

MOT TILLFÖRLITLIG YTTÄCKANDE PACKNINGSKONTROLL – LÄRDOMAR FRÅN FULLSKALEFÖRSÖK

Wenjun Hua^A, *Carl Wersäll*^B, *Andreas Persson*^C, *Stefan Larsson*^A

^A *KTH Kungliga Tekniska högskolan*

^B *Kerberos Geoteknik AB*

^C *Dynapac Compaction Equipment AB*

SAMMANFATTNING

Jordpackning är en av de mest grundläggande och kritiska jordförstärkningsmetoderna, som utförs i nästan alla typer av byggprojekt, med särskild betydelse inom infrastruktursektorn. En väl utförd packning är avgörande för en konstruktions funktion och livslängd, och med tanke på dess betydande miljöpåverkan är det av yttersta vikt att optimera packningsarbetet. För känsliga konstruktioner som järnvägar, där minimala sättningar är ett krav, är optimal packning av yttersta vikt. Detta gäller i synnerhet vid byggnation av moderna järnvägssystem med ”slab-track”, där undergrundens stabilitet är avgörande för att minimera sättningar. Idag finns ett stort behov av att effektivt kunna verifiera packningsresultat. Nuvarande metoder, såsom plattbelastningsförsök (PLT), är tidsödande och ger endast diskreta mätpunkter, vilket begränsar den yttäckande kontrollen. Därför är det av stor vikt att etablera tillförlitliga korrelationer mellan intelligenta packningsmått (ICMV) – som möjliggör yttäckande packningskontroll (YPK) – och konventionella punktprov.

Denna studie adresserar detta behov genom att presentera fullskaliga, kontrollerade laboratorieförsök. Syftet var att systematiskt utvärdera hur plattstorlek (300 och 600 mm) och vält-typ (Dynapac CA3500D och CA6500D med statiska linjelaster på 36 och 65 kg/cm) påverkar deformationsmoduler från PLT samt 16 olika ICMV, vilka spänner över kinematiska, mekanikbaserade och energibaserade kategorier.

Resultaten visar att 600 mm-plattan, trots något lägre deformationsmodul E_{v2} , gav konsekvent förbättrade korrelationer med ICMV, sannolikt tack vare dess djupare influensvolym. Den tyngre välten producerade högre E_{v2} och lägre variabilitet än den lättare. Analys av ICMV-samband avslöjade stark redundans och tre tydliga kluster (harmonisk-, styvhets- och energibaserade), vilket stöder användningen av en enskild representant från varje kluster vid kalibrering. Vibrationsmodulen E_{vib} och harmonisk-baserade index presterade bäst i korrelation med PLT, medan energibaserade index var mindre lämpliga.

Sammanfattningsvis förbättrar större PLT-plattor och mekanikbaserade ICMV korrelationen mellan YPK och PLT, men vältspecifik kalibrering är fortsatt nödvändig. Dessa resultat ger praktisk vägledning för mer tillförlitliga YPK-baserade arbetsflöden för kvalitetssäkring.

SUMMARY

Soil compaction is one of the most fundamental and critical ground improvement methods, performed in almost all types of construction projects, with particular significance within the infrastructure sector. Well-executed compaction is crucial for the performance and service life of a structure, and given its significant environmental impact, optimizing compaction work is of the utmost importance. For sensitive structures such as railways, where minimal settlement is a requirement, optimal compaction is vital. This applies in particular to the construction of modern railway systems using “slab-track”, where subgrade stability is decisive for minimizing settlement. Today, there is a great need to effectively verify compaction results. Current methods, such as the plate load test (PLT), are time-consuming and provide only discrete measurement points, limiting area-wide control. Therefore, it is highly important to establish reliable correlations between intelligent compaction measurement values (ICMV) – which enable continuous compaction control (CCC) – and conventional spot tests.

This study addresses this need by presenting full-scale, controlled laboratory experiments. The aim was to systematically evaluate how plate size (300 and 600 mm) and roller type (Dynapac CA3500D and CA6500D with static linear loads of 36 and 65 kg/cm) affect deformation moduli from PLT as well as 16 different ICMVs, spanning kinematic, mechanics-based, and energy-based categories.

The results show that the 600 mm plate, despite a slightly lower deformation modulus E_{v2} , yielded consistently improved correlations with ICMVs, likely due to its deeper influence volume. The heavier roller produced higher E_{v2} values and lower variability than the lighter roller. Analysis of relationships among ICMVs revealed strong redundancy and three distinct clusters (harmonic-, stiffness-, and energy-based), supporting the use of a single representative from each cluster during calibration. The vibration modulus E_{vib} and harmonic-based indices performed best in correlation with PLT, while energy-based indices were less suitable.

In conclusion, larger PLT plates and mechanics-based ICMVs improve the correlation between CCC and PLT, but roller-specific calibration remains necessary. These results provide practical guidance for more reliable CCC-based workflows for quality assurance.

1 INLEDNING

Tillförlitlig kvalitetskontroll/kvalitetssäkring (QC/QA) av jordpackning är avgörande för att säkerställa bärlighet, homogenitet och långsiktig funktion, samtidigt som det

stödjer ett mer effektivt och hållbart byggande genom att undvika överpackning och onödiga överfarter. Konventionella punktprov, i synnerhet statiska plattbelastningsförsök (PLT), används fortfarande i stor utsträckning för att kvantifiera styvhet (t.ex. deformationsmodul E_{v2}), men de är arbetsintensiva, långsamma och i sig glesa i rumslig utbredning, vilket begränsar deras förmåga att representera stora arbetsområden. I kontrast till detta använder yttäckande packningskontroll (YPK) (även kallat intelligent packning) sensorer monterade på välten för att leverera kontinuerliga, spatialt täta mätvärden (ICMV) under packningen, vilket möjliggör återkoppling i realtid och driftjusteringar (Forsblad, 1980; Thurner & Sandström, 1980).

Ett stort hinder för en bredare tillämpning av YPK inom kvalitetssäkring är bristen på konsekvent tillförlitliga korrelationer mellan ICMV och mätvärden från konventionella punktprov, såsom styvhet härledd från PLT (Hua *et al.*, 2025). Publicerade studier rapporterar vitt skilda resultat, vilket inte är förvånande med tanke på att ICMV påverkas inte bara av jordegenskaper (modul och fuktkvot) utan även av driftparametrar (vibrationsamplitud, frekvens, körhastighet), maskinegenskaper (massa, valsgeometri) samt skillnader i influensdjup mellan mätmetoderna. Dessa komplexiteter gör det svårt att göra rättvisa jämförelser av ICMV eller att generalisera kalibreringsmetoder över olika arbetsplatser och maskiner.

För att adressera detta genomförde detta arbete en serie fullskaleförsök på en testbädd av grus. Studien isolerar och kvantifierar hur två nyckelfaktorer, PLT-plattans diameter och vält-typ, styr storleken och variabiliteten hos E_{v2} och ICMV, samt de resulterande korrelationerna mellan ICMV och E_{v2} . Rapporten utvärderar också redundans och klustring bland en bred uppsättning ICMV, vilket ger vägledning för valet av representativa indikatorer vid kalibrering.

2 METOD

2.1 Försöksupplägg

Fem fullskaleförsök genomfördes i ett packningslaboratorium med hjälp av en bottenlös testbädd på 27 m × 7 m, avgränsad av vertikala betongväggar, se Figur 1. Den packade ytan delades in i två intilliggande filer på 22 m × 2,13 m (vilket matchar valsbredden). För utvalda försök delades ytan vidare in i tre områden separerade av buffertzoner för att möjliggöra olika antal överfarter inom samma preparering. Denna layout möjliggjorde systematisk jämförelse av mätresultat under kontrollerade initiala förhållanden samtidigt som realistisk vältdrift och jordbeteende bibehölls.

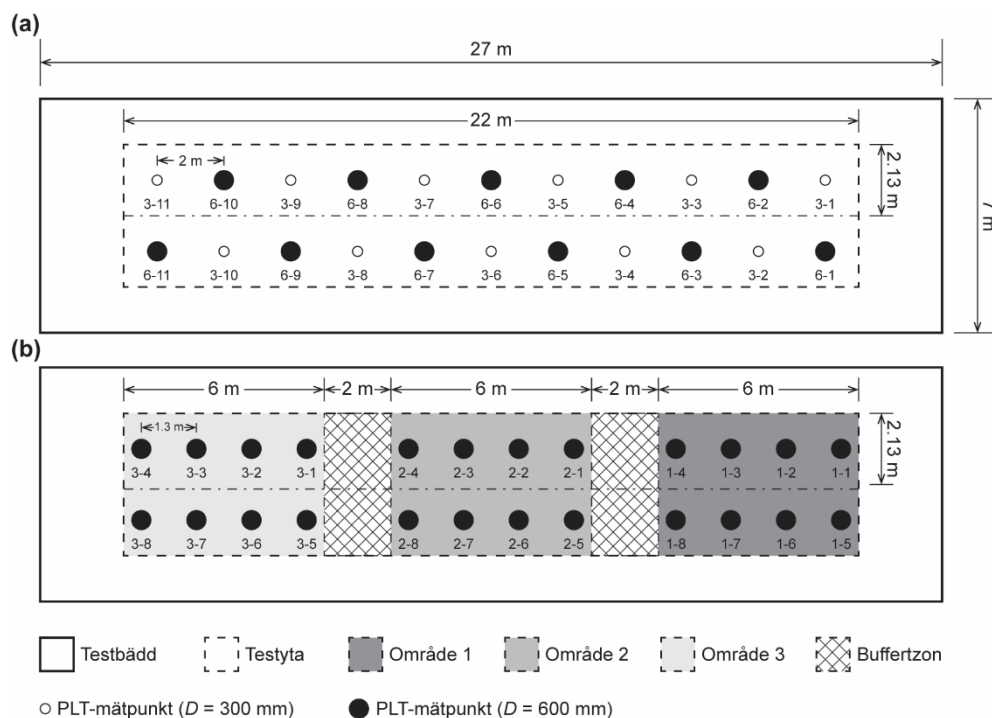
Vid starten av varje försök luckrades jorden upp till cirka 0,7 m djup, avjämnades till en enhetlig yta och utsattes sedan för en förberedande statisk överfart vid 1 m/s. PLT-positioner markerades efter denna initiala överfart. Varje försök applicerade sedan ett föreskrivet antal vibrationsöverfarter N följt av två statiska överfarter (förutom i ett jämförelseområde där de avslutande statiska överfarterna avsiktligt utelämnades). PLT utfördes cirka 24 timmar senare för att tillåta konditionering och sättning före

provning. Totalt över alla försök utfördes 116 PLT, vilket gav en statistiskt meningsfull datamängd för regressionsbaserade jämförelser.

Två vältar och två plattdiametrar utvärderades. Försök 1–2 växlade mellan 300 mm och 600 mm plattor efter sex överfarter för att jämföra platteffekter samtidigt som avståndet maximerades, se Figur 2. Försök 3–5 använde primärt 600 mm-plattan med tätare avstånd för att öka urvalsstorleken för korrelationsanalys över flera nivåer av överfarter. Nivåerna för överfarter inkluderade $N = 2, 4, 6, 8$ för att fånga ett brett spektrum av packningstillstånd utan att riskera ogiltiga PLT vid extremt låg styvhet.



Figur 1. Testbädd och vält i drift.



Figur 2. Testuppställning för olika försök: (a) Försök 1–2; (b) Försök 3–5.

2.2 Material

Testmaterialet var välgraderat krossat grus, representativt för svenska bankfyllningar, med en maximal partikelstorlek på 32 mm. Testbädden täcktes över mellan operationerna, och ytprover togs i början och slutet av varje försök för att testa fuktkvoten, som hölls stabil runt 3 %. Detta stödjer repeterbarhet och minskar störande variabilitet.

2.3 Utrustning för packning och mätning

Två Dynapac enkelvalsade vibrationsvältar användes, nämligen CA3500D och CA6500D, se Tabell 1. Båda vältarna kördes med hög amplitud och en vibrationsfrekvens på 24 Hz för att minska risken för intermitterent kontaktförlust mellan vals och mark (så kallad ”double-jumping”) när styvheten ökade, vilket därmed förbättrade mätstabiliteten.

Vältmätningarna baserades på en biaxiell accelerometer monterad på valsen, där signaler registrerades vid 2 kHz. En triggerpuls loggades när valsen passerade markerade PLT-positioner för att möjliggöra matchning mellan vältuppmätta ICMV och PLT-resultat. En valspositionssensor gav en pulssignal för att beräkna den realiserade vibrationsfrekvensen.

PLT utfördes med cirkulära stålplattor med diametrar (D) på 300 mm och 600 mm (Trafikverket, 2014), med vältens motvikt. Deformationsmodulen från den andra lastcykeln (E_{v2}) användes som det huvudsakliga styvhetsmättet, i enlighet med vanlig QA-praxis. Samtidigt registrerades modulen från den första lastcykeln (E_{v1}) och kvoten E_{v2}/E_{v1} användes som ett mått på återstående packningspotential.

Tabell 1. Viktiga driftsparametrar för olika vibrationsvältar vid inställning för hög amplitud och maximal frekvens.

Egenskap	CA3500D	CA6500D
Arbetsvikt (kg)	13 800	21 000
Valsbredd (m)	2,13	2,13
Valsdiameter (m)	1,518	1,546
Statisk linjelast (kg/cm)	36	65
Nominell amplitud (mm)	1,9	2,1
Vibrationsfrekvens (Hz)	31	29
Centrifugalkraft (kN)	280	360

2.4 ICMV och analysmetod

Sexton ICMV beräknades från samma accelerometerdataset (se Tabell 2) och grupperades i tre kategorier: (i) kinematiska index (tidsdomänsbeskrivningar och harmoniska kvoter); (ii) mekanikbaserade index härledda från interaktionen mellan vals och jord, såsom vibrationsmoduler för lastnings- och avlastningsfaserna av en vibrationscykel (E_{vib1} och E_{vib2}); och (iii) energibaserade index avsedda att representera trender för energiöverföring och dissipation. Bredden av indikatorer

möjliggör både (a) identifiering av starka kandidater gentemot PLT-härledd styvhet och (b) kvantifiering av inbördes korrelation mellan ICMV.

Analyserna inkluderade bedömning av korrelation mellan ICMV, inklusive hierarkisk klustring och principalkomponentanalys (PCA), samt linjär regression mellan utvalda ICMV och E_{v2} för jämförelser av plattor och vältrar. Spearmans korrelationskoefficient (r) användes för robusthet mot icke-normalfördelning och extremvärden. Den kontrollerade försöksdesignen säkerställer att observerade skillnader mer direkt reflekterar platt- och välteffekter snarare än okontrollerad heterogenitet på platsen.

Tabell 2. ICMV som analyserats i denna studie (Hua et al., inskickad).

Kategori	Indikatorer
Kinematik	CMV, AICV, CCV, THD, F_t , CF
Mekanik	k_s , E_{vib}
Energetik	CEV, DMV, OMEGA, E

3 RESULTAT

3.1 Deformationsmoduler från PLT

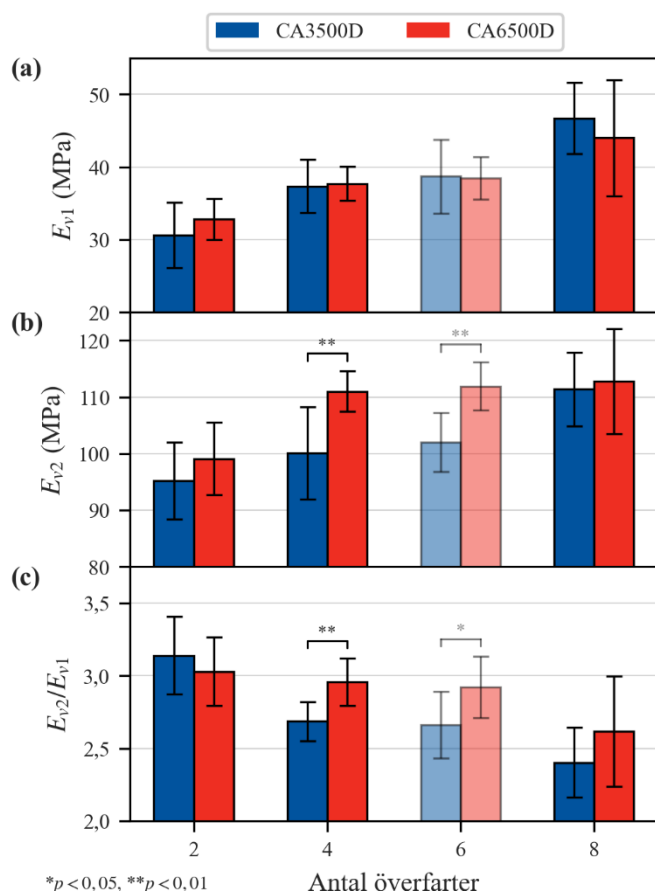
Jämförelser av de två plattdiametrarna vid $N = 6$ visade att 600 mm-plattan producerade något lägre medelvärde för E_{v2} än 300 mm-plattan, medan E_{v1} förblev nästan oförändrad oavsett plattstorlek, se Tabell 3. Stabiliteten hos E_{v1} stödjer att de initiala förhållandena kontrollerades effektivt, medan minskningen i E_{v2} för den större plattan är konsistent med djupare influensvolym och lägre spänningsnivåer, vilket leder till mindre uppenbart hårdnande och en starkare medelvärdesbildning över djupare, mindre styvt material.

Tabell 3. Sammanställning av PLT-mätvärden för 300 mm- och 600 mm-plattor.

Mätvärde	D (mm)	E_{v1} (MPa)		E_{v2} (MPa)		E_{v1}/E_{v1} (-)	
		CA3500D	CA6500D	CA3500D	CA6500D	CA3500D	CA6500D
Medelvärde	300	39,3	38,8	109,6	117,7	2,8	3,0
	600	38,7	38,5	102,1	111,9	2,7	2,9
Variationskoefficient	300	8%	6%	6%	6%	7%	4%
	600	13%	8%	5%	4%	9%	7%

Tvårs över vältyperna uppnådde den tyngre CA6500D högre E_{v2} och generellt lägre variabilitet än CA3500D vid jämförbara nivåer av överfarter, vilket återspeglar dess starkare packningsförmåga. Figur 3 visade den förväntade styvhetsökningen med ökande N , med avtagande utbyte bortom $N = 6$. För den tyngre välten ökade variabiliteten märkbart vid $N = 8$, vilket tyder på potentiell början till ineffektivitet

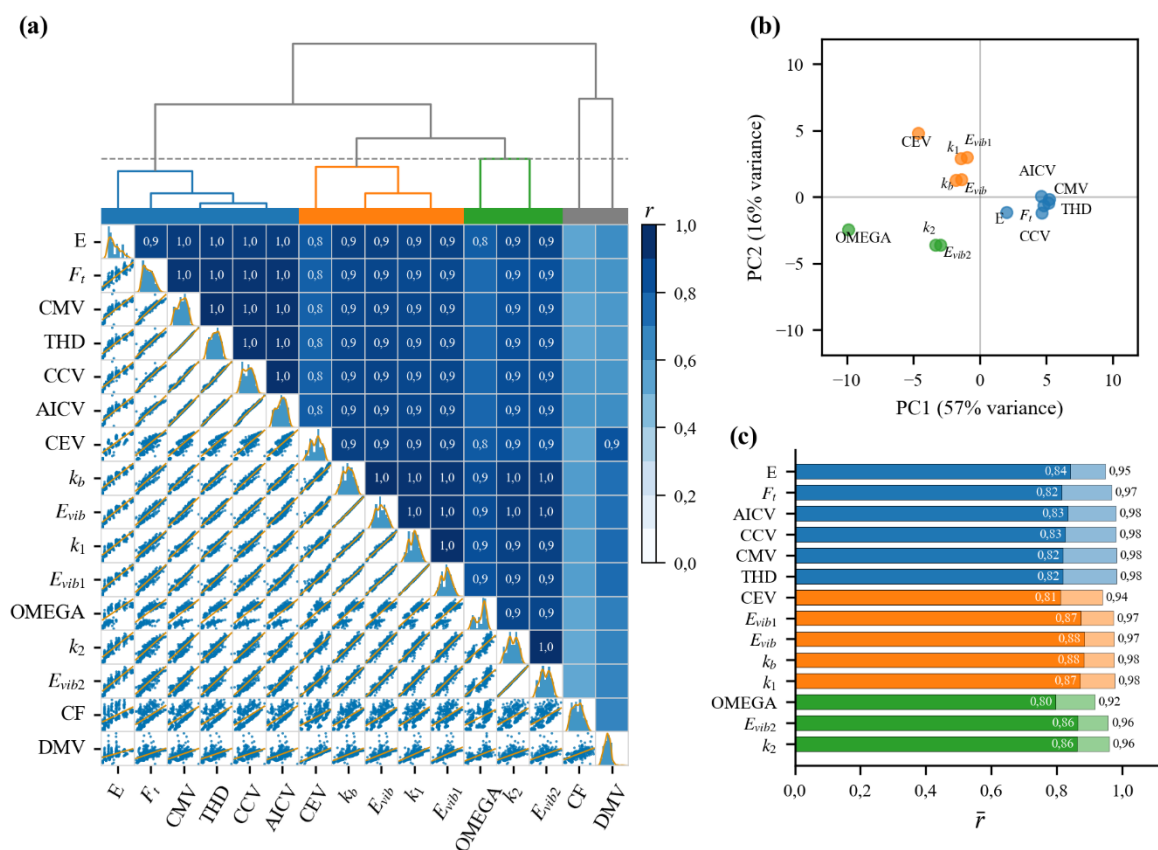
och ökad känslighet för lokal strukturell störning i aggregatskelettet vid överdriven energiinmatning.



Figur 3. Variation av PLT-resultat erhållna med 600 mm-plattan som funktion av N : (a) E_{v1} ; (b) E_{v2} ; och (c) E_{v2}/E_{v1} .

3.2 Inbördes samband mellan olika ICMV

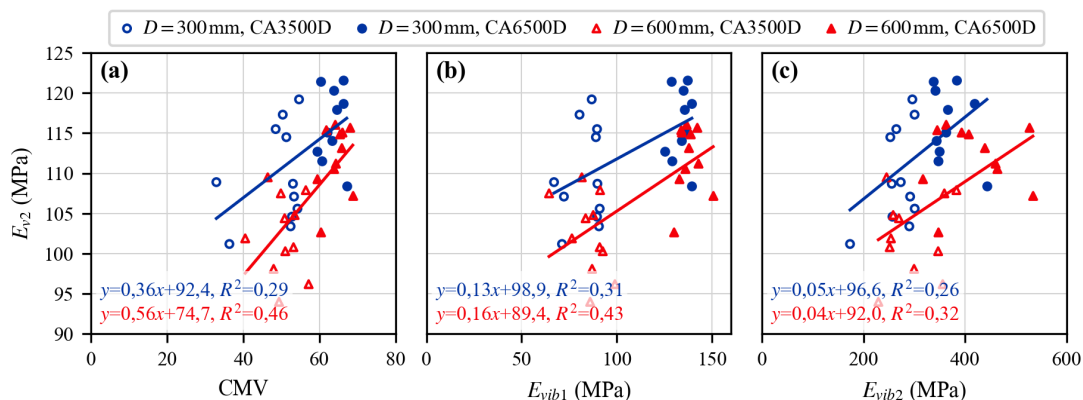
Spridningsmatrisen indikerade att olika ICMV uppvisar markant olika dynamiska omfång och variabilitet, se Figur 4. Vissa är stabila men mindre diskriminerande, medan andra är mycket känsliga men också mer variabla. Korrelationsanalysen mellan ICMV visade stark redundans över många indikatorer. Klustrings- och PCA-mönster stödde en praktisk gruppering i tre kluster: (1) harmonisk-baserade indikatorer (t.ex. CMV-familjen), (2) styvhets-/energibaserade indikatorer som motsvarar lastningsfasen (t.ex. E_{vib1} och CEV), och (3) de som relaterar till avlastningsfasen (t.ex. E_{vib2} och OMEGA). Denna klustring föreslår att kalibrering och övervakning kan använda en representativ indikator per kluster istället för att spåra många högt korrelerade index.



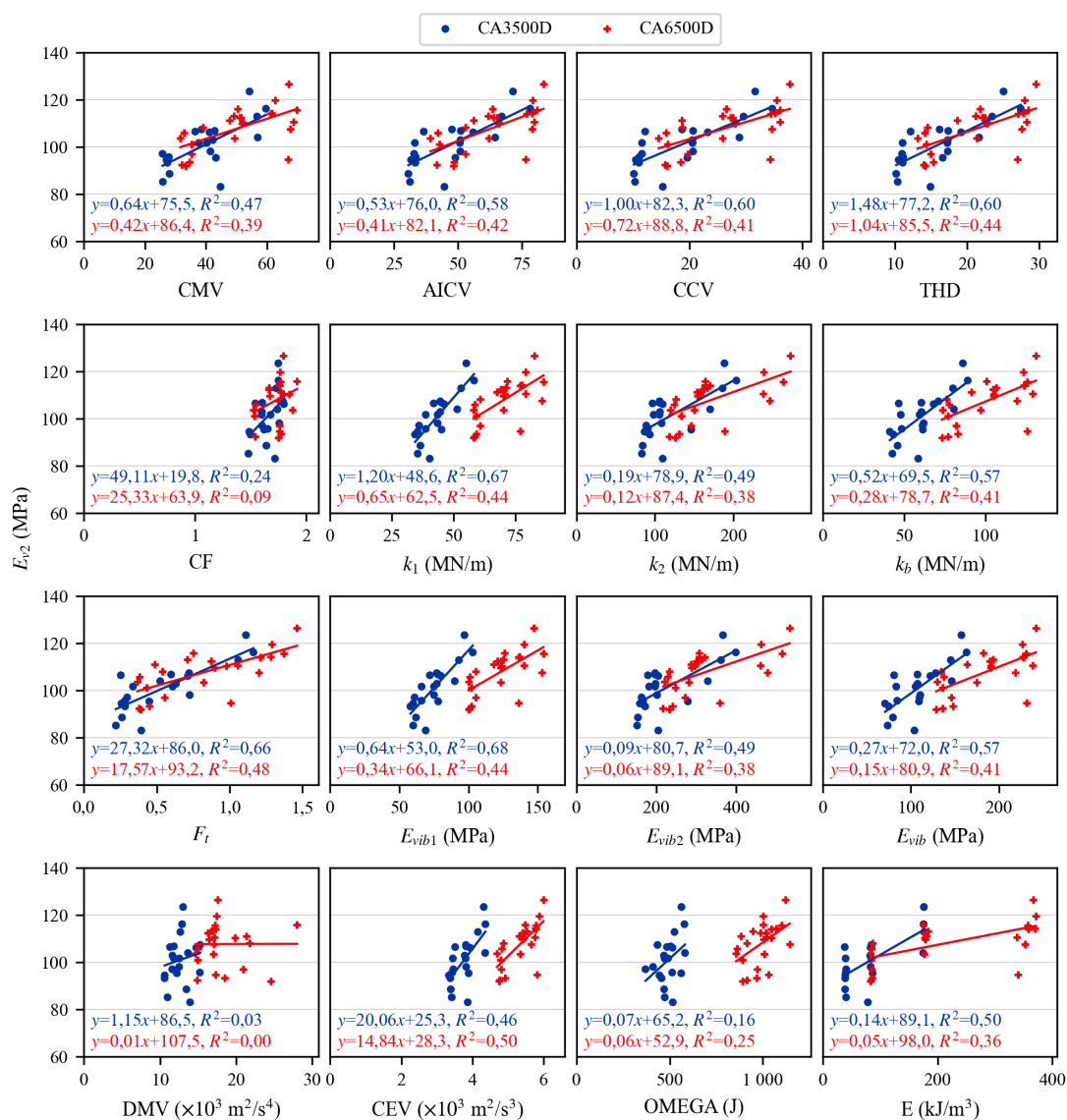
Figur 4. Statistisk analys av ICMV: (a) hierarkiskt klustrad värmekarta; (b) PCA-scoreplot; och (c) stapeldiagram över genomsnittliga korrelationskoefficienter inom och mellan kluster.

3.3 Korrelation mellan ICMV och E_{v2}

För samma vält och nivå av överfarer producerade 600 mm-plattan konsekvent starkare ICMV- E_{v2} -korrelationer än 300 mm-plattan, se Figur 5. Jämförelse av vältar över flera nivåer av överfarer visade att mekanikbaserade indikatorer generellt uppnådde de starkaste korrelationerna med E_{v2} , följt av kinematiska index, se Figur 6. Energibaserade index tenderade att korrelera mindre tillförlitligt. CA3500D gav ofta starkare korrelationer och högre känslighet (brantare lutningar) än CA6500D, trots att CA6500D uppnådde högre absolut styvhet. Detta är konsistent med minskad kontaktförlust för den lättare välten och en bättre matchning mellan dess effektiva mätdjup och PLT:s influensdjup under de testade förhållandena.



Figur 5. Korrelation mellan E_{v2} erhållen med olika D och utvalda ICMV uppmätta av olika vältar vid $N = 6$: (a) CMV; (b) E_{vib1} ; och (c) E_{vib2} .



Figur 6. Korrelation mellan E_{v2} erhållen med 600-mm plattan och ICMV uppmätta av olika vältar vid $N = 2, 4, 8$.

4 DISKUSSION

4.1 Plattstorlek och influensdjup

Att 600 mm-plattan ger något lägre E_{v2} men starkare korrelationer är inte motsägelsefullt. En större platta mobiliserar en djupare, större jordvolym och tenderar att genomsnittsbereäkna styvhet över en bredare zon. Vältmätningar återspeglar också en djupberoende respons som styrs av interaktionen mellan vals och jord och därmed dynamiska spänningsbulber. När dessa influensvolymmer matchar bättre, minskar variabiliteten som induceras av ytliga styva effekter och småskalig heterogenitet, vilket förbättrar korrelationen. I praktiken stödjer detta användningen av större plattor för YPK-kalibrering där det är genomförbart, eftersom kalibreringskvaliteten beror på korrelationens robusthet.

4.2 Beroende av vält-typ

Den tyngre CA6500D uppnådde högre E_{v2} snabbare och förbättrade ofta homogeniteten vid måttliga nivåer av överfarter, men korrelationsstyrkan var inte nödvändigtvis överlägsen. Två sammanlänkade mekanismer förklarar varför en lättare vält kan korrelera bättre: (i) minskad intermittent kontaktförlust när styvheten ökar, vilket stabiliserar accelerometerhärledda avläsningar; och (ii) vältens effektiva mätdjup som kan ligga närmare PLT:s influenszon, särskilt vid användning av en större platta. Den tunga vältens ökade variabilitet vid höga antal överfarter illustrerar också en viktig praktisk poäng: högre packningsenergi översätts inte alltid till bättre mätkonsekvens eller kalibreringstillförlitlighet. För arbetsflöden med YPK beror därför den ”bästa välten” inte bara på att uppnå målstyvhet utan också på att producera stabila, tolkningsbara mätsignaler för QA.

4.3 Val av ICMV

Mekanikbaserade ICMV ligger närmare fysikaliska tolkningar av interaktionen mellan vals och jord och kopplar därför naturligt till styvhetsbaserade punktprov som PLT. Harmonisk-baserade familjer presterade också väl, sannolikt eftersom frekvensinnehållet i valsens acceleration återspeglar icke-linjärt kontaktbeteende, även om det är mindre direkt mekaniskt. Energibaserade index var mindre tillförlitliga, vilket är konsistent med det konceptuella glappet mellan ”teoretisk inmatad energi” och ”faktisk energi absorberad i densifiering” under varierande kontaktförhållanden. Denna mismatchning blir mer uttalad när valsens respons avviker från idealiserad full kontakt. Den starka redundans som observerades bland ICMV tyder på att, även om nuvarande praxis ofta förlitar sig på en enda indikator, YPK-kalibrering istället kan använda en liten uppsättning representativa indikatorer (t.ex. en mekanikbaserad modul plus en harmonisk-baserad indikator) snarare än många korrelerade, vilket förbättrar robustheten samtidigt som implementeringen hålls enkel och onödig informationsöverlappning undviks.

5 SLUTSATSER

Denna studie genomförde kontrollerade fullskaliga packningsförsök för att systematiskt utvärdera hur PLT-plattans diameter och typ av vibrationsvält styr PLT-resultat, ICMV-avläsningar och korrelationer mellan ICMV och E_{v2} för en testbädd av grus. De huvudsakliga slutsatserna är:

- Plattdiametern har betydelse för kalibreringskvaliteten. 600 mm-plattan gav konsekvent starkare korrelationer med flertalet ICMV än 300 mm-plattan. Detta stödjer användningen av större plattor för YPK-kalibrering eftersom deras djupare influensvolym bättre överensstämmer med vältens mätdjup.
- Vält-typ påverkar både styvhetsutveckling och korrelationsstyrka. Den tyngre CA6500D uppnådde högre styvhet och typiskt lägre variabilitet vid måttliga nivåer av överfarter, medan den lättare CA3500D ofta producerade starkare korrelationer mellan ICMV och E_{v2} samt högre känslighet, vilket är konsistent med minskad kontaktförlust och förbättrad djupmatchning.
- Mekanikbaserade indikatorer är mest tillförlitliga mot PLT-härledd styvhet. Överlag korrelerade mekanikbaserade ICMV (särskilt vibrationsmodulen E_{vib}) och harmonisk-baserade index bäst med E_{v2} , medan energibaserade index var mindre lämpliga under de testade förhållandena.
- De flesta ICMV är redundanta. För praktisk kalibrering är valet av en representativ indikator per kluster en försvarbar strategi för att minska komplexiteten samtidigt som kompletterande information bevaras.
- Vältspecifik kalibrering är fortsatt nödvändig. Även under kontrollerade förhållanden påverkade vältens egenskaper avsevärt lutningen och styrkan i sambanden mellan ICMV och E_{v2} , vilket förstärker att nuvarande YPK-praxis kräver maskinspecifik kalibrering för tillförlitliga QA-tröskelvärden.

6 LÄRDOMAR

Tekniken för YPK har utvecklats i mer än fyra decennier sedan den först föreslogs i Sverige på 1970-talet. Under denna period har forskare och ingenjörer successivt föreslagit olika ICMV-index. Det kvarstående problemet med inkonsekvent korrelation har dock inneburit att kvalitetssäkring av packning fortfarande i stor utsträckning förlitar sig på traditionella punktprov idag. Det finns ett akut behov av en förbättrad ICMV av styvhetstyp som är generellt tillämpbar över olika jordförhållanden och maskintyper, för att minska kostnader och förbättra byggnationens effektivitet och tillförlitlighet.

7 REFERENSER

Forssblad, L., 1980. *Compaction meter on vibrating rollers for improved compaction control*. Proc. Int. Conf. Compact. 2:541–546.

Hua, W., Wersäll, C., Larsson, S., 2025. *Packningskontroll för framtiden: Modern teknik i stället för långsamma försök*. Bygg & Tek. (1):24–27.

Hua, W., Persson, A., Akesson, F., Wersäll, C., Larsson, S., submitted for publication. *Correlating continuous compaction measurement to plate load tests for quality assurance*. Transp. Geotech.

Turner, H., Sandström, Å., 1980. *A new device for instant compaction control*. Proc. Int. Conf. Compact. 2:611–614.

Trafikverket, 2014. *Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning*. TDOK 2014:0141, Version 1.0.