



## Packningsförsök vid Kardonbanan

### Resultat från Etapp 2

Datum: 2020-02-01

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



## Sammanfattning

Packningsförsök utfördes i två etapper under 2017 och 2018 på Malmölandet, Norrköping, i anslutning till Kardonbanan. Etapp 1 (2017) har presenterats i en tidigare rapport. Denna rapport redovisar Etapp 2 (2018). I Etapp 1 studerades packningsfrekvens, lagertjocklek och materialfraktion. Resultaten från den tidigare etappen visade bl.a. att krossmaterialet DCH.15 (0-150 mm) kan packas bättre än grovkrossad sprängsten 0-250 mm, att packning vid resonansfrekvensen ökar effektiviteten och gav information om lämpligt antal överfarer för olika lagerstjocklekar. Dessa resultat tillämpades i Etapp 2 på en 2,5 m hög provbank som packades dels konventionellt och dels med automatisk frekvensstyrning (AFC). Syftet var ge underlag för att bestämma optimalt packningsförfarande vid bankuppbyggnad för höghastighetsjärnväg.

Banken lades ut i tre lager och hade en mätyta som var 20 m lång. Bredden på överytan var ca 12 m och banken packades över hela ytan, till skillnad från i Etapp 1. Vid packning av Lager 2 och Lager 3, som båda hade en tjocklek av 1 m, utfördes omfattande mätningar i banken, på överytan och på välten. Nytt för denna etapp var även att de dynamiska spänningarna mättes på olika djup i bankmaterialet.

Försöket försvarades av dålig kvalitet på bankmaterialet och av logistiska problem vid utläggningen. Tack vare en stor mängd mätningar och med stöd av tidigare erfarenheter kunde dock slutsatser erhållas som kan vara till nytta vid planering, utförande och kravställning för packning.

De huvudsakliga fördelarna med frekvensstyrning, som säkerställer att packning sker vid resonansfrekvensen, är minskad energi- och bränsleförbrukning, ingen uppluckring i ytan, en mer homogen packning och undvikande av dubbelhopp. Det sistnämnda innebär att en högre packningsgrad kan erhållas eftersom konventionell packning normalt måste avbrytas på grund av dubbelhopp innan maximal packningsgrad har uppnåtts. Försöken visar även att avslutande statistiska överfarer kan vara nödvändiga på varje lager vid konventionell packning (dock ej med frekvensstyrning). Ytterligare betydelsefulla slutsatser innefattar bl.a. att ett mycket stort antal överfarer krävs om maximal packningsgrad ska uppnås samt att sättningen på överytan inte är ett tillförlitligt mått på packningen.

## Innehållsförteckning

1	Bakgrund och syfte .....	5
2	Material och packningsutrustning .....	6
2.1	Terrass .....	6
2.2	Provbänk.....	6
2.3	Packningsutrustning .....	8
3	Genomförande.....	9
3.1	Försöksplats.....	9
3.2	Försökupställning .....	9
3.3	Terrass .....	12
3.4	Lager 1.....	12
3.5	Lager 2 .....	13
3.6	Lager 3 .....	14
4	Mät- och utvärderingsmetoder .....	17
4.1	Sättning.....	17
4.2	EMU-spolar .....	17
4.3	Statisk plattbelastning.....	19
4.4	Integrerade vältmätningar .....	20
4.5	Fallviktsapparat.....	20
4.6	Spänningsmätningar .....	21
5	Resultat.....	23
5.1	Lagertjocklek .....	23
5.2	Integrerade vältmätningar .....	23
5.2.1	Lager 2 .....	23
5.2.2	Lager 3 .....	26
5.3	Sättningar .....	28
5.4	EMU-spolar .....	31
5.4.1	Lager 2 .....	31
5.4.2	Lager 3 .....	34
5.4.3	Komprimeringsprofiler .....	35
5.5	Plattbelastningsförsök.....	36
5.6	Fallviktsapparat.....	38
5.7	Spänningsmätningar .....	40
5.7.1	Packning lager 2 .....	40
5.7.2	Packning lager 3 .....	41
5.7.3	Spänning vid plattbelastning .....	42
6	Diskussion .....	47

6.1	Integrerade vältmätningar .....	47
6.1.1	Jämförelse med Etapp 1 .....	47
6.2	Komprimering/sättning .....	47
6.3	Styvhet .....	48
6.4	Frekvensstyrning .....	49
6.5	Lagertjocklek och överfarter .....	49
6.6	Tillförlitlighet.....	49
7	Slutsatser .....	53
	Referenser .....	54
	Bilagor .....	55
	Bilaga A: Integrerade vältmätningar .....	56
	Bilaga B: EMU-spolar .....	62
	Bilaga C: Fallviktsapparat.....	73
	Bilaga D: Spänningsgivare.....	78

## 1 Bakgrund och syfte

Denna rapport redovisar resultat från Etapp 2 av packningsförsök vid Kardonbanan, som ingår i forskningsprojektet ”Packning av bank för höghastighetsjärnväg”, vilket har utförts vid Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) och har finansierats av Branschsamverkan i Grunden (BIG A2016-3), Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF 13317), PEAB AB och KTH. Kostnader för utförande av packningsförsöken (entreprenad- och mätkostnader) har finansierats av Trafikverket och Dynapac Compaction Equipment AB.

Målsättningen med forskningsprojektet är att ge rekommendationer för hur bankar för höghastighetsjärnväg ska packas för att minimera nedbrytning, omlagring och sättningar i driftskedet. Parametrar som har studerats innefattar frekvens, lagertjocklek, antal överfarer och materialfraktion. Projektet har även som målsättning att ge rekommendationer för hur en provpackning bör utföras. Bakgrunden till projektet har beskrivits utförligt i Wersäll (2018).

I Etapp 1 anlades ett antal provbankar som packades i ett lager i centrerade vältstråk för att studera inverkan av olika parametrar. Resultaten från försöket redovisades i Wersäll (2018), där rekommendationer för Etapp 2 även presenterades. I Etapp 2 anlades en provbank i tre lager med en total höjd av 2,5 m och som packades över hela sin yta för att få ett mer realistiskt packningsförlopp än i Etapp 1.

I Etapp 1 testades för första gången i fält en automatisk frekvensstyrningsteknik, AFC (automatic frequency control), som sänker vibrationsfrekvensen så att resonans erhålls i vält-jord-systemet. Tekniken har beskrivits i rapporten som presenterar resultat från Etapp 1 (Wersäll, 2018) samt i ett antal artiklar Wersäll et al. (2017, 2018, 2019a) och innebär bland annat en minskad energiförbrukning. I detta försök studerades packning både med AFC och konventionellt med en fast (hög) vibrationsfrekvens.

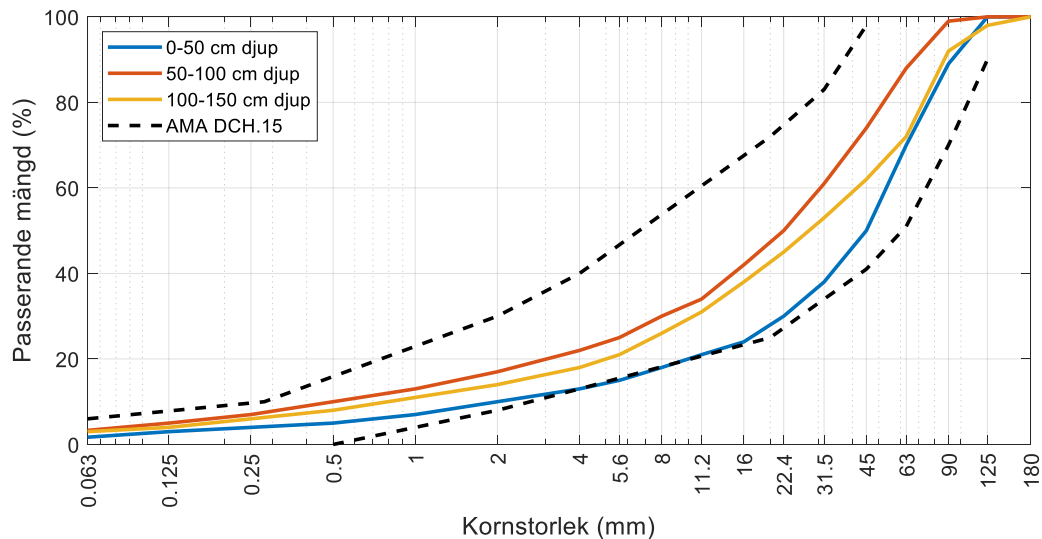
## 2 Material och packningsutrustning

### 2.1 Terrass

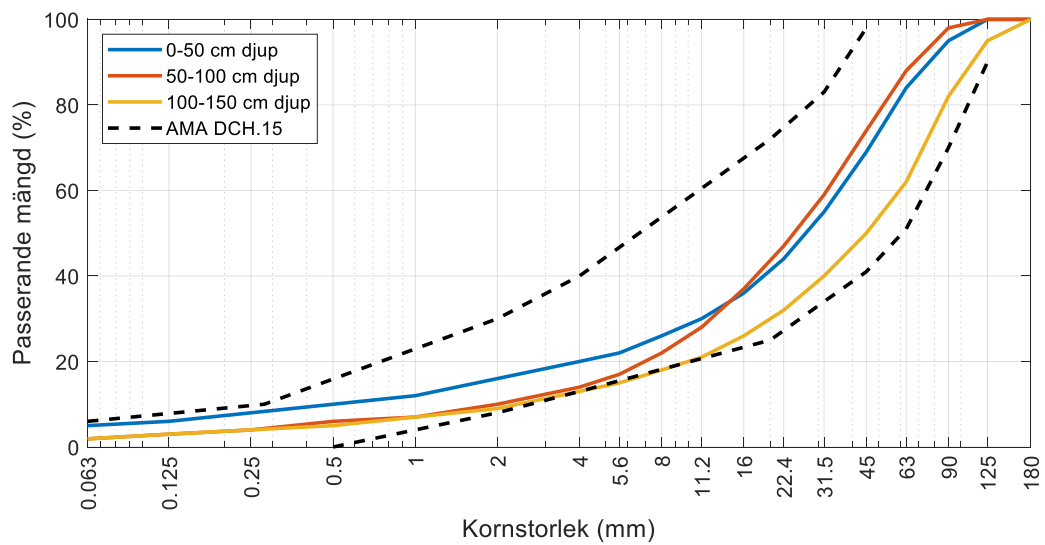
Terrassen bestod främst av grusig siltig morän med en finjordshalt runt 30 %. Moränen har beskrivits mer utförligt i Wersäll (2018). Vid försökstillfället var undergrunden torr och hade en hög styvhet.

### 2.2 Provbank

Provbanken bestod av underballastmaterial för förstärkningslager DCH.15 enligt AMA Anläggning 17 (Svensk Byggtjänst, 2014) från tåkten Skärlunda. Resultat från siktanalys, utförd av VTI på prover tagna i banken, visas i Figur 1 och Figur 2. Siktkurvorna visar att kornfördelningen i vissa fall ligger något utanför begränsningskurvorna för DCH.15. Efter misstanke om höga glimernivåer (Figur 3) utfördes även glimmeranalys på material från samma prov som siktanalysen. Resultaten från glimmeranalysen visas i Tabell 1.



Figur 1. Kornstorleksfördelning i provbank, yta A (AFC).



**Figur 2. Kornstorleksfördelning i yta F (28 Hz).**



**Figur 3. Glimmerrikt och sönderfallet material efter packning.**

**Tabell 1. Resultat från glimmeranalys.**

Prov nr.	Provtagningsdatum	Antal korn	Glimmerhalt
1	2019-01-16	653	26%
2	2019-01-16	786	28%
3	2019-01-16	593	23%
4	2019-03-29	471	21%
5	2019-03-29	491	18%
6	2019-03-29	746	19%

### 2.3 Packningsutrustning

Packningen av banken (ej terrass) utfördes med samma prototypvält som i etapp 1, baserad på Dynapac CA6500D (Figur 4). Vältens egenskaper listas i Tabell 2. Välten kunde packa med en varierande frekvens enligt AFC-tekniken eller konventionellt med en fast frekvens. Vid konventionell packning var frekvensen 28 Hz vid hög amplitud och 33 Hz vid låg amplitud.



Figur 4. Dynapac CA6500D med frekvensstyrning.

Tabell 2. Vältegenskaper.

Modell:	Dynapac CA6500D
Typ:	Enkelvalsvält
Arbetsvikt:	20 900 kg
Valsmodulvikt:	13 950 kg
Statisk linjelast:	65 kN/m
Nominell amplitud, hög:	2,1 mm
Nominell amplitud, låg:	0,8 mm
Fast vibrationsfrekvens, hög amplitud:	28 Hz
Fast vibrationsfrekvens, låg amplitud:	33 Hz
Centrifugalkraft, fast frekvens, hög amplitud:	360 kN
Centrifugalkraft, fast frekvens, låg amplitud:	150 kN
Frekvensspann, AFC, hög amplitud:	17-28 Hz
Frekvensspann, AFC, låg amplitud:	17-33 Hz
Excentermoment, hög amplitud	10,31 kgm
Excentermoment, låg amplitud	4,10 kgm



### 3 Genomförande

#### 3.1 Försöksplats

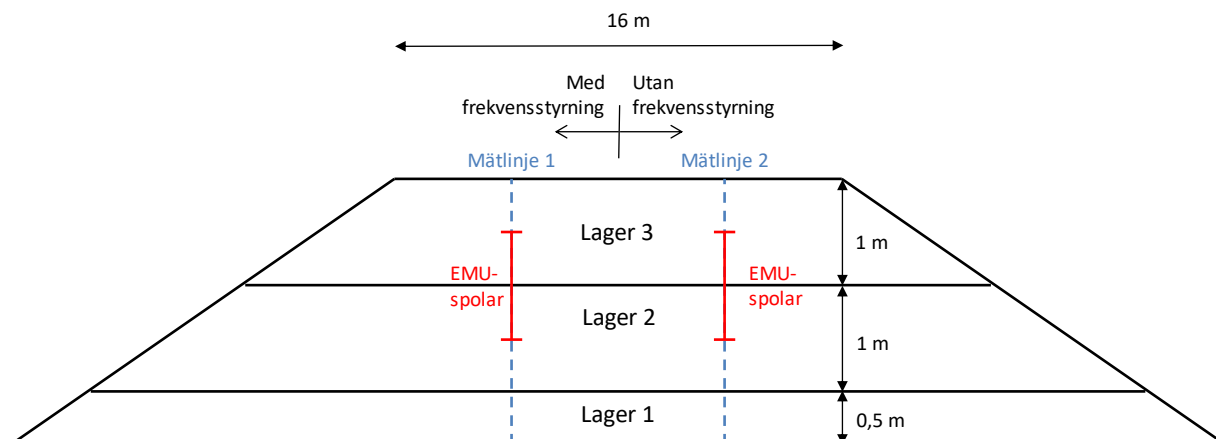
Försöken utfördes i anslutning till byggandet av Kardonbanan i Norrköping som ingår i projekt Ostlänken. Försöksplatsen (Figur 5) var densamma som i Etapp 1, på den moränrygg som går genom området.



Figur 5. Försöksplatsen på Malmölandet, Norrköping.

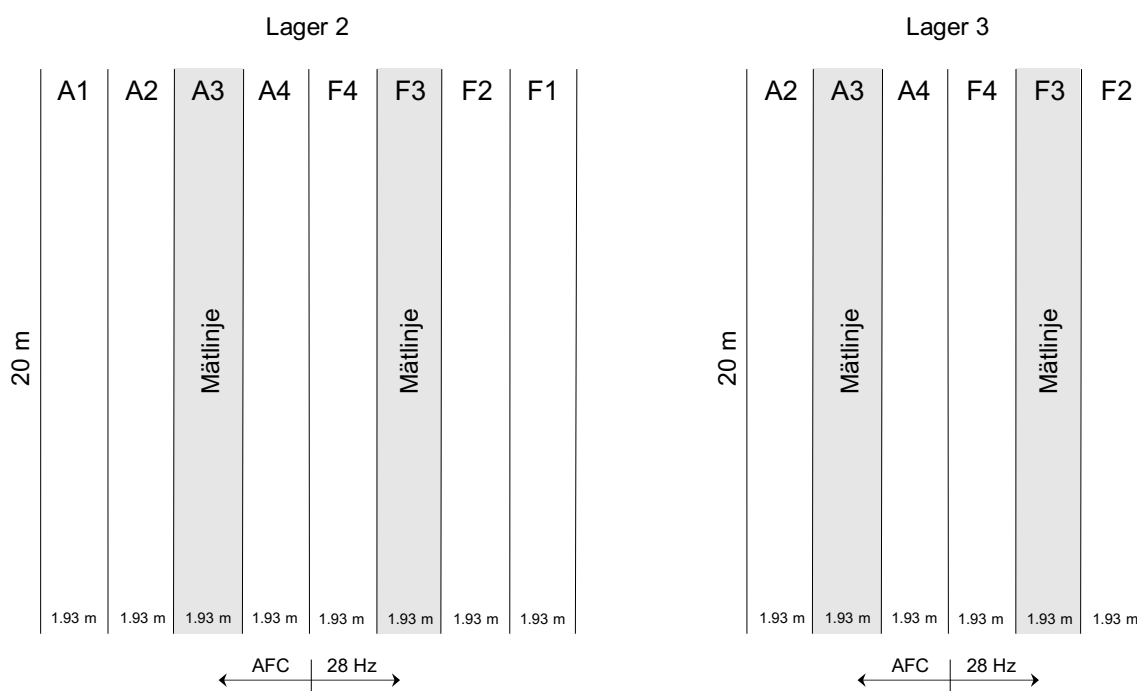
#### 3.2 Försöksuppställning

En 2,5 m hög provbank anlades i tre lager. Banken visas schematiskt i Figur 6. Det understa lagret, Lager 1, hade en tjocklek på 0,5 m medan Lager 2 och Lager 3 hade en tjocklek på 1 m vardera. Lager 1 hade som syfte att ge ett styvt underlag för de övriga lagren och att ge banken tillräcklig höjd. Inga mätningar gjordes därför på Lager 1 förutom nivåmätning efter packning. På Lager 2 och 3 delades banken in två delar, där ena halvan packades med AFC och den andra med den fasta frekvensen 28 Hz.

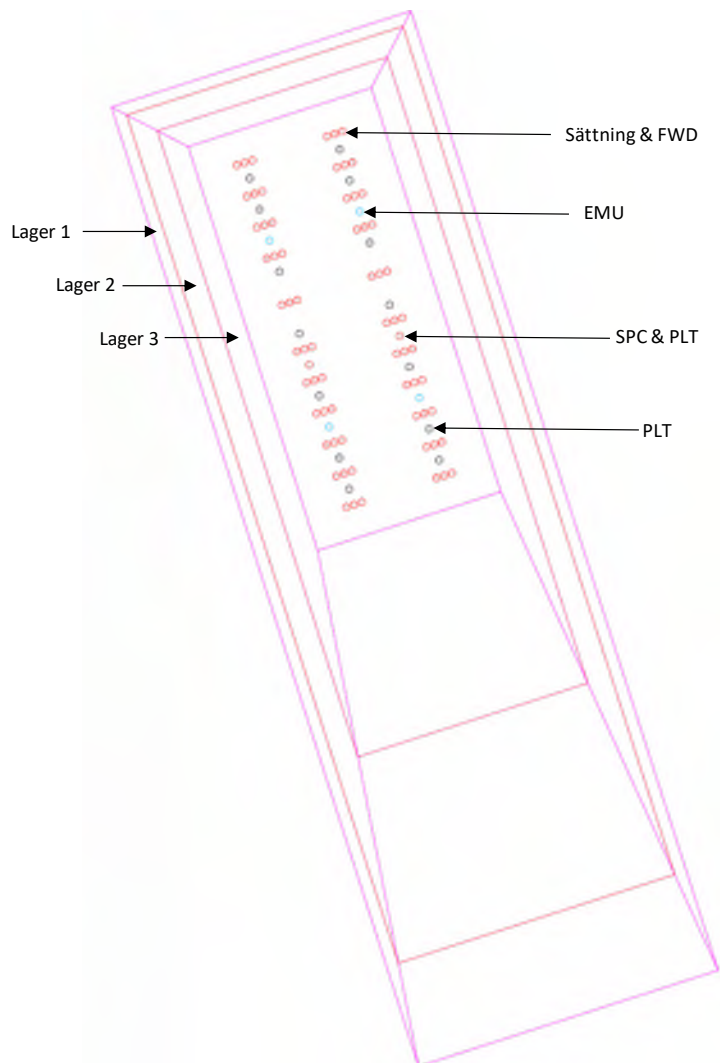


**Figur 6. Schematisk försöksuppställning (ej skalenlig).**

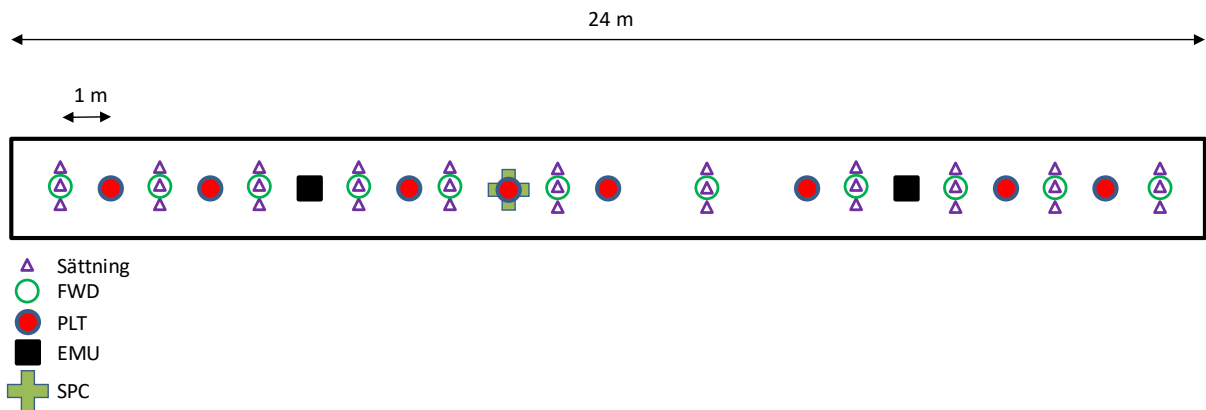
För att kunna kontrollera antalet överfarter utfördes packningen i fördefinierade stråk som visas i Figur 7. På Lager 2 var 8 stråk, varav 4 packades med AFC och 4 med frekvensen 28 Hz. På Lager 3 var de yttersta stråken borttagna så att det totala antalet blev 6 stråk. Vältens vals var 2,13 m bred och stråken hade 20 cm överlappning så att varje stråk hade bredden 1,93 m. Alla mätningar var koncentrerade i två mätlinjer, en för vardera bankdel och packningsmetod. I varje bankdel var mätlinjen placerad mitt i det andra vältstråket, räknat från bankens centrumlinje. Vältstråken mellan mätlinjerna bedömdes som tillräckligt för att mätningarna inte skulle påverkas av packning med den motsatta bankdelens packningsmetod. Provbanken och dess mätpunkter visas Figur 8, där PLT betyder statisk plattbelastning, SPC betyder spänningsgivare, FWD betyder fallviktsapparat och EMU är deformationsgivare (Epsilon Measuring Unit). Sättningsmätning gjordes i alla tre punkterna medan fallviktsförsök endast gjordes i centrum. Mätpunkterna längs en mätlinje visas även i Figur 9. Den färdigställda provbanken visas i Figur 10.



**Figur 7. Stråk vid packning.**



**Figur 8. Provbänk och mätpunkter.**



**Figur 9. Mätpunkter.**



**Figur 10. Färdigställd provbank.**

### 3.3 Terrass

Den siltiga moränterrassen packades med en vibrationsvält av modell Dynapac CA3500D med statisk linjelast 36 kN/m. Terrassen var torr och hade en mycket hög styvhet. Den kunde därför inte packas med hög amplitudinställning eftersom dubbelhopp uppkom på nästan hela ytan. Packning utfördes därför med låg amplitud. Även vid låg amplitud uppstod dubbelhopp och terrassen packades därför med en gradvis sänkning av frekvensen från 30 Hz till 24 Hz. Terrassen packades i totalt 12 överfarter, varav de första 6 framfördes med en välthastighet av 0,5 m/s och de resterande med 1,0 m/s. Ingen tillväxt i packmätarvärden erhöles i slutet av packningsförloppet.

### 3.4 Lager 1

Lager 1 fylldes med bandtraktor enligt AMA Anläggning och packades med prototypvälten beskriven i avsnitt 2.3 med AFC aktiverat och framförd med en hastighet av 1,0 m/s. Packning utfördes i 18 överfarter med hög amplitud och 6 överfarter med låg amplitud. Ingen tillväxt i packmätarvärden erhöles i slutet av packningsförloppet. Efter avslutad packning placerades spänningsgivare på lagrets överyta (se avsnitt 4.6).

### 3.5 Lager 2

Lager 2 fylldes med bandtraktor enligt AMA Anläggning. Över spänningsgivarna och deras kablar lades först material med hjälp av hjullastare för att skydda dem under den resterande fyllningsprocessen. Fyllningen av Lager 2 visas i Figur 11 och Figur 12. Efter avslutad fyllning installerades EMU-spolar i den övre halvan av banken (se avsnitt 4.2). Därefter gjordes två statiska överfarter med välten över hela ytan.

Packning skedde med prototypvälten beskriven i avsnitt 2.3 i fördefinierade stråk enligt Figur 7. Först packades A1 i 2 överfarter med AFC aktiverat, därefter A2, A3 och sist A4 i 2 överfarter per stråk. AFC avaktiverades sedan för att packa med den fasta frekvensen 28 Hz, varefter F1 packades i 2 överfarter, sedan F2, F3, och F4 i 2 överfarter per stråk. Denna process upprepades till dess att hela ytan hade packats i 22 överfarter. Före, under och efter packning utfördes mätningar enligt kapitel 4. Efter packning installerades spänningsgivare på lagrets överyta.



**Figur 11. Fyllning av Lager 2.**



**Figur 12. Fyllning av Lager 2.**

### **3.6 Lager 3**

Lager 3 fylldes i två halvmeterslager för att möjliggöra installation av EMU-spolar i nedre halvan av lagret och installation av spänningsgivare mitt i lagret. Detta förfarande får en viss påverkan på packningen eftersom byggtrafik framförs på den nedre halvan av lagret, vilket även konstaterades i Etapp 1. Den nedre delen benämns 3A och den övre halvan benämns 3B. Lager 3A fylldes med bandtraktor enligt AMA Anläggning. Därefter installerades EMU-spolar enligt avsnitt 4.2 och spänningsgivare på överytan av Lager 3A enligt avsnitt 4.6.

Då Lager 3B skulle fyllas uppstod vissa logistikproblem som härrörde från entreprenörens planering och som resulterade i att utläggning inte kunde utföras enligt AMA Anläggning. Bandtraktorn som skulle lägga ut massorna var upptagen på annat håll och kunde inte användas till provbanken som planerat. Samtidigt fanns det ingen möjlighet att få massor levererade vid något annat tillfälle. Det innebar att en stor mängd material levererades utan att det fanns någon bandtraktor som kunde lägga ut dem. Materialet tippades därför på rampen och hanterades med en grävmaskin för att göra plats för ytterligare material (Figur 13). När bandtraktorn blev tillgänglig var ca två tredjedelar av materialet till Lager 3B redan levererat och detta lades då ut från den stora ansamlingen på rampen (Figur 14), varefter det resterande materialet levererades och lades ut på konventionellt sätt. Den okonventionella utläggningen orsakade stor synligt materialeparation, en mycket ojämn andel byggtrafik, sannolika inhomogentiter och möjligtvis även förflyttning av givare, vilket diskuteras i avsnitt 6.6. Efter utläggning utfördes två statiska överfarter på hela ytan.



**Figur 13. Hantering av massor på rampen.**



**Figur 14. Utläggning av Lager 3B.**

Packning skedde med prototypvälten beskriven i avsnitt 2.3 i fördefinierade stråk enligt Figur 7. Först packades A2, A3 och sedan A4 i två överfarter vardera med AFC och hög amplitud. Därefter packades F2, F3 och F4 i två överfarter vardera med frekvensen 28 Hz. Detta upprepades till dess att alla stråk hade packats i 26 överfarter. Dubbelhopp började förekomma på bankdel F (fast frekvens) i överfart 13 och var vid 26 överfarter så kraftigt förekommande att packning med hög amplitud avbröts på denna bankdel. Dubbelhopp (eller "bouncing") uppstår vid hög frekvens och hög styvhet av underlaget och innebär att valsen släpper kontakt med underlaget under en tid som är längre än en vibrationscykel, vilket ger en negativ påverkan på packningen och på maskinen. Packning fortsatte på bankdel A (AFC) till dess att 40 överfarter hade utförts på denna. Ingen förekomst av dubbelhopp kunde noteras på bankdel A. Efter detta packades alla stråk i 8 överfarter med låg amplitud (bankdel A med AFC och

bankdel F med 33 Hz). Avslutningsvis packades alla stråk i 4 statiska överfarter utan vibration. Före, under och efter packning utfördes mätningar enligt kapitel 4.



## 4 Mät- och utvärderingsmetoder

Detta kapitel beskriver de olika mätmetoderna som tillämpades. Alla givare var noggrant kalibrerade på laboratorium före installation i fält.

### 4.1 Sättning

Sättningar och nivåer mättes av Kardonbanans entreprenör Rover Alcisa. På terrassen och på Lager 1 mättes nivåer med GPS (noggrannhet  $\pm 20$  mm) i rutnät av 2 m x 2 m och totalt 55 punkter efter packning.

På Lager 2 och 3 mättes nivåer och sättningar med avvägning (noggrannhet  $\pm 3$  mm). En källa till osäkerhet i mätningarna var att fixpunkten endast var nedslagen ca 0,5 m i morän och inte var placerad på fast botten. Avståndet från banken till fixpunkten var ca 20 m. För respektive packningsmetod var sättningspunkterna placerade centrerat längs mätlinjen samt på  $\pm 0,5$  m i sidled från mätlinjen (se Figur 8). På varje bankdel mättes sättningar i 33 punkter, dvs. totalt i 66 punkter på banken.

På Lager 2 mättes nivåerna före vibrerande packning men efter statiska överfarter (nollmätning) samt efter 2, 4, 8, 12, 16 och 22 överfarter. På Lager 3 mättes nivåer efter inledande statiska överfarter (nollmätning) samt efter 2, 4, 8, 12, 16, 22 och 26 överfarter. Efter 22 överfarter gjordes två mätningar, en direkt efter packning och en efter ett fyra veckor långt uppehåll. På bankdel A (AFC), där packning fortsatte med hög amplitud, mättes även sättningar efter 34 och 40 överfarter.

### 4.2 EMU-spolar

EMU-spolar (Janoo et al., 1999) har till syfte att mäta djupberoende deformation/sättning. De 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. Tekniken ger en mycket god mätnoggrannhet som kan vara så låg som 0,025 mm (Janoo et al., 1999) så länge inga instrument förflyttas i sidled eller roterar.

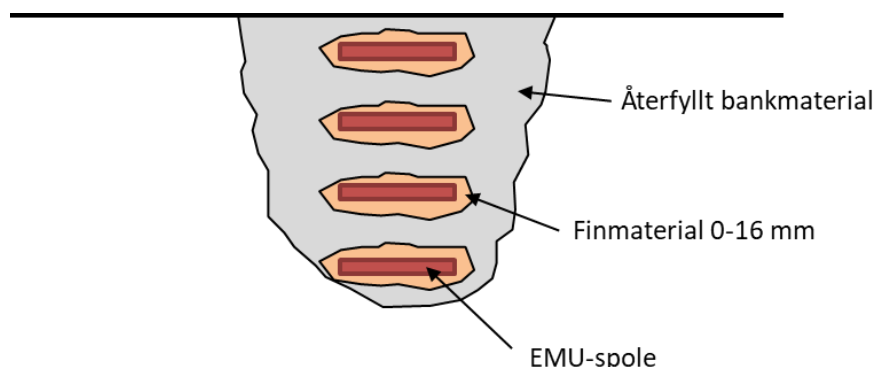
Givarna kalibreras parvis och placeras i en stapel i bankmaterialet med hjälp av inmätning. Först schaktas banken till avsett djup, den understa spolen placeras i botten och ansluts till en styrpinne för att inte erhålla sidoförskjutning av övriga givare (Figur 15). Nästa spole träs sedan på styrpinnen 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 och en mindre mängd finare material (0-16 mm) placeras runt spolarna för att få god anliggning till bankmaterialet. När alla givare är placerade avlägsnas styrpinnen och en mätstapel erhålls där avståndsförändringen mellan varje spolar kan mätas genom att inducera en elektrisk spänning och avläsa den resulterande spänningen i över- eller underliggande spole. En färdiginstallerad stapel visas i Figur 16 och schematiskt i Figur 17.



**Figur 15. Installation av EMU-spolar.**



**Figur 16. Färdiginstallerad stapel av EMU-spolar. På bilden syns endast den översta spolen.**



**Figur 17. Schematisk skiss av installerade EMU-spolar.**

Totalt fyra staplar av EMU-spolar installerades, varav två i bankdel A (AFC) och två i bankdel F (28 Hz). Staplarnas placering i plan visas i Figur 8 och i sektion i Figur 6. Den undre delen av varje stapel var placerad i den övre delen av Lager 2 och bestod av fyra spolar som gav tre mätavstånd. Den övre delen av varje stapel placerades i den nedre delen av Lager 3 och bestod av tre spolar som gav två mätavstånd uteslutande i Lager 3 och ett mätavstånd som innefattade både Lager 2 och Lager 3 samt gränsskiktet, där en större andel av avståndet mätte deformationer i Lager 3. Vid packning av Lager 2 avlästes spolarna i Lager 2 och vid packning av Lager 3 avlästes alla spolar.

EMU-spolarerna i Lager 2 avlästes efter inledande statiska överfarter på Lager 2 (nollmätning) och sedan efter 2, 4, 8, 12, 16 och 22 vibrerade överfarter. Efter utläggning av Lager 3 och statiska överfarter gjordes en nollmätning av alla spolar. EMU-spolarerna i både lagren avlästes sedan under packning av Lager 3 efter 2, 4, 8, 12, 16, 22 och 26 överfarter. Vid ytterligare packning på bankdel A avlästes spolarerna under denna bankdel även efter 34 och 40 överfarter.

### 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,  $E_{v1}$ , och för andra belastningscykeln,  $E_{v2}$ . Första cykeln innebär till stor del en initialisering av kontakt mellan plattan och underlaget och medan  $E_{v2}$  anses vara den modul som är mest relaterad till ytans styvhet. Acceptenskriterier är därför alltid uttryckta i  $E_{v2}$ -modul. I många fall presenteras kvoten  $E_{v2}/E_{v1}$  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. Den första belastningscykeln är till stor del relaterad till en initialisering av plattans kontakt med underlaget och beror på kontaktförutsättningarna. Detta blir mer påtagligt vid grovkrossat material. Som mothåll användes hjullastare eller lastbil (Figur 18).



**Figur 18. Statisk plattbelastning.**

Plattbelastning utfördes i 8 punkter per bankdel, dvs. i totalt 16 punkter. På Lager 2 gjordes försök efter 22 överfarter. På Lager 3 gjordes försök efter 8, 12 och 22 överfarter samt efter avslutad packning. På bankdel A innebar avslutad packning 40 överfarter med hög amplitud, 8 överfarter med låg amplitud och 4 statiska överfarter medan det på bankdel F gjordes 26 överfarter med hög amplitud, 8 överfarter med låg amplitud och 4 statiska överfarter. Statisk plattbelastning utfördes av Sweco och VTI.

#### **4.4 Integrerade vältmätningar**

Baserat på en accelerometer på valsen och mätning av excentermassans läge kan ett antal parametrar bestämmas. Längs mätlinjerna registrerades i alla överfarter förskjutningsamplituden, som fås av att dubbelintegrera accelerationen, samt packmätarvärdena Compactometervärde (CMV), pålastningsmodulen  $E_{vib1}$  och avlastningsmodulen  $E_{vib2}$ , vilka har beskrivits i Wersäll (2018). Även parametern RMV (Resonance Meter Value), som är ett mått på förekomsten av dubbelhopp, registrerades samt den maximala kontaktkraften i varje cykel, som fås utifrån lastförskjutningssambandet där  $E_{vib}$  beräknas.

#### **4.5 Fallviktsapparat**

Provbelastning 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.



**Figur 19. Mätning med tung fallviktsapparat.**

Fallviktsförsök utfördes av VTI i 11 punkter per bankdel, dvs. totalt 22 punkter, endast på Lager 3. Mätningar gjordes längs båda mätlinjerna efter 8, 12, 22, och 26 överfarer med hög amplitud. På bankdel A (AFC) mättes även efter 40 överfarer. Efter ytterligare 8 överfarer med låg amplitud gjordes ytterligare en mätning längs båda mätlinjerna samt även efter 4 avslutande statistiska överfarer.

#### **4.6 Spänningsmätningar**

Vertikal dynamisk tillskottsspänning mättes med hydraulisk spänningsgivare/jordtrycksdosa (SPC). Spänningsgivare placerades på tre olika djup i en punkt per mätlinje. De understa givarna placerades på överytan av Lager 1 efter packning, dvs. i skiktgränsen mellan Lager 1 och 2. De mellersta givarna placerades på överytan av Lager 2 efter packning, dvs. i skiktgränsen mellan Lager 2 och 3. De översta givarna placerades på överytan av Lager 3A, dvs. mitt i Lager 3. Vid packning på Lager 2 erhöles således mätdjupet 1 m och vid packning på Lager 3 erhöles mätdjupen 0,5 m, 1 m och 2 m. Spänningsgivarna lades direkt på ytan och med en mindre mängd finare material (0-16 mm) runt dem för att få en god anliggning till omgivande bankmaterial. Därefter överfylldes de av en mindre mängd bankmaterial för att skydda dem vid utläggning. En spänningsgivare visas i Figur 20.



**Figur 20. Spänningsgivare.**

## 5 Resultat

### 5.1 Lagertjocklek

Genomsnitt från avvägningar på terrassen samt på varje lager ger lagertjocklekar enligt nedan. Måltjocklekar var 0,5 m för Lager 1, 1 m för Lager 2 och 1 m för Lager 3.

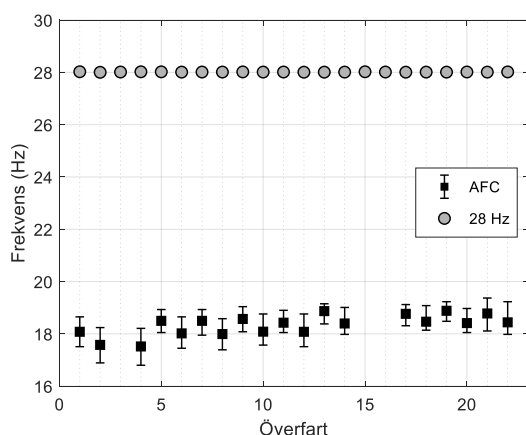
- Lager 1
  - Packat: 0,46 m
- Lager 2
  - Opackat: 1,02 m
  - 8 överfarter: 0,97 m
  - 22 överfarter: 0,94 m
- Lager 3
  - Opackat: 1,09 m
  - 8 överfarter: 1,02 m
  - 22 överfarter: 1,02 m
  - 40 överfarter (delyta A): 1,00 m
- Slutlig höjd: 2,40 m

### 5.2 Integrerade vältmätningar

Detta kapitel presenterar utvalda mätresultat från de integrerade vältmätningarna. En komplett sammanställning av mätresultaten redovisas i Bilaga A. I överfarterna 3, 15 och 16 på yta A (AFC) uppstod problem med datainsamlingsenheten vilket ledde till uteblivna vältdata i dessa överfarter.

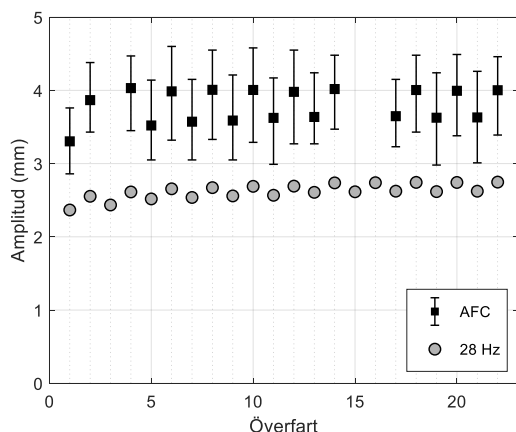
#### 5.2.1 Lager 2

I detta avsnitt presenteras mätresultat från integrerade vältmätningar vid packning av Lager 2. Den genomsnittliga frekvensen i varje överfart visas i Figur 21. Den fasta frekvensen var vältens standardfrekvens 28 Hz och varierade inte. När AFC var aktiverat varierade frekvensen kontinuerlig för att uppnå resonans, vilket resulterade i genomsnittsfrekvenser mellan 17 Hz och 19 Hz. Intervallen visar högsta och lägsta frekvens i varje överfart. Eftersom det dynamiska systemet påverkas av excentermassans rotationsriktning i förhållande till valsens rotationsriktning, påverkas även resonansfrekvensen, vilken då varierar beroende på vältens färdriktning. När välten färdas framåt (udda överfarter) fås en något högre resonansfrekvens än om välten färdas bakåt (jämma överfarter). Frekvensen sjönk kraftigt vid användande av AFC, vilket är samstämmigt med tidigare resultat.



**Figur 21. Genomsnittlig frekvens per överfart, Lager 2.**

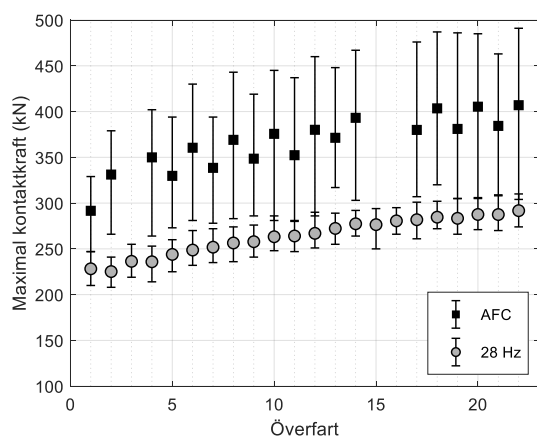
Figur 22 visar förskjutningsamplituden (hädanefter kallad enbart amplitud enligt gängse praxis). Amplituden ökade påtagligt med AFC, trots lägre frekvens och lägre centrifugalkraft, tack vare en förbättrad interaktion mellan välten och banken. Figuren visar och maximum- och minimumvärden av amplituden i varje överfart när packning utfördes med AFC. Eftersom amplituden i hög grad beror av frekvensen så fås ett brett intervall. Vid fast frekvens är variationen försumbar.



**Figur 22. Genomsnittlig amplitud per överfart, Lager 2.**

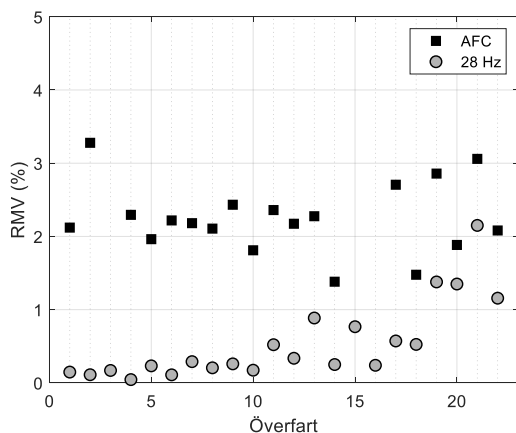
Den maximala kontaktkraften mellan valsen och bankmaterialet i varje belastningscykel kan beräknas med hjälp av den uppmätta accelerationen och excentermassans läge. Figur 23 visar det genomsnittliga värdet, samt maximum- och minimumvärden, i varje överfart. Även denna parameter är till stor del frekvensberoende, vilket gav ett större intervall för AFC. Kontaktkraften var påtagligt högre för AFC, trots en lägre centrifugalkraft, vilket även det beror på en optimerad interaktion mellan valsen och underlaget vid resonans. Eftersom styvheten i bankmaterialet ökade i varje överfart ökade även kontaktkraften.





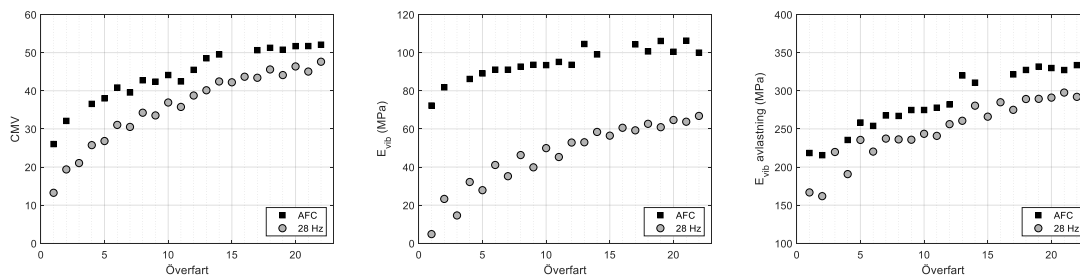
**Figur 23. Genomsnittligt värde av maximal kontaktkraft per överfart, Lager 2.**

Parametern RMV (Resonance Meter Value) beräknas utifrån accelerationssignalens frekvensinnehåll och är relaterad till förekomsten av dubbelhopp. Under de rådande förutsättningarna kan ett värde högre än ca 6 % antas indikera att dubbelhopp uppstår. Figur 24 visar det genomsnittliga RMV-värdet i varje överfart. Vid packning med AFC erhöles ett något förhöjt värde av ett par procent till följd av att välten arbetar vid resonansfrekvens, vilket inte ska tolkas som dubbelhopp. Vid fast frekvens ökade RMV något efter ca 10 överfarter och mer påtagligt efter ca 18 överfarter, dock ej så pass mycket att dubbelhopp kunde anses föreligga. Inget dubbelhopp kan heller identifieras för AFC.



**Figur 24. Genomsnittligt värde av RMV per överfart, Lager 2.**

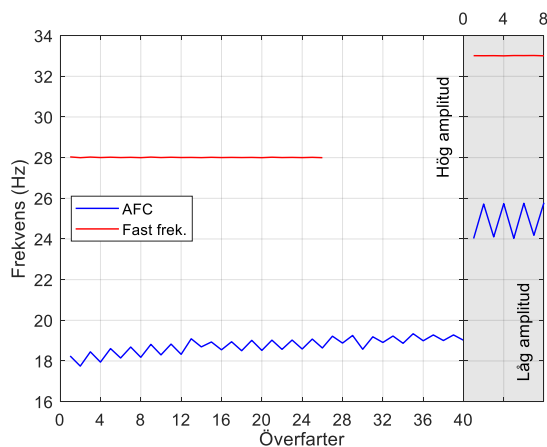
Figur 25 presenterar packmätarvärdena CMV,  $E_{vib1}$  och  $E_{vib2}$ . Tidigare undersökningar har visat att  $E_{vib2}$  är den parameter som är bäst relaterad till bankmaterialets styvhet (Wersäll et al., 2019b). Packmätarvärdena ökade påtagligt upp till ca 10 överfarter, varefter en måttlig ökning kan observeras. Värdena visar en något fortsatt tillväxt vid 22 överfarter, där packningen av Lager 2 avslutades. Det antyder att packningspotential återstår, dvs. att mer packning hade kunnat erhållas med ett högre antal överfarter. Figur 24 antyder dock att dubbelhopp snart skulle ha uppstått om packningen hade fortsatt med fast frekvens, vid vilket packningen normalt sett hade avbrutits eller amplitudinställningen ändrats från hög till låg.



**Figur 25. Genomsnittliga värden av CMV,  $E_{vib1}$  (pålastning) och  $E_{vib2}$  (avlastning) per överfart, Lager 2.**

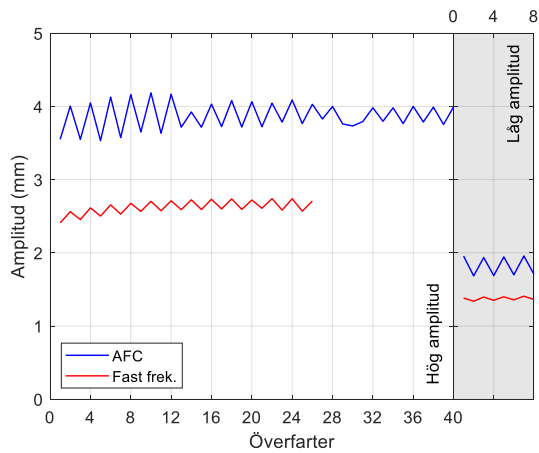
### 5.2.2 Lager 3

Nedan presenteras mätresultat från integrerade välmätningar vid packning av Lager 3. Liksom på Lager 2 var den fast inställda standardfrekvensen konstant på 28 Hz vid hög amplitud medan AFC gav en varierande frekvens inom intervallet 17 Hz till 19 Hz samt något ökande med ökande styvhet i banken. Vid låg amplitud sattes den fasta frekvensen till 33 Hz, medan AFC varierade frekvensen inom intervallet 24-26 Hz. Vid låg amplitud ökade resonansfrekvensen, till stor del på grund av den lägre töjningsnivån som ger en högre styvhet då bankmaterialet uppvisar en hög grad icke linjäritet.

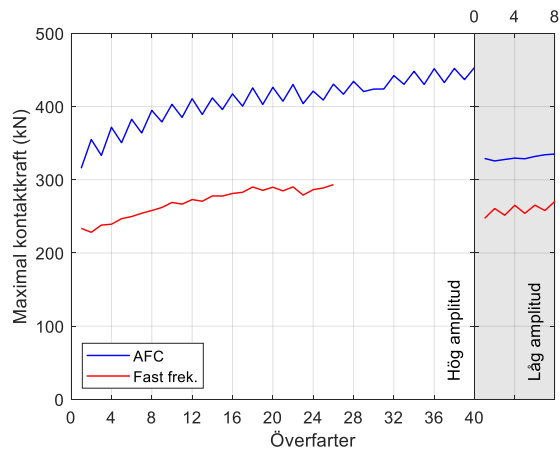


**Figur 26. Genomsnittlig frekvens per överfart, Lager 3.**

Den genomsnittliga amplituden i varje överfart vid packning på Lager 3 presenteras i Figur 27. Liksom vid packning av Lager 2 ökade den betydligt då AFC användes, jämfört med den fasta frekvensen, vilket gäller även vid låg amplitud. Figur 28 visar genomsnittsvärden av den maximala kontaktkraften, vilken även den var högre för AFC än för fast frekvens, både vid hög och vid låg amplitud.

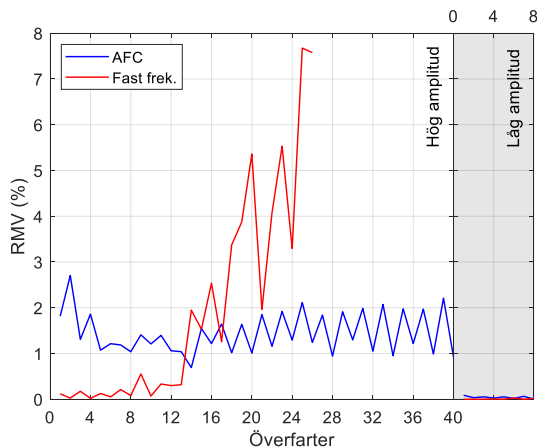


**Figur 27. Genomsnittlig amplitud per överfart, Lager 3.**



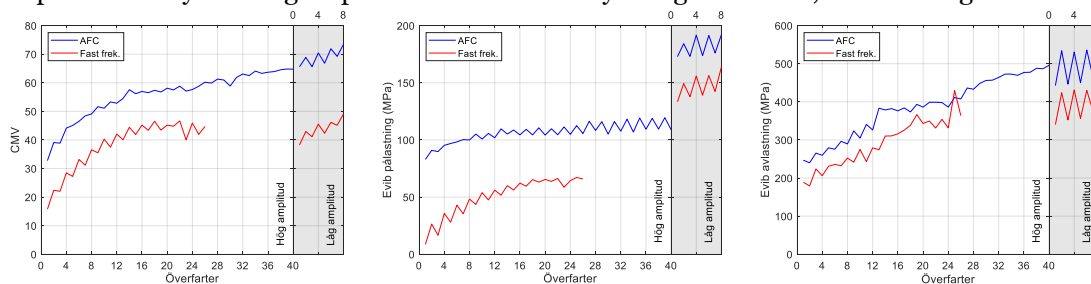
**Figur 28. Genomsnittlig värde av maximal kontaktkraft per överfart, Lager 3.**

Parametern RMV visas i Figur 29. Liksom tidigare erhöles ett något förhöjt värde vid packning med AFC, vilket inte är relaterat till dubbelhopp. Inget dubbelhopp kunde identifieras för AFC i någon av de 40 överfarterna. Vid 28 Hz däremot erhöles en betydande andel dubbelhopp i överfart 20 och så pass mycket i överfart 26 att packningen avbröts. Vid låg amplitud fanns ingen antydning till dubbelhopp för någon av packningsmetoderna.



**Figur 29. Genomsnittligt värde av RMV per överfart, Lager 3.**

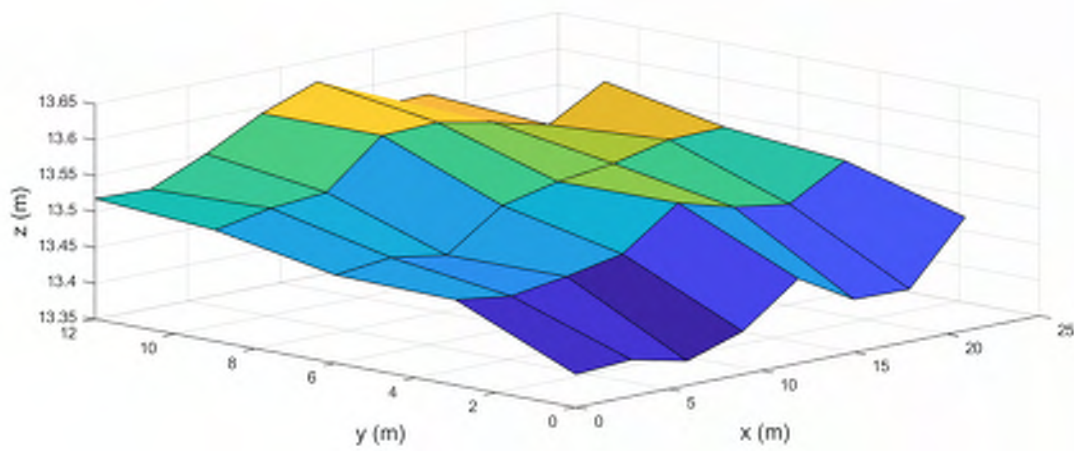
Genomsnitt av packmätarvärdena CMV,  $E_{vib1}$  och  $E_{vib2}$  visas i Figur 30. För AFC erhöles kontinuerligt ökande värden av CMV och  $E_{vib2}$  i alla 40 överfarter med hög amplitud, medan  $E_{vib1}$  avtog snabbare. Dock bör  $E_{vib1}$  inte användas tillsammans med AFC pga. dess starka frekvensberoende (Wersäll et al., 2019b). Tillväxten vid packning med fast frekvens avstannade efter ca 20 överfarter, vilket även var då dubbelhopp uppstod (Figur 29). Det innebär att mer packning ej kunde utföras vid denna frekvens och amplitud. Vid byte till låg amplitud erhöles dock en ytterligare tillväxt, vilket även gäller AFC.



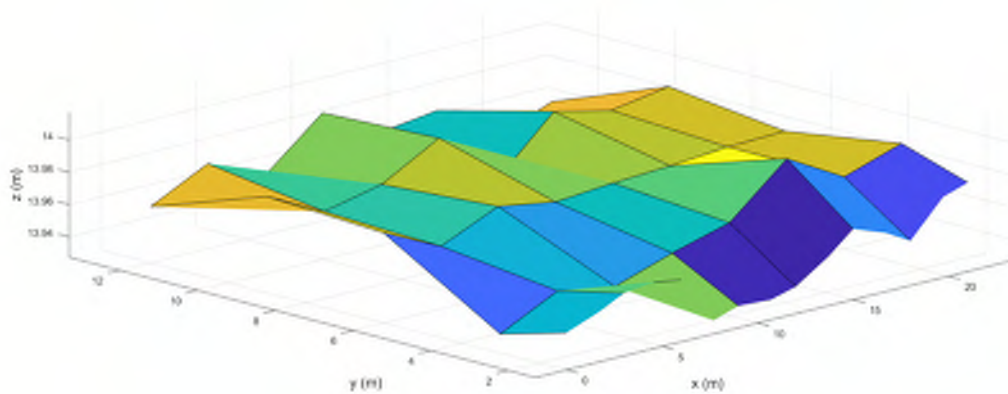
**Figur 30. Genomsnittliga värden av CMV,  $E_{vib1}$  (pålastning) och  $E_{vib2}$  (avlastning) per överfart, Lager 3.**

### 5.3 Sättningar

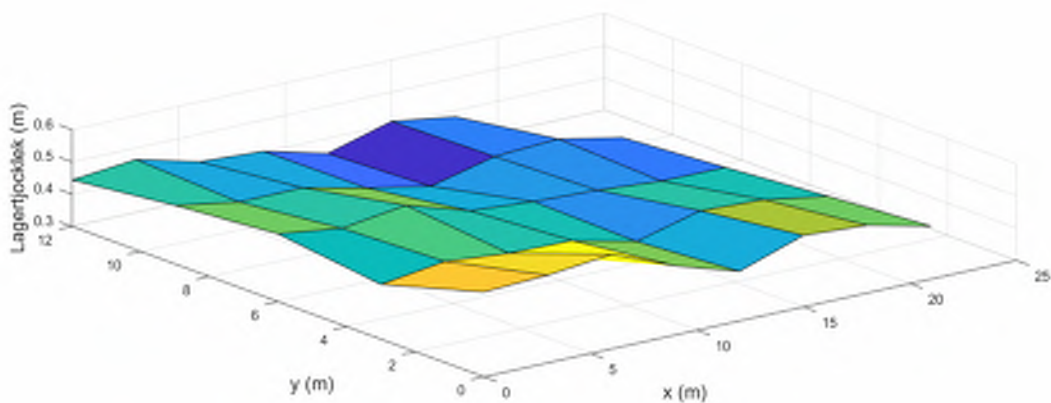
De uppmätta nivåerna på terrassen och på Lager 1 efter packning visas i Figur 31 respektive Figur 32. Figur 33 visar lagertjockleken av Lager 1 efter packning. Vältstråken är riktade längs med x-axeln med ökande värden motsvarande framåt i färdriktningen. Den halva av banken med låga y-värden (0-6 m) packades med fast frekvens medan den andra halvan ( $y=6-12$  m) packades med AFC. Något lägre nivåer kunde observeras vid låga y-värden, dvs. utanför mätstråket för fast frekvens, medan lagertjockleken håller en någorlunda jämn nivå.



**Figur 31. Nivå på terrass efter packning.**



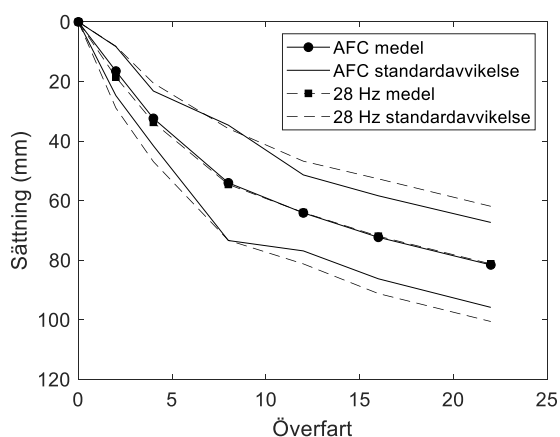
**Figur 32. Nivå på Lager 1 efter packning.**



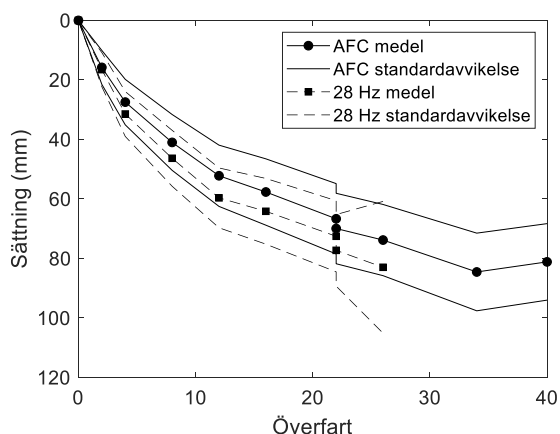
**Figur 33. Lagertjocklek av Lager 1 efter packning.**

De genomsnittliga sättningarna på Lager 2 visas i Figur 34. Sättningen på den del av banken som packades med AFC var identisk med den som packades med fast frekvens förutom att variationen var

mindre. Eftersom sättningen på överytan inte enbart är relaterad till packningen utan även till sidoförflyttning, packning av underliggande material m.m. så är det svårt att dra några direkta slutsatser från dessa observationer. Sättningsarna på Lager 3 visas i Figur 35. Sättningsarna på Lager 3 var påtagligt större för fast frekvens än för AFC. Efter 22 överfarter var ett 4 veckor långt uppehåll som orsakade ytterligare sättningar. Mellan överfart 34 och 40 erhöles en negativ sättning. Utöver detta fanns inget tecken på att sättningarna avtog.

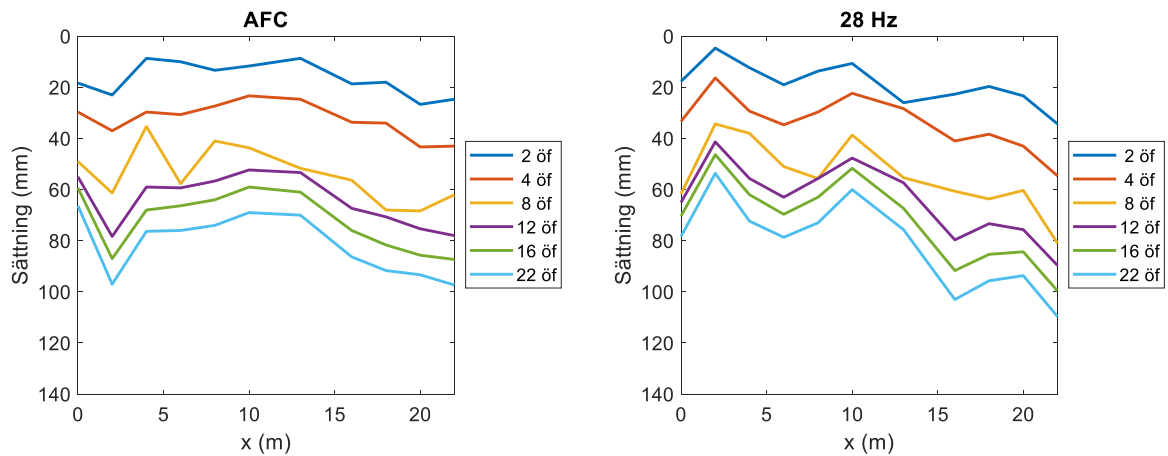


**Figur 34. Genomsnittlig sättning på Lager 2.**

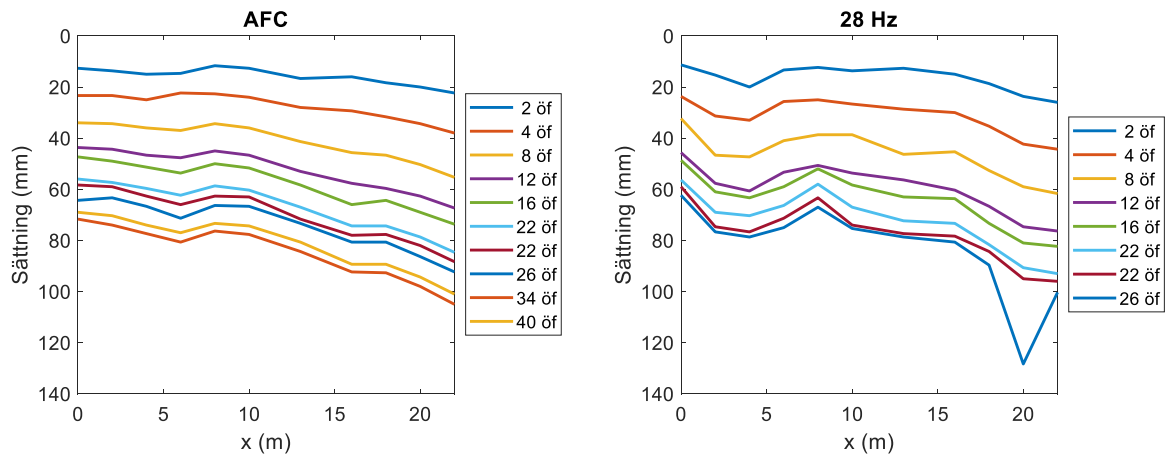


**Figur 35. Genomsnittlig sättning på Lager 3.**

Figur 36 visar sättningen längs med respektive packningsstråk på Lager 2. Något större sättningar kan ses vid höga x-värden. Detsamma kan observeras på Lager 3, vilket visas i Figur 37. Det kan bero på att material efter  $x=24$  m, dvs. 2 m efter packningsstråket var opackat och nära bankslänten. Sättningsmätningen efter 2 överfarter på stråket för fast frekvens vid  $x=20$  m är mest sannolikt mätfel och har exkluderats från övriga sammanställningar.



Figur 36. Sättning på Lager 2 längs med mätlinje.



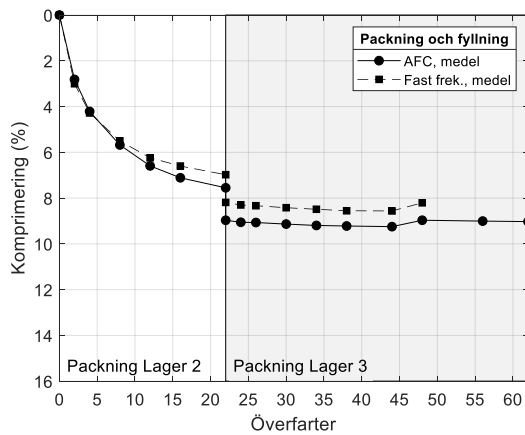
Figur 37. Sättning på Lager 3 längs med mätlinje.

## 5.4 EMU-spolar

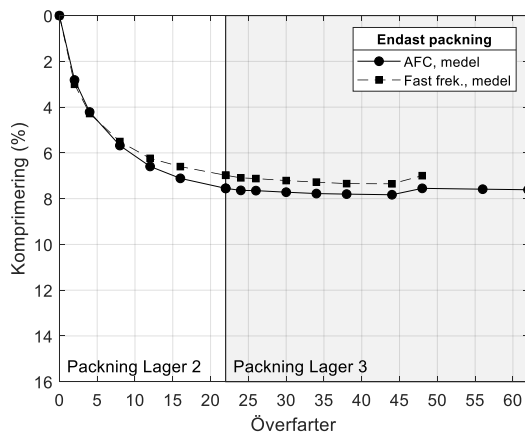
Detta avsnitt redovisar utvalda mätresultat från EMU-spolarna i Lager 2 och Lager 3. Kompletta mätresultat återfinns i Bilaga B.

### 5.4.1 Lager 2

EMU-spolarna i Lager 2 var placerade i den övre halvan av lagret, ner till ca 0,6 m djup. EMU-spolarernas deformationer mättes före, under och efter packning av både Lager 2 och Lager 3. Medelvärden av den totala komprimeringen av spolarerna i de två staplarna i varje bankdel redovisas i Figur 38. Vid packning av Lager 2 gav AFC större komprimering än 28 Hz, sett till totala deformationer. Elastiska sättningar till följd av utfyllnad av Lager 3 gav ca 1,5 % ytterligare komprimering. Komprimeringen till följd av packning av Lager 3 gav mycket små men märkbara deformationer som dock kan anses försumbara ur packningssynpunkt. Efter 22 överfarter på Lager 3 (totalt 44 överfarter) var ett uppehåll på ca 4 veckor. Detta ledde till rörelser i banken som yttrade sig som en måttlig negativ komprimering i EMU-spolarerna mellan 22 och 26 överfarter på Lager 3 (mellan totalt 44 och 48 överfarter). Figur 39 visar samma förlopp där den elastiska sättningen har exkluderats för att se enbart inverkan av packningen.



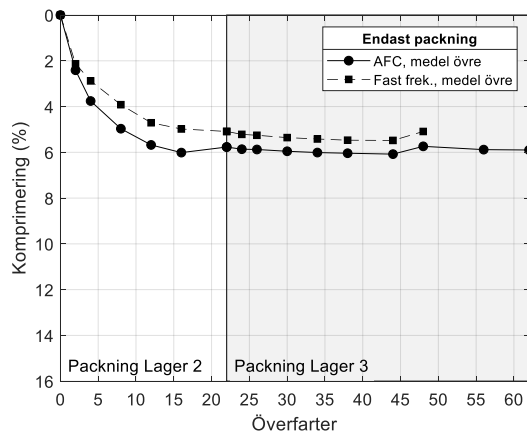
**Figur 38. Total uppmätt medelkomprimering av Lager 2, inklusive komprimering från fyllning.**



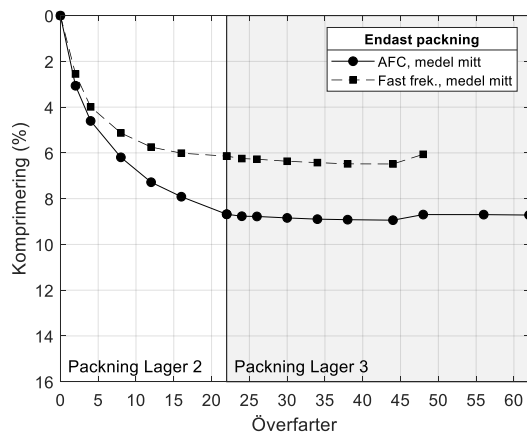
**Figur 39. Total medelkomprimering av Lager 2 vid packning, exklusive komprimering från fyllning.**

Eftersom fyra EMU-spolar var placerade i varje mätstapel i Lager 2 erhöles tre mätavstånd. De övre, mellersta och nedre komponenterna redovisas i Figur 40, Figur 41 respektive Figur 42 där de elastiska deformationerna till följd uppfyllnad av Lager 3 har exkluderats. Genomsnittliga mätdjup var ca 60-230 mm för de övre, ca 230-400 mm för de mellersta och ca 400-560 mm för de nedre spolparen. I det övre mätavståndet gav AFC något högre deformationer än 28 Hz. Skillnaden mellan de två packningsmetoderna var mindre än förväntat, baserat på tidigare resultat. Mellan 16 och 22 överfarter kan en negativ komprimering observeras som sannolikt beror på förflyttning av översta spolen. För de mellersta spolparen gav AFC betydligt större komprimering som överensstämmer med tidigare mätningar. I de nedersta spolparen erhöles något större komprimering för fast frekvens. Även i tidigare undersökningar har en något större djupverkan identifierats vid hög frekvens. Dock har denna skillnad tidigare erhållits på större djup än de som redovisas i Figur 42.

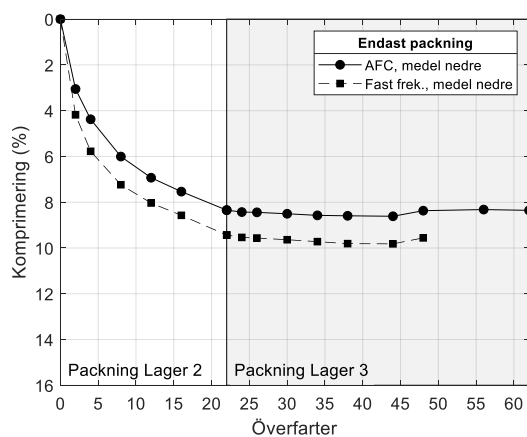




**Figur 40. Medelkomprimering i översta spolparet, Lager 2.**



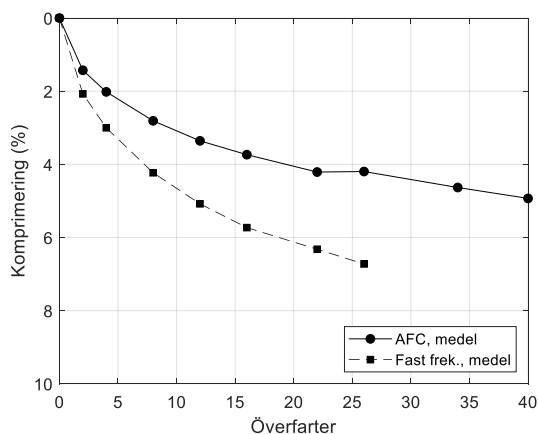
**Figur 41. Medelkomprimering i mellersta spolparet, Lager 2.**



**Figur 42. Medelkomprimering i nedersta spolparet, Lager 2.**

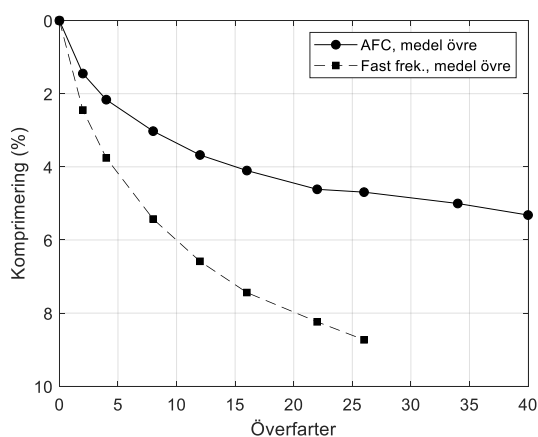
### 5.4.2 Lager 3

EMU-spolarerna i Lager 3 var placerade i nedre halvan av lagret, från ca 0,6 djup. I varje mätstapel var tre spolar placerade i Lager 3 och den fjärde i övre delen av Lager 2, vilket gav totalt tre mätavstånd. Den totala komprimeringen visas i Figur 43. Komprimeringen blev påtagligt större för fast frekvens än för AFC. En något högre komprimering var förväntad utifrån tidigare resultat, dock med mindre skillnad och med betydligt högre komprimering för AFC än den som presenteras i Figur 43.

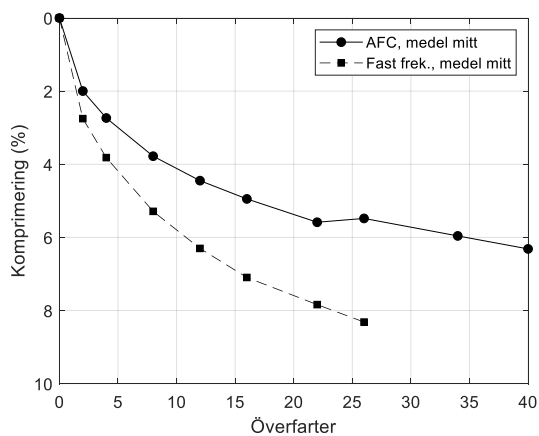


**Figur 43. Total medelkomprimering av nedre halvan av Lager 3.**

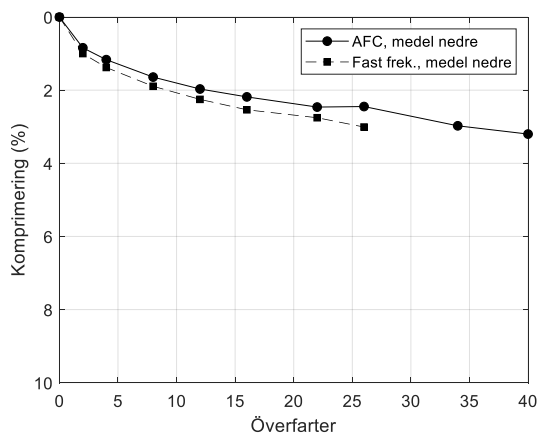
Genomsnitt av de två mätstaplarnas komprimering per djupintervall visas i Figur 44 för det övre mätavståndet, i Figur 45 för det mellersta mätavståndet och i Figur 46 för det nedre mätavståndet. Mät djupet från överkant av Lager 3 var ca 600-800 mm, 800-1000 mm respektive 1000-1150 mm. Det nedre mätavståndet motsvarar således till ca 2/3 den undre delen av Lager 3 och till ca 1/3 den övre delen av Lager 2. I både de övre och mellersta mätavstånden var komprimeringen betydligt större för fast frekvens än för AFC medan mycket liten komprimering erhöles för båda packningsmetoderna i det nedersta mätavståndet. I det mellersta mätavståndet erhålls en negativ komprimering för AFC mellan överfart 22 och 26, vilket antyder att en spole har förflyttats.



**Figur 44. Medelkomprimering i översta spolparet, Lager 3.**



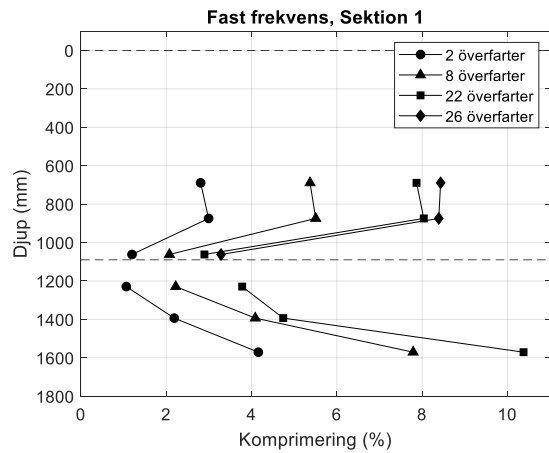
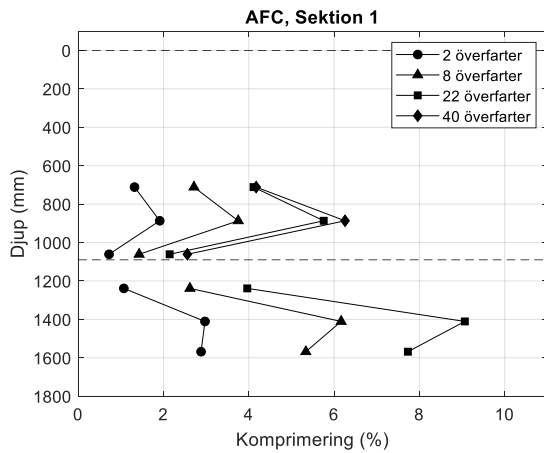
**Figur 45. Medelkomprimering i mellersta spolparet, Lager 3.**



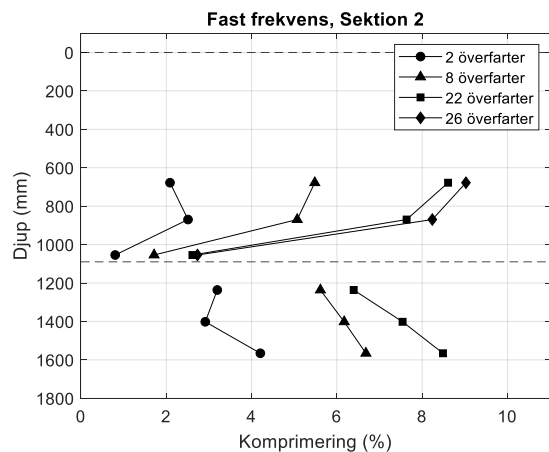
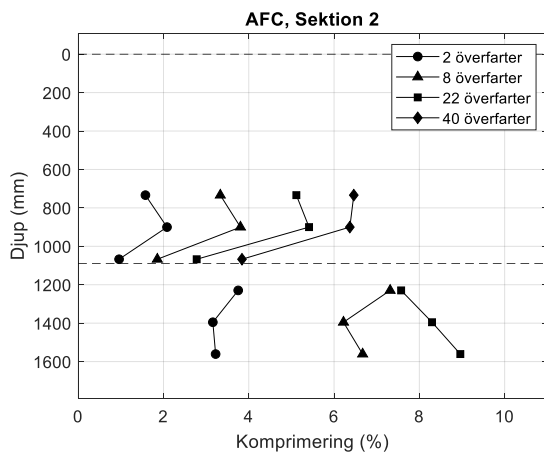
**Figur 46. Medelkomprimering i nedersta spolparet, Lager 3.**

### 5.4.3 Komprimeringsprofiler

Ovanstående resultat redovisar genomsnittet av de två mätstaplarna i varje packningsyta. Nedan visas komprimeringsprofiler för de enskilda mätstaplarna. I Figur 47 visas Sektion 1 och i Figur 48 visas Sektion 2. Komprimeringsprofilerna skiljer sig påtagligt mellan de två packningsmetoderna. De skiljer sig också anmärkningsvärt mycket mellan de två mätstaplarna för respektive packningsmetod. Detta, tillsammans med det faktum att resultaten inte liknar de från tidigare mätningar, minskar trovärdigheten av de deformationer som uppmätts med EMU-spolarna. Möjliga orsaker till dessa resultat diskuteras i avsnitt 6.6.



Figur 47. Komprimeringsprofil, Sektion 1.



Figur 48. Komprimeringsprofil, Sektion 2.

### 5.5 Plattbelastningsförsök

På Lager 2 utfördes statistiska plattbelastningsförsök i 8 punkter på yta A (AFC) och i 8 punkter på yta F (28 Hz) efter 22 överfarter. Resultaten visas i Tabell 3. Återbelastningsmodulen  $E_{v2}$  var mycket likvärdig för de båda packningsmetoderna och påtagligt lägre än den som förväntas av ett välpackat material av denna typ och fraktion. Kvoten  $E_{v2}/E_{v1}$  var något lägre för AFC men skillnaden var inom den statistiska felmarginalen.

**Tabell 3. Statisk plattbelastning på Lager 2 efter 22 överfarter.**

AFC					28 Hz				
Punkt	Utförare	$E_{v1}$ (MPa)	$E_{v2}$ (MPa)	$E_{v2}/E_{v1}$	Punkt	Utförare	$E_{v1}$ (MPa)	$E_{v2}$ (MPa)	$E_{v2}/E_{v1}$
A1	Sweco	23,7	90,6	3,83	F1	Sweco	45,3	109,7	2,42
A2	Sweco	26,2	94,7	3,61	F2	Sweco	35,0	98,7	2,82
A3	Sweco	37,5	95,6	2,55	F3	Sweco	30,3	99,2	3,28
A4	Sweco	35,3	96,2	2,73	F4	Sweco	24,3	87,6	3,61
A5	Sweco	33,4	88,5	2,65	F5	Sweco	24,0	97,1	4,04
A6	Sweco	30,8	85,6	2,78	F6	Sweco	23,4	101,5	4,33
A7	Sweco	30,1	105,9	3,52	F7	Sweco	25,0	78,6	3,15
A8	Sweco	33,0	96,4	2,92	F8	Sweco	24,5	91,8	3,74
<b>Medel</b>		<b>31,3</b>	<b>94,2</b>	<b>3,1</b>	<b>Medel</b>		<b>29,0</b>	<b>95,5</b>	<b>3,4</b>

På Lager 3 utfördes statisk plattbelastning i samma 16 punkter som på Lager 3. I Tabell 4 redovisas plattbelastningsförsök på Lager 3 efter 8 överfarter. Även här erhöles mycket liknande styvhet på de båda packningsytorna och en något lägre kvot för AFC. Efter 8 överfarter på Lager 3 var styvheten nästan lika hög som efter 22 överfarter på Lager 2. Modulen efter 12 överfarter, som visas i Tabell 5, uppvisade en mycket blygsam tillväxt, vilket innebär att styvhetstillväxten i överfart 9-12 var i praktiken försumbar. Tabell 6 redovisar plattbelastningsförsök direkt efter 22 överfarter där modulen återigen var praktiskt taget oförändrad (Sweco). Tabellen visar även plattbelastningsförsök som utfördes 3 veckor efter packning av en annan utförare (VTI). Dessa visar en liten tillväxt, dock mycket blygsam. Provytan med frekvensstyrning packades i 40 överfarter med hög amplitud, 8 överfarter med låg amplitud och 4 statiska överfarter medan provytan med fast frekvens packades i 26 överfarter med hög amplitud, 8 överfarter med låg amplitud och 4 statiska överfarter. Plattbelastning efter avslutad packning, Tabell 7, visade en styvhetstillväxt med ca 30 % jämfört med efter 22 överfarter. Dock erhöles ingen skillnad mellan de två packningsmetoderna och modulerna var betydligt lägre än förväntat. Baserat på erfarenheter på liknande material förväntades  $E_{v2}$ -modulen snarare uppgå till ca 200 MPa efter många överfarter.

**Tabell 4. Statisk plattbelastning på Lager 3 efter 8 överfarter.**

AFC						28 Hz					
Punkt	Utförare	Överfart	$E_{v1}$ (MPa)	$E_{v2}$ (MPa)	$E_{v2}/E_{v1}$	Punkt	Utförare	Överfart	$E_{v1}$ (MPa)	$E_{v2}$ (MPa)	$E_{v2}/E_{v1}$
A1	Sweco	8	34,3	91,7	2,67	F1	Sweco	8	24,9	92,6	3,72
A2	Sweco	8	23,9	82,6	3,46	F2	Sweco	8	23,8	90,7	3,81
A3	Sweco	8	25,6	86,1	3,36	F3	Sweco	8	23,5	85,9	3,65
A4	Sweco	8	24,0	90,9	3,78	F4	Sweco	8	21,2	92,6	4,38
A5	Sweco	8	27,1	91,3	3,37	F5	Sweco	8	25,2	76,7	3,04
A6	Sweco	8	33,0	92,6	2,81	F6	Sweco	8	22,8	89,2	3,91
A7	Sweco	8	30,1	90,8	3,02	F7	Sweco	8	23,9	83,8	3,50
A8	Sweco	8	38,3	85,8	2,24	F8	Sweco	8	20,6	80,8	3,93
<b>Medel</b>			<b>29,5</b>	<b>89,0</b>	<b>3,1</b>	<b>Medel</b>			<b>23,2</b>	<b>86,5</b>	<b>3,7</b>

**Tabell 5. Statisk plattbelastning på Lager 3 efter 12 överfarter.**

AFC						28 Hz					
Punkt	Utförare	Överfart	E <sub>v1</sub> (MPa)	E <sub>v2</sub> (MPa)	E <sub>v2</sub> /E <sub>v1</sub>	Punkt	Utförare	Överfart	E <sub>v1</sub> (MPa)	E <sub>v2</sub> (MPa)	E <sub>v2</sub> /E <sub>v1</sub>
A1	Sweco	12	30,5	89,7	2,94	F1	Sweco	12	19,7	85,7	4,34
A2	Sweco	12	31,1	91,9	2,95	F2	Sweco	12	21,8	99,7	4,57
A3	Sweco	12	30,5	98,8	3,24	F3	Sweco	12	20,0	89,7	4,49
A4	Sweco	12	31,3	96,3	3,08	F4	Sweco	12	22,5	90,4	4,02
A5	Sweco	12	30,4	87,8	2,89	F5	Sweco	12	22,6	87,8	3,89
A6	Sweco	12	28,3	90,2	3,19	F6	Sweco	12	26,4	91,6	3,47
A7	Sweco	12	26,0	94,6	3,64	F7	Sweco	12	22,8	91,7	4,03
A8	Sweco	12	30,6	93,3	3,04	F8	Sweco	12	19,2	86,7	4,52
<b>Medel</b>			<b>29,8</b>	<b>92,8</b>	<b>3,1</b>	<b>Medel</b>			<b>21,9</b>	<b>90,4</b>	<b>4,2</b>

**Tabell 6. Statisk plattbelastning på Lager 3 efter 22 överfarter.**

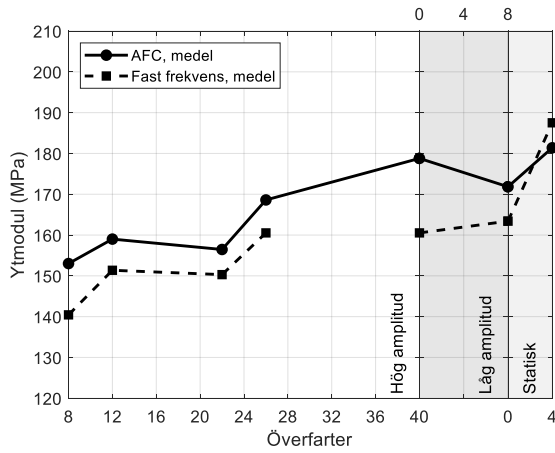
AFC						28 Hz					
Punkt	Utförare	Överfart	E <sub>v1</sub> (MPa)	E <sub>v2</sub> (MPa)	E <sub>v2</sub> /E <sub>v1</sub>	Punkt	Utförare	Överfart	E <sub>v1</sub> (MPa)	E <sub>v2</sub> (MPa)	E <sub>v2</sub> /E <sub>v1</sub>
A1	Sweco	22	27,5	93,0	3,38	F1	Sweco	22	28,5	85,5	3,00
A2	Sweco	22	32,6	89,1	2,73	F2	Sweco	22	29,3	97,0	3,31
A3	Sweco	22	31,4	96,0	3,05	F3	Sweco	22	22,5	96,0	4,26
A4	Sweco	22	29,6	91,4	3,08	F4	Sweco	22	23,3	94,0	4,04
A5	Sweco	22	28,0	86,8	3,10	F5	Sweco	22	20,8	95,7	4,61
A6	Sweco	22	30,8	91,9	2,98	F6	Sweco	22	31,6	87,4	2,77
A7	Sweco	22	33,1	98,7	2,98	F7	Sweco	22	24,5	92,3	3,76
A8	Sweco	22	29,6	99,2	3,35	F8	Sweco	22	23,9	100,6	4,20
<b>Medel</b>			<b>30,3</b>	<b>93,3</b>	<b>3,1</b>	<b>Medel</b>			<b>25,6</b>	<b>93,6</b>	<b>3,7</b>
A11	VTI	22	26	94	3,6	F11	VTI	22	24	92	3,9
A12	VTI	22	26	104	4,0	F12	VTI	22	29	98	3,4
A13	VTI	22	29	105	3,7	F13	VTI	22	27	96	3,6
A14	VTI	22	38	108	2,9	F14	VTI	22	22	92	4,3
<b>Medel</b>			<b>30</b>	<b>103</b>	<b>3,6</b>	<b>Medel</b>			<b>26</b>	<b>95</b>	<b>3,8</b>

**Tabell 7. Statisk plattbelastning på Lager 3 efter avslutad packning inklusive 8 överfarter med låg amplitud och 4 statiska.**

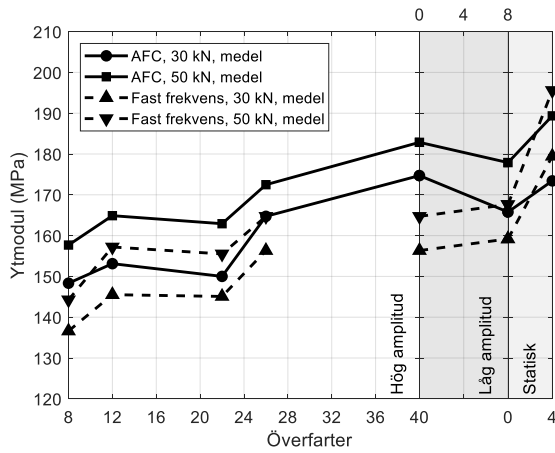
AFC						28 Hz					
Punkt	Utförare	Överfart	E <sub>v1</sub> (MPa)	E <sub>v2</sub> (MPa)	E <sub>v2</sub> /E <sub>v1</sub>	Punkt	Utförare	Överfart	E <sub>v1</sub> (MPa)	E <sub>v2</sub> (MPa)	E <sub>v2</sub> /E <sub>v1</sub>
A11	VTI	40+8+4	39	134	3,4	F11	VTI	26+8+4	26	107	4,1
A12	VTI	40+8+4	38	122	3,2	F12	VTI	26+8+4	32	115	3,6
A4	VTI	40+8+4	31	141	4,6	F4	VTI	26+8+4	37	127	3,5
A13	VTI	40+8+4	30	124	4,2	F13	VTI	26+8+4	33	153	4,6
A14	VTI	40+8+4	33	123	3,7	F8	VTI	26+8+4	35	153	4,3
			<b>34</b>	<b>129</b>	<b>3,82</b>				<b>33</b>	<b>131</b>	<b>4,02</b>

## 5.6 Fallviktsapparat

Detta avsnitt presenterar utvalda resultat från fallviktsapparat. Övriga resultat återfinns i Bilaga C. Ytmodulen från styvhetsmätningar med fallviktsapparat vid båda belastningsnivåerna visas i Figur 49 som ett medelvärde och i Figur 50 för respektive belastningsnivå. Båda figurerna redovisar medelvärden av alla belastningspunkter på respektive provyta. I överfarterna 8-26 gav AFC en högre uppmätt styvhet i ytan än packning vid 28 Hz. Efter 26 överfarter avbröts packning med fast frekvens på grund av dubbelhopp längs nästan hela testytan. Packning kunde dock fortsätta med AFC. Efter 40 överfarter bedömdes att ingen ytterligare packning var nödvändig. Efter detta packades båda testytorna i 8 överfarter med låg amplitud. För fast frekvens erhöles en i praktiken försumbar tillväxt med låg amplitud och för AFC minskade styvheten påtagligt. Statiska överfarter, däremot, gav en betydande tillväxt på båda testytorna. Efter alla överfarter hade ytan som packats med fast frekvens en något högre styvhet, dock inom den statistiska felmarginalen.

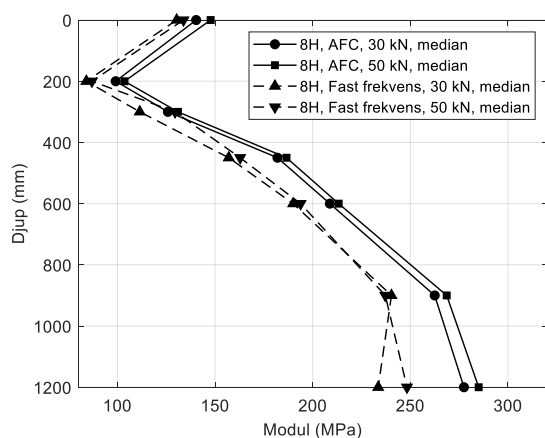


**Figur 49. Medelvärde av ytmodulen för båda belastningsnivåerna.**

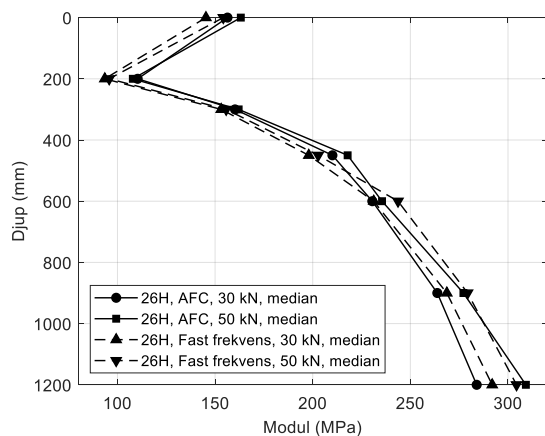


**Figur 50. Medelvärde av ytmodulen för respektive belastningsnivå.**

Medianvärden av de djupberoende modulerna som utvärderades från mätningar med fallviktsapparat visas i Figur 51 för 8 överfarter och i Figur 52 för 26 överfarter. Båda figurerna visar en något högre styvhet i ytan för AFC. På större djup var den uppmätta styvheten betydligt högre för AFC efter 8 överfarter men likvärdig efter 26 överfarter. Detta motsäger resultat från EMU-spolarna eftersom en större komprimering torde ge en högre styvhet.



**Figur 51. Djupberoende modul efter 8 överfarter.**



**Figur 52. Djupberoende modul efter 26 överfarter.**

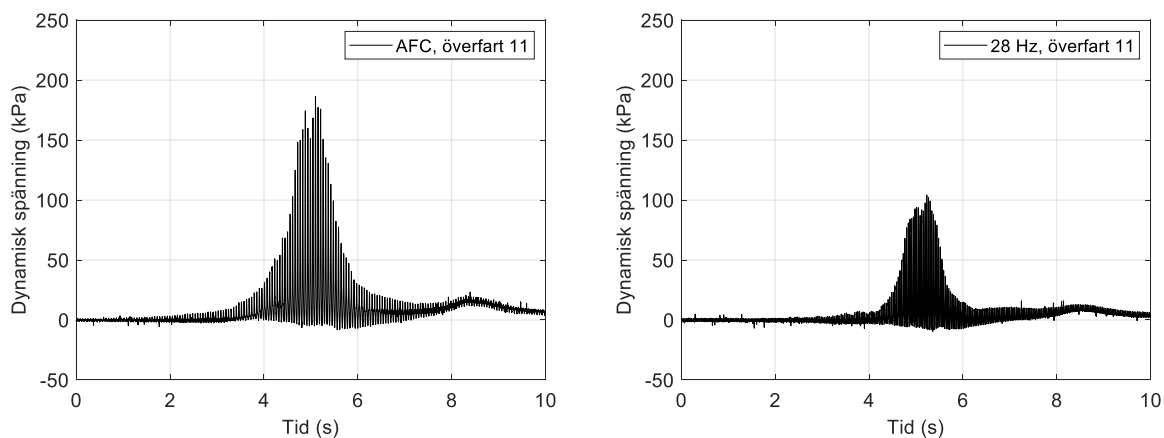
## 5.7 Spänningsmätningar

Detta avsnitt sammanfattar mätningarna med spänningsgivare. Alla mätningar redovisas i Bilaga D.

### 5.7.1 Packning lager 2

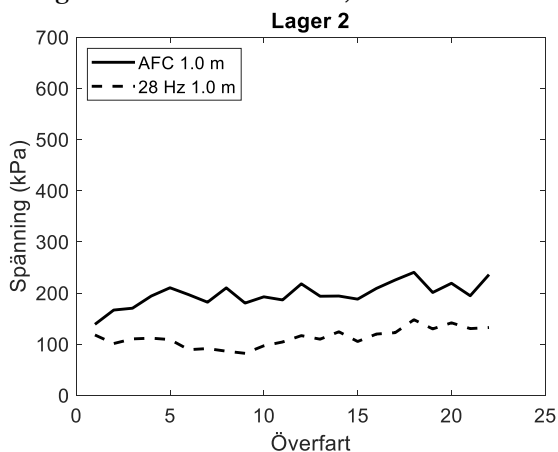
Ett exempel på vertikal spänningsmätning på 1 m djup vid packning av Lager 2 (överfart 11) visas i Figur 53. Utseendet av det dynamiska spänningsförloppet motsvarar det förväntade och det som återfinns i litteraturen (Rinehart & Mooney, 2009). Båda packningsmetoderna uppvisade det förväntade beteendet men spänningen var högre för AFC. Vid packning med 28 Hz var frekvensen högre, vilket gav upphov till fler dynamiska cykler.





**Figur 53. Vertikalspänning på 1 m djup vid överfart 11 på Lager 2.**

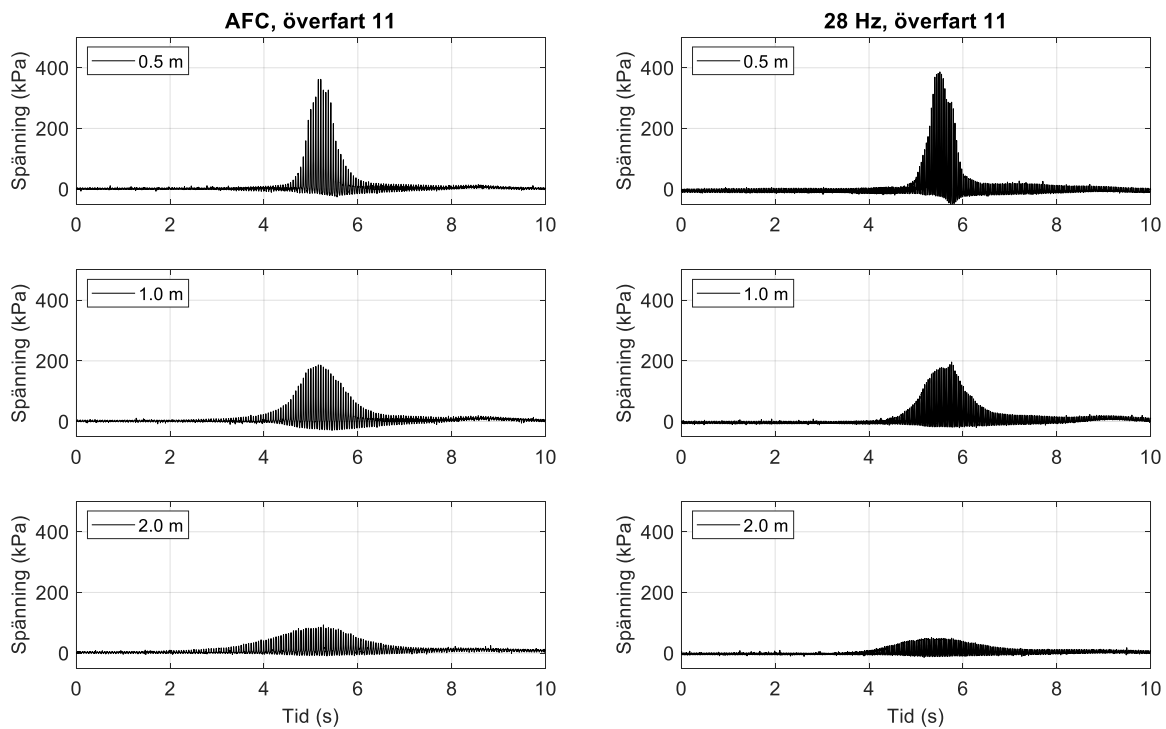
Figur 54 visar maximalvärdet av alla spänningsförlopp på 1 m djup vid packning av Lager 2. Frekvensstyrning gav upphov till en påtagligt högre spänning. Den dynamiska spänningen var 20-140 % högre för AFC än för 28 Hz, med ett medelvärde på 80 %.



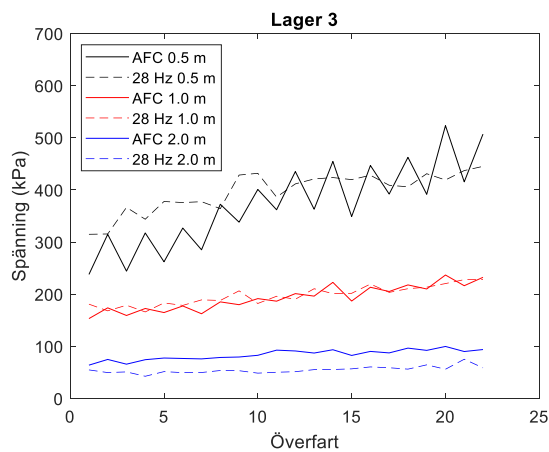
**Figur 54. Vertikalspänning på 1 m djup vid packning av Lager 2, alla överfarter.**

### 5.7.2 Packning lager 3

Vid packning på Lager mättes vertikalspänningen på 0,5 m, 1 m och 2 m djup. Resultat från överfart 11 visas i Figur 55. På 0,5 m och på 1 m djup blev spänningarna nu likvärdiga, medan högre nivåer erhöles för AFC på 2 m djup. Detsamma kan ses i resterande överfarter, vars maximalvärden redovisas i Figur 56.



Figur 55. Vertikalspänning på 0,5, 1 och 2 m djup vid överfart 11 på Lager 3.

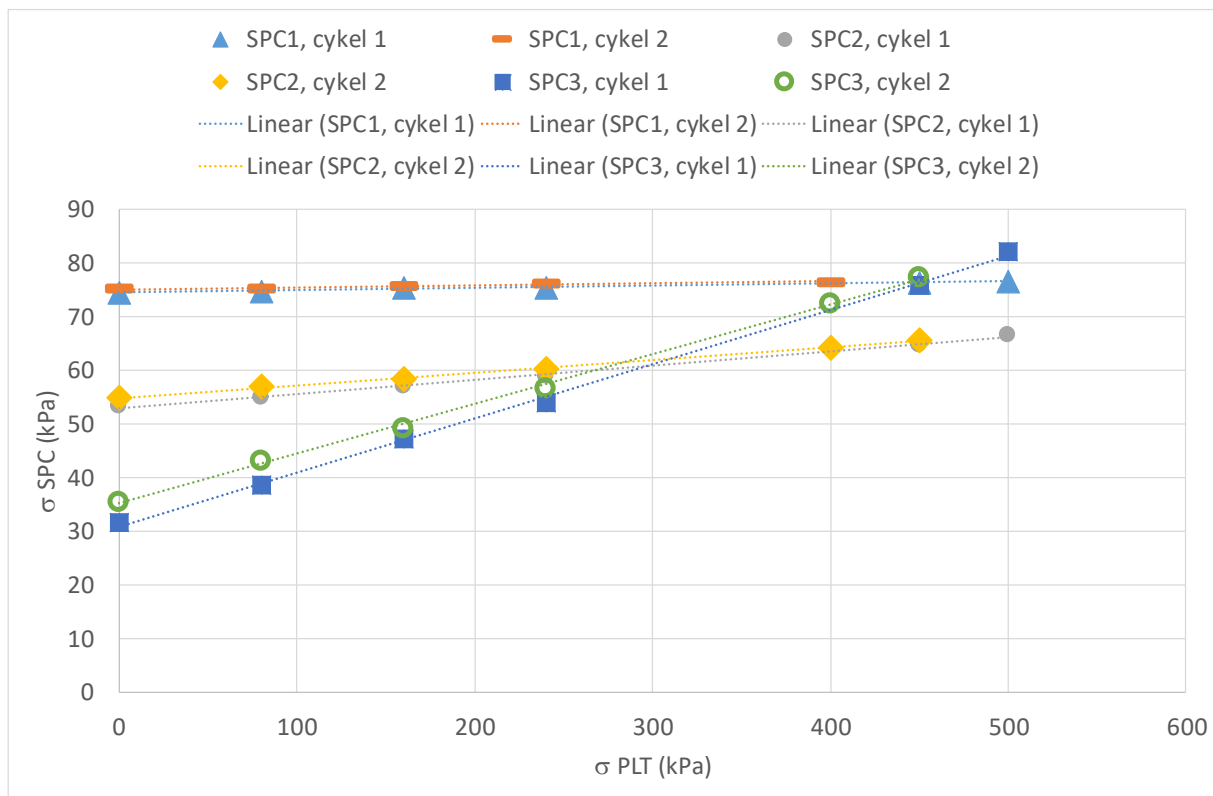


Figur 56. Vertikalspänning på 0,5, 1 och 2 m djup vid packning av Lager 3, alla överfarter.

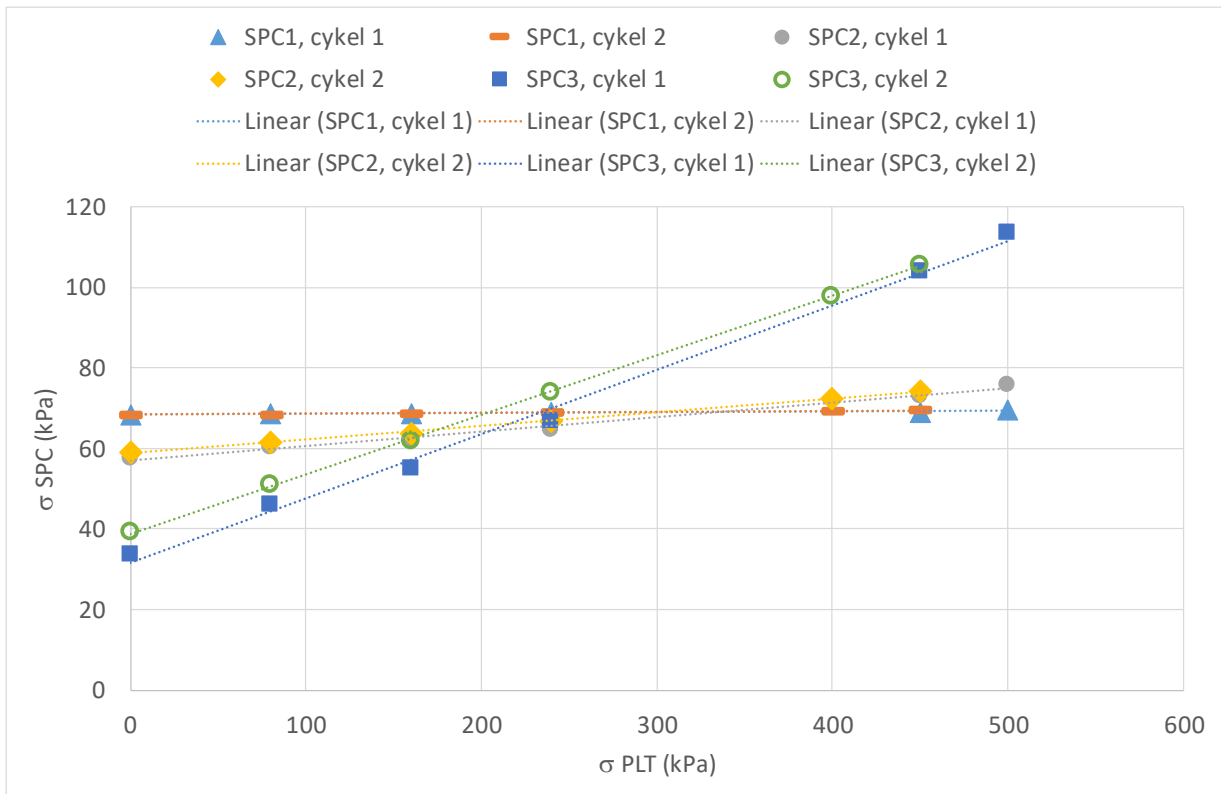
### 5.7.3 Spänning vid plattbelastning

Spänningar mättes direkt under plattan vid statisk plattbelastning på Lager 3 för att jämföra de tillskottsspänningar som erhöles från plattbelastningen med teoretiska tillskottsspänningar enligt Boussinesqs spänningsekvation för en cirkulär platta på elastisk halvrymd. I varje belastningssteg och i båda belastningscyklerna mättes vertikalspänningar på djupen 2 m (SPC1), 1 m (SPC2) och 0,5 m (SPC3). Spänningsgradienten (spänningsökning på djupet dividerad med spänningsökningen under plattan) erhöles med lutningen av en regressionsanalys för respektive belastningscykel. Figur 57 visar

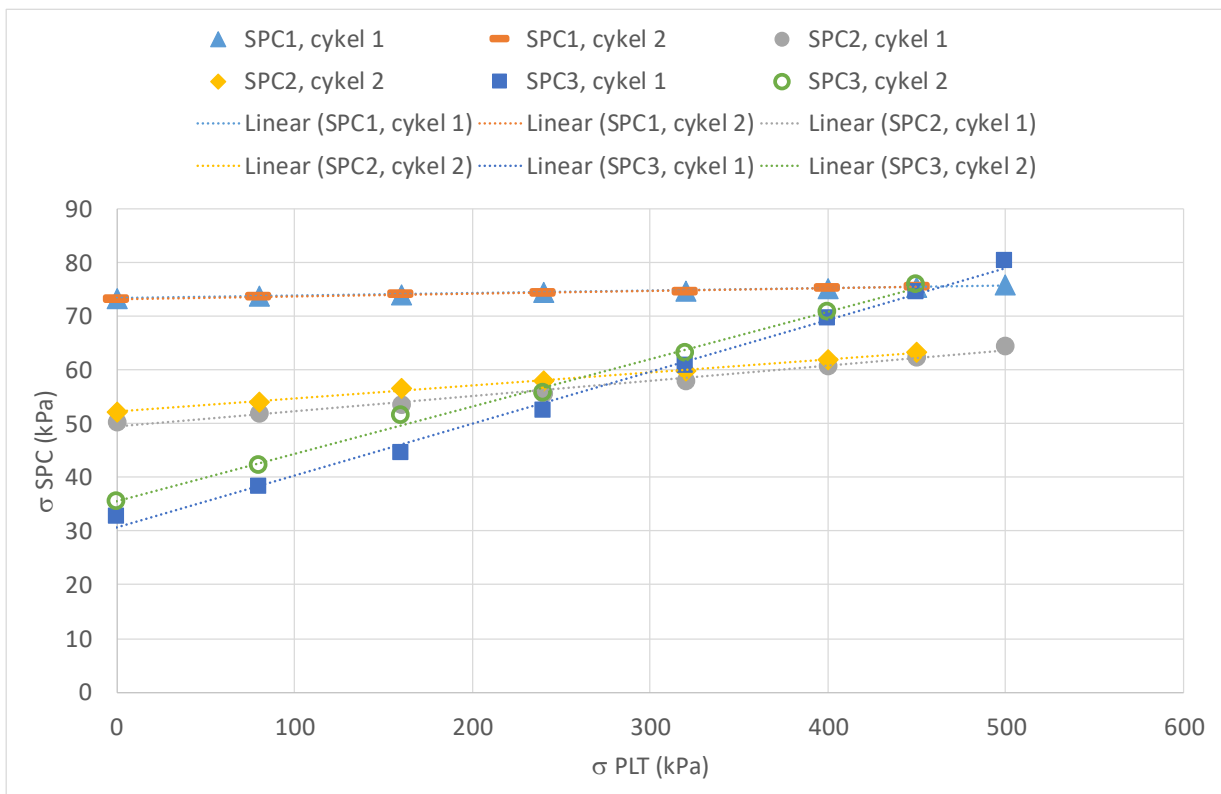
de uppmätta spänningarna vid plattbelastning på yta A efter 8 överfarter medan Figur 58 visar yta F. Mätningar från plattbelastning efter 22 överfarter visas i Figur 59 för yta A och Figur 60 för yta F.



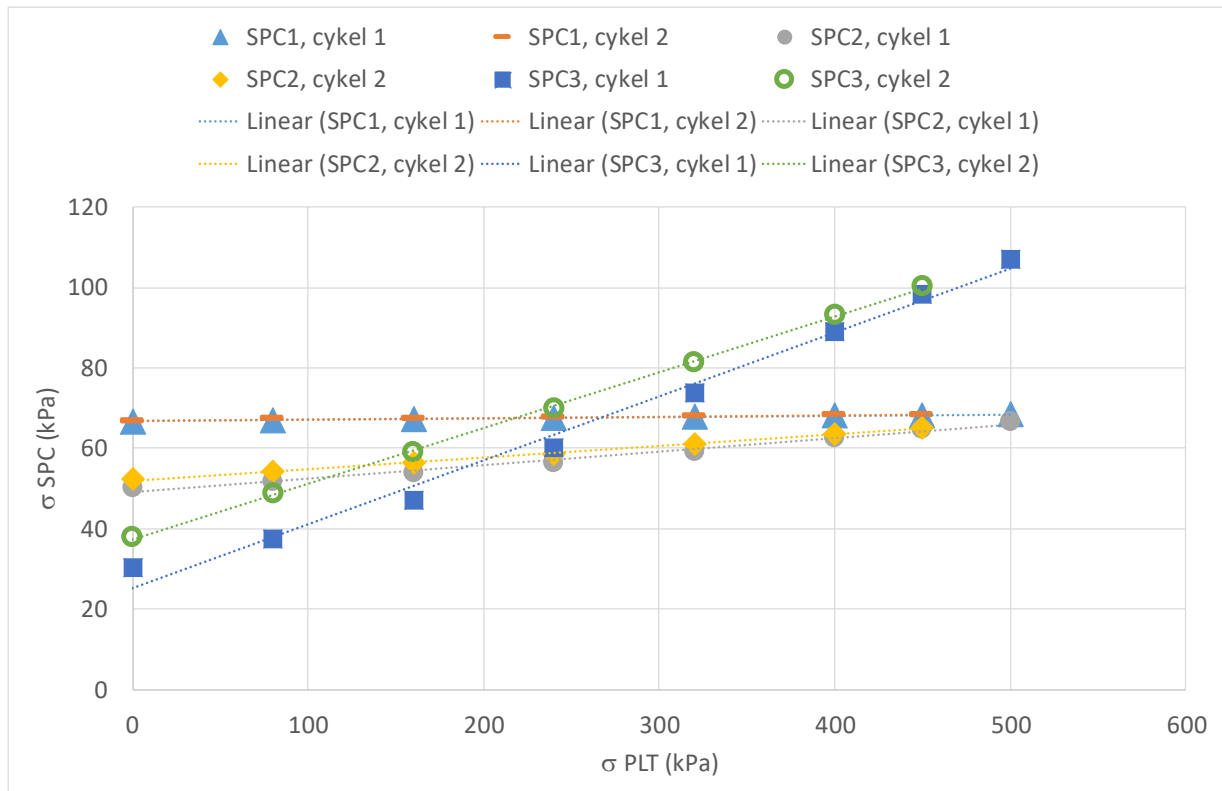
Figur 57. Spänningsmätning vid plattbelastning på yta A (AFC) efter 8 överfarter.



**Figur 58. Spänningsmätning vid plattbelastning på yta F (28 Hz) efter 8 överfarter.**



**Figur 59. Spänningsmätning vid plattbelastning på yta A (AFC) efter 22 överfarter.**



**Figur 60. Spänningsmätning vid plattbelastning på yta F (28 Hz) efter 22 överfarter.**

Alla uppmätta spänningsgradienter sammanställs i Tabell 8 tillsammans med de beräknade enligt Boussinesqs spänningsekvation. På 0,5 m djup var de beräknade spänningarna något lägre än de uppmätta medan de på 1 m djup ungefärligen motsvarade de uppmätta spänningarna. På 2 m djup däremot var de beräknade spänningarna betydligt högre än de uppmätta. På 0,5 m djup och 1 m djup gav den andra belastningscykeln högre spänningar än den första cykeln medan det motsatta förhållandet förelåg på 2 m djup. Boussinesqs spänningsekvation gav således en bra uppskattning på 1 m djup. På 0,5 m djup underskattade den spänningstillskottet mågot och på 2 m djup överskattades spänningarna kraftigt. Skillnader mellan beräknade och uppmätta spänningar kan förklaras med icke-linjäritet, anisotropi och inhomgenitet, som inte beaktas i den elastiska ekvationen. AFC gav uppmätta spänningsgradienter som mer liknade de beräknade än fast frekvens, vilket sannolikt beror på att materialet var mer homogent packat.

**Tabell 8. Jämförelse av uppmätta och beräknade spänningsgradienter.**

Djup (m)	Överfart	Frekvens	Cykel	Beräknad spänningsgradient	Uppmätt spänningsgradient	Beräknad/uppmätt
0,588	8	AFC	1	0,0903	0,1008	90%
0,588	8	AFC	2	0,0903	0,0929	97%
0,588	8	28 Hz	1	0,0903	0,1602	56%
0,588	8	28 Hz	2	0,0903	0,1475	61%
0,571	22	AFC	1	0,0953	0,0968	98%
0,571	22	AFC	2	0,0953	0,0883	108%
0,571	22	28 Hz	1	0,0953	0,1588	60%
0,571	22	28 Hz	2	0,0953	0,1385	69%
<b>Medel:</b>						<b>80%</b>
1,05	8	AFC	1	0,0298	0,0265	113%
1,05	8	AFC	2	0,0298	0,0235	127%
1,05	8	28 Hz	1	0,0298	0,0361	83%
1,05	8	28 Hz	2	0,0298	0,0337	89%
1,02	22	AFC	1	0,0316	0,0284	111%
1,02	22	AFC	2	0,0316	0,0244	129%
1,02	22	28 Hz	1	0,0316	0,0336	94%
1,02	22	28 Hz	2	0,0316	0,0288	110%
<b>Medel:</b>						<b>107%</b>
1,99	8	AFC	1	0,0085	0,0042	201%
1,99	8	AFC	2	0,0085	0,0036	235%
1,99	8	28 Hz	1	0,0085	0,0021	403%
1,99	8	28 Hz	2	0,0085	0,0025	338%
1,96	22	AFC	1	0,0087	0,0047	186%
1,96	22	AFC	2	0,0087	0,0050	174%
1,96	22	28 Hz	1	0,0087	0,0034	257%
1,96	22	28 Hz	2	0,0087	0,0034	257%
<b>Medel:</b>						<b>256%</b>

## 6 Diskussion

### 6.1 Integrerade vältmätningar

De dynamiska aspekterna av att använda AFC diskuterades i Wersäll (2018). Resultaten från de integrerade vältmätningarna i Etapp 2 bekräftar resultaten från Etapp 1, dvs. att användande av AFC får följande positiva effekter:

- Frekvensen sjunker påtagligt, vilket ger lägre energi- och bränsleförbrukning samt mindre maskinslitage.
- Förskjutningsamplituden ökar påtagligt tack vare förbättrad interaktion mellan valsen och jorden vid resonans. Etapp 2 visar att detta gäller även vid låg amplitud.
- Kontaktkraften mellan valsen och jorden ökar.

Packmätarvärdena visar att, liksom i Etapp 1, avstannar den mesta av styvhetstillväxten efter ca 18-22 överfarter vilket antyder att den uppnådda packningen är nära materialets maximala packningspotential. Däremot erhöles en betydande ökning i uppmätt styvhet på Lager 3 vid packning med AFC även efter detta ända upp till 40 överfarter. Dock krävdes många överfarter för att få en signifikant tillväxt.

#### 6.1.1 Jämförelse med Etapp 1

Frekvenser, amplituder och kontaktkrafter liknar de som uppmättes i Etapp 1. Etapp 1 och Etapp 2 är likvärdiga på det sättet att samma vält och samma materialfraktion användes. Dock skiljer sig försöken i banktjocklek och det faktum att banken i Etapp 2 packades över sin hela yta. Jämförelser av packmätarvärden bör därför göras med försiktighet. En jämförelse av Lager 2 i Etapp 2 och Etapp 1 visar att dessa packmätarvärden är mycket likvärdiga. Lager 3, däremot, visar en högre uppmätt styvhet än Etapp 1, trots att övriga styvhetsmätningar (plattbelastningsförsök, fallviktsapparat) visar motsatsen, vilket sannolikt kan förklaras av att packmätarvärdena i Etapp 1 påverkades av den lösa terrassen då bankhöjden var betydligt lägre.

### 6.2 Komprimering/sättning

Sättningarna på Lager 2 var identiska för de båda packningsmetoderna, dock med mycket stor spridning. Detta trots att EMU-spolarna uppmätte påtagliga skillnader. Vidare avstannade inte sättningsförloppet utan en betydande fortsatt deformation erhöles, medan packmätarvärdena visade att maximal packning nära nog hade uppnåtts. Detta antyder att andra mekanismer kan ligga bakom en stor del av sättningarna. Sådana mekanismer kan innefatta sidoförflyttning och nedbrytning. Ytterligare en osäkerhet orsakas av att fixpunkten var belägen på en stolpe som var nedslagen endast 0,5 m i morän, alltmedan byggverksamhet pågick intill. Det finns därför risk för att fixpunkten har förflyttats. Dock erhöles liknande resultat i Etapp 1, som då antogs bero på sättningar i terrassnivå (endast ett lager) i kombination med sidoförflyttning (packning endast i enskilda vältstråk).

På Lager 3 erhöles betydligt större sättningar med 28 Hz än med AFC. Under uppehållet efter 22 överfarter skedde en påtaglig sättning som var mycket större på ytan som packats med fast frekvens. Detta resultat är svårtolkat. Mellan överfart 34 och överfart 40 erhöles en negativ sättning på ytan som packades med AFC. Bortsett från detta kunde ingen avtagande sättning observeras heller på detta lager, trots att packmätarvärden visade påtaglig avtagande packning. Sammantaget bedöms sättningsmätningarna mycket osäkra för att bedöma packningsgraden då de visar motsägelsefulla resultat som inte verkar direkt kopplade till packningsförloppet.

EMU-spolarna i Lager 2 gav en större total komprimering för AFC än för 28 Hz, vilket överensstämmer med tidigare resultat. Dock erhöles betydande skillnader från tidigare försök. Skillnaden i ytan var inte så stor som förväntat. Vid användande av AFC optimeras interaktionen mellan välten och jorden som vid alla tidigare försök har gett en mycket bra packning i ytan medan den fasta, höga, frekvensen normalt ger en uppluckring. I dessa mätningar erhöles en måttlig packning för båda metoderna. Dock ses en negativ komprimering för AFC i de sista överfarterna på Lager 2, vilket är en stark antydning att den översta spolen har förflyttats, och att resultaten ej är tillförlitliga. En annan skillnad mot tidigare försök är den större komprimering som erhöles för 28 Hz på cirka 0,5 m djup. En något bättre djupverkan har observerats i alla tidigare mätningar, men mycket måttlig och på något större djup.

EMU-spolarna i Lager 3 var placerade på ca 0,6-1,1 m djup. Här erhöles en betydligt större komprimering för 28 Hz än för AFC. Komprimeringen för 28 Hz var ungefär som förväntat medan den för AFC var mycket lägre än tidigare observerats. Liksom i Lager 2 erhöles även negativ komprimering under ytan som packades med AFC, vilket antyder att spolar har förflyttats eller roterat. Om spolar förskjuts i sidled eller utsätts för en rotation påverkas induktionen mellan spolarna och således avståndsmätningen påtagligt.

Komprimeringsprofilerna visar stora skillnader mellan AFC och 28 Hz. Övriga skillnader mellan mätsektioner i samma bankdel, där förutsättningarna ska vara desamma. Detta gäller för de båda packningsmetoderna. Dessutom är ingen komprimeringsprofil lik de som uppmätts i tidigare försök. Kombinationen av ovanstående observationer minskar pålitligheten av resultaten från sättnings- och kompressionsmätningar. Orsaken kan vara mättekniska problem, såsom förflyttning eller rotation av spolar eller en konsekvens av att EMU-spolarna installeras i ett finare material en uppschaktad del av banken, som sedan återfylls. Ytterligare en orsak till ovanstående resultat kan vara egenskaperna av banken eller bankmaterialet eller varierande förutsättningar längs med banken.

### 6.3 Styvhet

Styvhetsmätningarna med olika mätmetoder visar motsägelsefulla resultat. Packmätarvärdena beter sig som förväntat med kontinuerligt ökande värden fram till ca 18 överfarter och därefter endast måttlig ökning. Storleksordningen av värdena på Lager 2 motsvarar de som uppmättes i Etapp 1, medan de är högre på Lager 3. Övriga styvhetsmätningar visar dock betydligt lägre värden än i Etapp 1.

Statisk plattbelastning gav  $E_{v2}$ -moduler på ca 90-100 MPa på båda lagren, oavsett antal överfarter eller packningsmetod, vilket är betydligt lägre än förväntat under dessa förutsättningar. Det är anmärkningsvärt att styvheten inte ökade med antalet överfarter, vilket antyder att högre styvhet ej kunde uppnås i detta material under dessa förutsättningar. Orsaken till detta kan innefatta t.ex. materialegenskaper, såsom glimmerhalt. Efter att ha avslutat packningen med 8 överfarter med låg amplitud och 4 statiska överfarter erhöles en något högre styvhet, ca 130 MPa, som dock även det är betydligt lägre än förväntat.

Även fallviktsapparat gav lägre styvhet än i Etapp 1, dock ej så stor skillnad som statisk plattbelastning gav. Den uppmätta ytmodulen (Figur 49) ökade med ökande antal överfarter, till skillnad från  $E_{v2}$ -modulen från plattbelastningsförsök. Ett undantag var mellan 12 och 22 överfarter där ytmodulen minskade. Det kan bero på att fallviktsförsöken efter 22 överfarter utfördes efter det fyra veckor långa uppehållet. Efter 26 överfarter, då packning vid fast frekvens avbröts p.g.a. dubbelhopp, fortsatte packning med AFC upp till 40 överfarter, vilket var möjligt tack vare den lägre frekvensen. Ytmodulen visar att ytterligare packning erhöles vid dessa överfarter och att AFC därför kan möjliggöra mer packning än vad som tilläts vid konventionellt förfarande. De 8 statiska överfarterna gav inte någon styvhetstillväxt och på provytan som packades med AFC minskade styvheten. De 4 statiska



överfarterna ökade dock ytmodulen påtagligt över hela banken. Styvheten blev generellt högre med AFC, förutom efter avslutad packning då de två metoderna gav liknande resultat.

Alla styvhetsmätningar bör tolkas med försiktighet då resultaten var motsägelsefulla.

#### **6.4 Frekvensstyrning**

Resultaten från denna etapp bekräftar i vissa fall tidigare mätningar, medan andra resultat motsäger de slutsatser som dragits i tidigare försök. Men tanke på de många motsägelsefulla resultaten i Etapp 2 i kombination med entydigheten i tidigare försök bör vissa resultat dock tolkas med försiktighet.

Mätningarna antyder att de dynamiska spänningarna blir högre med AFC, särskilt på större djup. Att fast frekvens ger en något bättre packning på större djup kan förklaras med att antalet cykler är större. Styvhets- och deformationsmätningar var svårtolkade i denna etapp, men tydligt är att AFC tillåter fler överfarter med hög amplitud och att dessa ytterligare överfarter ger en fortsatt packning, som kan vara till fördel då höga krav finns på packningsgraden. Liksom i tidigare försök minskade bränsleförbrukning, maskinslitage och miljöpåverkan.

#### **6.5 Lagertjocklek och överfarter**

Liksom i tidigare försök antyder resultaten, om än osäkra, att AFC är mest effektivt i den övre delen av lagret medan fast (hög) frekvens är mer effektivt i den nedre delen av skiktet. Dock ger båda metoderna betydande packning i hela lagret då tjockleken är 1 m och linjelasten är 65 kN/m. Deformationer uppmätta med EMU-spolar visar att ingen packning sker i underliggande lager. Det betyder att en uppluckrad yta inte erhåller fullgod packning eftersom den inte påverkas av packningen av ovanliggande lager. Då hög frekvens används fås en uppluckring i ytan av varje lager som därigenom skapar en inbyggd inhomogenitet i banken och kan ha negativa konsekvenser under bankens driftsskede. Om en hög frekvens bör därför varje lager packas i statiska överfarter efter avslutad vibrerande packning.

Efter sammanvägning av alla mätresultat görs bedömningen att 18-22 överfarter ger ett resultat som är nära den maximala packningskapaciteten. Det är möjligt att erhålla ett mer välpackat material men det krävs ett stort antal överfarter för att ge en betydande förbättring. Med konventionell packning fås dubbelhopp då styvheten är hög, vilket i dessa försök inträffade efter ca 22 överfarter och vilket innebär att packning vid hög amplitud måste avbrytas. Dubbelhopp innebär inte att maximal packningsgrad har uppnåtts utan endast att maximal packning under rådande förutsättningar har erhållits. Med AFC kan dock en högre packningsgrad uppnås eftersom dubbelhopp inte inträffar tack vare lägre frekvens. Resultaten visar även att packning med låg amplitud inte ger någon nämnvärd effekt men att statiska överfarter ger en mycket stor effekt då banken har packats med fast frekvens eftersom de statiska överfarterna packar den uppluckrade ytan.

#### **6.6 Tillförlitlighet**

I denna etapp erhöles vissa resultat som var svårtolkade eller uppvisade motsägelsefulla tendenser. Dessa kan sammanfattas enligt följande:

- Statiska plattbelastningsförsök gav mycket låga värden som inte ökade vid ett ökande packningsarbete trots att andra mätningar visade att bankens egenskaper förbättrades. Statiska överfarter på överytan förbättrade dock värdena något.
- Det var stor skillnad mellan styvhet uppmätt med statisk plattbelastning och tung fallviktsapparat trots att dessa mätmetoder brukar ge likvärdiga resultat.

- Både sättningar och komprimering uppmätt med EMU-spolar var betydligt lägre för den bankdel som packades med AFC än som var förväntat och som har observerats i tidigare försök.
- Skillnaden mellan AFC och fast frekvens i deformationsmätningarna i den ytliga delen av Lager 2 var mindre än förväntat. Endast något större komprimering uppmättes med AFC medan tidigare försök har visat en påtaglig skillnad p.g.a. uppluckring vid hög frekvens.
- EMU-spolarerna visade stora skillnader i beteende mellan AFC och fast frekvens men också mellan de två mätstaplarna i respektive bankdel, där liknande resultat hade förväntats på grund av samma förutsättningar.
- I Lager 2 visade spänningsmätningarna att den dynamiska vertikalspänningen på 1 m djup var betydligt högre för AFC än för fast frekvens. Vid packning av Lager 3 var spänningarna på 0,5 m och 1 m djup likvärdiga för de två packningsmetoderna. På 2 m djup var dock spänningen högre vid packning med AFC.

Ett antal möjliga orsaker till ovanstående resultat kan identifieras:

- Det är uppenbart att det levererade krossmaterialet inte uppfyllde tillräcklig kvalitet. Siktcurvor visar att kornfördelningen i vissa fall ligger utanför begränsningskurvorna för DCH.15. Proverna är tagna mitt i lagren och är således inte påverkade av krossning från packning. Framförallt är bergmaterialets kvalitet en möjlig orsak. Det kunde tydligt observeras att materialet mycket lätt krossades till finmaterial vid packning (Figur 61). Efter avslutad packning bestod hela den packade ytan av endast finmaterial ner till några cm djup. Detta kan bero på hög glimmerhalt som tydligt kunde observeras (Figur 62). De glimmeranalyser som utfördes visade på måttliga nivåer (ca 20-30 %) men endast ett fåtal prover togs och det finns en möjlighet att glimmernivåerna kan ha varit högre i andra delar av banken. Det finfördelade materialet i ytan är en sannolik orsak till låga  $E_{v2}$ -värden, alternativt något annat problem med materialet som innebär att högre styvhet ej kunde uppnås i ytan. Att högre moduler erhöles från fallviktsapparat kan möjligen förklaras med att den dynamiska belastningen påverkas mindre av det ytligaste materialet.
- Det finns även en möjlighet till problem med utförandet av statisk plattbelastning. Eftersom två olika utförare användes och försöken gav liknande resultat är dock sannolikheten för detta låg.
- En stor källa till osäkerhet vid mätningar i Lager 3 är de problem som uppstod i samband med utfyllnad av lagret, vilka har beskrivits ovan. Den stora mängden material som förflyttades i flera omgångar orsakade en påtaglig materialseparation. Eftersom utfyllnaden inte var konsekvent längs banken är det även sannolikt att inhomogenitet uppstod. Det kunde även konstateras att det levererade materialets fuktinnehåll inte var konstant mellan olika lass utifrån att observera dess färg, vilket således orsakade inhomogenitet i vattenkvoten. Utfyllnaden orsakade även en viss ojämnheter i byggtrafik i olika delar av banken som kan ha haft stor inverkan på resultaten eftersom en ojämnt fördelad initial packning erhöles. Den stora mängden material som förflyttades längs med banken kan även ha förskjutit eller roterat EMU-spolarer och spänningsgivare. De påtagliga skillnaderna mellan EMU-spolarernas olika mätstaplar styrker tesen att egenskaperna varierade betydligt längs med banken.

- EMU-spolar och spänningsgivare kan även ha förflyttats eller roterat vid packning, vilket kan ge osäkra mätningar. Särskilt känsliga för detta är EMU-spolar. Eftersom EMU-spolar och spänningsgivare är omgivna av finmaterial för att få god kontakt med det övriga bankmaterialet finns inhomogeniteter runt mätsektionerna som kan ge ojämna deformationer och således orsaka förflyttning.



**Figur 61. Finmaterial i ytan efter packning.**



**Figur 62. Levererat krossmaterial med hög glimmerhalt.**

Utfyllnaden, tillsammans med materialets låga kvalitet och varierande egenskaper bedöms vara de mest sannolika orsakerna till motsägelsefulla resultat. Förflyttning eller rotation av EMU-spolar bedöms även som sannolikt. Utfyllnaden gjorde att resultaten från Lager 3 är mycket osäkra och det är även på detta lager som störst andel motsägelsefulla resultat erhöles. Dock finns svårtolkade resultat även på Lager 2. Därför bör viss försiktighet iakttagas vid slutsatser baserade på detta fältförsök. Den

stora mängden mätresultat ger dock entydighet i vissa aspekter, särskilt i kombination med tidigare mätningar. Sammantaget finns tillräckligt med underlag för att dra väl underbyggda slutsatser.

## 7 Slutsatser

I denna etapp anlades en 2,5 m hög provbank som packades både med automatisk frekvensstyrning och konventionellt med en fast frekvens. På grund av problem under försöket, vilket har diskuterats ovan, erhöles vissa motsägelsefulla resultat. Många resultat var dock entydiga, särskilt kombination med resultatet från Etapp 1, och kan användas som underlag vid packning av bankar för höghastighetsjärnväg. Dessa resultat ledde till följande slutsatser:

- Tidigare slutsatser om fördelar med automatisk frekvensstyrning bekräftades i dessa försök:
  - Förskjutningsamplituden ökar påtagligt tack vare förbättrad interaktion mellan valsen och jorden vid resonans. Etapp 2 visar att detta gäller även vid låg amplitud.
  - Kontaktkraften mellan valsen och jorden ökar tack vare den förbättrade interaktionen..
  - Dubbelhopp undviks.
  - Frekvensen sjunker påtagligt, vilket ger lägre energi- och bränsleförbrukning samt mindre maskinslitage.
- Vid låg amplitud ökar resonansfrekvensen.
- Automatisk frekvensstyrning ökar de dynamiska spänningarna i banken. Den något ökande djupverkan med fast (hög) frekvens som har observerats i flertalet försök antas bero på ett större antal belastningscykler.
- Packning avtog påtagligt efter ca 18-22 överfarter men fortsatte även upp till 40 överfarter. Det krävs därför ett stort antal överfarter för att uppnå maximal packning.
- Vid konventionell packning med fast frekvens kan maximal packningsgrad inte uppnås eftersom dubbelhopp gör att packningen måste avbrytas. Med frekvensstyrning kan en högre packningsgrad uppnås.
- Sättningarna på överytan kan vara större än komprimeringen av bankmaterialet och att utvärdera packningsförloppet utifrån sättningsmätningar bedöms ej vara tillförlitligt vid ett stort antal överfarter eftersom aspekter såsom sidoförskjutning och sättning av underliggande lager får större relativ påverkan då packningen är måttlig.
- Packning av ovanliggande lager ger inte någon packning i den uppluckrade zon i ytan som erhålls vid packning med fast frekvens. Vid konventionell packning bör därför varje lager packas med avslutande statiska överfarter före utläggning av nästa lager för att undvika inhomogeniteter.
- Boussinesqs elastiska spänningsekvation kan någorlunda uppskatta spänningarna i banken på måttliga djup vid plattbelastning men överskattar spänningar på större djup kraftigt.
- En stor del av de motsägelsefulla resultaten antas bero på kvalitet av bankmaterialet och utfyllnadsproceduren, vilket antyder att dessa har aspekter som har stor betydelse för bankens egenskaper.

## Referenser

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.

Rinehart, R.V. & Mooney, M.A. (2009) Measurement of roller compactor induced triaxial soil stresses and strains. *Geotechnical Testing Journal*, 32(4), 347-357.

Svensk Byggtjänst (2017), *AMA Anläggning 17. Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten.*

Trafikverket (2012), TRVMB 112, *Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat*, TRV 2012:050.

Trafikverket (2014), *Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning*, TDOK 2014:0141.

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.

Wersäll, C. (2018) Packningsförsök vid Kardonbanan – Resultat från Etapp 1, slutrapport, KTH.

Wersäll, C., Nordfelt, I. & Larsson, S. (2019a). Roller compaction of rock-fill with automatic frequency control. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, In press.

Wersäll, C., Åkesson, F. & Persson, A. (2019b). Dynamic roller characteristics and CCC using automatic frequency control, IICTG2019, Beijing, China, 16-17 April 2019.

## **Bilagor**

Bilaga A: Integrerade välmätningar

Bilaga B: EMU-spolar

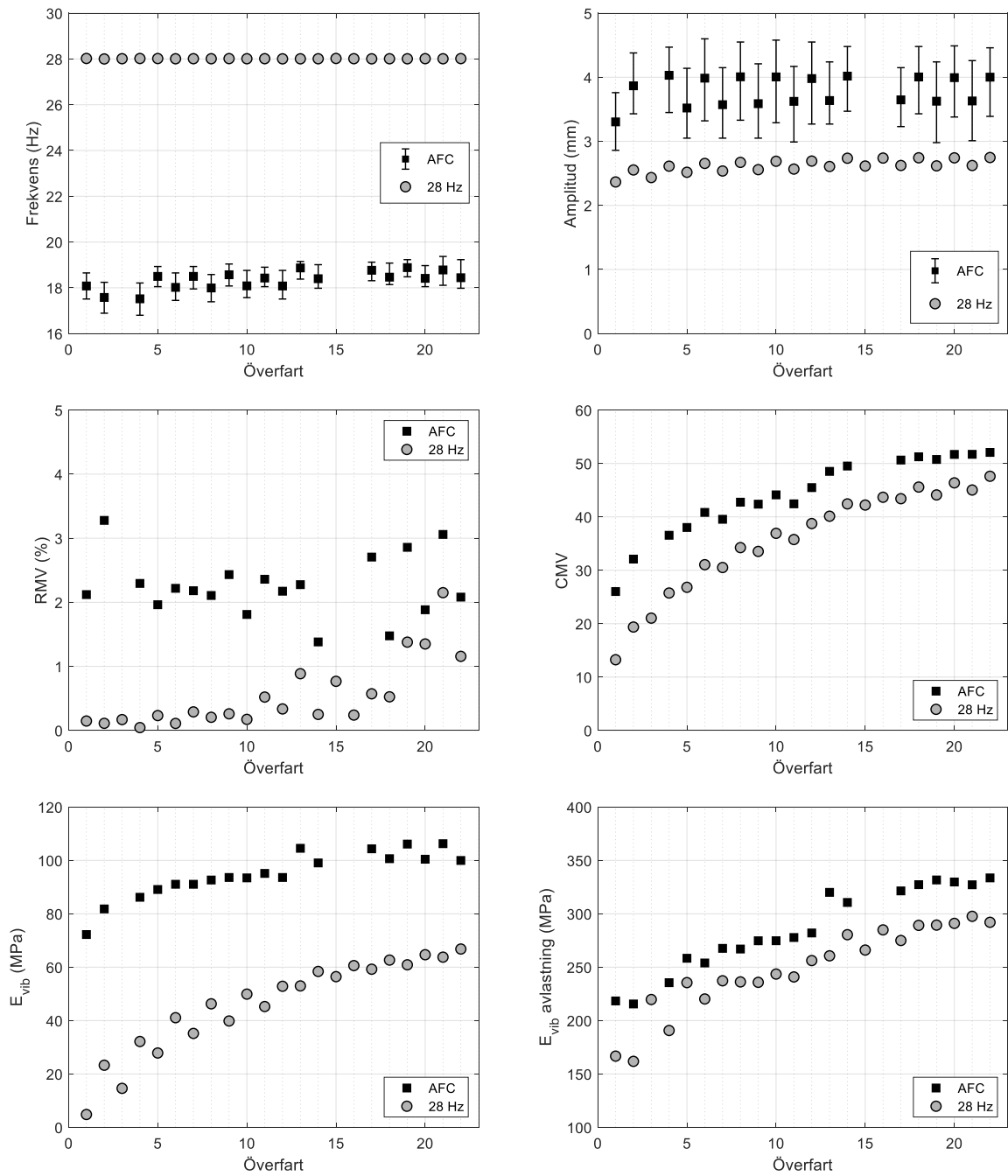
Bilaga C: Fallviktsapparat

Bilaga D: Spänningsgivare

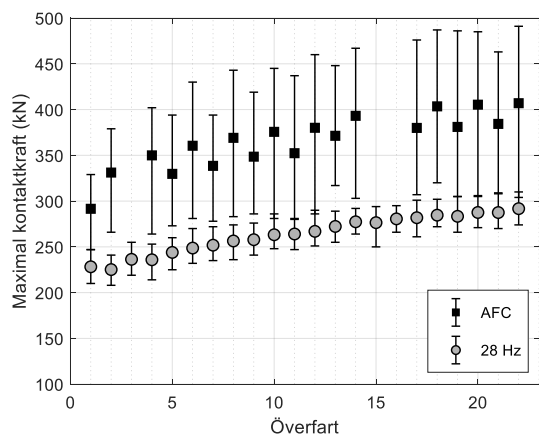
# Bilaga A: Integrerade vältmätningar

## Lager 2

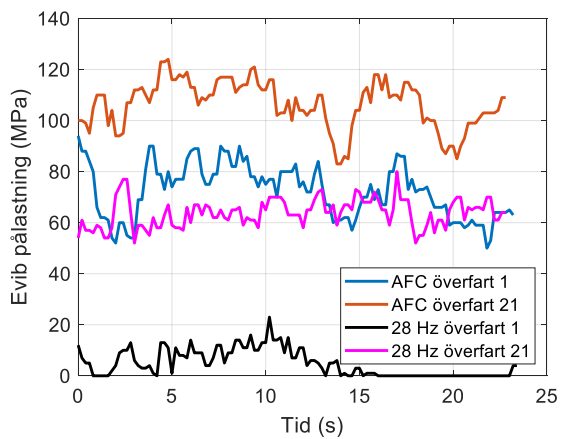
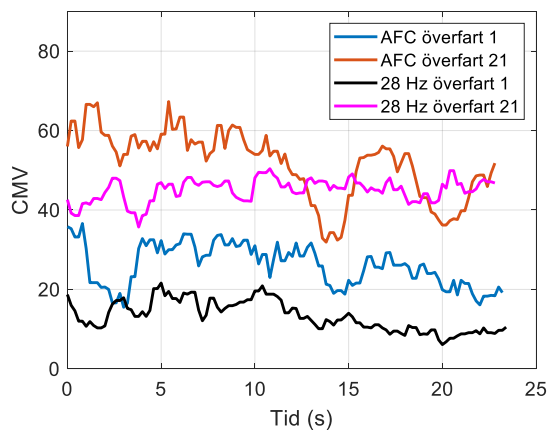
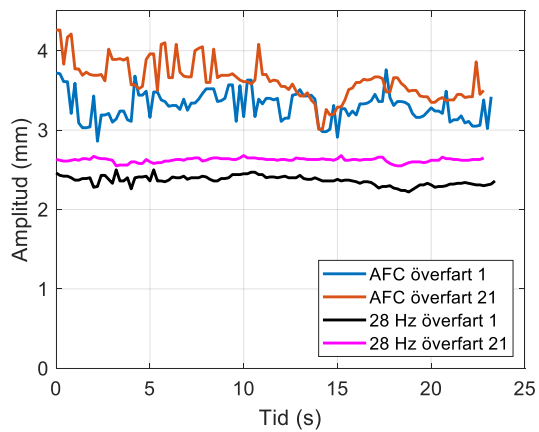
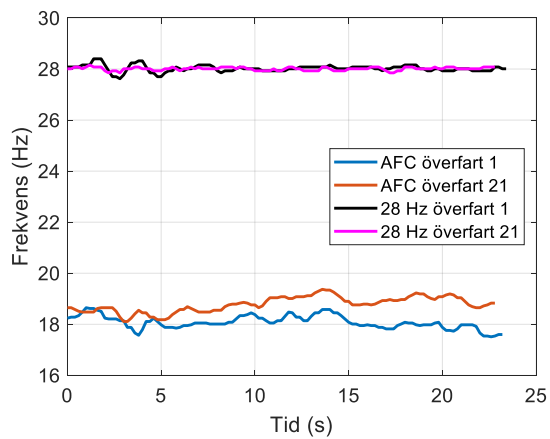
### Medel

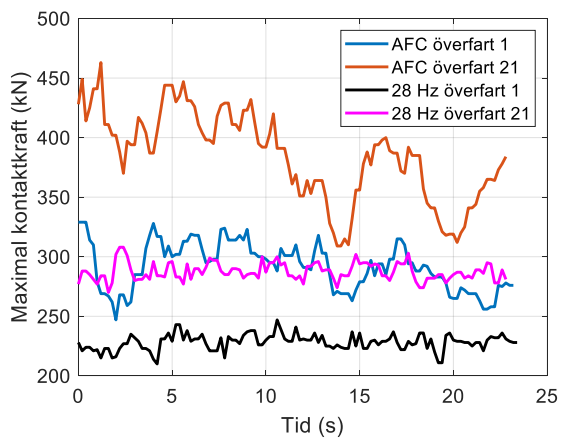
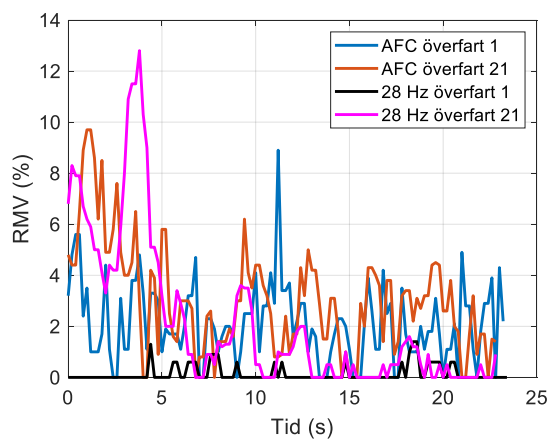
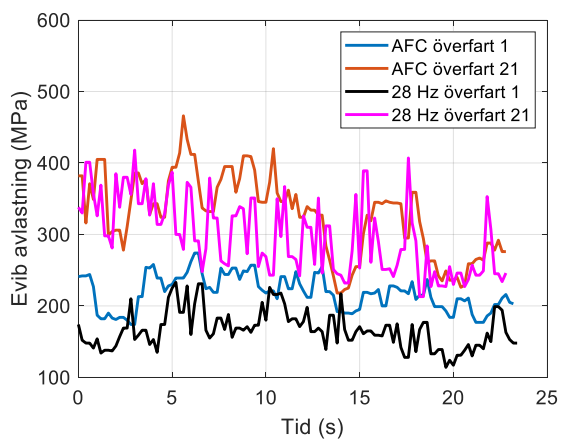






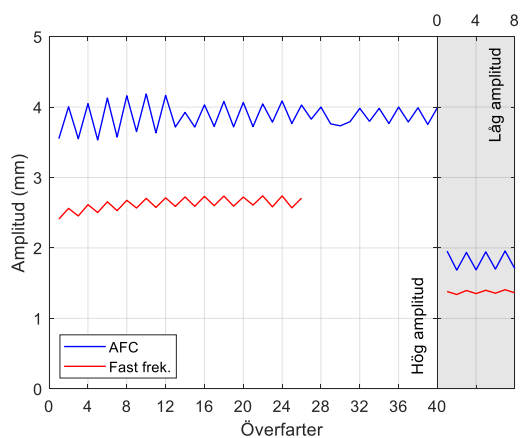
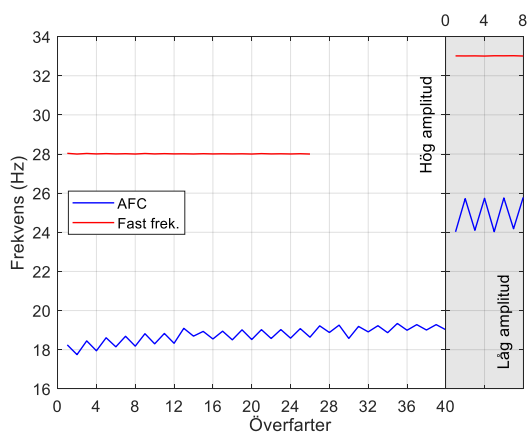
### Individuella överfarter

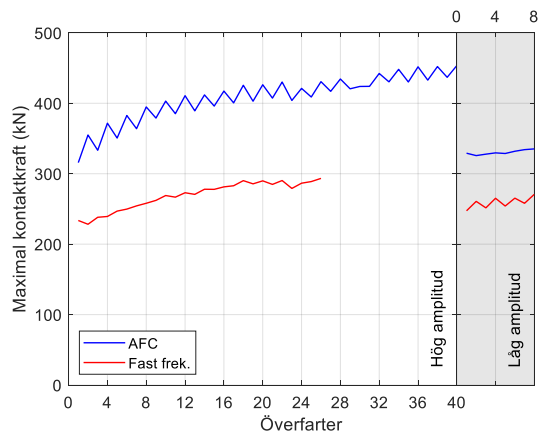
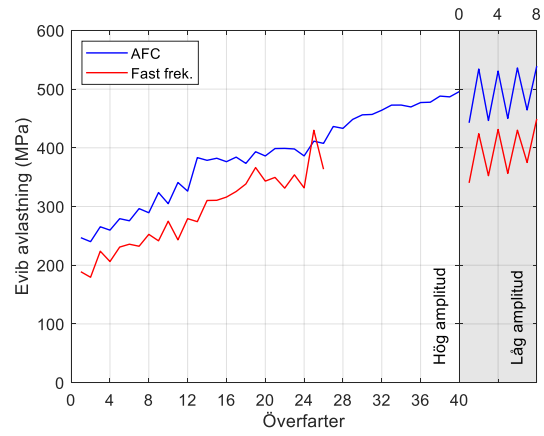
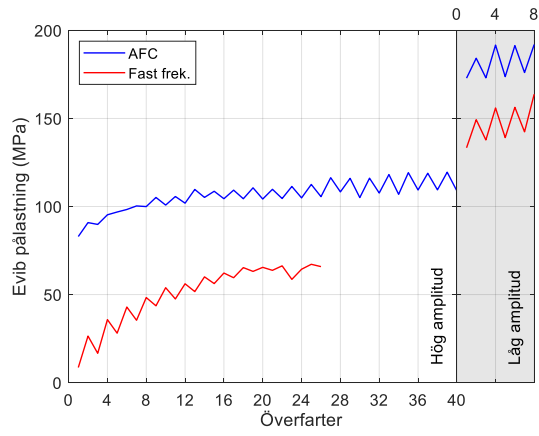
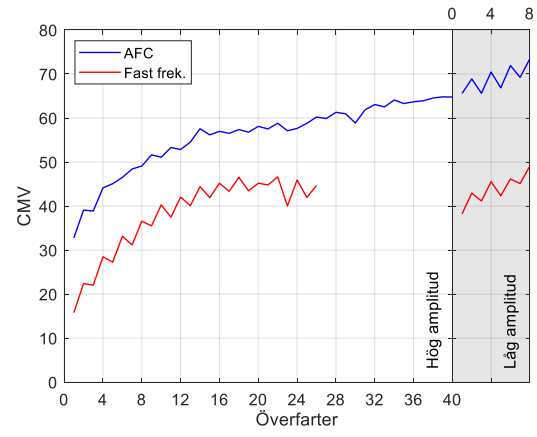
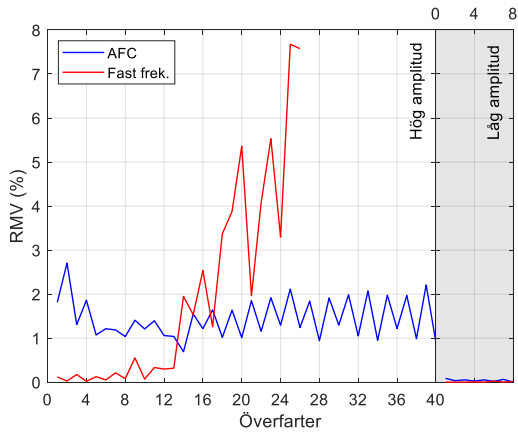




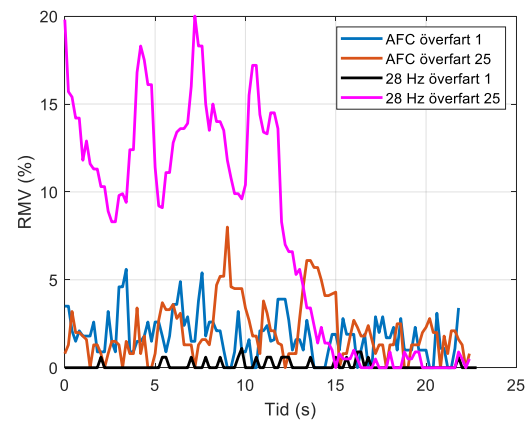
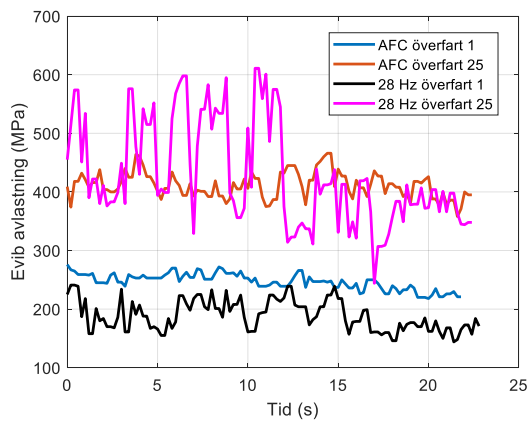
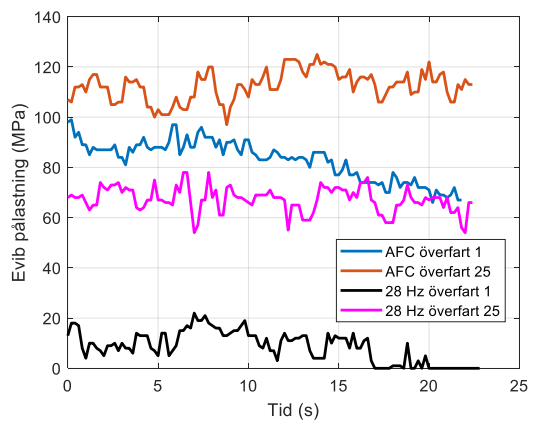
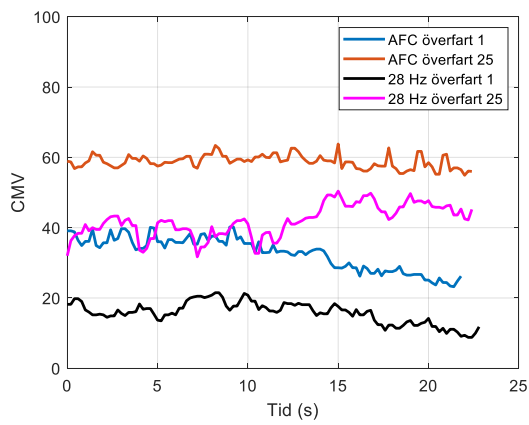
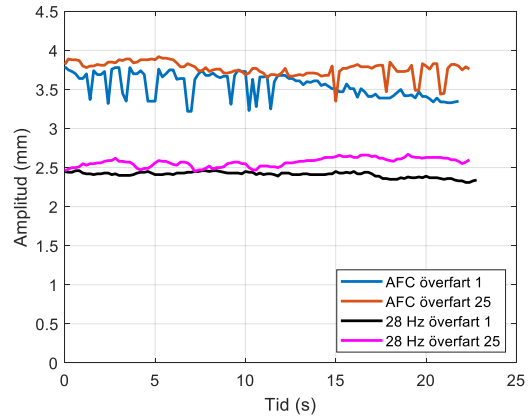
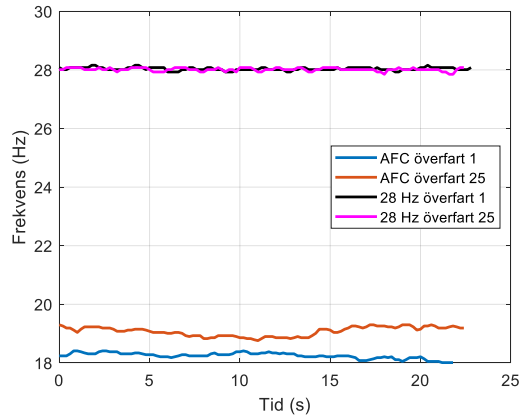
### Lager 3

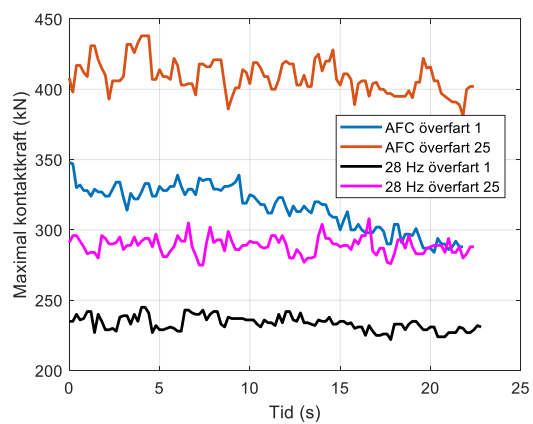
#### Medel





## Individuella överfarter

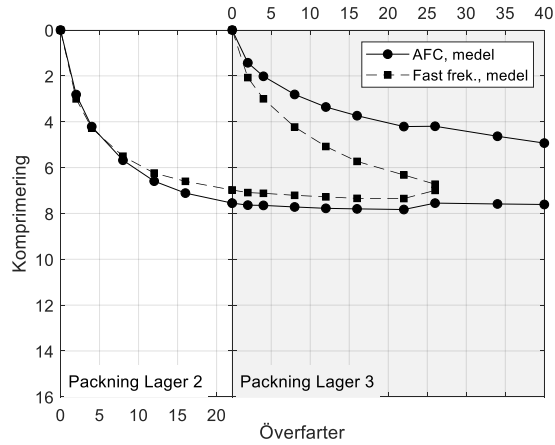




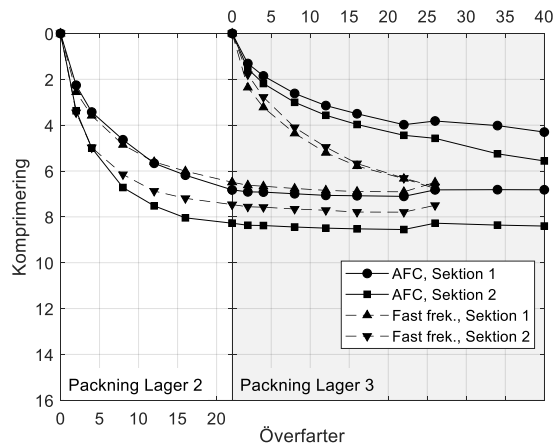
# Bilaga B: EMU-spolar

## Lager 2 och 3

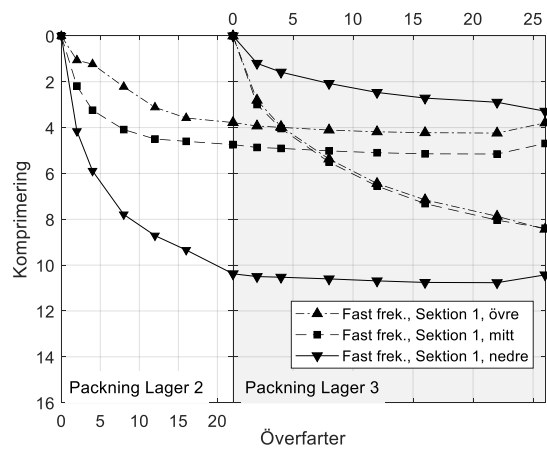
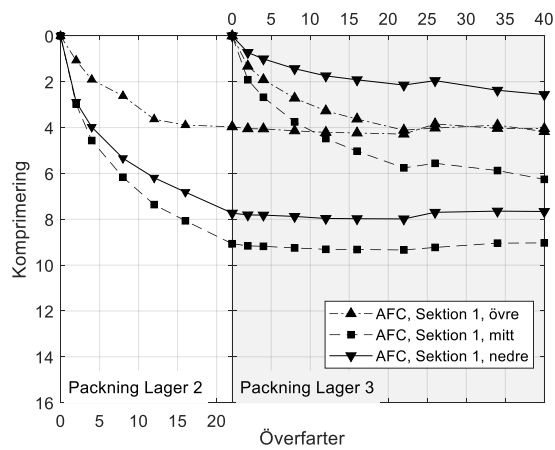
### Medel

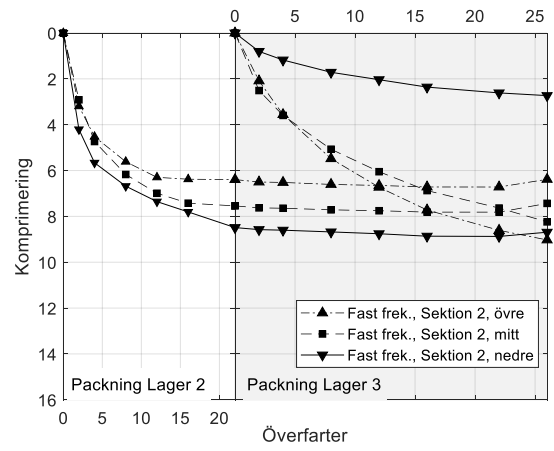
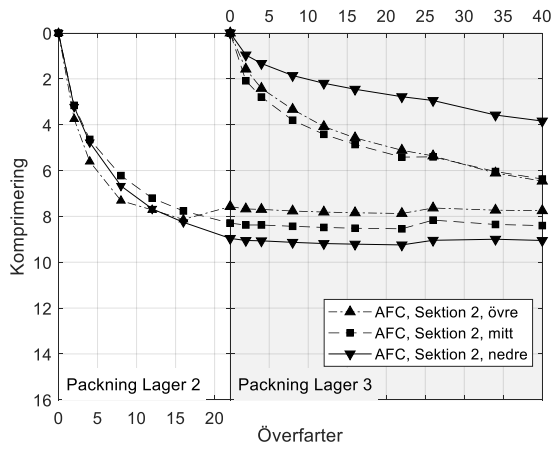


### Medel per sektion

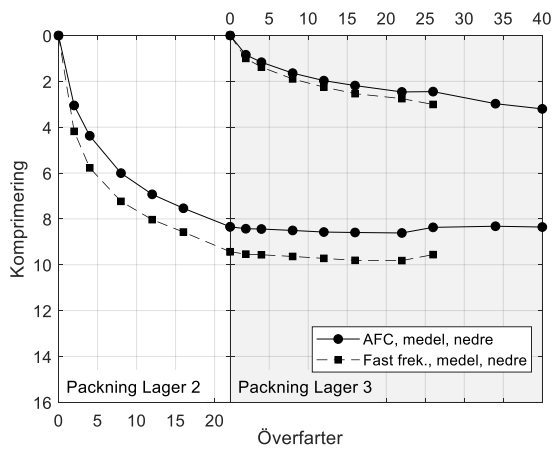
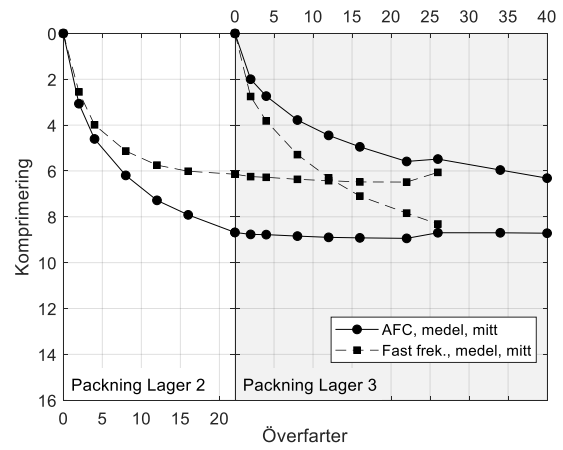
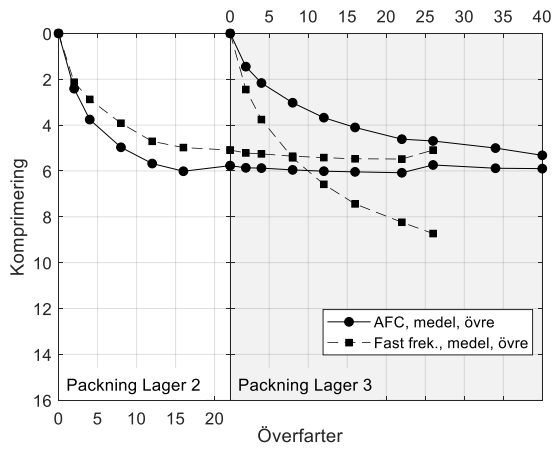


### Per sektion

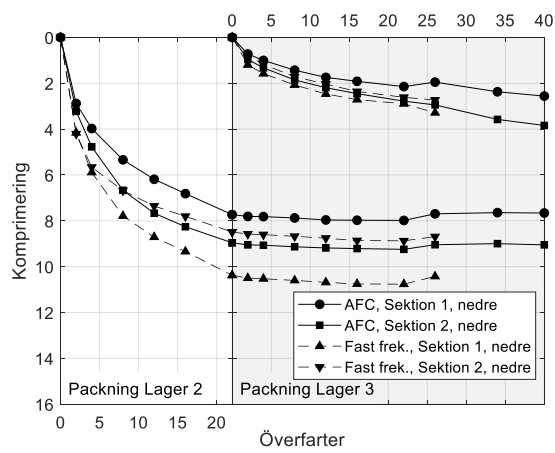
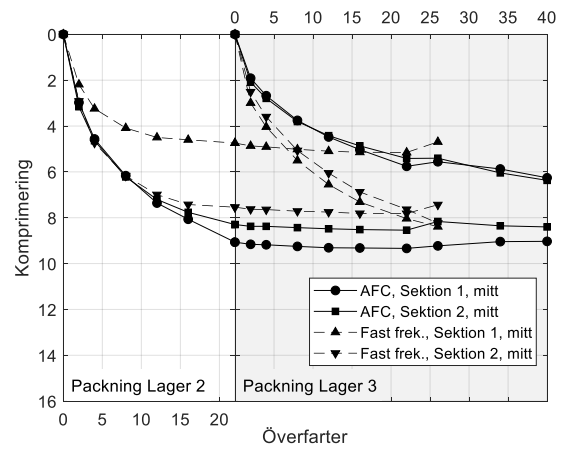
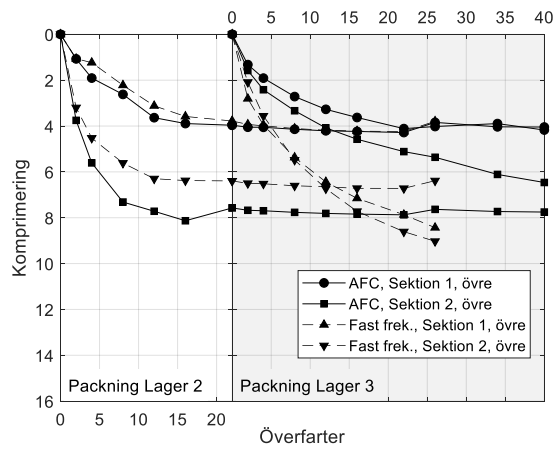




### Medel per djupintervall

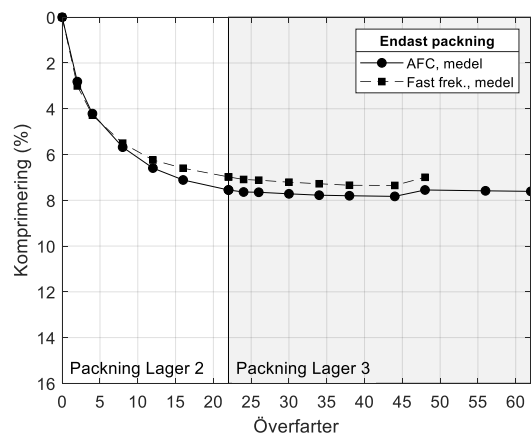
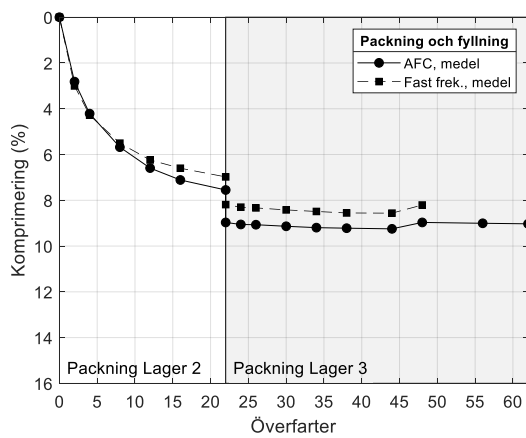


## Per djupintervall



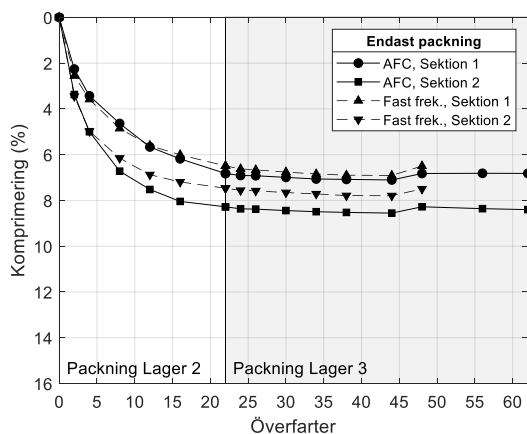
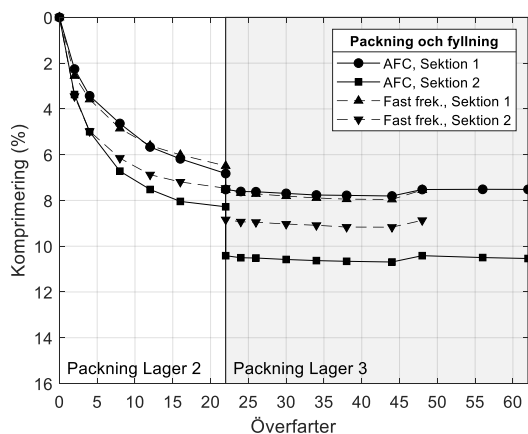
## Lager 2

### Medel

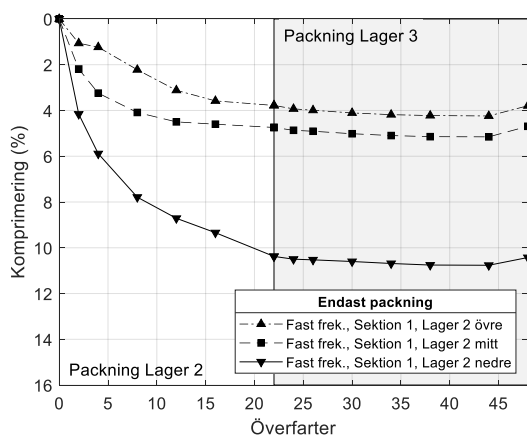
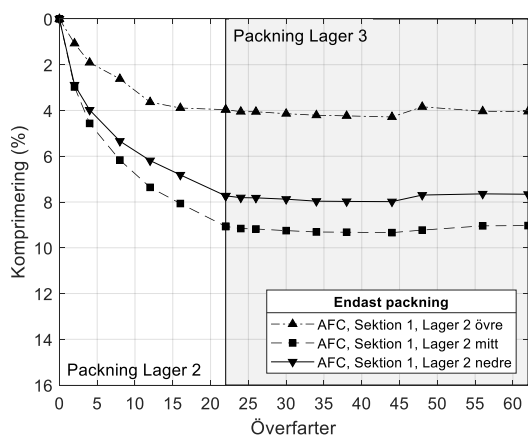
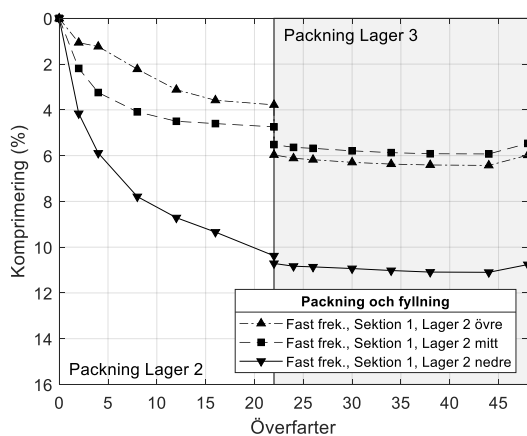
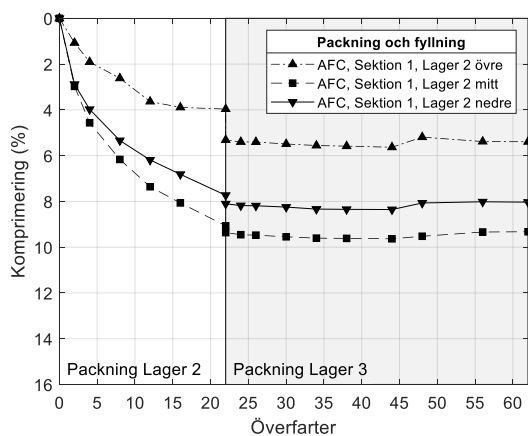


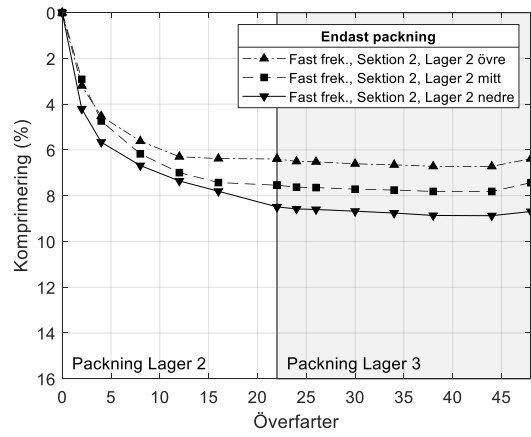
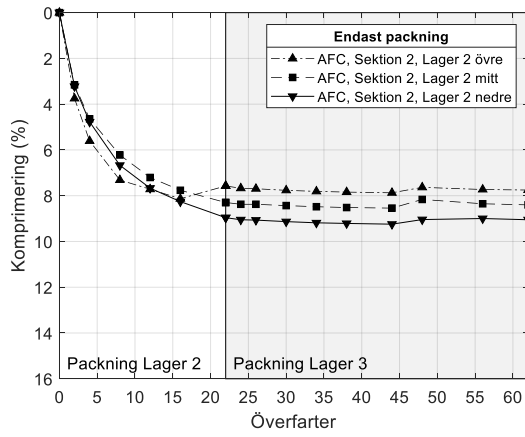
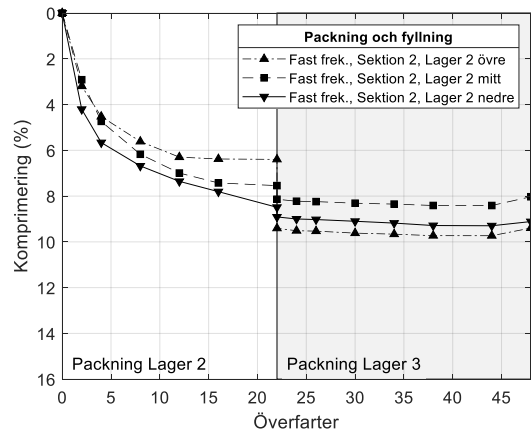
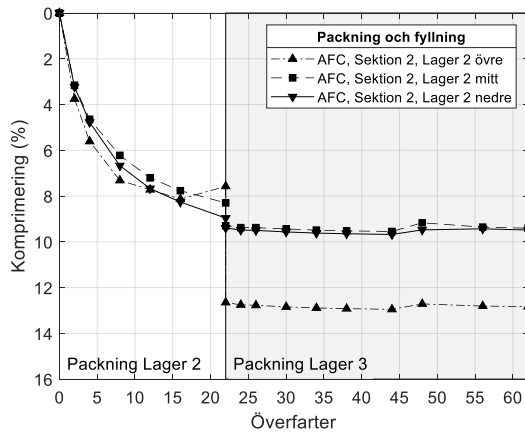


## Medel per sektion

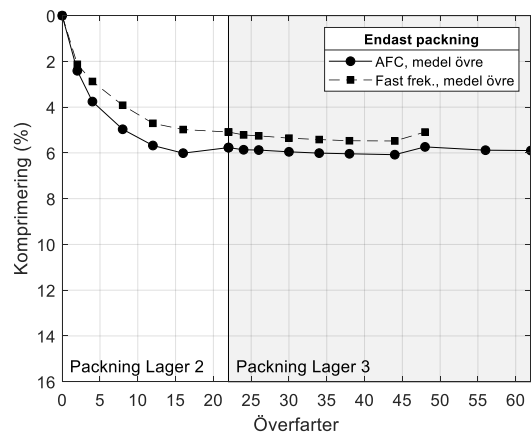
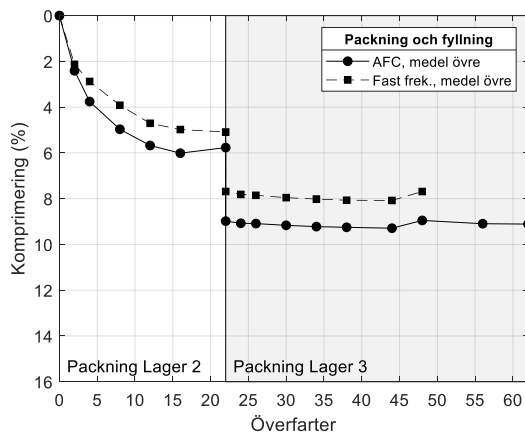


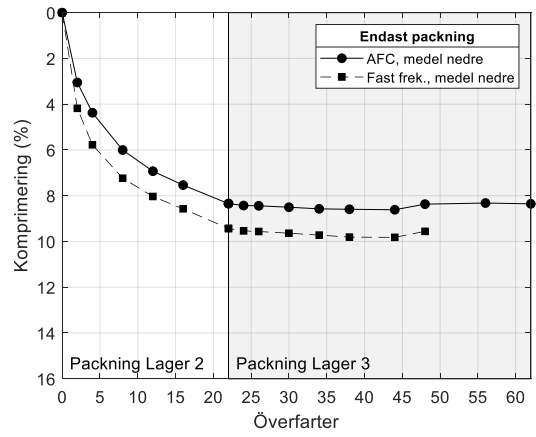
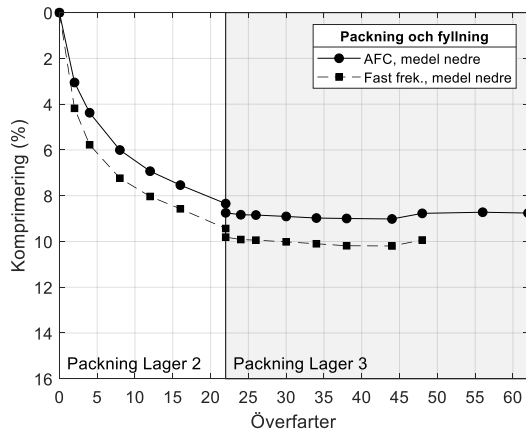
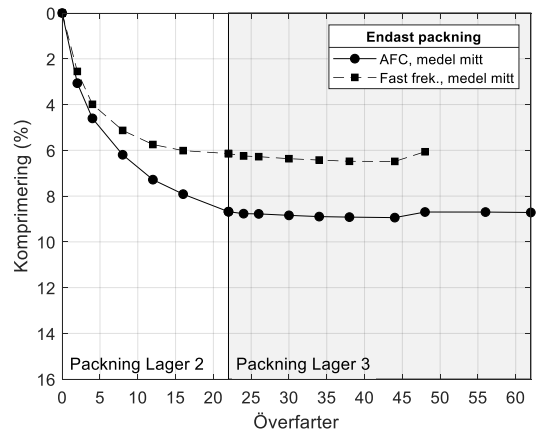
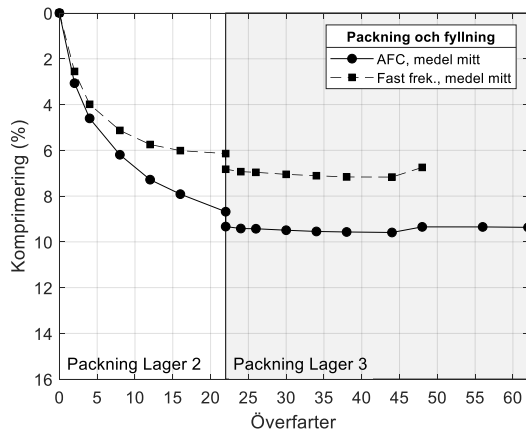
## Per sektion



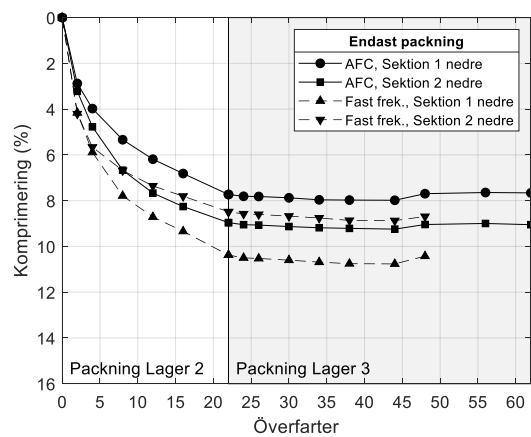
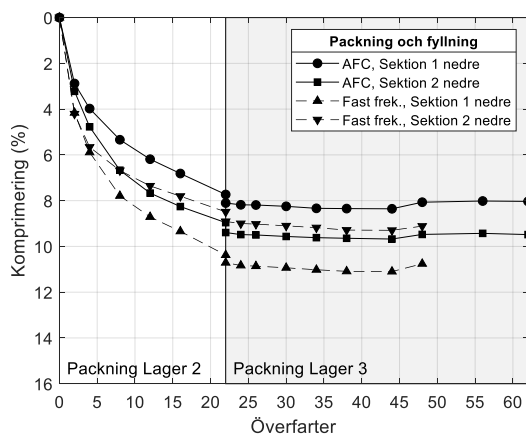
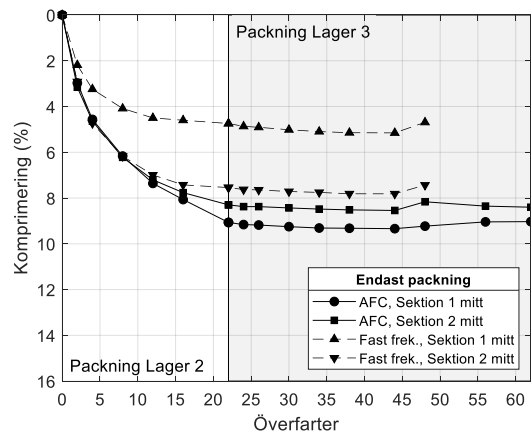
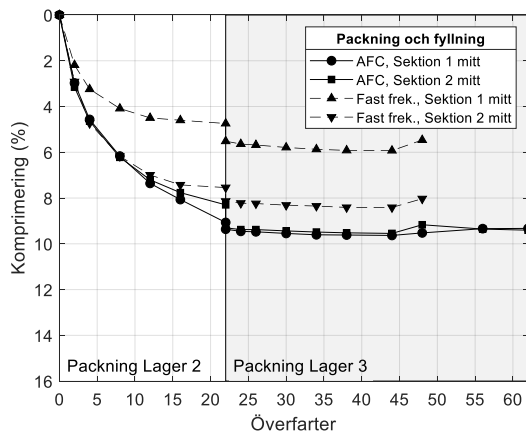
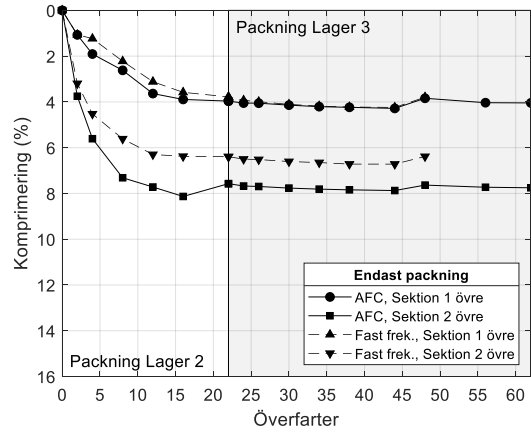
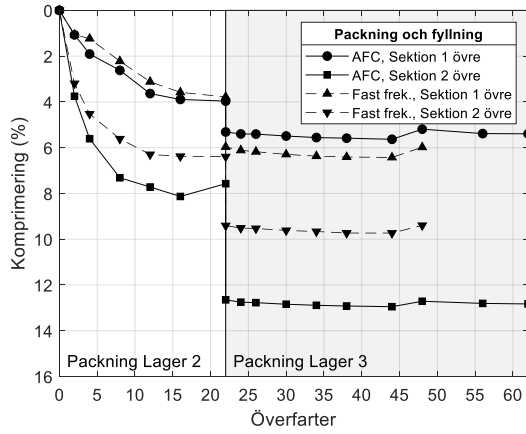


**Medel per djupintervall**

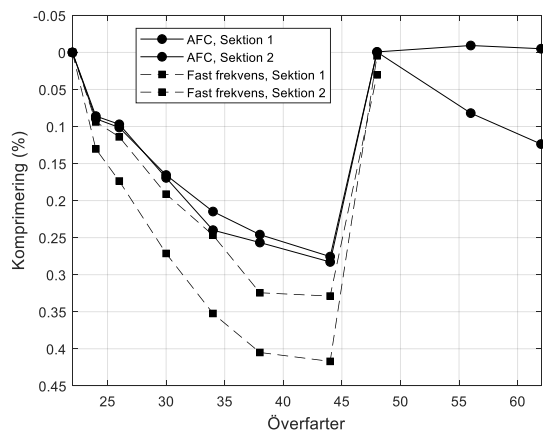




## Per djupintervall

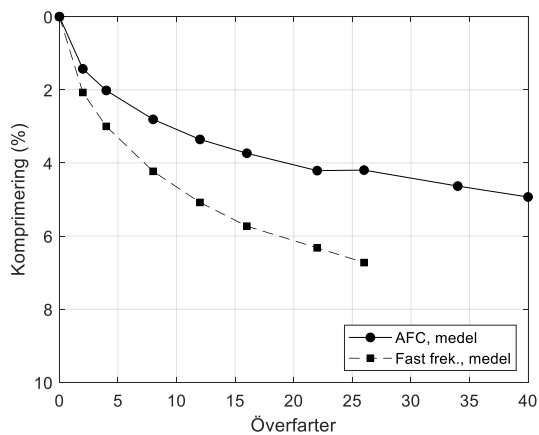


### Endast packning på lager 3

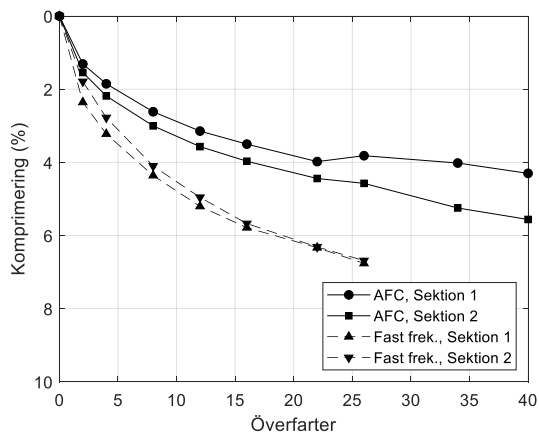


### Lager 3

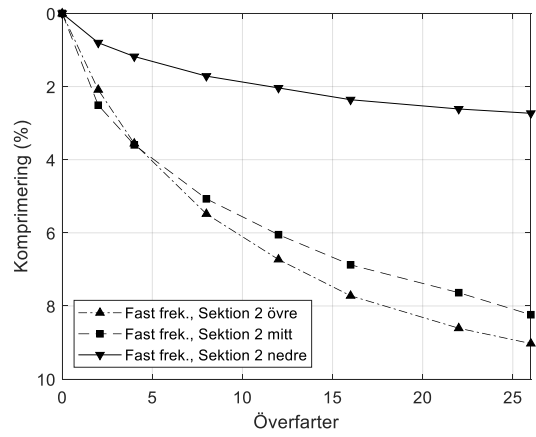
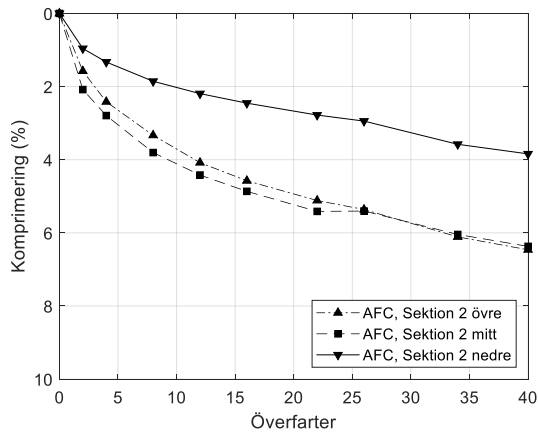
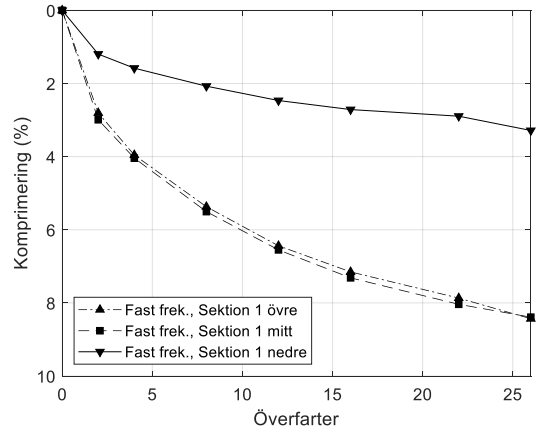
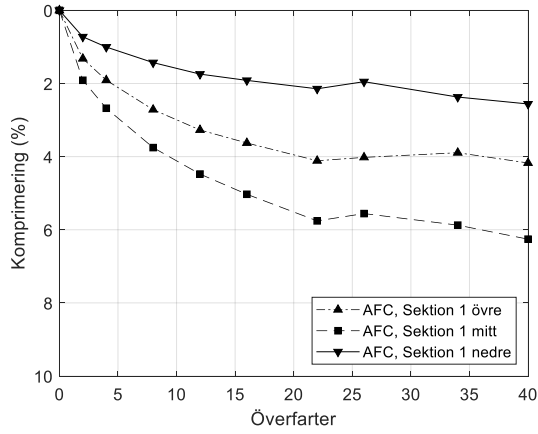
#### Medel



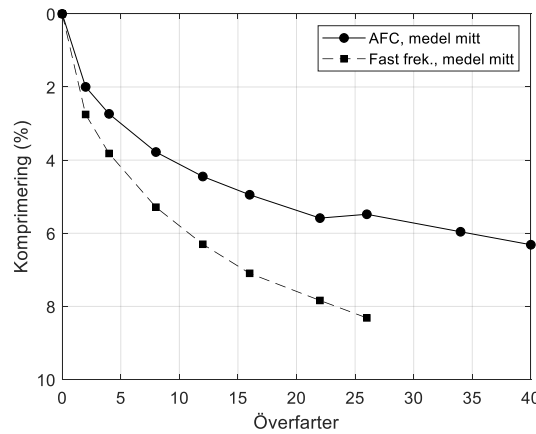
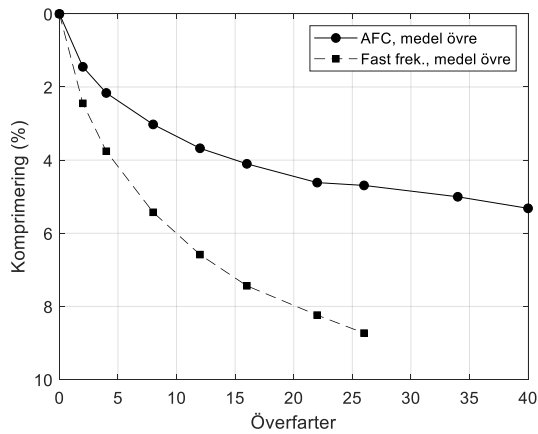
#### Medel per sektion

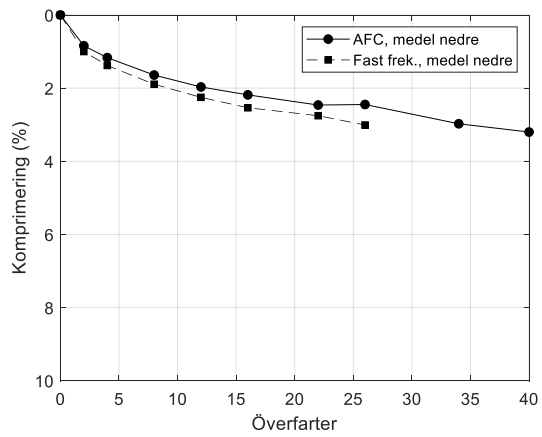


### Per sektion

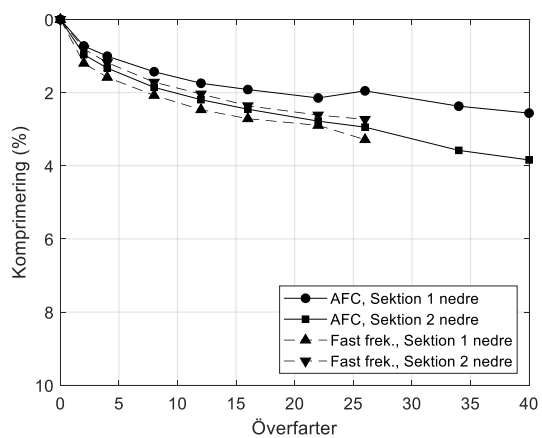
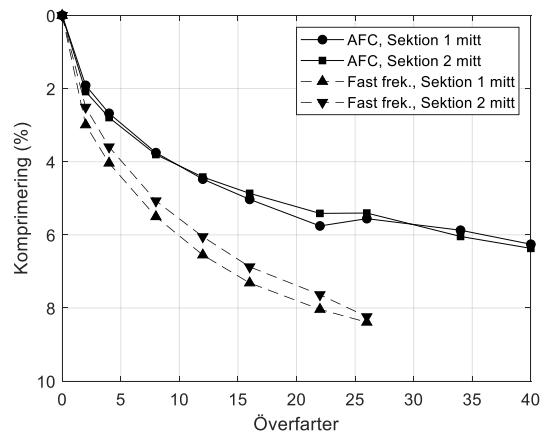
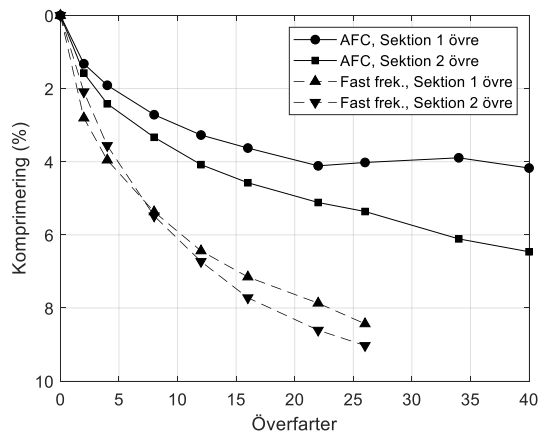


### Medel per djupintervall

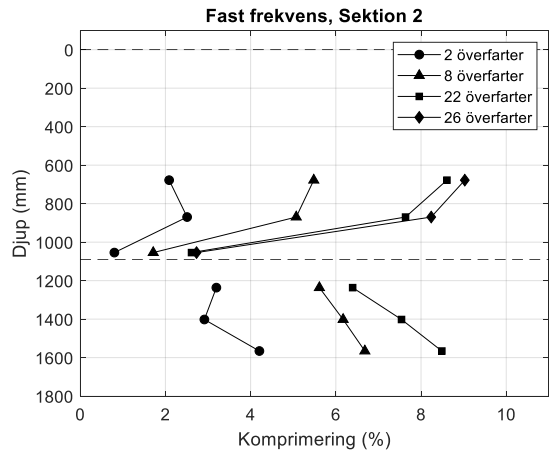
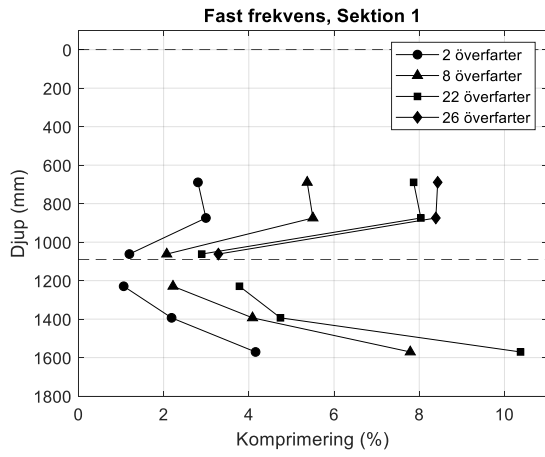
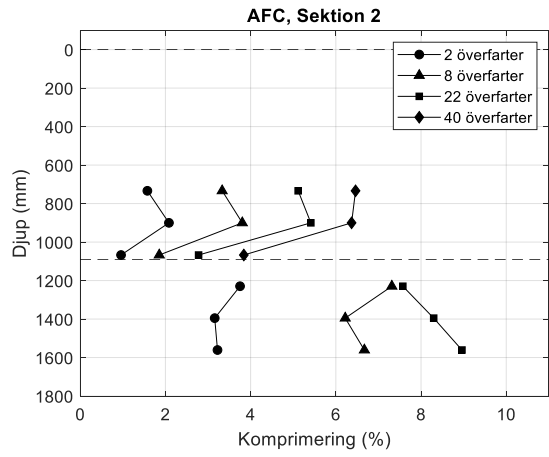
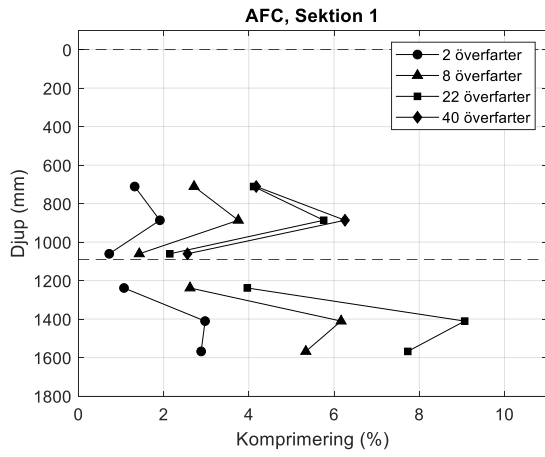




**Per djupintervall**



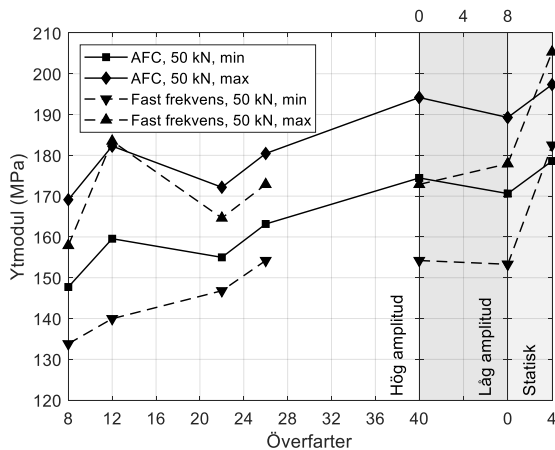
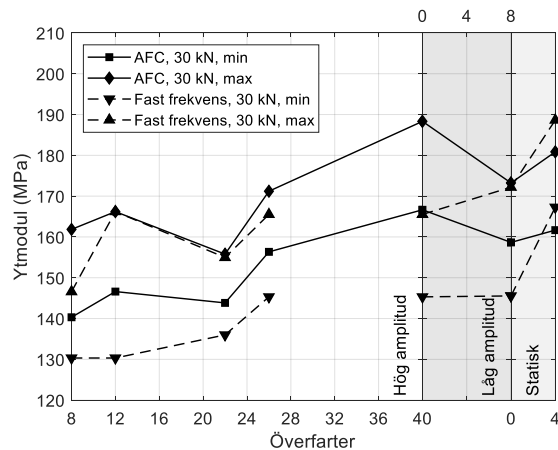
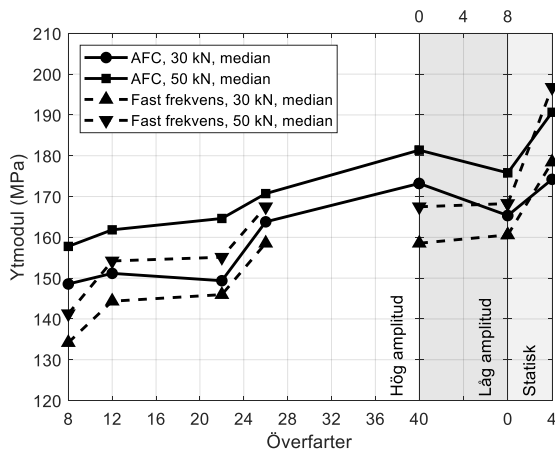
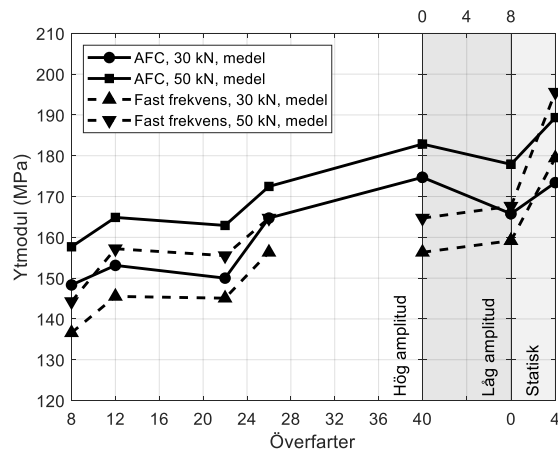
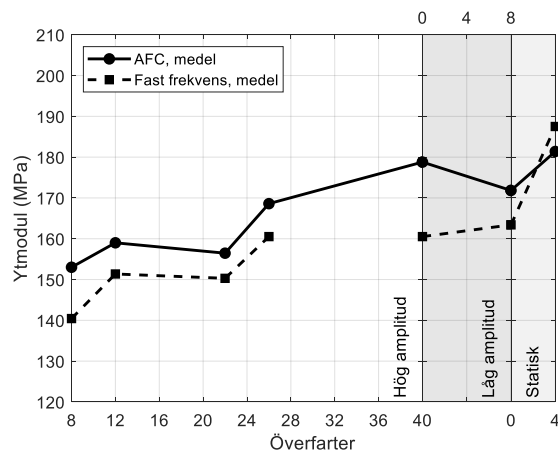
# Profiler





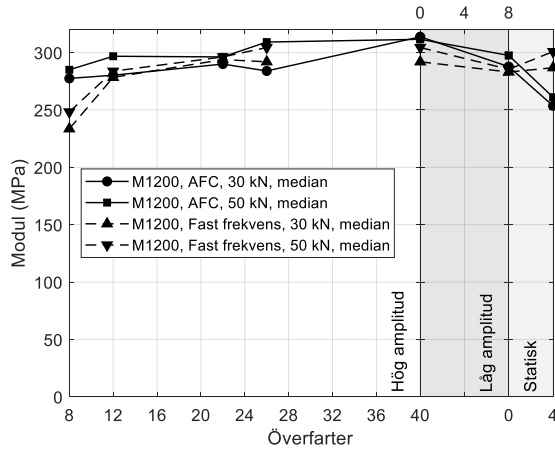
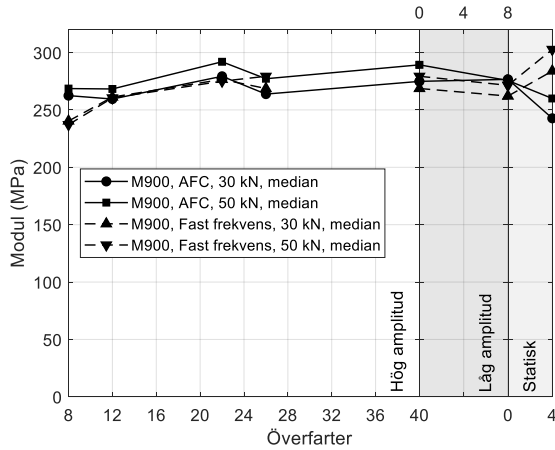
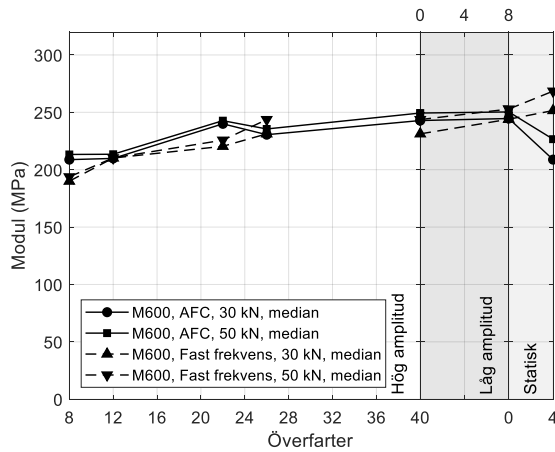
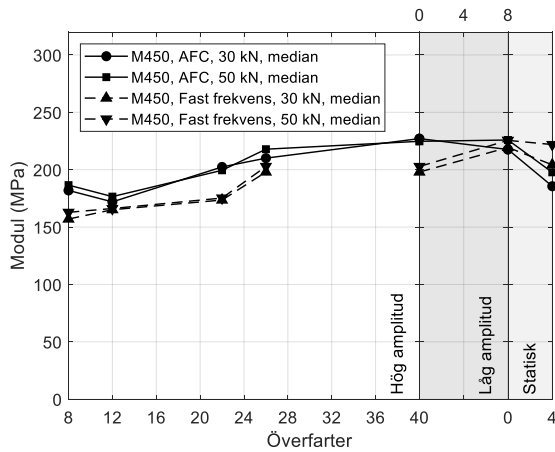
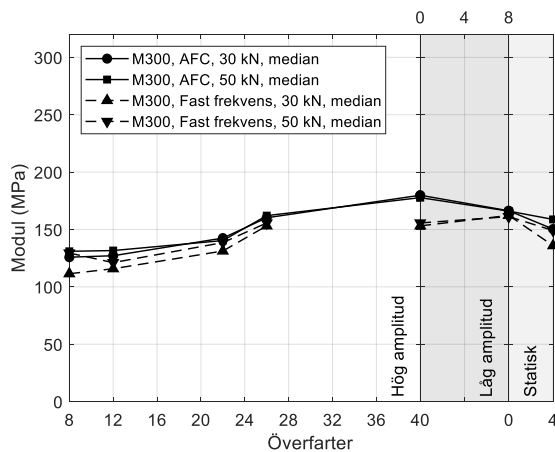
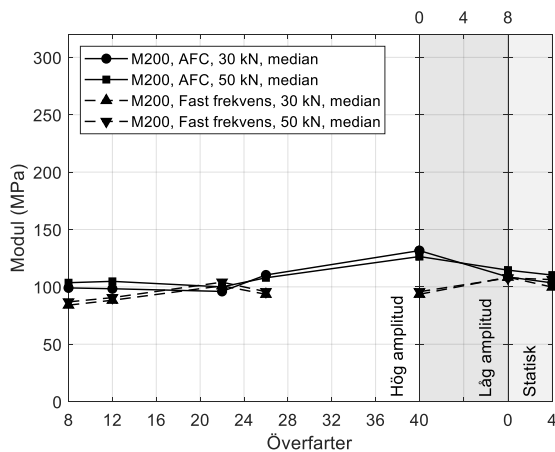
# Bilaga C: Fallviktsapparat

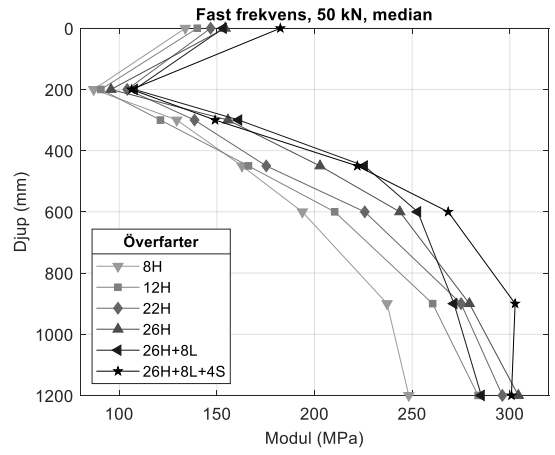
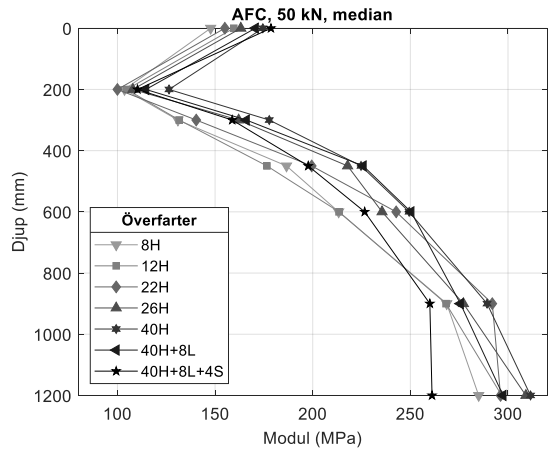
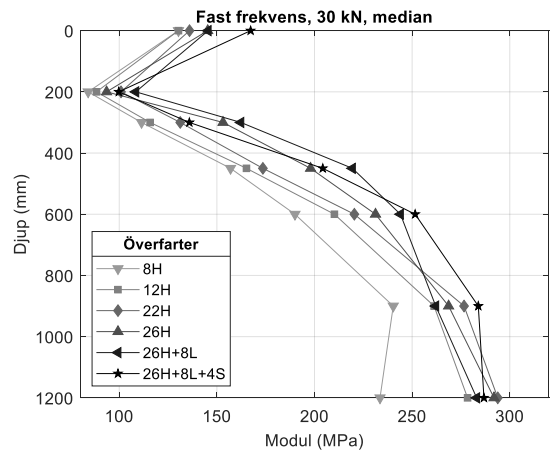
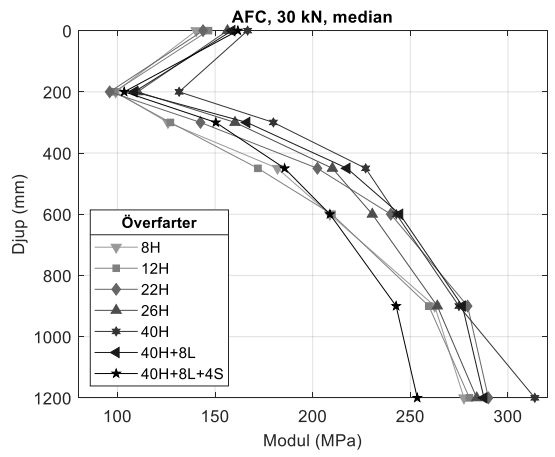
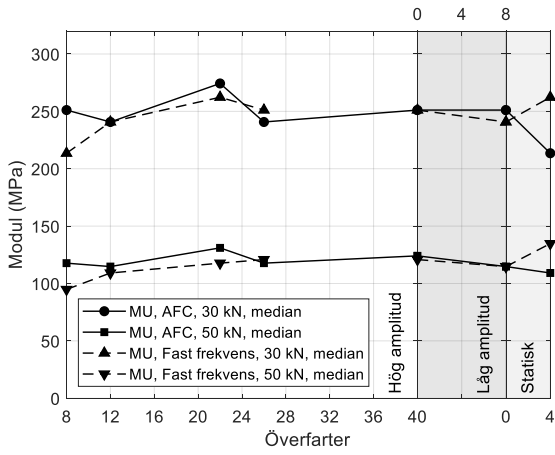
## Ytmodul – medel, median, min, max



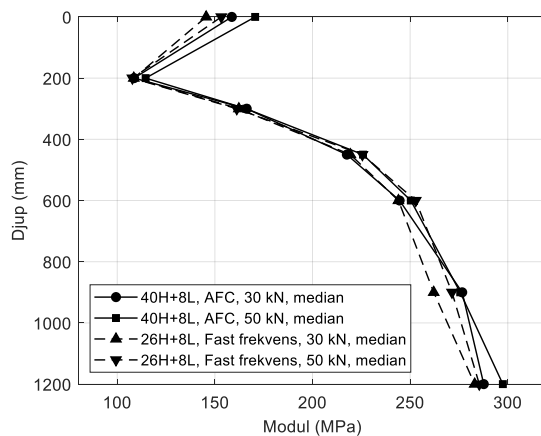
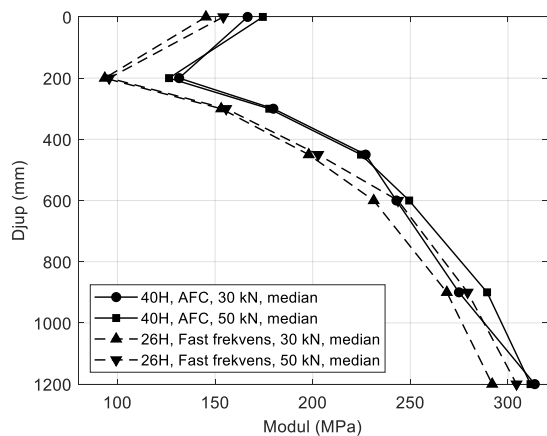
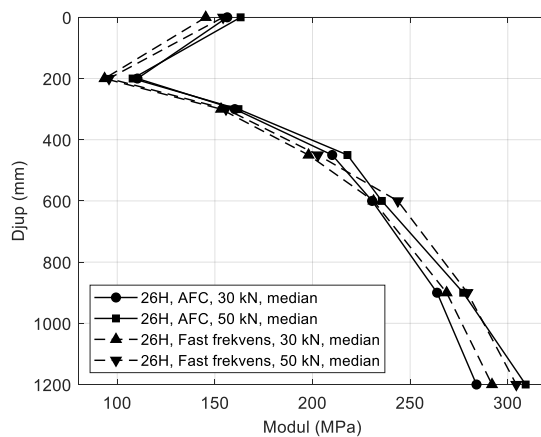
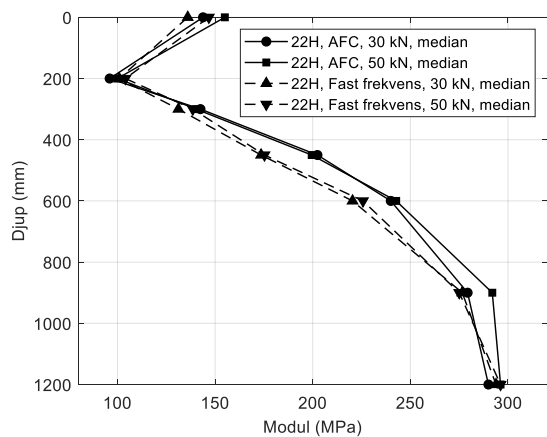
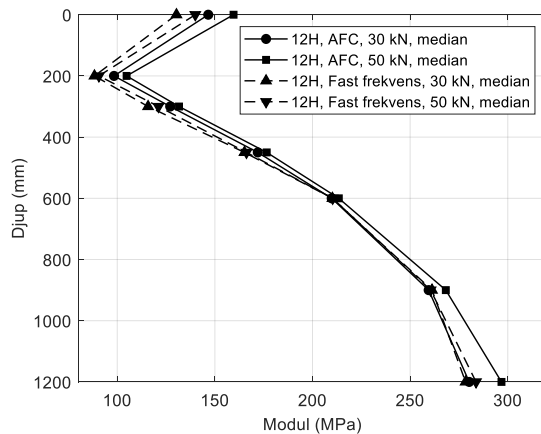
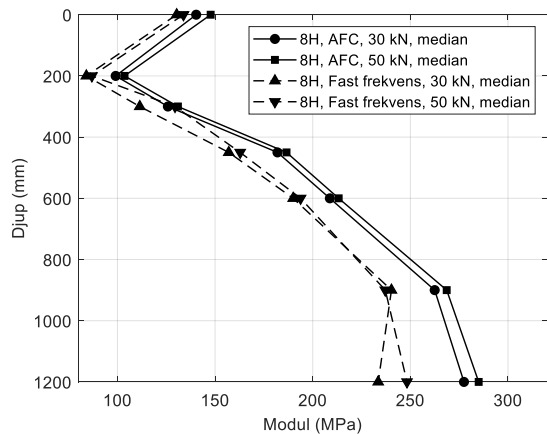
# Djupberoende modul

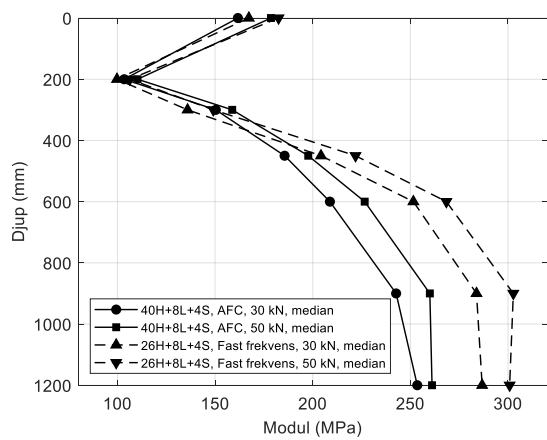
## Alla överfarter





### Enskilda överfarter

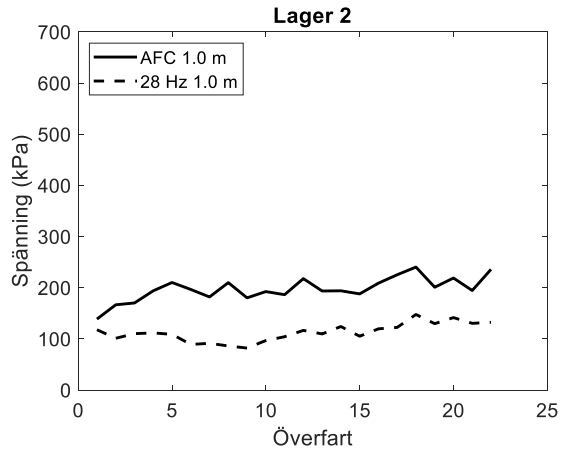




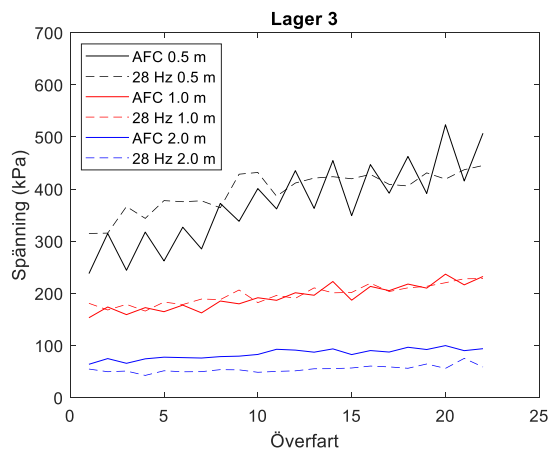
## Bilaga D: Spänningsgivare

### Maximalvärden

#### Packning lager 2

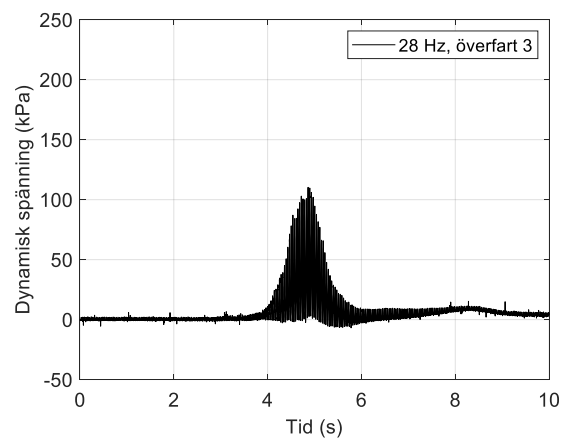
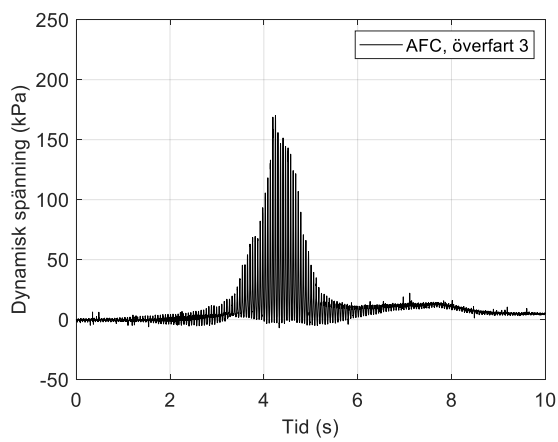
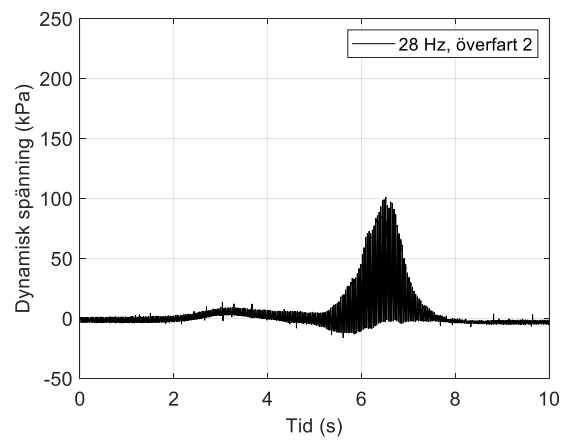
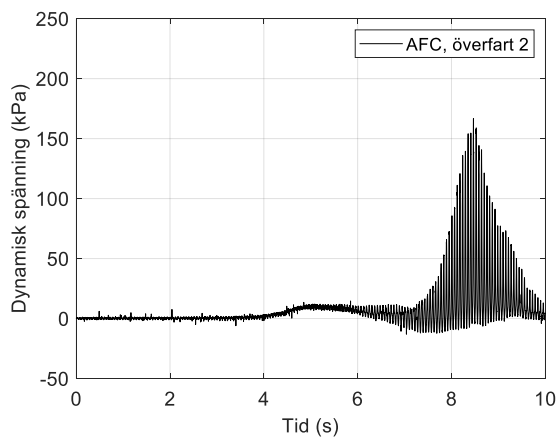
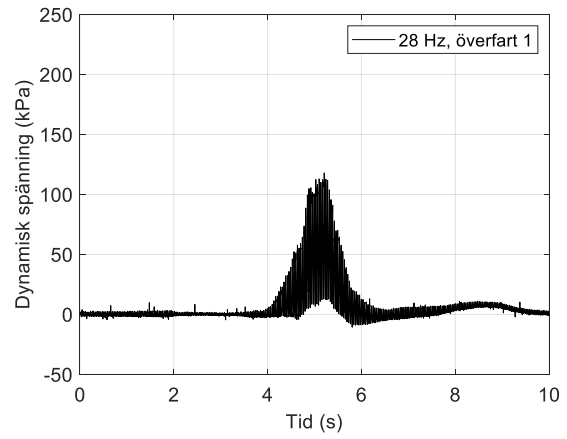
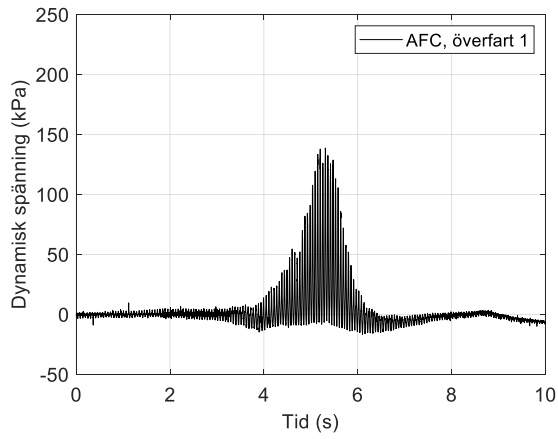


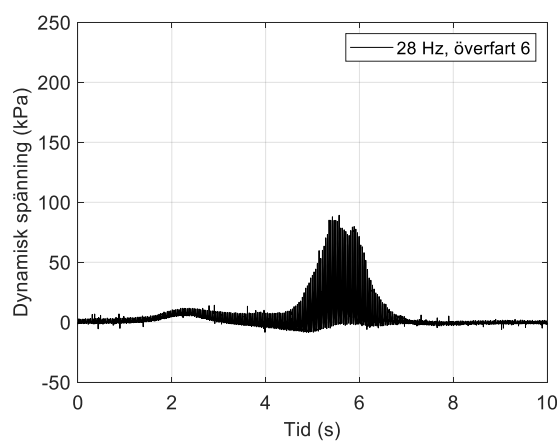
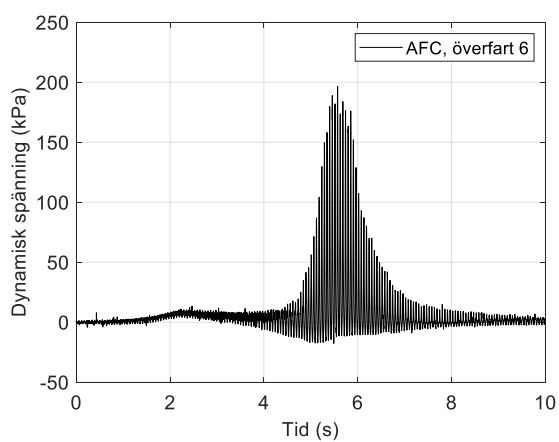
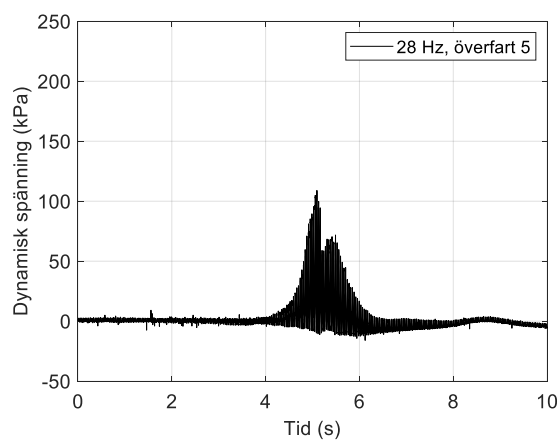
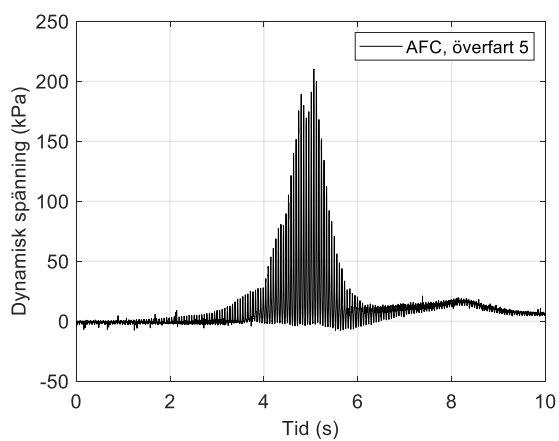
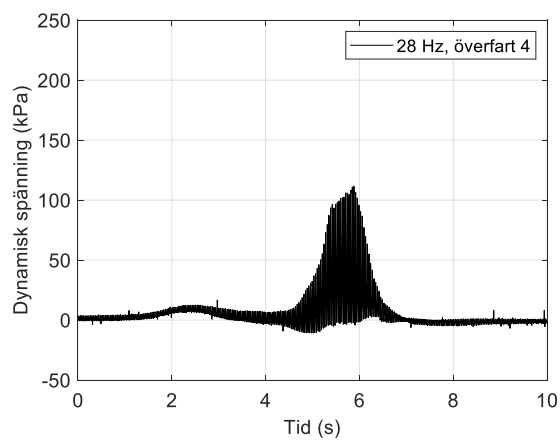
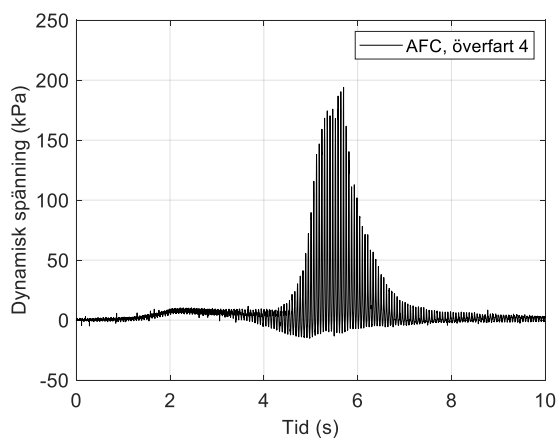
#### Packning lager 3



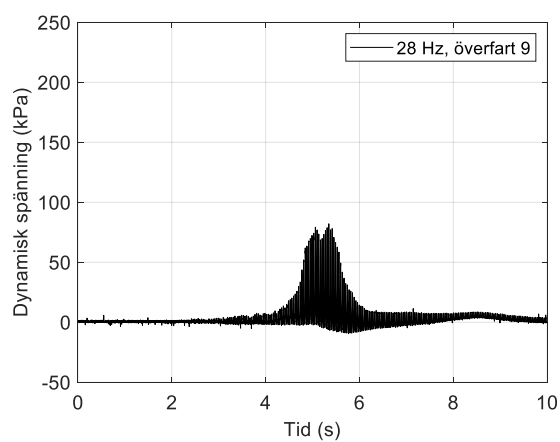
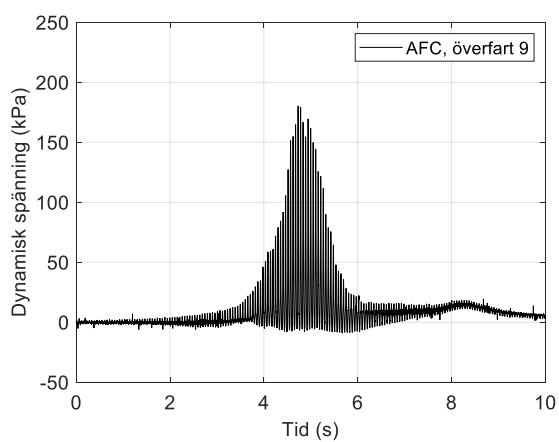
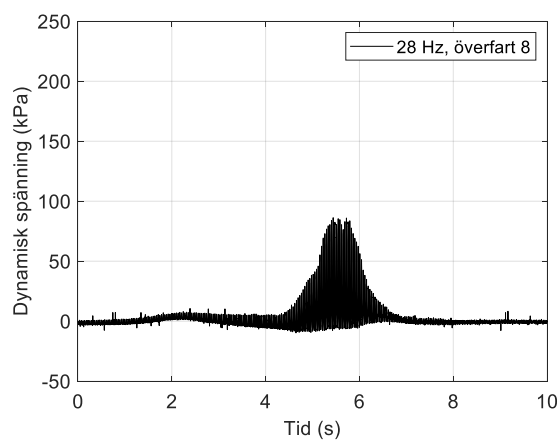
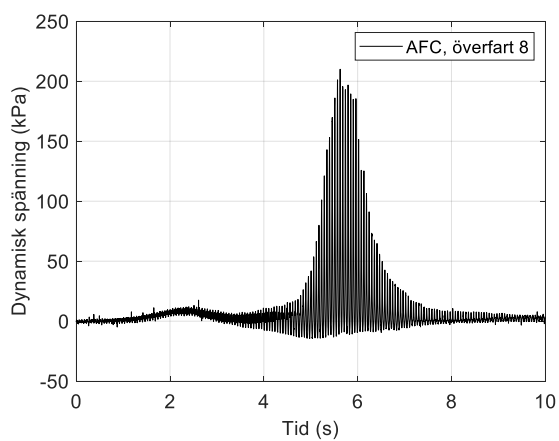
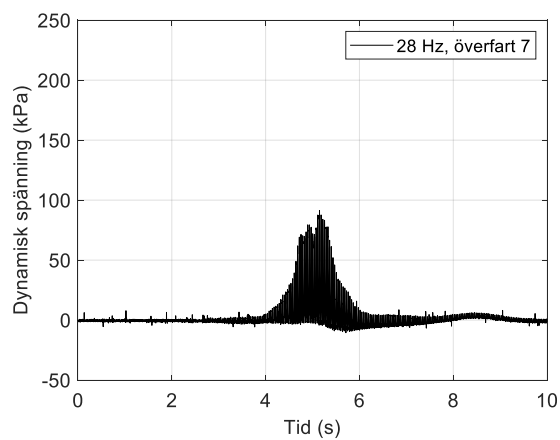
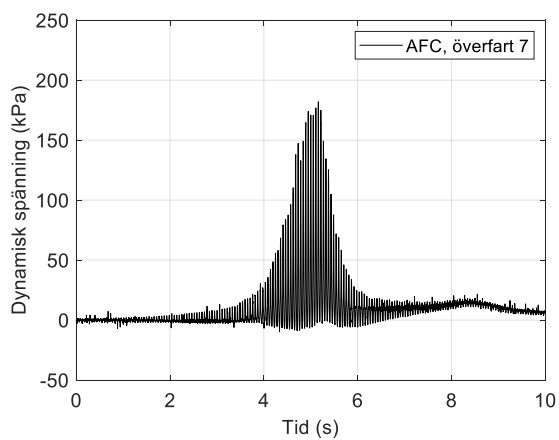
## Individuella överfarter

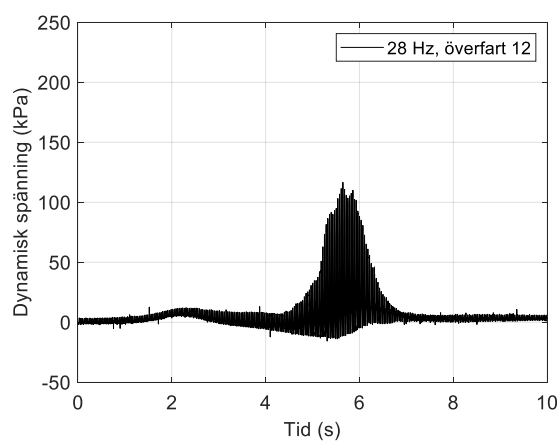
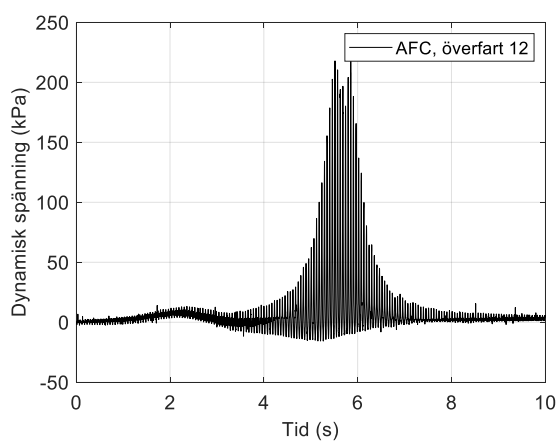
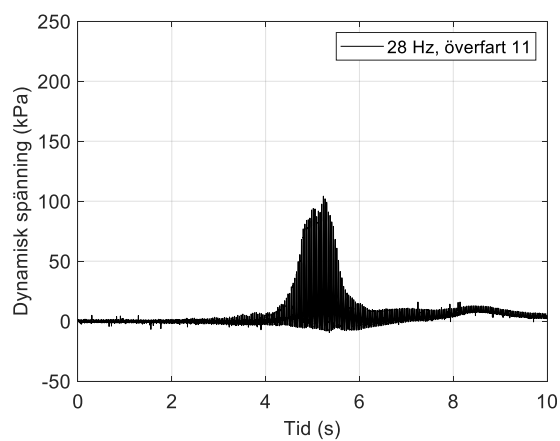
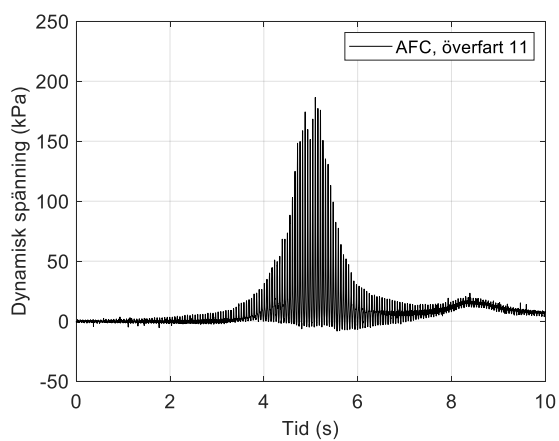
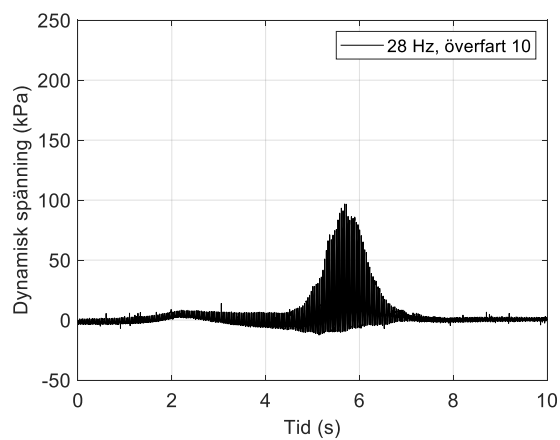
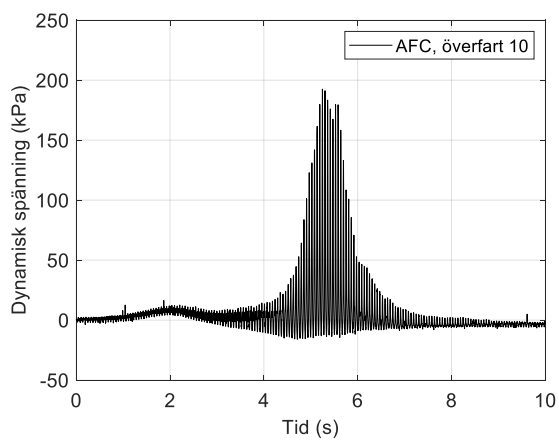
### Packning lager 2

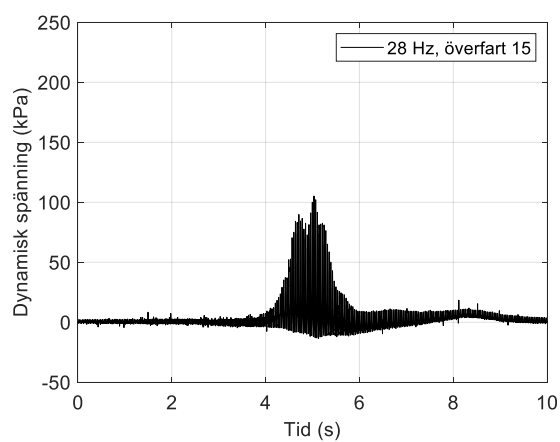
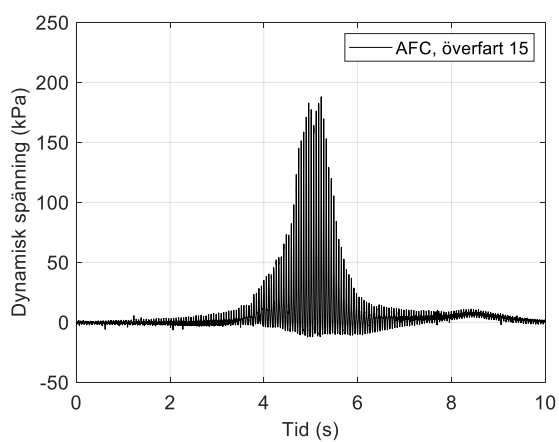
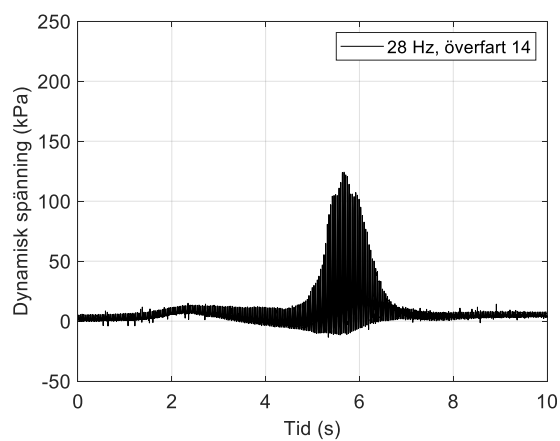
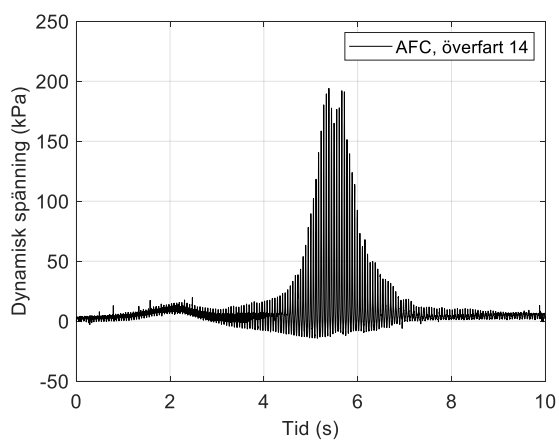
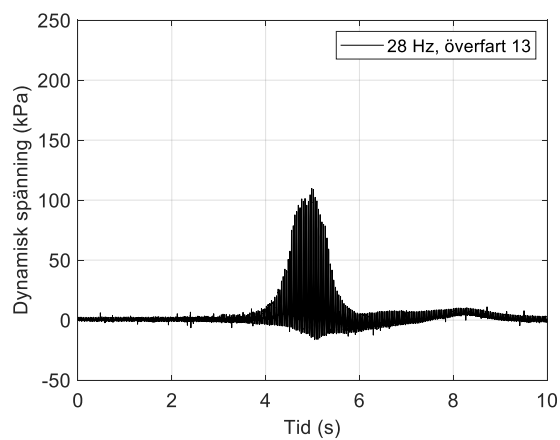
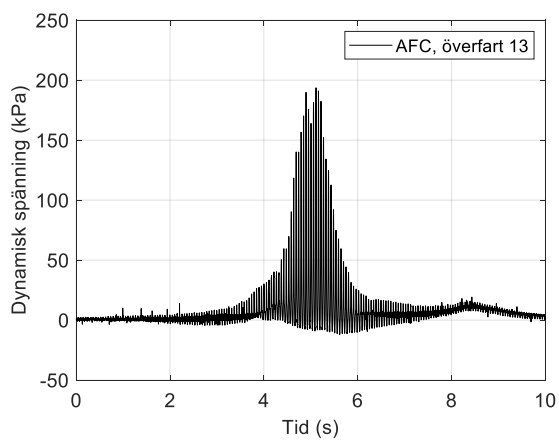


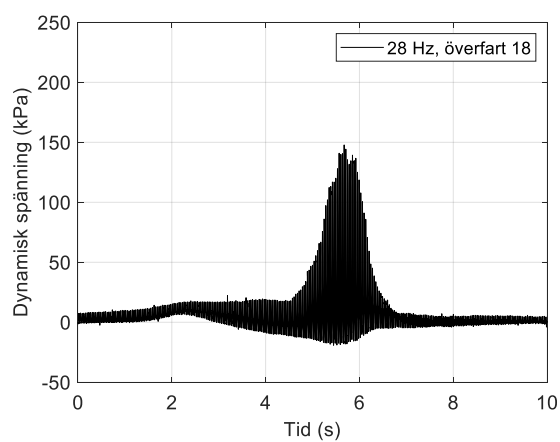
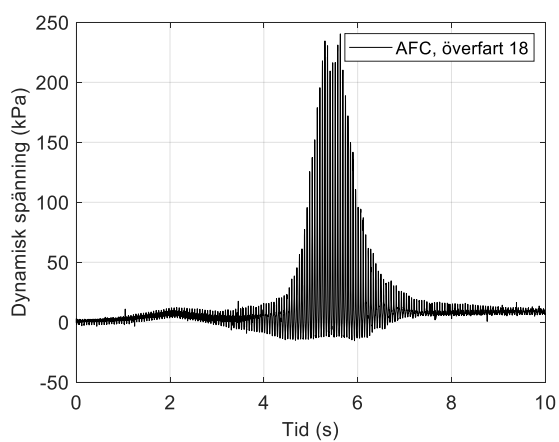
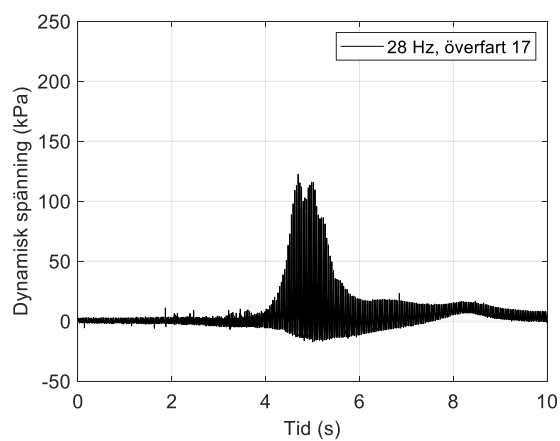
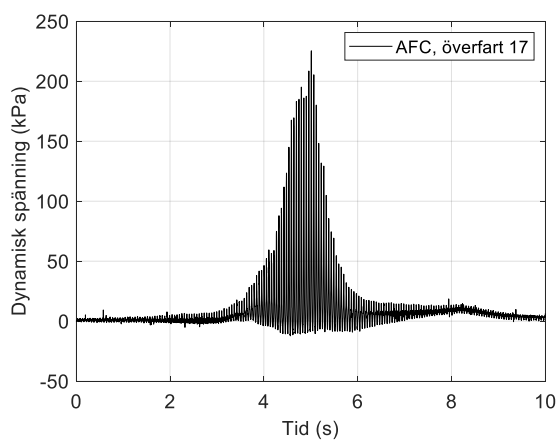
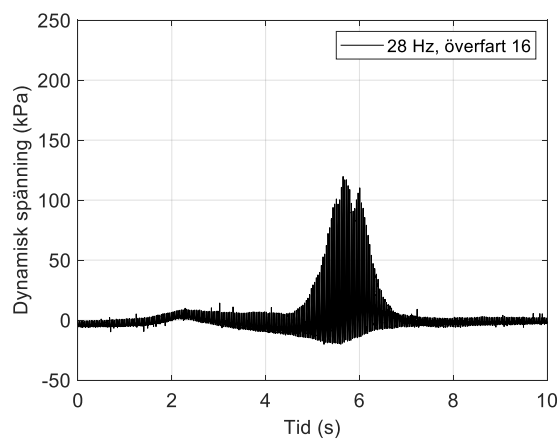
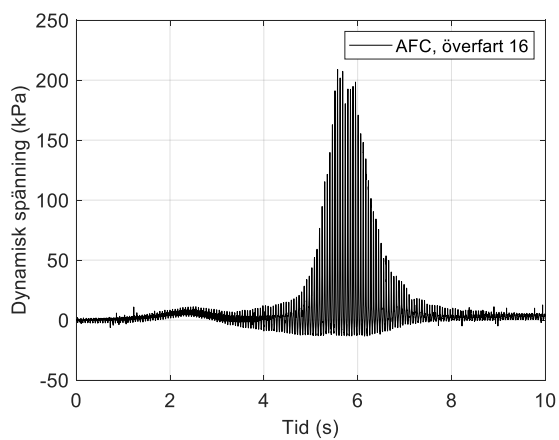


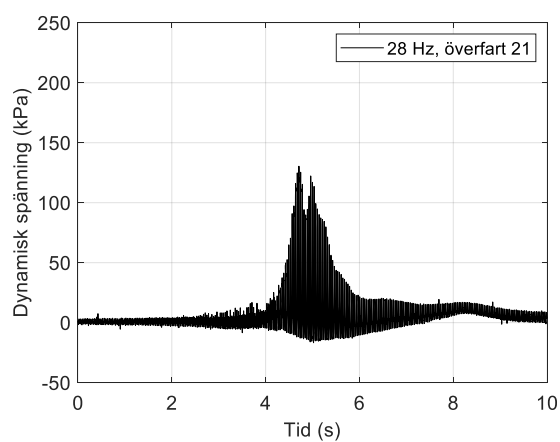
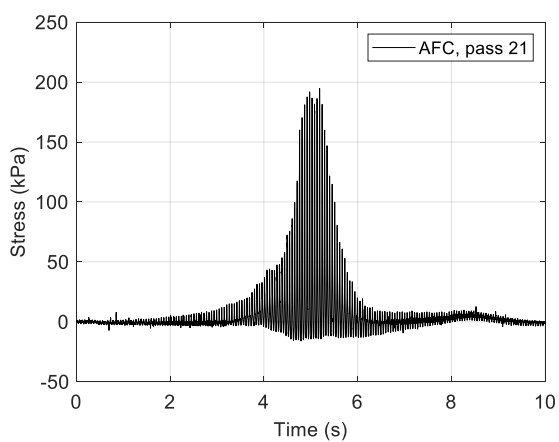
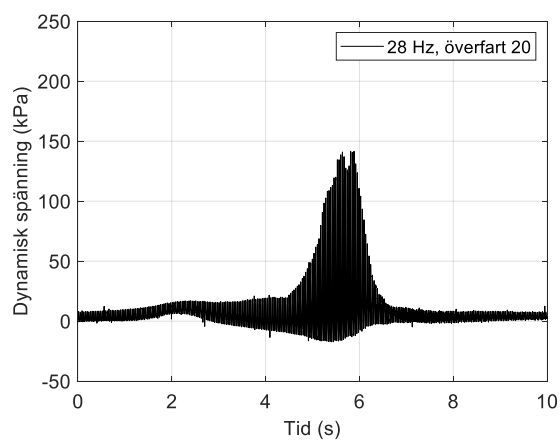
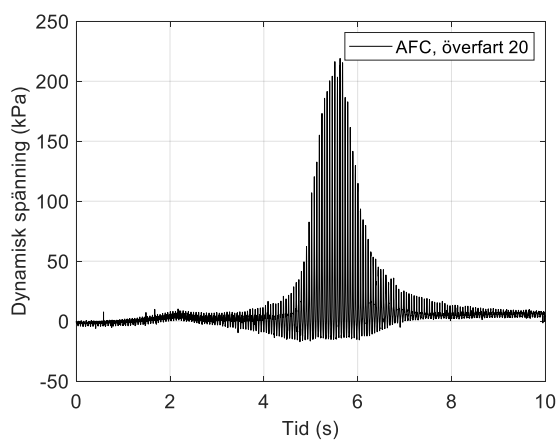
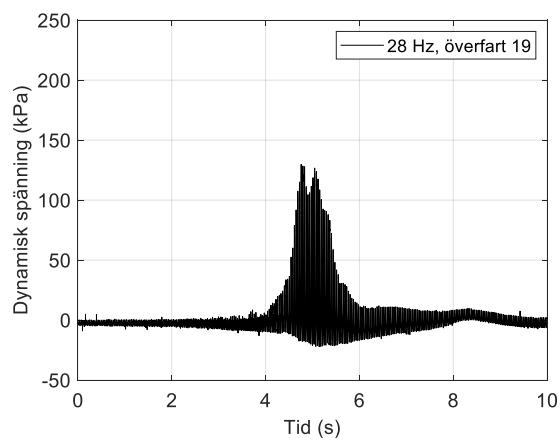
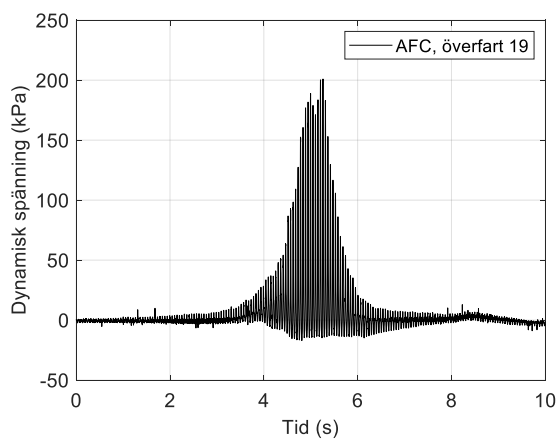


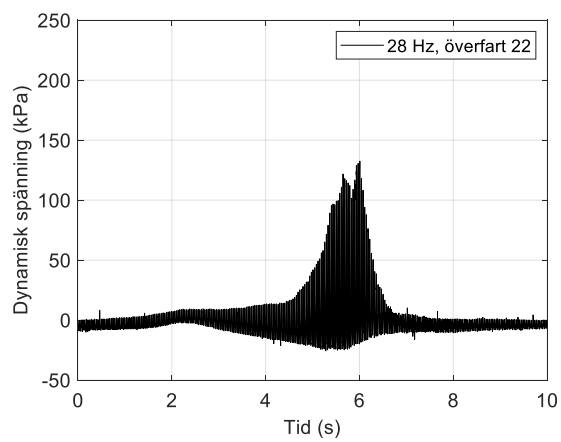
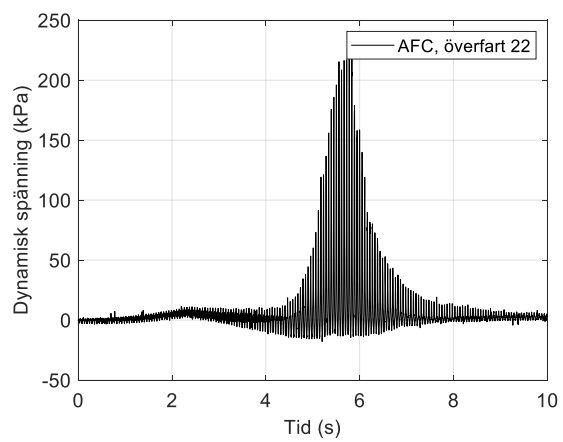












Packning lager 3

