

UNDERSÖKNING AV SEPARATIONSEFFEKTER VID KOMPakterING AV OBUNDNA MATERIAL



**Johannes Quist, Klas Jareteg, Adam Bilock
Andreas Persson**

2021-07-02

FÖRORD

Projektet har genomförts inom ramen för Vinnova InfraSweden2030 projektet DigiRoad som koordineras av Fraunhofer-Chalmers Centre. Övriga deltagare i konsortiet är Dynapac AB, Volvo CE, Chalmers samt NCC AB. Detta del-projekt har fokuserat på fullskaliga experiment och simulering av rullkompaktering. Experimenten har planerats och genomförs vid Dynapacs fullskaliga laboratorieanläggning i Karlskrona. Experimenten har planerats i samverkan mellan FCC, NCC och Dynapac. Från NCC har Kristoffer Hofling, Per Murén samt Pär Johnning deltagit med projektledning och återkoppling i planeringsskedet. Från Dynapacs sida har Andreas Persson varit ledande i arbetet tillsammans med laboratorietekniker Michael Knutsson. VTI har genom Håkan Carlsson deltagit i projektet med ansvar för mätteknisk hårdvara samt mätning med marksensorer. Utvecklingen av mjukvara för DEM simuleringar vid FCC genomförs av Dr. Klas Jareteg, Elin Solberg och Adam Bilock. I anslutning till projektet genomfördes exjobbet ”Multibody Dynamics Coupling to DEM for Roller Compaction” av Joar Axås Göransson. I detta exjobb utvecklades en unik modell för flerkroppsdynamik av rullkompaktorer med en numerisk koppling till diskret element modell av partikelmaterialet.

De slutliga modeller och simuleringar som ingår i denna rapport har utvecklats av Adam Bilock, Johannes Quist och Klas Jareteg med Axås Göranssons arbete som grund. Sammanställning av experiment- och simuleringsdata, statistisk analys och textframställning har i huvudsak genomförts av Johannes Quist. Andreas Persson har genomfört datasammanställning av rådata från experiment vid Dynapac samt textframställning relaterad till denna data. Ett stort tack till Jonatan Berglund (Visinator AB) för hjälp med 3D laser scanning och bearbetning av punktmolnsdata.

Projektets deltagare vill rikta ett stort tack till SBUF samt InfraSweden2030 för finansiering samt stöd och coachning under projektet. Covid19 pandemin slog till mitt under slutfasen av den experimentella studien och har pågått under hela resterande projekttiden. Undertecknad vill därför rikta ett speciellt tack och rikta en eloge till alla som bidragit till ett mycket bra slutresultat, trots de utmaningar pandemin orsakat.

Johannes Quist

Juni, 2021

SAMMANFATTNING

Kompaktering av obundna bergmaterial är av central betydelse vid produktion av vägar och annan infrastruktur. Vägkroppens struktur, hållfasthet och livslängd är beroende av packningsegenskaperna i de olika obundna och bundna lager som utför en modern vägkonstruktion. De nedbrytningseffekter av vägkroppen som driver behovet av underhållsåtgärder, så som permanent deformation av bitumen lager eller olika typer av springbildning, är direkt kopplade till underliggande lagers packning och styvhet. Därför är det av såväl kostnads- som miljöskäl viktigt att öka prestanda och minska variansen för de obundna lagren. För att möjliggöra förbättring krävs effektiva metoder för att dels ge ökad grundläggande förståelse, dels för att utvärdera effekten av en potentiell förbättringsåtgärd. Digitalisering genom avancerad modellering och simulering är den naturliga vägen framåt för att uppnå signifikanta framsteg. Den dominerande metoden för att simulera system av partiklar, i det här fallet bergmaterial eller jord, är diskreta element-metoden (DEM). Fraunhofer-Chalmers Centre för industrimatematik bedriver forskning och utveckling på området DEM inom olika applikationsområden där partikelsystem är av central betydelse. Sedan 2018 har projektet DigiRoad (Vinnova InfraSweden2030 diarienummer: 2018-606) bedrivits med fokus på att undersöka bland annat segregeringseffekter i de olika hanteringssteg som bergmaterialet genomgår från produktion i bergtäkten, till lastning, transport, utbredning och kompaktering. En central aktivitet i projektet har varit att genom fullskaliga experiment i industriell miljö ta fram underlag för validering av simuleringsmetoden.

Syftet med detta projekt är att studera kompaktering av obundna bergmaterial genom experiment samt genom partikelbaserad simulering. Målet är dels att utveckla ett data-set för validering av simuleringsmodeller, dels att denna data och analys kan ge ökad förståelse gällande effekten av segregerade material på kompakteringsprestanda.

I projektet har experiment genomförts tillsammans med och vid Dynapacs testanläggning i Karlskrona. Testanläggningen är uppbyggd av en betongkanal för bergmaterial och en kanal för jord/ler-material där kompakteringstester kan genomföras i full skala. För dessa tester har tre bergmaterialfraktioner valts ut; +8/-90 (anpassat förstärkningslager utan finmaterial), +8/-32 (anpassat bärlager utan finmaterial) och +0/-32 (standard bärlager). Materialet placerades ut med grävmaskin från sidokanalen och Geokon marktrycksensorer begrävdes för mätning av tryck under kompakteringsprocessen. Kanalens bredd om ca 7m möjliggjorde två kompakteringsspar vilket utnyttjades genom att utvärdera kompaktering med låg och hög amplitud. Detta ger sammantaget sex olika tillstånd/kombinationer av material och maskininställningar som testats. Ett antal olika mätmetoder har nyttjats för att fånga tillståndet före, under och efter kompakteringssekvensen. Laser skanning har nyttjats för beräkning av deformation samt för volymberäkningar av material. Laseravjämning har nyttjats som referensmätning av deformation. Marktrycksensorer har nyttjats för dynamisk mätning av krafter i marken under kompaktering. Statisk plattbelastning samt kompakteringsmaskinens mätning av CMV värde har genomförts för mätning av markstyvhet. Ett videokamerasystem har även använts för att filma kompakteringen vid synkroniserat för varje materialektion. Testsekvensen bestod av 2 initiala statiska överfarter följt av 12 dynamiska överfarter.

Parallellt har en digitaliserad modell av kompakteringsmaskinen utvecklats med flerkroppsdynamik samt kopplats till DEM modellen för bergmaterialet.

Simuleringsmodellen har verifierats med avseende på rörelse och dynamik med och utan interaktion med partiklar.

Sammanfattningsvis har ett unikt data-set tagits fram som kommer vara till mycket stor nytta för framtida vidare utveckling och validering av DEM simuleringar utöver de resultat som framkommer i denna rapport. Experimenten visar även en mycket påtaglig effekt av storleksfördelning för bergmaterial och kompakteringsprestanda. Dessa resultat ligger i linje med tidigare erfarenhet i branschen, dock har sannolikt inte så noggranna fullskaliga tester genomförts innan där just segregeringseffekter (bortfall av finmaterial) studeras och kvantifieras.

Jämförelsen och valideringen mellan experiment och simulering visar på goda resultat och överensstämmelse. Under utvecklingen har flera ytterligare förbättringsåtgärder och detaljer identifierats som sannolikt kommer förbättra predikteringsförmågan ytterligare.

Projektresultaten tyder på att branschen bör bibehålla fokus på ballastkvalité och säkerställning av så jämn storleksfördelning i obundna lager som möjligt. Projektet visar att segregerings- och separationseffekter kan ha en mycket påtaglig inverkan på obundna lagers styvhet och bärighet.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INTRODUKTION	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Relaterade projekt	2
1.3	Annan relaterad forskning	2
1.4	Syfte	3
2	EXPERIMENT OCH MÄTMETODER.....	4
2.1	Beskrivning av försök	4
2.2	Bergmaterial och valda fraktioner	6
2.3	Dynamisk mätning av marktryck	7
2.4	Deformationsmätning.....	9
2.5	Mätning av packning och styvhet.....	14
3	MODELLERING OCH SIMULERING	15
3.1	Diskret elementmetod (DEM) och implementation	15
3.2	Maskinmodell och flerkroppsdynamik	16
3.3	Konfiguration av DEM-modell	16
3.4	Dataefterbehandling.....	18
4	EXPERIMENTELLA RESULTAT	19
4.1	Kompaktering och styvhet.....	19
4.2	Deformation	22
5	SIMULERINGSRESULTAT.....	25
5.1	Marktryck	27
5.2	Deformation	28
6	JÄMFÖRELSE OCH VALIDERING.....	31
7	SLUTSATSER.....	34
8	LITTERATURFÖRTECKNING	35
9	Bilagor.....	36
9.1	Sammanställning marktryckssignaler	36
9.2	Sammanställning analys av punktmoln och deformationsmätning.....	45

1 INTRODUKTION

1.1 Bakgrund

Fraunhofer-Chalmers Centre (FCC) har i en serie forskningsprojekt tillsammans med NCC, Dynapac, Volvo CE och Chalmers studerat bergmaterial, dess beteende och interaktion med maskingeometri vid vägbyggnationsprocesser. För detta används och utvecklas simuleringsmetoden diskret elementmetod (DEM) av FCC. Målet är att tillhandahålla en världsledande simuleringsmjukvara för obundna bergmaterial. Potentiella användare är exempelvis konstruktörer och utförare av infrastruktur, maskintillverkare, akademiska och industriella forskningsutövare. Tekniken är idag mycket kapabel och används skarpt i flera industrier, dock ej lika utbrett inom bergmaterialindustrin. Vad som krävs inom ballast- och infrastrukturindustrin specifikt är att metoden valideras på en industriellt relevant skala för att åstadkomma en stegning i TRL-nivå från 4-5 till 6-8. Denna typ av lyckad TRL-stegning och implementering kan anses vara en reell innovation. Detta kräver enkelt uttryckt ny metodik och mätteknik för fullskaliga bergmaterialexperiment som är anpassade för valideringsjämförelse med simuleringsdata. I SBUF projekt 13638 – ”Fullskaliga försök för DEM validering och undersökning av segregering” har denna typ av metodik utvecklats och DEM modeller av avlastning från hjullastare och bergflakbil har validerats (Quist, Hunger, & Jareteg, 2019). Därmed kan det anses att metoden demonstrerats ha en TRL nivå på 6-8 för fria flöden och högbildning av bergmaterial.

En typisk grusbitumenöverbyggnad (GBÖ) består av bituminöst slitlager, eventuellt bitumenbundet bärlager, obundet bärlager, förstärkningslager samt eventuellt skyddslager på jordterrass. Vid vägbyggnation transporteras och hanteras producerat bergmaterial i flera steg av anläggningsmaskiner till dess att en jämn bädd av obundet bergmaterial har åstadkommit. Därefter påbörjas flera steg av kompaktering. Vid simulering av dessa processer krävs modelleringstekniskt en god representation av partiklarnas form. Modellering av just kompakteringsförloppet kräver även en mer avancerad fysik för beräkning av kontaktkrafterna mellan partiklar än för de processer som involverar fritt flöde. Därför är det naturligt att ”steg två” i ansatsen att utveckla och validera DEM metodiken för hela processen att även utföra valideringsexperiment för kompakteringsprocessen.

Vi utläggning av förstärkningslager eller bärlager är det vanligen ett problem att segregerings/separationseffekter fortplantas så att motsvarande varians i storleksfördelning uppträder i de obundna lagren. Därför används ibland asfaltläggare för att lägga ut väl mixade bärlager. För grövre fraktioner är detta dock svårare. Resultaten angående segregering vid hantering och utbredning av material leder naturligt till frågan: Hur påverkas packningsbeteendet och den resulterande styvheten vid en tydlig skillnad i storleksfördelning på grund av segregering? Genom att strategiskt välja bergmaterialfraktioner för testerna kan även inverkan av segregeringseffekter på kompakteringsprestandan utvärderas och kvantifieras.

För Dynapac har dessa försök även syftet att ge svar på hur kompakteringsbeteendet och prestandan påverkas av olika maskininställningar vid olika storleksfördelningar. Dessa mätningar kräver en bred flora av kompetens och utrustning. Därför har även VTI involverats för att utföra mätningar av krafter i materialbädden medelst marksensorer.

1.2 Relaterade projekt

Projektet DIGIROAD genomförs inom ramen för Vinnovas SIO InfraSweden2030 och syftar till att modellera och simulera bergmaterialets hantering och funktion i väggkroppen. Projektets förlaga är en förstudie som genomförts inom ramen för Chalmers styrkeområde Building Futures där resultaten visade på en stark relation mellan storleksfördelning och bäddstyvhet samt segregeringseffekter vid hantering och utbredning av obundna bergmaterial. Den koordinerande parten i projektet är Fraunhofer-Chalmers Centre (FCC) och industripartners är NCC AB, Volvo CE samt Dynapac. Institutionen för Industri- och Materialvetenskap (IMS) är ytterligare akademisk partner. Efter avslutat projekt är målsättningen att en världsledande och industriellt validerad demonstrator är utvecklad för simulering av bärlager och förstärkningslager samt dess interaktion med undergrunden. Med denna typ av verktyg förväntas ingenjörer och konstruktörer kunna analysera och skapa optimala flexibla överbyggnader med avseende på materialvolym, packningsgrad samt styvhet (kostnad och prestanda).

DIGIROAD är organiserat i ett antal arbetspaket med fokus på två huvudspår: Modellering och simulering med diskret elementmetod (DEM), samt laboratorie- och fältförsök för validering. Den avgörande utmaningen för att lyfta den tekniska mognadsgraden för simuleringsverktyg av denna typ ligger i att lyckas samordna omfattande validerande fältförsök med arbetet att utforma simuleringsmodeller på det matematiska planet. Ingen enskild akademisk eller industriell part har hittills lyckats med denna utmaning, därför krävs ett konsortium som det skapat i DIGIROAD-projektet. NCC bidrar i projektet genom att tillhandahålla kunskap och produktionsmiljöer från tillverkning av bergmaterial i bergtäkt till underhåll och byggnation av färdig väg. Dynapac bidrar med kunskap och erfarenhet av kompaktering genom sin roll som världsledande maskinutvecklare av rullkompaktorer. Det är i denna typ av industriell miljö som valideringsexperiment måste genomföras vilket naturligt är förknippat med direkta kostnader för mark, material, maskiner och arbetstid.

1.3 Annan relaterad forskning

Det är i sammanhanget lämpligt att nämna de studier som genomförts inom ramen för SBUF av Carl Wersäll vid KTH (Wersäll, 2016; Wersäll, Nordfelt, & Larsson, 2018). Wersäll har studerat optimal vibrationsfrekvens för kompaktering genom både laborietester samt med fullskalig rullkompakteringsmaskin vid just Dynapacs anläggning i Karlskrona. Därför har resultaten och erfarenheterna från denna avhandling varit av värde och beaktas vid detaljplaneringen av experimentstudien. Det kan nämnas att de tester som Wersäll genomfört inte var tänkta att nyttjas som valideringsunderlag för DEM eller för studier av segregering, annars hade jämförelse med Wärsells data varit en potentiell möjlighet.

Fullskaliga kompakteringstester med tryckceller har även utförts av Pistor et al (Pistor & Dietmar, 2018; Pistor, Villwock, W., Kopf, & Adam, 2014) vid en bergtäkt utanför Wien, Österrike. I studien studerades två olika typer av excitations-principer för valsen: vibrerande och oscillerande. Fyra olika banor preparerades där statisk, vibrerande, oscillerande och kombinerad vibrerande och oscillerande rörelse testades.

1.4 Syfte

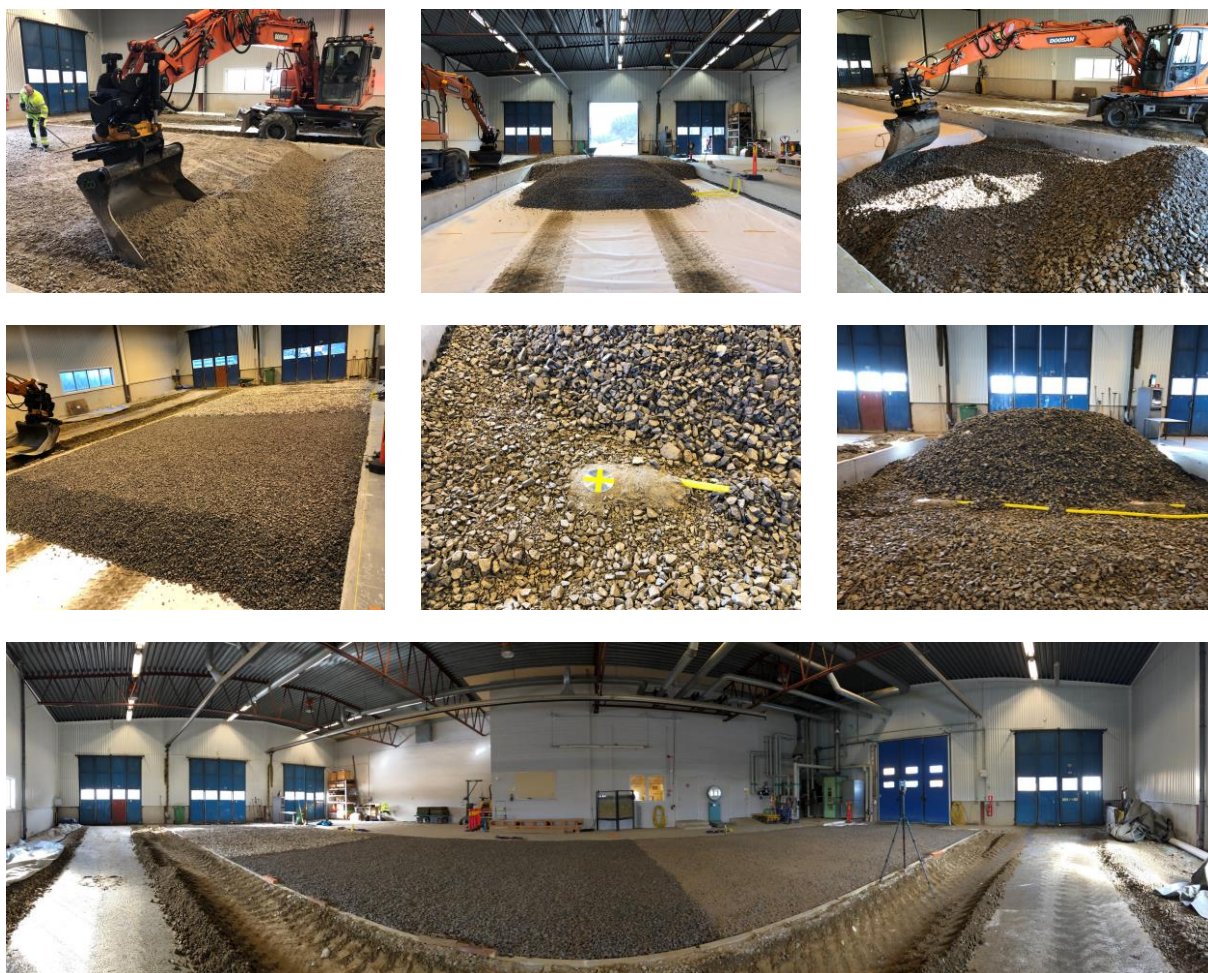
Projektets primära syfte är att ta fram metodik samt fullskaligt experimentellt underlag för validering av simuleringsmodeller för kompaktering av obundna bergmaterial och dess interaktion med maskingeometri. Det sekundära syftet är att vid dessa försök undersöka hur segregeringseffekter påverkar utfallet av dynamisk vibrerande kompaktering.

Följande punkter exemplifierar hur projektet riktar sig mot SBUFs uppsatta mål:

- Mervärde för kund – Ökad vägkvalitet genom minskad variation och ökad prestanda i de obundna lagrens packningsegenskaper.
- Gynnsamma förutsättningar för innovation & teknikutveckling – Digitalisering genom validerad simulerings-teknologi ger en virtuell testmiljö för utveckling av nya maskiner och processer till signifikant reducerade kostnader i relation till fysiska experiment och prototyper.

2 EXPERIMENT OCH MÄTMETODER

Experimenten har planerats i samverkan mellan FCC och Dynapac i Karlskrona. Vid anläggningen i Karlskrona har Dynapac en fullskalig testanläggning inomhus. Anläggningen består av en betongkanal med dimension ca 7x30x1m med tillhörande operatörsrum och verkstad. I betongkanalen kan bergmaterial eller jord placeras. Labbhallen har portar i respektive ände så att kompakteringsmaskiner kan passera från båda håll, se Figur 1.



Figur 1. Fotografier som visar utbredning av material i tre sektioner samt utplacering av trycksensorer.

2.1 Beskrivning av försök

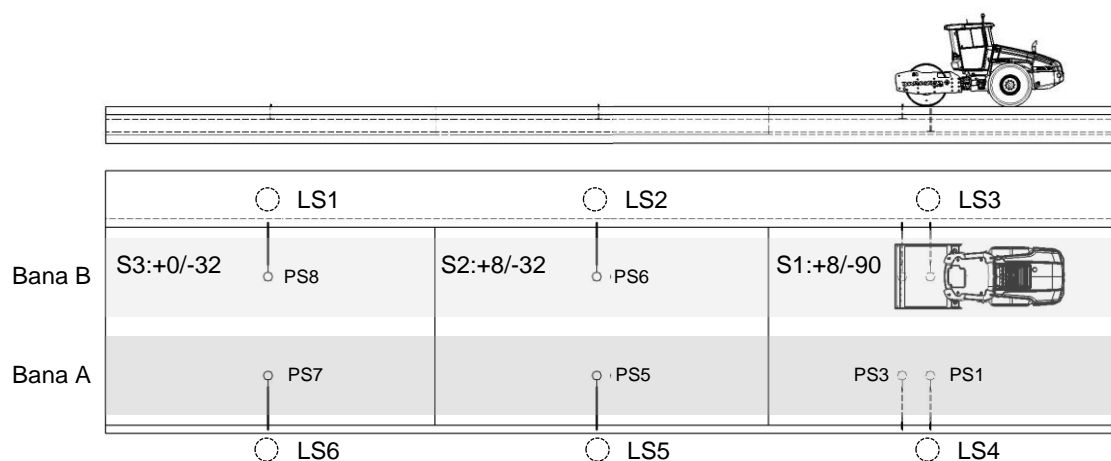
Försöken har planerats på så vis att sex olika tillstånd testats. Dessa innefattar tre olika fraktioner bergmaterial och två maskin-inställningar. De tre materialen placerades ut i kanalen med ungefär en tredjedel av kanalens längd för varje material. De två olika maskininställningarna åstadkoms genom att bereda två parallella banor i kanalen, kallade bana A och bana B. Därmed åstadkoms sex olika tillstånd, se Figur 2. Specialfraktionerna +8/-90, +8/-32 samt standard +0/-32 bärlager erhöles och transporterades från Skanskas bergtäkt Vambåsa. Innan bergmaterialet placerats ut vägdes underlaget av och kompakterades för att åstadkomma en bra grund, 1 meter djup vid +8/-90 fraktionen och 0.5 meter djup för övrig sträcka. Placeringen av sensorer visas schematiskt i Figur 3 samt

faktisk placering i Figur 1. Området med 0.5 meters djup bereddes med en markfiberduk för enklare bortförsel av material efter tester och förenklad utmärkning av trycksensorer. Marktrycksensorer Geokon 3515 placerades ut på 1.0 och 0.5 meters djup under centrollinjen i bana A och bana B i +8/-90 sektionen samt vid 0.5 meters djup för övriga två materialektioner.

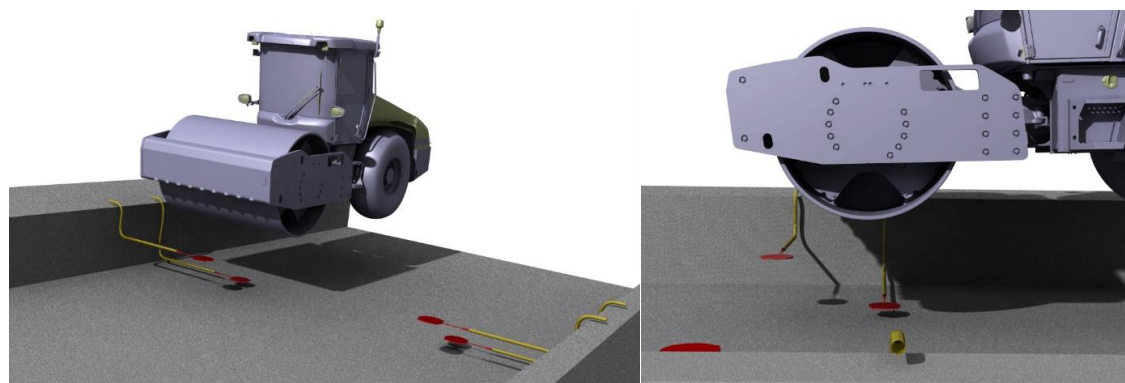
Bergmaterial placerades ut i kanalen med hjälp av grävmaskin från den sekundära kanal som finns parallellt i laboratoriehallen, se Figur 1. Målet var att breda ut allt material utan att trafikera lagren med maskin innan testerna påbörjats. Detta gjordes möjligt genom en mycket skicklig maskinoperatör.

Följande mätmetoder har nyttjats för att mäta tillståndet under och efter testsekvens:

- Partikelstorleksfördelning
- Lös packningsdensitet
- Solid densitet
- Laserskanning
- Avvägning med rotationslaser
- Statisk plattbelastning
- Dynamisk marktrycksensor
- Videofilm
- Sampling av maskinens styr- och mätsystem



Figur 2. Schematisk illustration av test-ytan med förslag på utplacering av tryck-celler på två olika djup.



Figur 3. Visualisering av testuppställning av marktrycksensorer i betongkanal.

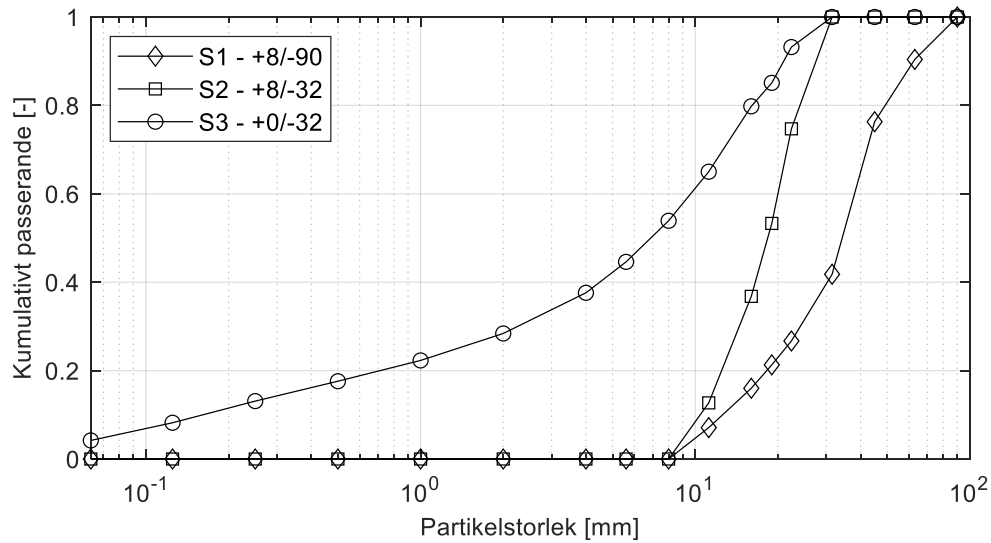
Testsekvensen för kompakteringsexperimenten visas i Tabell 1. För att skapa ett stabilt initialtillstånd genomfördes först två statiska överfarter. Därefter följde 12 dynamiska överfarter med maskininställningar enligt Tabell 1. Laserskanning genomfördes före och efter statiska överfarter samt efter varannan överfart på respektive bana. Rent praktiskt betyder detta att första överfarten på respektive bana gjordes med maskinen körd framåt och den andra med maskinen i backande tillstånd.

Tabell 1. Specifikation av test-serie och maskininställning

Test	Överfart	Frekvens (Hz)		Amplitud / Svängmassa	
		Bana A	Bana B	Bana A	Bana B
1	S1	0	0	Hög	Låg
2	S2	0	0	Hög	Låg
3	P1	26	33	Hög	Låg
4	P2	26	33	Hög	Låg
5	P3	26	33	Hög	Låg
6	P4	26	33	Hög	Låg
7	P5	26	33	Hög	Låg
8	P6	26	33	Hög	Låg
9	P7	26	33	Hög	Låg
10	P8	26	33	Hög	Låg
11	P9	33	33	Låg	Låg
12	P10	33	33	Låg	Låg
13	P11	33	33	Låg	Låg
14	P12	33	33	Låg	Låg

2.2 Bergmaterial och valda fraktioner

Materialet för experimenten beställdes och levererades från Skanska Vambåsa bergtäkt i Nättraby. Täkten valdes på grund av god materialkvalité samt av logistiska skäl då det ligger 12.4 km från testanläggningen i Karlskrona. Standardprodukten bärlager +0/-32 mm togs ut direkt ur produkthög. Fraktionen +8/-32 skapades genom en viktad blandning av makadamprodukterna +8/-16 och +16/-32. Fraktionen +8/-90 togs fram genom att sikta standard förstärkningslager +0/-90. Under utläggning av material i betongkanalen togs prover för siktanalys och fukthalt. Materialen +0/-32 och +8/-32 tvättades, torkades, delades ner och siktades enligt SS-EN 933-1:2012 i fyra specimen för respektive prov. Det grövre +8/-90 materialet tvättades, delades ner och handsiktades med tolk ner till +22.4mm. Fraktioner mindre än 22.4 siktades med konventionell skaksikt. De resulterande storleksfördelningarna ses i Figur 4. Materialens lösa packningsdensitet provades på plats i testanläggningen genom att ett kärl med känd volym försiktigt fylldes med material, ströks av och vägdes. Kärlet var en "Euro container - 400 x 300 x 230mm" med inre volym om 19 liter. Packningstestet upprepades tre gånger per material. Lös packningsdensitet bestämdes till 0.630 för +8/-90, 0.589 för +8/-32 och 0.641 för +0/-32.



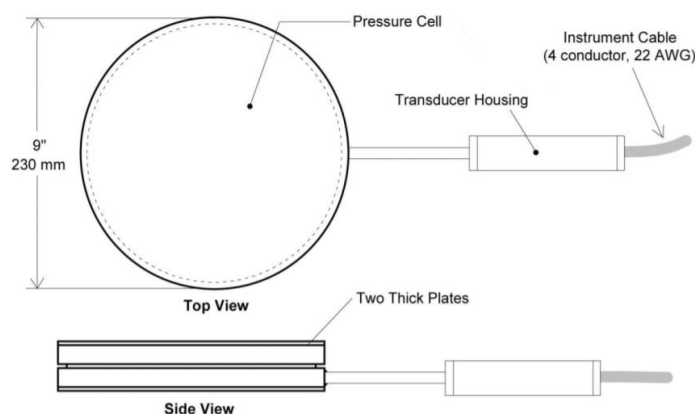
Figur 4. Partikelstorleksfördelning för de tre fraktioner som ingår i försöksserien.

2.3 Dynamisk mätning av marktryck

Marktrycksensorer från Geokon, modell 3515 med extra förstärkning för grov ballast, placerades ut vid åtta positioner, se Figur 5 samt Figur 6 och Tabell 2. Ett mätsystem utvecklat av VTI baserat på National Instruments komponenter och mjukvaran LABView användes för signalinsamling och loggning data. Under förberedelsefasen uppkom mättekniska problem vilket fördröjde projektet med tre dagar. Efter ett stort antal tester och felsökning upptäcktes att bergmaterialet dels var magnetiskt och att materialet i kontakt med sensorns metallhölje fångade upp elektromagnetiska störningar i rummet vilka fortplantades in i sensor och mätsystem. Lösningen blev slutligen att galvaniskt separera marksensor från materialet med ett plastskikt.



Figur 5. Fotografier från försöksberedning. T.v. översikt av trycksensorer utplacerade i kanal. C. Närbild utplacering av trycksensor. T.h. Uppställning av kopplingsbox, ström-matning och mätdator.



Figur 6. Tryckcell modell 3515 från Geokon lämplig för dynamisk mätning av marktryck i grova bergmaterialfraktioner.

Tabell 2. Position för GEOKON 3515 marktrycksensorer

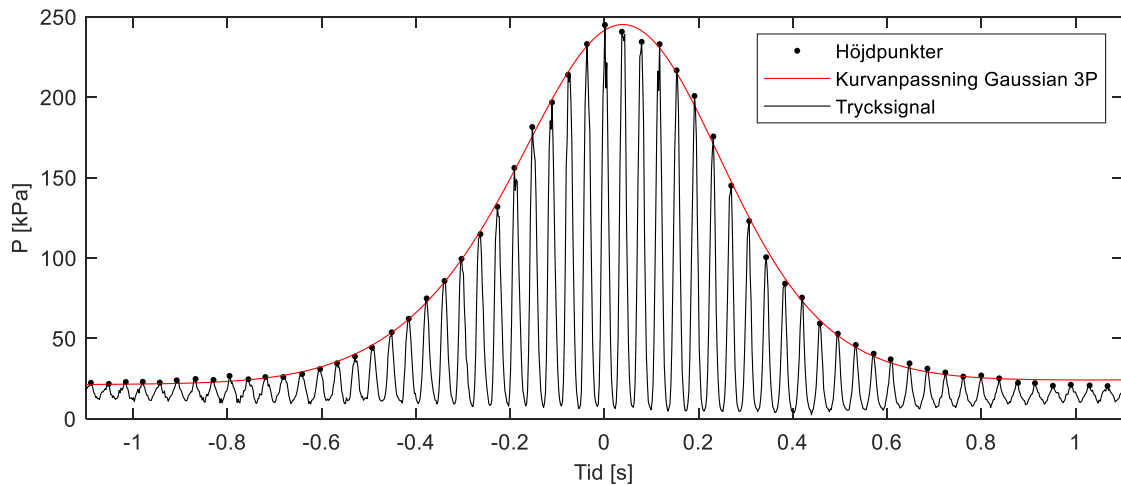
Namn	Bana	Djup [m]	Materialektion [-]	X [m]	Y [m]
Sensor 1	A	-1.0	M1 - +8/-90	1.747	4.971
Sensor 2	B	-1.0	M1 - +8/-90	5.315	4.946
Sensor 3	A	-0.5	M1 - +8/-90	1.747	5.971
Sensor 4	B	-0.5	M1 - +8/-90	5.315	5.946
Sensor 5	A	-0.5	M2 - +8/-32	1.754	13.04
Sensor 6	B	-0.5	M2 - +8/-32	5.281	13.04
Sensor 7	A	-0.5	M3 - +0/-32	1.7465	20.421
Sensor 8	B	-0.5	M3 - +0/-32	5.294	20.439

Vi vältöverfart registrerar trycksensorn den kraftkedja som bildas genom partikel-matrisen från kontakten med valsen ner till ytan på trycksensorn. Vid statisk överfart med konstant hastighet utan vibration ger detta ideals en kurva med formen likt en normalfördelning. Då valsen även har vibration påslagen registrerar sensorn även tryckpulserna på grund av valsens excitation mot underlaget. I Figur 5 illustreras en sådan trycksignal från experimenten. Då signaldata för varje sensor registrerats för varje överfart krävs efterbearbetning för att möjliggöra vidare studie av den tidssekvens där valsen passerar över sensorn.

Signaldata har preparerats i 28 rådata-filer (2+12 ÖF bana A, 2+12 ÖF bana B) med 8 trycksignaler för respektive sensor. Den relevanta tidssekvensen har tagits fram genom att finna indexposition för maximalt tryck och klippa ut ± 2 s centrerat runt tidspositionen för maximalt tryck.

Den ideala trycksignalen har maximalt tryck centrerat för den paraboliska envelopp som framträder. I verklig signal uppträder stokastisk variation vilket gör att metoden för centrerung med maximalt tryck ger en deviation mellan enveloppens center och tidpunkten för maximalt tryck. För att hitta en mer noggrann centrerung, justerat maxtryck samt verklig vibrationsfrekvens har varje höjdpunkt för den överlagrat periodiska signalen sparats. Detta ger möjlighet att studera tidsdifferensen mellan höjdpunkterna för att estimerar verklig vibrationsrekvens. Vi fann vid kurvanpassning att en lämplig funktionsform för envelopp var en tre-terms Gauss-fördelning enligt ekvation (1).

$$f(x) = a_1 e^{-((x-b_1)/c_1)^2} + a_2 e^{-((x-b_2)/c_2)^2} + a_3 e^{-((x-b_3)/c_3)^2} \quad (1)$$



Figur 7. Analys av trycksignal för beräkning av justerat värde för maximalt tryck och tidscentrering.

2.4 Deformationsmätning

Målet med kompaktering är att pressa samman partikelmaterialet och därmed öka packningsdensiteten samt vidare styvheten. Därför är det centralt att kvantifiera progressionen av deformation över sekvensen av överfarter. Det hade även varit av stort intresse att mäta deformationen i marken tidsupplöst över kompakteringsförloppet likt sensordignalen för marktryck. Tyvärr är denna typ av mätning mer komplicerad och det fanns ej möjlighet att implementera av tekniska, tids samt kostnadsskäl. För framtida tester kan det vara av intresse att utvärdera nyttjandet av accelerometrar och geofoner för kontinuerlig mätning av rörelser i marken.

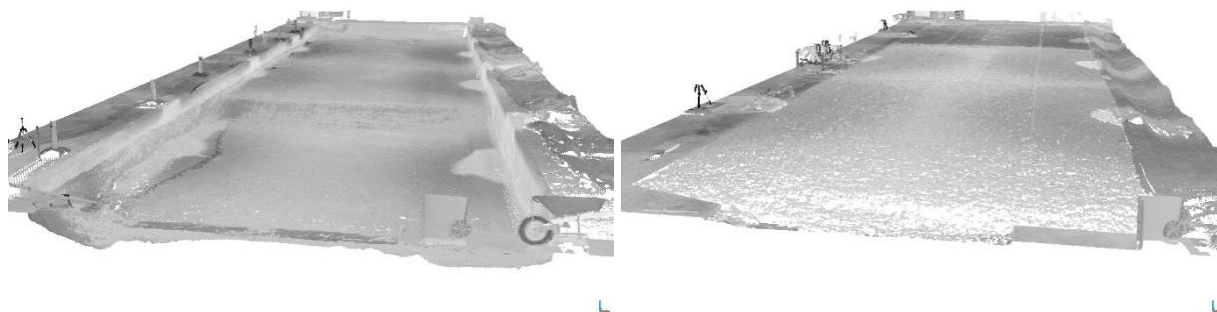
2.4.1 Deformationsmätning med laser-scanning

Den primära mätmetoden för deformation har varit laserskanning. En FARO Focus 3D utrustning har använts tillsammans med ett referenssystem av sfärer som placeras ut i lokalen. För att skapa en god täckning av punkter i hela rummet och för hela testutan genomfördes sex skanningar per mättillfälle. Referenssystemet möjliggör en automatisk registrering av flera punktmoln till ett komplett punktmoln så länge som skannern har fri sikt till varje referenssfär. Utan denna typ av referenssystem är denna typ av registrering relativt tidskrävande och manuell.



Figur 8. Fotografi som visar FARO Focus 3D utrustning på stativ.

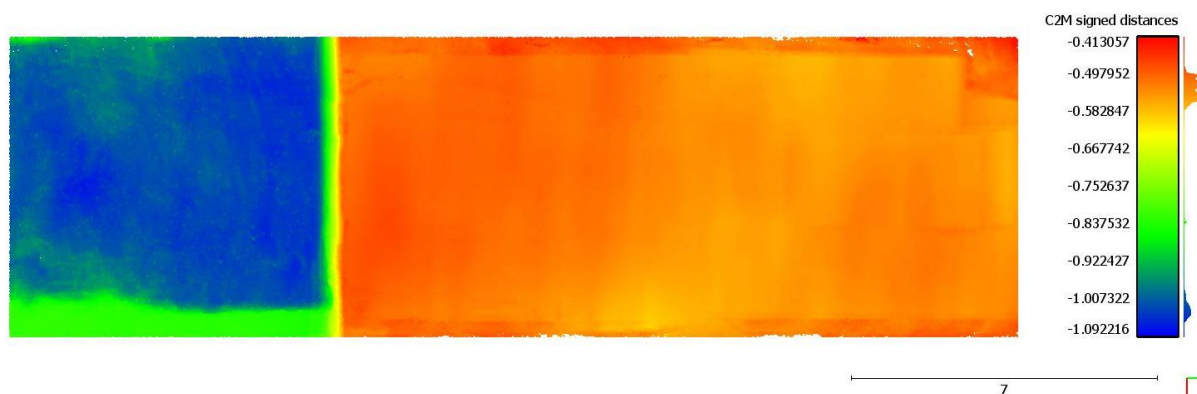
I Figur 9 ses punktmoln för laboratoriehallen med tom respektive fylld betongkanal. Denna typ av data möjliggör också noggrann beräkning av skillnader mellan tillstånd. Man kan alltså beräkna exempelvis avståndsskillnader mellan två moln samt estimerar volymsdifferensen. På så vis kan bulkvolymen bergmaterial beräknas samt massan om man känner till materialets lösa packningsdensitet.



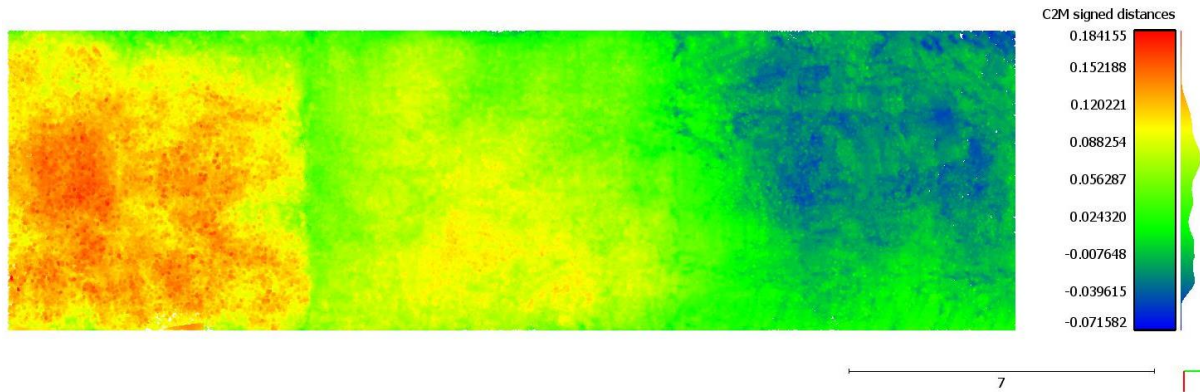
Figur 9. Punktmoln för tom kanal t.v. och fylld kanal t.h.

I Figur 10 visas distansskillnaden vertikalt mellan den tomma kanalen och rummets nollnivå. Bilden visar att det i blå sektion är ca 1m djupt och i orange sektion är ca 0.5 m djupt. Utöver detta ses även mindre variationer i höjd samt ett stråk i den djupa sektionens nedre kant som ett grävts ut till korrekt nominellt djup. I Figur 11 visas motsvarande bild för den fyllda kanalen. Även här kan man notera en viss varians i topografi med en tendens till för hög nivå i den grövre +8/-90 sektionen och en lägre nivå än nominellt i sektionen med standardbärlager.

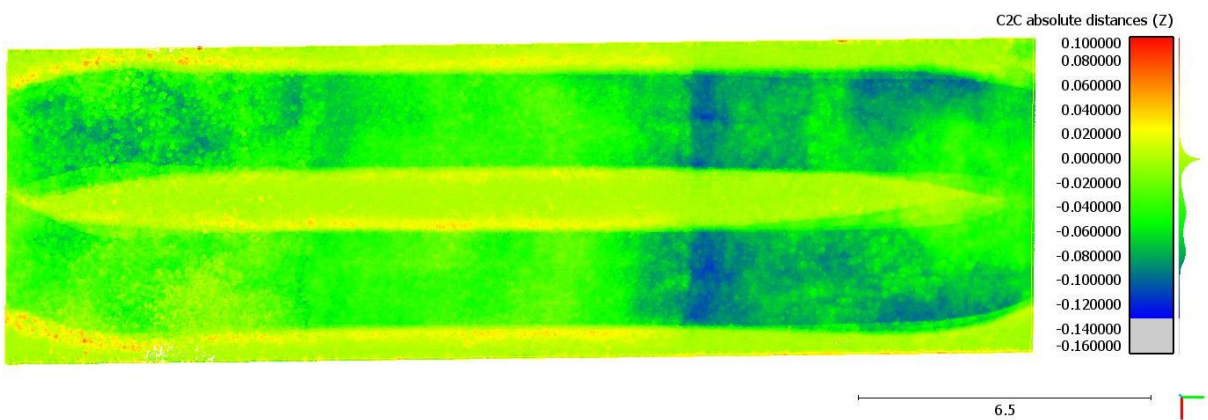
Som exempel på skannat punktmoln efter överfart visas tillståndet efter passage 3-4 i Figur 12. Här ses de två banorna tydligt samt den ryggås av material som trycks upp mellan banorna samt mot kanterna. Det bör noteras att färglegenden för de tre bilderna har olika värden för respektive max och min-nivå.



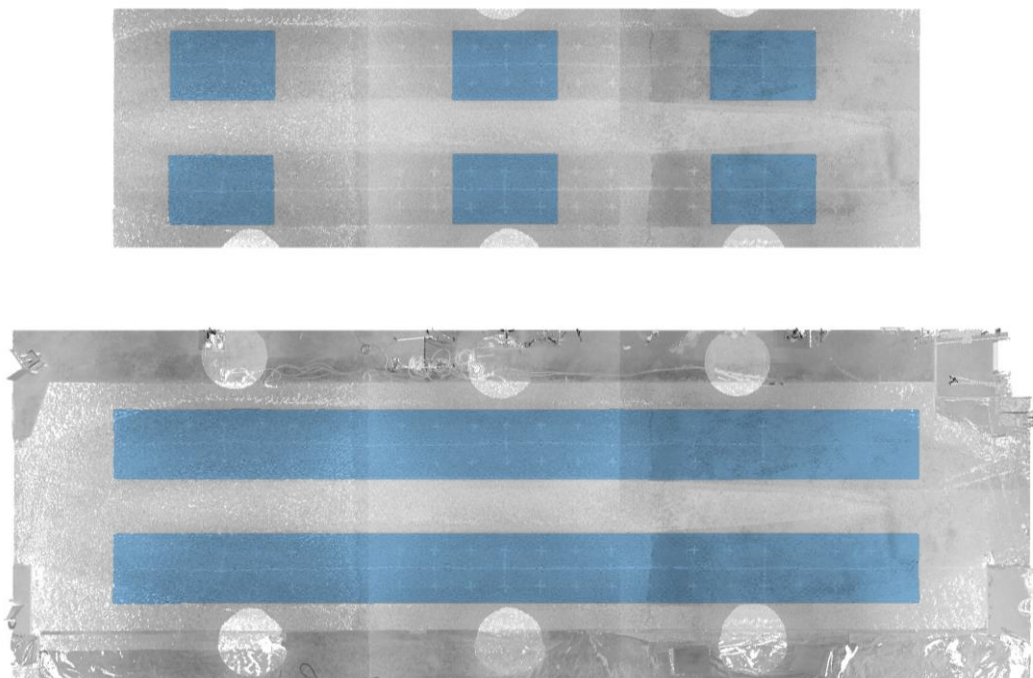
Figur 10. Illustration av punktmoln för tom kanal. Punkterna är färgade enligt vertikal position från referensnivån.



Figur 11. Illustration av punktmoln för fylld kanal med de tre materialektionerna. Punkterna är färgade enligt vertikal position från referensnivån.



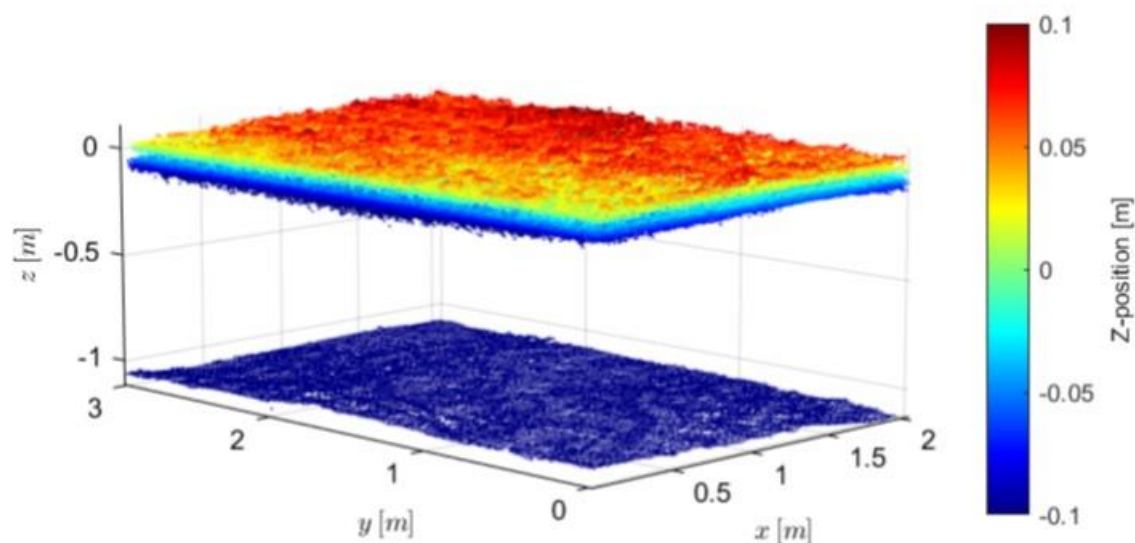
Figur 12. Illustration av punktmoln för nivån efter dynamisk passage 3 och 4 (test nr 5-6). Punkterna är färgade enligt vertikal position från referensnivån.



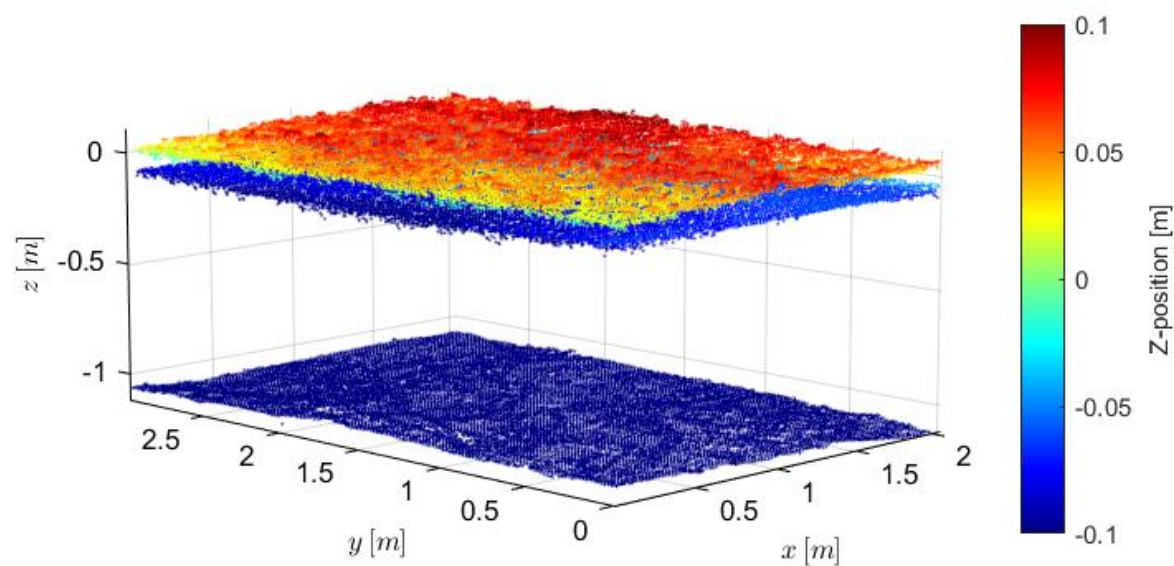
Figur 13. Laser-skannat punktmoln och de selektionsområden som valts ut för vidare analys. Bilden visar även de målade färgmarkeringar som indikerar positioner för manuell laseravvägning med rotationslaser.

Totalt innehåller alla de punktmoln som uppmäts ett flertal miljoner punkter och de ger en god detaljrikedom. För att vid nyckelpositioner beräkna ett specifikt skalärt värde för deformationen på grund av kompaktering måste dock efterbehandling göras. I Figur 13 ses två nivåer för segmentering av data, dels klippning av punktmoln-data för respektive bana, och dels för ett område runt varje trycksensor. Denna segmentering har genomförts för alla punktmoln så att höjdtopografin efter varje kompakteringssekvens kan skattas.

I Figur 14 plottas ett exempel på alla punktmoln för området runt sensor PS1 i bana A. Det är svårt att tydligt se att det är flera punktmoln i samma bild, dock ses den orörda ytan tydligt samt den slutgiltiga nivån i Figur 15. Den totala deformationen efter statisk och dynamisk överfart är ca 150-200 mm i detta exempel.



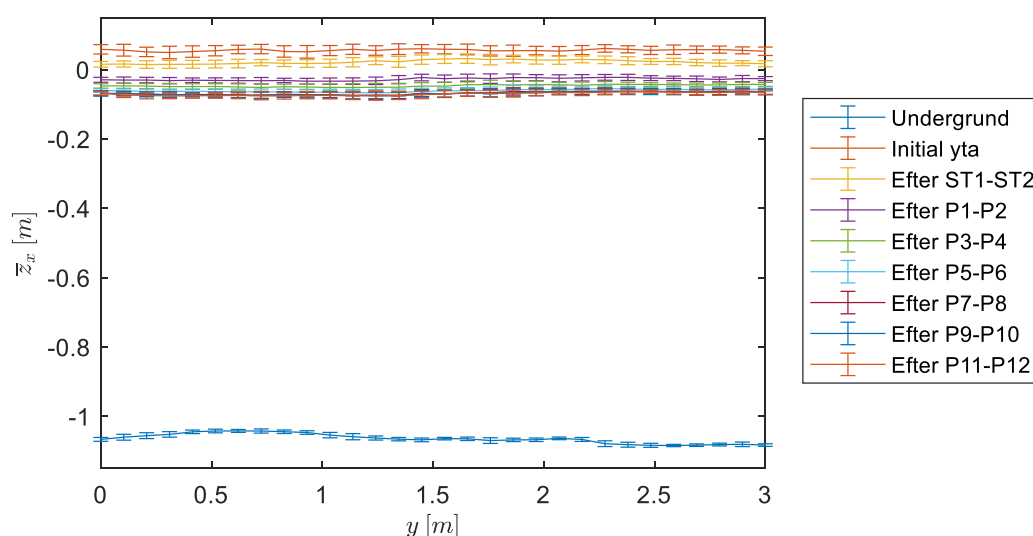
Figur 14. Punktmolnsdiagram för området runt sensor PS1, bana A, material +8/-90. Bilden visar laser-skannat moln för undergrund, orörd initial yta samt nivåer efter passage 1-14.



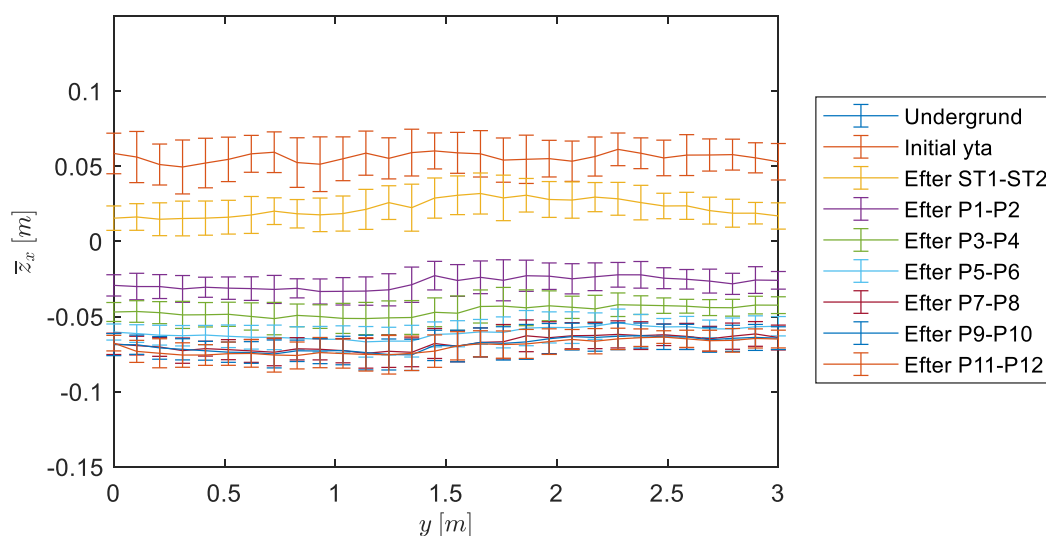
Figur 15. Punktmolnsdiagram för området runt sensor PS1, bana A, material +8/-90. Bilden visar laser-skannat moln för undergrund, orörd initial yta samt nivå efter dynamisk passage nr 14.

Nästa steg i behandlingen av punktmolnsdata är att beräkna medelhöjden samt variansen i x-riktningen. Man kan då beräkna höjdnivån i y-led samt variansen, vilket demonstreras i Figur 16. Man kan lägga märke till en viss ojämnhet i undergrunden men relativt stabil höjd i längdled för topp-ytan.

För att visa variansen i data mer tydligt har även samma topografiska data plottats utan undergrunden i Figur 17. Värt att notera är att en relativt stor andel av deformationen sker vid de två statiska överfarterna samt de två första dynamiska överfarterna. Komplet redovisning av grafer för de sex olika sensorområden som studerats finns i Bilaga 9.2.



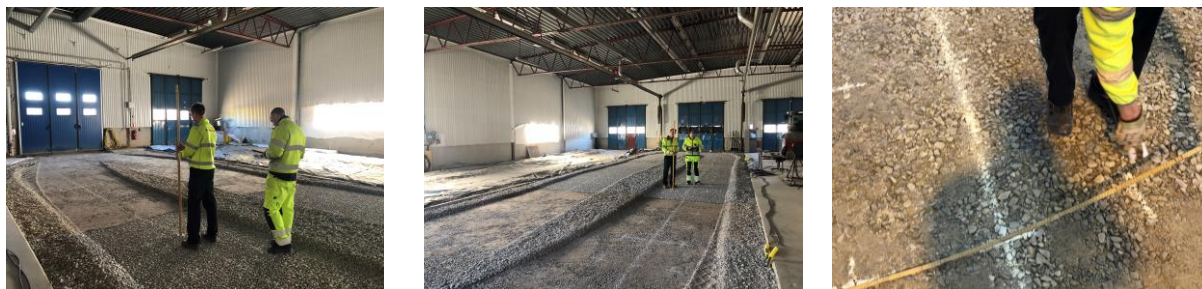
Figur 16. Diagram för medelhöjdnivån längs med y-axeln för en 500mm bred centrerad segmentering i x-led ur punktmolnet som visas i Figur 14. Medelvärdering har gjorts över 30 sektioner och felstaplarna visar en standardavvikelse.



Figur 17. In-zoomat diagram för medelhöjdnivån längs med y-axeln för en 500mm bred centrerad segmentering i x-led ur punktmolnet som visas i Figur 14. Medelvärdering har gjorts över 30 sektioner och felstaplarna visar en standardavvikelse.

2.4.2 Deformationsmätning med laseravjämning

Deformation (sättning) har även uppmätts genom laseravjämning för ett markerat nät av punkter för varje bana. I Figur 18 visas fotografier av hur projektdeltagare markerar mätpunkter samt genomför nivåregistrering..



Figur 18. Fotografi som visar genomförande av manuell laseravjämning med rotationslaser över ett rutnät.

2.5 Mätning av packning och styvhet

Markens styvhet har uppmätts genom statisk plattbelastning DIN 18134. Bilder från genomförandet av styvhetsmätning kan ses i Figur 19. Kompakteringsmaskinen kördes ut i respektive bana som motvikt till hydraulcylindern. Eftersom valsen ej hade vibration påslagen har sannolikt denna trafikering ej nämnvärt påverkat kompakteringen.



Figur 19. Fotografi visandes genomförande av statisk plattbelastningstest DIN 18134.

3 MODELLERING OCH SIMULERING

Följande stycke beskriver kortfattat DEM samt hur metoden implementerats för modellering och simulering av vibrerande rullkompaktorer inklusive interaktion med partikelsystem.

3.1 Diskret elementmetod (DEM) och implementation

Diskret elementmetoden (DEM) är en numerisk metod för att simulera populationer av partiklar. Metoden har historiskt tillämpats för en mängd industriella problem, och har tack vare den alltjämt ökande beräkningskraften kunnat appliceras på större och större problem. I tidiga tillämpningar av metoden användes främst sfäriska form för att modellera partiklarna, och senare även sammansatta sfäriska former, så kallade multisfärer. Den sfäriska partikeln har fördelar i termer av att den är enkel att räkna på; kraften mellan sfäriska partiklar kan enkelt evalueras som en funktion av små överlapp mellan sfärerna. Dock är sfäriska partiklar också kraftigt begränsande då mycket av både det statiska och dynamiska beteendet hos irreguljärt formade partiklar styrs av just formen på partiklarna. Till viss del kan avsaknaden av form kompenseras med adderad friktion, rullfriktion och/eller kohesion mellan partiklarna, men detta har både matematiska och simuleringsmässiga nackdelar.

Under senare år har DEM utvecklats snabbt mot att inte bara utgå från sfäriska modellpartiklar utan även med polyedriska partiklar, Polyedriska modellpartiklar kan t.ex. genereras genom att, för det studerade problemet, typiska partiklar 3D-scannas till triangulerade geometrier. Polyedrar ställer större krav på beräkningsmjukvaran då man istället för de enkla uttrycken för överlapp mellan sfäriska objekt behöver räkna faktisk volym mellan de triangulerade objekten. Inte minst ökar mängden beräkningar som behöver göras för varje kollision, och en polyeder-kod ställer därför högre krav på mjukvarans implementation och de algoritmer som används.

FCC har sedan 2016 utvecklat en egen DEM mjukvara, Demify®, vilken till en början var baserad på sfäriska partiklar men sedan 2020 också kan användas för att simulera polyedrar. Under våren 2020 bedrevs ett examensarbete vid FCC där studenten Adam Bilock tillsammans med Klas Jareteg som handledare utvecklade en DEM-lösare för simulering av polyedrar genom nyttjande av GPU:er (Graphical Processing Units). För en fullständig beskrivning av denna lösare, dess egenskaper och prestanda, hänvisas läsaren till projektets slutrapport (Bilock, 2020). Till skillnad mot flera av metoderna från den öppna litteraturen, så är Demifys polyederlösare inte begränsad till konvexa partiklar, utan klarar direkt att simulera på icke-konvexa geometrier utan att använda dekomposition på partiklarna.

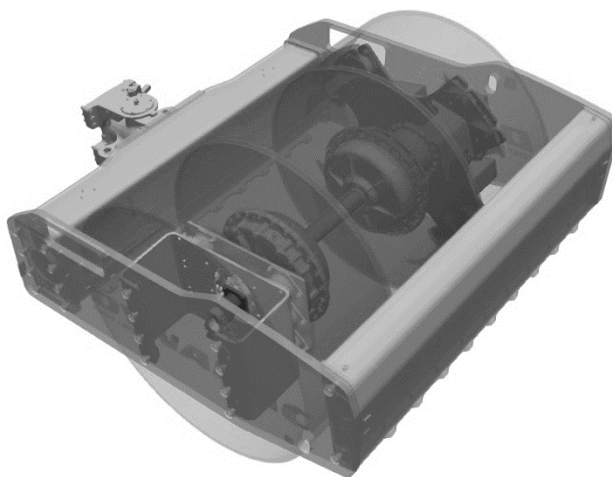
För att åstadkomma industriellt relevanta simuleringar är alla delar av Demify kodade för beräkningar på grafikkort (så kallade GPU:er). En modern GPU har fördelen att den kan utföra massivt parallella beräkningar på ett energi- och kostnadseffektivt sätt och givet välformulerade algoritmer kan en mångfaldigt högre prestanda uppnås på en GPU jämfört med en CPU på en normal dator. I tillägg till den unika implementation av kontakter och överlapp mellan polyedrarna så utnyttjas också ett snabbt sökträd som gör att icke-kolliderande objekt snabbt kan filtreras bort och inte betraktas när krafterna mellan objekten beräknas. Den formulering som används för skalar linjärt med antalet partiklar

simulerade och med antalet trianglar i varje modellpartikel och totalt sett uppnås en världsledande prestanda.

Demifys användargränssnitt består av två delar, dels ett API interface baserat på Python och dels ett grafiskt användargränssnitt implementerat på IPS-plattformen. Python-interfacet har fördelen att det ger ingenjören stor möjlighet att på ett flexibelt sätt interagera med lösaren, vilket i arbetet med denna rapport varit en grundsten för kopplingen mellan partiklarna och maskinmodellen som styrs med hjälp av flerkroppsdynamik. Det grafiska användargränssnittet har här använts för att visualisera interaktionen mellan partiklar och maskin, och tack vare en unikt effektiv visualiseringsmotor kan ett stort antal partiklar snabbt och effektivt visualiseras och studeras i mjukvaran.

3.2 Maskinmodell och flerkroppsdynamik

Inom ramen för projektet har examensarbetet "A Coupled Multibody and Discrete Element Approach for Roller Compaction Dynamics" bedrivits genom studenten Joar Göransson Axås. Projektets målsättning var att utveckla en flerkroppsdynamisk modell av en vibrerande rullkompaktor och koppla samman denna modell med diskret elementmodell av obundna material. För ändamålet utvecklades en generell lösare i Python samt en koppling till Demify®. Den utvecklade lösaren användes i examensarbetet för att konfigurera en representation av en Dynapac CD3500D maskin, se Figur 20.



Figur 20. Visualisering av CAD-modell av den främre ramkonstruktionen för en Dynapac CA3500D.

Modellen inkluderar stelkroppar för den främre ramen, inklusive ram, drivskiva, excenteraxel, vibb-skiva, gummibussningar och vals. Dessa kroppar konfigureras med, massa, mass-centrum, tröghetsmoment, bivillkor och leder för att åstadkomma korrekt mekanik och rörelse. För en fullständig beskrivning av den utvecklade och validerade lösaren för flerkroppsdynamik i Python, DEM-koppling samt simuleringsresultat, hänvisas läsaren till examensarbetets slutrapport (Axås, 2020).

3.3 Konfiguration av DEM-modell

De initiala simulering som gjordes under våren 2020 baserades på en partikelmodellrepresentation ofta benämnd som multisfär. Denna representation och metod bygger på att positionera en grupp sfärer för att så väl som möjligt återskapa och representera formen för ett underliggande objekt, som exempelvis en bergmaterialpartikel. Som beskrivet ovan har denna metod kraftiga begränsningar och polyeder-metoden är att

föredra. Systemet har därmed iterativt utvecklats under projektet från simulering med enskilda sfärer, till multisfärer, och slutligen med polyedrar.

De simuleringsresultat som presenteras i denna rapport baseras på automatiserad sekvens av del-simuleringar:

1. Generering av initial partikelbädd
2. Avjämning av yta
3. Simulering av statisk överfart
4. Simulering av dynamisk överfart 1
5. Simulering av dynamisk överfart 2

Dimensionerna för bädden är 3.5x2.5x1.0 m och valsen initieras mot bädden 500 mm in och lyfts upp automatiskt när den når 95% av systemets längd. Ett så stort system som möjligt är naturligtvis fördelaktigt för att nå ett stabilt jämviktsläge. I praktiken krävs att systemets storlek och därmed antalet partiklar balanseras mot beräkningsprestanda och hur lång tid det tar att slutföra beräkningar. Parametrar för material, interaktioner och antal partiklar kan ses i Tabell 3. För en visuell representation av systemuppställningen hänvisas läsaren till exempelvis Figur 29 i kapitel 5. I denna rapport har endast den grövsta fraktionen +8/-90 studerats för jämförelse. För att utvärdera inverkan av storleksfördelning har två simulerings-serier genomförts. Den första med uniform storleksfördelning +70/-90 och en andra med uniform storleksfördelning +30/-60. En mer utvidgad studie med övriga material och fraktioner kommer publiceras i vetenskapliga tidskrifter.

Tabell 3. Parametrar för DEM modell

Parameter	Detalj	Enhet	Värde
Friktion	partikel-partikel	[-]	0.7
	partikel-stål	[-]	0.45
	partikel-mark	[-]	0.8
Restitution	partikel-partikel	[-]	0.2
	partikel-stål	[-]	0.15
	partikel-mark	[-]	0.08
Elasticitetsmodul	Granit	[Pa]	2.0e9
	Stål	[Pa]	210e9
	mark	[Pa]	1.0e8
Poisson's ratio	granit	[-]	0.27
	stål	[-]	0.3
	mark	[-]	0.27
Densitet	granit	[kg/m ³]	2750
	stål	[kg/m ³]	7800
Polyeder upplösning	# trianglar	[#]	20
Tidssteg		[s]	1.0e-5
Antal partiklar	SA1.1 +70/-90	[#]	73'443
	SA1.2 +30/-90	[#]	590'305

Beräkningar har genomförts på FCCs beräkningskluster med en nod bestyckad med ett Nvidia V100 kort. Beräkningstiden för hela sekvensen enligt ovan varierar mellan ett antal

timmar till ett antal dagar beroende på storleksfördelning och hur många trianglar som används för att lösa upp varje bergmaterialpartikel.

3.4 Dataefterbehandling

För att åstadkomma en jämförelse mellan simulering och experiment har virtuella sensorer utvecklats. De två responsvariabler som legat i fokus är marktryck samt bäddens plastiska deformation och packning. För marktryck har en platta med motsvarande area som i experiment placerats vid 1.0m och 0.5m djup. Plattan vid 0.5m djup är placerad i materialbädden som en rörlig stelkropp med tvång för horisontell rörelse.

I DEM känner man visserligen till position och hastighet för alla partiklar och skulle kunna nyttja detta för att skatta bäddens deformation. Dock uppstår en felkälla då partiklarnas mass-centrum ej är representativ för den verkliga ytan. Eftersom den experimentella serien innefattar laserskannade punktmoln som indata för beräkning av plastisk deformation gjordes valet att utveckla en strålsparningsmetod som åstadkommer motsvarande data från simulering. Genom att över ett rutnät skjuta strålar vertikalt kan skärningspunkten mellan partiklarnas triangulering och strålen identifieras. Resultatet blir ett punktmoln mycket likt de i experimenten. Denna metod möjliggör nyttjande av samma algoritm för deformationsberäkning från punktmoln som för experimenten.

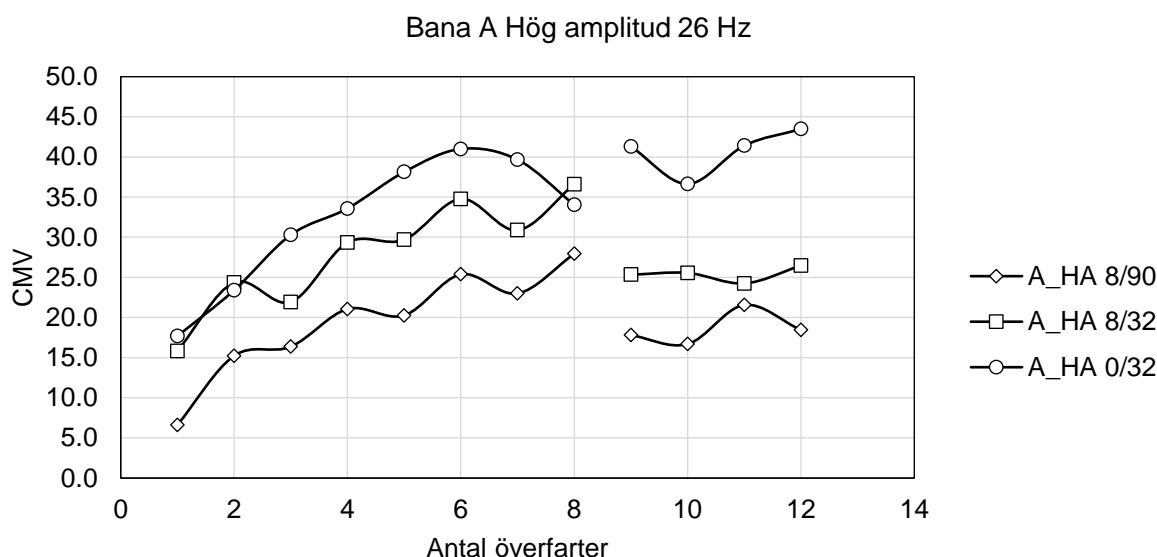
4 EXPERIMENTELLA RESULTAT

Följande stycke beskriver och sammanställer experimentella resultat från den metodik som beskrivits i kapitel 2.

4.1 Kompaktering och styvhet

4.1.1 Bana A: 8 överfarter HA, 26 Hz + 4 överfarter LA, 33 Hz

I Figur 21 visas CMV (Compaction Meter Value) som är ett dimensionslöst mått på markens styvhet. Det beräknas genom att man mäter valsens respons mot underlaget. Ju mjukare underlaget är, desto mer "linjärt" rör sig valsen, dvs responsen är en relativt ren sinussignal. Ju hårdare marken blir, desto mer olinjärt rör sig valsen, dvs det blir inverkan av övertoner i den mätta valsaccelerationen/rörelsen. Relationen mellan amplituden på första övertonen och grundtonen (vibrationsfrekvensen) kan beräknas ur ett FFT-diagram och omvandlas till CMV-värdet.



Figur 21. CMV (Compaction Meter Value) för 8 överfarter HA @ 26 HZ + 4 överfarter LA @ 33 Hz på de tre olika fraktionerna.

Ur Figur 21 ser vi att ju "grövre materialet är" desto lägre styvhet uppnår vi när vi har tagit bort finmaterialet under 8 mm. Man ser också att +0/-32-materialet ger snabbast styvhetstillväxt och högst absoluta styvhetsvärden, vilket ju är helt väntat. Materialen utan finmaterial är ju inte "stabila" i den mening att det fina materialet lägger sig runt det grövre och stabiliserar detta. Tittar man på den höga amplituden ser man att styvheten faller för +0/-32-materialet de sista överfarterna, vilket händer när dubbelhopp eller sk "bouncing" uppstår. Det innebär inte nödvändigtvis att materialets styvhet sjunker i verkligheten, men CMV-värdet reagerar på det viset när dubbelhopp uppstår.

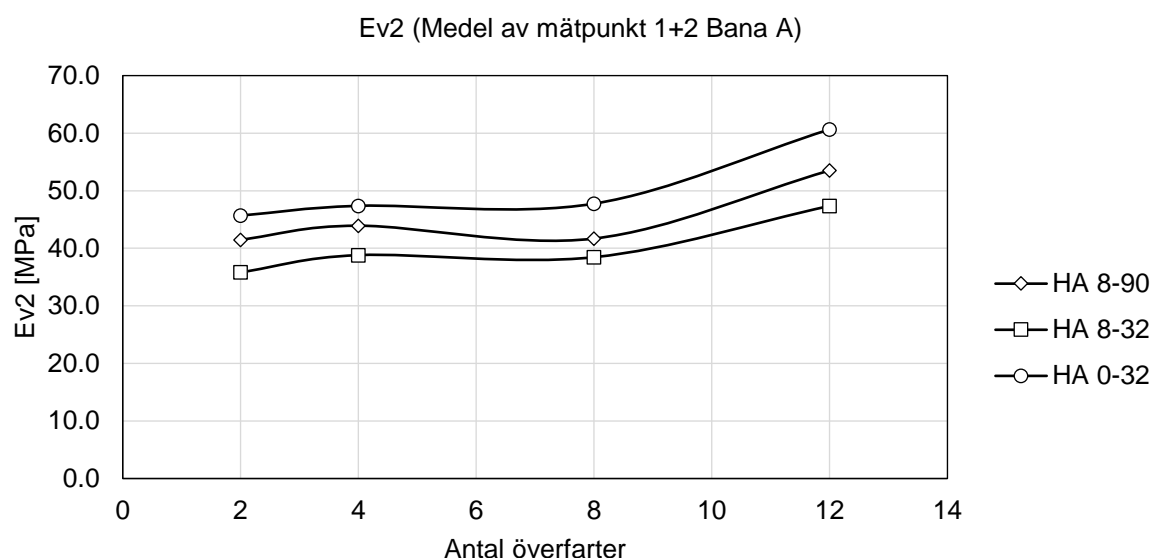
Vidare ser man att kurvorna för de grövre materialen är "vågiga" +0/-32 visar en mycket mindre tendens till vågor i kurvan. Detta beror på att man får mindre skillnader i CMV-värde beroende på om maskinen körs framåt eller bakåt. Sammanfaller valsens rotationsriktning med excenterns får man en lite annorlunda kontaktbild mellan vals och underlag, än om valsens och excenterns rotationsriktning är motriktade. Detta blir särskilt tydligt på "lösa" underlag (+8/-32 och +8/-90) för där får man en mycket kraftigare bogvåg

framför valsen i dess färdriktning och detta påverkar kontaktbilden. I ett stabilare material (0-32) blir inte detta lika tydligt. Att det har med excenterns och valsens rotationsriktning att göra kan man se om man jämför kurvorna ovan.

I figur 1 visas samtliga överfarter körda i bana A, dvs 8 st med hög amplitud på 26 Hz och 4 st på låg amplitud med 33 Hz. Man ser att för de grova materialen så "sjunker" CMV-värdet då man går över till låg amplitud. Detta innebär oftast inte att materialets styvhet har sjunkit, utan är återigen ett fenomen i CMV-värdet som speglar att mätvärdet är beroende av amplituden och frekvensen. Det hade varit mycket bra om man kunde hitta ett "ombord-mätvärde" som var helt oberoende av maskinens frekvens, amplitud, hastighet etc, men något sådant har ingen lyckats ta fram än.

Den vikande trenden på kurvan för +0/-32-materialet, som kan observeras mellan 6:e och 8:e överfarten, beror på att maskinen kom in i sk "bouncing" eller dubbelhopp. Vid detta tillstånd sjunker CMV-värdena kraftigt, även om den verkliga styvheten inte minskar. Att CMV-värdena sjunker är en effekt av hur värdet beräknas.

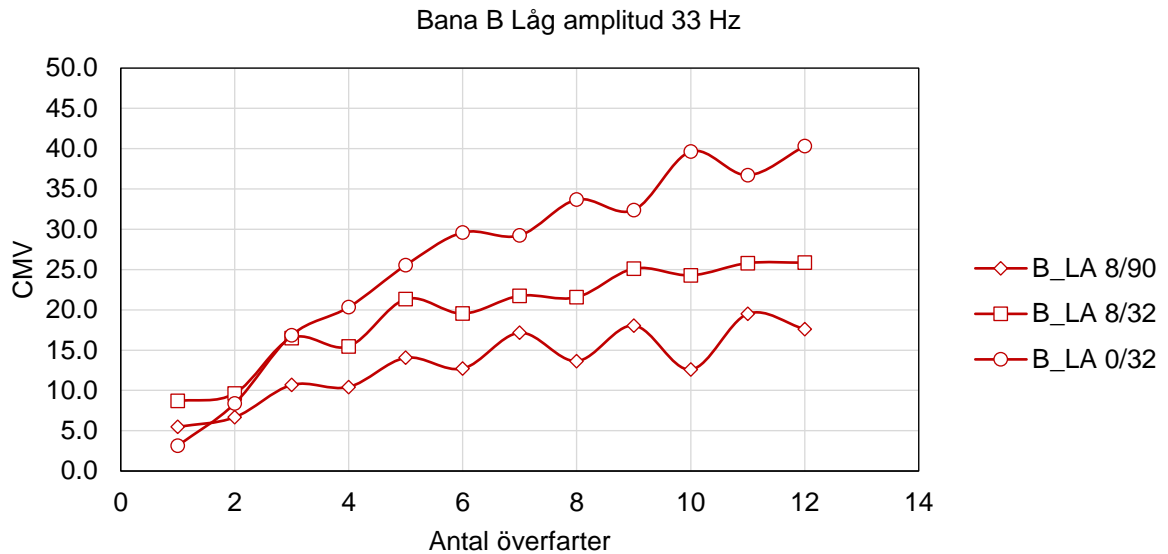
Figur 22 visar den statiska plattbelastningens andra pålastningscykel (Ev2) för bana A och de tre olika fraktionerna.



Figur 22. PLT (Static plate load test) för 8 överfarter HA @ 26 HZ + 4 överfarter LA @ 33 Hz på de tre olika fraktionerna.

4.1.2 Bana B: 12 överfarter LA, 26 Hz

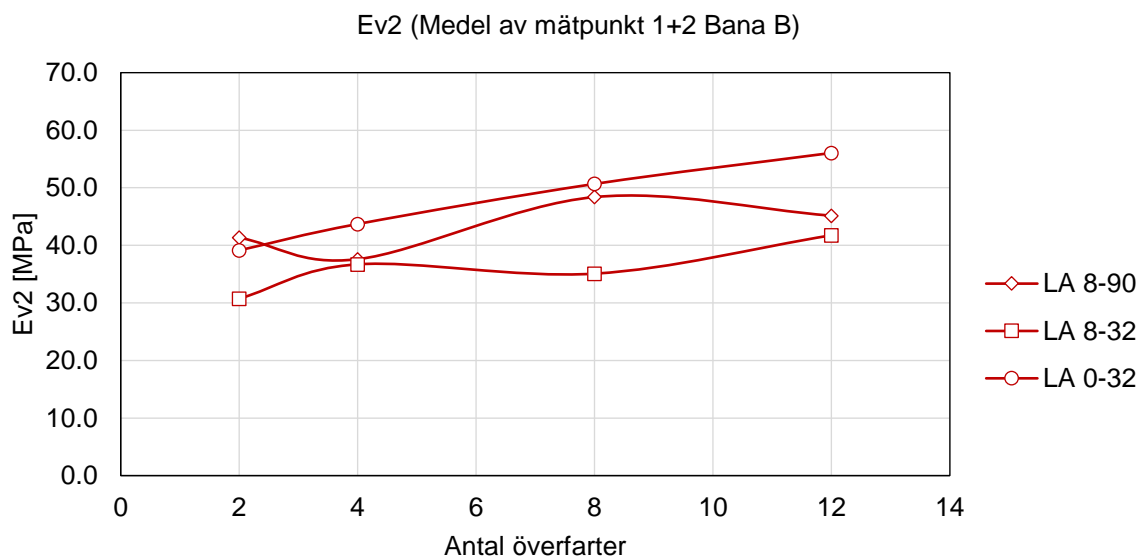
I Figur 23 visas CMV (Compaction Meter Value) som är ett dimensionslöst mått på markens styvhet för samtliga överfarter i bana B. Precis som för bana A är det tydligt att 0-32-materialet ger den högsta styvhetstillväxten och den högsta absoluta styvheten, helt i linje med förväntningarna. Även i bana B är den "dynamiska styvheten" mätt med CMV lägst för +8/-90-materialet. Den blygsamma styvhetstillväxten för materialen utan fraktioner under 8 mm, förklaras återigen med att dessa material får en låg stabilitet eftersom finmaterialet inte kan fylla de hålrum som uppstår mellan de grövre partiklarna och på så sätt stabilisera dessa.



Figur 23. CMV (Compaction Meter Value) för 12 överfarter LA @ 33 Hz på de tre olika fraktionerna.

I bana B observeras ingen fallande styvhet för +0/-32-materialet då antalet överfarter överstiger 6 st (jfr med Bana A). Detta beror på att maskinen inte kommit in i "bouncing" någon gång under körning i bana B. Detta beror i sin tur på att risken för "bouncing" ökar med ökad amplitud. Eftersom maskinen endast körts på låg amplitud i bana B har "bouncing" kunnat undvikas.

Figur 24 visar den statistiska plattbelastningens andra pålastningscykel (Ev2) för bana B och de tre olika fraktionerna.



Figur 24. PLT (Static plate load test) för 12 överfarter LA @ 26 Hz på de tre olika fraktionerna.

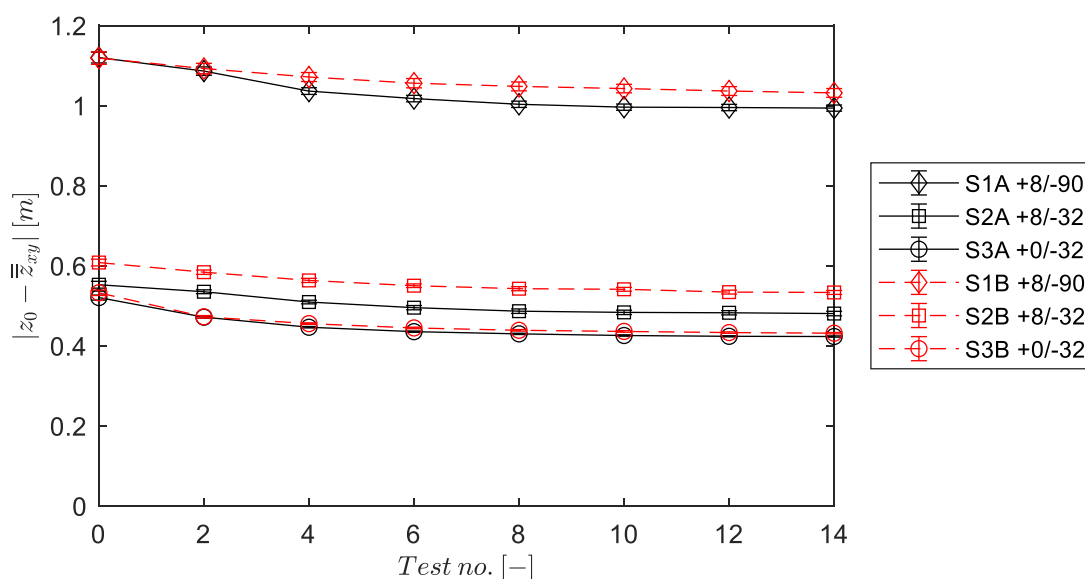
I figur 4 ser man att styvheten ökar i princip linjärt med antalet överfarter för +0/-32-materialet. Detta är förväntat, då CMV-värdena i figur 3 också indikerar en någorlunda linjär ökning. Notera att eftersom varken amplitud eller frekvens ändrats under de 12

överfarterna på bana B, bör ”beteendet” i CMV och PLT stämma överens, vilket de verkar göra i detta fall. Precis som för bana A uppnås den högsta styvheten för +0/-32-materialet.

När det gäller styvheten mätt med PLT i +8/-32 och +8/-90 är kurvorna inte helt tydliga. Då maskinen endast körts på låg amplitud, har ingen packning erhållits på djupet. Detta kan påverka plattbelastningsresultaten och förklara varför kurvorna i de mer ”ostabila materialen” inte har en tydlig trend.

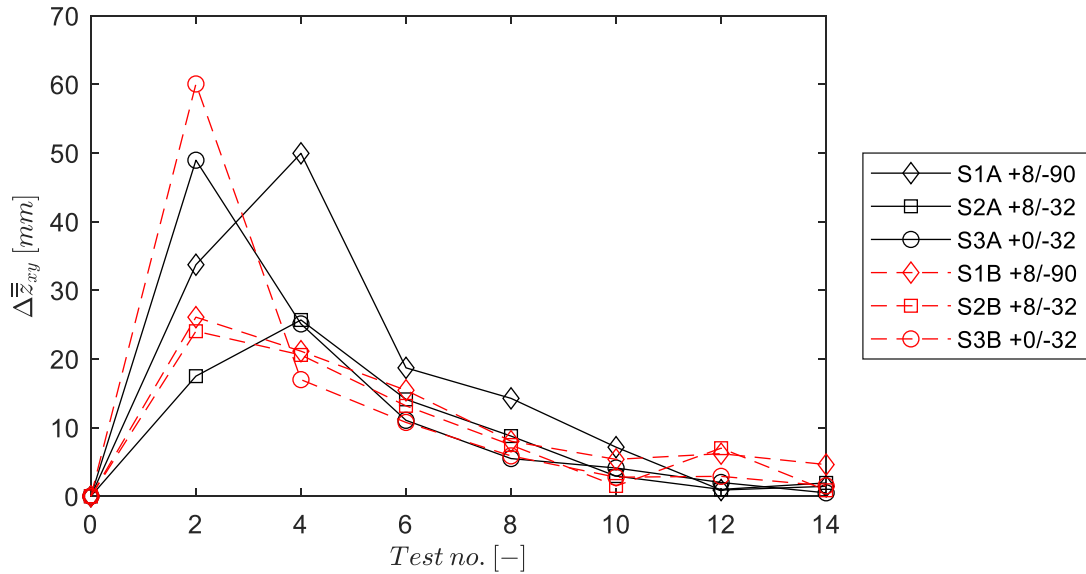
4.2 Deformation

I Figur 25 visas deformationsprogressionen med avseende på avståndet mellan undergrund och yt-nivå för sekvensen av överfarter. För +8/-90 samt +8/-32 sektionen har en större deformation uppmätts för bana A (hög amplitud, låg frekvens) än bana B (låg amplitud, hög frekvens). För sektionen med +0/-32 är skillnaden relativt liten mellan banorna.



Figur 25. Distans mellan yt-nivå och undergrund för 2 statiska och 12 dynamiska överfarter.

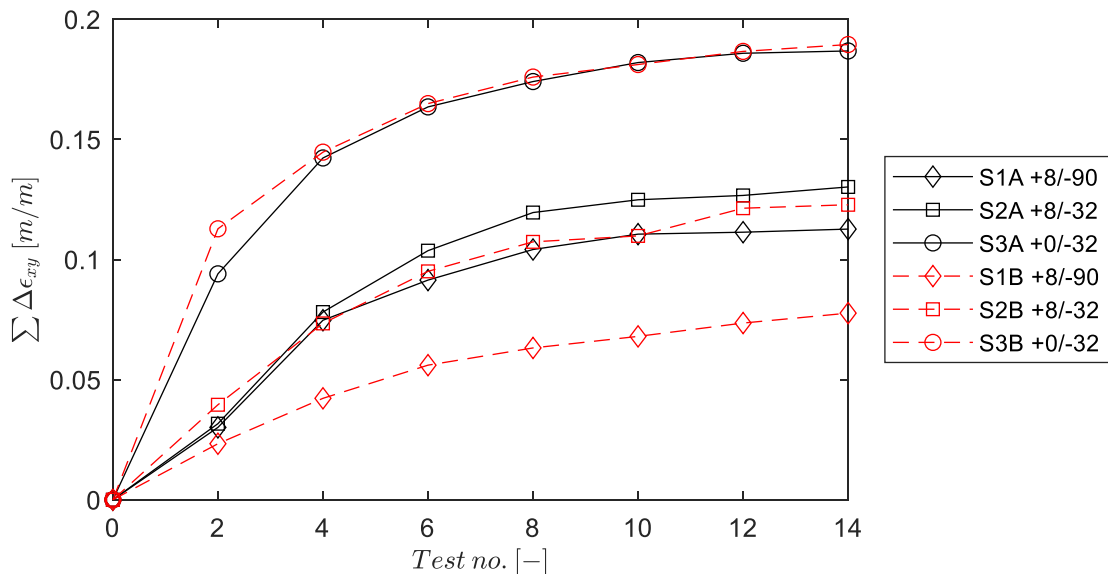
Den faktiska deformationen efter varje passage visas i Figur 26 för de sex olika positionerna. En intressant detalj är att +0/-32 materialet uppvisar störst deformation efter de statiska överfarterna. Ytterligare en detalj är att kompakteringen med hög amplitud för +8/-90 materialet ger en god deformation efter de två första dynamiska överfarterna i kontrast till bana B med låg amplitud där inte samma nivå åstadkoms. Enligt förväntan konvergerar deformationen efter varje successiv överfart mot lägre värden.



Figur 26. Deformation efter passage för 2 statiska och 12 dynamiska överfarter.

I Figur 27 visas deformationen istället som den kumulativa plastiska töjningen efter varje successiv överfart. Kurvorna för bana A och bana B för +0/-32 materialet sammanfaller i princip vilket indikerar låg inverkan från maskininställning. Detta är intressant då statisk plattbelastning samt CMV värde uppvisar en viss skillnad mellan bana A och B för samma material.

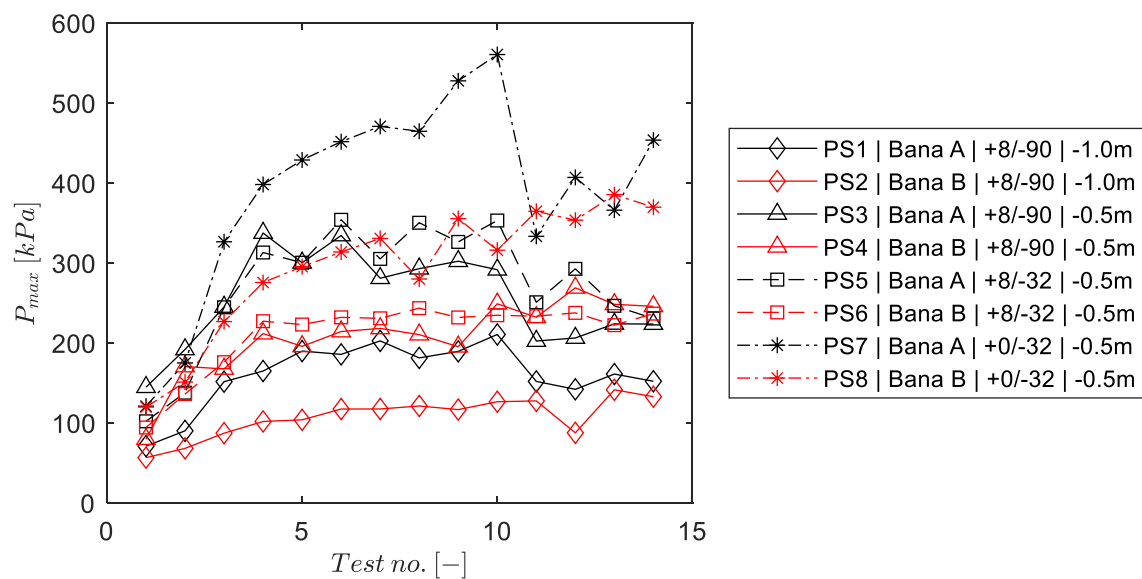
För +8/-32 materialet kan en relativt liten men tydlig skillnad ses i kumulativ töjning. För den grövre +8/-90 fraktionen är dock differensen i kumulativ töjning påtaglig.



Figur 27. Kumulativ plastisk töjning efter passage för 2 statiska och 12 dynamiska överfarter.

I Figur 28 plottas det uppmätta maximala trycket för varje överfart respektive sensor. De högsta trycknivåerna uppkommer i bana A (hög amplitud) för +0/-32 materialet. Som tidigare beskrivits justerades maskininställningarna för de sista fyra överfarterna i bana A för att undvika *bouncing* beteende vilket ses tydligt i minskningen i trycknivå. Den lägsta trycknivån uppmäts vid bana B och 1m djup vilket är förväntat.

En komplett sammanställning av trycksignaler för respektive sensor och överfart kan ses i bilaga 9.1.

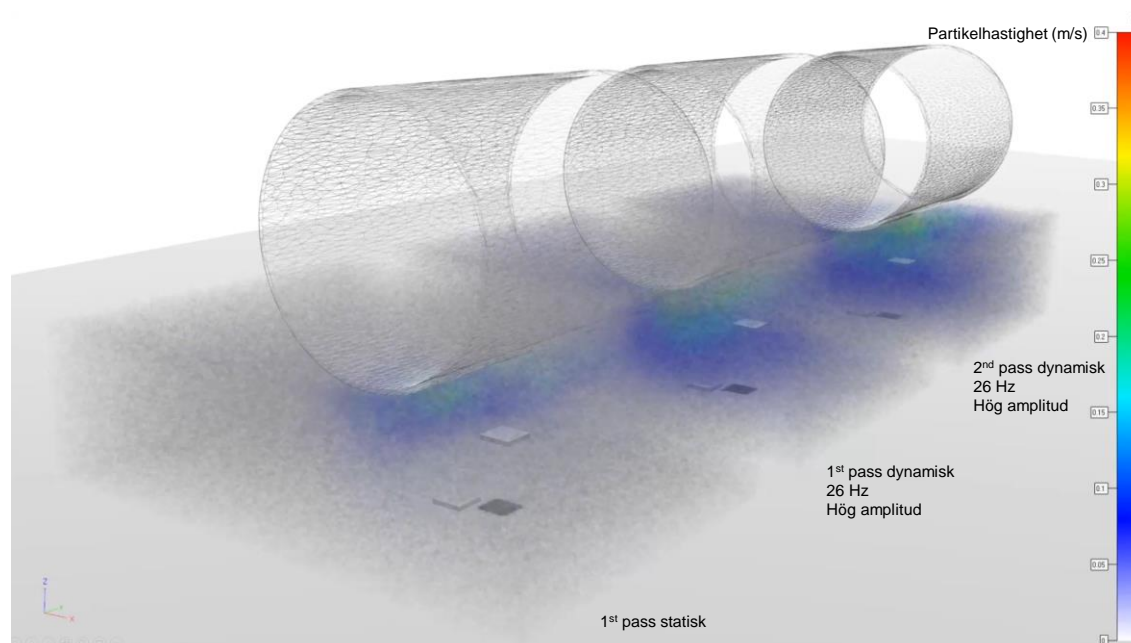


Figur 28. Maximalt tryck för de åtta olika sensorerna för 2 statiska och 12 dynamiska överfarter.

5 SIMULERINGSRESULTAT

Följande stycke beskriver och demonstrerar resultatet från de simuleringar som genomförts. De simuleringar som utförts visar principiellt potentialen i simuleringstekniken, men bör inte alls ses som en uttömmande analys. I detta projekt har endast två fall-uppställningar simulerats för att ge en initial validering och jämförelse.

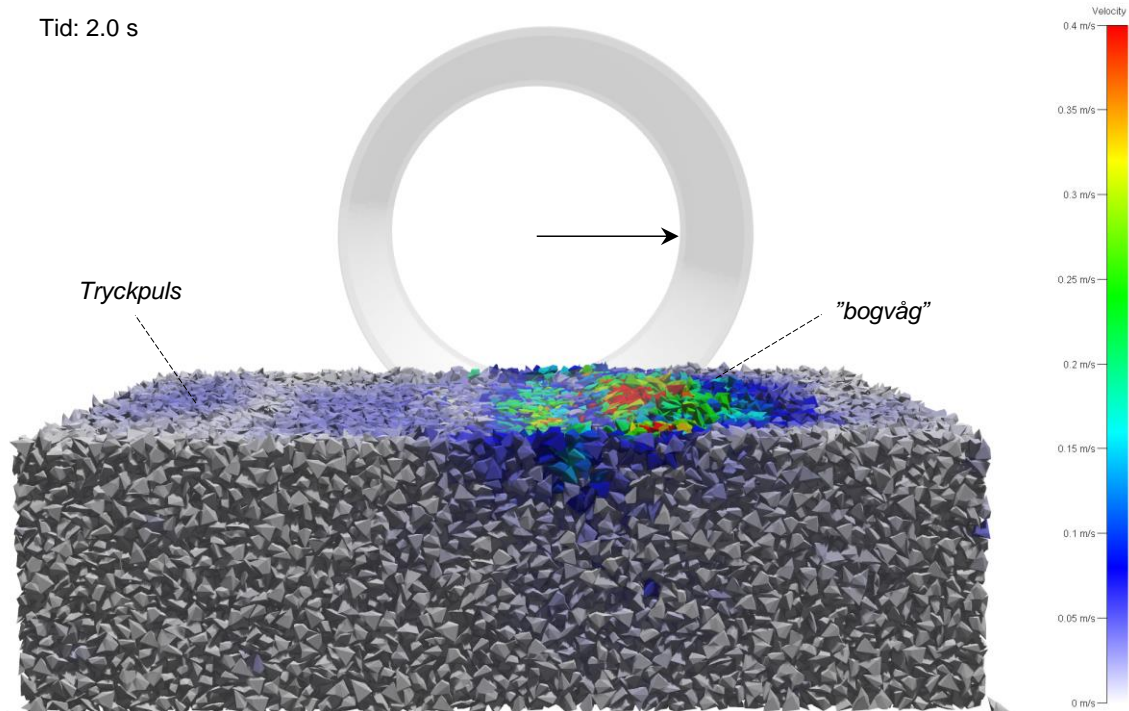
I Figur 29 visas statisk överfart samt den första och andra dynamiska överfarten visualiserat tillsammans då valsen är ungefär i mitten av testkroppen. Partiklarna är visualiserade dels med en transparens samt med en färgskala relaterad till varje partikels hastighet. Även de virtuella marktrycksensorerna är synliga. En tydlig skillnad i partikelrörelse kan ses mellan statisk överfart och dynamisk överfart.



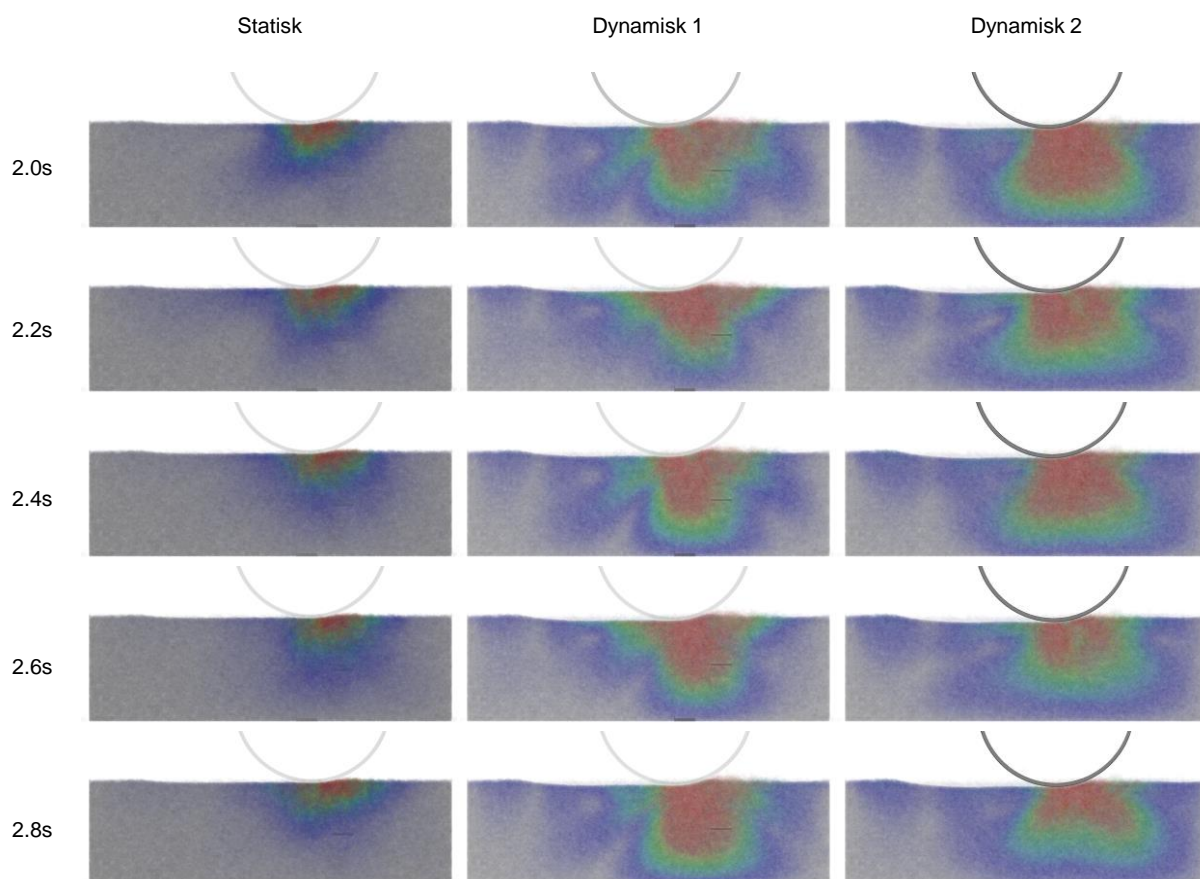
Figur 29. Illustration från Demify® där partiklarna färgats utifrån sin hastighetsmagnitud samt med transparens för visualisering av hastighetsfältet inom partikelbädden.

Partiklarnas rörelse då den vibrerande valsen är i ingrepp ses även i Figur 30. I denna bild är partiklarna inte transparenta men fortfarande visualiserade med färgskala för hastighet. Två intressanta effekter kan uppmärksammas speciellt. Dels uppträder en bogvåg av partiklar som reser sig (dilatation) framför valsen; ett fenomen som tydligt ses i filminspelningen från de verkliga testerna. Dels framträder tryckpulser framför och bakom valsen som färdas genom partikelmaterialet och studsar i den triangulerade vägggeometrin.

I Figur 31 visas de tre kompakteringssekvenserna för ett urval av tidpunkter. Här framkommer tydligt ett karakteristiskt rörelsemönster som skiljer sig mellan statisk och dynamisk överfart. En intressant frågeställning är hur detta rörelsemönster relaterar till kompakteringens djupverkan samt mekanismer för intern omstrukturering och sättning i bädden.



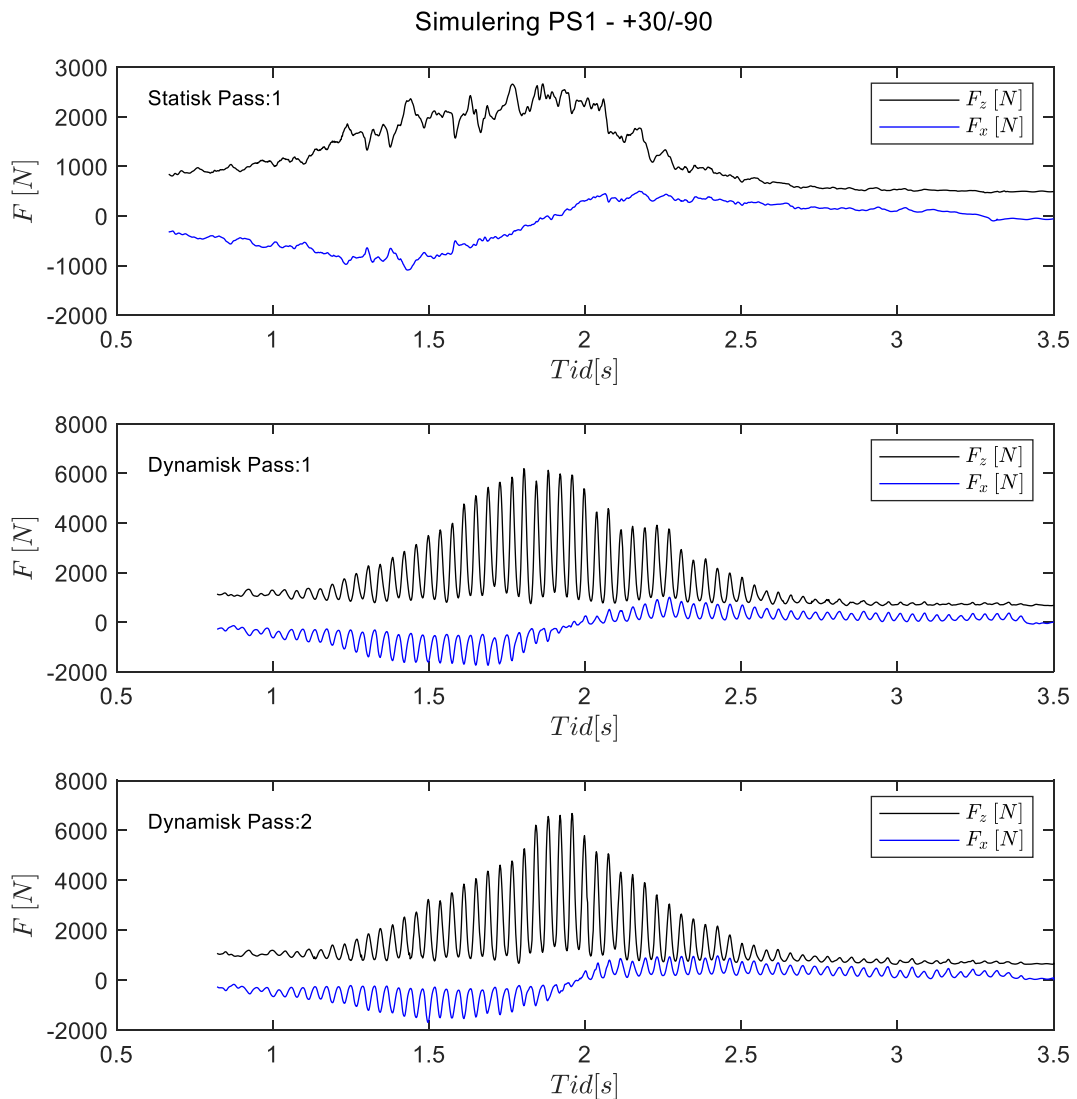
Figur 30. Visualisering av simuleringsresultat. Partiklar är färgade enligt dess hastighetsmagnitud.



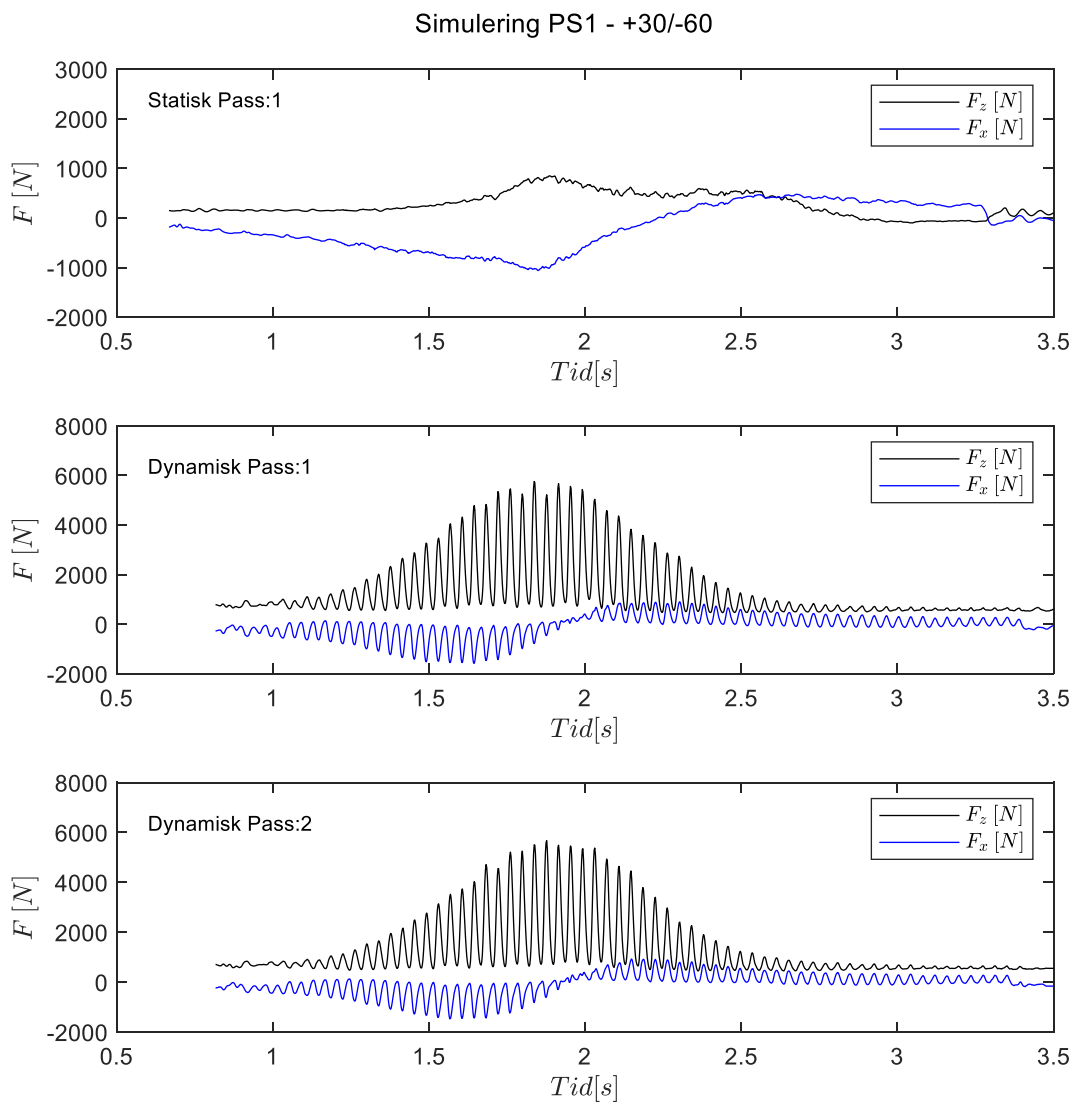
Figur 31. Simulerade sekvenser visade i sido-vy med semi-transparenta partiklar. Partiklarna är färgade med avseende på hastighetsmagnitud där maximal hastighet motsvarar 0.1 m/s (röd färg).

5.1 Marktryck

I Figur 32 ses den vertikala och horisontella kraften på den virtuella sensorn vid simulering med fraktion +30/-90. En viss varians uppträder för den statistiska överfarten. Denna varians är sannolikt relaterad till partikelstorleken och antalet kontakter med sensorns yta. Argument för detta kan ses vid simulering med en finare storleksfördelning, se Figur 33. Till skillnad från den verkliga marksensorn är det trivialt i simuleringsfallet att även beräkna horisontell kraft. Denna signal visar hur kraften initialt är negativ för att vid en viss position för valsen vända till att bli positiv. I framtida studier bör kraftresultanten studeras närmare även om den inte beräknats här.



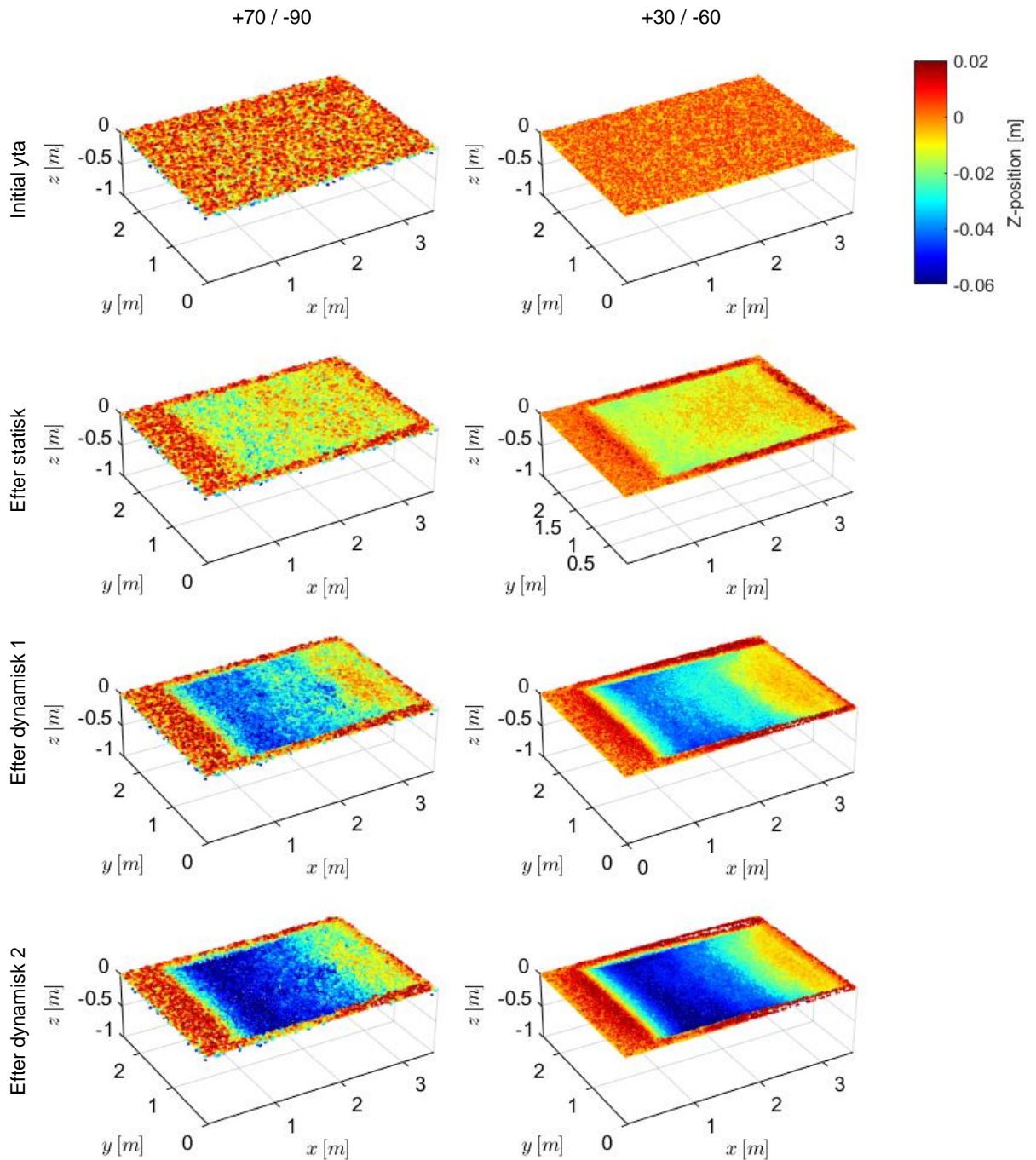
Figur 32. Krafter i vertikal och horisontell riktning på sensor PS1 för simulering SA1.2 +70/-90



Figur 33. Krafter i vertikal och horisontell riktning på sensor PS1 för simulering SA1.2 +30/-60

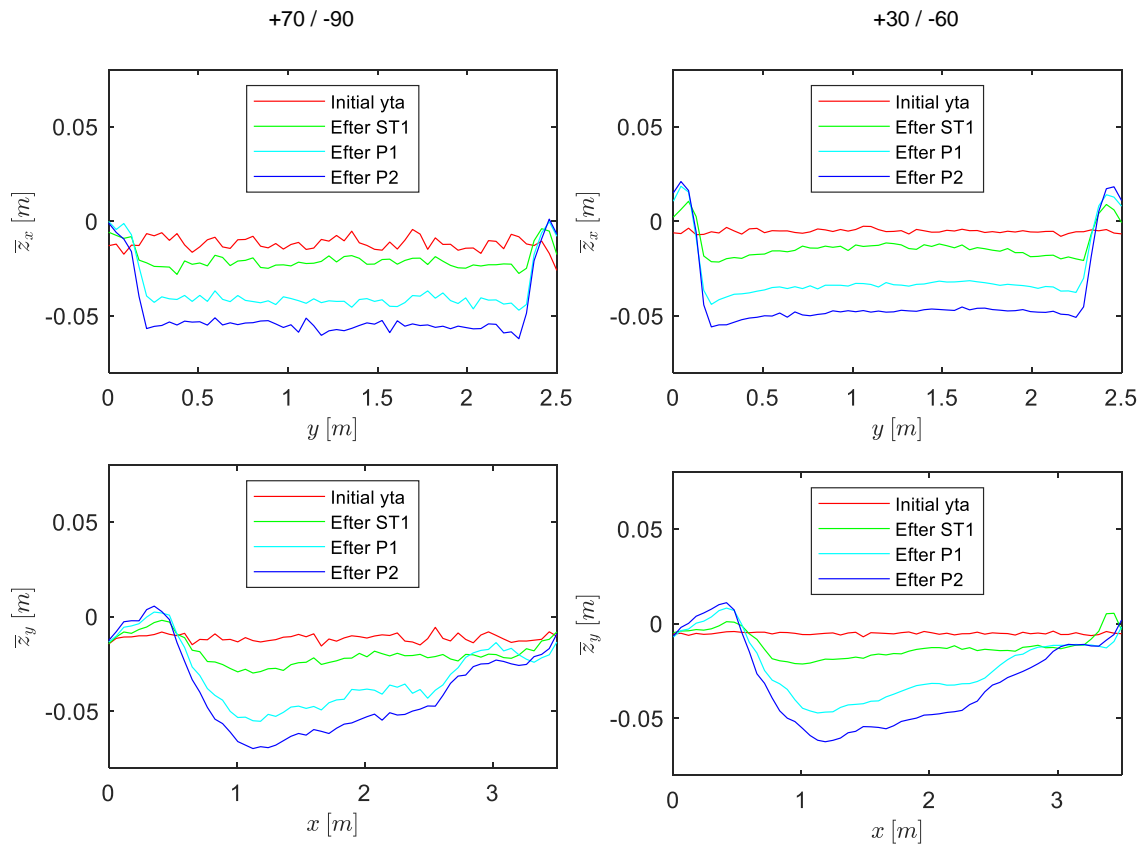
5.2 Deformation

De punktmoln som tagits fram med strålsparning av partikelytan visas i Figur 34. Bilderna visar en succesiv deformation av ytan. Det är även tydligt att en mycket kort, eller eventuellt ingen sektion har en konstant deformationsnivå. Detta tyder på att randeffekterna vid introduktionen av valsen mot materialet, samt vid interaktionen med den bortre väggen, sannolikt påverkar resultaten. En längre simulerad sträcka bör beaktas vid fortsatta simuleringsstudier.



Figur 34. Visualisering av punkmoln från strålspärning av simulerad partikelbädd. Punkterna i molnet är färgade med avseende på den vertikala z-positionen och visar plastisk deformation efter respektive överfart.

Genom att medelvärdera i x- och y-riktning kan höjdnivån plottas med linje för de tre simulerade överfarterna, se Figur 35. För att ej ta med kanteffekterna har ett band av punkter beaktats med en bredd om 500mm.



Figur 35. Partikelbäddens medeldeformation för ett centrerat band om 50 cm visat över y-riktning samt x-riktning.

6 JÄMFÖRELSE OCH VALIDERING

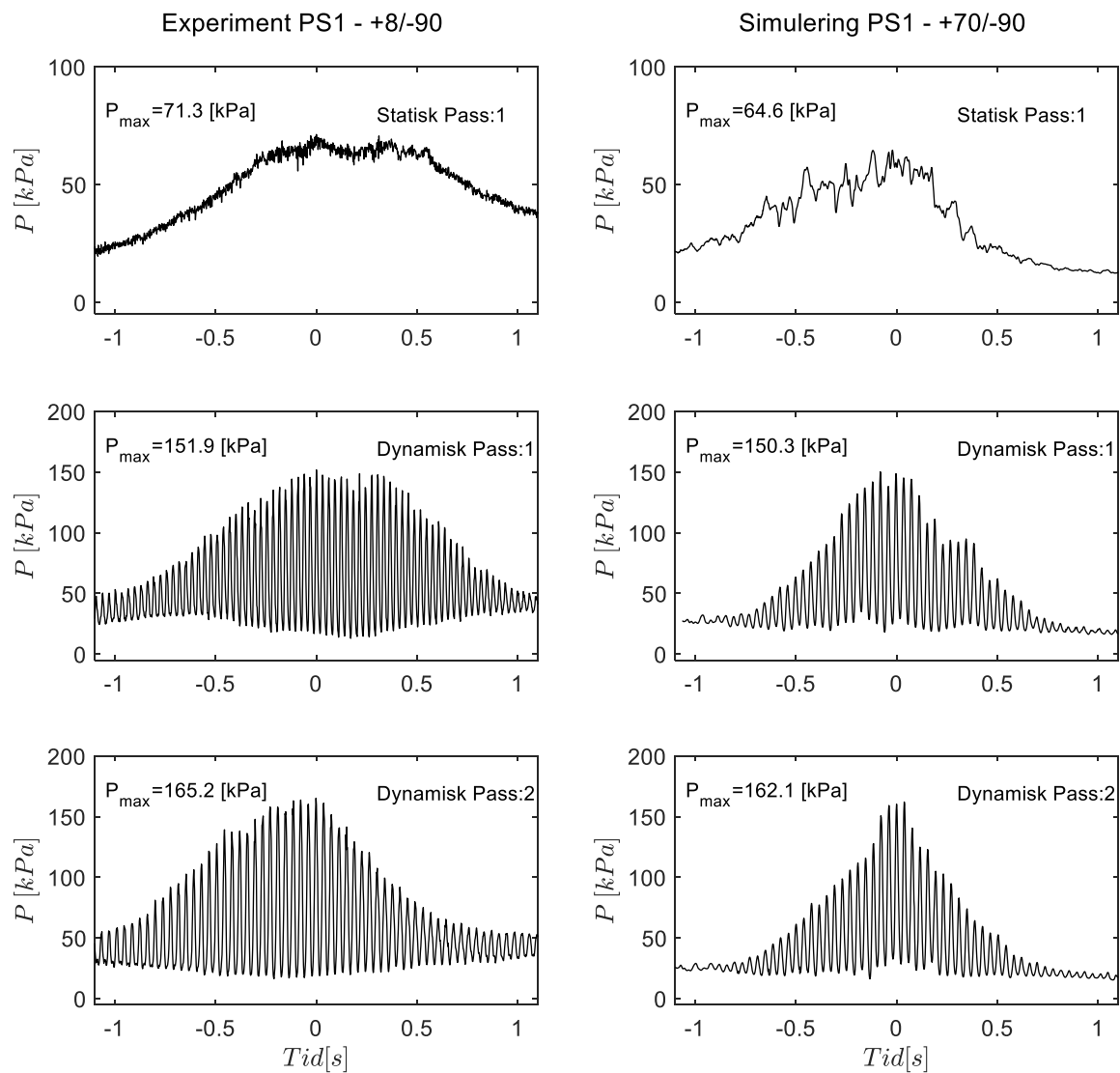
I följande stycke beskrivs och demonstreras jämförelsen och valideringen mellan simulering och experiment.

I Figur 36. Illustration av experiment och simulering med statisk överfart till vänster och dynamisk överfart till höger. visas en jämförelse mellan videoinspelning och simulerad kompaktering. En synkroniserad filmuppspelning ger en bättre bild av förloppet och överensstämmelsen än vad som är möjligt att återge i rapportformat.



Figur 36. Illustration av experiment och simulering med statisk överfart till vänster och dynamisk överfart till höger.

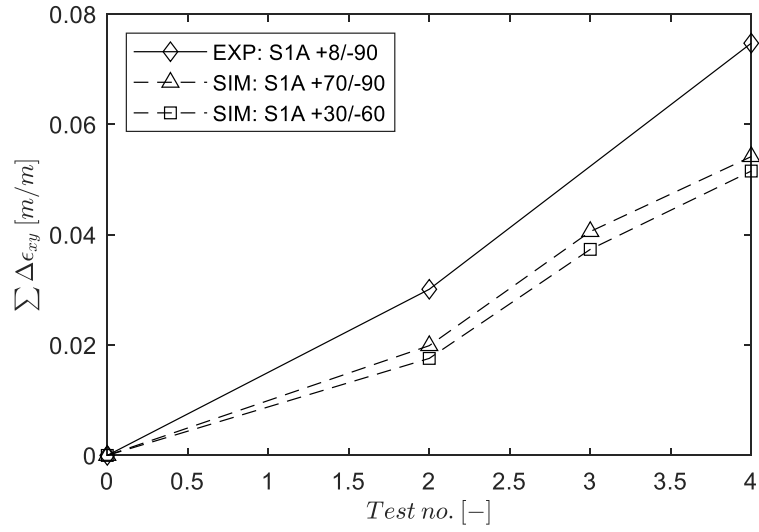
En direkt jämförelse mellan trycksignaler kan ses i Figur 37. Den maximala trycknivån stämmer bra överens mellan experiment och simulering. Signalen från simulering uppvisar en något mindre bred bas än experimenten. Sannolikt har detta att göra med en viss skillnad i intern friktion och skjutmotstånd. En bredare form på signalen bör betyda att trycksensorn registrerar kraft från valsem i ett något tidigare skede, alltså med en flackare intern vinkel i kraftkedjans dynamiska uppbyggnad. Vid analys av trycksignaler från experimenten upptäcktes att valsems frekvens skilde något från den nominella. Denna felkälla uppkommer på grund av den korta sträckan från porten i laboratoriehallen till den första sensorn. Maskinens reglersystem hinner helt enkelt inte att svänga in mot angiven frekvens.



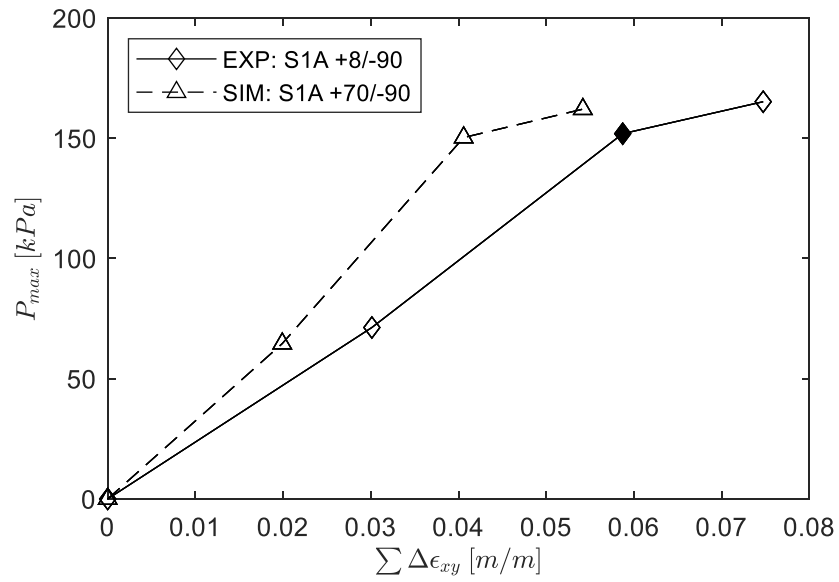
Figur 37. Jämförelse av tryckdata mellan experiment och simulering för trycksensor PS1.

Den kumulativa plastiska töjningen visas för simulering och experiment i Figur 38. Kurvorna indikerar en något lägre deformation för simulering än experiment. Dock bör det beaktas att endast en statisk överfart simulerats i sekvensen. Om man utökar till två statiska överfarter kommer sannolikt kurvorna stämma bättre.

Denna felkälla beskriver sannolikt även det mesta av skillnaden mellan experiment och simulering i Figur 39. Här visas relationen mellan kumulativ töjning och maximalt tryck.



Figur 38. Jämförelse av kumulativ plastisk töjning mellan experiment och simulering.



Figur 39. Jämförelse mellan simulering och experiment för relation mellan maximalt marktryck och plastisk töjning efter överfart.

7 SLUTSATSER

Projektets resultat kan studeras och belysas från tre perspektiv; 1. experimentell empiri genom analys av maskin- och sensordata, 2. analys av simuleringsresultat och djupgående mekanistisk beskrivning av fysiken i systemet, och 3. validering och överensstämmelse mellan simulering och experiment. I denna rapport har en inledande analys av detta slag presenterats. Ett antal detaljer och aspekter kan specifikt nämnas och lyftas fram.

- De experimentella resultaten visar på en tydlig skillnad i packningsbeteende för de tre olika storleksfördelningarna.
- För att sätta skillnaden i packning mellan +8/-32mm och +0/-32mm i ett sammanhang, kan man tänka sig ett hypotetiskt scenario. I detta scenario placeras ett bärlager ut, men på grund av storleksseparation (segregering) vid hantering och utbredning skapas materielområden lokalt där +0/-8 fraktionen helt eller delvis saknas. Under dessa förutsättningar kommer styvheten lokalt att vara en faktor X lägre där fraktion +0/-8mm saknas. En sådan lokal försämring av styvhet kan potentiellt påverka väggkroppens beständighet.
- Mätserien håller över lag mycket god kvalitet där både varians är låg och få eller inga datapunkter saknas.
- Laserskanning fungerar bra för mätning av markdeformation då referenssystem för registrering nyttjas.
- DEM simuleringar ger en helt ny möjlighet till detaljstudier av material och maskinparametrar.
- Ett flertal nya (unika) metoder för mätning, modellering och databehandling har tagts fram i projektet.

Sammanfattningsvis har ett unikt data-set tagits fram som kommer vara till mycket stor nytta för framtida vidare utveckling och validering av DEM simuleringar utöver de resultat som framkommer i denna rapport. Experimenten visar även en mycket påtaglig effekt av storleksfördelning för bergmaterial och kompakteringsprestanda. Dessa resultat ligger i linje med tidigare erfarenhet i branschen, dock har sannolikt inte så noggranna fullskaliga tester genomförts innan där just segregeringseffekter (bortfall av finmaterial) studeras och kvantifieras.

Jämförelsen och valideringen mellan experiment och simulering visar på goda resultat och överensstämmelse. Under utvecklingen har flera ytterligare förbättringsåtgärder och detaljer identifierats som sannolikt kommer förbättra predikteringsförmågan ytterligare.

De till en början ambitiöst ställda projektmålen kan därmed anses vara uppfyllda, även om ytterligare iterationer kommer fortgå för vidare förbättring och utveckling.

Projektresultaten tyder på att branschen bör bibehålla fokus på ballastkvalité och säkerställning av så jämn storleksfördelning i obundna lager som möjligt. Projektet visar att segregerings- och separationseffekter kan ha en mycket påtaglig inverkan på obundna lagers styvhet och bärighet.

Framtida projekt och arbete bör med fördel riktas mot ballastmaterialens funktion i järnvägsöverbyggnader. Fler simuleringsstudier bör även genomföras för ytterligare förståelse och förbättring av valideringen.

8 LITTERATURFÖRTECKNING

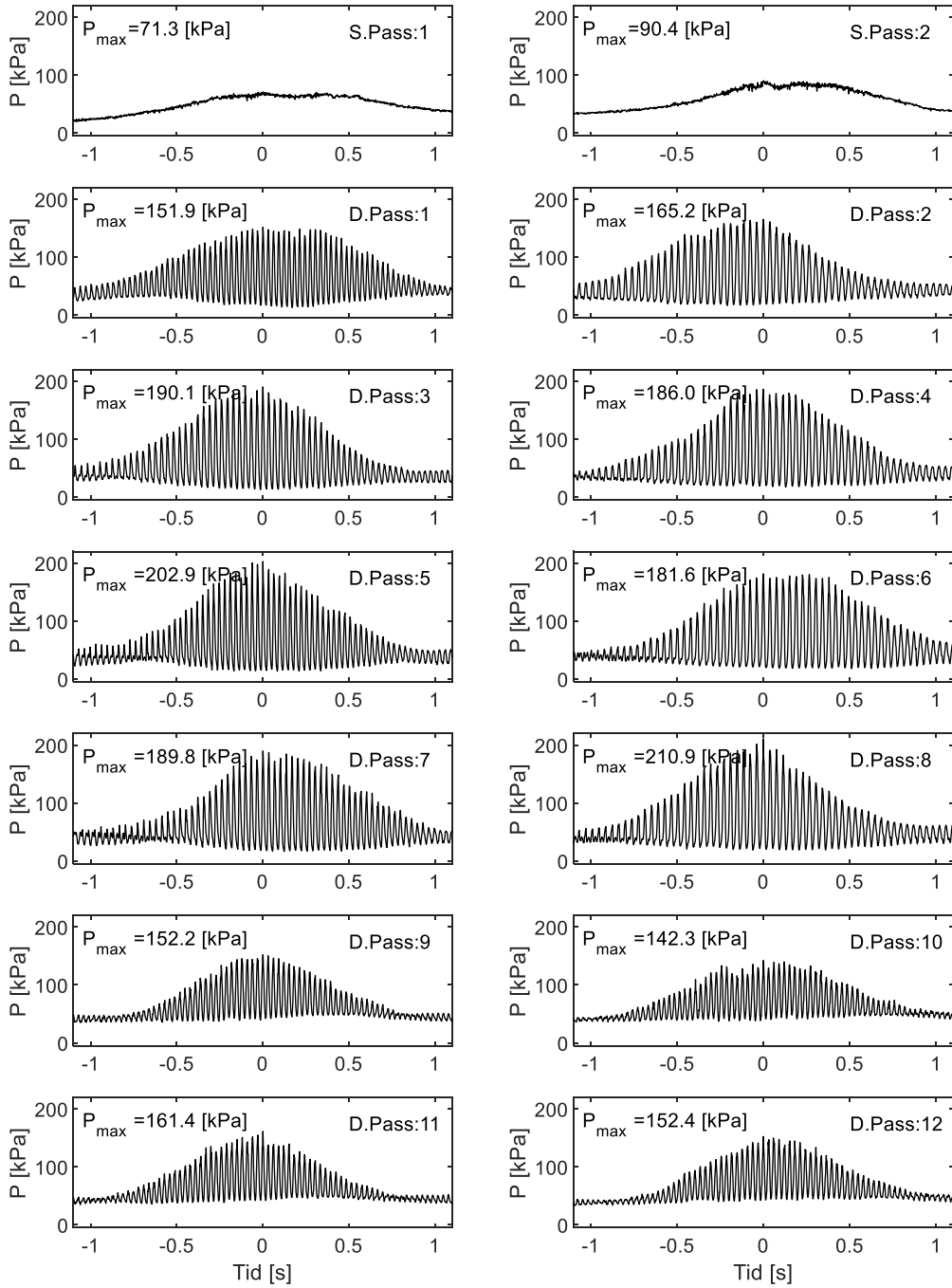
- Axås, J. G. (2020). *A Coupled Multibody and Discrete Element Approach for Roller Compaction Dynamics*. Department of Mechanics and Maritime Sciences, Division of Vehicle Engineering and Autonomous Systems. Chalmers University of Technology. Hämtat från <https://hdl.handle.net/20.500.12380/301057>
- Bilock, A. (2020). *A GPU Polyhedral Discrete Element Method*. Department of Mathematical Sciences. Göteborg: Chalmers tekniska högskola. doi:<https://hdl.handle.net/20.500.12380/300900>
- Pistol, J., & Dietmar, A. (2018). Fundamentals of roller integrated compaction control for oscillatory rollers and comparison with conventional testing methods. *Transportation Geotechnics*, 17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.010>
- Pistol, J., Villwock, S., W., V., Kopf, F., & Adam, D. (2014). Roller Compaction - Impact of Dynamic Drums in Comparison. *XV Danube - European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE 2014)*. Vienna, Austria.
- Quist, J., Hunger, F., & Jareteg, K. (2019). *Segregering av bergmaterial vid avlastning*. Fraunhofer-Chalmers Centre for INdustrial Mathemathics, Computantional Engineering & Design. Göteborg: SBUF.
- Wersäll, C. (2016). *Frequency Optimization of Vibratory Rollers and Plates for Compaction of Granular Soil*. Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Soil and Rock Mechanics. Stockholm: Royal Institute of Technology.
- Wersäll, C., Nordfelt, I., & Larsson, S. (2018). Resonant roller compaction of gravel in full-scale tests. *Transportation Geotechnics*, 14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.11.004>

9 Bilagor

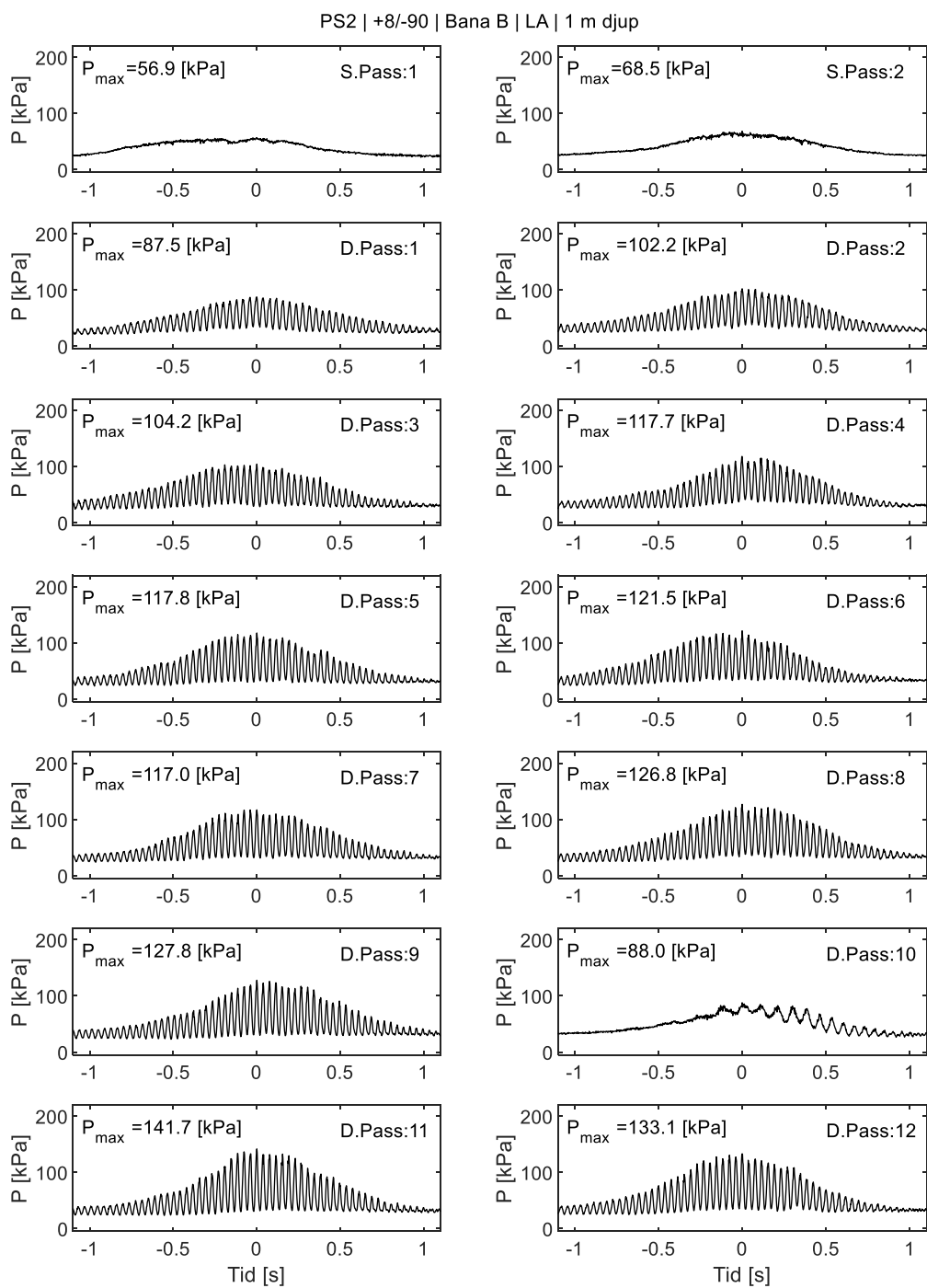
9.1 Sammanställning marktryckssignaler

I Figur 6 till Figur 13 visas en sammanställning för marktrycksensorernas signaler för alla överfarter i testserien. I graferna har det maximala värdet för ordnatans skala anpassats för att både ge möjlighet att avläsa nivåer men även för att kunna göra relevanta jämförelser mellan mätningar. Därför visas statiska överfarter samt sensorer på 1 meter djup med max 220 kPa och dynamiska överfarter på 0.5 meter djup med max 550 kPa.

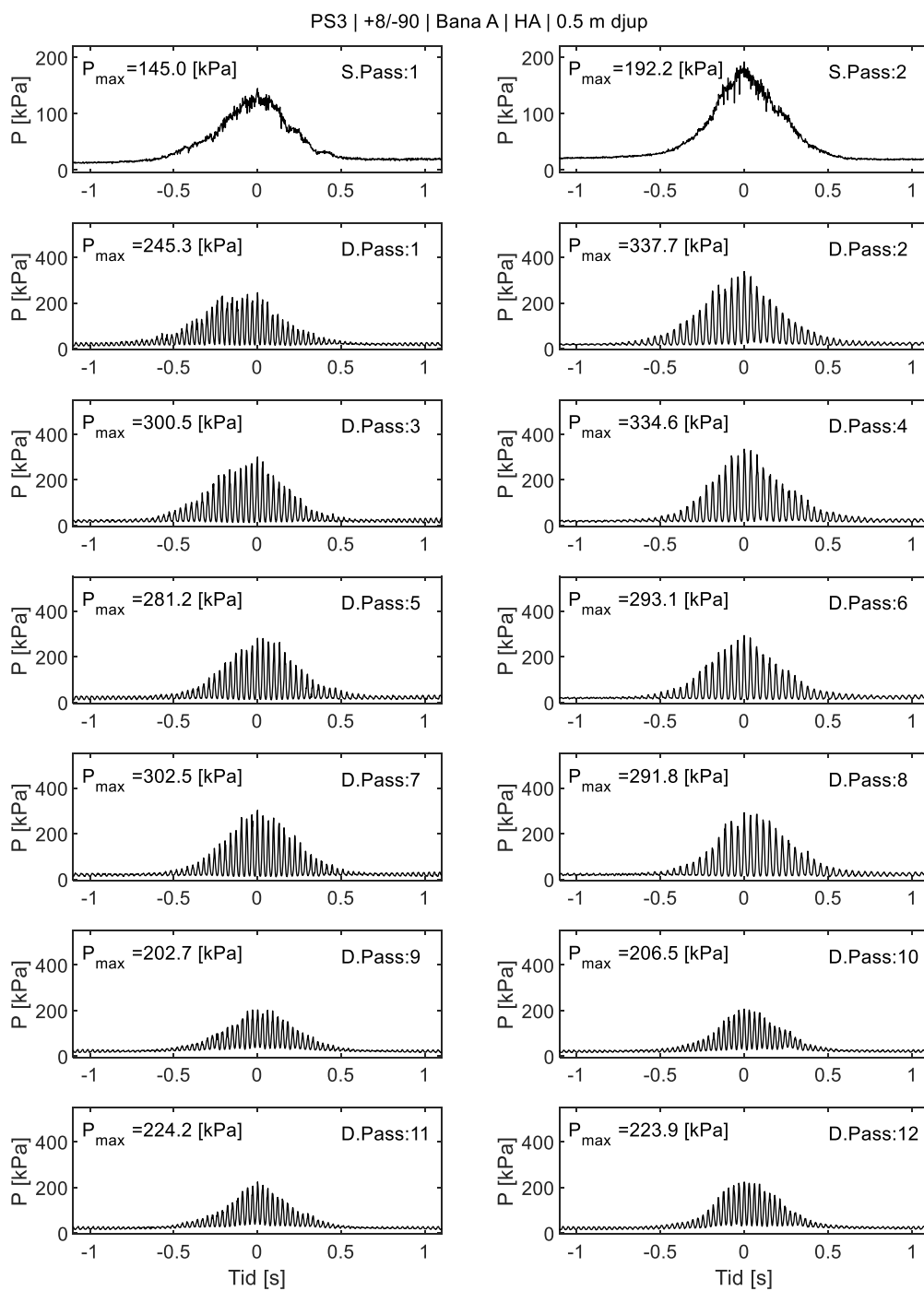
PS1 | +8/-90 | Bana A | HA | 1 m djup



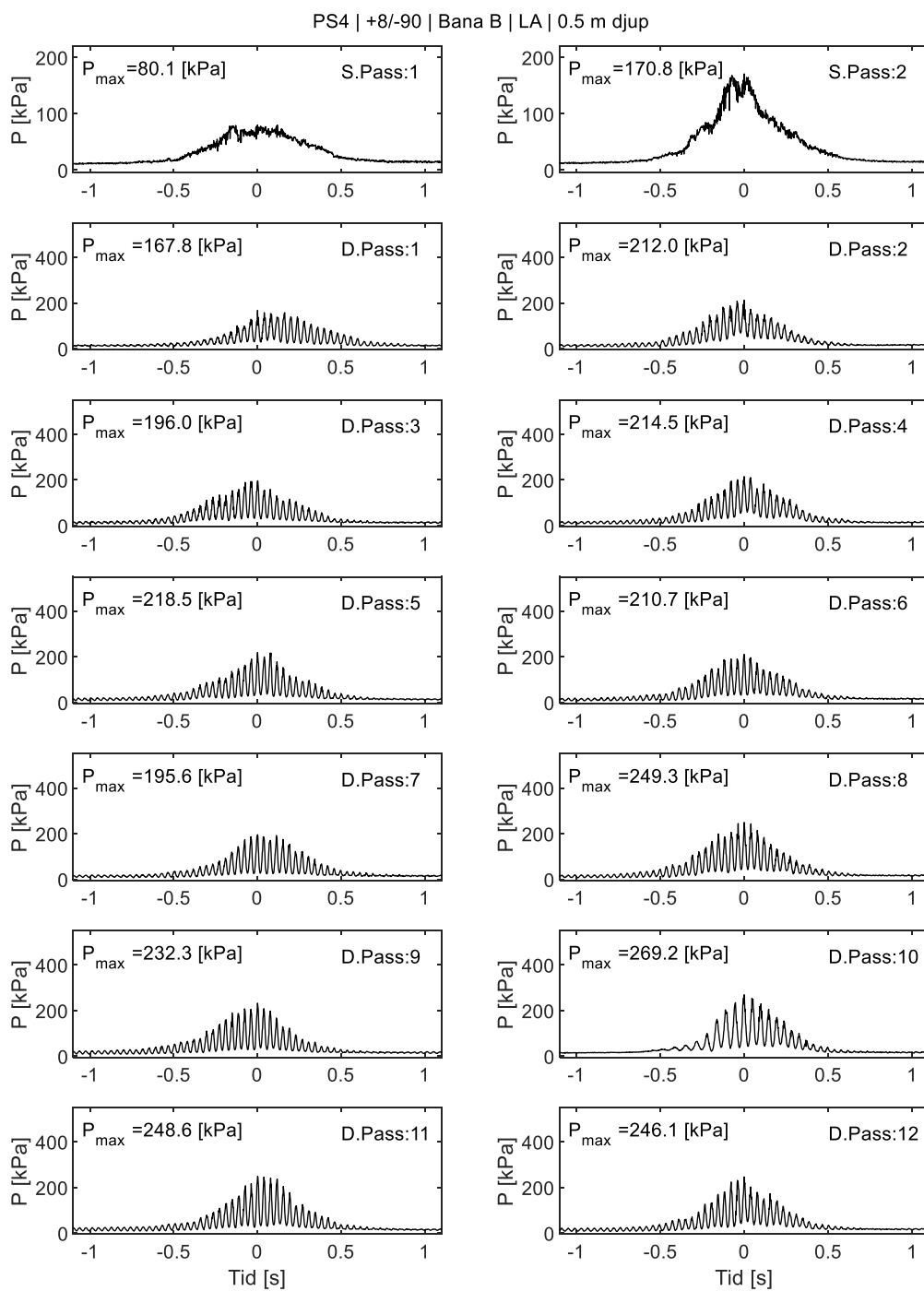
Figur 40. Tryckrespons för sensor PS1 placerad på 1m djup i bana A, material +8/-90 (Hög amplitud @ 26Hz passage 1-8 och låg amplitud @ 33Hz passage 9-12).



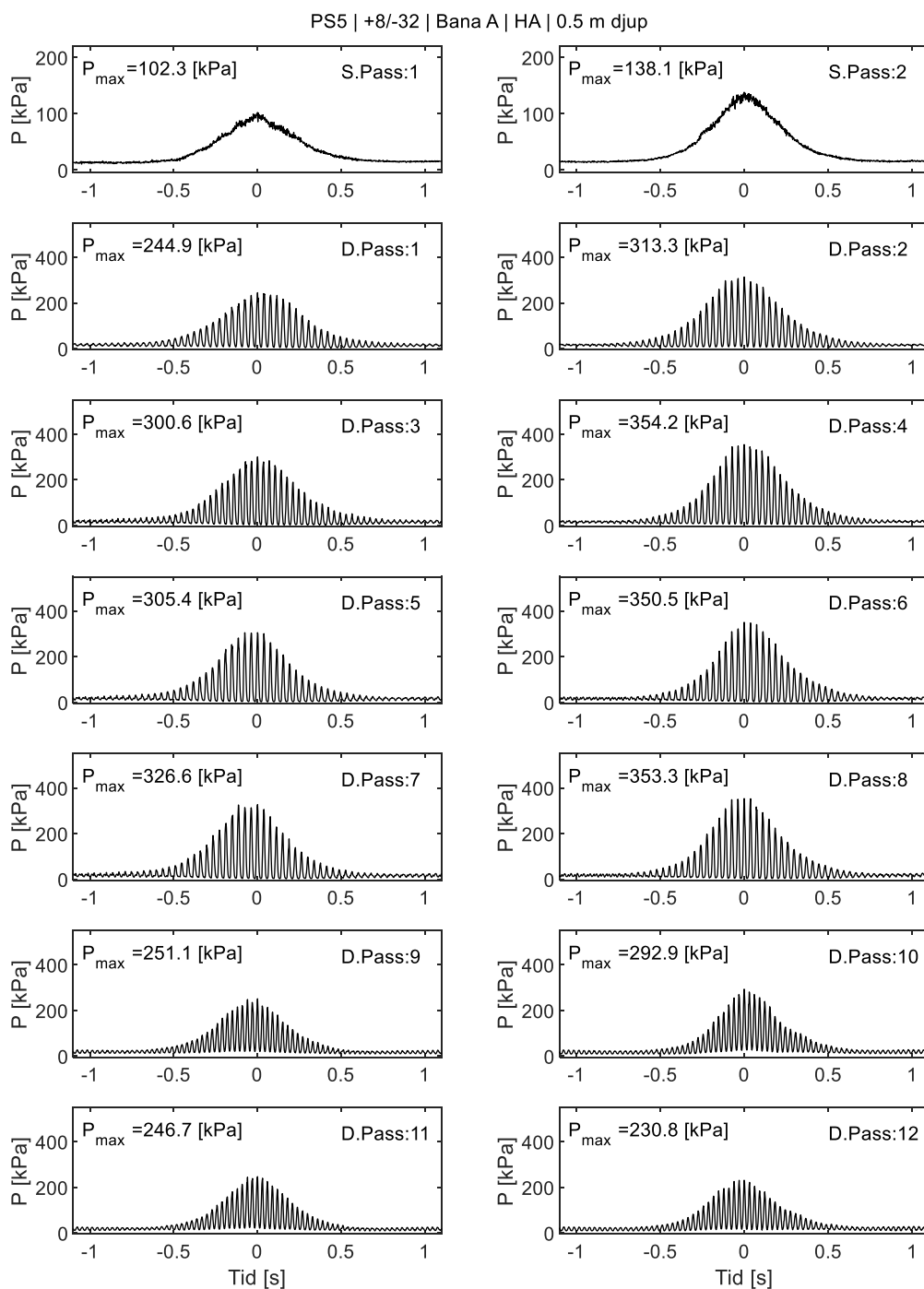
Figur 41. Tryckrespons för sensor PS2 placerad på 1m djup i bana B, material +8/-90 (Låg amplitud @ 33Hz).



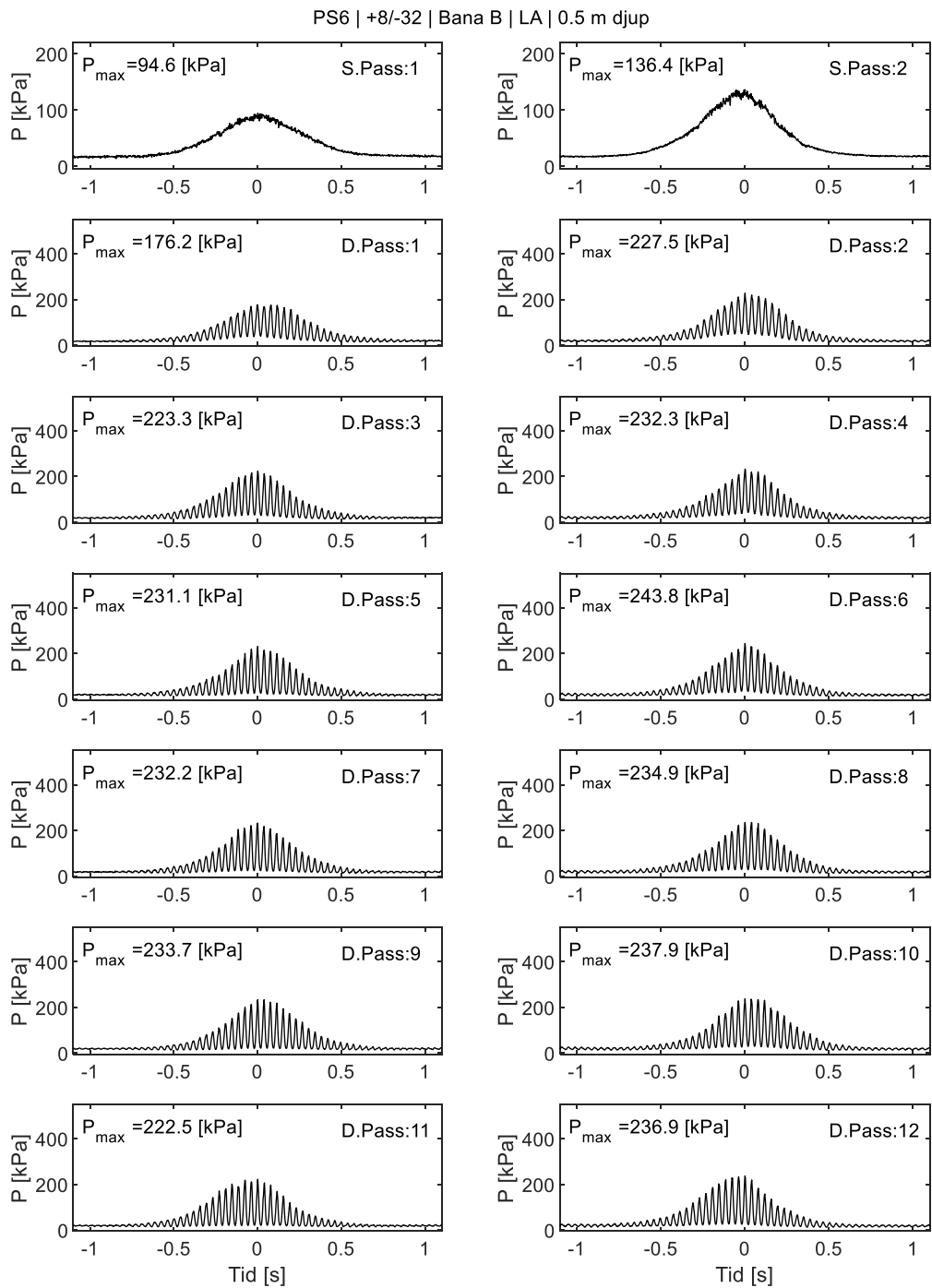
Figur 42. Tryckrespons för sensor PS3 placerad på 0.5m djup i bana A, material +8/-90 (Hög amplitud @ 26Hz passage 1-8 och låg amplitud @ 33Hz passage 9-12).



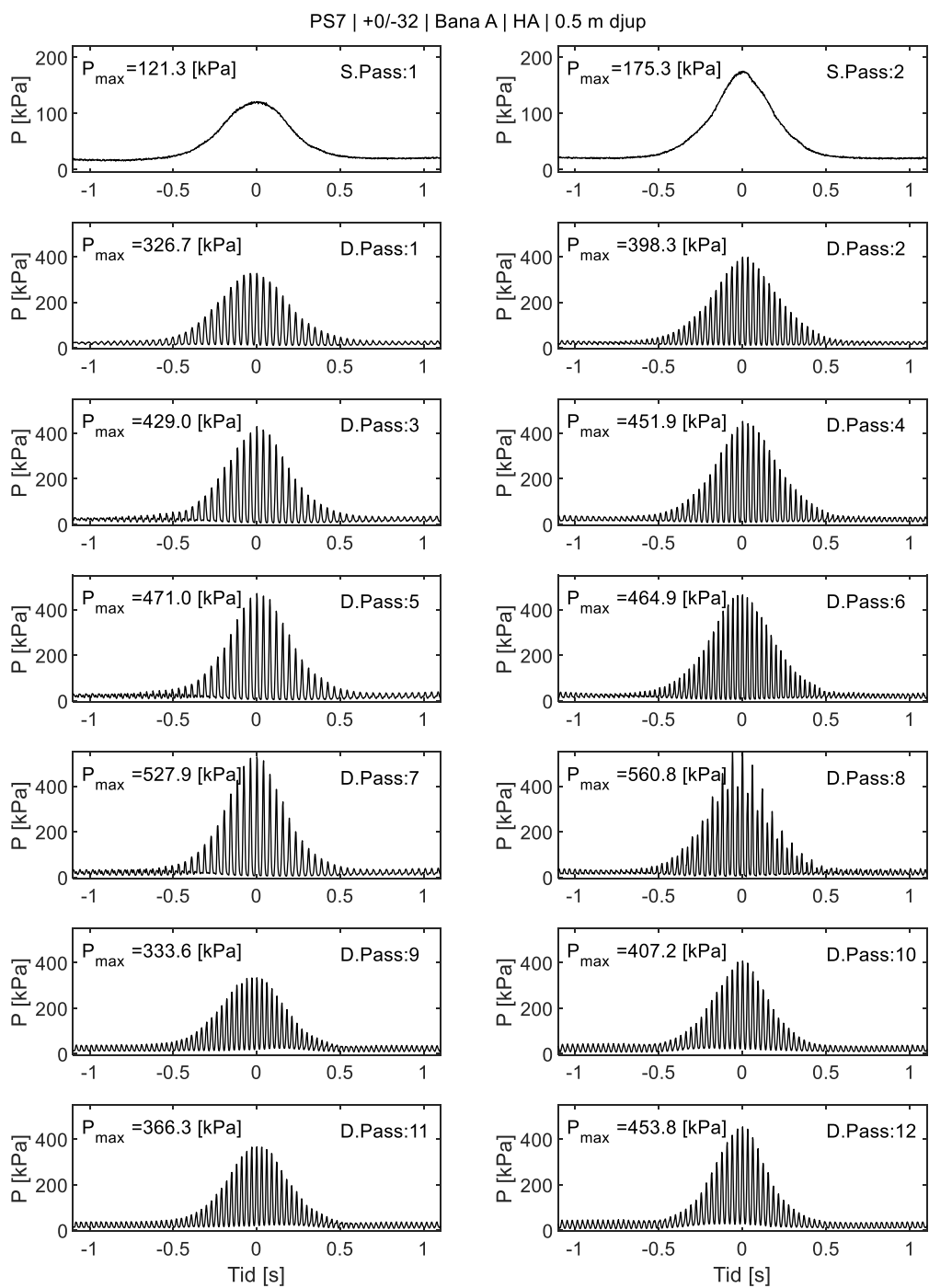
Figur 43. Tryckrespons för sensor PS4 placerad på 0.5m djup i bana B, material +8/-90 (Låg amplitud @ 33Hz).



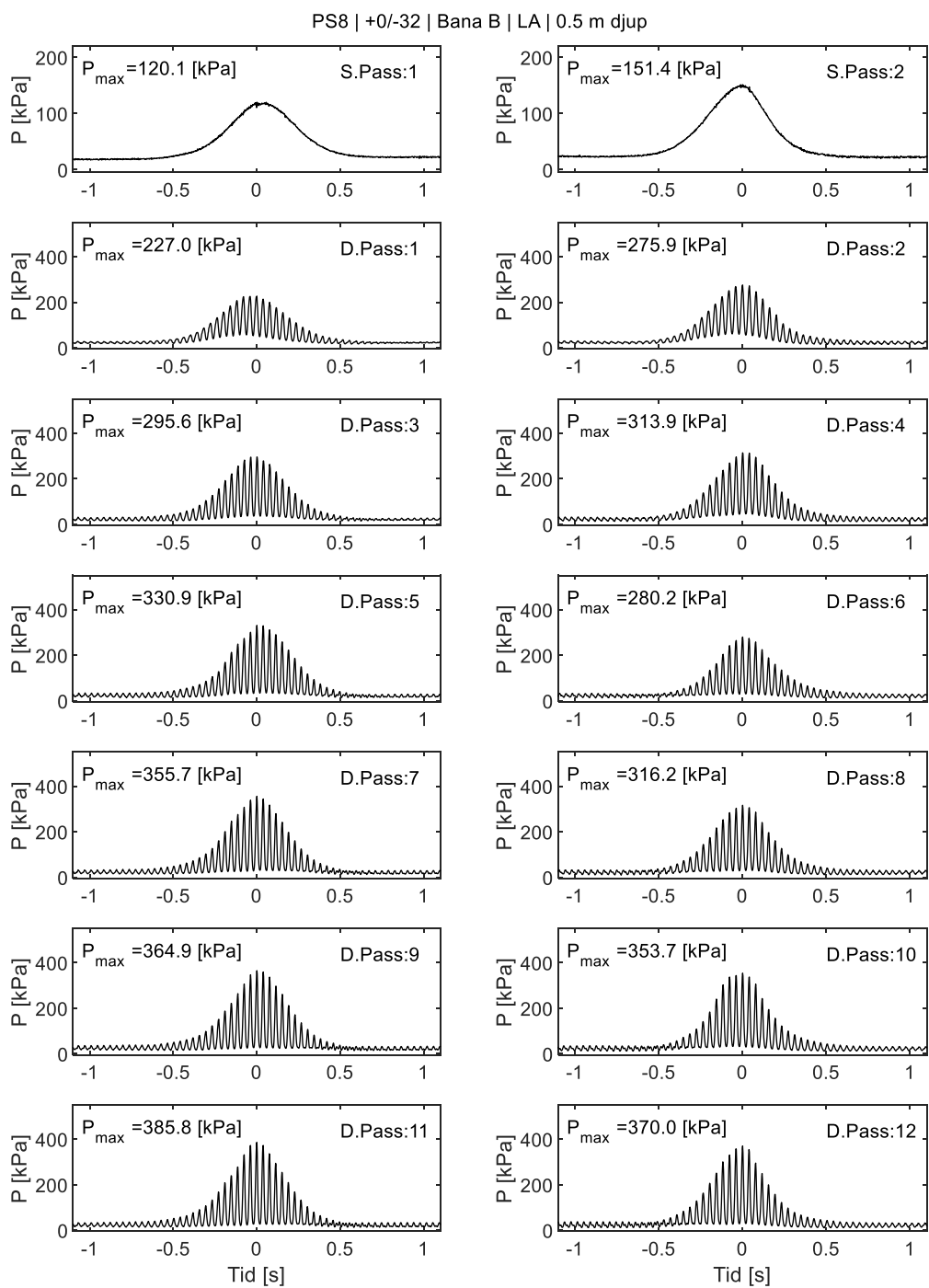
Figur 44. Tryckrespons för sensor PS5 placerad på 0.5m djup i bana A, material +8/-32mm (Hög amplitud @ 26Hz passage 1-8 och låg amplitud @ 33Hz passage 9-12).



Figur 45. Tryckrespons för sensor PS6 placerad på 0.5m djup i bana B, material +8/-32mm (Låg amplitud @ 33Hz).



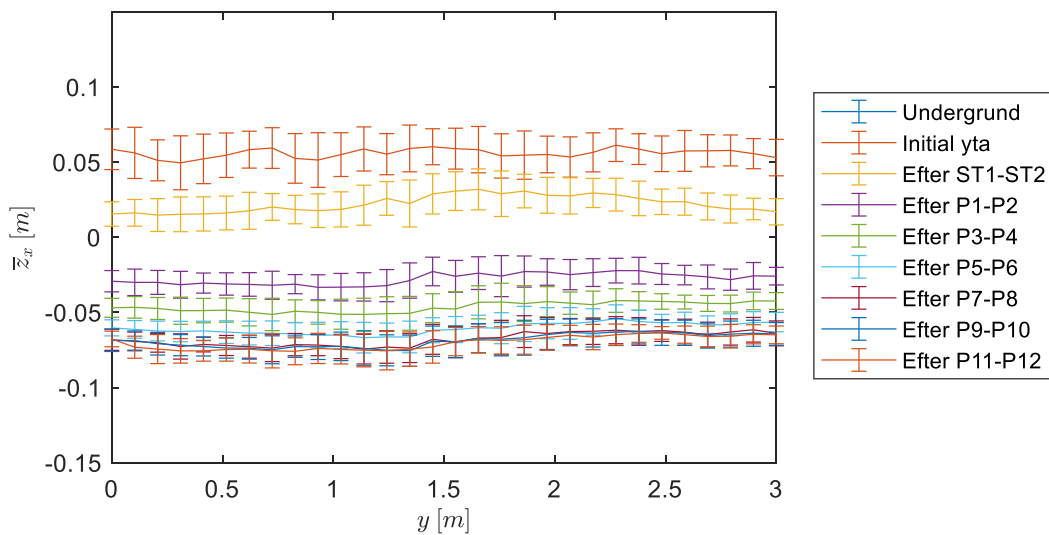
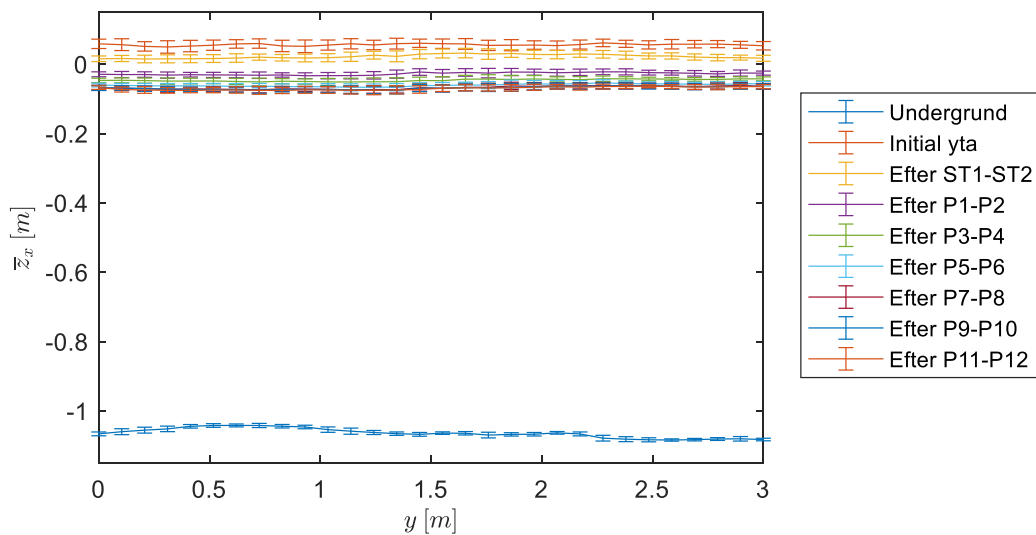
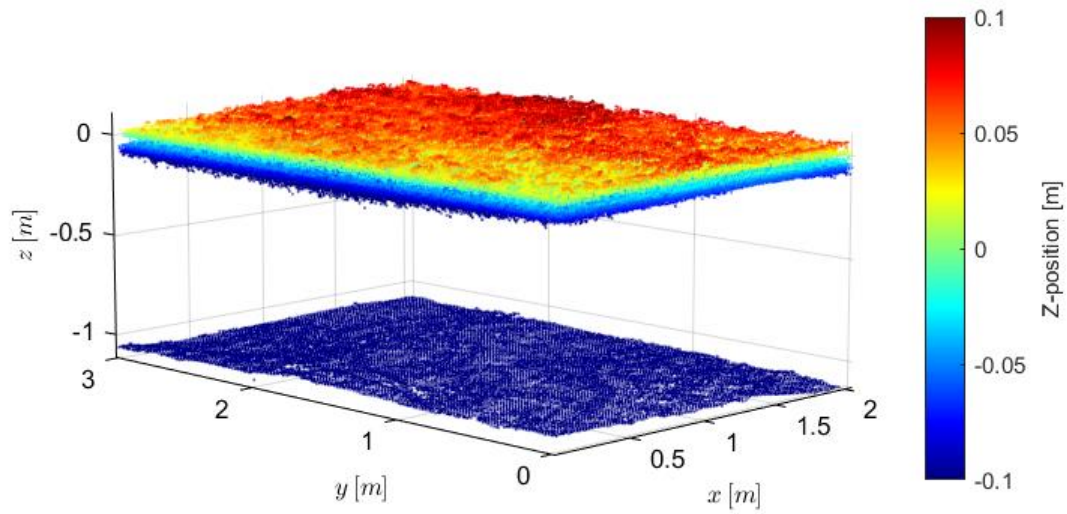
Figur 46. Tryckrespons för sensor PS7 placerad på 0.5m djup i bana A, material +0/-32mm (Hög amplitud @ 26Hz passage 1-8 och låg amplitud @ 33Hz passage 9-12).



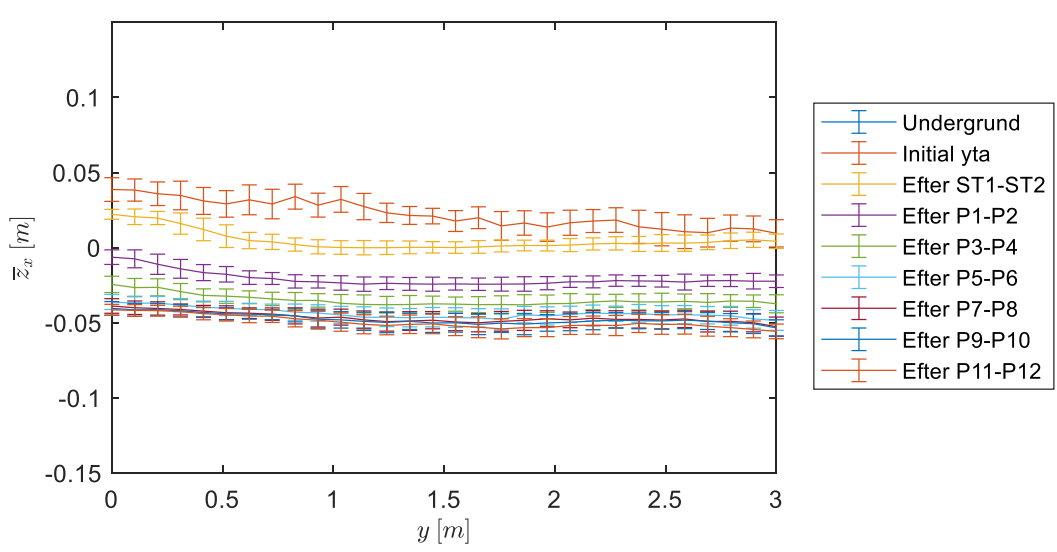
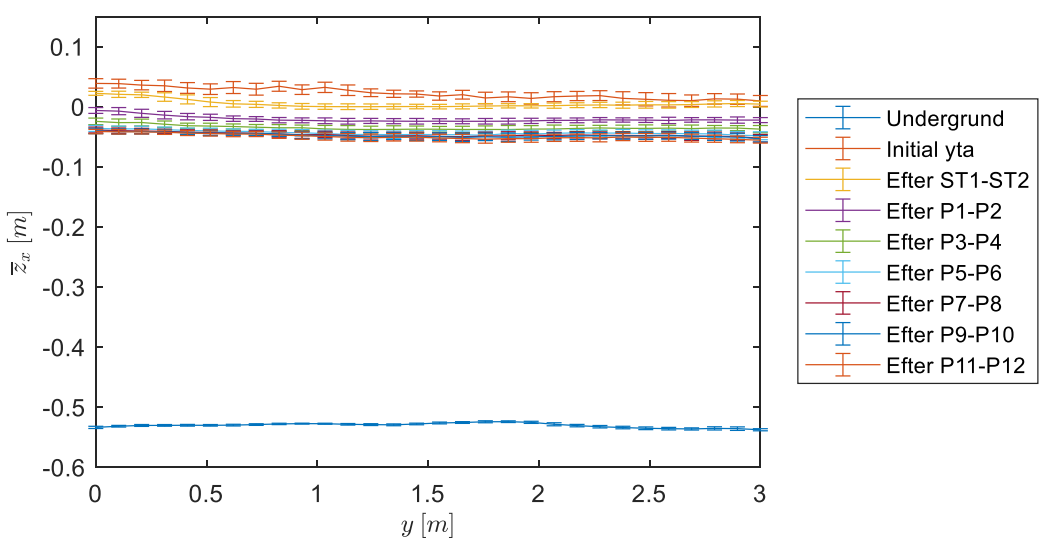
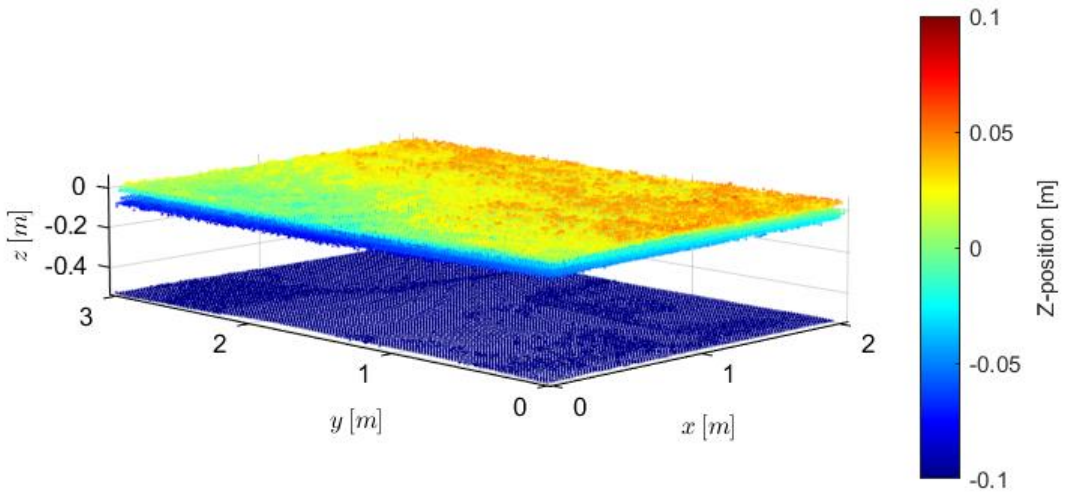
Figur 47. Tryckrespons för sensor PS8 placerad på 0.5m djup i bana B, material +/-32mm (Låg amplitud @ 33Hz).

9.2 Sammanställning analys av punktmoln och deformationsmätning

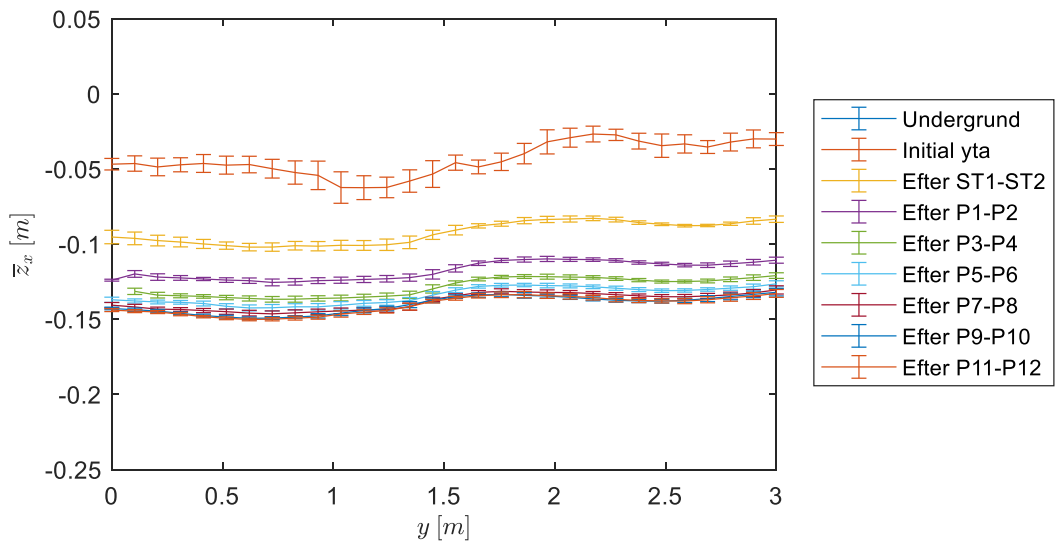
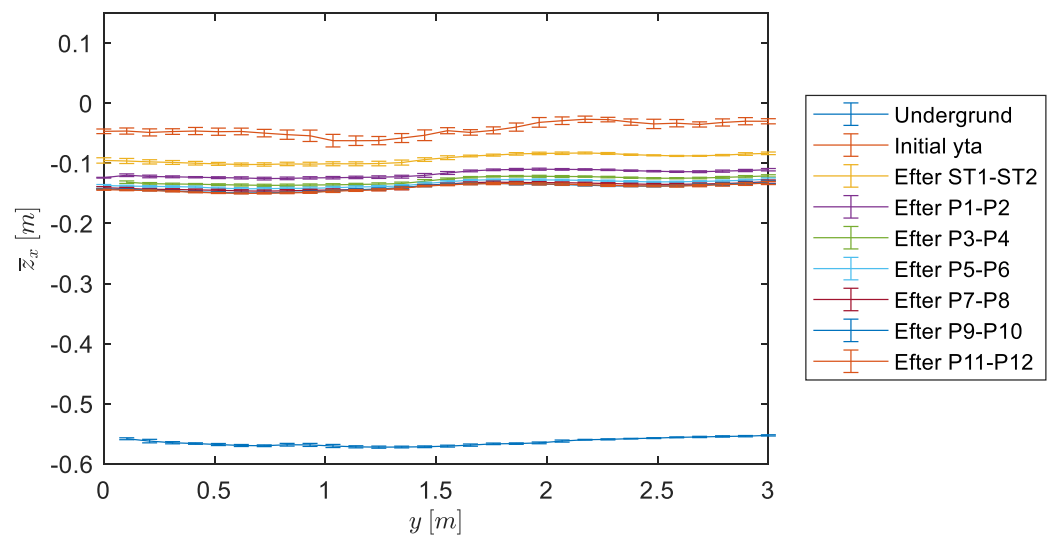
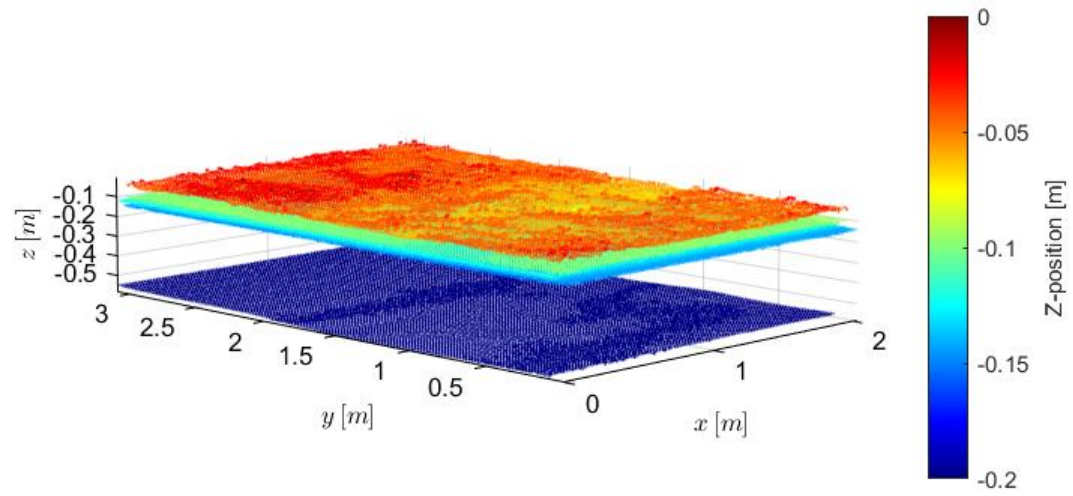
9.2.1 Sensor position 1 – Bana A – Material: +0/-90



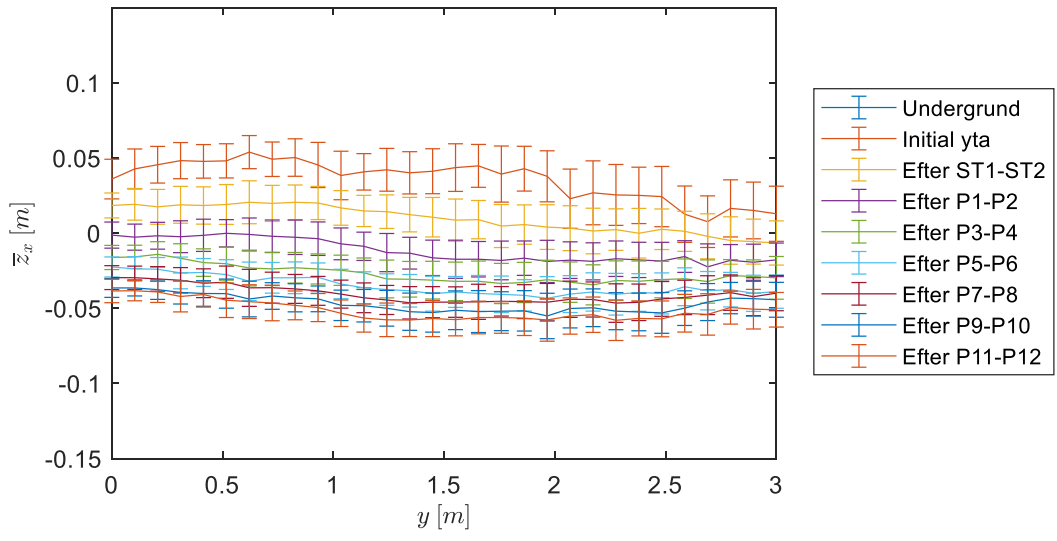
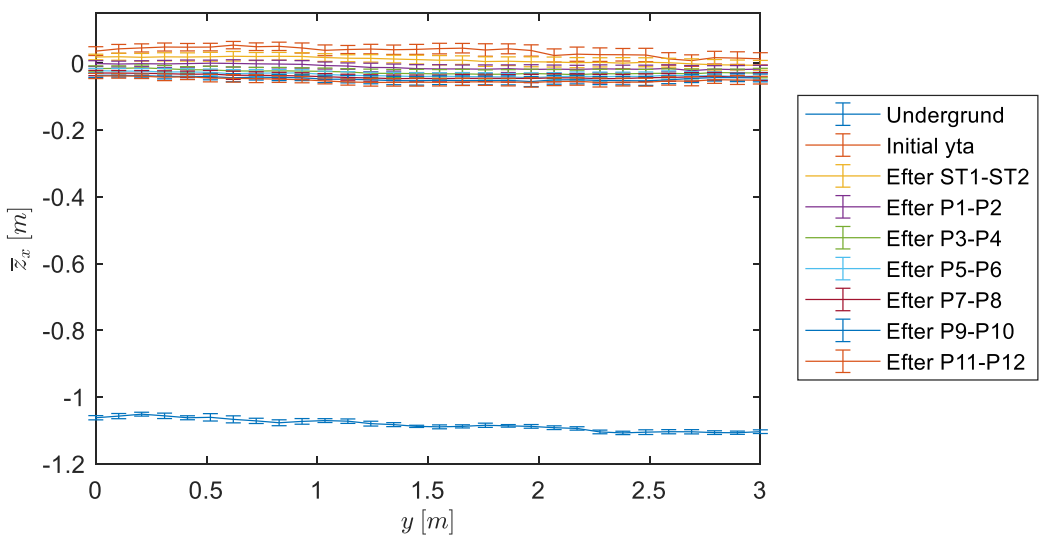
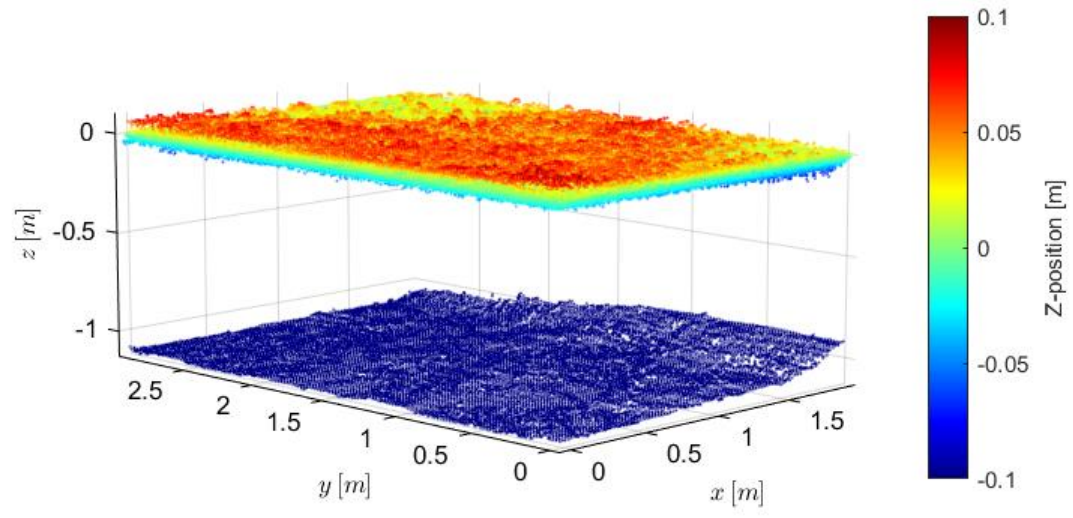
9.2.2 Sensor position 2 – Bana A – Material: +8/-32



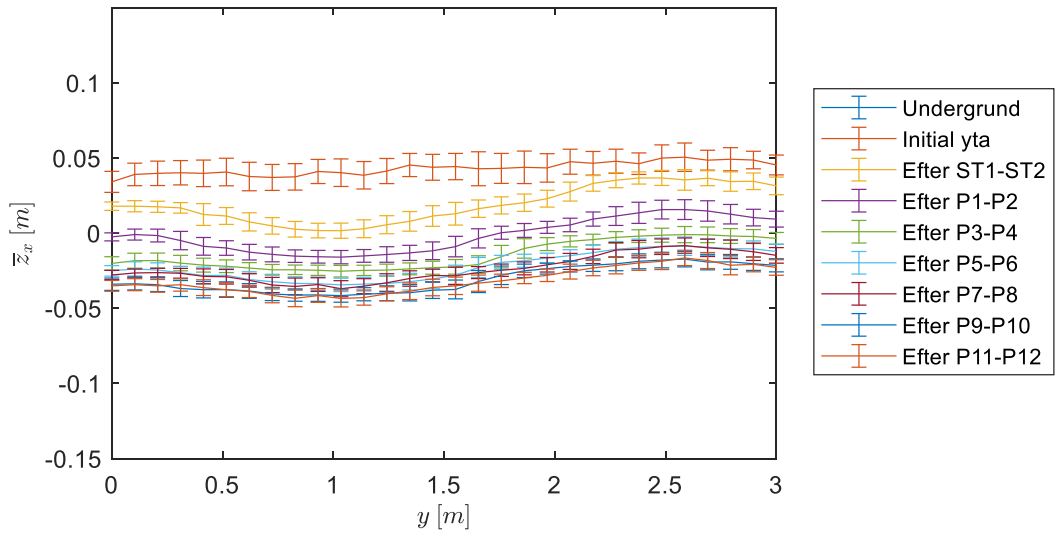
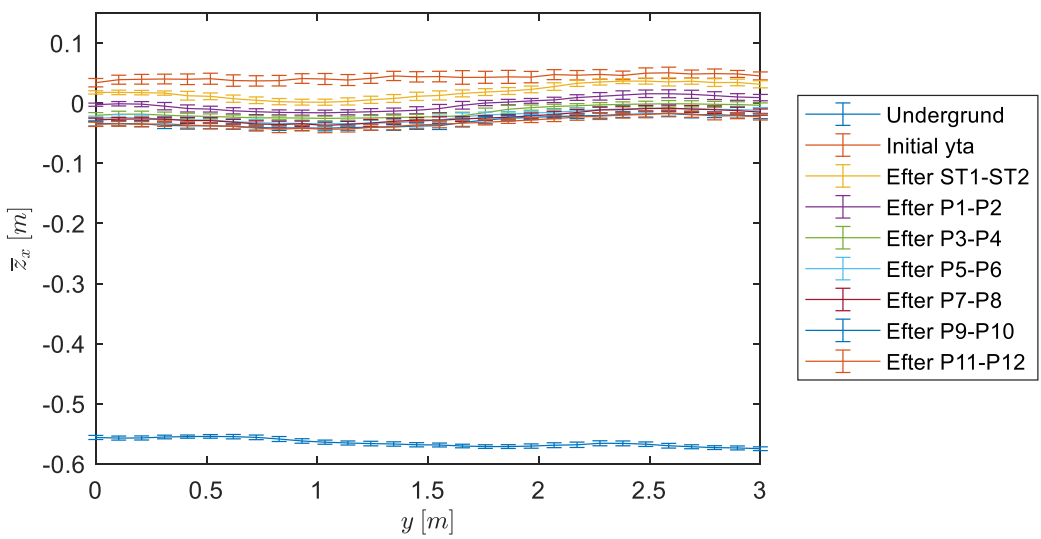
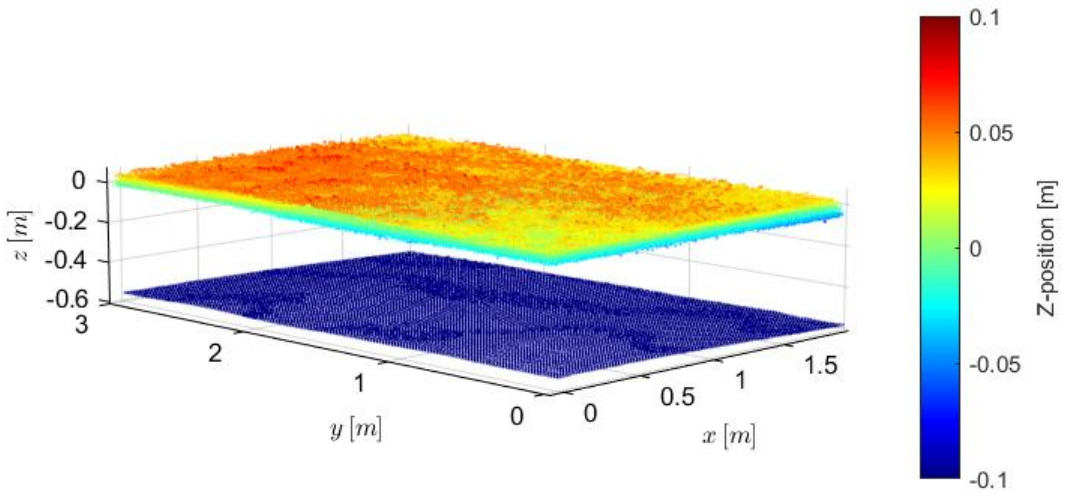
9.2.3 Sensor position 3 – Bana A – Material: +0/-32



9.2.4 Sensor position 4 – Bana B – Material: +8/-90



9.2.5 Sensor position 5 – Bana B – Material: +8/-32



9.2.6 Sensor position 6 – Bana B – Material: +0/-32

