

# DYNAMISK MARKRESPONSANALYS FÖR UTOMHUSKONSERTER: EN FALLSTUDIE AV LÖS LERAS BETEENDE UNDER RYTMISK PUBLIKBELASTNING

*Tan Manh Do*<sup>A</sup>, *Håkan Rosén*<sup>A</sup>, *Anton Laitila*<sup>A</sup>, *Andreas Sigfridsson*<sup>B</sup>

**A Mitta AB**

**B Norconsult AB**

## SAMMANFATTNING

Denna studie utvärderade flera geotekniska risker baserat på detaljerade bedömningar av jordegenskaper, belastningsfrekvenser och dynamiska responsegenskaper för en omfattande geoteknisk riskanalys som genomfördes för en utomhuskonsert under publikinducerade dynamiska laster. En initial analys utfördes först, följt av ett omfattande kontrollprogram under och efter konserten, med mätning av portrycksutveckling och efterföljande sättningar. Dessutom installerades vibrationssensorer vid närliggande byggnader för att bedöma potentiella strukturella påverkningar från markförmedlade vibrationer. Fältmätningarna validerade den föregående riskbedömningen och visade inga signifikanta sättningar, endast mindre portrycksökningar under framträdandet samt vibrationsnivåer som förblev väl inom acceptabla gränser för intilliggande strukturer.

## SUMMARY

This study evaluated several geotechnical risks based on detailed assessments of soil properties, load frequencies, and dynamic response characteristics for a comprehensive geotechnical risk analysis conducted for an outdoor concert event under crowd-induced dynamic loads. An initial analysis was performed first and followed by a comprehensive monitoring program during and after the concert, measuring pore pressure development and subsequent settlements. In addition, vibration sensors were installed at nearby buildings to assess potential structural impacts from ground-borne vibrations. The field measurements validated the previous risk assessment and showed no significant settlements, only minor pore pressure increases during the performance, and vibration levels that remained well within acceptable limits for adjacent structures.

## 1 INTRONDUCTION

Lös lera, särskilt kvicklera, uppvisar betydande geotekniska problem under allmänna belastningsförhållanden. Dessa jordar genomgår dramatisk hållfasthetsförlust vid störning. Under dynamisk belastning förstärks dessa sårbarheter avsevärt, eftersom vibrationer orsakar ökad porvattentrycksuppbyggnad och minskad stabilitet, vilket potentiellt kan leda till katastrofala brott (Yvonne et al., 2005). I de flesta fall är porvattentrycksuppbyggnad associerad med seismisk belastning och cyklisk trafikbelastning (Do et al., 2023). Emellertid kan alla vibrationsinducerade dynamiska accelerationer orsaka en ökning av porvattentrycket, varigenom skjuvhållfastheten i jorden reduceras (Do et al., 2022).

Under de senaste decennierna har flera studier behandlat dynamiska jordbeteenden under seismisk belastning (Dash och Sitharam, 2011; Kheirbek-Saoud och Fleureau, 2012; Sonmezer, 2019; Sonmezer et al., 2020; Wang et al., 2012) eller under cyklisk trafikbelastning (Do et al., 2021; Do et al., 2023; Gluchowski et al. 2019; Ichii och Mikami, 2018; Indraratna et al. 2020; Lei et al. 2016; Loh, 2011; Mortezaie och Vucetic, 2013; Procter och Khaffaf, 1984; Sangrey et al. 1969; Wang et al. 2013; Yasuhara et al. 1982; Zhou och Gong, 2001).

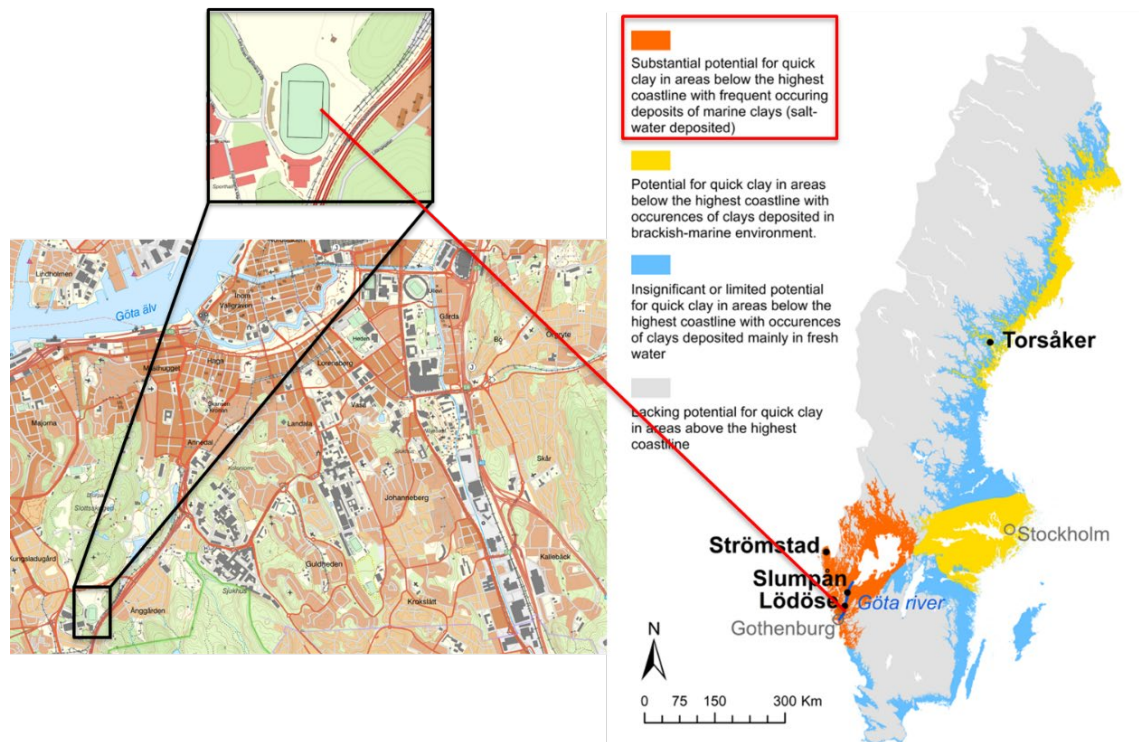
Dock har forskning om dynamiskt jordbeteende under rytmisk hoppande publikbelastning ännu inte närmare utvärderats. Därför fokuserar denna studie på jordens dynamiska responskaraktistik under rytmisk publikbelastning genom både empiriska metoder och fältkontrollprogram.

## 2 INITIAL ANALYS

### 2.1 Markförhållanden

Den utvalda platsen för denna undersökning är Slottsskogsvallen (Göteborg) i sydvästra Sverige, där randen av den fennoskandiska inlandsisen drog sig tillbaka medan den var i kontakt med Nordsjön. Efter inlandsisens tillbakadragande avsattes glaciomarin lera i saltvatten under havsgränsen. Figur 1 visar studieområdet och potentiella kvickleraområden i Sverige (Christoffer With et al., 2022).

Christoffer With et al 2022 (SIG)



Figur 1. Potentiella kvickleraområden i Sverige (Christoffer With et al 2022)

### 2.1.1 Geohydrologiska förhållanden

Baserat på tidigare undersökningar (PE Teknik och Arkitektur, 2023) från CPT och DPT tyder porvattentrycksmätningarna i leran på en grundvattennivå mellan 0,3 och ca 2 m under markytan. Grundvattenytan bedöms kunna variera över tid beroende på årstid och nederbörd.

### 2.1.2 Geotekniska förhållanden

De tidigare utförda geotekniska undersökningarna (PE Teknik och Arkitektur, 2023) som utförts har huvudsakligen koncentrerats till områdets östra sida. Jordprofilen består generellt av fyllning ovanpå naturligt lagrad jord ned till berg. Överst återfinns fyllnadsmaterial med en mäktighet av cirka 0,2–1,6 meter. Fyllningen består av sandig mulljord, stenig grusig sand och stenig grusig lera. Tegelrester har även påträffats i fyllningen.

Under fyllningen påträffas lera med varierande mäktighet. De översta cirka 1–2 metrarna utgörs av torrskorpelera. Mellan torrskorpeleran och den lösa leran finns ett lager av organiskt material, bestående av torv, gyttja och dy med en mäktighet mellan 0,1 och 1 meter. Detta organiska material uppvisar mycket höga vattenhalter.

Den underliggande leran har följande egenskaper: Vattenkvot mellan 95–105% (uppmätt mellan 3–8 meters djup); Densitet mellan 1,3–1,5 t/m<sup>3</sup>; Låg skjuvhållfasthet omkring 8–10 kPa; Hög sensitivitet (30–70).

Under leran finns ett lager friktionsjord som vilar på berg.

### 2.1.3 Geotekniska parametrar

Alla geotekniska parametrar som används i den initiala analysen visas i Tabell 1. Härledda värden på odränerad skjuvhållfasthet ( $c_u$ ) för lerig jord är baserade på utvärderade resultat från CPT-sonderingar.

Tabell 1. Geotekniska parametrar som använts i initial analys

Jordlager	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Tjocklek (m)	Konflytgränsen (%)	Skjuvhållfasthet (kPa)	Skjuvvågshastighet $V_s$ (m/s)	$V_{s_{eq}}$ (m/s)	Egenfrekvens (hz)
Fyllning	2000	1.0	-	-	205	81	2.54
Torrskorpelera	1800	1.5	-	30	124		
siltig Lera	1800	1.5	78	20	85		
gyttig Lera	1500	4.0	68	8	63		

För övriga dynamiska parametrar finns det empiriska samband för att uppskatta den dynamiska skjuvmodulen, föreslagna av Larsson, R. och Mulabdic, M. (1991) i 'Shear moduli in Scandinavian clays' (Rapport nr 40, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Sverige). Enligt Larsson och Mulabdic (1991) kan det empiriska sambandet för skandinaviska kohesionsjordar beskrivas enligt följande:

$$G_0 = 504 * c_u / w_L \quad (1)$$

Där  $c_u$  är den odränerade skjuvhållfastheten och  $w_L$  är jordens flytgräns. För vidare läsning om hur uttrycket enligt ekvation (1) har härletts hänvisas läsaren till rapporten av Larsson och Mulabdic (1991).

Om ekvation (1) vidare kombineras med uttrycket för skjuvmodulen enligt ekvationen  $G_0 = \rho V_s^2$  erhålls följande:

$$V_s = \sqrt{((504 * c_u) / (w_L * \rho))} \quad (2)$$

Detta empiriska samband återfinns i Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner (TK Geo) och används ofta i branschen när en första uppskattning av skjuvvågshastigheten med tillhörande dynamiska problem ska göras.

En annan viktig dynamisk parameter är egenfrekvensen ( $f$ ) för en jordprofil, som kan beräknas baserat på skjuvvågshastigheten ( $V_s$ ) genom följande samband:

$$f = V_s / (4H) \quad (3)$$

där:

$f$  är egenfrekvensen i Hz (Hertz)

$V_s$  är skjuvvågshastigheten i m/s

$H$  är jordlagrets mäktighet i meter

## 2.2 Belastningsfrekvenser under rytmisk publikbelastning

Beräkningar från den initiala analysen visar att markens egenfrekvens i det aktuella området är 2,5 Hz. För fotbollspublik och andra liknande evenemang har det noterats att normal hoppfrekvens erhålls inom 1,9–2,3 Hz. Standarden nämner att man bör beakta 1,5–3,5 Hz för grundtonen, men det finns en hel del erfarenhet som visar att det är svårt att erhålla koordinerad hoppsekvens över 2,8 Hz. Egenfrekvensen ligger därmed något över den hoppfrekvens vi förväntar oss vara mest kritisk, men fortfarande inom riskområdet.

Detta ger en viss reduktion av risken för att hoppfrekvens och markens egenfrekvens ska sammanfalla, men de ligger fortfarande tillräckligt nära varandra för att viss försiktighet bör iaktas. Vid resonans, det vill säga när hoppfrekvens och markens egenfrekvens sammanfaller, kan förstärkningsfaktorn bli betydande, men även om de kommer nära varandra kan viss förstärkning erhållas på grund av bandbredden på markens egenfrekvens. Denna marginal ger en viss säkerhet mot direkt resonans, men eftersom frekvensen fortfarande ligger relativt nära det kritiska intervallet bör viss försiktighet iaktas. Vid resonans kan förstärkningsfaktorn bli betydande även vid frekvenser som ligger nära men inte exakt på egenfrekvensen.

Särskild uppmärksamhet bör ägnas åt detta område på grund av förekomsten av gytjig lera med hög sensitivitet (30–70). Högekänsliga leror kan uppvisa betydande hållfasthetsförlust vid dynamisk belastning, vilket kan påverka både stabiliteten och sättningsegenskaperna. Även om egenfrekvensen ligger utanför det kritiska intervallet kan den relativt höga sensitiviteten hos leran innebära att även måttliga vibrationer kan leda till strukturförändringar i jorden över tid.

Dock baseras alla resultat från den initiala analysen på de tidigare utförda geotekniska undersökningarna, vilka huvudsakligen har koncentrerats till områdets östra sida. För säkerhetens skull rekommenderas därför att utföra ett kontrollprogram med sättningkontroll, porttryckskontroll och vibrationskontroll för evenemanget.

### **3 KONTROLLPROGRAM**

#### **3.1 Sättnings- och portrycksmätning**

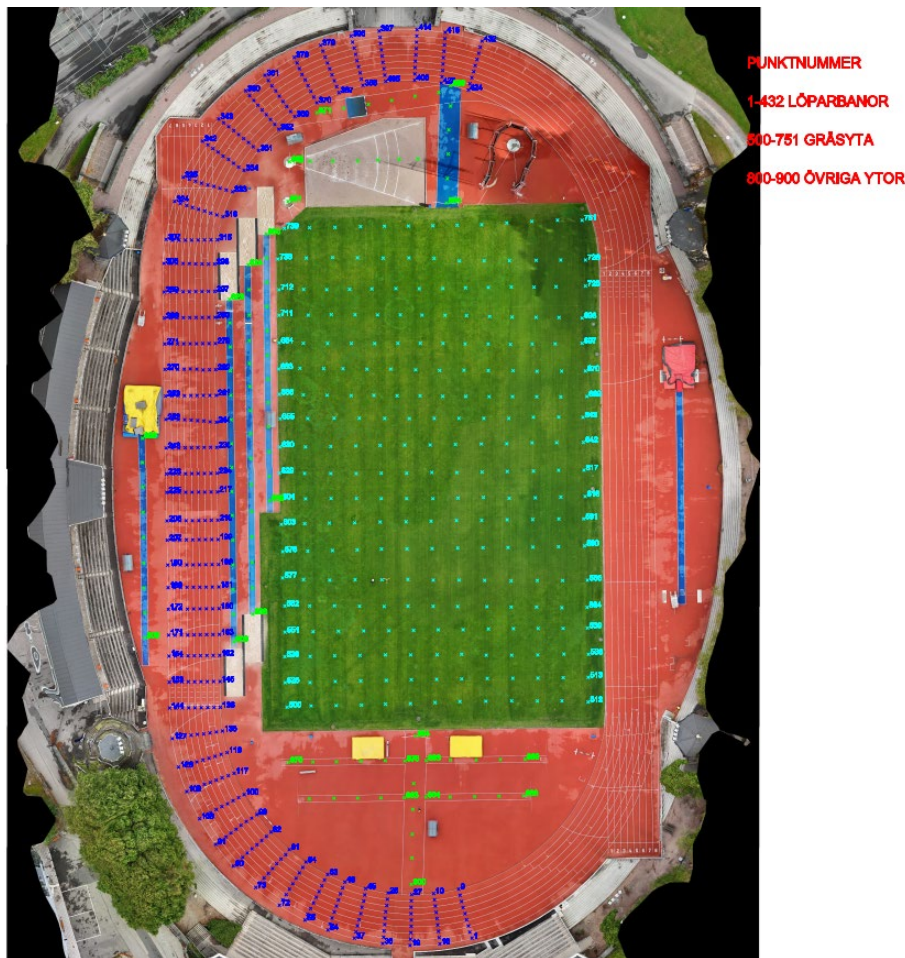
##### **3.1.1 Sättningskontroll**

För att säkerställa noggrann dokumentation av marksättningar genomfördes en omfattande geodetisk mätningsskampanj med totalstation. Mätmetodiken utvecklades specifikt för denna tillämpning, där specialanpassade mätprisma med platta fotplattor på stängerna användes för att optimera mätnoggrannheten och säkerställa reproducerbara mätförhållanden.

Sättningskontrollerna omfattade systematisk inmätning av 50 procent av löparbanornas yta, motsvarande cirka 200 meter av arenans totala omkrets (se översikt över mätpunkter i figur 2). Detta urval gjordes strategiskt för att täcka den del av anläggningen som inte påverkades direkt av scenuppbyggnad och tillhörande infrastruktur, vilket möjliggjorde en representativ analys av markbeteendet under den primära belastningszonen.

Mätningen genomfördes enligt ett strukturerat rutnät där totalt åtta löparbanor karterades längs nio parallella mätlinjer. Mätpunkterna placerades med fem meters intervall längs varje linje, vilket resulterade i totalt 432 kontrollpunkter för den geodetiska analysen. Utöver löparbanorna omfattade kontrollprogrammet även systematisk övervakning av gräsytan med 251 mätpunkter samt övriga ytor inom anläggningen med 100 mätpunkter. Detta gav en total täckning med 783 kontrollpunkter över hela det övervakade området, vilket säkerställde en detaljerad spatial upplösning av sättningsförloppen över samtliga relevanta ytor inom arenakomplexet.

Mätprotokollen följde en tvåfasmetodik där initiala nollmätningar genomfördes före konserten för att etablera referensnivåer. Efter konsertens genomförande återetablerades identiska mätpunkter med exakt samma positionering, varefter slutmätningarna utfördes. Denna systematiska metod möjliggjorde precisa beräkningar av vertikala förskjutningar och säkerställde reliabla data för den geotekniska utvärderingen.



Figur 2. Översikt mätpunkter i fältet

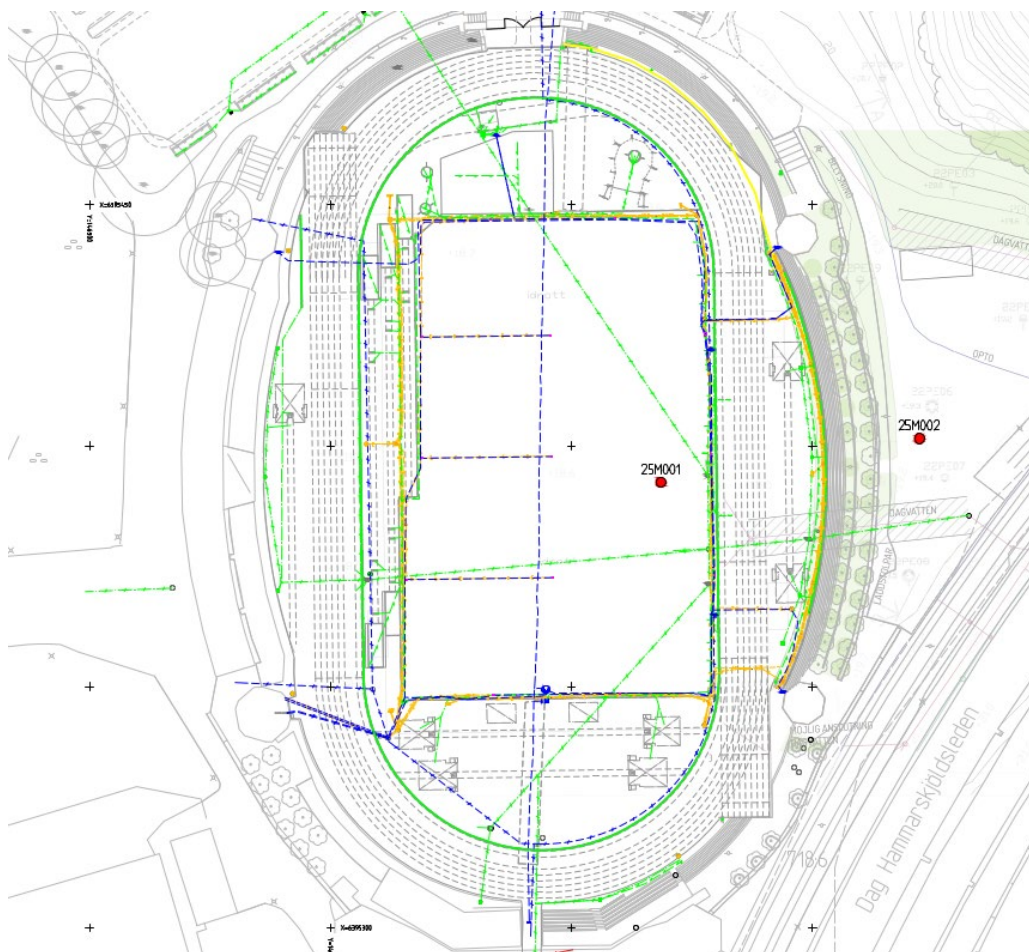
### 3.1.2 Portryckskontroll

För övervakning av portrycksförändringar under konsertperioden installerades BAT-piezometrar på strategiskt utvalda platser inom anläggningsområdet. Instrumenteringen omfattade totalt tre mätpunkter med olika installationsdjup för att erhålla en representativ bild av portrycksutvecklingen i de kritiska jordlagren. Figur 3 och 4 visar installation av BAT-piezometrar i fältet respektive en översikt över portrycksmätpunkter i fältet. I mätpunkt 25M001 installerades två BAT-spetsar på olika nivåer för att möjliggöra djupspecifik övervakning av portrycksförhållandena. På 3,5 meters djup placerades piezometer PA5212, medan piezometer PA5205 installerades på 5,5 meters djup. Denna vertikala distribution av instrument möjliggjorde analys av portrycksvariationer med djupet och identifiering av eventuella skillnader i konsolideringsbeteende mellan olika jordlager.

Ytterligare en BAT-spets, betecknad PA5111, installerades i mätpunkt 25M002 på 4,5 meters djup. Denna kompletterande mätpunkt bidrog till den spatiala täckningen av portrycksövervakningen och möjliggjorde validering av mätdata genom jämförelse mellan närliggande installationer.



Figur 3. BAT-piezometrar installation i fältet



Figur 4. Översikt portrycksmätpunkter i fältet

### 3.1.3 Resultat

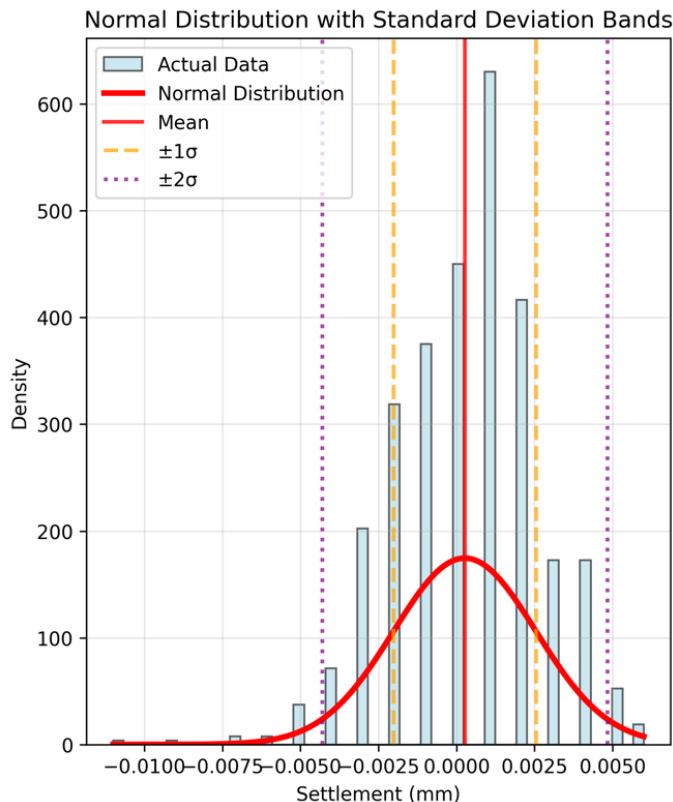
#### *Sättning:*

Alla fältmättningsresultat sammanfattas i PM Riskanalys Geoteknik och Kontrollprogram (Mitta AB, 2025) (inmätning före, inmätning efter och differenser). Figur 5 visar fördelningen av sättningsdata med normalfördelningsanpassning och standardavvikelseband.

Den uppmätta sättningsdata följer en normalfördelning med medelvärde  $\mu = 0,0003$  mm och standardavvikelse  $\sigma = 0,0023$  mm. Detta indikerar att sättningarna är mycket små och väl centrerade kring noll.

Normalfördelningsanpassningen (röd kurva) visar mycket god överensstämmelse med den faktiska datafördelningen, vilket bekräftar att sättningsdata följer normalfördelningsprinciper.

Resultaten tyder på att sättningsprocessen är väl kontrollerad med minimal variation och inga systematiska fel i mätningarna. Få extremvärden (endast 0,5% utanför  $\pm 3\sigma$ ) indikerar hög mätkvalitet. Sättningsdata uppvisar utmärkta normalfördelningssegenskaper med mycket små variationer kring noll, vilket tyder på stabil grund och pålitliga mätningar.



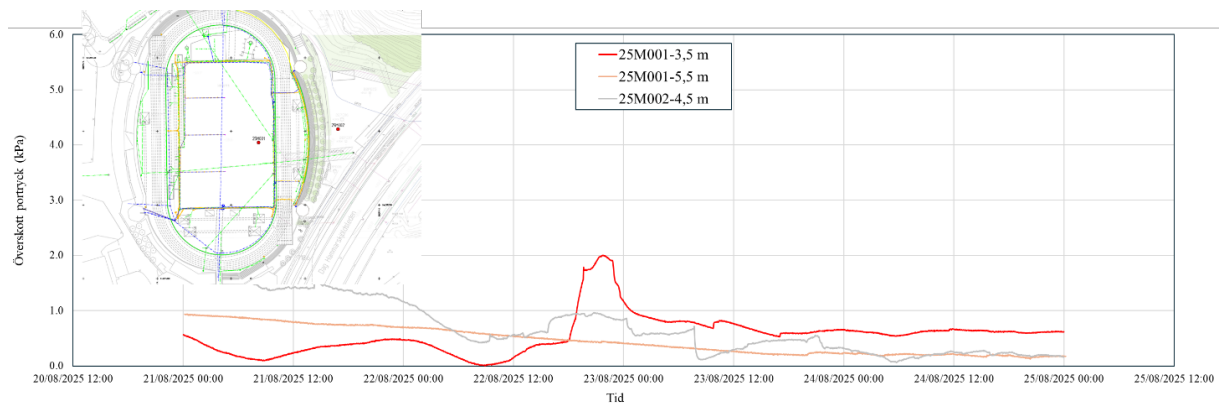
Figur 5. Fördelningen av sättningsdata med normalfördelningsanpassning och standardavvikelseband

### Portrycksmätning:

Resultaten från de tre piezometrarna presenteras i figur 6 och visar skillnader i portrycksutveckling beroende på både läge och djup. Piezometer PA5111, som är placerad utanför området för hopparnas landning (mätpunkt 25M002) på 4,5 meters djup, uppvisar små portrycksförändringar under hela konserten. Detta resultat var förväntat då denna punkt ligger utanför det primära belastningsområdet.

En mer märkbar portrycksutveckling observerades vid mätpunkt 25M001, som är belägen inom området för hopparnas landning. Den grundare piezometern PA5212 (3,5 m djup) registrerade en portrycksökning som kulminerade vid maximalt 2 kPa under konsertens mest intensiva faser. Denna ökning, även om den är mätbar, är fortfarande så begränsad att den inte kan betraktas som en betydande påverkan på jordmassan. Intressant nog visar den djupare piezometern PA5205 (5,5 m djup) i samma mätpunkt en nästan försumbar portrycksutveckling. Detta tyder på att de dynamiska belastningarna från konserten främst påverkar de övre jordlagren, medan effekten avtar betydligt med djupet.

Sammantaget indikerar resultaten att portryck byggdes upp under konserten vid grundare djup, men i obetydlig omfattning. De uppmätta värdena tyder på att jordmassans respons på de dynamiska belastningarna var kontrollerad. Den snabba avklingningen av effekterna med djupet bekräftar att belastningspåverkan var lokaliserad till de övre jordlagren.



Figur 6. Portrycksmätning resultat

## 3.2 Vibrationskontroll

### 3.2.1 Vibration mätpunkter

Inför konserten har en geoteknisk studie utförts med syfte att analysera risk för skador på de nya löparbanorna inom arenan. I samband med denna utredning beslutades att genomföra vibrationsmätningar för att verifiera vilka vibrationsnivåer som erhöles, detta med syfte att följa upp risk för skador på anläggningen. Resultaten kan sedan även användas för bättre bedöma risk inför eventuella framtida konserter.

Mätningar utfördes i 3 punkter enligt figur 7, där mätpunkt kan förklaras enligt följande:

- 1 – Mätpunkt inne på planen, mark (dvs under publik)
- 2 – Mätpunkt utanför arenan, mark
- 3 – Mätpunkt befintlig byggnad söder.



Figur 7. Aktuell placering av mätpunkter

### 3.2.2 Resultat

Resultat visar att vibrationsnivåer ej varit så kraftiga under konserten och att för byggnader inom arenan föreligger mycket liten risk för skador på byggnader. Det gäller även de högre tornen inom området men där komfortstörande vibrationer kan upplevas om man befinner sig högre upp i byggnaderna. Gällande risk för skador på löparbanor så motsvarar maximalt uppmätta vibrationsnivåer inne på gräsplanen (dvs under publik) en rörelse på maximalt +/- 1,3 mm (16 mm/s @ 2 Hz). För befintlig pålad byggnad i söder (benämnd ovan som kansli) enligt mätpunkt 3 föreligger ingen risk för skador då uppmätta vibrationsnivåer är mycket låga. Även resultat för mätpunkt 2 och en eventuell kommande byggnation medför låg risk då riktvärdet för en ny anläggning bör uppgå till omkring 10 mm/s. Riktvärde beror dock på slutlig konstruktion och grundläggning.

Tabell 2. Sammanställning över högst uppmätta vibrationsnivåer.

Mätpunkt	Fastighetsbeteckning Adress	Riktning	Högsta uppmätta svängnings- hastighet (mm/s)	Högsta uppmätta komfortvärde (mm/s vägd RMS)
1	Göteborg Slottsskogen 719:4 25M001 - Mark	X-led, horisontellt längs arenan	14	3,6
		Y-led, horisontellt tvärs arenan	16	3,5
		Z-led, vertikalt	12	2,9
2	Göteborg Slottsskogen 719:4 25M002 - Mark	X-led, horisontellt tvärs arenan	2,0	0,5
		Y-led, horisontellt längs arenan	2,9	0,7
		Z-led, vertikalt	1,1	0,3
3	Göteborg Slottsskogen 719:4 Kansli - Byggnad	X-led, horisontellt längs arenan	0,2	0,1
		Y-led, horisontellt tvärs arenan	0,2	0,1
		Z-led, vertikalt	0,1	0,1

Slutligen bedöms även låg risk för kännbara vibrationer till bostäder österut dvs på andra sidan Dag Hammarskjöldsleden. Till vår vetskap har heller inga klagomål inkommit efter konserten. Baserat på resultaten i mätpunkt 2 och komfortnivåer på 0,7 mm/s vägd RMS kan ett enklare överslag med avseende på avståndsdämpning utföras. Avståndet till bostäder bedöms uppgå till cirka tre gånger större än till mätpunkt 2, vilket medför att komfortnivåer med avseende på geometrisk dämpning bör reduceras till ca 0,4 mm/s vägd RMS. Beroende på byggnadernas grundläggning och känslighet för inkommande vibrationer med störfrekvens ca 2 Hz kan dessa vibrationsnivåer både minska (t ex vid pålad grundläggning) samt förstärkas uppåt i byggnad (egenfrekvens för byggnad/grundläggning – horisontell riktning).

## 4 SLUTSATS

Denna studie genomförde en dynamisk markresponsanalys för en utomhuskonsert under rytmiska publikbelastningar. En initial analys utfördes först, följt av ett omfattande kontrollprogram under och efter konserten, med mätning av sättning, portrycksutveckling och vibration.

Sättningsmätningarna visade mycket små förskjutningar, vilket bekräftar stabil grund och pålitliga mätningar. Portrycksmätningarna visade begränsade effekter: en mätbar men obetydlig portrycksökning registrerades i övre jordlagren under konsertens mest intensiva faser, medan effekten var försumbar i djupare lager. Detta bekräftar att belastningspåverkan var lokaliserad till övre jordlager och avklingade snabbt med djupet.

Vibrationsmätningarna visade att nivåerna förblev inom acceptabla gränser. För byggnader inom arenan och eventuell framtida byggnation bedöms risken vara låg. Bedömningen visar även låg risk för kännbara vibrationer till närliggande bostäder, vilket bekräftar att inga klagomål inkommit efter konserten.

Sammantaget bekräftar resultaten att de dynamiska publikbelastningarna inte orsakade signifikant geoteknisk påverkan. Sättningarna var försumbara, portrycksutvecklingen begränsad och lokaliserad till övre jordlager, och vibrationsnivåerna förblev inom acceptabla gränser för strukturell säkerhet och komfort. Studien visar att med korrekt riskbedömning och kontrollprogram kan utomhuskonserter genomföras säkert.

## 5 REFERENSER

- Dash, H. and Sitharam, T. (2011), *Cyclic liquefaction and pore pressure response of sand-silt mixtures*. Geomech. Eng., 3(2), 83–108.
- Do, T.M., Gunnvard, P., Mattsson, H., and Laue, J., 2021. *Railway embankment behaviour due to increased truck loads - A numerical study*. In Proceeding of the 18th Nordic Geotechnical Meeting 2020, Virtual Conference, 18–19 January 2021.
- Do, T.M., Laue, J., Mattsson, H., and Jia, Q., 2023. *Excess pore water pressure generation in fine granular materials under undrained cyclic triaxial loading*. International Journal of Geo-Engineering (2023) 14:8
- Gluchowski, A., Sobol, E., Szymanski, A., and Sas, W., 2019. *Undrained pore pressure development on cohesive soil in triaxial cyclic loading*. Appl Sci 9(18):3821.
- Ichii, K., and Mikami, T., 2018. *Cyclic threshold shear strain in pore water pressure generation in clay in situ samples*. Soils Found 58(3):756–765.
- Indraratna, B., Singh, M., Nguyen, T.T., Leroueil, S., Abeywickrama, A., Kelly, R., and Neville, T., 2020. *Laboratory study on subgrade fluidization under undrained cyclic triaxial loading*. Can Geotech J 57(11):1767–1779.

- ISO, 2007. ISO 10137:2007, *Bases for design of structures Serviceability of buildings and walkways against vibrations*.
- Kheirbek-Saoud, S. and Fleureau, J.M., 2012. *Liquefaction and post-liquefaction behaviour of a soft natural clayey soil*, Geomech. Eng., 4(2), 121–134.
- Larsson, R., and Mulabdic, M., 1991. *Shear moduli in Scandinavian clays*. Rep. No. 40, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Sweden.
- Lei, H., Li, B., Lu, H., and Ren, Q., 2016. *Dynamic deformation behavior and cyclic degradation of ultrasoft soil under cyclic loading*. J Mater Civ Eng 28(11):04016135.
- Loh, B.H., 2011. *Behaviour of railway track subgrade under cyclic loading*. PhD thesis, Curtin University.
- Mitta AB, 2025. *PM Riskanalys Geoteknik och Kontrollprogram*. Upprättad 2025-09-19.
- Mortezaie, A.R., and Vucetic, M., 2013. *Effect of frequency and vertical stress on cyclic degradation and pore water pressure in clay in the NGI simple shear device*. J Geotech Geoenviron Eng 139(10):1727–1737.
- PE Teknik och Arkitektur, 2023. *MUR Geoteknisk undersökning för skatepark, Göteborg, Slottsskogsvallen*. Upprättad 2023-01-23.
- PE Teknik och Arkitektur, 2023. *Projekterings-PM Geoteknisk undersökning för skatepark, Göteborg, Slottsskogsvallen*. Upprättad 2023-01-23.
- Procter, D.C., and Khaffaf, J.H., 1984. *Cyclic triaxial tests on remoulded clays*. J Geotech Eng 110(10):1431–1445.
- Sangrey, D., Henkel, D., and Esrig, M.I., 1969. *The effective stress response of a saturated clay soil to repeated loading*. Can Geotech J 6(3):241–252.
- Sonmezer, Y.B., Akyuz, A. and Kayabali, K., 2020. *Investigation of the effect of grain size on liquefaction potential of sands*, Geomech. Eng., 20(3), 243–254.
- Wang, B., Zen, K., Chen, G. and Kasama, K., 2012. *Effects of excess pore pressure dissipation on liquefaction-induced ground deformation in 1-g shaking table test*, Geomech. Eng., 4(2), 91–103.
- Wang, S., Yang, J., and Onyejekwe, S., 2013. *Effect of previous cyclic shearing on liquefaction resistance of Mississippi River Valley silt*. J Mater Civ Eng 25(10):1415–1423.
- Yasuhara, K., Yamanouchi, T., and Hirao, K., 1982. *Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay*. Soils Found 22(3):77–91.
- Yvonne, A.S., Kenneth, T., Bo, L., Karin, O., Rodney L.S., Karin, R., 2005. *Quick clay—A case study of chemical perspective in Southwest Sweden*. Engineering Geology. 82(2):107–118.
- Zhou, J., and Gong, X., 2001. *Strain degradation of saturated clay under cyclic loading*. Can Geotech J 38(1):208–212.