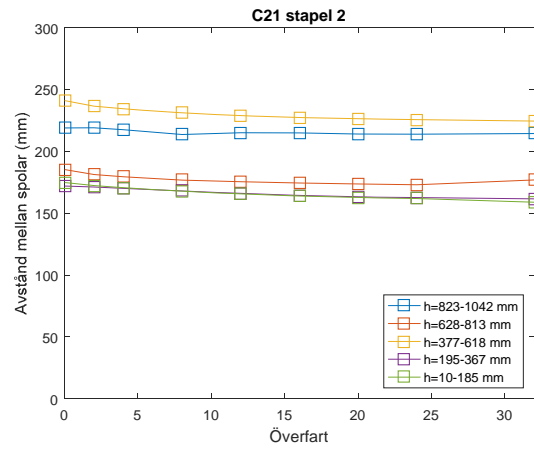
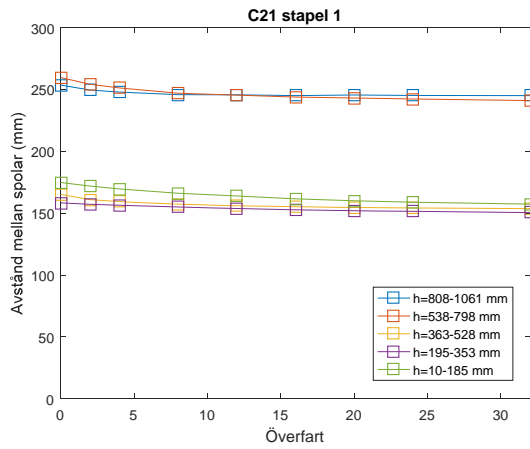


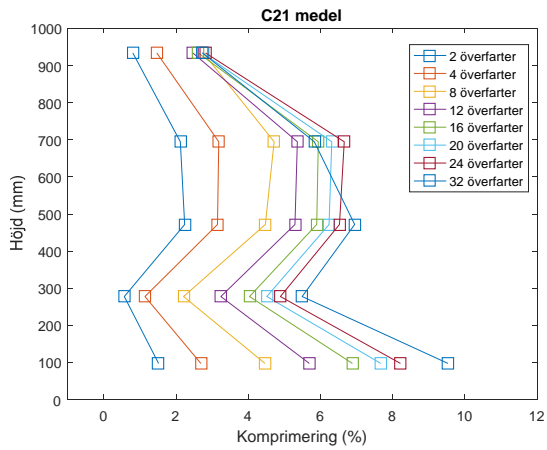
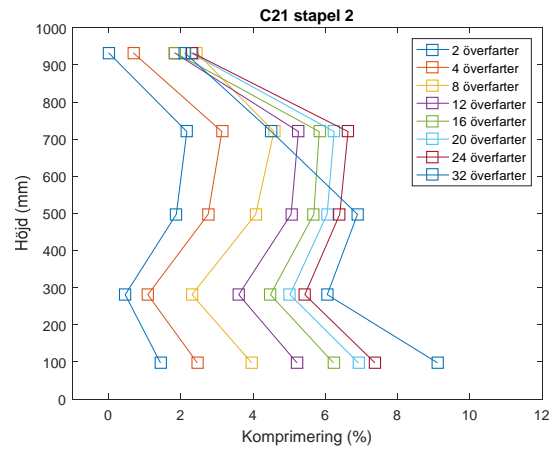
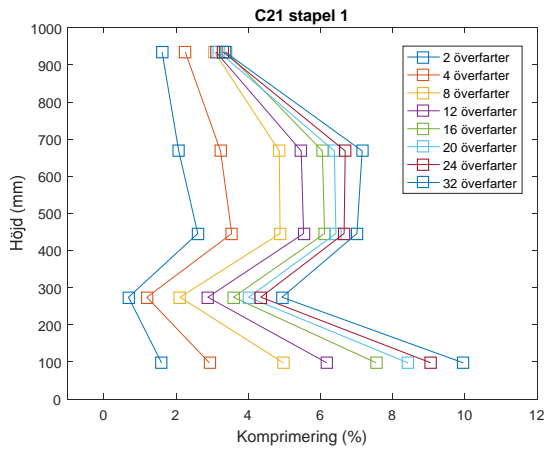
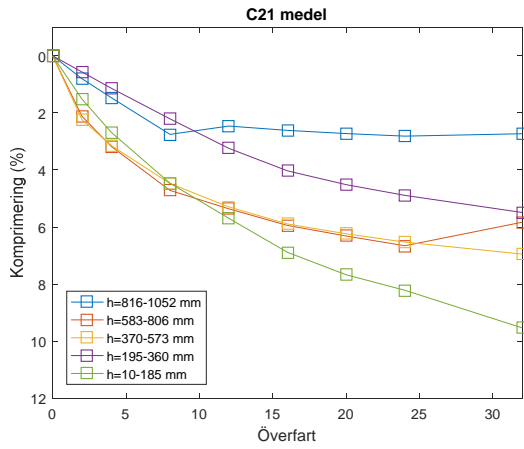
# C11





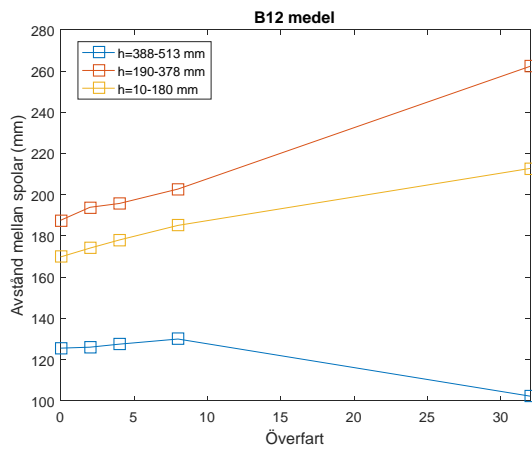
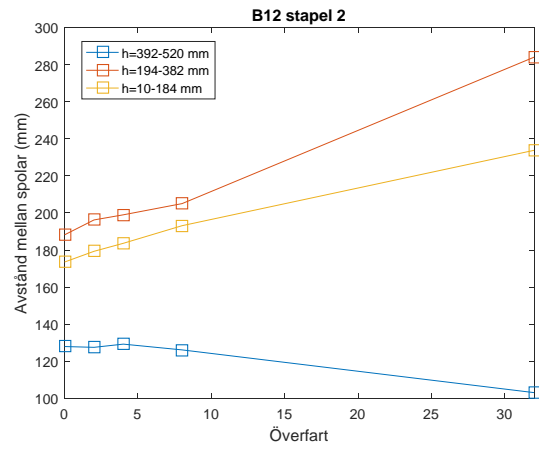
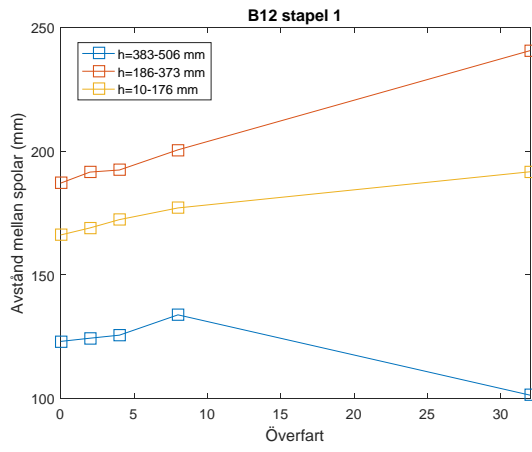
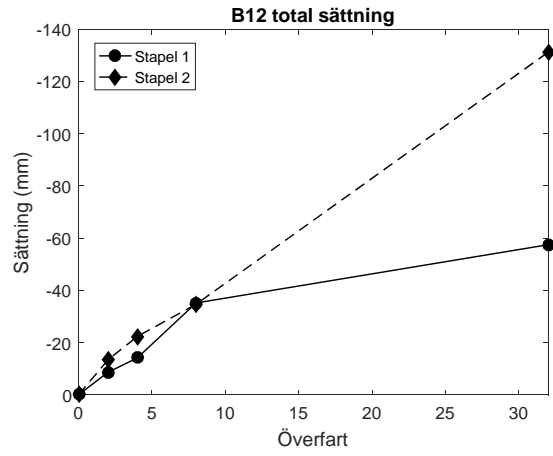
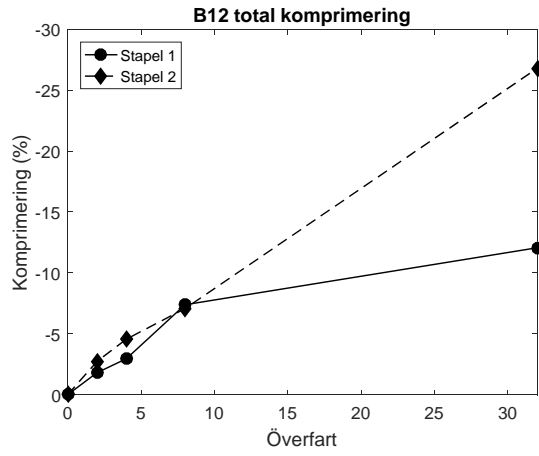
# C21

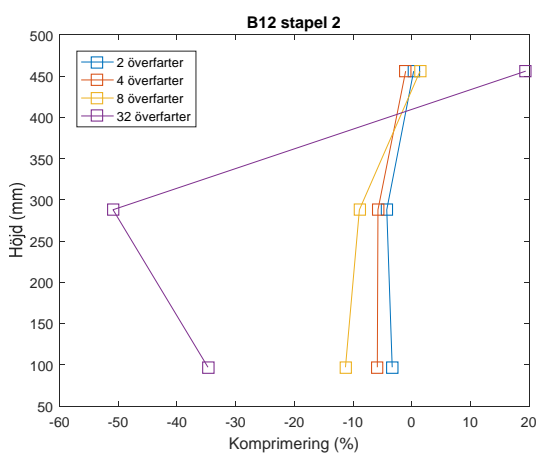
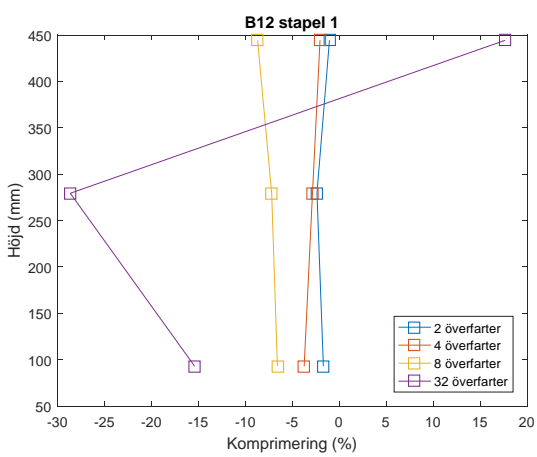
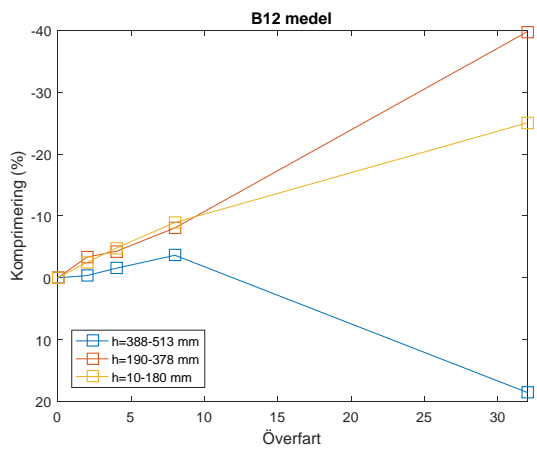
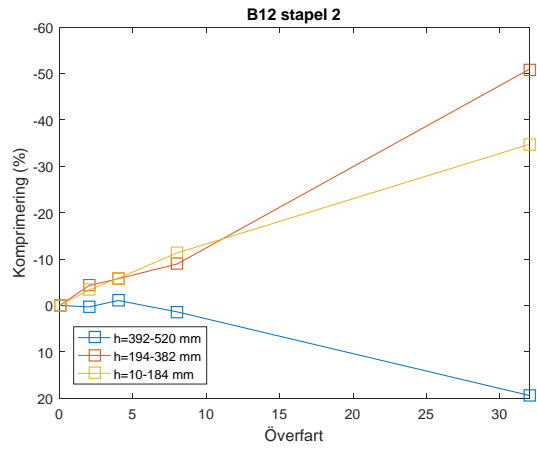
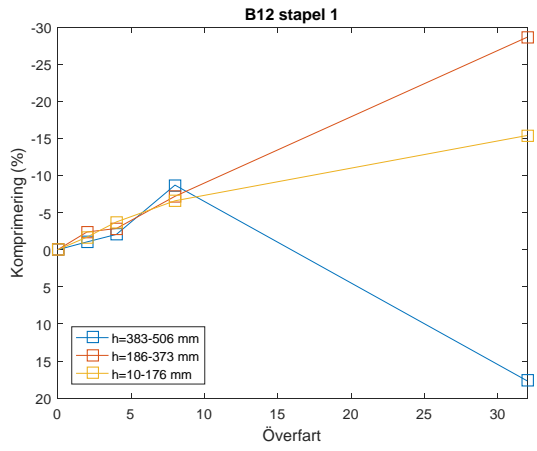


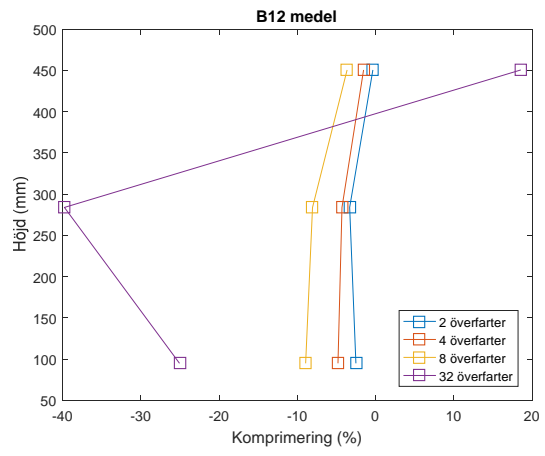


## Morän

Mätningarna är ej tillförlitliga på grund av att spolarna har förflyttat sig i sidled.





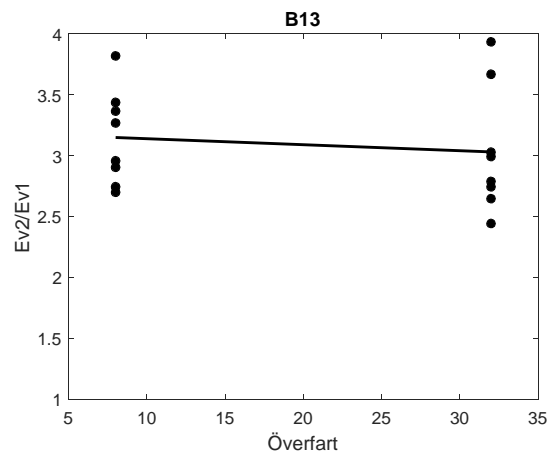
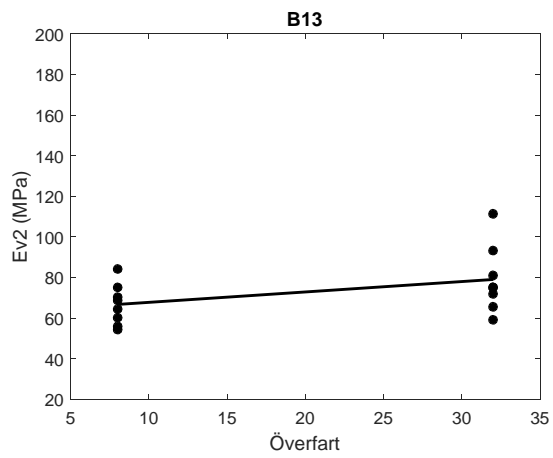
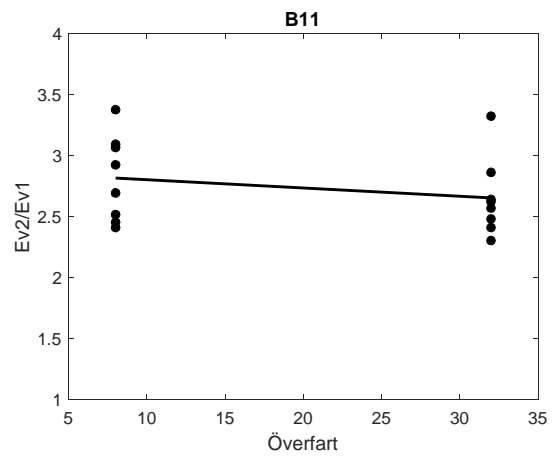
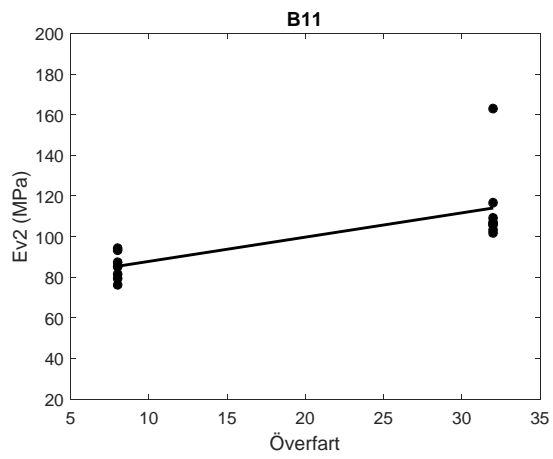
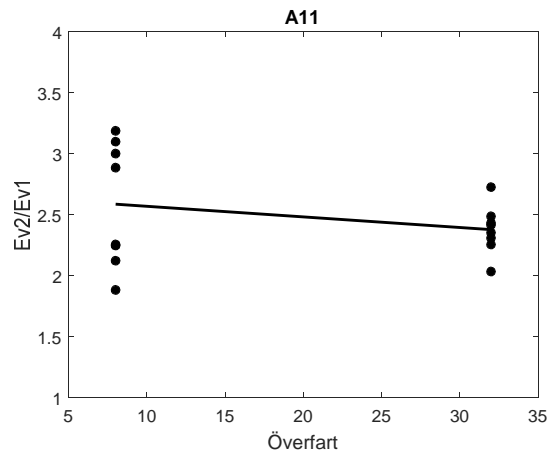
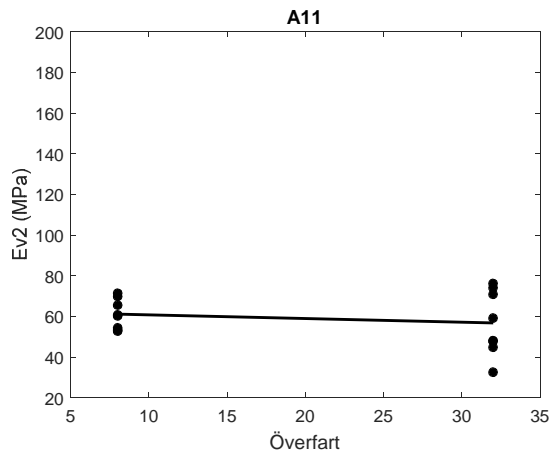


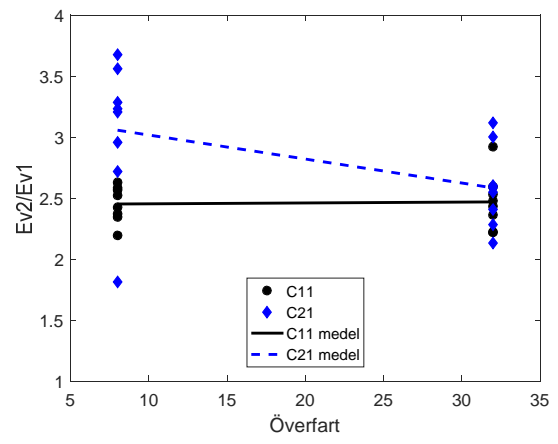
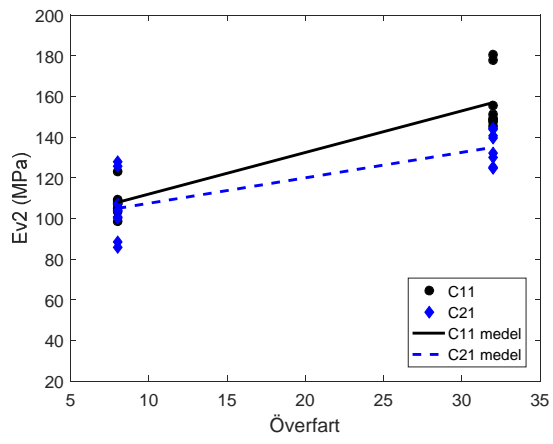


# Bilaga J

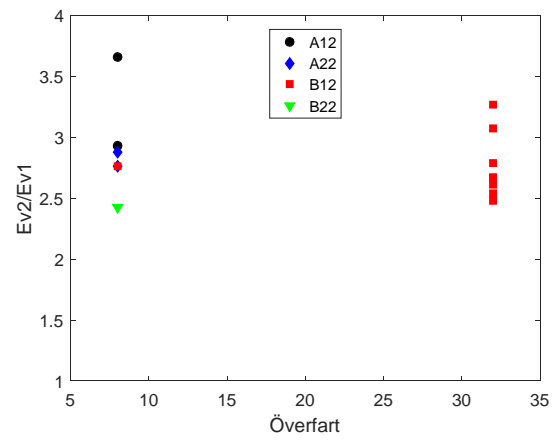
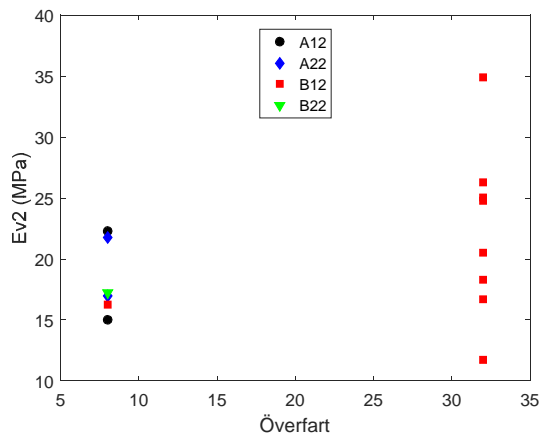
## Resultat från plattbelastningsförsök

### Krossmaterial





## Morän

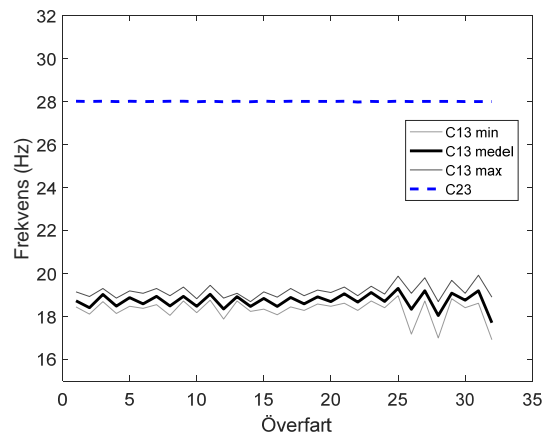
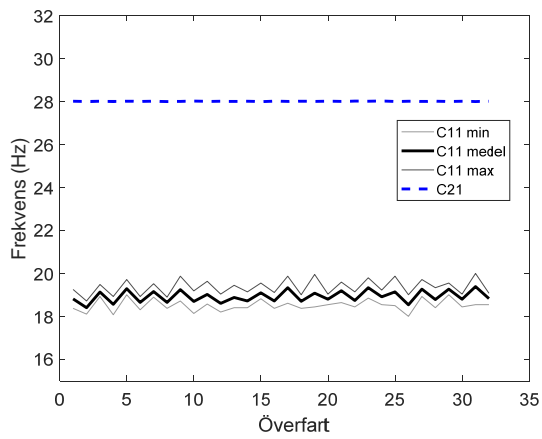
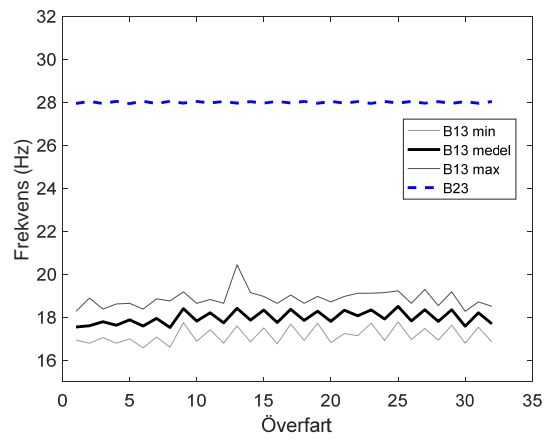
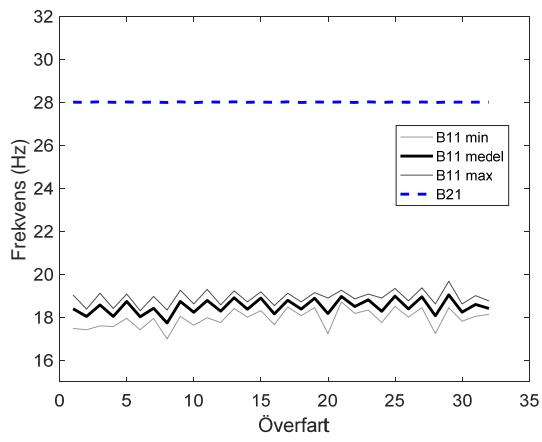
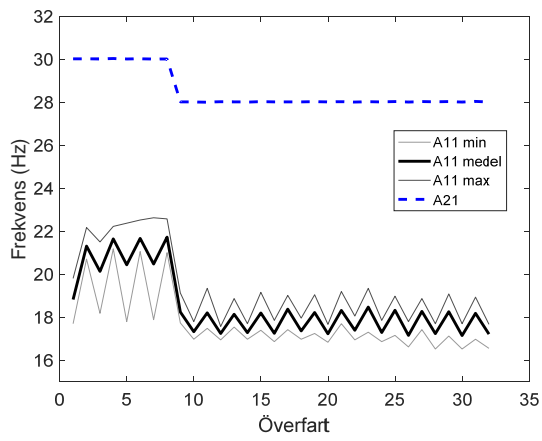


# Bilaga K

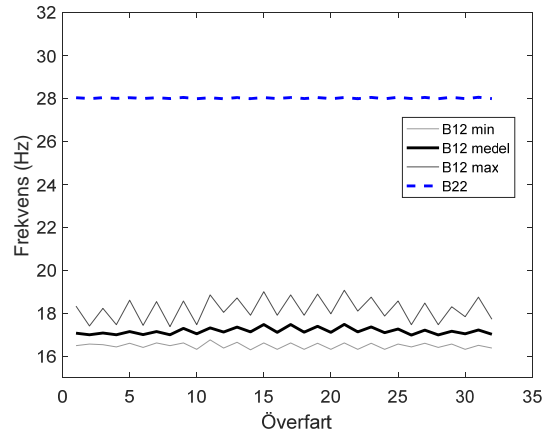
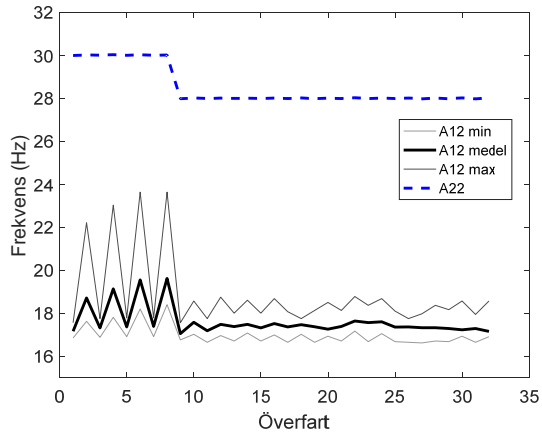
## Integrerade vältmätningar

### Frekvens

#### Krossmaterial

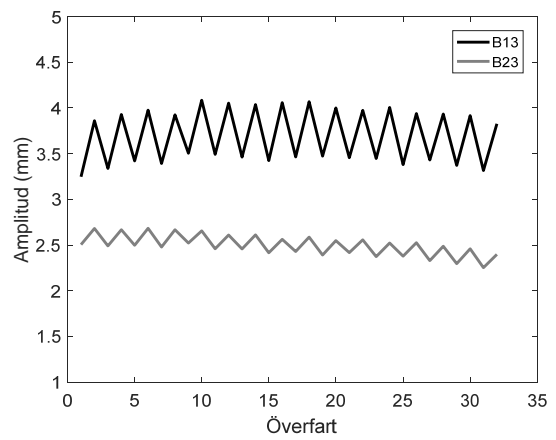
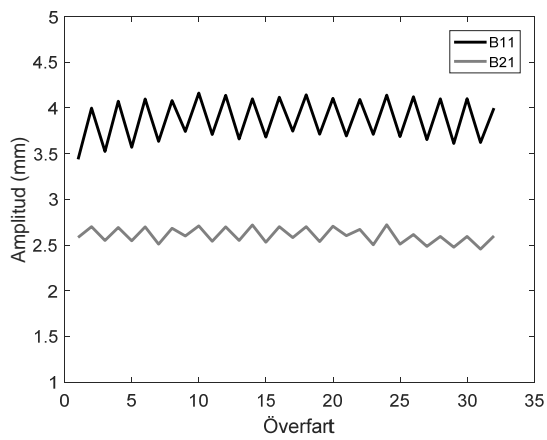
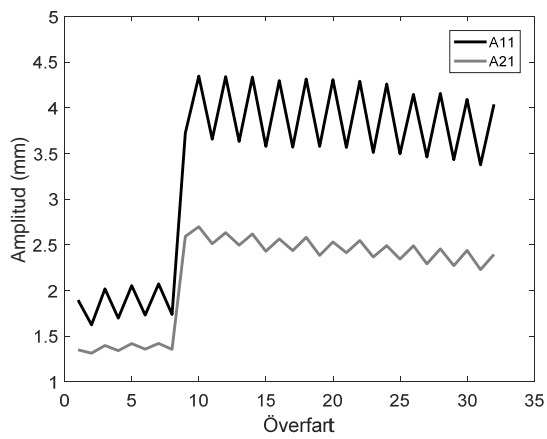


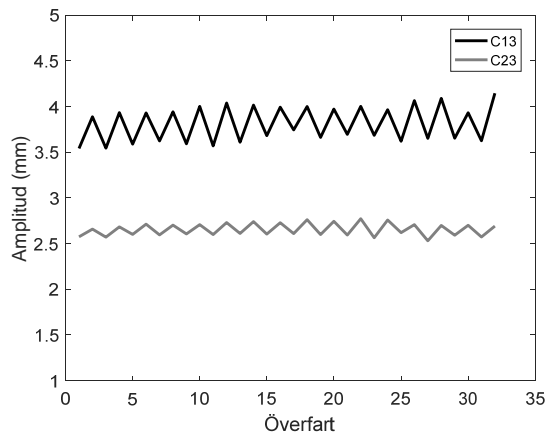
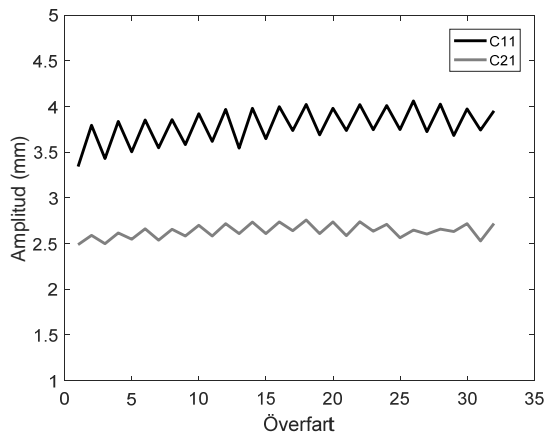
## Morän



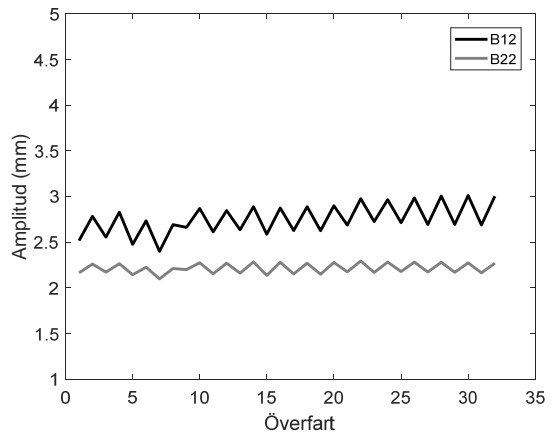
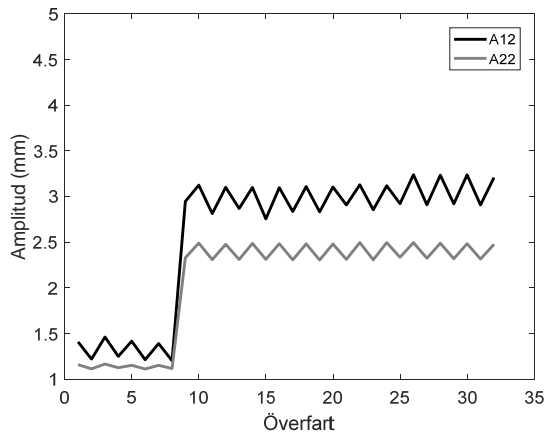
## Amplitud

### Krossmaterial



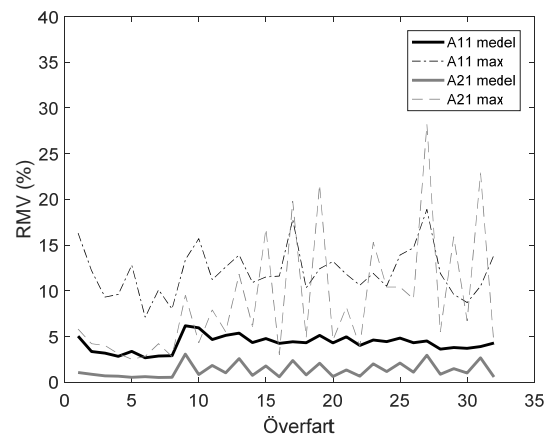


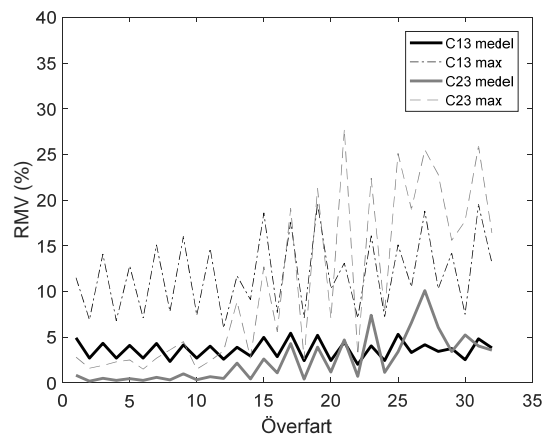
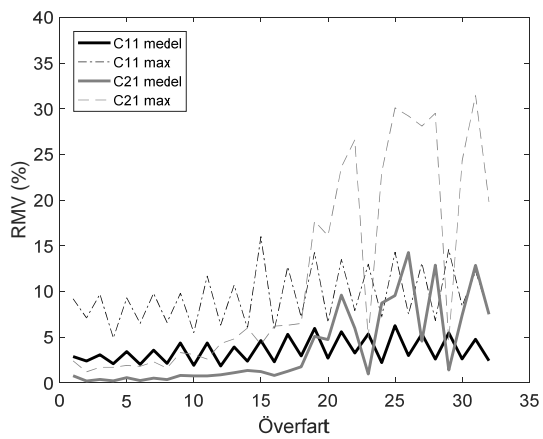
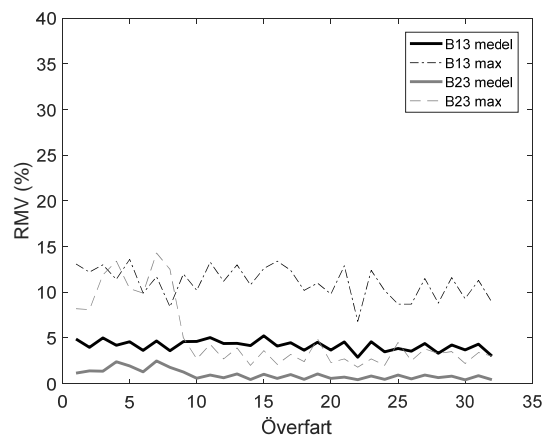
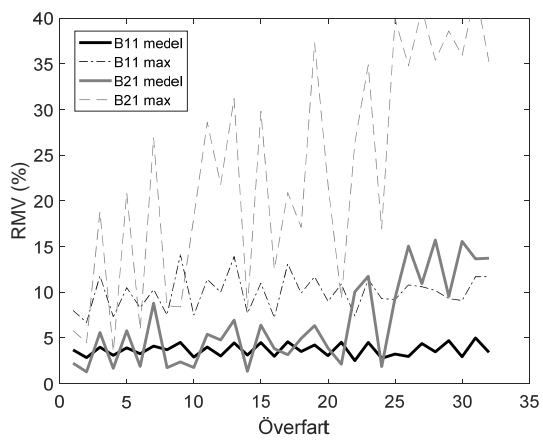
**Morän**



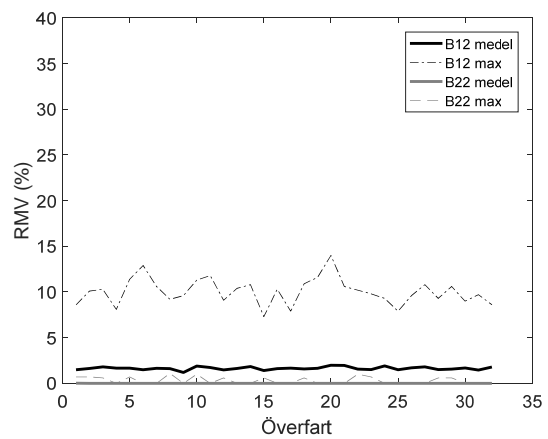
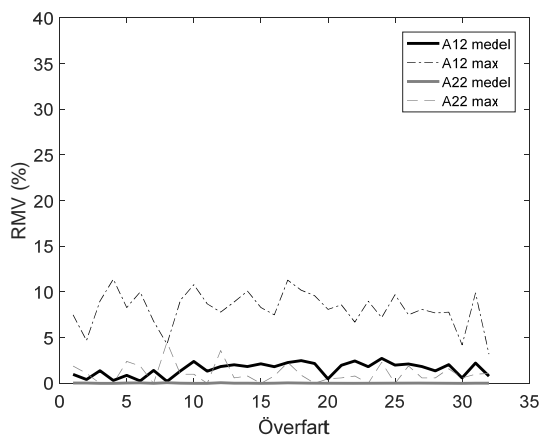
**RMV**

**Krossmaterial**



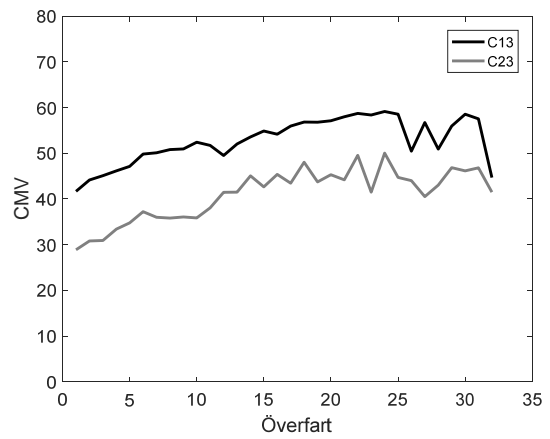
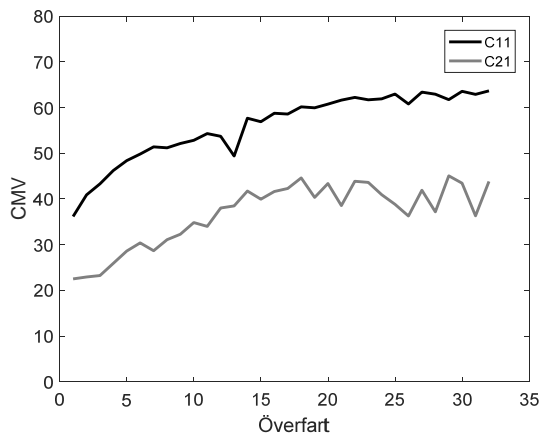
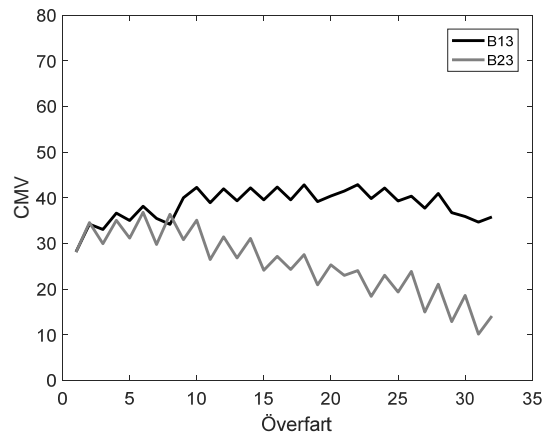
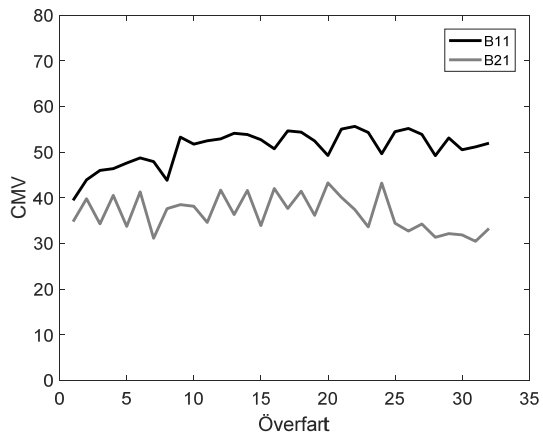
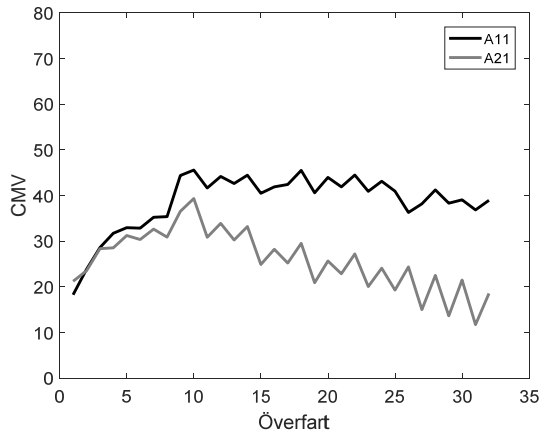


**Morän**

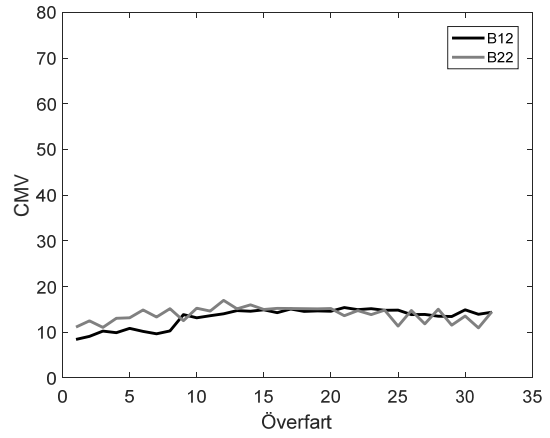
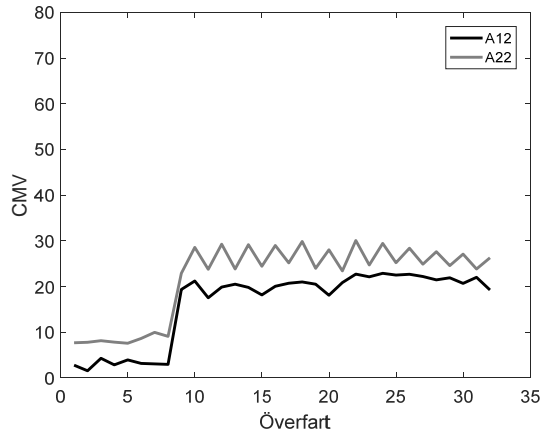


# Compactometervärde

## Krossmaterial

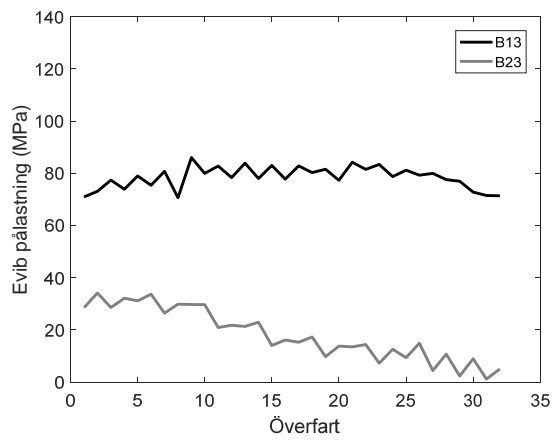
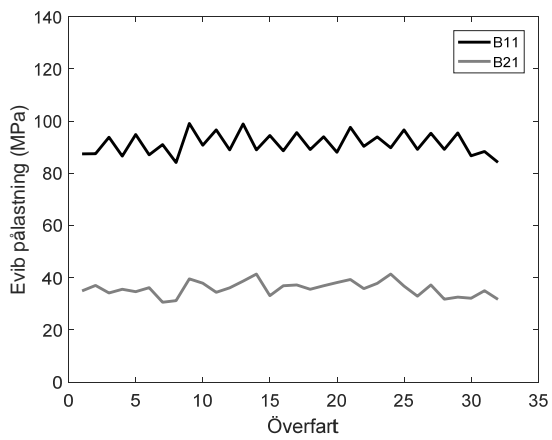
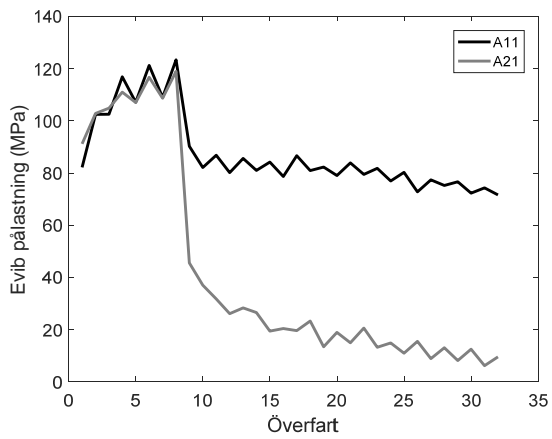


### Morän

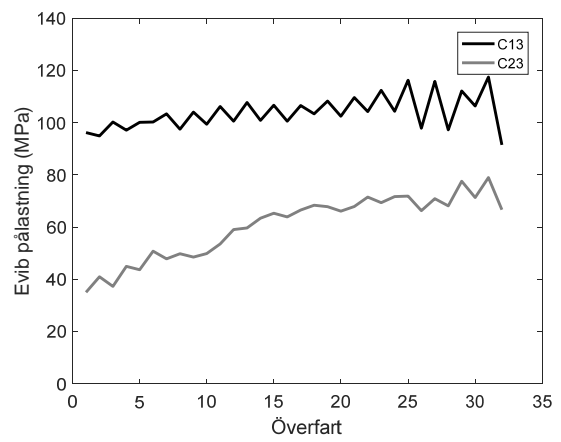
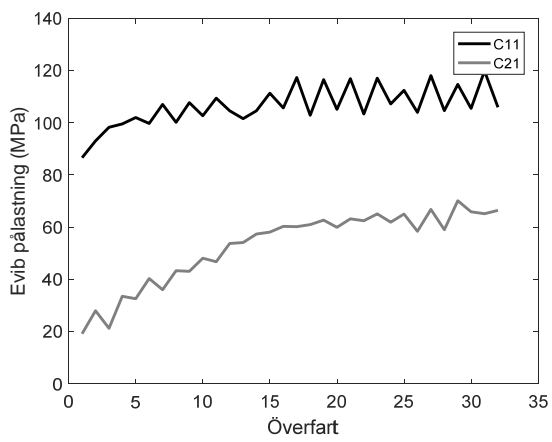


### Evib pålastning

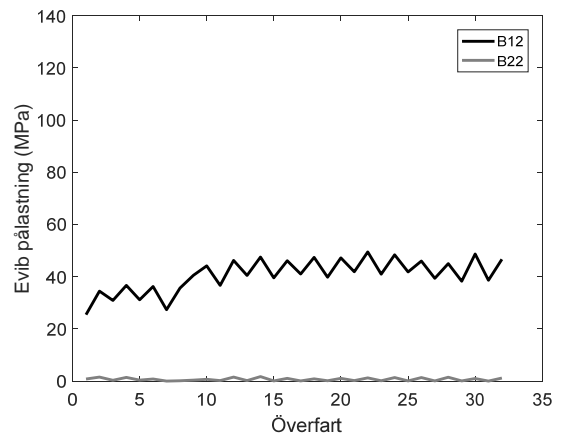
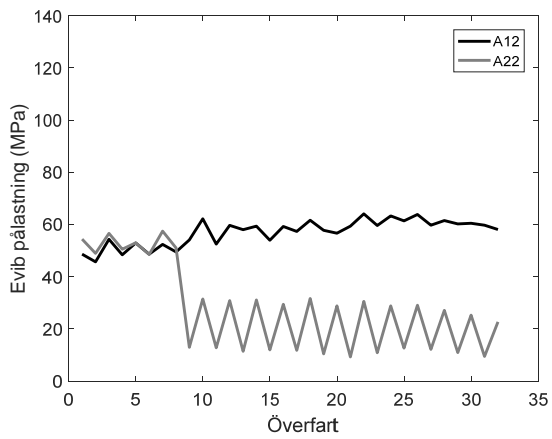
#### Krossmaterial





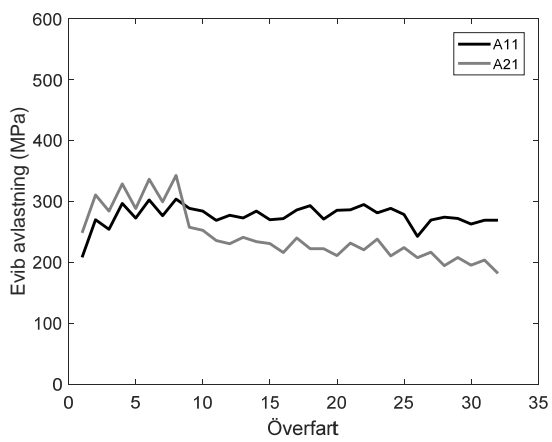


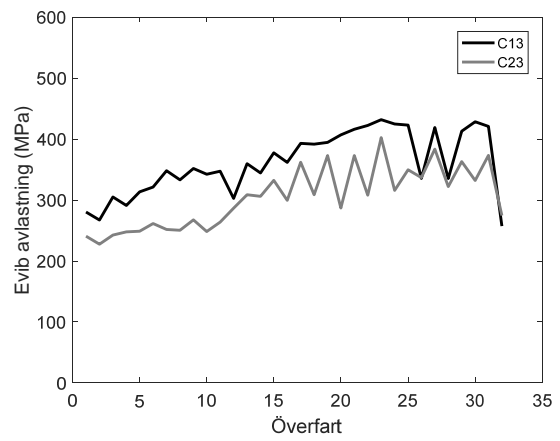
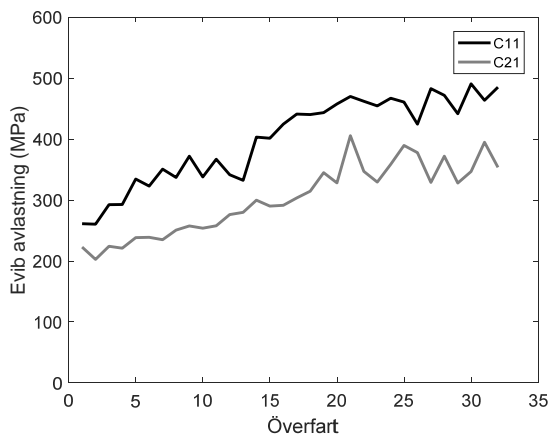
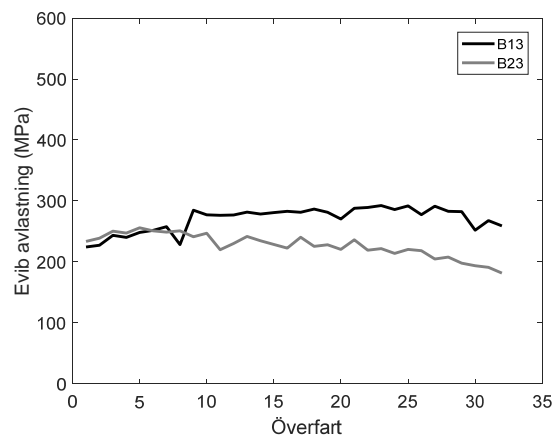
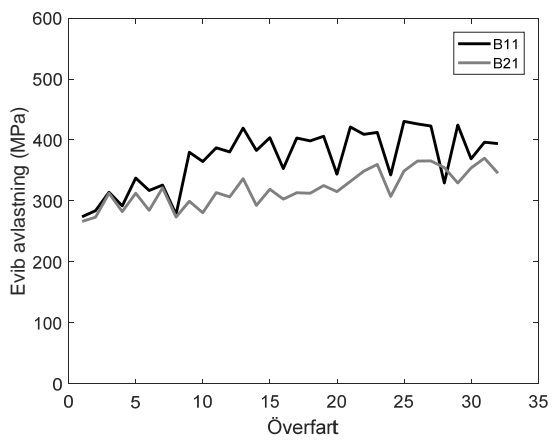
### Morän



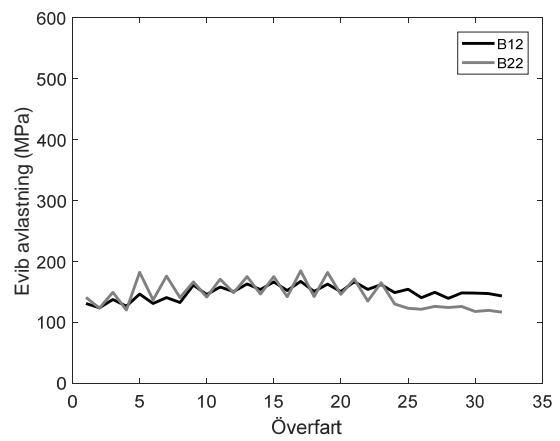
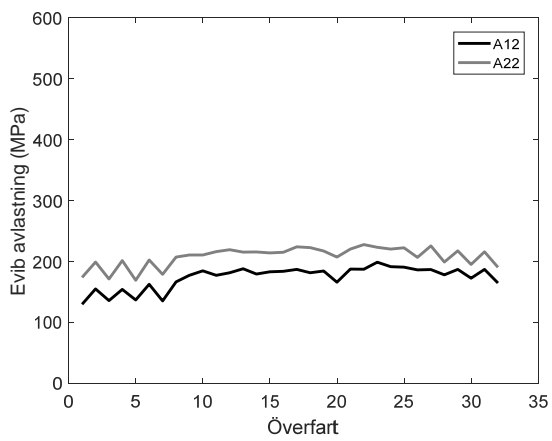
### Evib avlastning

#### Krossmaterial



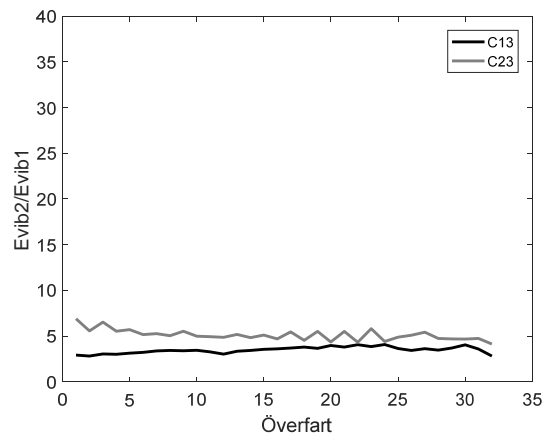
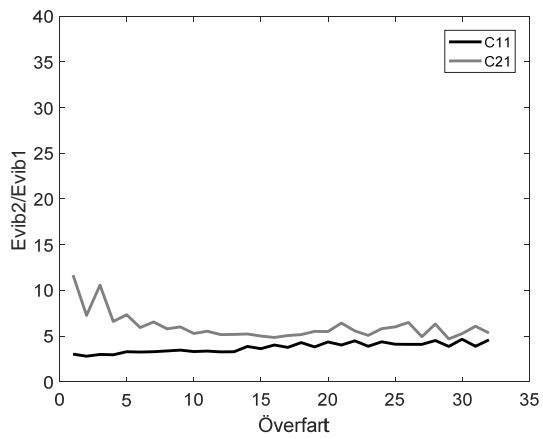
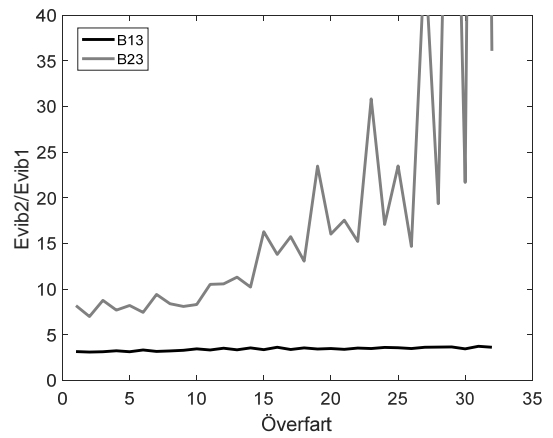
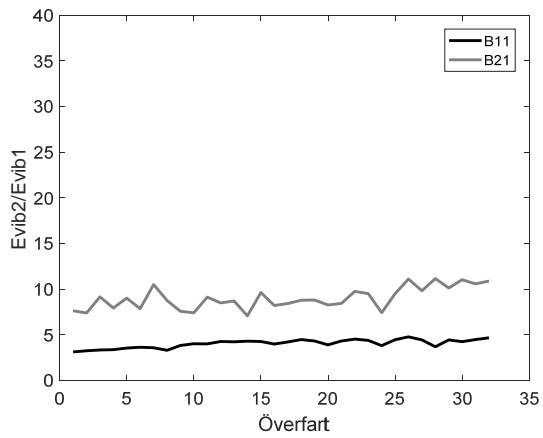
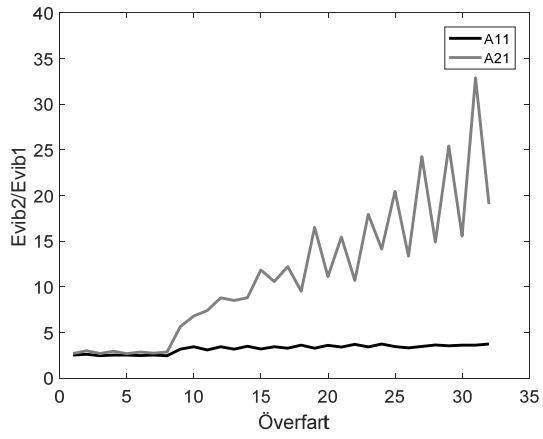


**Morän**

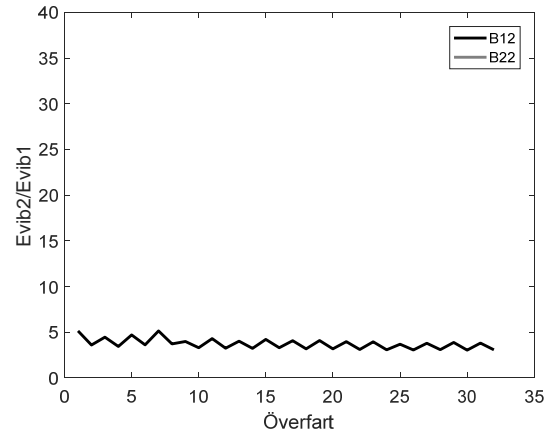
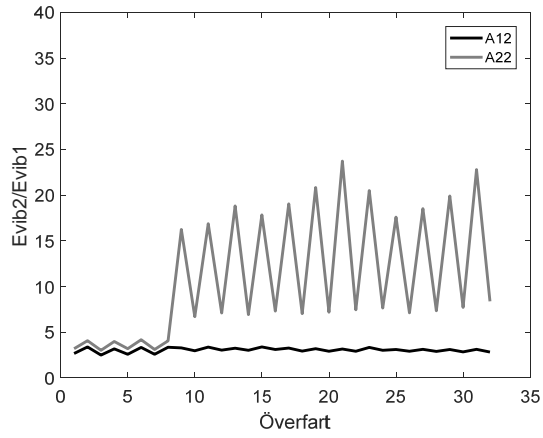


# Evib2/Evib1

## Krossmaterial

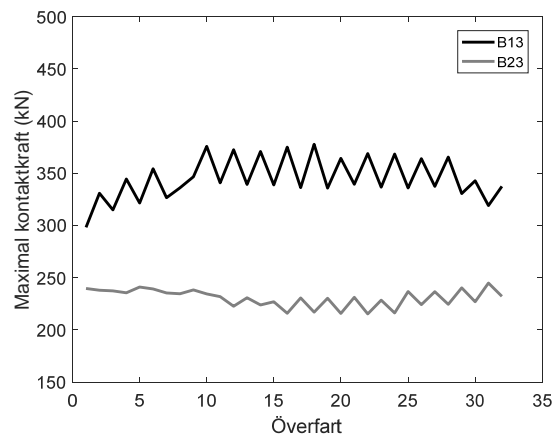
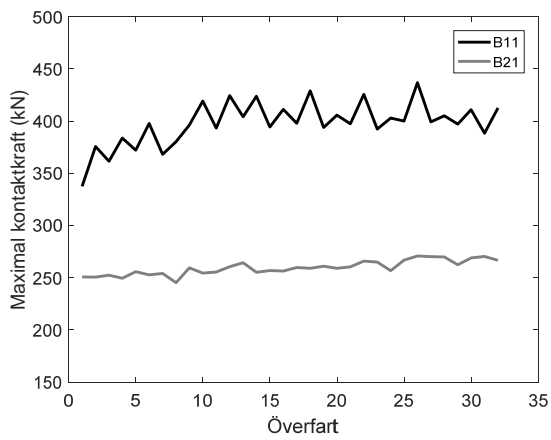
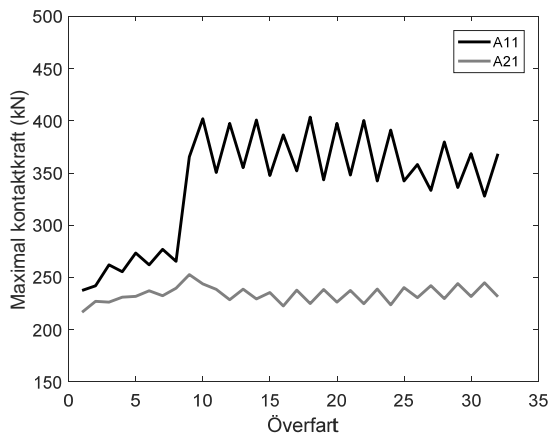


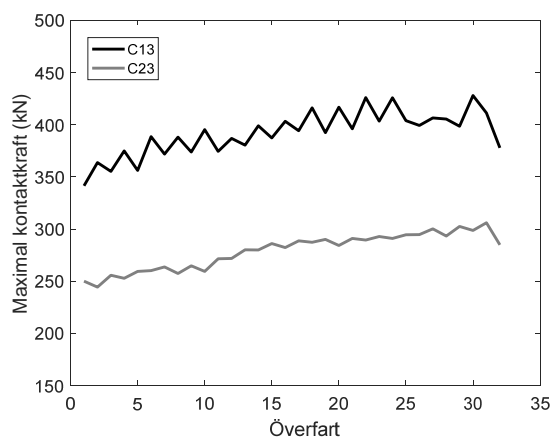
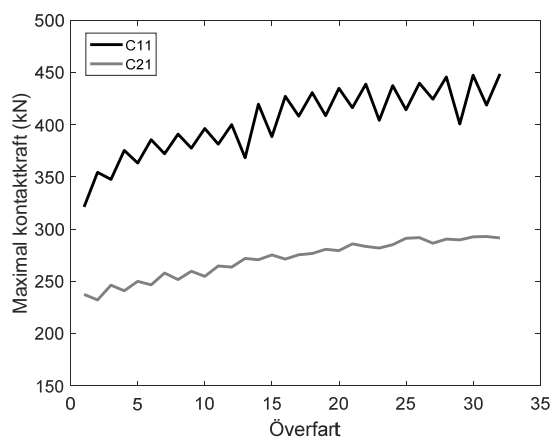
### Morän



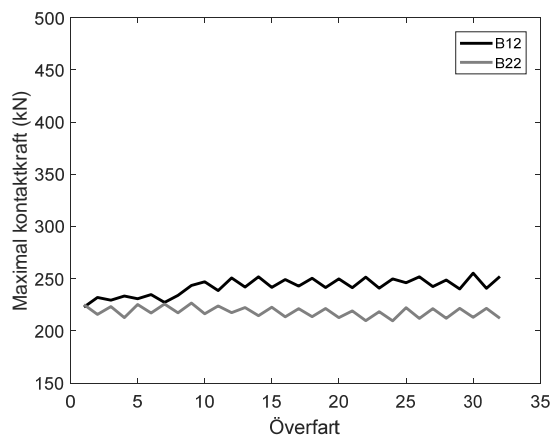
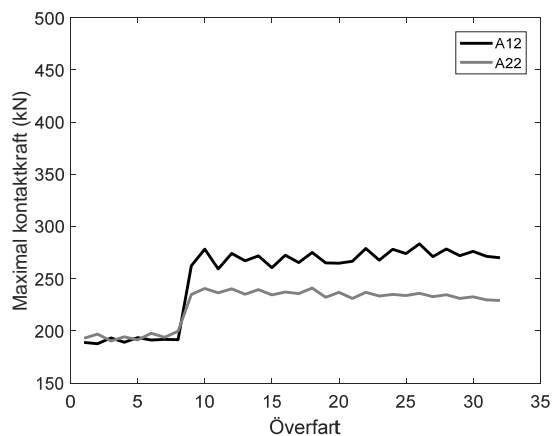
### Maximal kontaktkraft

#### Krossmaterial





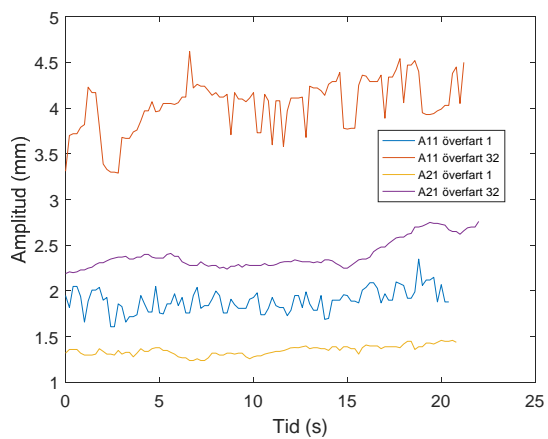
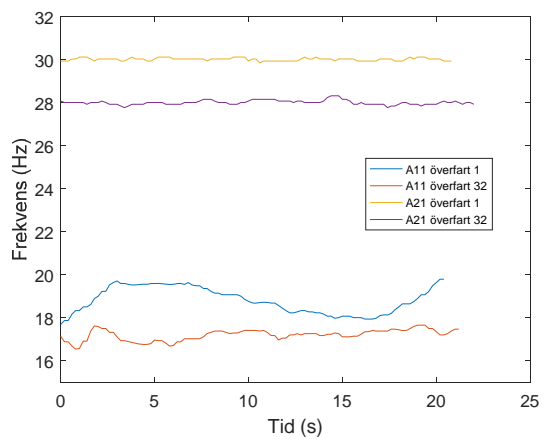
### Morän

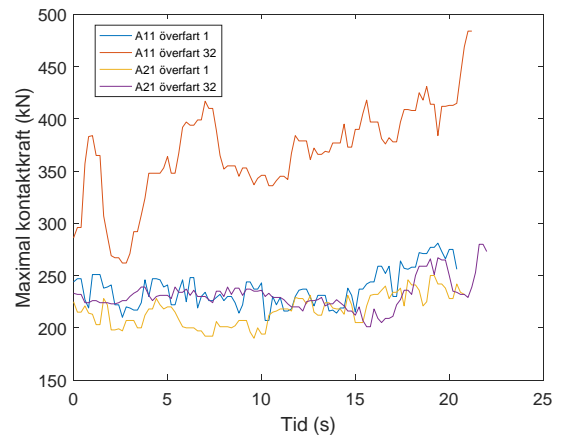
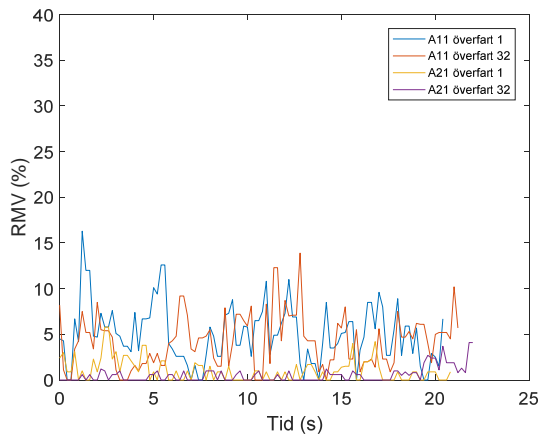
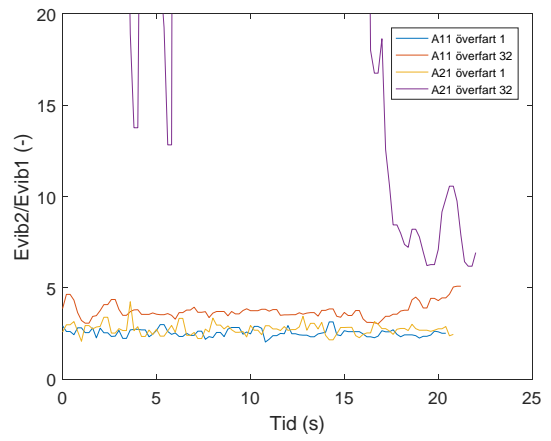
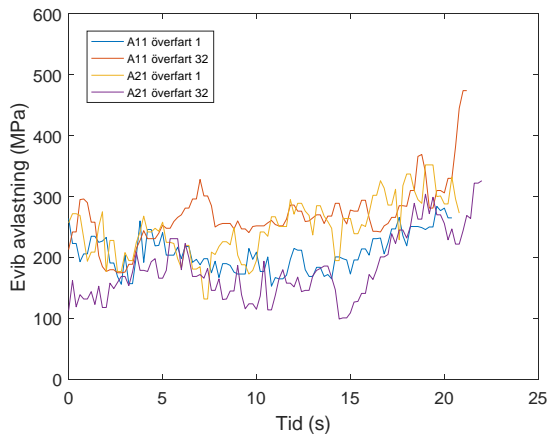
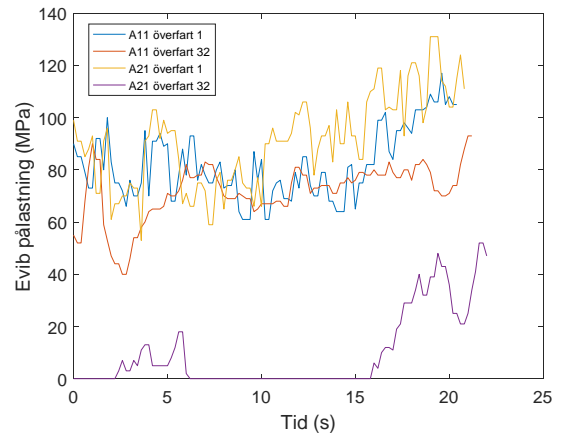
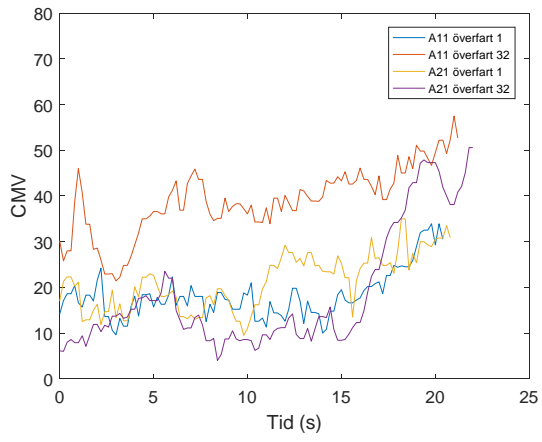


### Enskilda överfarter

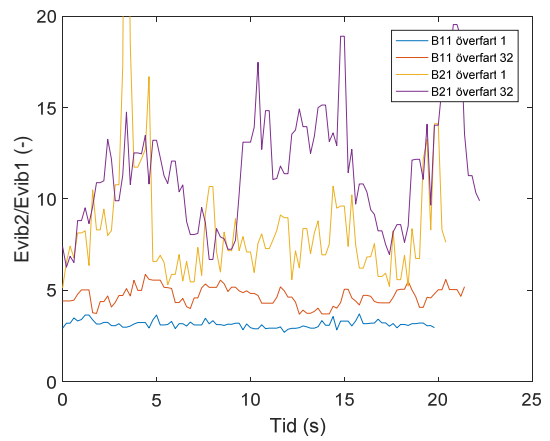
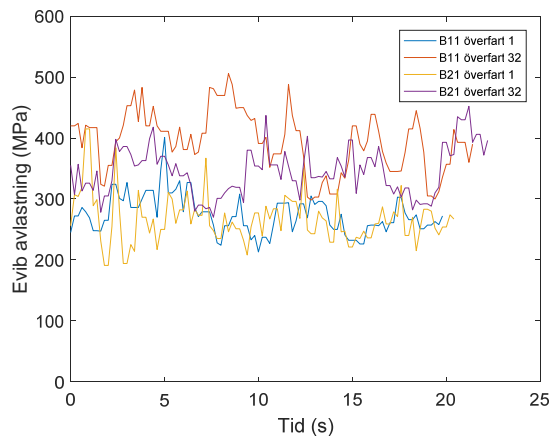
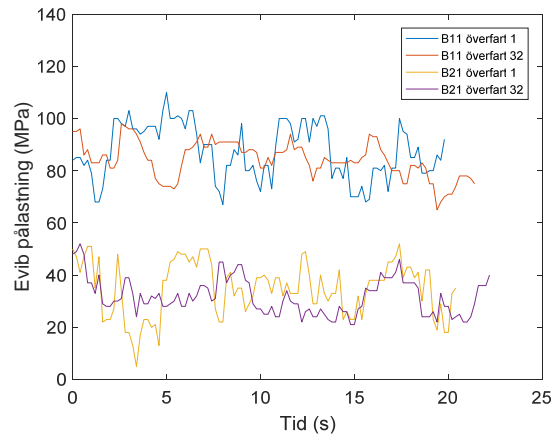
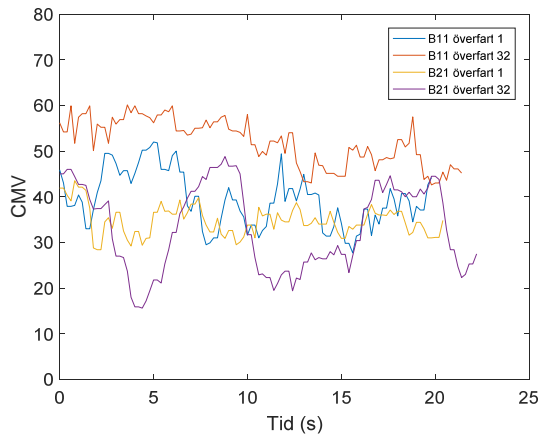
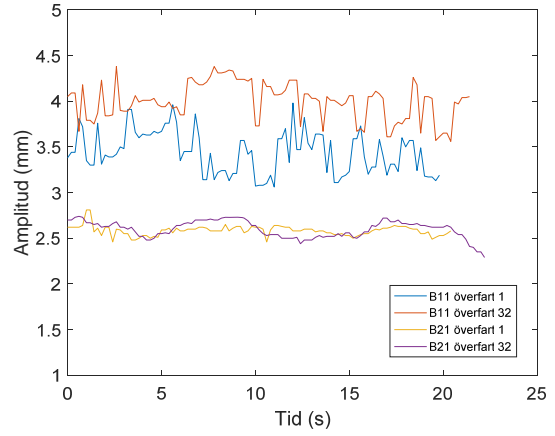
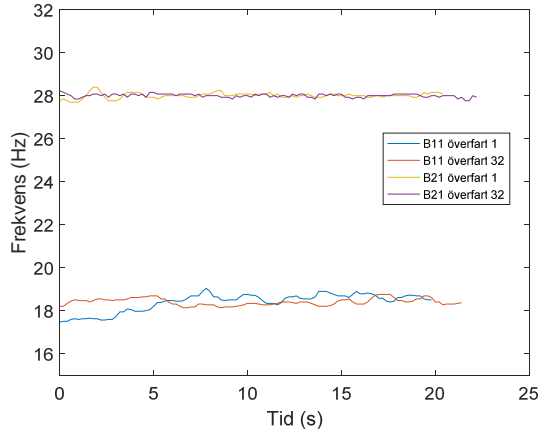
#### Krossmaterial

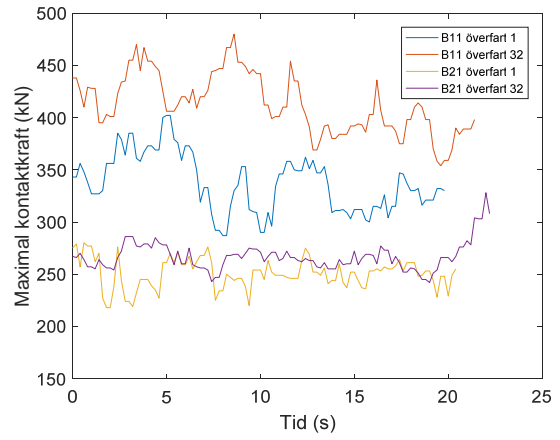
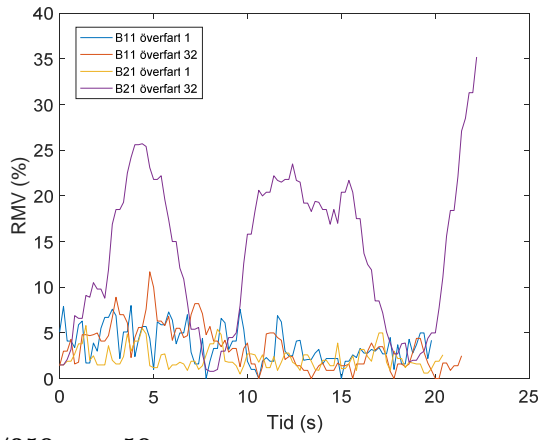
0/150 mm, 30 cm



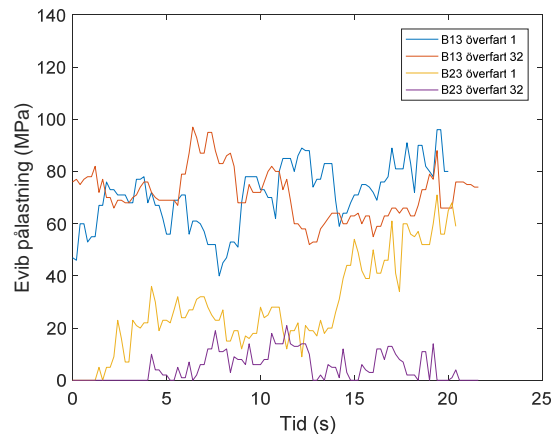
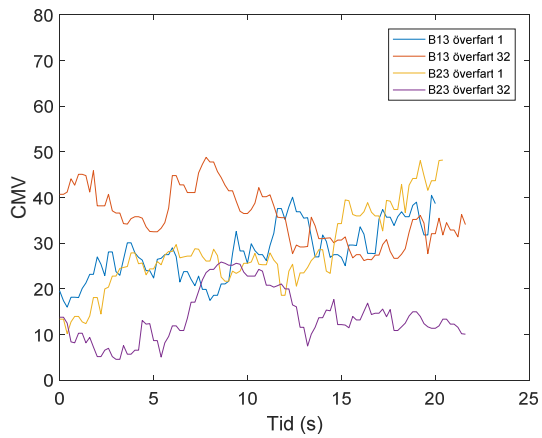
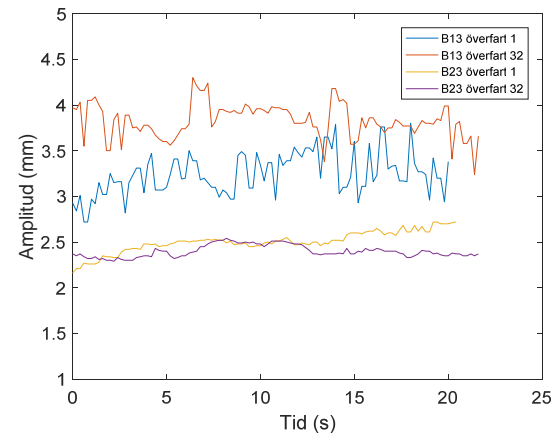
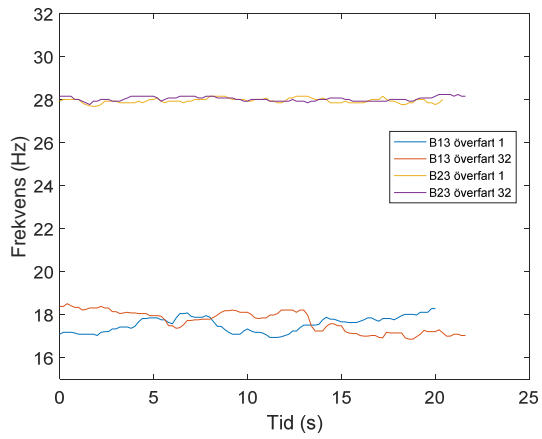


0/150 mm, 50 cm

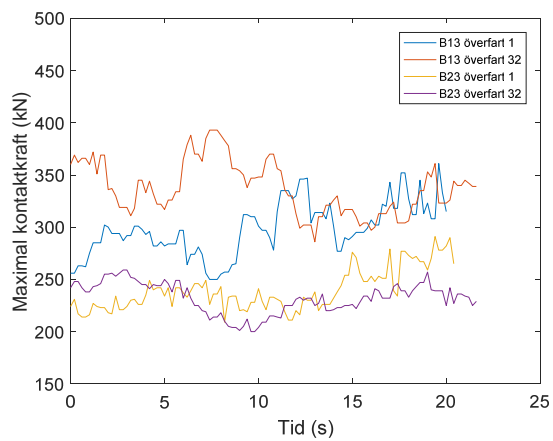
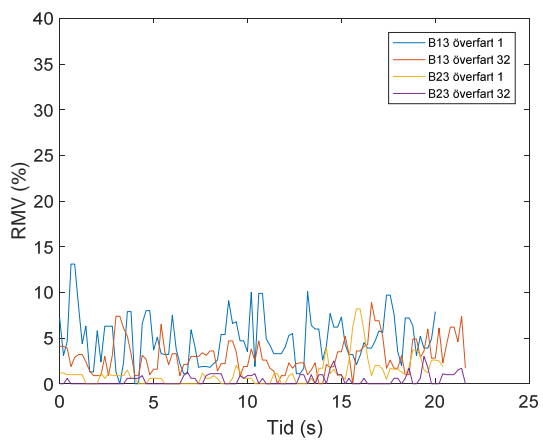
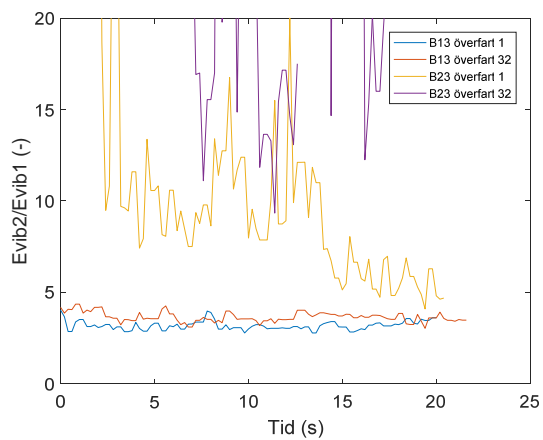
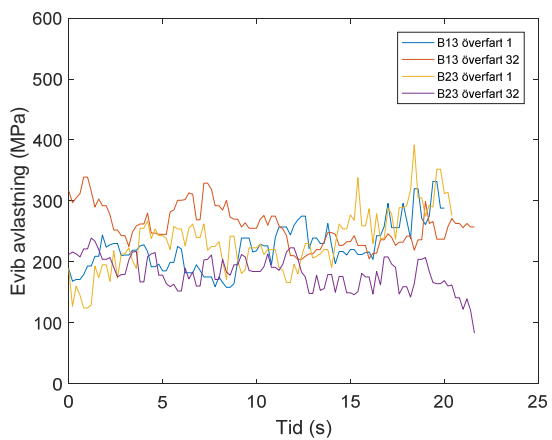




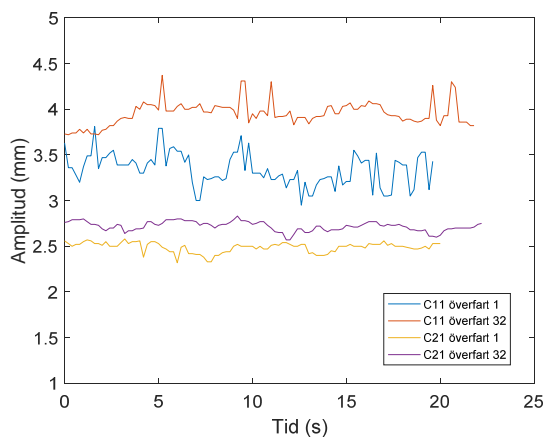
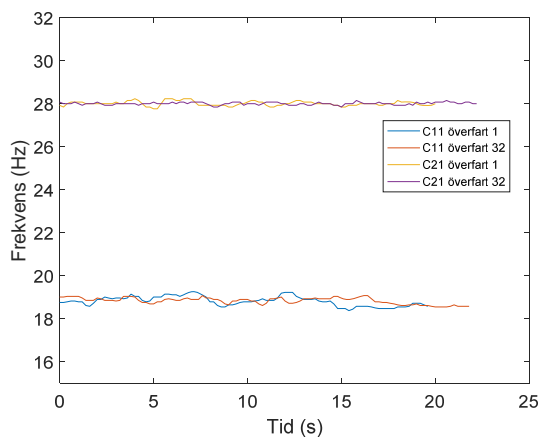
**0/250 mm, 50 cm**

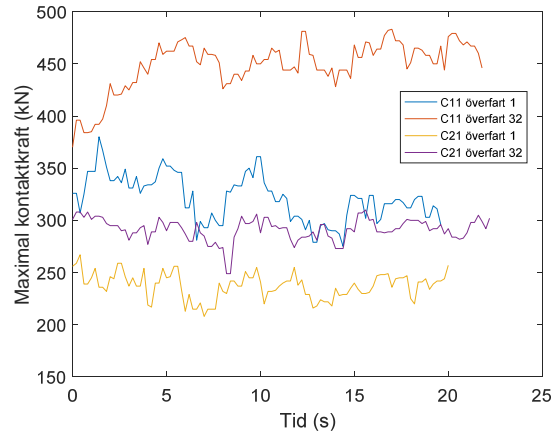
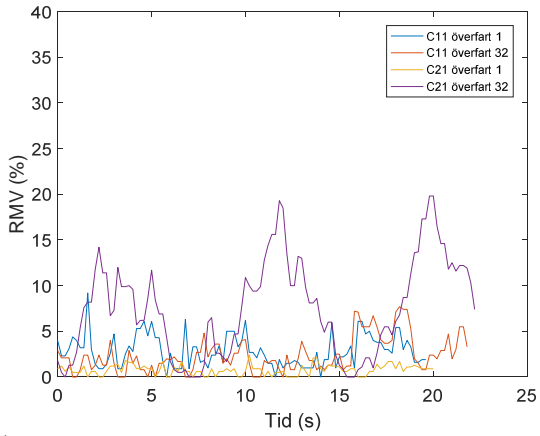
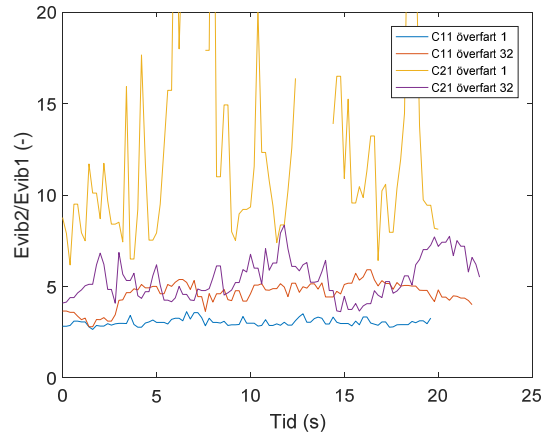
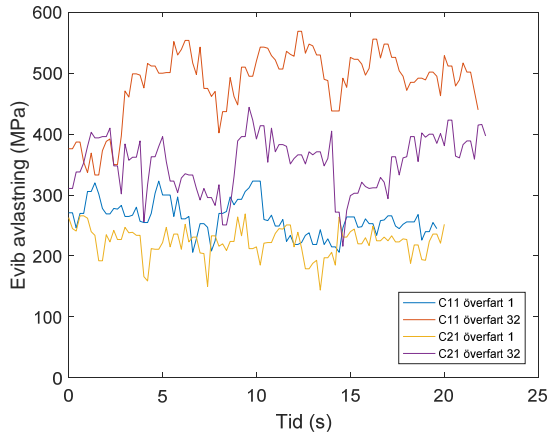
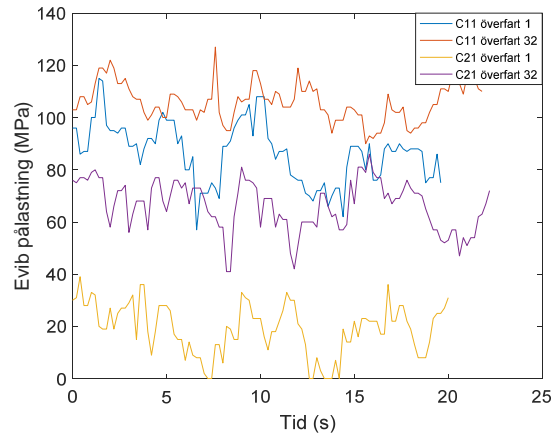
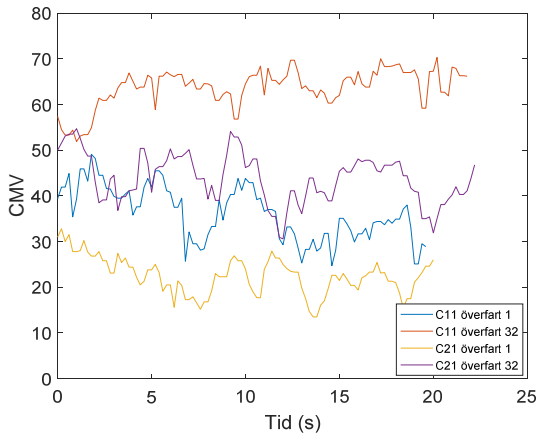




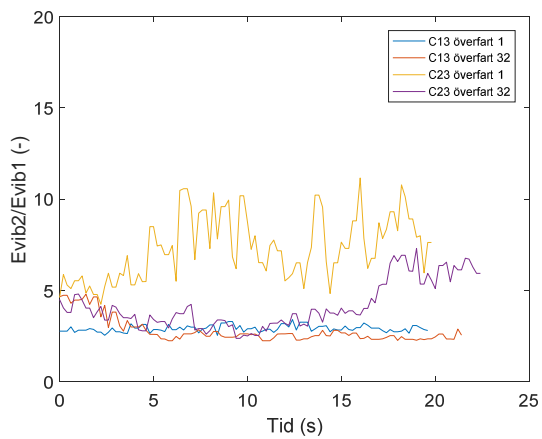
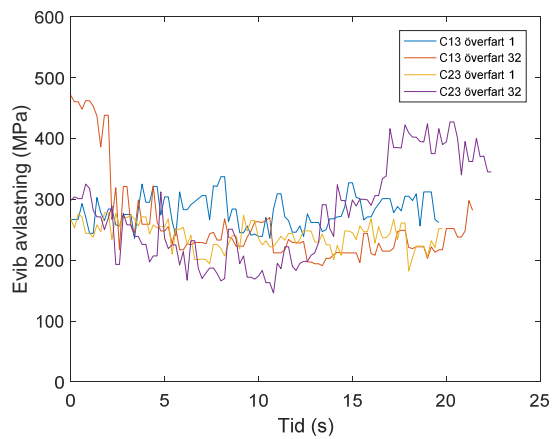
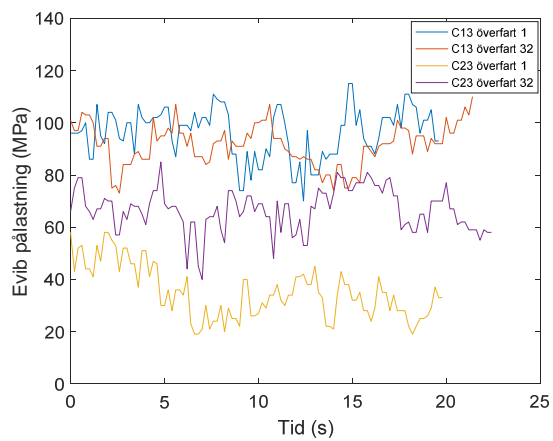
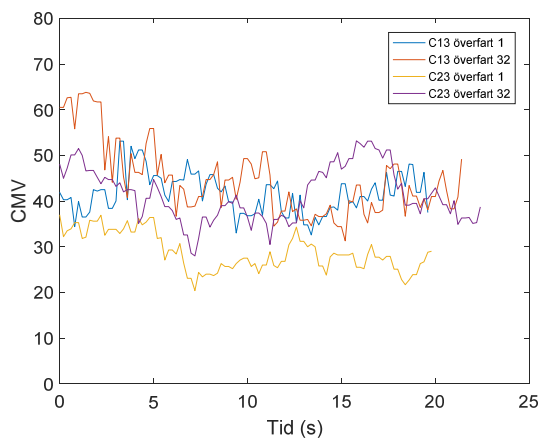
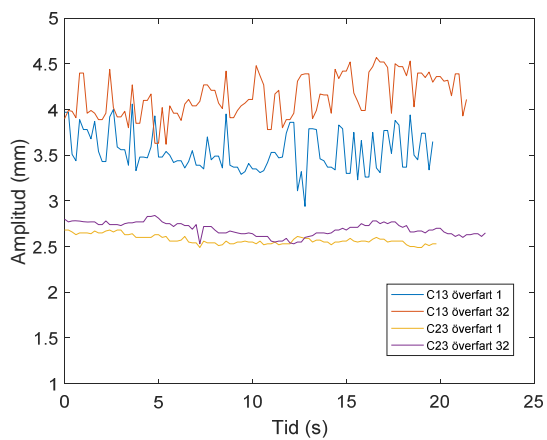
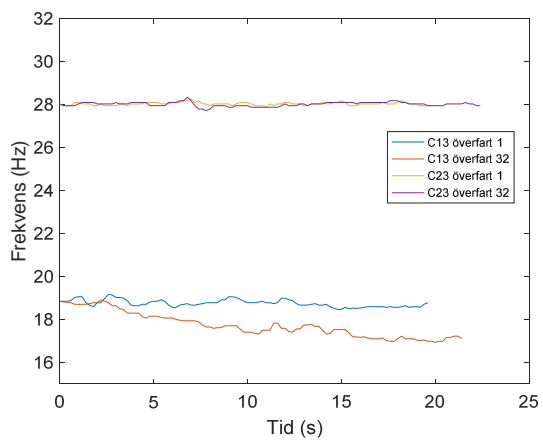


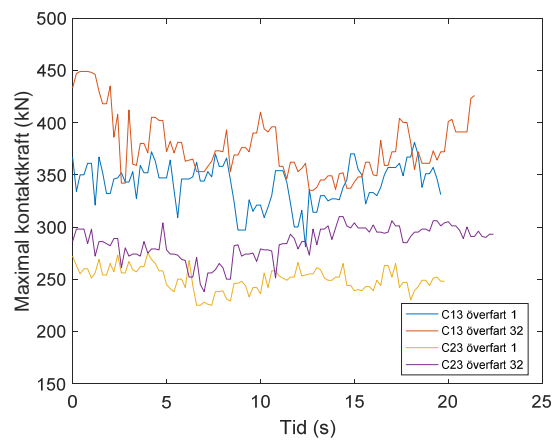
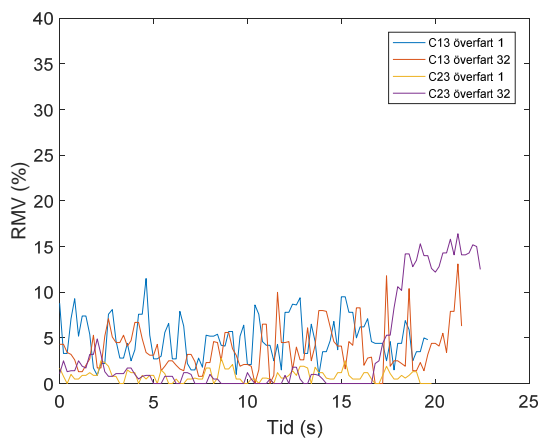
0/150 mm, 90 cm





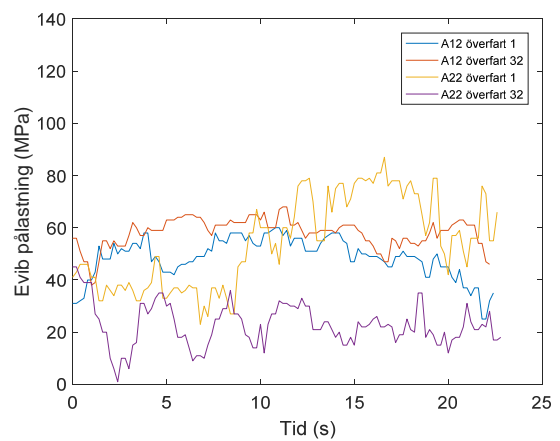
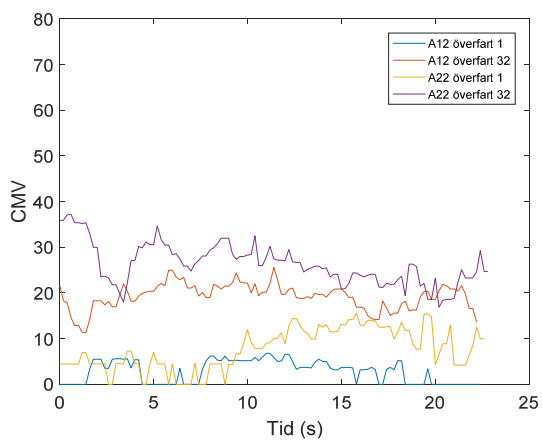
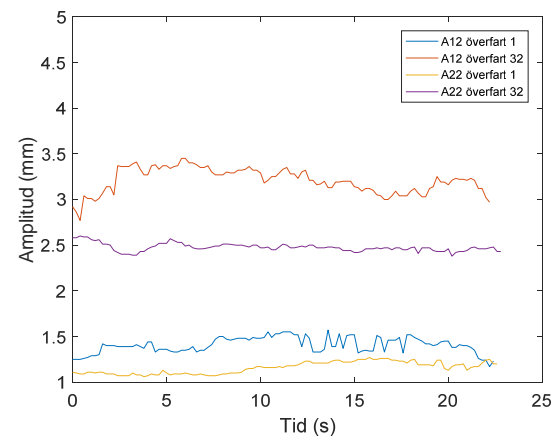
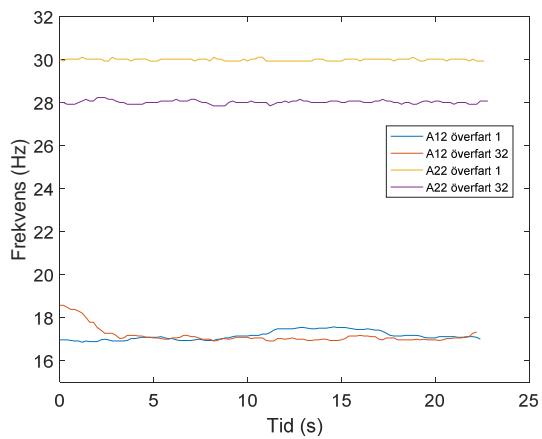
0/250 mm, 90 cm

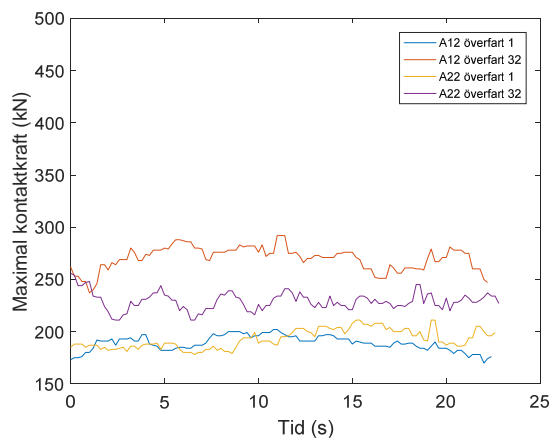
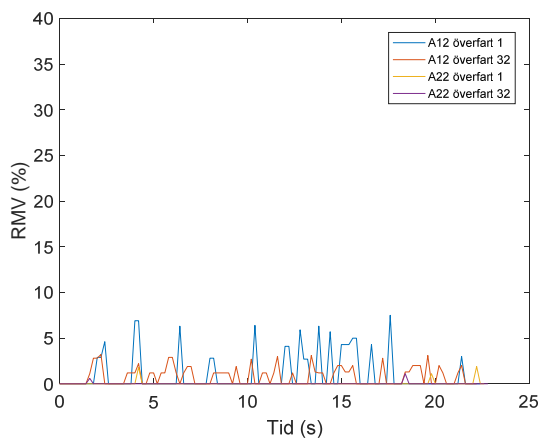
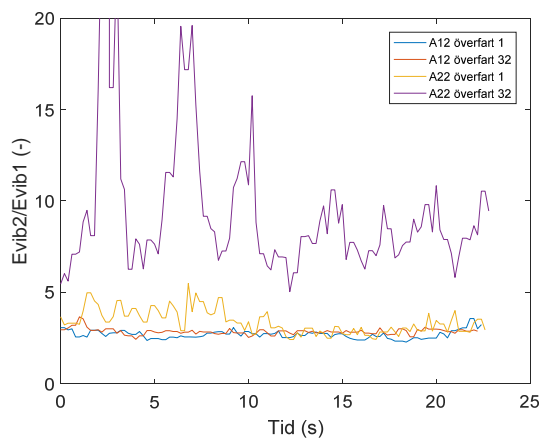
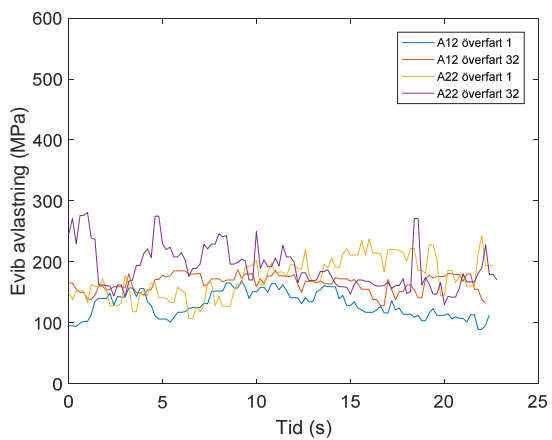




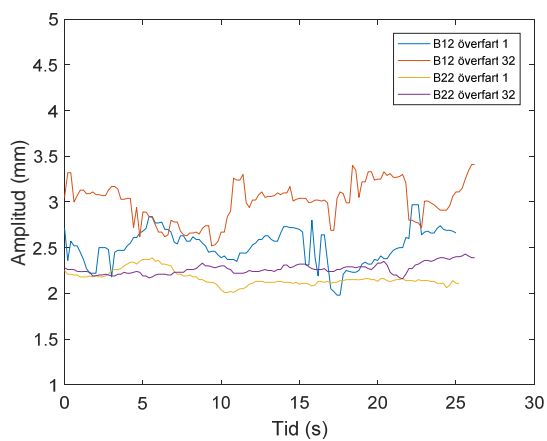
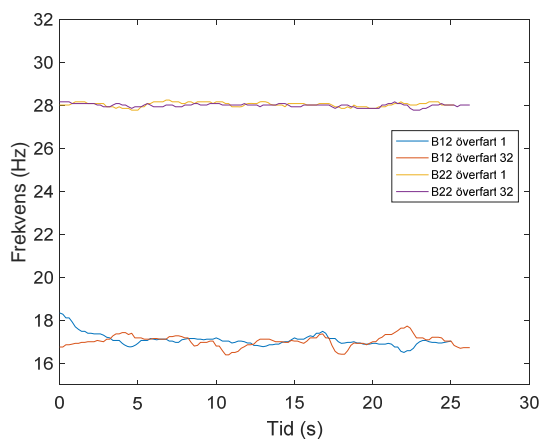
**Morän**

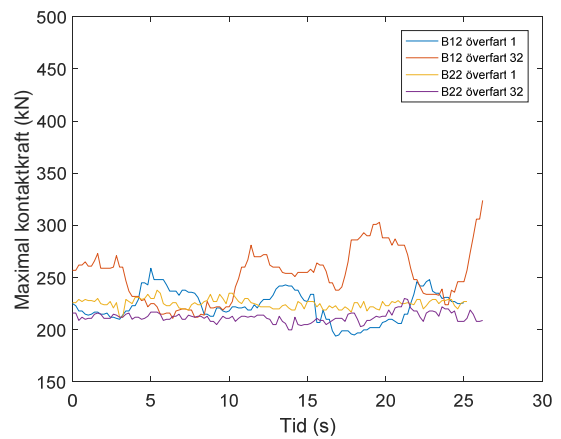
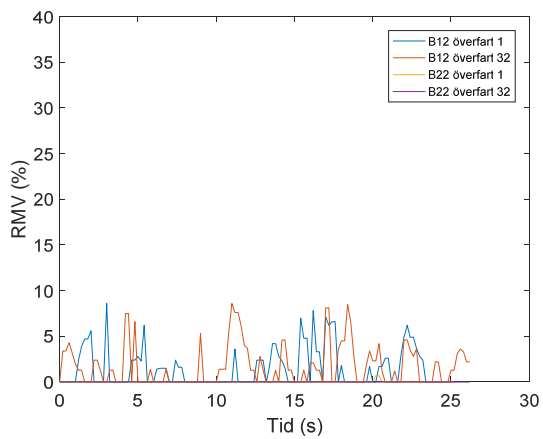
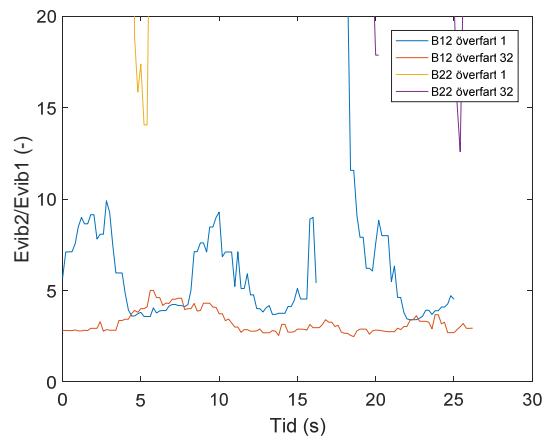
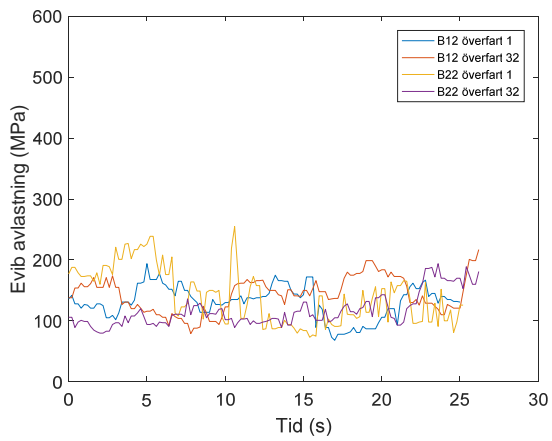
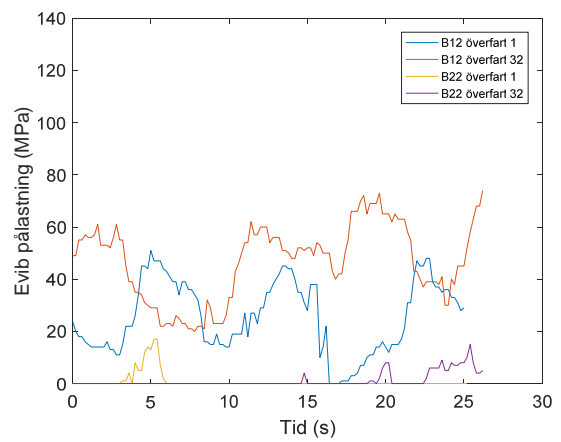
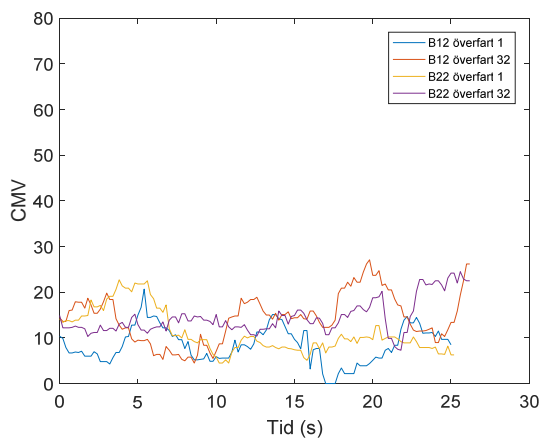
30 cm





50 cm



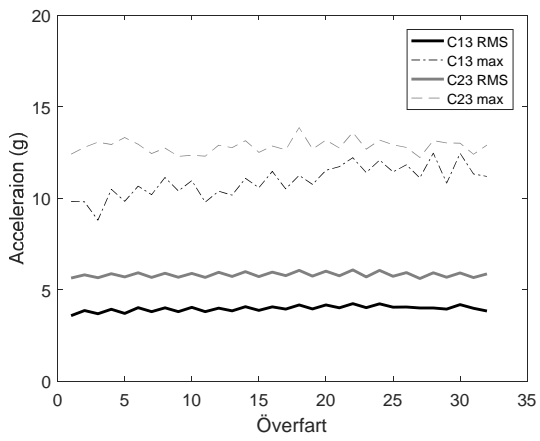
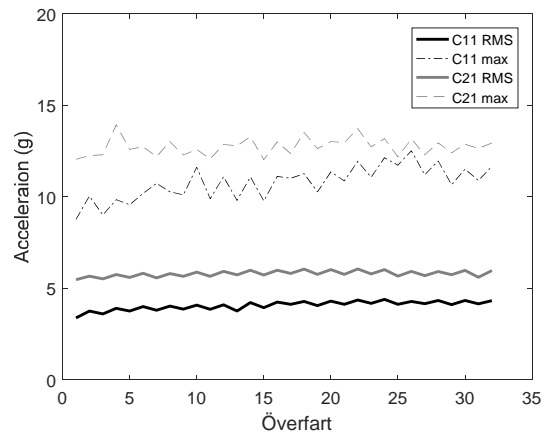
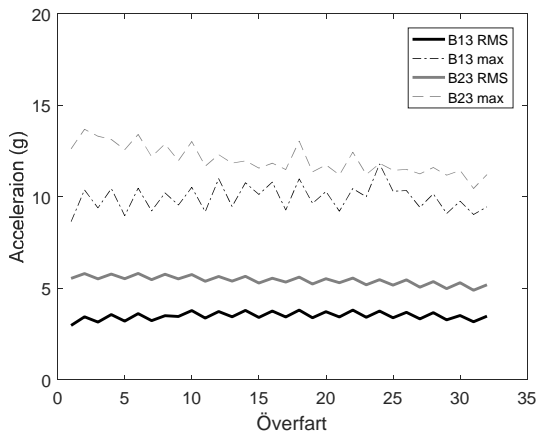
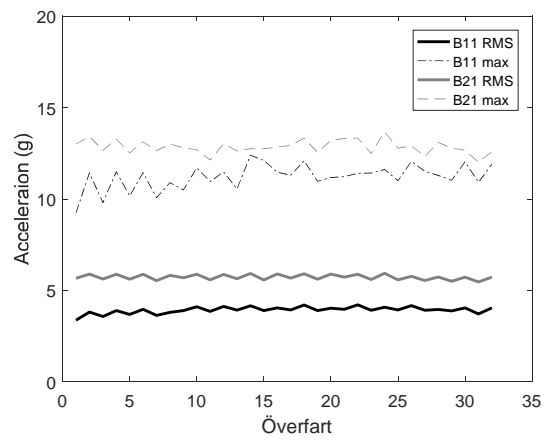
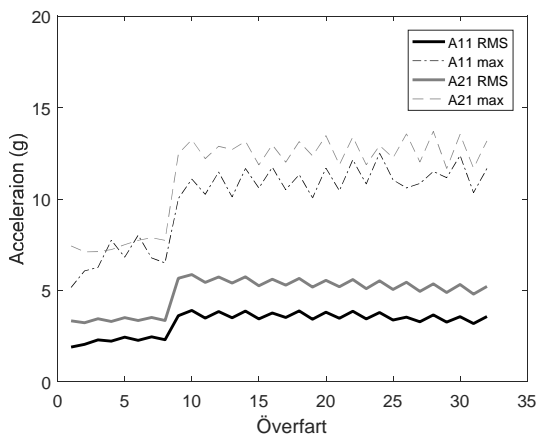


# Bilaga L

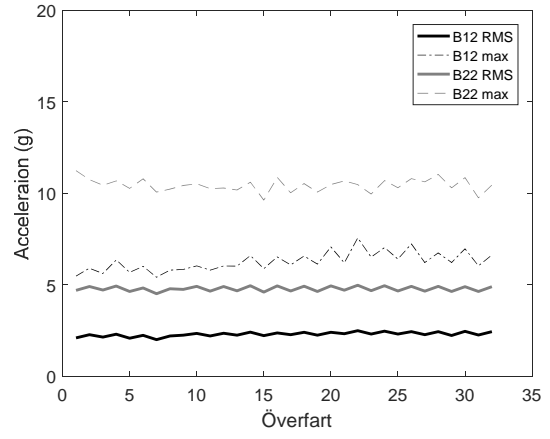
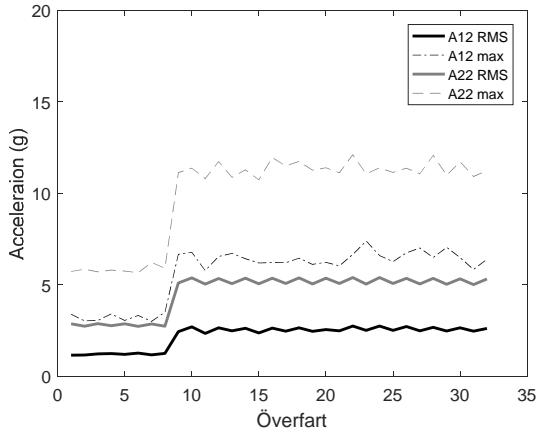
## Accelerometermätningar

### Acceleration

#### Krossmaterial

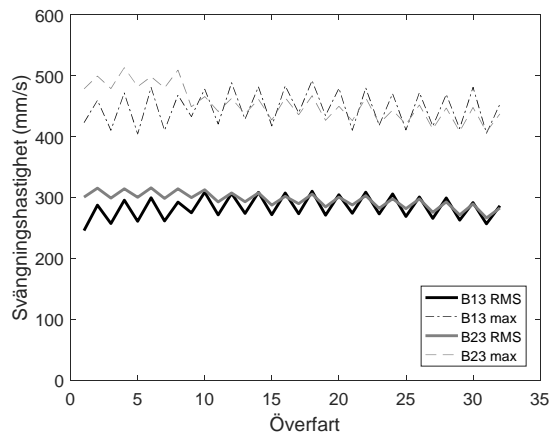
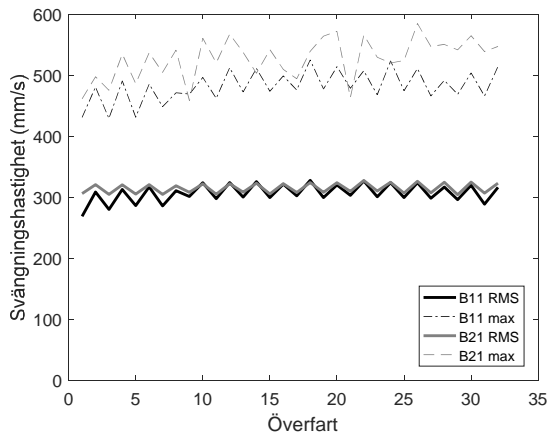
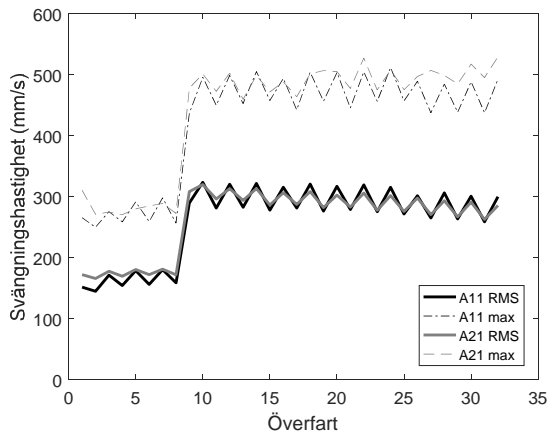


## Morän

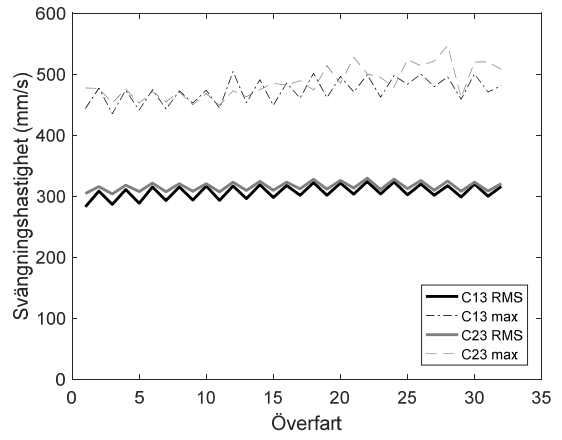
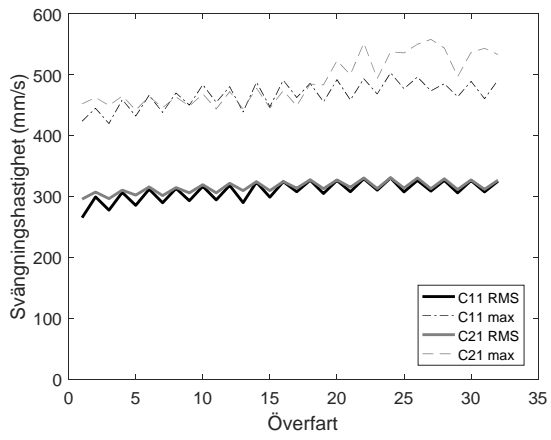


## Svängningshastighet

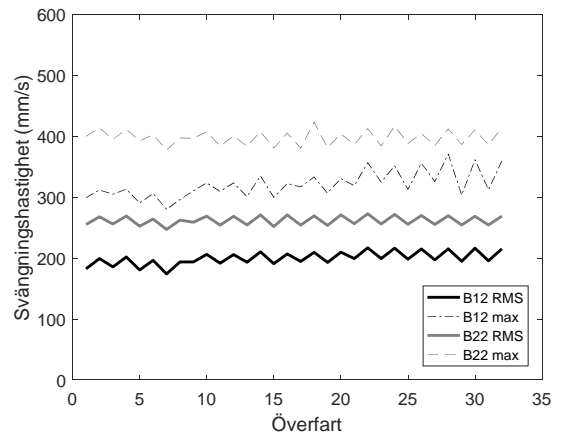
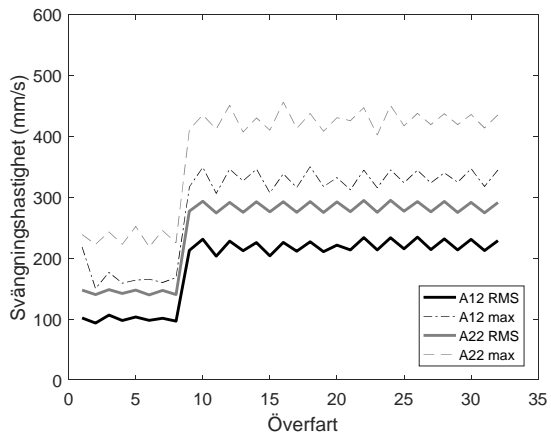
### Krossmaterial





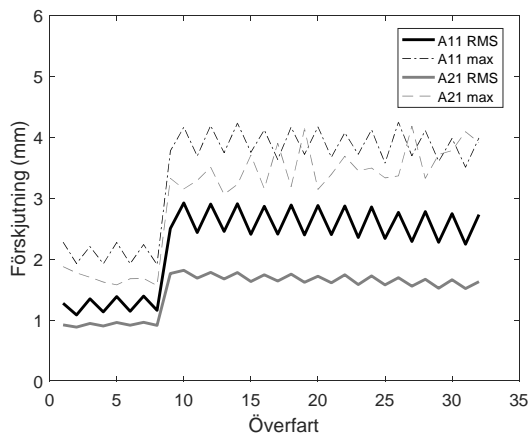


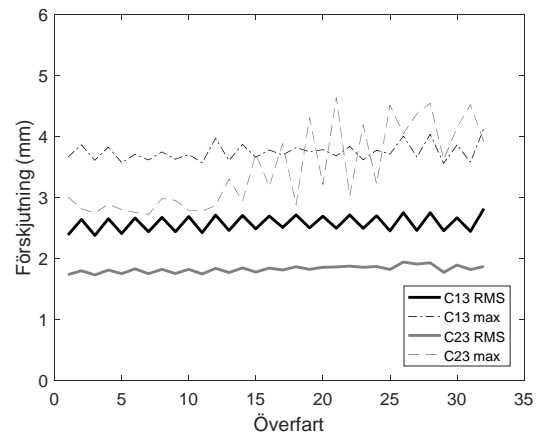
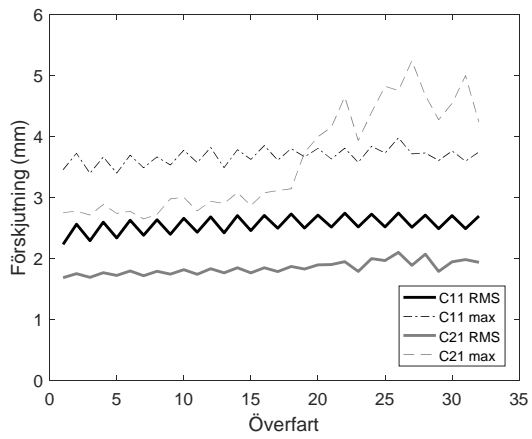
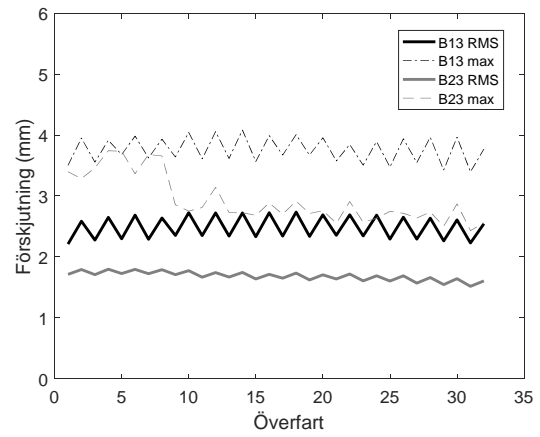
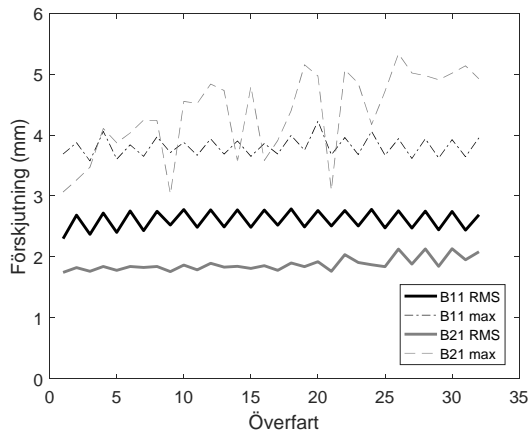
### Morän



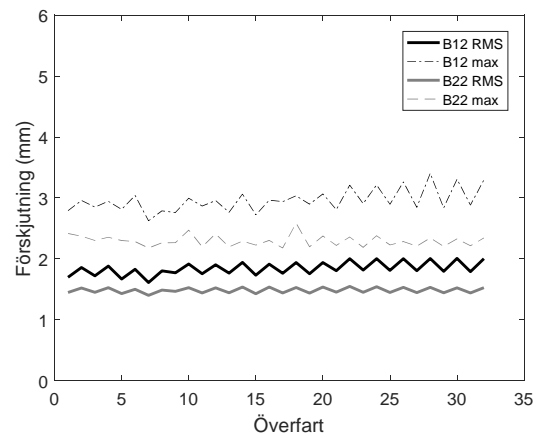
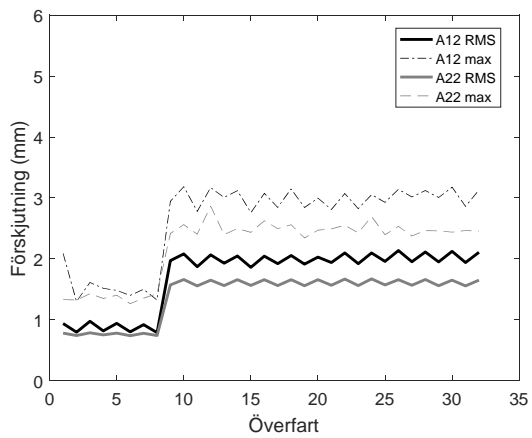
### Förskjutning

#### Krossmaterial





**Morän**

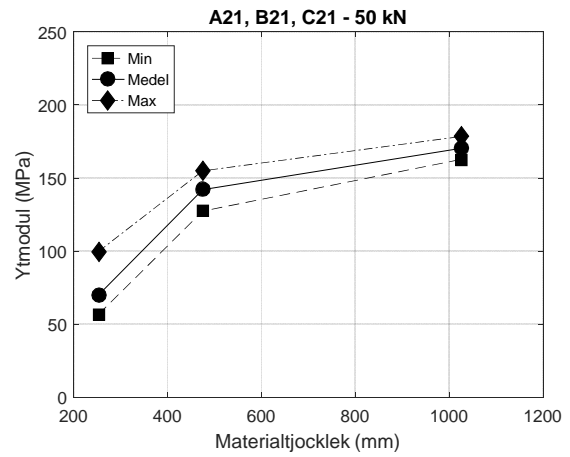
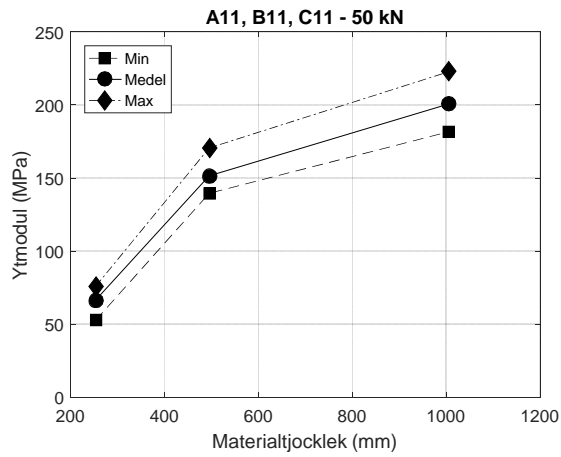
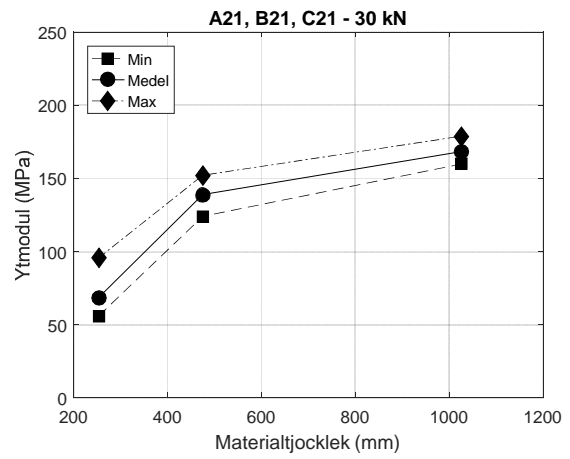
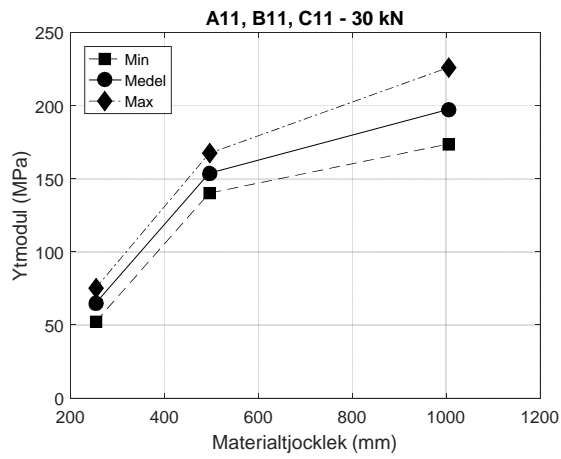


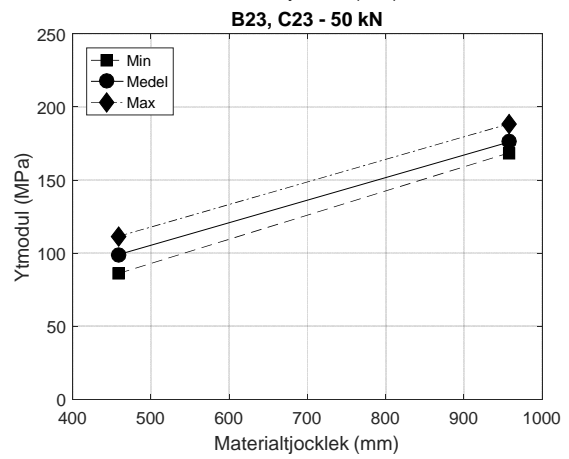
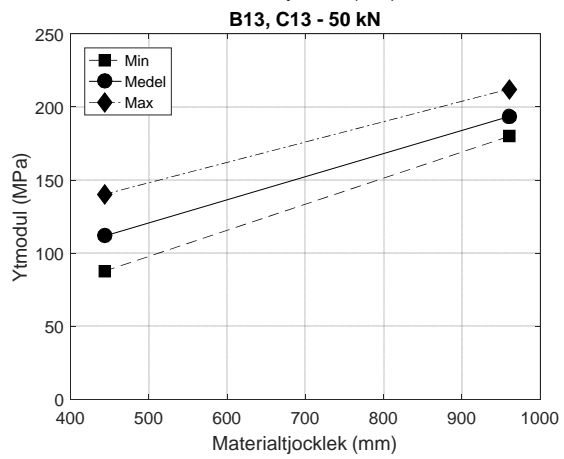
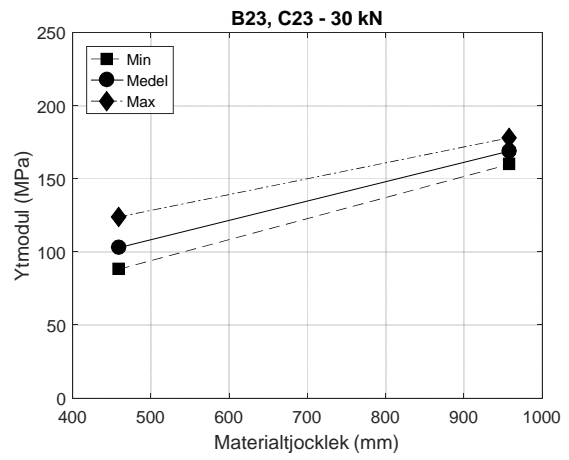
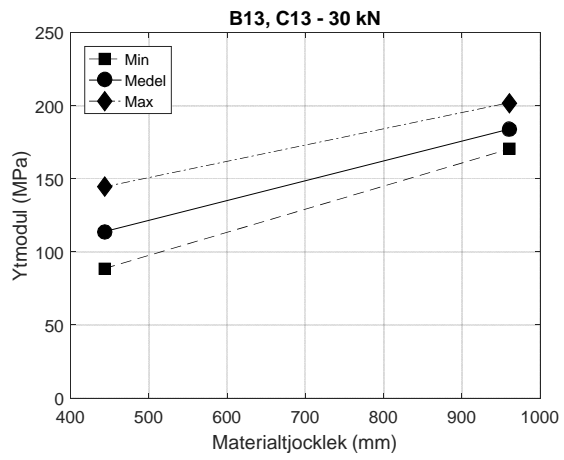
# Bilaga M

## Resultat från tung fallvikt

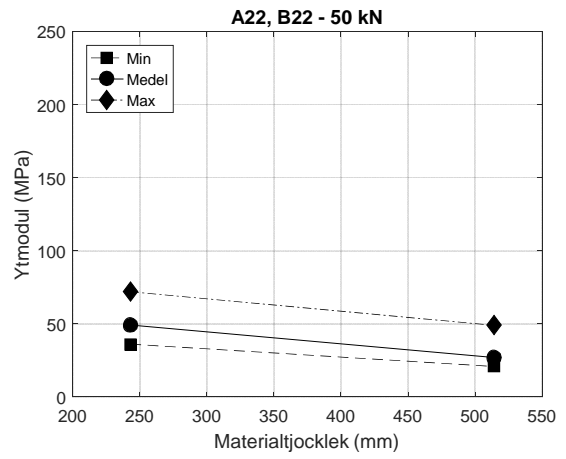
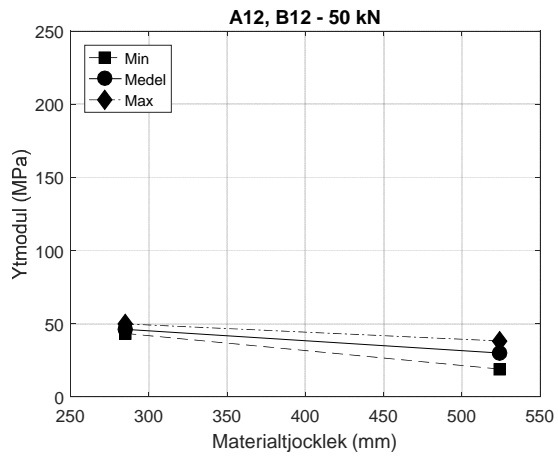
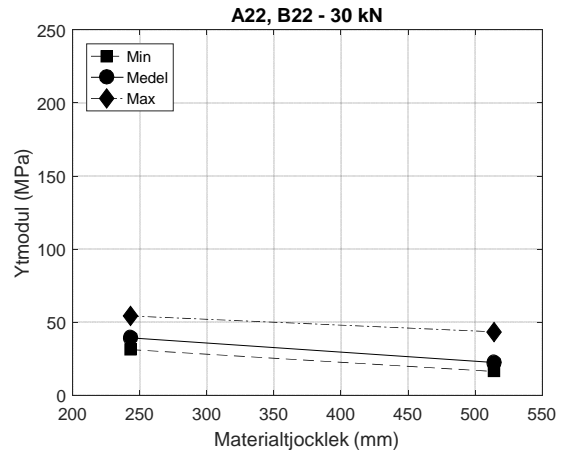
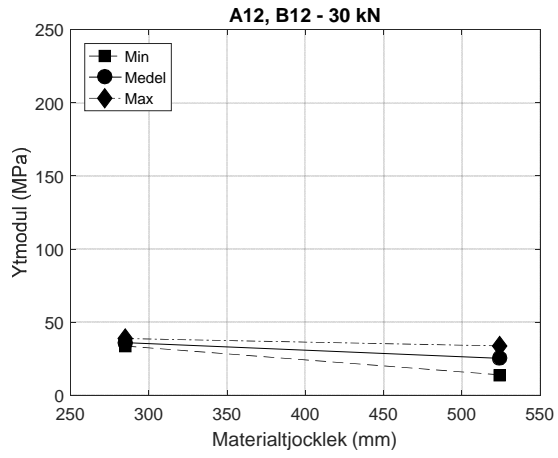
### Ytmodul

#### Krossmaterial



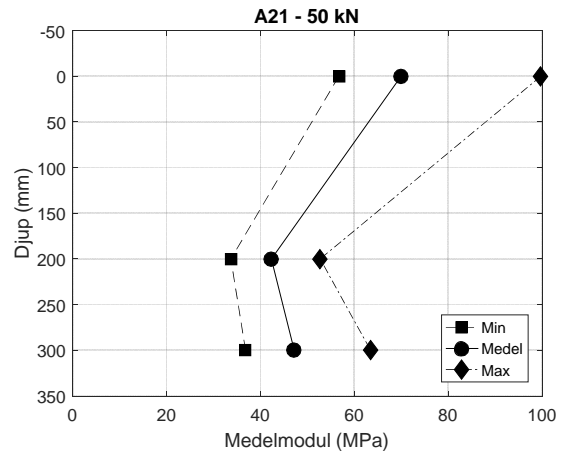
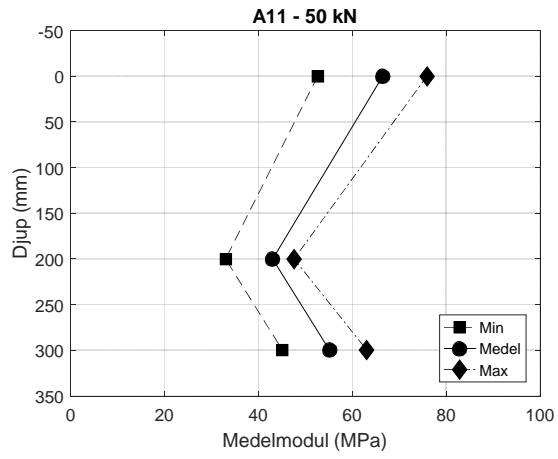
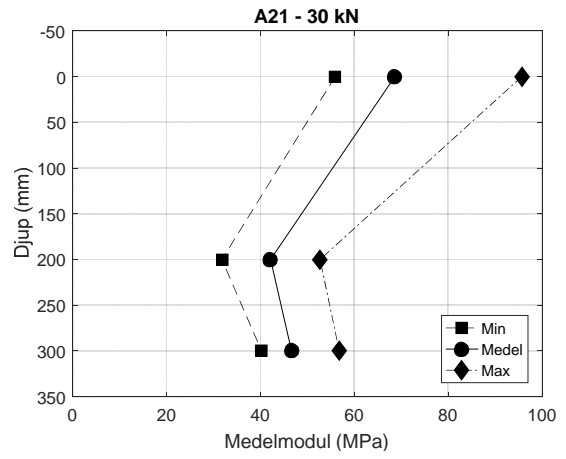
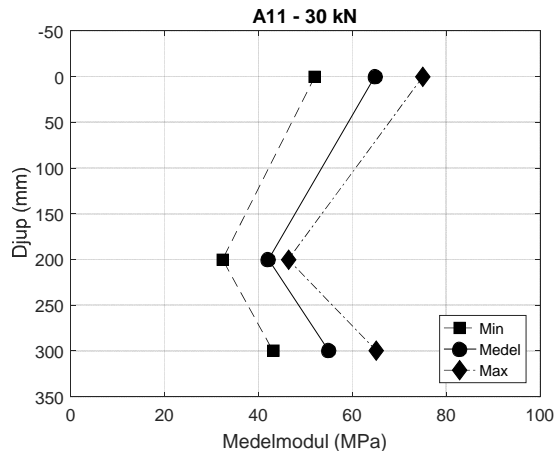


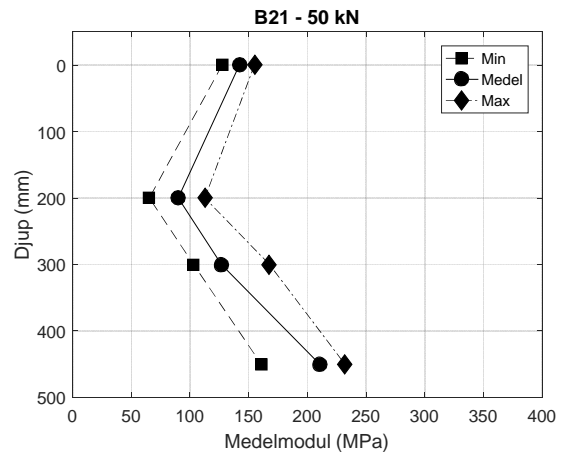
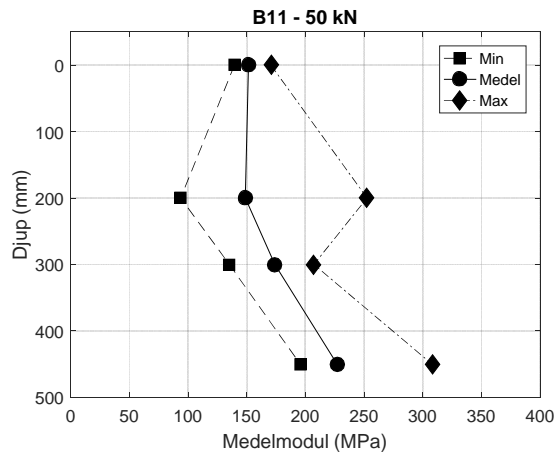
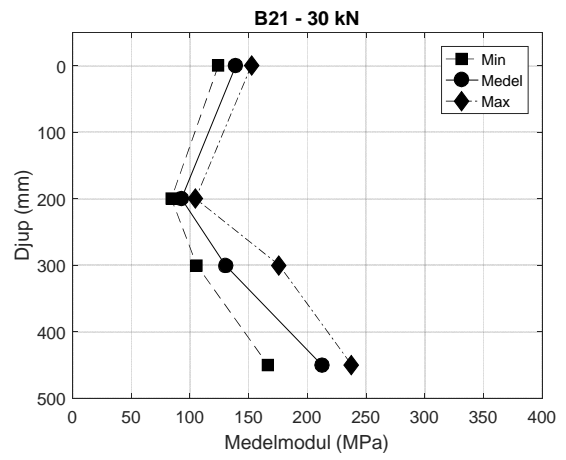
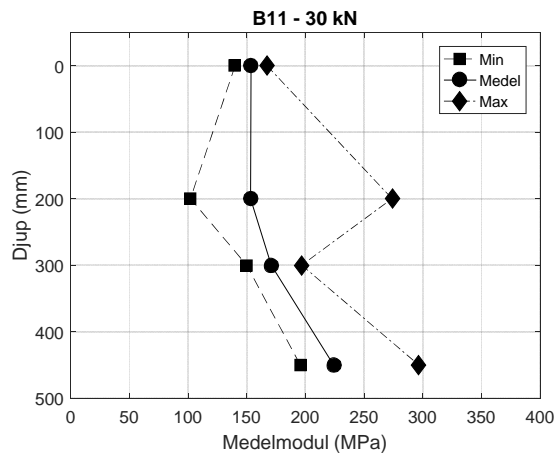
# Morän

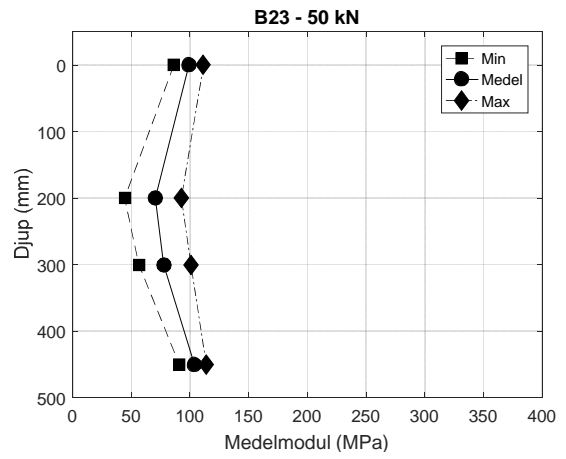
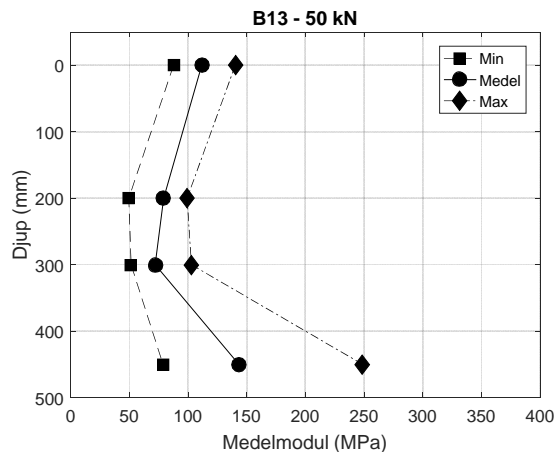
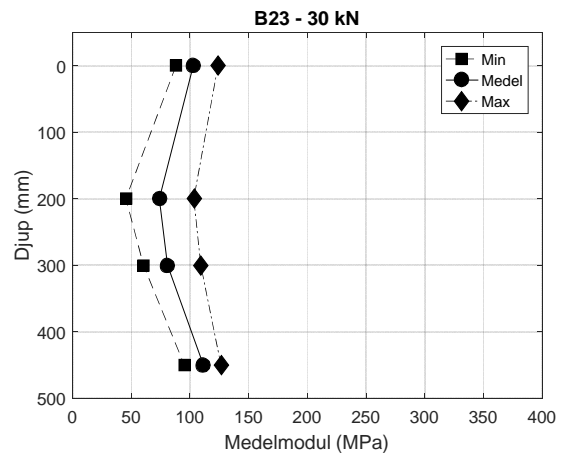
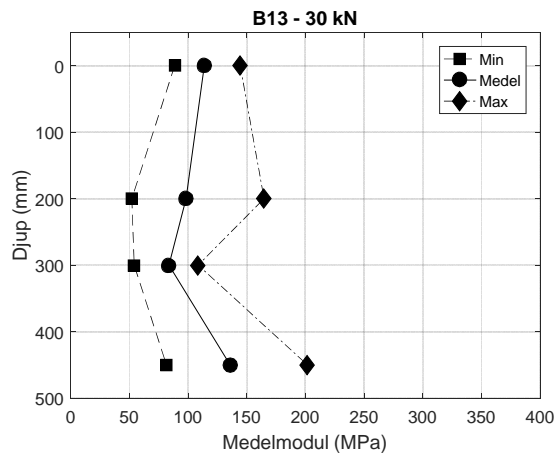


# Medelmodul

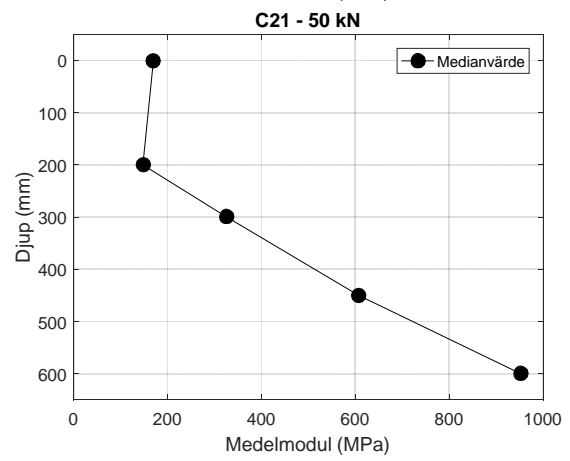
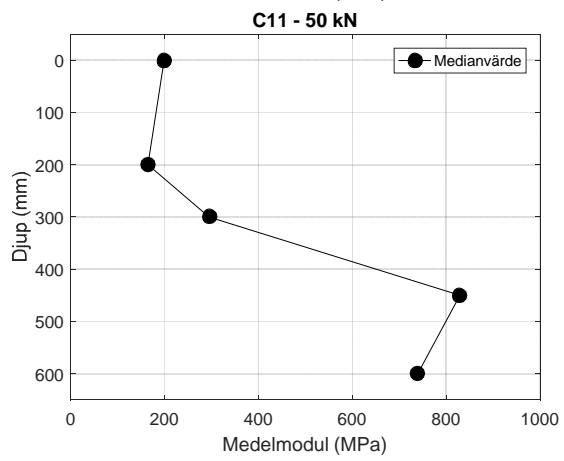
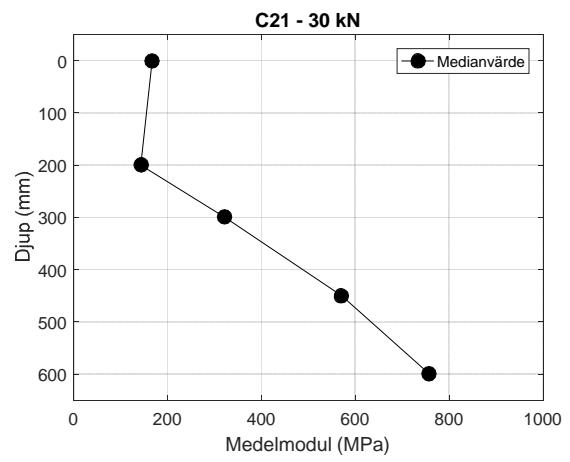
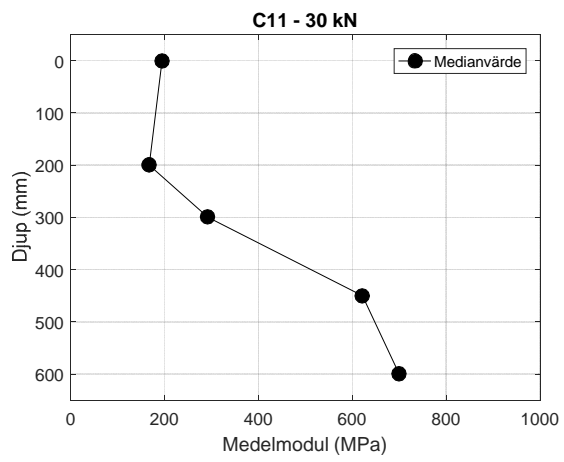
## Krossmaterial

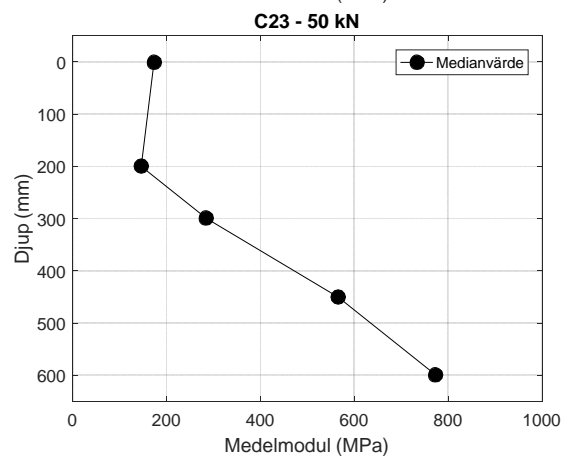
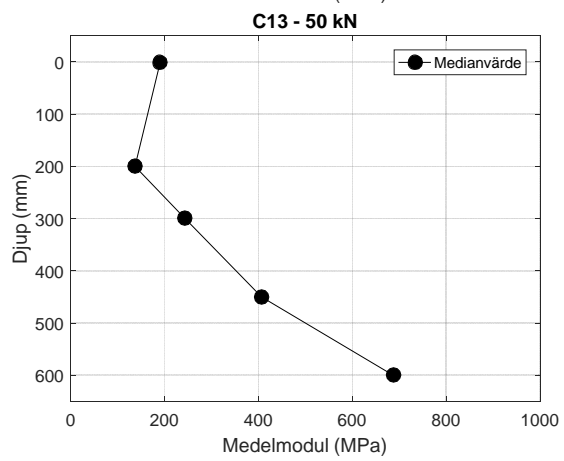
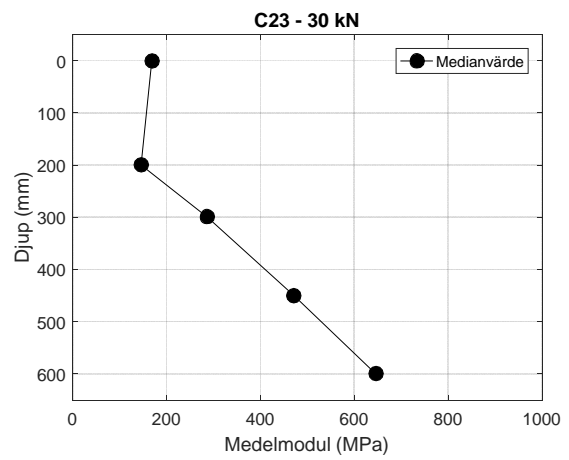
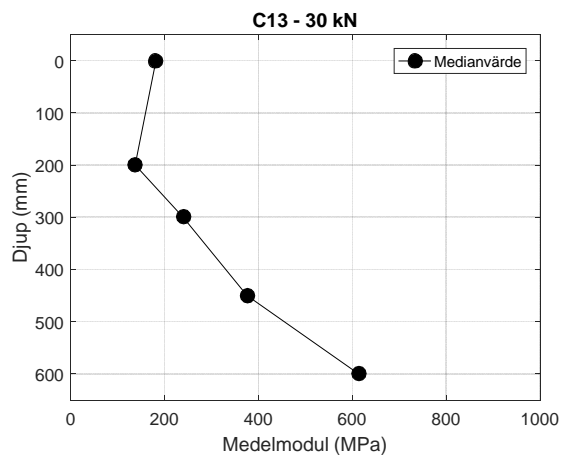




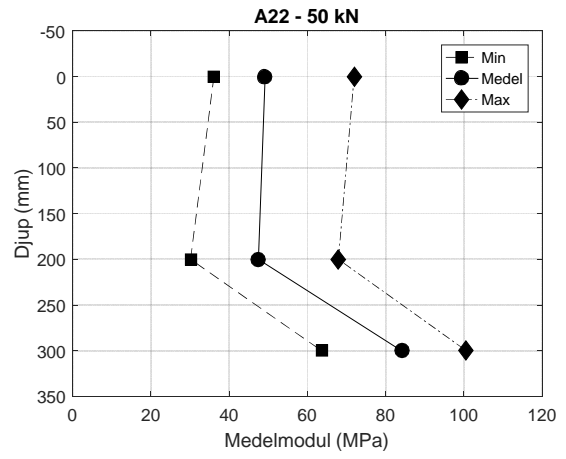
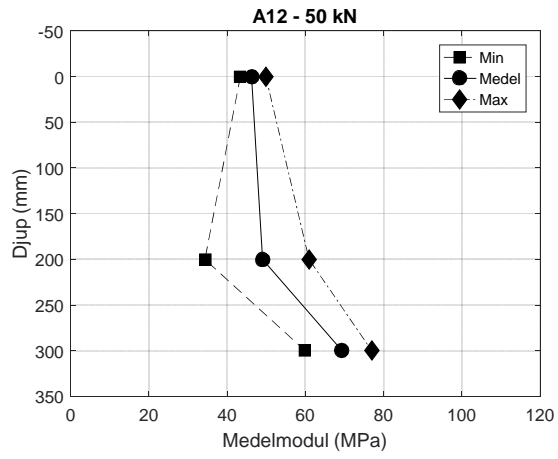
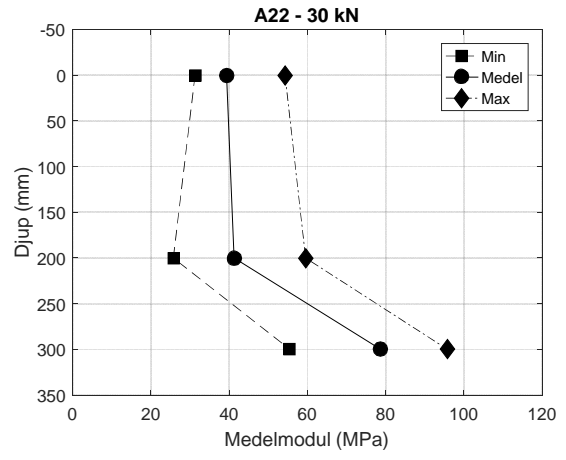
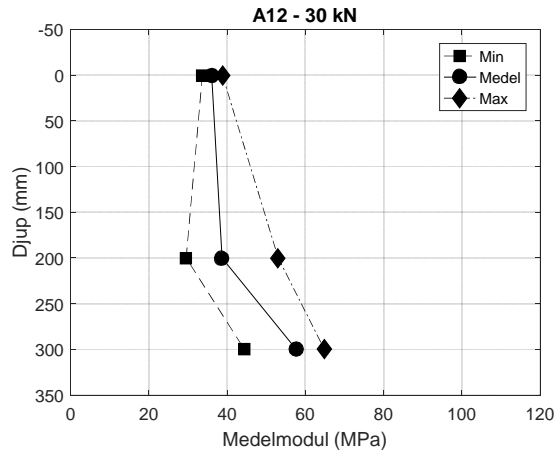


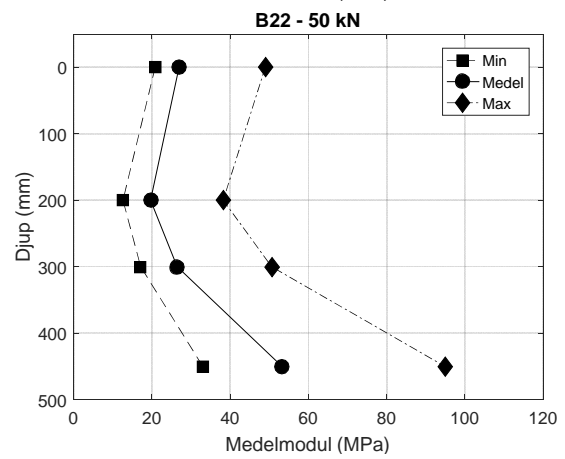
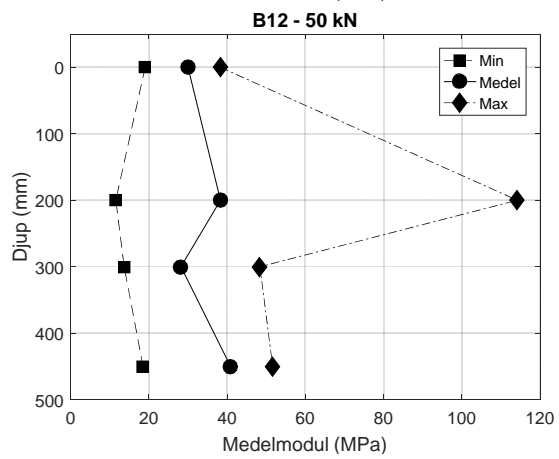
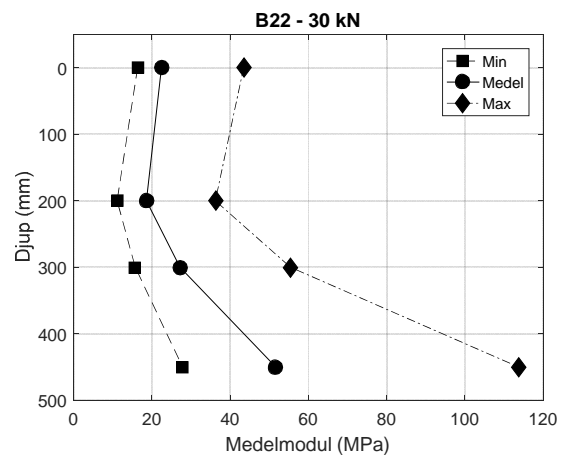
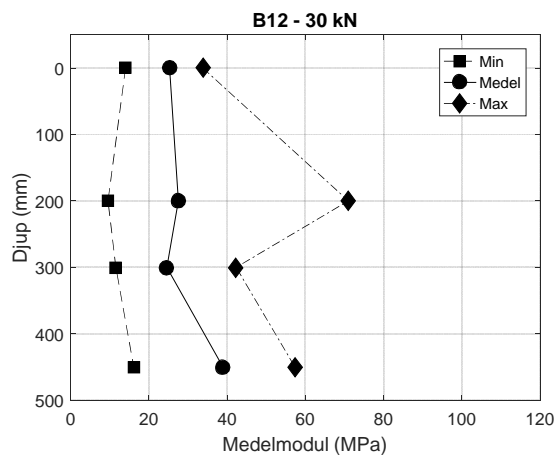






# Morän





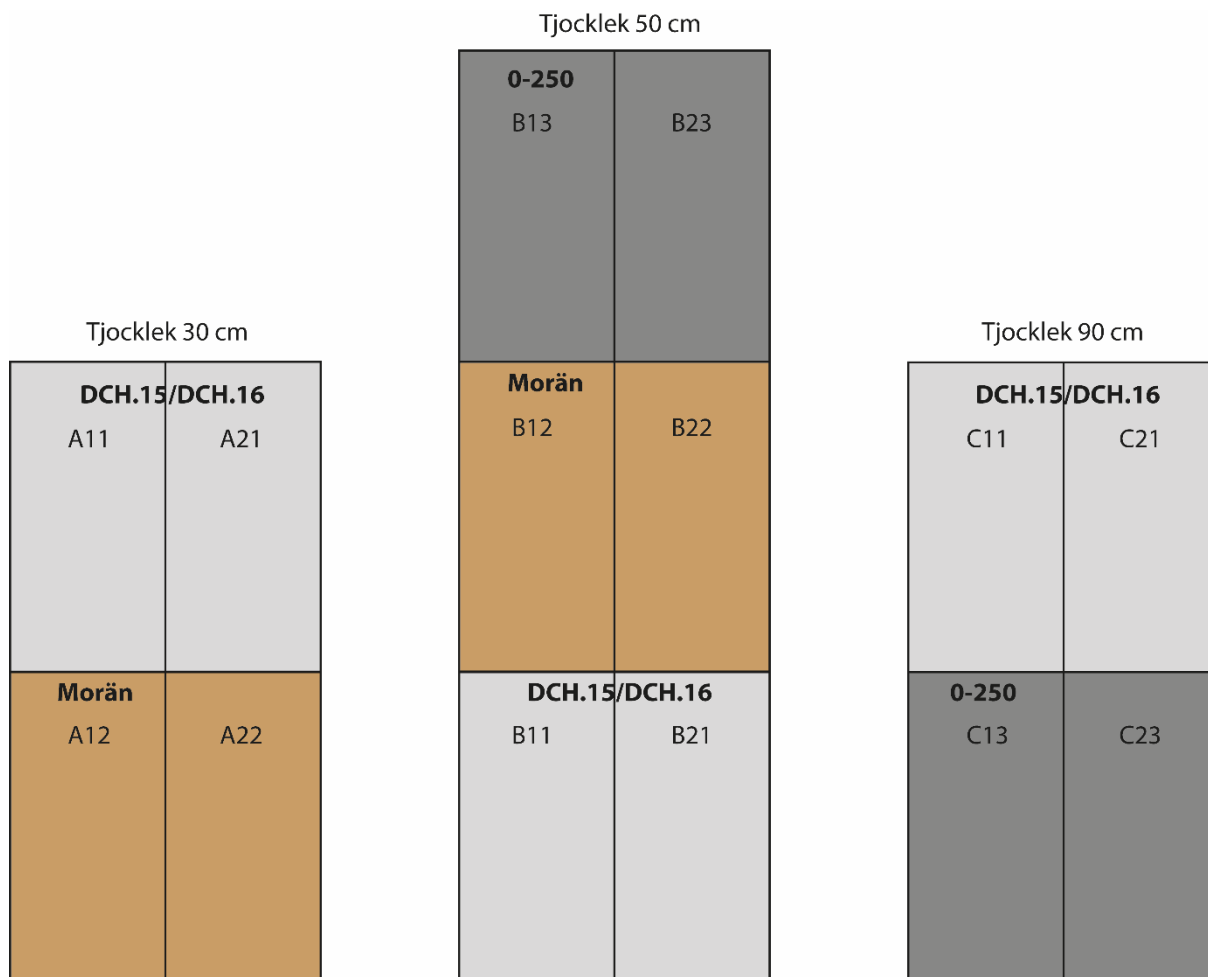
**Bilaga N**

**Rapport seismiska mätningar**

## Seismiska mätningar Norrköping (Braviken)

### Sammanfattning:

Seismiska mätningar har utförts i Norrköping (Braviken) på 14 stycken provytor uppbyggda enligt figur 1. Mätningarna utfördes längs en 3 m lång linje vid två olika tillfällen med syfte att utvärdera förändringar i provytorna beroende på packningsinsats och typ av packning. För de tunnare lagren om 30 och 50 cm var det inte möjligt att bestämma fashastigheten för så korta våglängder som motsvarar lagrets tjocklek. Mätningarna av de tjockare lagren om 90 cm visar att materialet efter sista packningsinsats styvnar till mot ytan vilket visar att packningen har haft mer effekt på den övre delen av provytan. En relativt bra undergrund i kombination med de tunna lagren har lett till mycket dispersion där hastigheten varierar kraftigt över frekvensområdet. Tabell 1 redovisar fashastighet och P-vågshastighet där de har kunnat bestämmas för relevant tjocklek för respektive mätning.



Figur 1. Skiss över provytorna

## Mätningar utförda 17-10-02, 17-10-03 och 17-10-30

Tabell 1. Sammanställning av fashastighet och P-vågshastighet (Vp) för respektive mätning.

Tjocklek (cm)	Material	Yta	Datum	Tid	Fil(er)	Fashastighet (m/s)	Vp (m/s)
30	DCH	A11	17-10-02	09:31-10:30	171002a6-a7	-	320, 334
			17-10-30	10:47	171030a13	-	295
		A21	17-10-02	10:44	171002a8	-	329
			17-10-03	10:00	171003a8	-	309
	Morän	A12	17-10-30	11:24	171030a16	-	408
		A22		11:16	171030a15	-	405
50	DCH	B11	17-10-02	11:22-11:40	171002a10-a11	-	331, 352
			17-10-30	10:17	171030a11	-	292
		B21	17-10-02	11:59-12:14	171002a12-a13	-	349, 350
			17-10-30	10:27	171030a12	-	307
	Morän	B12	17-10-02	11:01	171002a9	-	380
			17-10-30	10:01	171030a10	-	374
		B22	17-10-03	10:17	171003a9	-	390
			17-10-30	09:50	171030a9	-	349
	0-250	B13	17-10-03	08:55-09:07	171003a4-a5	-	325, 281
			17-10-30	09:28	171030a7	-	325
B23		17-10-03	09:19-09:30	171003a6-a7	-	268, 290	
		17-10-30	09:39	171030a8	-	300	
90	DCH	C11	17-10-02	08:19-08:42	171002a1-a3	177, 174, 170	378, 378, 355
			17-10-30	08:20, 08:51	171030a1, a4	223, 177	453, 311
		C21	17-10-02	08:56-09:14	171002a4-a5	158, 175	325, 353
			17-10-30	08:31, 08:41	171030a2-a3	228, 190	446, 399
	0-250	C13	17-10-03	08:07-08:25	171003a1-a2	107, 107	312, 318
			17-10-30	09:02	171030a5	149	333
		C23	17-10-03	08:39	171003a3	103	287
			17-10-30	09:10	171030a6	150	313

## Innehåll

Seismiska mätningar Norrköping (Braviken) .....	1
Sammanfattning:.....	1
Tjocklek 90 cm.....	5
Yta C11 90 cm DCH.15/DCH.16.....	5
171002a1 och 171002a2 (linje 1) = 179 m/s och 176 m/s (200-500 Hz).....	5
171030a1 (linje 1) = 223 m/s (300-700 Hz).....	6
171002a3 (linje 2) = 170 m/s (200-320 Hz).....	7
171030a4 (linje 2) = 177 m/s (300-700 Hz).....	7
Yta C21 90 cm DCH.15/DCH.16.....	8
171002a4 (linje 2) = 158 m/s (200-600 Hz).....	8
171002a5 (linje 1) = 175 m/s (200-600 Hz).....	9
171030a2 (linje 1) = 229 m/s (300-600 Hz).....	10
171030a3 (linje 2) = 190 m/s (250-500 Hz).....	10
Yta C13, 90 cm 0-250 .....	11
171003a1 och 171003a2 (linje 1) = 114 och 115 m/s (100-150 Hz).....	11
171030a5 = 149 m/s (175-700 Hz).....	12
Yta C23, 90 cm 0-250 .....	13
171003a3 = 104 m/s (100-155 Hz).....	13
171030a6 = 150 m/s (175-700 Hz).....	13
Tjocklek 50 cm.....	14
Yta B11, 50 cm DCH.15/DCH.16.....	14
171002a10 (linje 1) = 139 m/s (100-275 Hz).....	14
171002a11 (linje 2) = 164 m/s (100-300 Hz).....	14
171030a11 (linje 1) = 128 m/s (100-200 Hz).....	15
Yta B21, 50 cm DCH.15/DCH.16.....	16
171002a12 (linje 1) = 169 m/s (100-320 Hz).....	16
171002a13 (linje 2) = 143 m/s (150-320 Hz).....	16
171030a12 (linje 2) = 115 m/s (100-200 Hz).....	17
Yta B12, 50 cm Morän.....	18
171002a9 = -.....	18
171030a10 = -.....	18
Yta B22, 50 cm Morän.....	19
171003a9 = -.....	19
171030a9 = 160 m/s (100 – 200 Hz).....	20



Yta B13, 50 cm 0-250 .....	21
171003a4 (linje 1, mycket stenig yta) = - .....	21
171003a5 (linje 2) = - .....	22
171030a7 (linje 2) = 135 m/s (100-200 Hz) .....	23
Yta B23, 50 cm 0-250 .....	24
171003a6 (linje 1) = .....	24
171003a7 (linje 2) = - .....	24
171030a8 (linje 1) = - .....	25
Tjocklek 30 cm.....	26
Yta A11 - DCH.15/DCH.16 .....	26
171002a6 (linje 1) = 121 m/s (100-225 Hz) .....	26
171002a7 (linje 2) = 130 m/s (100-150 Hz) .....	26
171030a13 (linje 2) = 107 m/s (80-150 Hz) .....	27
Yta A21 - DCH.15/DCH.16 .....	28
171002a8 (linje 1) = 141 m/s (100-275 Hz) .....	28
171003a8 (linje 2) = 158 m/s (100-175 Hz) .....	28
171030a14 (linje 1) = 101 m/s (100-175 Hz) .....	29
Yta A12 30 cm Morän.....	30
171030a16 = - .....	30
Yta A22 30 cm Morän.....	31
171030a15 = - .....	31

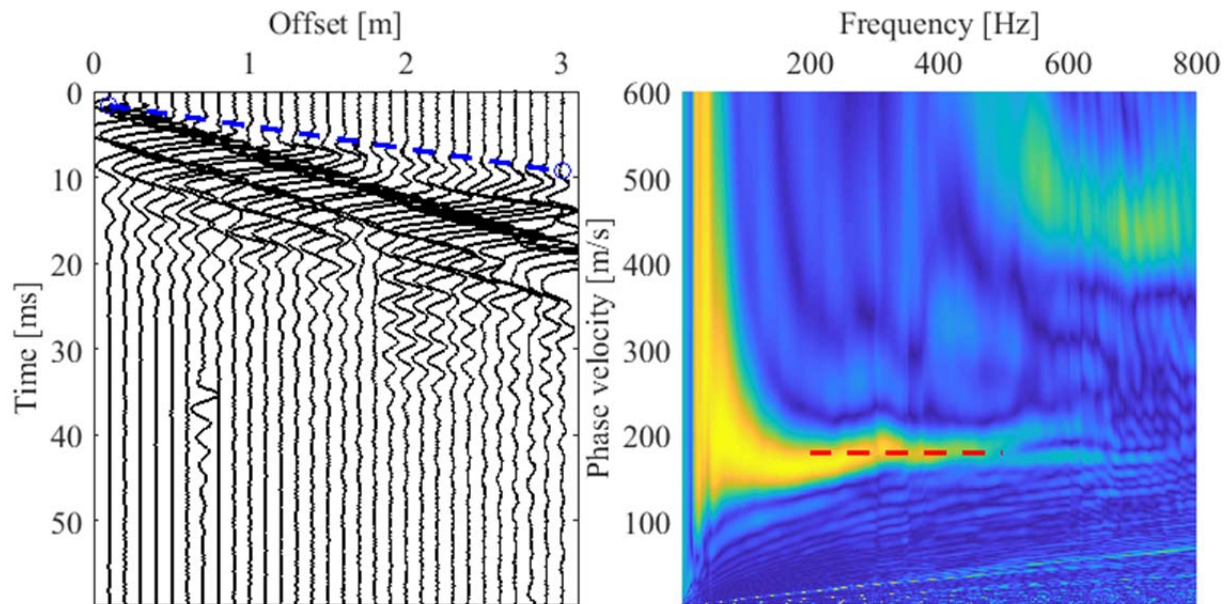
## Tjocklek 90 cm

### Yta C11 90 cm DCH.15/DCH.16

171002a1 och 171002a2 (linje 1) = 179 m/s och 176 m/s (200-500 Hz)

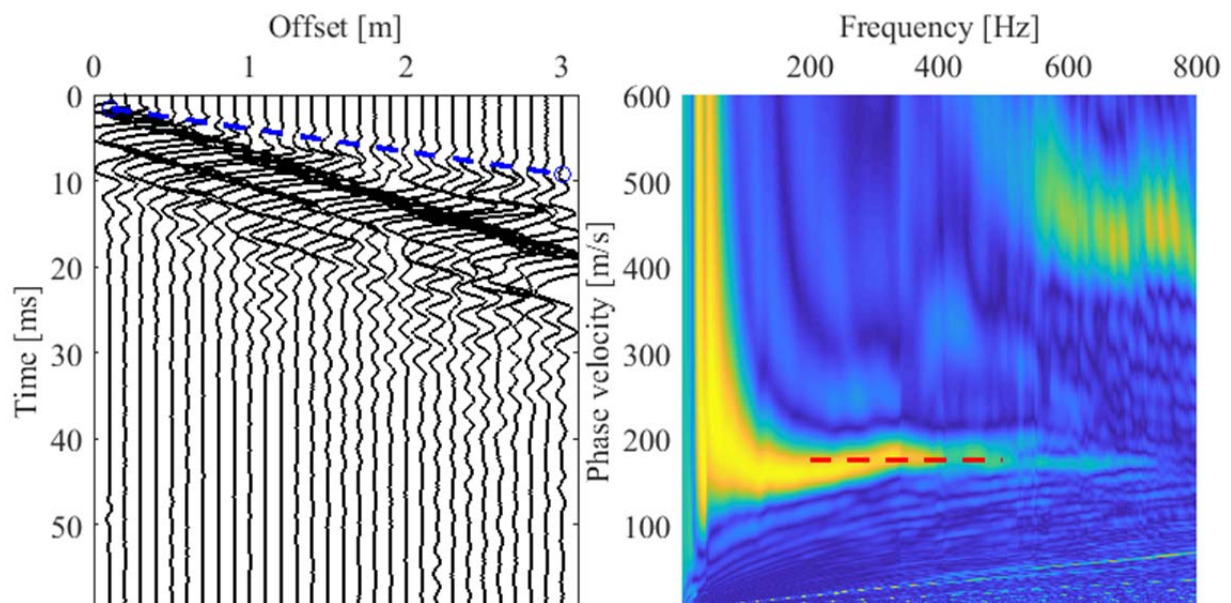
Fashastigheten är bestämd över ett frekvensområde som ger våglängder mellan ca 36 – 90 cm. Fashastigheten illustreras med en röd streckad linje i frekvensdomän och P-vågshastigheten med blå streckad linje i tidsdomän.

$V_p = 378$  m/s



171002a2 = 176 m/s (200-500 Hz)

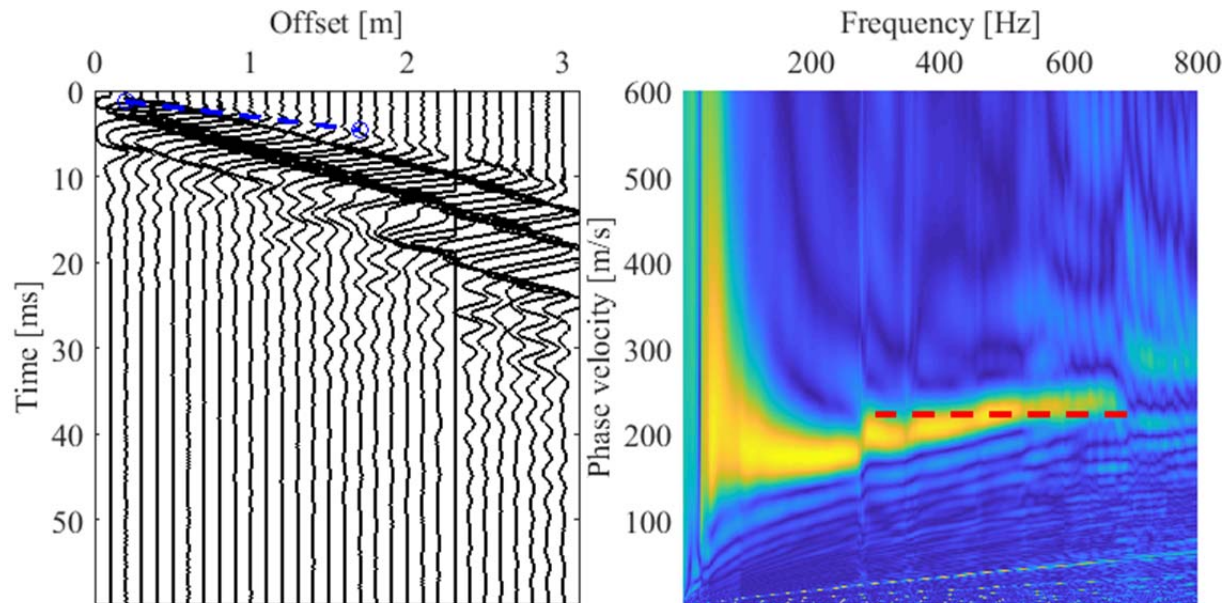
$V_p = 378$  m/s



**171030a1 (linje 1) = 223 m/s (300-700 Hz)**

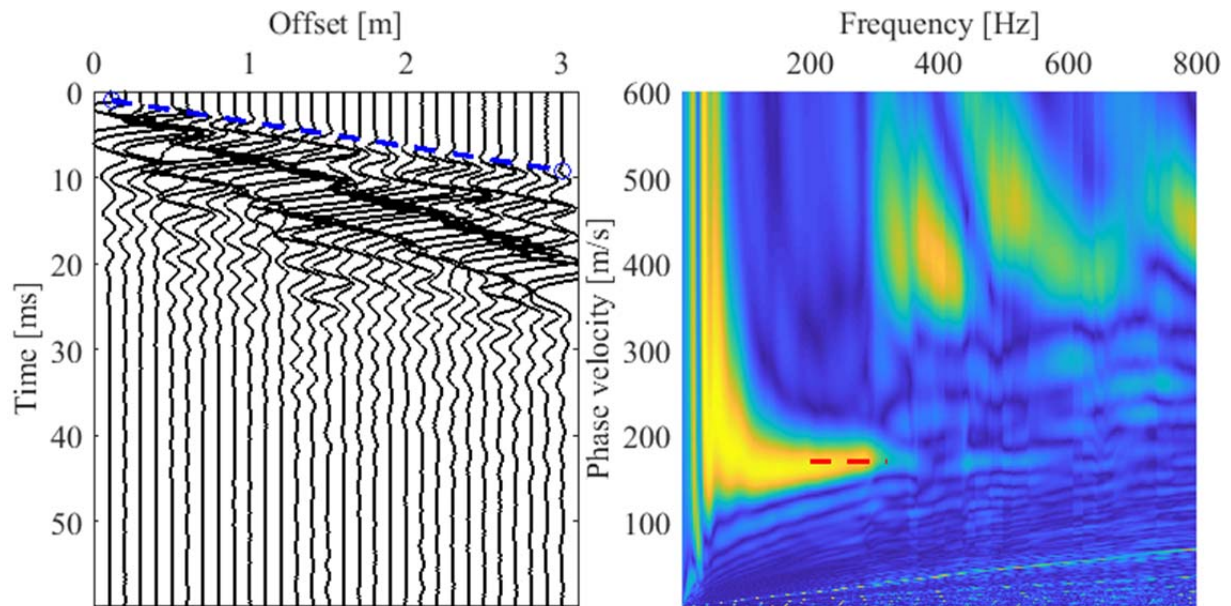
Våglängder mellan ca 32 – 74 cm. Den stigande fashastigheten tyder på att lagret blir styvare mot ytan.

$V_p = 453$  m/s

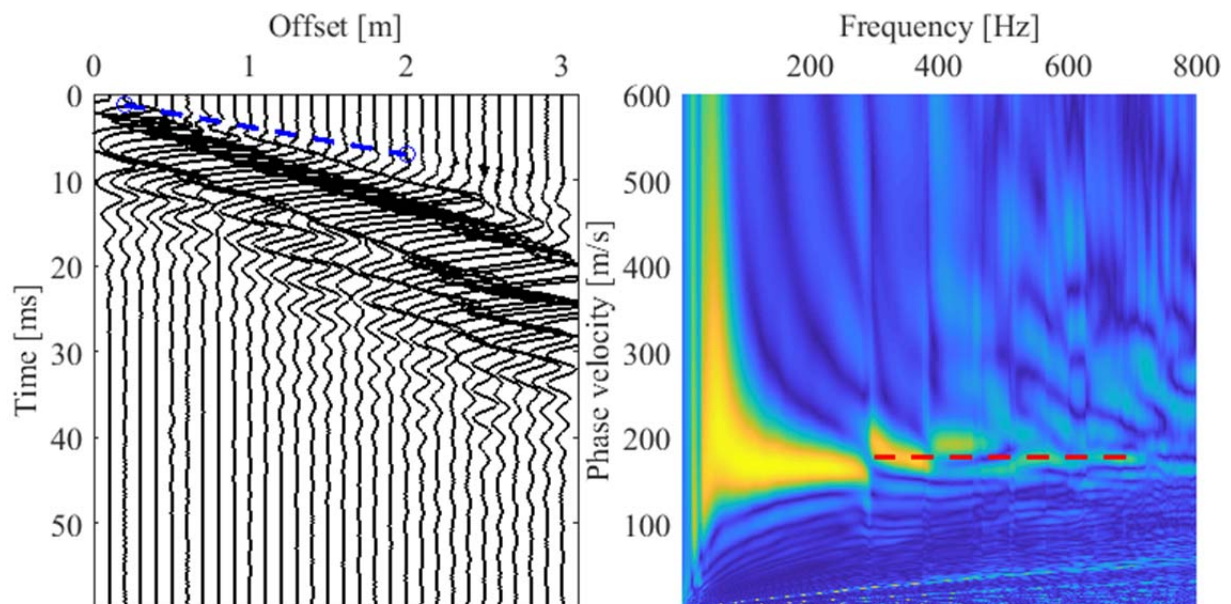


**171002a3 (linje 2) = 170 m/s (200-320 Hz)**

Våglängder mellan ca 53 – 85 cm.

 $V_p = 355 \text{ m/s}$ **171030a4 (linje 2) = 177 m/s (300-700 Hz)**

Våglängder mellan ca 25 – 59 cm.

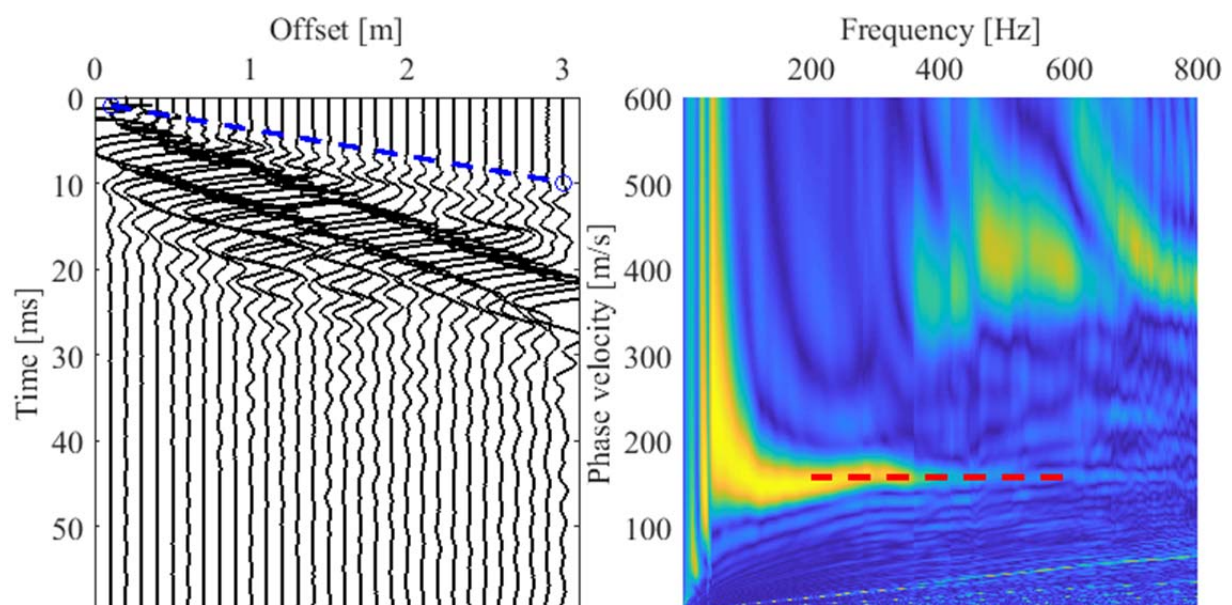
 $V_p = 311 \text{ m/s}$ 

## Yta C21 90 cm DCH.15/DCH.16

171002a4 (linje 2) = 158 m/s (200-600 Hz)

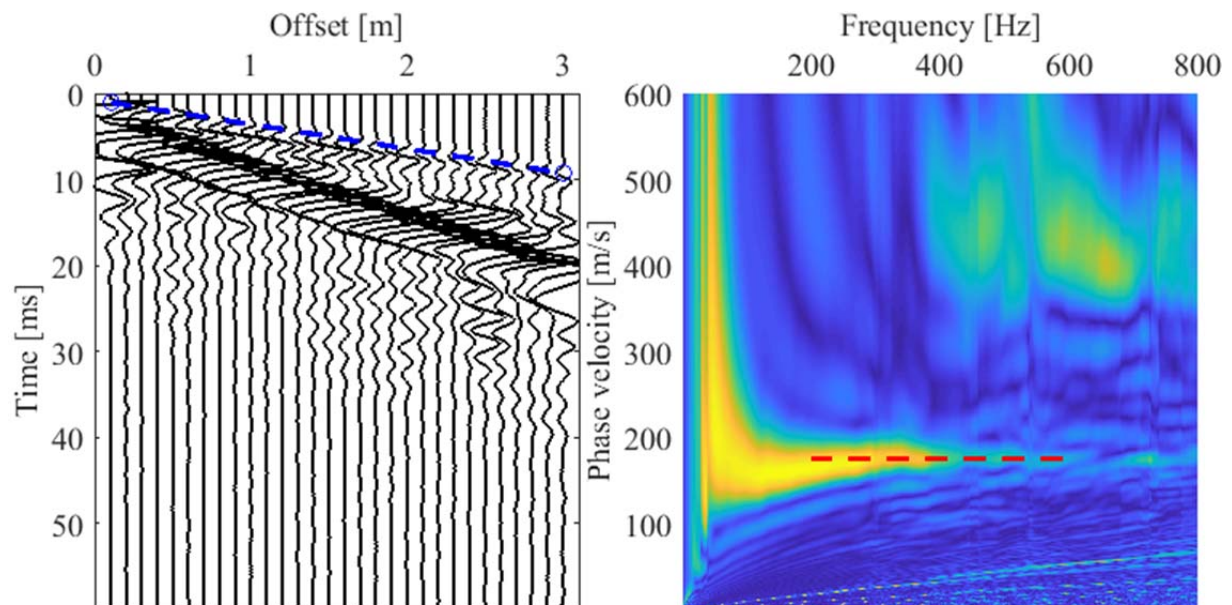
Våglängder mellan ca 35 – 63 cm.

$V_p = 325$  m/s



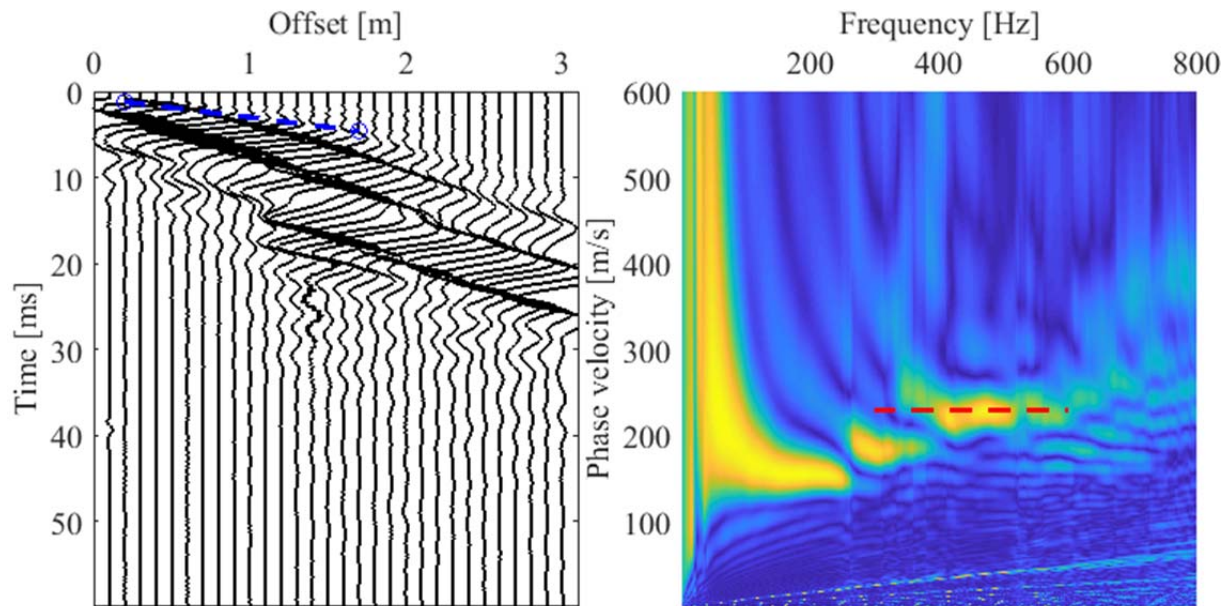
**171002a5 (linje 1) = 175 m/s (200-600 Hz)**

Våglängder mellan ca 39 – 70 cm.

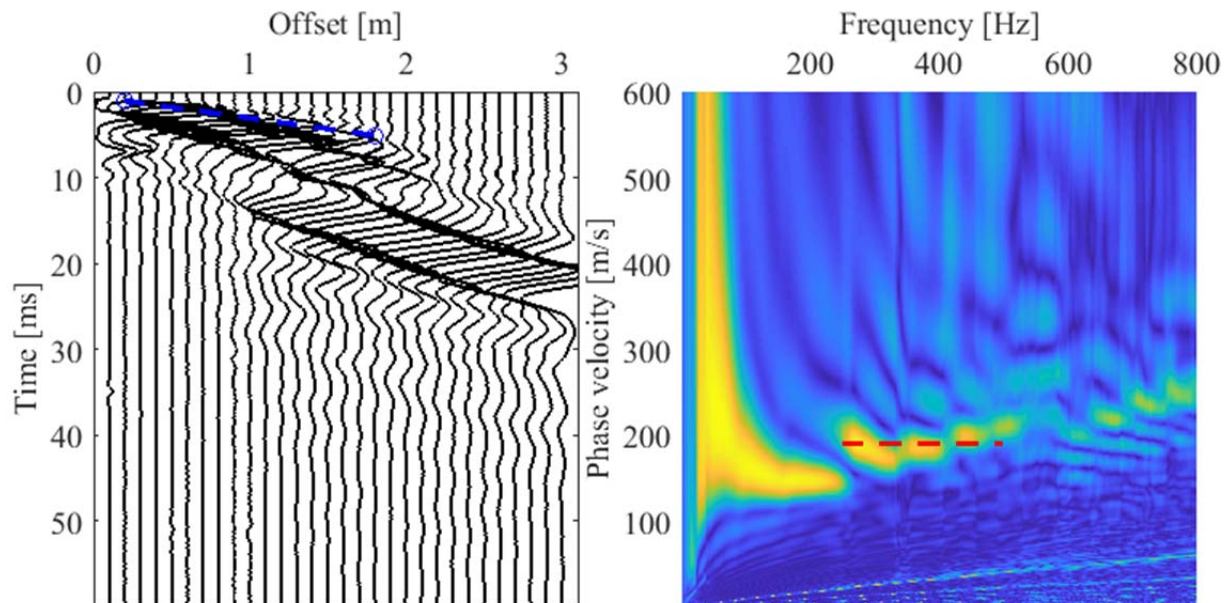
 $V_p = 353 \text{ m/s}$ 

**171030a2 (linje 1) = 229 m/s (300-600 Hz)**

Våglängder mellan ca 38 – 76 cm.

 $V_p = 446 \text{ m/s}$ **171030a3 (linje 2) = 190 m/s (250-500 Hz)**

Våglängder mellan ca 38 – 76 cm.

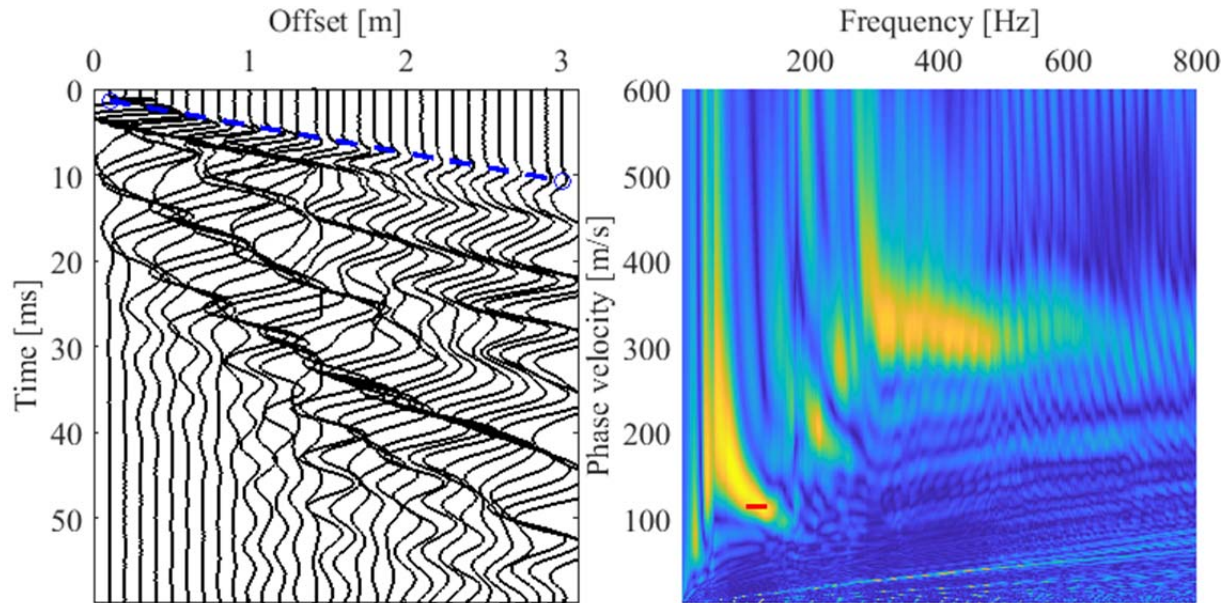
 $V_p = 399 \text{ m/s}$ 

## Yta C13, 90 cm 0-250

171003a1 och 171003a2 (linje 1) = 114 och 115 m/s (100-150 Hz)

Våglängder mellan ca 76 – 114 cm.

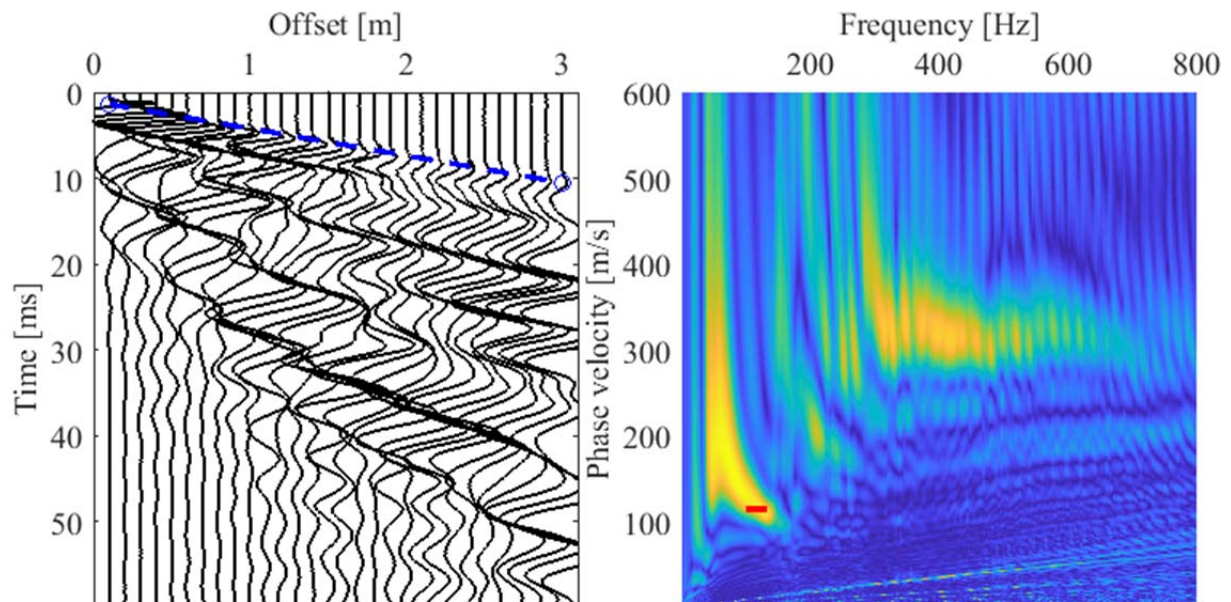
$V_p = 312$  m/s



171003a2 = 115 m/s (100-150 Hz)

Våglängder mellan ca 77 – 115 cm.

$V_p = 318$  m/s

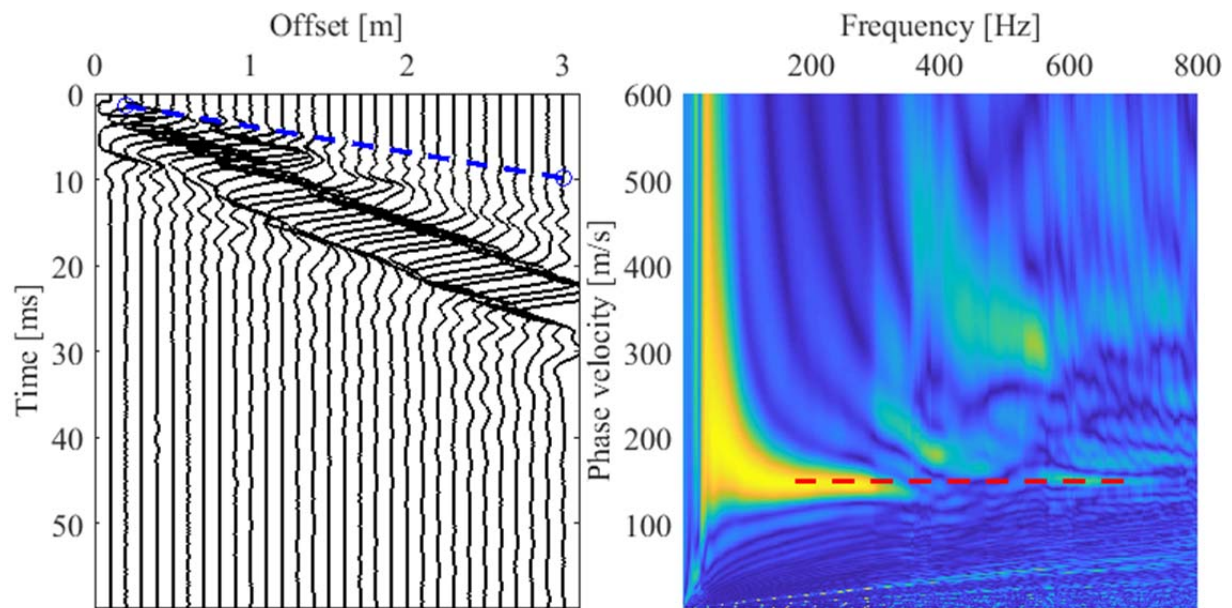




**171030a5 = 149 m/s (175-700 Hz)**

Våglängder mellan ca 21 – 85 cm.

$V_p = 333$  m/s

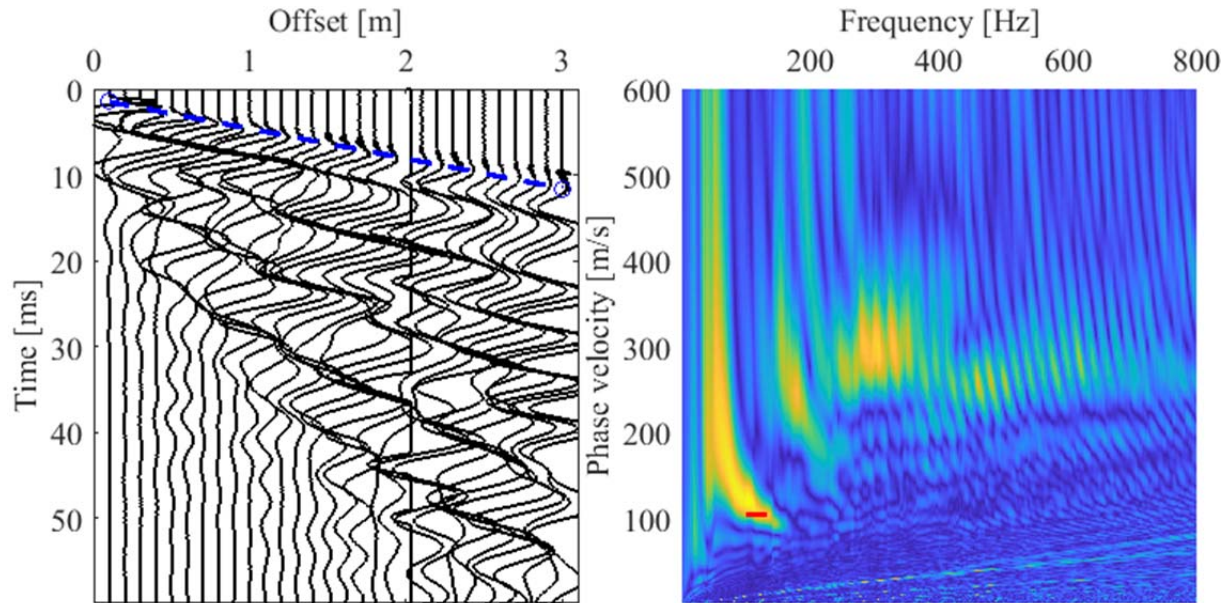


## Yta C23, 90 cm 0-250

**171003a3 = 104 m/s (100-155 Hz)**

Våglängder mellan ca 67 – 104 cm.

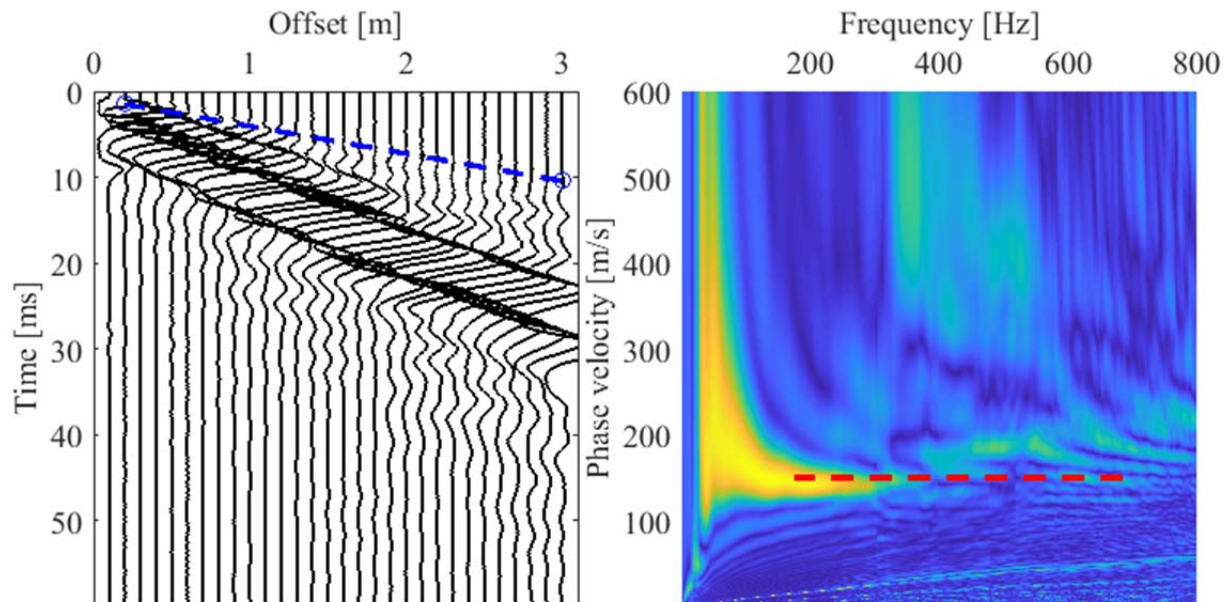
$V_p = 287$  m/s



**171030a6 = 150 m/s (175-700 Hz)**

Våglängder mellan ca 21 – 86 cm.

$V_p = 313$  m/s



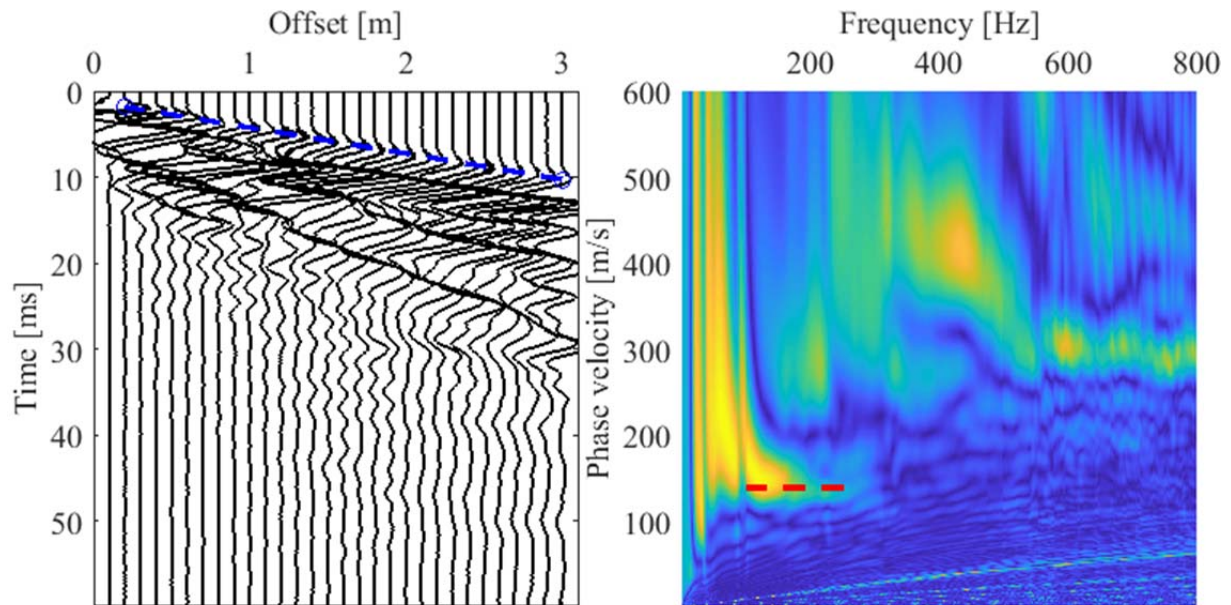
## Tjocklek 50 cm

### Yta B11, 50 cm DCH.15/DCH.16

**171002a10 (linje 1) = 139 m/s (100-275 Hz)**

Våglängderna mellan 100 till 275 Hz för en fashastighet på 139 m/s motsvarar ca 50 – 140 cm, vilket innebär att fashastigheten troligen är ett resultat av den underliggande terrassen. Detta gäller även för övriga mätningar på ytorna med tjocklek av 50 cm.

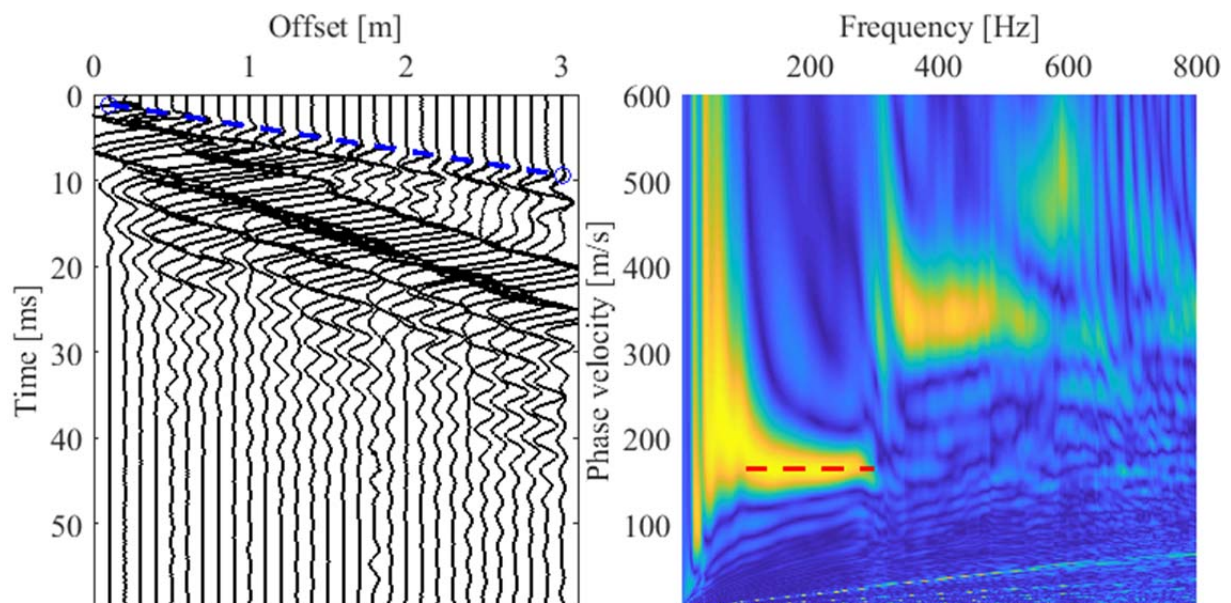
$V_p = 331$  m/s



**171002a11 (linje 2) = 164 m/s (100-300 Hz)**

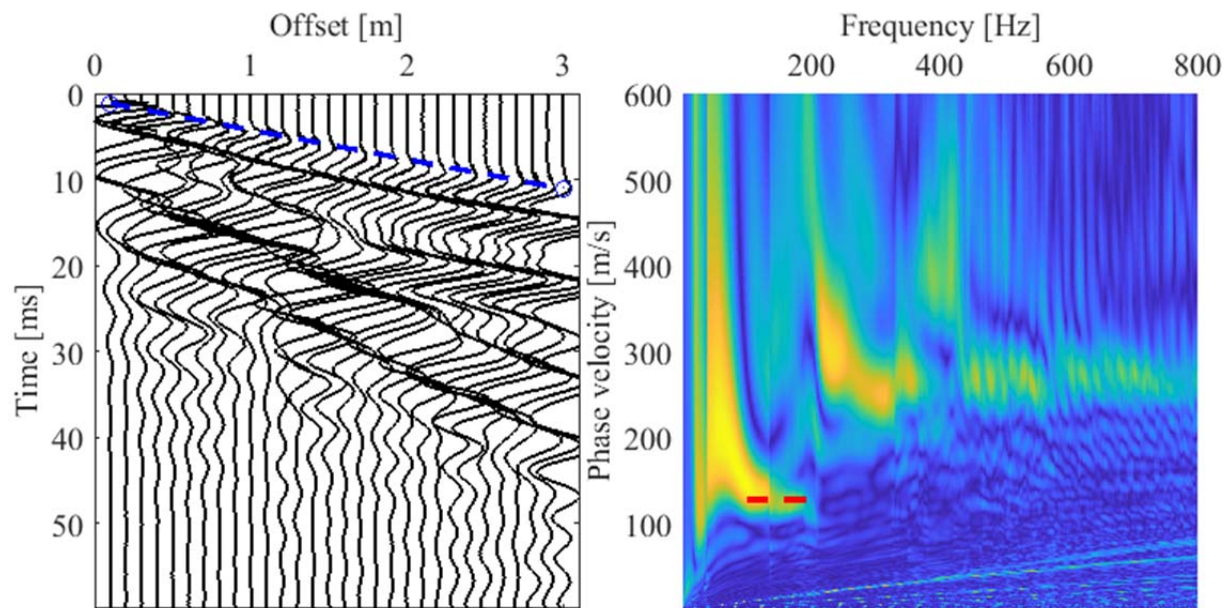
Våglängder mellan ca 55 – 160 cm.

$V_p = 352$  m/s



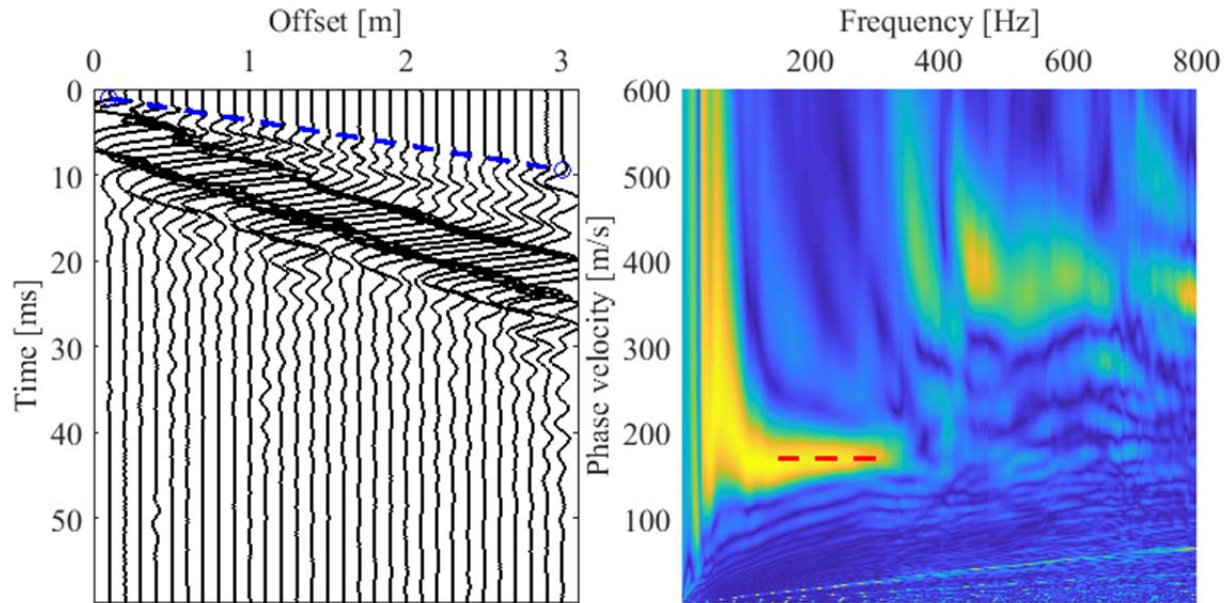
**171030a11 (linje 1) = 128 m/s (100-200 Hz)**

Våglängder mellan ca 64 – 130 cm.

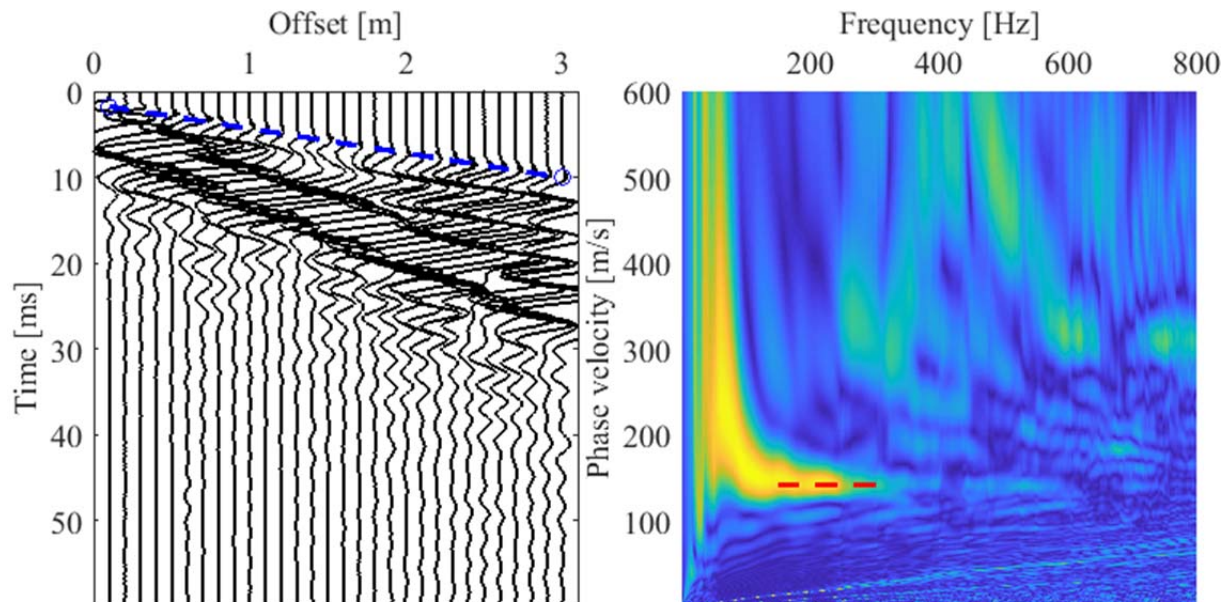
 $V_p = 292 \text{ m/s}$ 

**Yta B21, 50 cm DCH.15/DCH.16****171002a12 (linje 1) = 169 m/s (100-320 Hz)**

Våglängder mellan ca 52 – 170 cm.

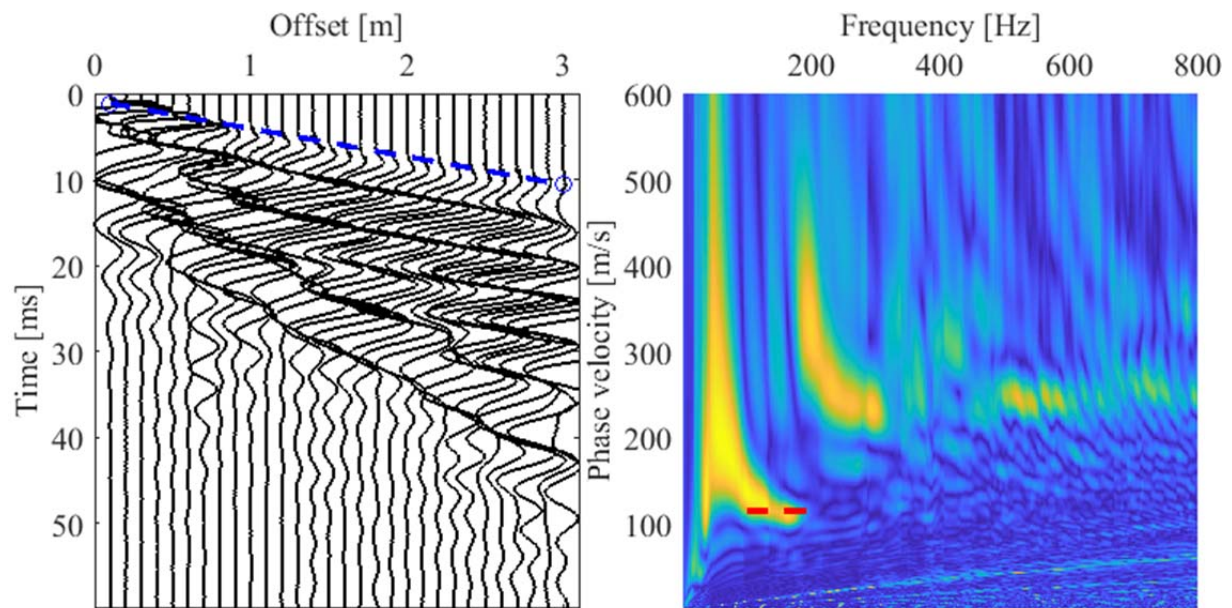
 $V_p = 349 \text{ m/s}$ **171002a13 (linje 2) = 143 m/s (150-320 Hz)**

Våglängder mellan ca 45 – 140 cm.

 $V_p = 350 \text{ m/s}$ 

**171030a12 (linje 2) = 115 m/s (100-200 Hz)**

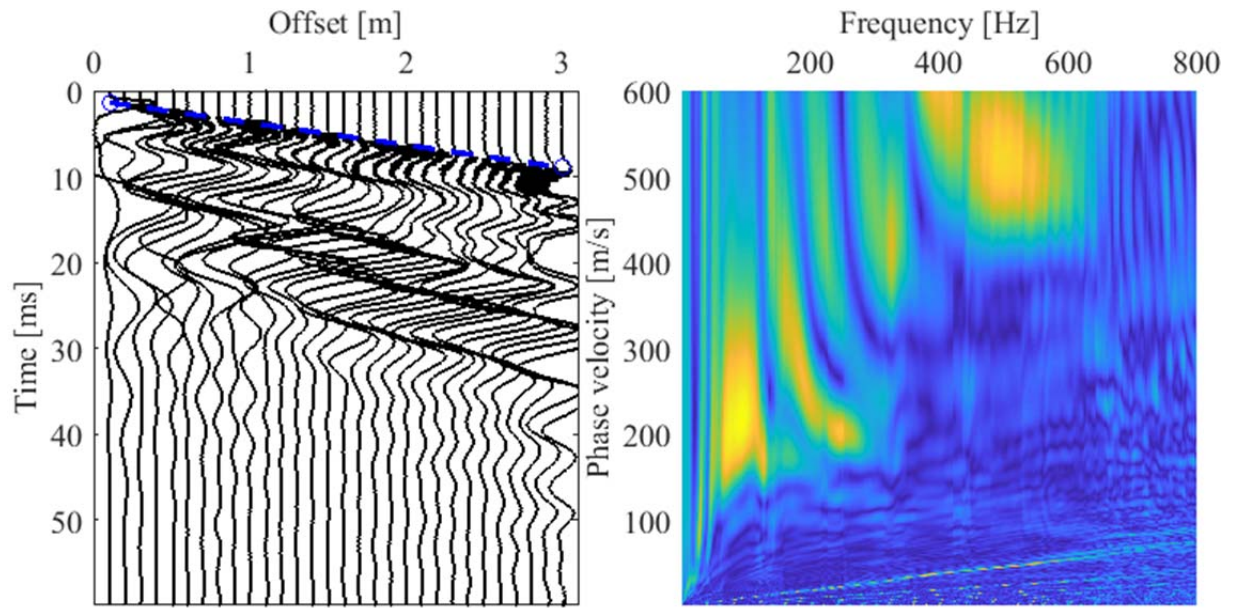
Våglängder mellan ca 58 – 115 cm.

 $V_p = 307 \text{ m/s}$ 

### Yta B12, 50 cm Morän

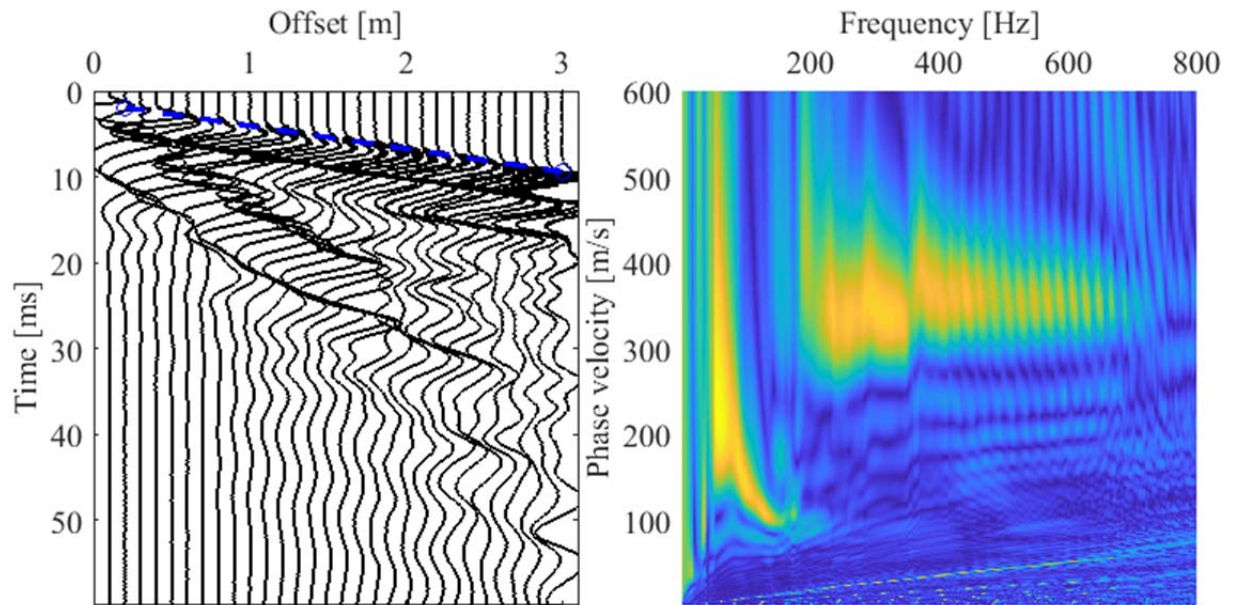
171002a9 = -

$V_p = 380$  m/s



171030a10 = -

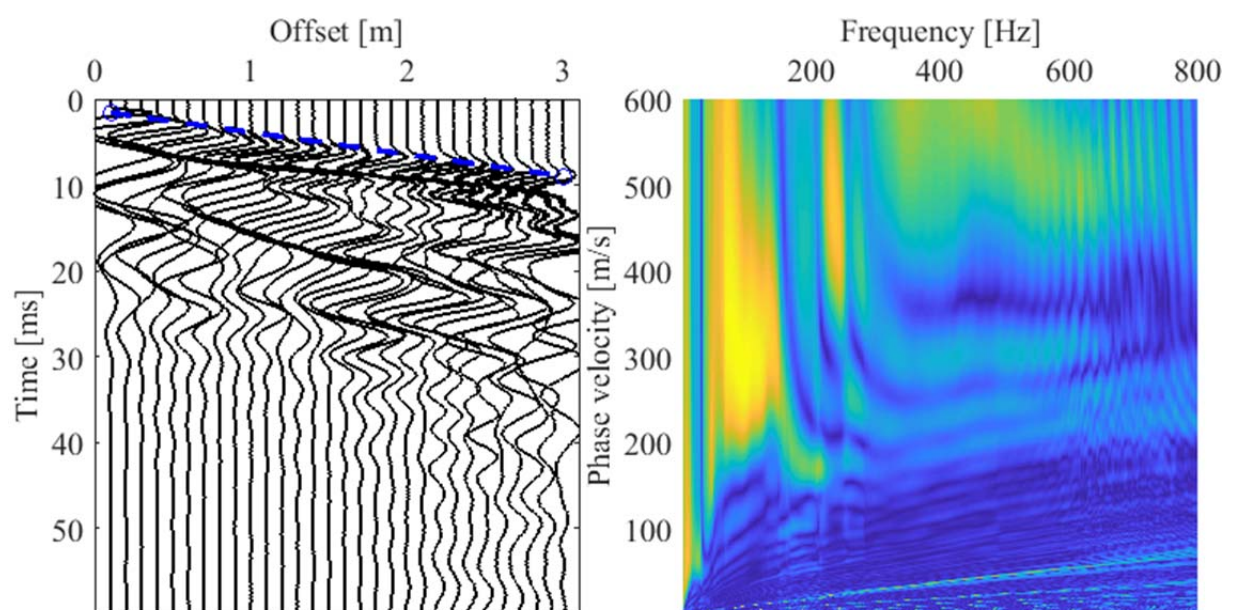
$V_p = 374$  m/s



# Yta B22, 50 cm Morän

171003a9 = -

$V_p = 390$  m/s

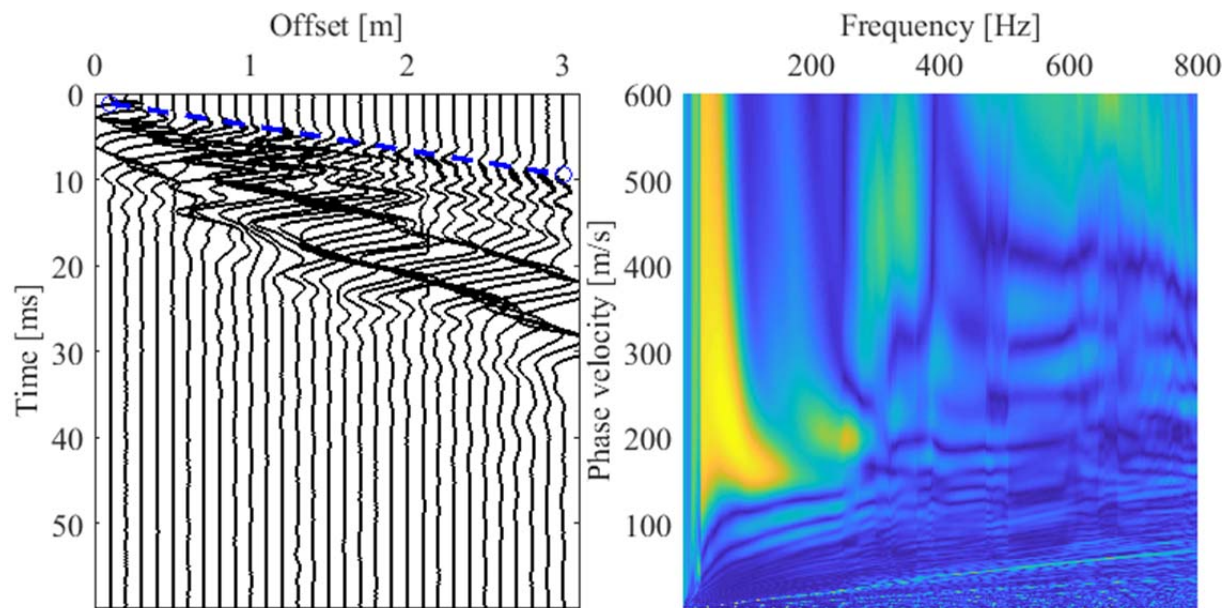


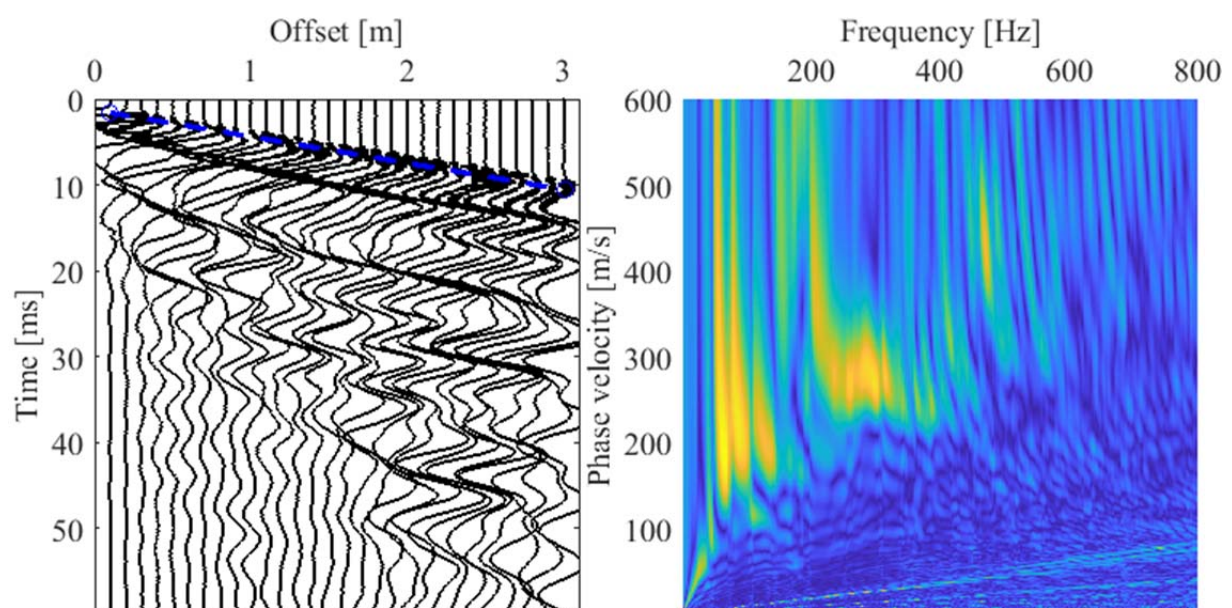


**171030a9 = 160 m/s (100 – 200 Hz)**

Våglängder mellan ca 80 – 160 cm.

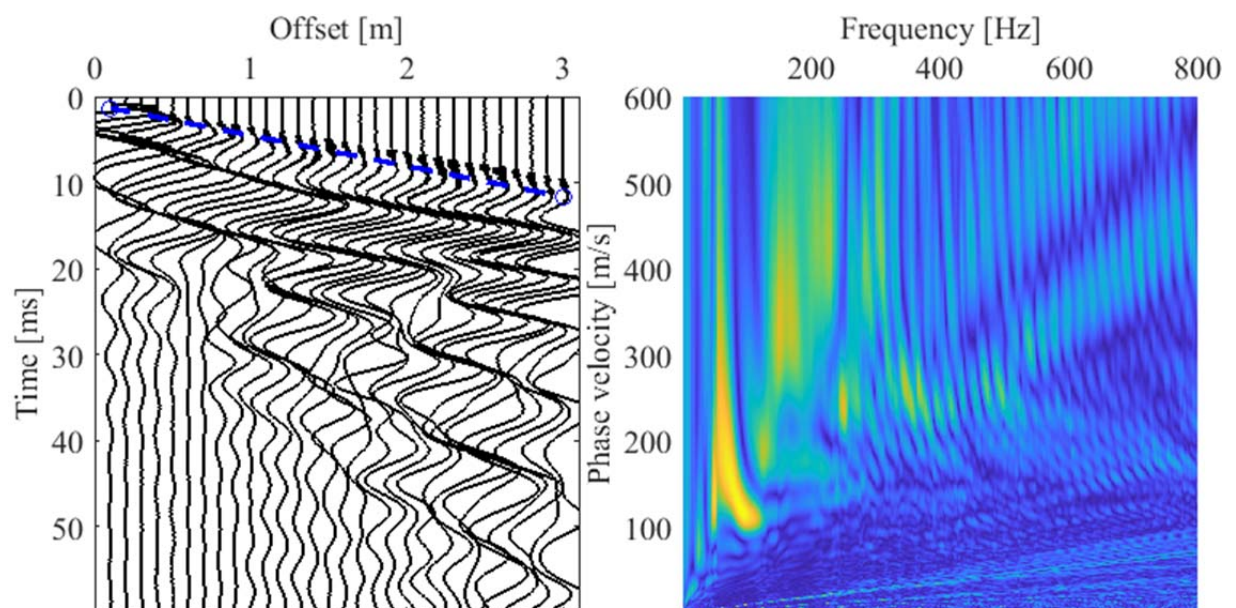
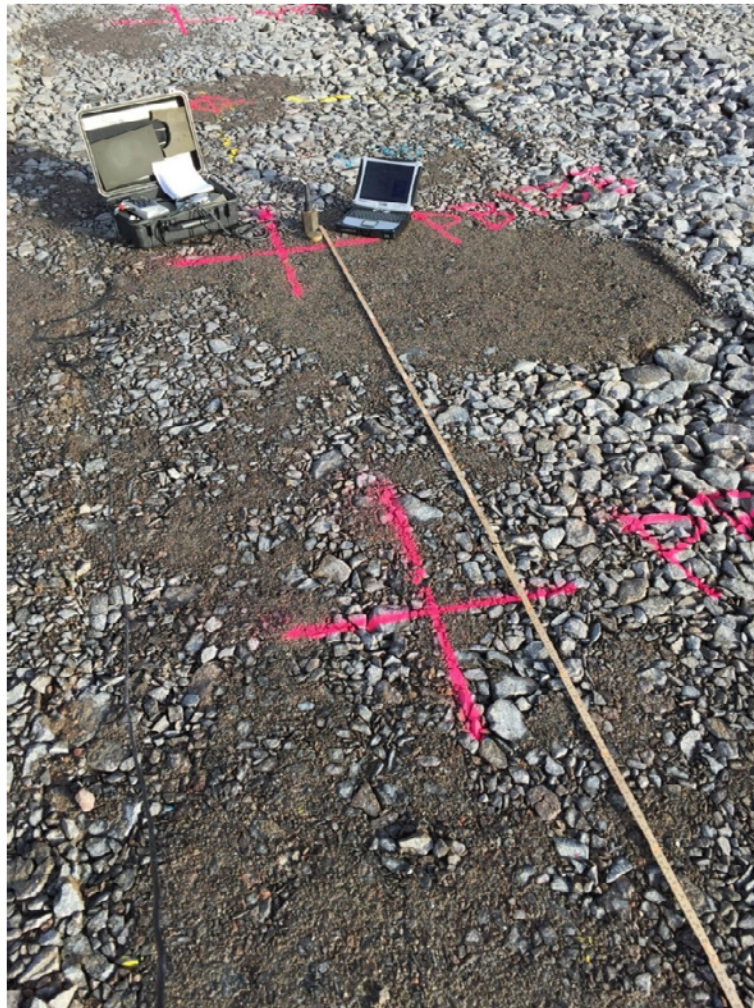
$V_p = 349$  m/s



**Yta B13, 50 cm 0-250****171003a4 (linje 1, mycket stenig yta) = -** $V_p = 325 \text{ m/s}$ 

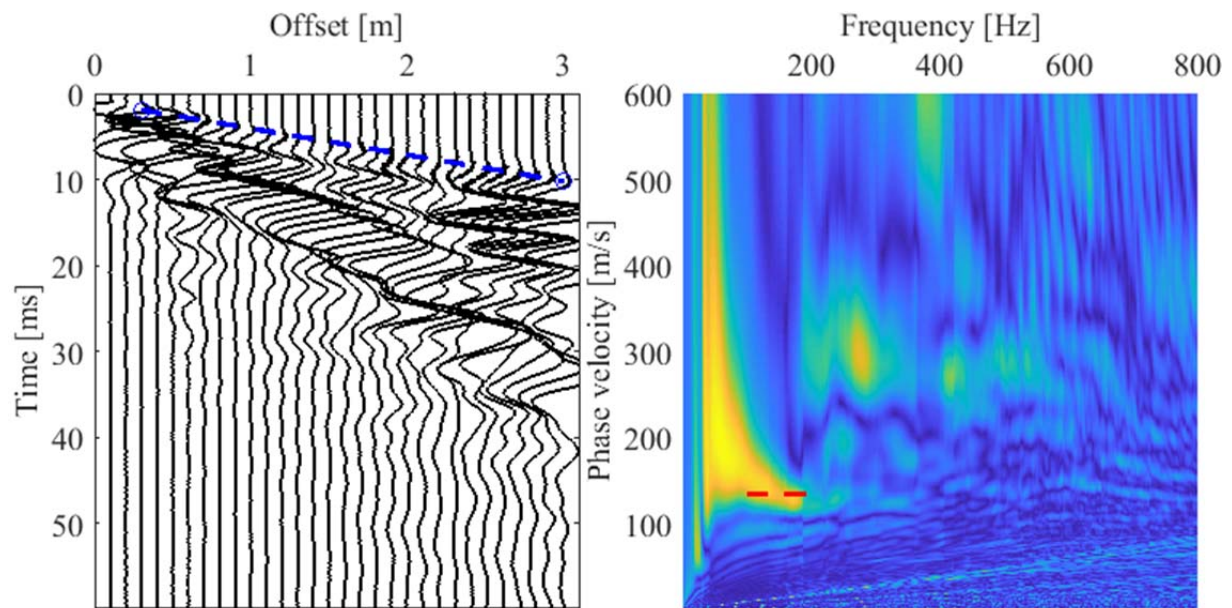
**171003a5 (linje 2) = -**

$V_p = 281$  m/s



**171030a7 (linje 2) = 135 m/s (100-200 Hz)**

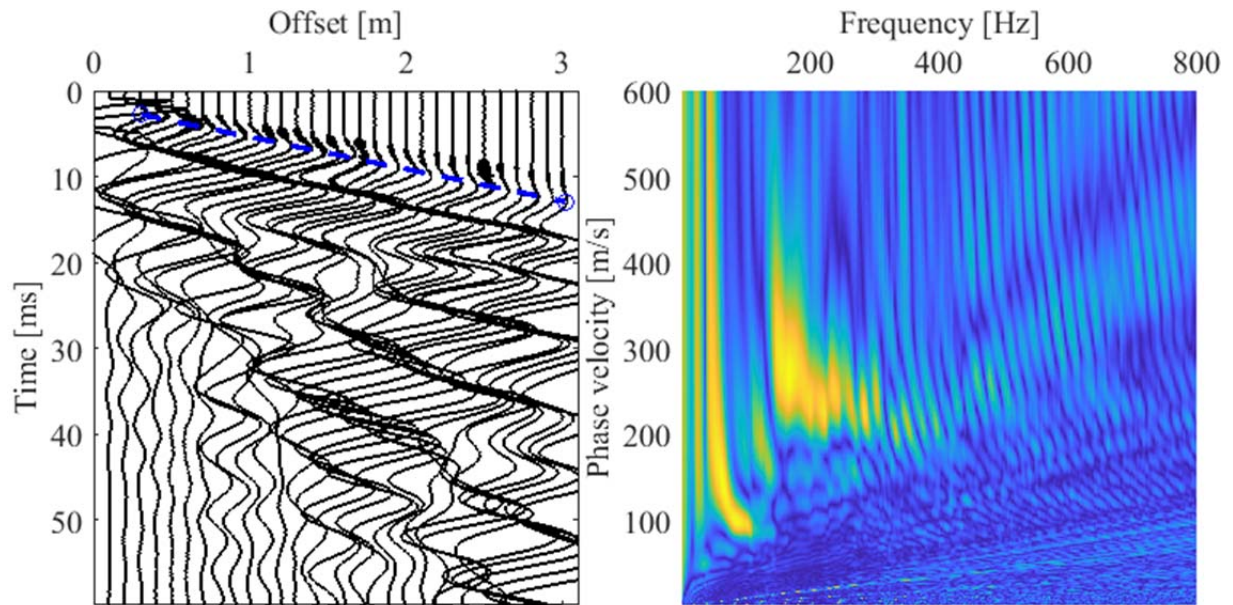
Våglängder mellan ca 68 – 135 cm.

 $V_p = 325 \text{ m/s}$ 

### Yta B23, 50 cm 0-250

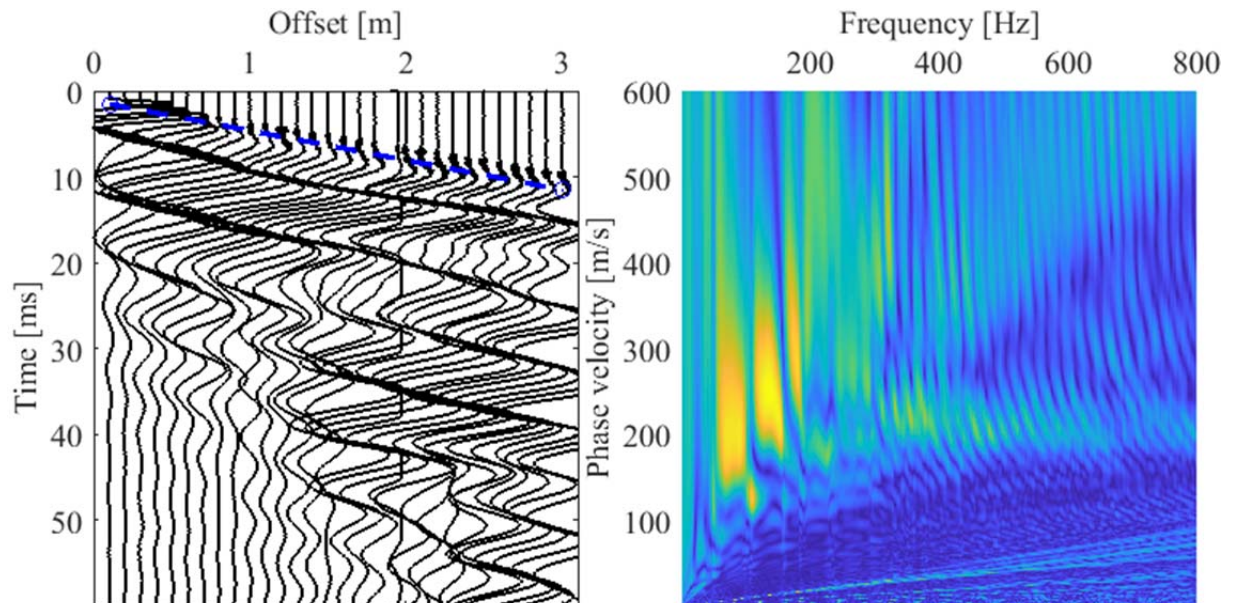
171003a6 (linje 1) =

$V_p = 268 \text{ m/s}$



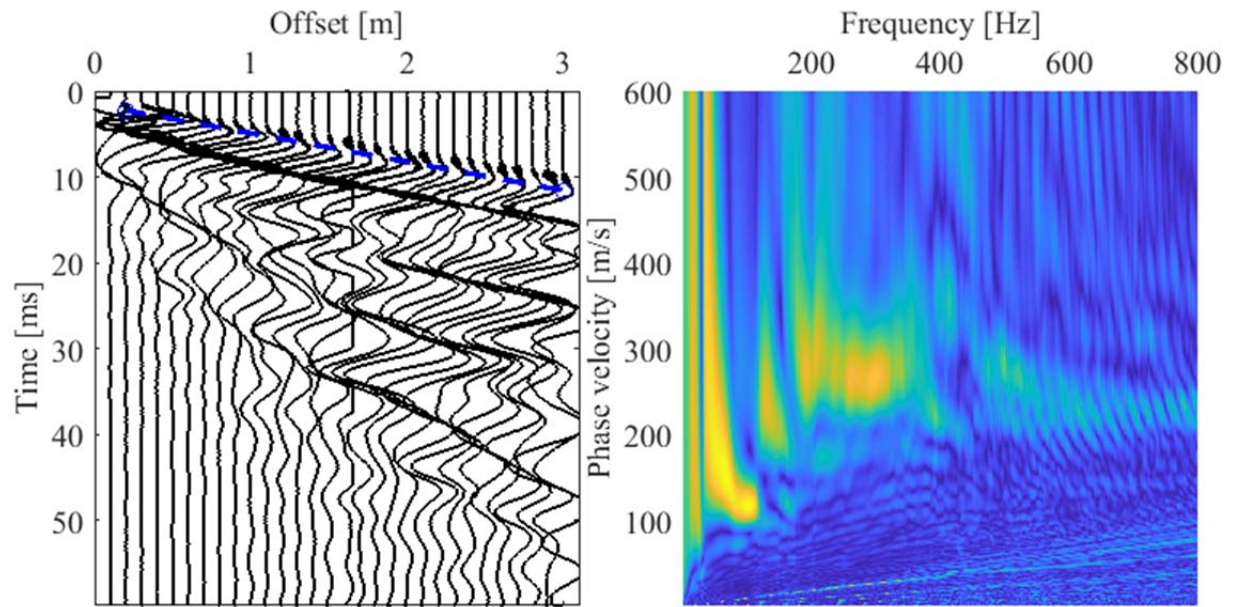
171003a7 (linje 2) = -

$V_p = 290 \text{ m/s}$



**171030a8 (linje 1) = -**

Vp = 300 m/s



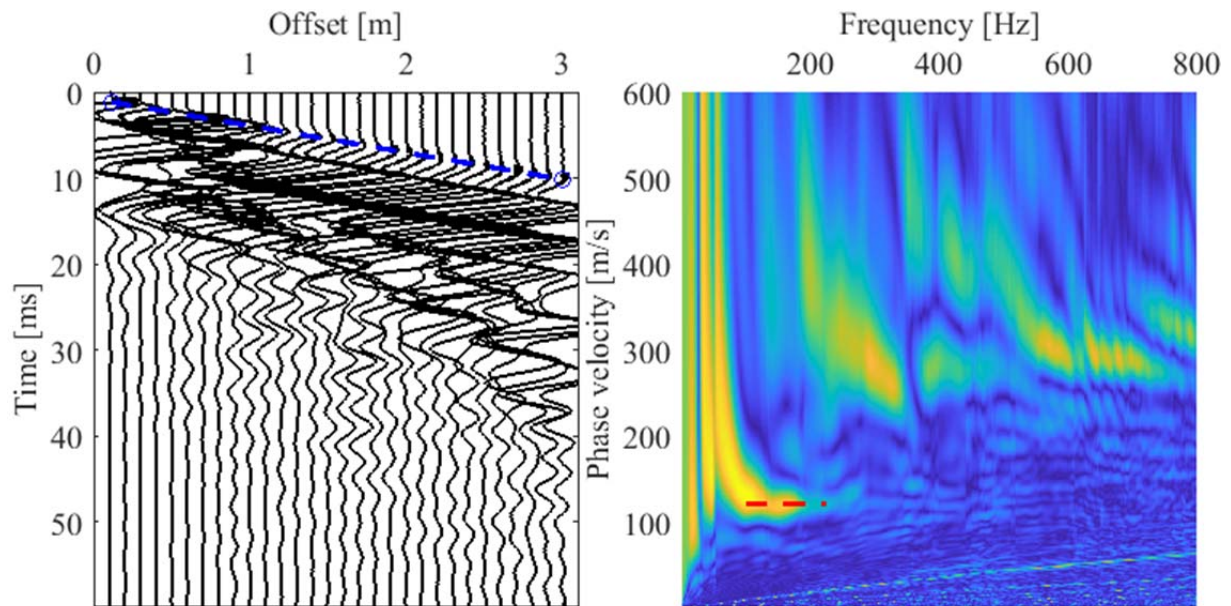
## Tjocklek 30 cm

### Yta A11 - DCH.15/DCH.16

#### 171002a6 (linje 1) = 121 m/s (100-225 Hz)

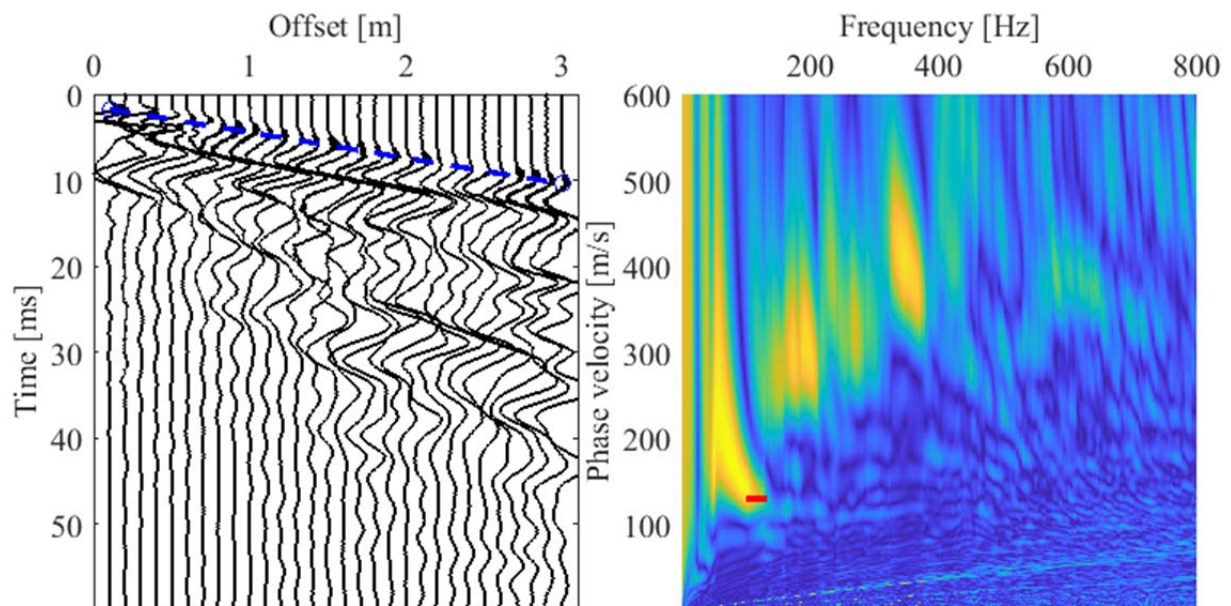
Våglängderna mellan 100 till 225 Hz för en fashastighet på 121 m/s motsvarar ca 54 – 120 cm, vilket innebär att detta troligen är ett resultat av den underliggande terrassen. Detta gäller även för övriga mätningar på ytorna med tjocklek av 30 cm.

$V_p = 320$  m/s



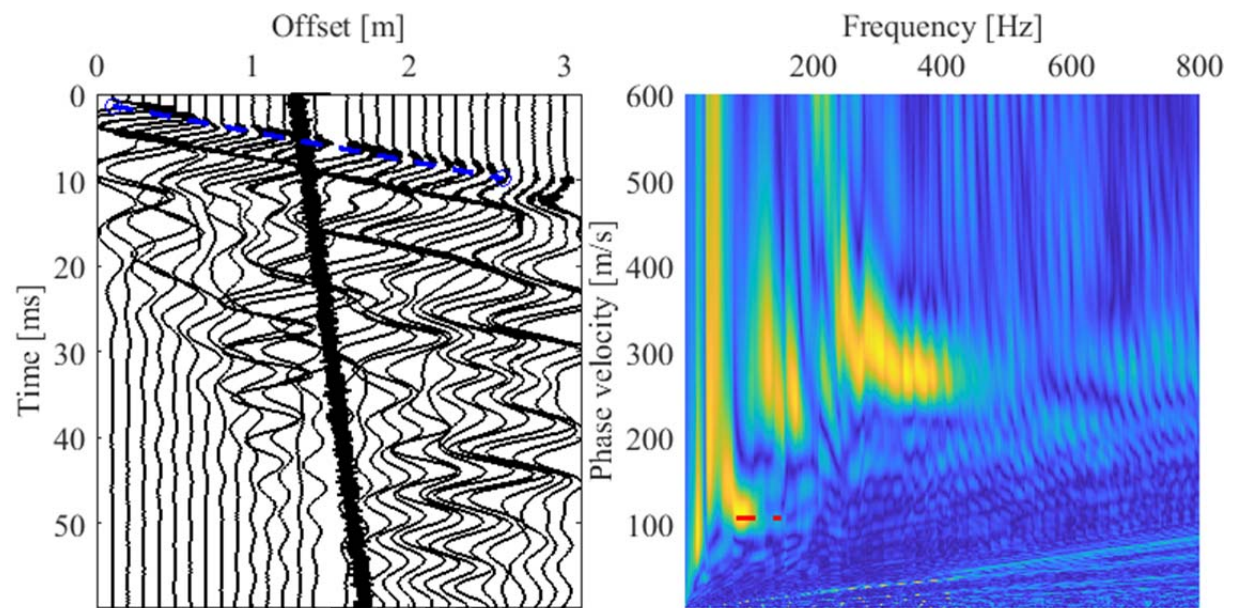
#### 171002a7 (linje 2) = 130 m/s (100-150 Hz)

$V_p = 334$  m/s



**171030a13 (linje 2) = 107 m/s (80-150 Hz)**

$V_p = 295 \text{ m/s}$

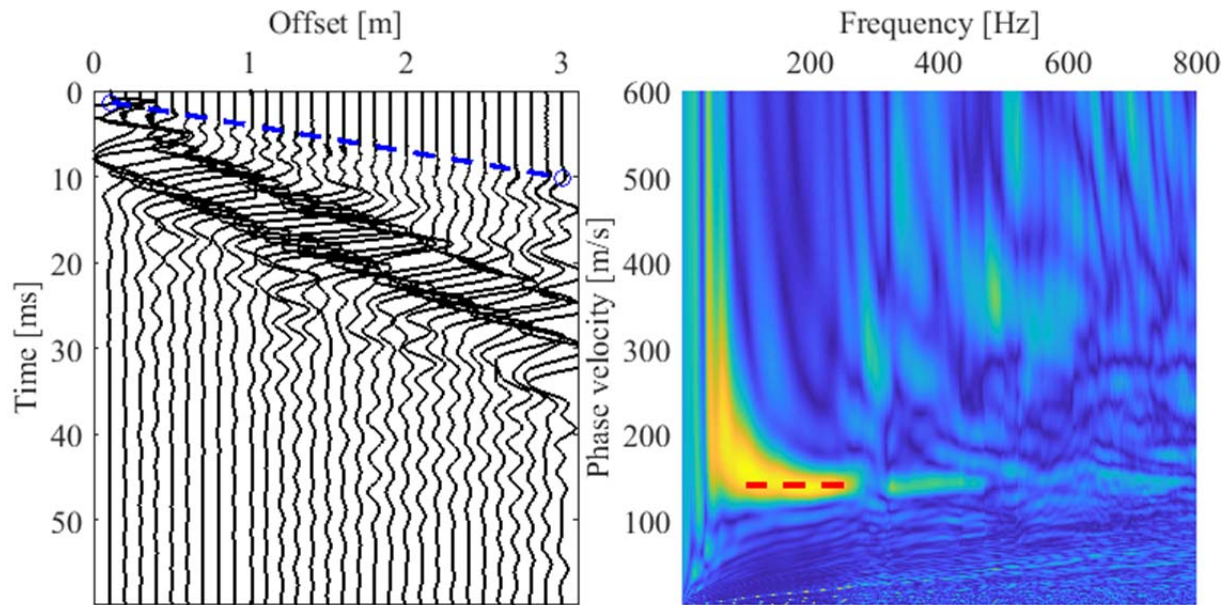




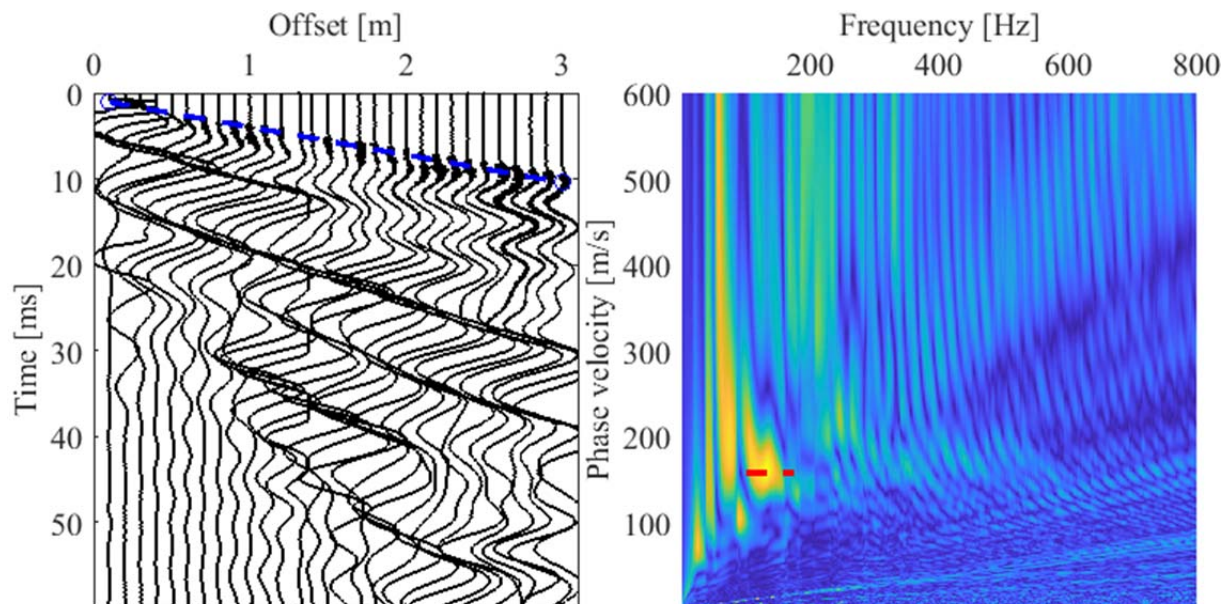
**Yta A21 - DCH.15/DCH.16****171002a8 (linje 1) = 141 m/s (100-275 Hz)**

141 m/s för aktuellt frekvensområde innebär våglängder på ca 50 – 140 cm. Fashastigheten reflekterar troligen terrassens egenskaper.

$$V_p = 329 \text{ m/s}$$

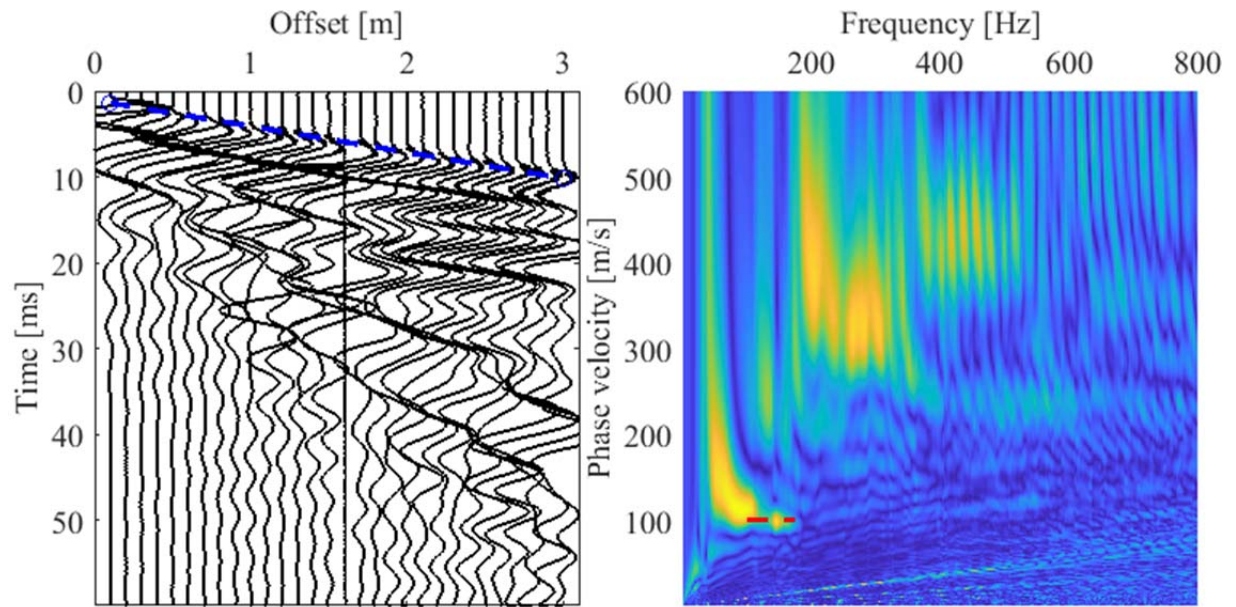
**171003a8 (linje 2) = 158 m/s (100-175 Hz)**

$$V_p = 309 \text{ m/s}$$



**171030a14 (linje 1) = 101 m/s (100-175 Hz)**

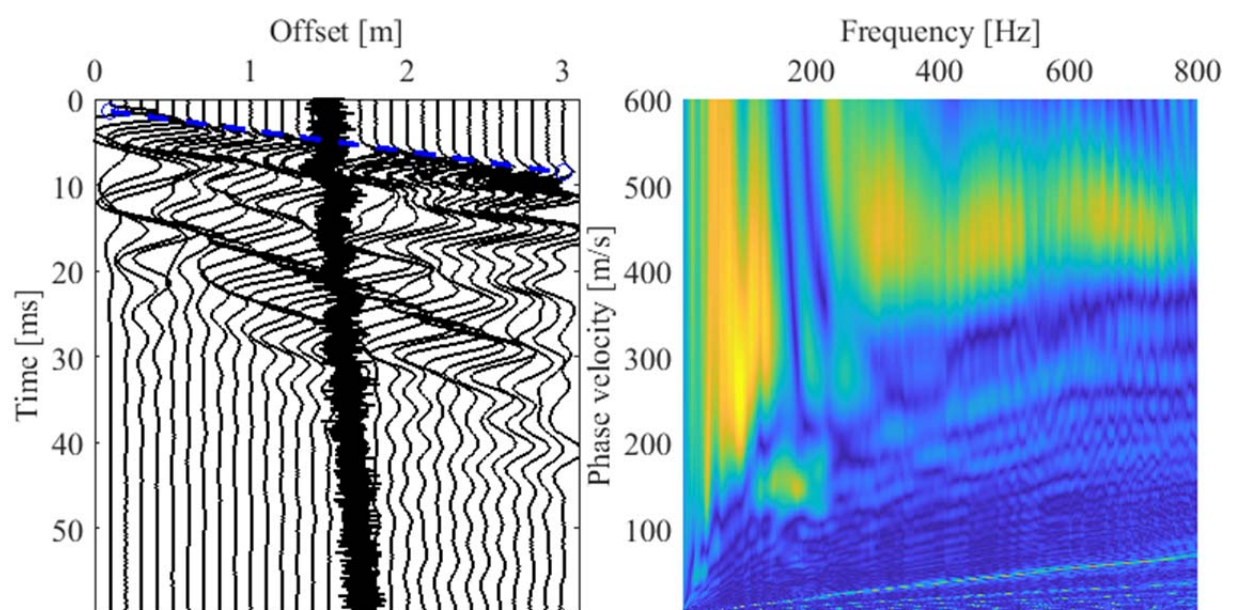
V<sub>p</sub> = 330 m/s



# Yta A12 30 cm Morän

171030a16 = -

$V_p = 408 \text{ m/s}$



## Yta A22 30 cm Morän

171030a15 = -

$V_p = 405 \text{ m/s}$

