
NCC Roads Sverige

FoU Asfalt

BÄRIGHETSMÄTNING MED GEOGAUGE: UTVÄRDERING OCH JÄMFÖRELSE MED LÄTT FALLVIKT



Jonas Ekblad
Lars Bergström
Bo Sävinger
Rapport 2009-02
(SBUF-projekt 11205)
Distribution: FRI

FÖRORD

Denna rapport har utarbetats som redovisning av ett projekt initierat av NCC Roads och finansierat av SBUF (Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond). Syftet med studien har varit att, genom studier och fältprovning, utvärdera Geogauge som en snabb metod för packningskontroll av obundna material i en vägkonstruktion. Bland metoder i bruk idag finns den statiska plattbelastningen som är den mest etablerade. Försök har även gjorts med den tyska lätta fallvikten för kontroll av överbyggnadens lager. Målet är således att undersöka om Geogauge kan vara ett alternativ för produktions- och kvalitetskontroll. Bo Sävinger har initierat projektet och tillsammans med Lars Bergström svarat för ursprunglig projekt- och provningsplanering. Lars Bergström utförde provplanering och fältprovning. Jonas Ekblad har analyserat och sammanställt resultat samt skrivit rapporten.

Arbetsgrupp för projektet har varit:

Bo Sävinger	NCC Roads
Lars Bergström	NCC Roads
Jonas Ekblad	NCC Roads

Som referensgrupp har deltagit:

Johannes Segerpalm	Skanska
Nils Ulmgren	NCC Roads
Per Murén	NCC Roads
Robert Lundström	NCC Roads

Göteborg i februari 2009

Bo Sävinger

Sammanfattning

Det är av stor vikt att de enskilda lagren i en vägkonstruktion uppnår tillräcklig bärighet. Vid dimensionering av vägens överbyggnad är de olika lagrens bärighet en avgörande faktor, vilket måste kontrolleras under produktion. För närvarande används huvudsakligen statisk plattbelastning för detta ändamål och i någon mån tysk lätt fallvikt. Det finns mycket att vinna på möjligheten att använda förfarandemässigt enklare men mätmässigt likvärdiga metoder. Detta projekt har undersökt möjligheten att använda Geogauge som ersättnings- eller kompletterande metod.

Studien har omfattat mätningar med Geogauge och lätt fallvikt på bär- och förstärkningslager under produktion av väg 610 i Halland. Erhållna resultat har statistiskt analyserats med avseende på variationsvidd av enskilda bestämningar, repeterbarhet och systematiska skillnader mellan Geogaugemätningar och mätningar med lätt fallvikt.

Repeterbarheten dvs. skillnaden mellan två upprepade provningar på identiska ytor är 14 MPa för såväl Geogauge som lätt fallvikt. Styvhetsmodulen mätt med Geogauge är i genomsnitt 7 MPa högre jämfört med mätningar med lätt fallvikt. I denna undersökning föreföll mätningar med Geogauge och lätt fallvikt vara tämligen samstämmiga, såväl precisions- som resultatmässigt.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING	4
1.1. TIDIGARE ERFARENHETER.....	4
2. METODER OCH PROVNINGAR	5
2.1. OÄNDLIG HALVRYMD.....	5
2.2. GEOGAUGE.....	9
2.3. (TYSK) LÄTT FALLVIKT.....	13
2.4. PROVNINGAR VÄG 610	14
3. RESULTAT	15
3.1. PRECISION.....	15
3.2. JÄMFÖRELSE GEOGAUGE OCH LÄTT FALLVIKT.....	17
3.3. YTMODUL FÖR DE OLIKA LAGREN	20
4. DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	21
REFERENSER	25
BILAGA 1. HANDHAVANDE GEOGAUGE (LARS BERGSTRÖM).....	26

1. INLEDNING

Bärighet är en viktig egenskap hos en vägöverbyggnad. Den kanske mest grundläggande funktionen hos de obundna lagren är att bära och fördela laster till terrassen för att begränsa de deformationer som orsakas av repeterad trafiklast. Bärighet är ett något diffust begrepp och framförallt inte lätt att entydigt bestämma i fält. Allmänt är vägkonstruktioner geometrisk enkla men med en komplex samverkan mellan de olika lagren vilket medför att det många gånger är svårt att urskilja inverkan av enstaka konstruktionsdelar som t.ex. de olika lagren. Till detta kommer att materialen i sig uppvisar komplext mekaniskt beteende. En egenskap som styvhet beror av en mängd olika faktorer, för såväl terrass, obundna och bundna lager. Den sammanlagda bärigheten beror av såväl materialens egenskaper, de ingående lagrens geometri och deras samverkan, som av produktionskvalitet. Under produktion är det av stor vikt att ha metoder för att kunna kontrollera att de egenskaper som förutsatts vid dimensionering, verkligen uppnås. Erfarenhetsmässigt, och med visst stöd av analytiska beräkningar, finns det idag kravställda bärighetsnivåer som skall uppnås för de olika lagren. För de obundna lagren baseras dessa nivåer i regel på statisk plattbelastning, vilket är en metod som har stor spridning och använts under lång tid. Den är dock behäftad med en del praktiska svårigheter; den är tämligen tidsödande och kräver ytterligare resurser, utöver mätutrustningen, i form av mothåll. Det finns mycket att vinna på möjligheten att använda förfarandemässigt enklare men mätmässigt likvärdiga metoder. I Vägverkets regelverk finns det idag utrymme för att i vissa fall använda sk. tysk lätt fallvikt.

Detta projekts huvudsyfte är att genomföra bärighetsmätningar med Geogauge och jämföra dessa med mätningar med resultat från lätt fallvikt. Vidare avses att bedöma Geogaugemätningarnas precision, i termer av repeterbarhet, i relation till mätningar med lätt fallvikt. Mätningar har genomförts på förstärknings- och bärlager i samband med byggnation av väg 610 i Halland. Slutligen görs även en jämförelse av faktiska styvheter uppmätta på de olika lagren med de olika metoderna.

1.1. TIDIGARE ERFARENHETER

Mätningar av terrassens och de obundna lagrens bärighet har utförts under lång tid. Den vanligaste metoden är troligtvis statisk plattbelastning som sedan 1952 har funnits som standardiserad metod av ASTM (American Society for Testing and Materials). Geogauge har utvecklats och använts under drygt 10 år och tillverkas av Humboldt Mfg. Co., USA och används huvudsakligen för bärighetsmätningar på jordmaterial. I denna rapport omfattas publicerat material avseende utvärdering och användning av Geogauge.

Vad avser vilken del av konstruktionen som påverkar mätningarna, dvs. verkansdjup och sidoavstånd, har ett flertal undersökningar publicerats t.ex. Lenke m.fl. (2001), Maher (2002) och Sawangsuriya (2002). Detta behandlas mer utförligt i sektion

Diskussion och slutsatser. Styvhetsmätningar med tung fallvikt har jämförts med Geogaugemätningar av George (2003). Han fann korrelation mellan moduler mätta med Geogauge och moduler bestämda genom passningsräkning av fallviktsbelastningar. En analys av redovisade resultat, genomförd av George, visar systematisk lägre moduler för Geogauge jämfört med fallviktsmätningarna. Det bör påpekas att en mängd randvillkor och antaganden i beräkningarna inte redovisats av George, varför resultatet bör ses i skenet av detta. I en undersökning om användning av Geogauge och lätt fallvikt som metoder för kvalitetskontroll vid vägkonstruktion drar Alshibli m.fl. (2005) slutsatsen att deras resultat indikerar att dessa metoder kan användas för kontroll vid packning av jordar, på terrass och på obundna lager. De utförde mätningar med Geogauge, lätt fallvikt och statisk plattbelastning och fann korrelation mellan plattbelastning och mätningar med såväl Geogauge som lätt fallvikt. I sektion 3.2 i denna rapport redovisas en utökad bearbetning av resultat publicerade av Alshibli m.fl. (2005). För att bedöma mätningar av styvhet under pågående packning med instrument monterade på välten, genomförde Rahman m.fl. (2008) en studie där vältnmoduler jämfördes med mätningar med bl.a. Geogauge, och lätt och tung fallvikt. En generell slutsats var att mätningar med vält inte överensstämmer väl med mätningar med övriga instrument. De spekulerar i att den stora skillnaden i belastningsnivåer och verkansdjup mellan de olika metoderna, gör det svårt att finna generell överensstämmelse. Emellertid fann de korrelation mellan mätningar med Geogauge och lätt fallvikt. Redovisade mätningar indikerar en något högre beräknad modul för Geogauge jämfört med lätt fallvikt. Mätmetoder och beräkningar är dock för knapphändigt redovisade för att kunna bedöma riktigheten i mätningarna; korrelationen påverkas troligen inte men absolutnivåerna kan ifrågasättas.

Det synes inte finnas några tidigare publicerade erfarenheter från Sverige.

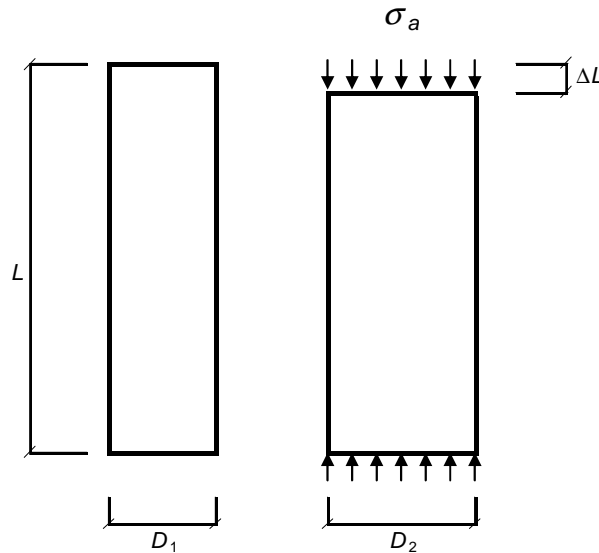
2. METODER OCH PROVNINGAR

Mätningarna som genomförts i samband med detta projekt grundas på en del antaganden om materialens och strukturens uppträdande. Dessa antaganden styr mycket av utfallet. Av denna anledning är det angeläget att först ge en översiktlig beskrivning av det ramverk i form av material- och strukturmodeller som ligger till grund för resultatbearbetningen för de metoder som använts. Detta följs sedan av beskrivning av de mätningar som gjorts i samband med detta projekt.

2.1. OÄNDLIG HALVRYMD

Tillståndsvariabler används för att beskriva tillståndet hos ett mekaniskt system. Dessa tillståndsvariabler kan t.ex. vara spänning, töjning, temperatur, massa mm. Förhållandet mellan tillståndsvariabler uttrycks med sk. konstitutiva samband (ekvationer). Dessa förhållanden styrs av materialets egenskaper. Det finns en stor mängd modeller för att beskriva ett materials mekaniska uppträdande. För att exemplifiera dessa termer visas i

figur 1 en belastning av en stång. Den mest grundläggande modellen för att beskriva det mekaniska uppträdandet är att materialet är isotropt linjärt elastiskt, vilket kan uttryckas med ett konstitutivt samband som brukar benämnas Hookes lag.



Figur 1. Ideal isotrop elastisk stång: L = längd, D = diameter, σ_a = axiell spänning.

En stång med längden L och diametern D utsätts för en kompressiv spänning längs axeln, σ_a . Detta medför att stången förkortas. Stångens tillstånd beskrivs med tillståndsvariablerna spänning, σ_a , och töjning, ε_a , enligt:

$$\sigma_a = \frac{F}{A} \quad 1$$

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L} \quad 2$$

där F är kraft och A är area.

Förhållandet mellan spänning och töjning beskrivs med en konstitutiv ekvation:

$$E = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \quad 3$$

där E benämns elasticitetsmodul eller Youngs modul. Elasticitetsmodul är således en materialegenskap som bestäms genom experiment. För verkliga material är elasticitetsmodulen sällan eller aldrig en konstant utan kan bero på en mängd faktorer som t.ex. temperatur, vattenhalt, belastningshastighet mm.

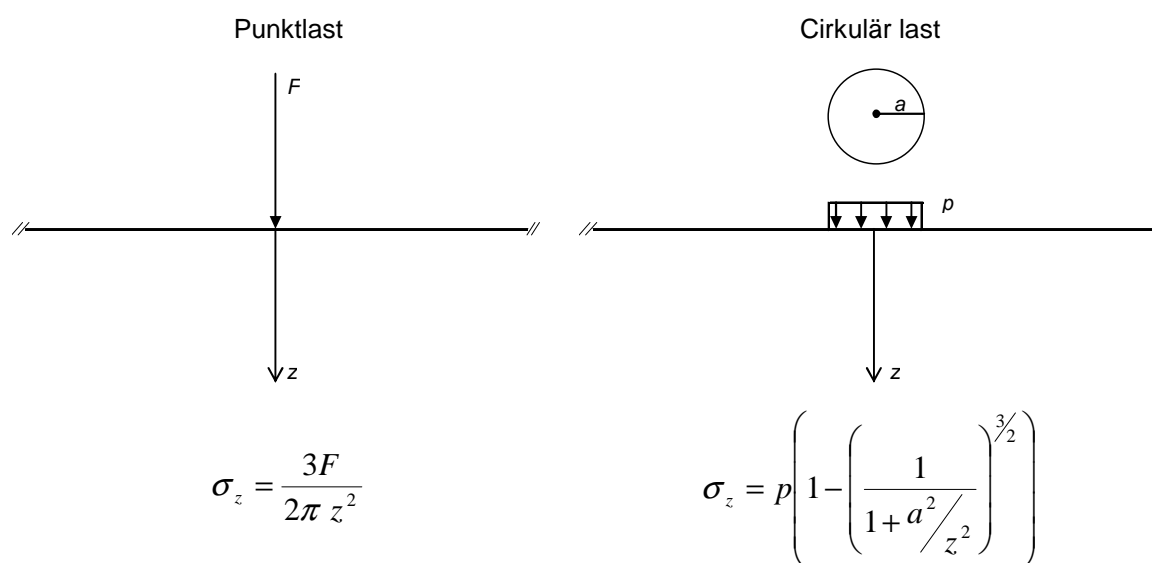
För en fullständig beskrivning av ett isotropt linjärt elastiskt material erfordras två oberoende parametrar. I figur 1 framgår det att en axiell belastning inte bara ger axiell längdförändring utan även en ökning av diametern. Sambandet mellan töjningen längs

belastningen, ε_a , och töjningen vinkelrätt belastningen, ε_r , benämns Poissons tal eller tvärkontraktionstalet, ν , och uttrycks enligt:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \quad 4$$

Som tidigare nämnts är elasticitetsmodulen normalt inte en konstant för verkliga material. Detta gäller även för Poissons tal. För ett givet jordmaterial är såväl elasticitetsmodulen som Poissons tal beroende av t.ex. vattenhalt. De är dessutom inte linjärt elastiska utan modul och Poissons tal beror av belastningens storlek och riktning. Jords elastiska egenskaper uttrycks i regel som funktion av spänningsinvarianter dvs. en beskrivning av det tredimensionella spänningstillståndet, och eventuellt vattenhalt. Ofta används termen styvhetsmodul för att beskriva jordars mekaniska egenskaper. Definition är dock den samma som för elasticitetsmodul. I denna rapport kommer termen styvhetsmodul att användas.

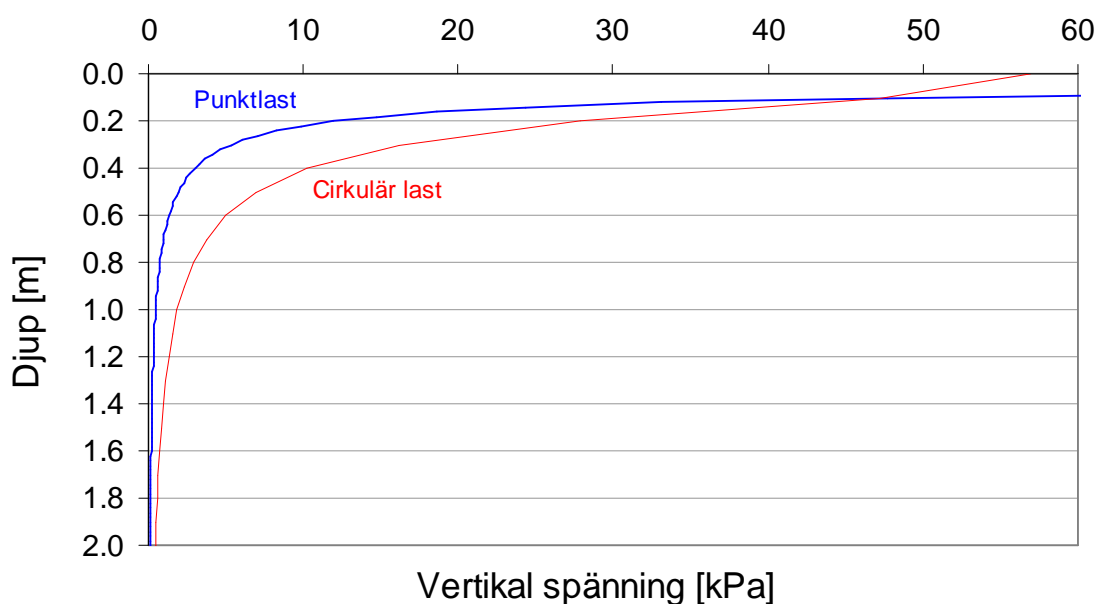
När det gäller belastningar och mätningar på ytan av väg- eller geotekniska konstruktioner behövs dessutom en modell för att beskriva strukturens uppträdande. En stor del av dagens modeller för väg- och geotekniska konstruktioners mekaniska (elastiska) uppträdande baseras på Boussinesqs lösning av spänningsfördelningen under en punktlast på en sk. oändlig halvrymd (Boussinesq, 1885). Med oändlig halvrymd menas att strukturen begränsas av en yta i en dimension; de övriga två är oändliga. Boussinesqs samband beskriver spänningar och förskjutningar under ytan i en oändlig halvrymd av ett isotropt linjärt elastiskt material, belastad med en punktlast. Dessa samband har sedan utvidgats till ett flertal lastfall varav den cirkulära belastningen är ofta använd i vägsammanhang. Dessa två lastfall, Boussinesqs punktlast och den cirkulära lasten, åskådliggörs i figur 2 tillsammans med sambandet för den vertikala spänningen som funktion av djup.



Figur 2. Belastningsfall på oändlig halvrymd: $z = \text{djup}$, $\sigma_z = \text{vertikal spänning}$,
 $F = \text{kraft}$, $a = \text{radie}$, $p = \text{kontakttryck}$.

Den vertikala spänningen är den enda tillståndsvariabel som går att bestämma, för en oändlig halvrymd, utan att anta ett konstitutivt samband dvs. utan att anta en materialmodell som bestämmer förhållandet mellan spänningar och töjningar. Enligt figur 1 ger belastning i en riktning upphov till en töjning såväl i belastningens riktning som vinkelrätt mot belastningen; överförs detta beteende till belastning på en oändlig halvrymd medför en vertikal belastning även en horisontell töjning. Denna horisontella töjning ger då upphov till en horisontell spänning. Storleken på dessa horisontella tillståndsvariabler bestäms av det konstitutiva sambandet mellan spänning och töjning, vilket i detta fall är isotropt linjärelastiskt.

Figur 3 visar den vertikala spänningen under 1000 N belastning, som punktlast eller utbredd cirkulär last, enligt sambanden i figur 2.



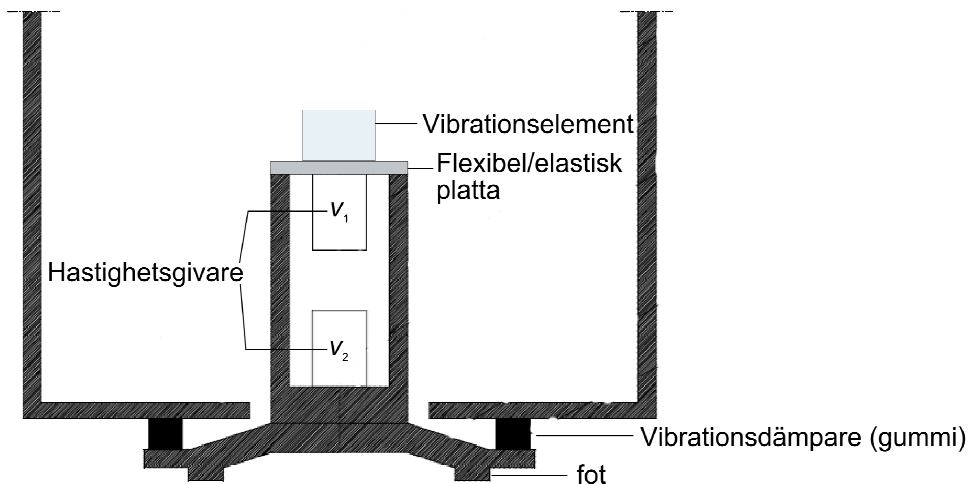
Figur 3. Vertikal spänning under punktlast resp. utbredd cirkulär last. Båda fallen motsvarar en last på 1000 N.

Som framgår av diagrammet och sambandet för spänning under en punktlast ökar spänningen mot oändligheten med minskat djup. För en cirkulär last motsvarar spänningen i ytan kontaktrycket och minskar med ökat djup.

Sammanfattningsvis är den grundläggande analysmodellen som används vid bestämning av bärlighet baserad på belastning av en oändlig halvrymd bestående av ett isotropt linjärt elastiskt material. Det är på detta ramverk de metoder som använts i denna undersökning vilar. Det kan tilläggas att även bärlighetsmätning med statisk plattbelastning baseras på denna modell. Emellanåt benämns den styvhet man mäter med belastning av markytan för ytmodul. Detta för att indikera att mätningen sker på ytan samtidigt som man gör antagandet att materialet i den oändliga halvrymden är homogent och ensartat. Verkliga konstruktioner och material motsvarar dock sällan denna idealiserade modell.

2.2. GEOGAUGE

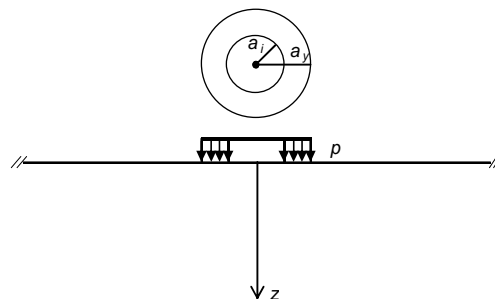
Geogauge är ett mätinstrument för bestämning av jordmaterials bärlighetsegenskaper, framförallt vid väg- och geokonstruktion. Det har utvecklats och använts under drygt 10 år och tillverkas av Humboldt Mfg. Co., USA. En schematisk beskrivning ges i figur 4.



Figur 4. Beskrivning av Geogauge.

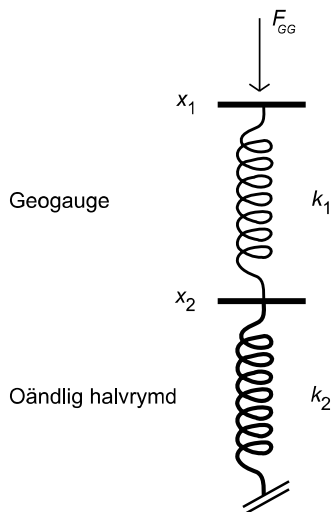
Det huvudsakliga arbetssättet för Geogauge är att ett vibrationselement på en elastisk platta inducerar vibrationer dvs. rörelser i höjdlid. Dessa rörelser ger upphov till en oscillerande kraft som via den flexibla plattan och den styva foten överförs till markytan. Det som mäts är hastigheten (geofoner) som funktion av tiden för två mätpunkter i instrumentet: dels hastigheten på den flexibla plattan (v_1) dels hastigheten i en punkt som är styvt förbunden med markytan (v_2). Den oscillerande kraften och nedsjunkningens storlek bestäms baserat på dessa hastighetsgivare.

Som tidigare beskrivits baseras bestämning av styvhetsmodul med Geogauge på ytbelastning av en oändlig halvrymd bestående av ett isotropt linjärelastiskt material. Skillnaden från föregående beskrivningar är att för Geogauge är belastningen ringformad. Den analytiska lösningen av detta lastfall på en oändlig halvrymd är mer komplicerad än de tidigare beskrivna. I figur 5 visas det idealiserade lastfallet. Kontaktrycket, p , består av en konstant del, motsvarande egenvikten, och en repeterad oscillerande del inducerad av ett vibrationselement i mätinstrumentet.



Figur 5. Belastningfall för Geogauge på oändlig halvrymd: a_i = inre radie, a_y = yttre radie.

Nedan följer en översiktlig beskrivning av mät- och analysteknik för bärighetsmätning med Geogauge. För att beskriva de grundläggande sambanden mellan mätningarna och den beräknade storheten styvhetsmodul, används en mekanisk modell av Geogauge. Denna mekaniska analogi visas i figur 6 och består av två seriekopplade elastiska fjädrar.



Figur 6. Mekanisk modell av Geogauge: k = fjäderkonstant och x = vertikal förskjutning.

Förhållandet mellan en fjäders längdförändring (Δx) och erforderlig kraft (F) beskrivs av den kända Hookes lag:

$$F = k \cdot \Delta x \quad 5$$

I detta fall består systemet av två seriekopplade fjädrar där den övre, med fjäderkonstanten k_1 , motsvarar den elastiska plattan i instrumentet (jämför figur 4) och den undre motsvarar marken med fjäderkonstanten (eller styvhetskonstanten) k_2 . Det vertikala läget för två punkter motsvarande den elastiska plattans läge (x_1) och markytans läge (x_2) bestäms med hjälp av hastighetsgivarna. Då läget på dessa två punkter är känt kan den övre fjäderns hoptryckning bestämmas och då k_1 är känd kan kraften inducerad av vibrationen (F_{GG}) beräknas enligt:

$$F_{GG} = k_1(x_1 - x_2) \quad 6$$

Markens styvhetskonstant (k_2) kan beräknas genom:

$$k_2 = \frac{F_{GG}}{\Delta x_2} \quad 7$$

där såväl kraften (F_{GG}) som markytans nedsjunkning (Δx_2) är kända. Sammansätts ekvation 8 och 9 erhålls uttrycket för markens styvhetskonstant:

$$k_2 = \frac{k_1(x_1 - x_2)}{\Delta x_2} \quad 8$$

Styvhetskonstanten bestäms genom att mäta hastigheten i två punkter och genom känd styvhet i den elastiska plattan. Utrustningen mäter styvhetskonstanten vid 25 diskreta frekvenser mellan 100 Hz till 196 Hz, med 4 Hz steg. Dessa mätningar sammanfattas sedan i ett medelvärde.

Poulos och Davis (1974) redovisar en lösning för en ringformad belastning på en oändlig halvrymd (given av Egorov, 1965). Baserat på denna lösning kan elasticitetsmodulen (E) beräknas enligt:

$$E = \frac{k(1-\nu^2)\omega}{r_y} \quad 9$$

där k är styvhetskonstanten, r_y är ringens yttre diameter, ω en formfaktor som beror av förhållandet mellan belastningens inre och yttre diameter. För belastningsringen på Geogauge är denna faktor ungefär 0,56 (Poulos och Davis, 1974). Humboldt anger denna faktor till $1/1,77$ (Humboldt, 2007). Om man sätter in ekvation 7 i ekvation 9 erhåller man ett samband för styvhetsmodulen bestämd med Geogauge:

$$S_{GG} = \frac{F(1-\nu^2)0,56}{d a_y} \quad 10$$

där F är kraft och d är nedsjunkningen, vilka mäts under provningen. Den inducerade kraften är av storleksordningen 10-20 N (Sawanguriya m.fl., 2003 och Alshibli m.fl., 2005). Kraftens storlek varierar med såväl provningsfrekvens som det totala systemets styvhet: Geogauge och mark. Den yttre diametern a_y är ungefär 11,4 cm och Poissons tal (ν) får ansättas. Men som tidigare diskuterat, är inte Poissons tal en konstant utan beror av belastningsnivå. Vanligtvis anses 0,35 vara en rimlig uppskattning för material som är vanligt förekommande vid vägkonstruktion. I fallet med lätt fallvikt används Poissons tal 0,5. För att mätningar med Geogauge skall vara jämförbara med lätt fallvikt, ansätts Poissons tal genomgående till 0,5. Detta innebär att genomförda mätningar räknas om så att bestämningen av styvhetsmodulen baseras på samma Poissons tal för de båda metoderna. Det finns inget sätt att mäta in-situ-egenskaper utan att anta såväl material- som strukturmodell, varför Poissons tal måste ansättas.

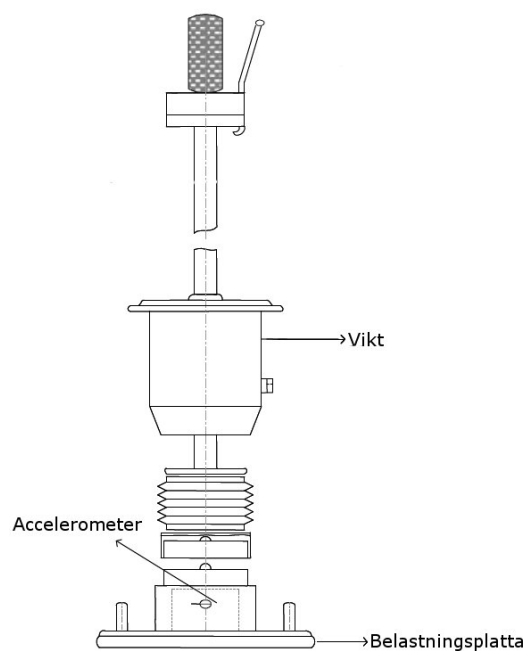
Ovanstående redovisning är en något förenklad beskrivning av de faktiska beräkningarna. Den är baserad på en statisk beskrivning av belastning och mätning. I själva verket är mätningarna oscillerande och det som mäts är hastighet i två punkter

från vilket man kan bestämma den komplexa mekaniska impedansen hos ytan. Den mekaniska impedansen är förhållandet mellan en oscillerande kraft i en punkt och punktens hastighet. Det är dock samma teoretiska grund men beräkningarna är matematiskt något annorlunda.

En översiktlig beskrivning av praktiskt handhavande av Geogauge ges i bilaga 1.

2.3. (TYSK) LÄTT FALLVIKT

Mätprincipen, för den lätta fallvikten, är att en vikt faller ned på en platta samtidigt som belastningsplattans rörelse mäts med en accelerometer. Vikt, fallhöjd och dämpningssystemet på belastningsplattan avgör lastpulsens amplitud och varaktighet. En principiell beskrivning av en lätt fallvikt åskådliggörs i figur 7.



Figur 7. Schematisk beskrivning av lätt fallvikt.

Plattans diameter är 300 mm. Lastpulsens amplitud uppges att vara kring 7 kN och dess varaktighet ung. 18 ms. Lastens amplitud och varaktighet beror inte bara på vikt, fallhöjd och utrustningens dämpningssystem utan även på underlagets respons, vilket medför att uppgiven amplitud och varaktighet inte med säkerhet erhålls. De får ses som riktvärden. Kraften mäts inte under provning utan ansätts enligt specifikation dvs. ca 7 kN.

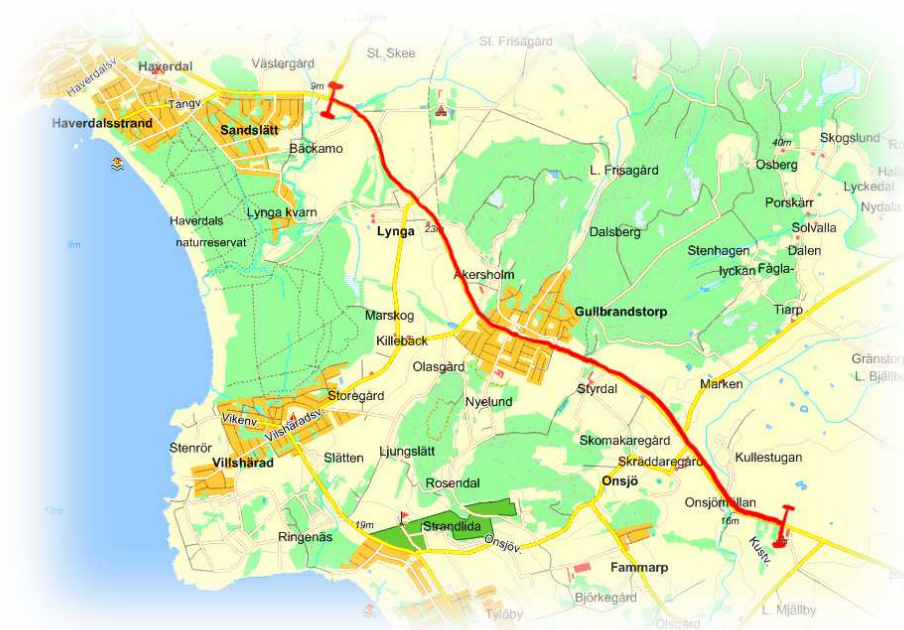
För beräkning av styvhetsmodul (ytmodul) används lösningen för förskjutningar under en cirkulär last. Vidare ansätts Poissons tal till 0.5. Sambandet blir då:

$$S_{fv} = \frac{1,5pr}{d} \quad 11$$

där S_{fv} är styvhetsmodul mätt med lätt fallvikt, p är kontaktryck, r är belastningsplattans radie och slutligen d är nedsjunkningen.

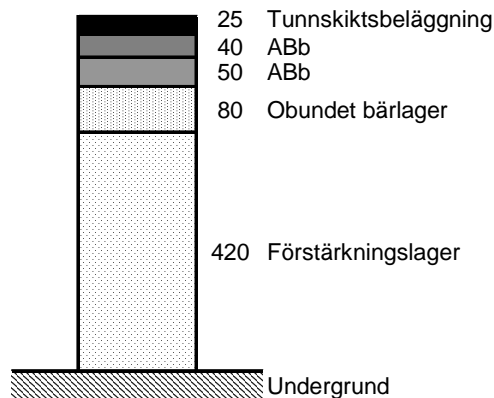
2.4. PROVNINGAR VÄG 610

Undersökningen, beskriven i denna rapport, utfördes i samband med byggnation av väg 610, sträckan Brotorpet-Heagård, strax norr om Halmstad (se figur 8). Dessa knappa 5 km utfördes som sk. funktionsentreprenad och färdigställdes 2003. Mätningar utförda i detta projekt genomfördes huvudsakligen under hösten 2002 på delsträckan söder om Gullbrandstorp.



Figur 8. Väg 610, sträckan Brotorpet-Heagård.

Figur 9 visar projekterad typsektion för aktuell sträcka.



Figur 9. Typsektion för väg 610.

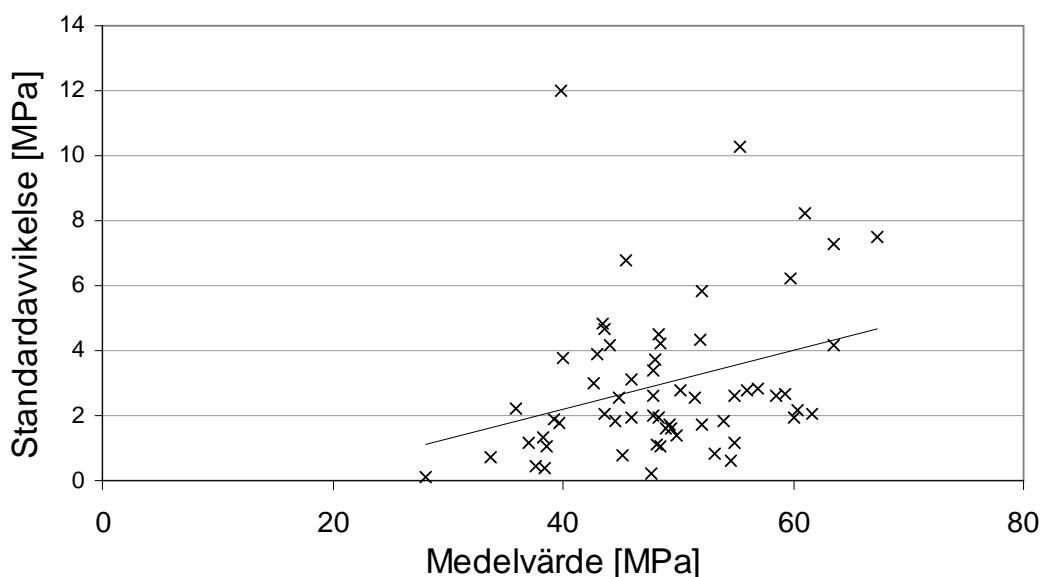
Provningsplanen omfattade mätningar på förstärknings- och bärlager huvudsakligen kring sektion 3/900 (objektets längdmätning, nordväst om Styrdal). På förstärkningslagret genomfördes mätningar på sammanlagt 4 delytor och på bärlagret på 3 ytor. Varje yta var ung. 15 m lång och 3,5 m bred (körvägarens bredd). Mätningar med Geogauge och tysk lätt fallvikt utfördes i samma punkt och med ung. 0,6 m förskjutning i längsled mellan varje punkt i en linje mitt på provytan. Då den ursprungliga bedömningen var att en mätning med (tysk) lätt fallvikt eventuellt kan orsaka en förändring av jordmaterialet, t.ex. efterpackning eller uppluckring, utfördes mätningen med Geogauge först i varje punkt. Denna hypotes kunde dock vederläggas; provningar indikerar ingen påverkan av fallviktsmätningarna.

3. RESULTAT

3.1. PRECISION

En viktig egenskap hos en mätmetod är dess precision i termer av repeter- resp. reproducerbarhet. I mättekniska sammanhang åsyftar begreppet precision hur bra överensstämmelsen är mellan mätresultat dvs. en kvantifiering av förväntad variation mellan upprepade mätningar. Precision uppdelas vanligen i repeterbarhet, variation mellan mätningar utförda av samma operatör med samma utrustning, och reproducerbarhet, variation mellan mätningar utförda med olika operatör och olika utrustning. I denna undersökning har mätningar utförts av samma operatör och med samma utrustning varför det endast är möjligt att skatta repeterbarhet. Bestämning av repeterbarhet har utförts i enlighet med SS-ISO 5725-2 och SS-ISO 5725-6. Detta har gjorts i två steg. Först har samstämmigheten mellan upprepade bestämningar med Geogauge i en punkt bestämts. Denna bestämning benämns mätrepeterbarhet. Detta följs sedan av en jämförelse mellan de olika metoderna, Geogauge och lätt fallvikt där repeterbarheten bestämts utifrån upprepade mätningar på (bedömt) identiska prov. Denna bestämning benämns repeterbarhet för respektive metod.

Mätrepeterbarhetsvariansen, s_r^2 , har beräknats för ett stort antal repeterade mätningar av styvhet med Geogauge. Vid varje punkt gjordes tre bestämningar. Dessa bestämningar utgör de mätresultat på vilken precisionsbestämningen grundas. Mätrepeterbarheten omfattar således inte hela mätproceduren inklusive applicering av utrustningen på ytan utan endast de tre repeterade bestämningarna (observerade värden) i samma punkt. I figur 10 sammanfattas beräkningen av mätrepeterbarhetsstandardavvikelse från sammanlagt 61 mätpunkter fördelade på 29 punkter på förstärkningslager och 32 på bärlager. Figur 10 visar standardavvikelsen som funktion av medelvärde för uppmätt styvhet i varje punkt.



Figur 10. Mätrepeterbarhetsstandardavvikelse som funktion av ytmodul för samtliga sträckor.

Inget tydligt samband kan skönjas även om lutningen är signifikant ($\alpha = 0,05$, dvs. 95 % säkerhet). Spridningen kring linjen är avsevärd. Vidare skiljer standardavvikelsen mellan bär- och förstärkningslager. Denna skillnad är dock inte statistiskt signifikant ($\alpha = 0,05$). Av denna anledning beräknas mätrepeterbarhetsstandardavvikelsen som medelvärdet av samtliga observationer. Medelvärdet av standardavvikelsen för samtliga sträckor är 3,0 MPa (förstärkningslagret 2,6 MPa och bärlagret 3,4 MPa).

Repeterbarhetsstandardavvikelsen kan användas för att bestämma sannolika intervall inom vilka upprepade mätningar kommer att falla. Vanligtvis används sannolikhetsnivån 95 %. Vad avser en mätmetods precision är benämningen repeterbarhet förbehållen en maximal skillnad mellan två mätresultat, i regel formulerad som att: skillnaden mellan två provresultat från identiska prov överskrider repeterbarhetsgränsen i genomsnitt inte mer än i 1 fall av 20. I detta fall omfattar mätrepeterbarhetsmättet 3 bestämningar varför benämningen repeterbarhet inte anses helt korrekt. Variationsbredden för fler mätningar än två benämns kritiskt område och bestäms enligt:

$$CR_{0,95}(n) = f_n \sigma$$

där n är antalet provresultat, f_n kritisk faktor för variationsbredd och slutligen σ är standardavvikelsen (eller skattningen). För 3 upprepade bestämningar är den kritiska faktorn 3,3 (SS-ISO 5725-6). Det kritiska området för 3 upprepade bestämningar blir således:

$$CR_{0,95} = 10 \text{ MPa}$$

Denna variationsbredd för 3 upprepade mätningar i samma punkt överskrider i genomsnitt endast i 1 fall av 20 (95 % sannolikhet).

Då mätningar med lätt fallvikt genomfördes samtidigt med Geogaugemätningar kan repeterbarheten för de två olika metoderna jämföras. Denna jämförelse baseras på medelvärdet av tre bestämningar i samma punkt. För lätt fallvikt är detta förfarande implementerat i den inbyggda mät- och analysalgoritmen, resultat visas efter 3 belastningar. Som tidigare nämnts baserades även medelvärdet för mätningar med Geogauge på tre enskilda mätningar. För att kunna bestämma repeterbarhet behövs upprepade mätningar på identiska prov. I detta fall anses de olika delsträckorna, 4 förstärkningslager och 3 bärlager, utgöra olika prov inom vilka upprepade provningar utfördes. Således utgör beräkningsunderlaget sammanlagt 7 olika nivåer (motsvarande de olika provytorna som antas homogena inom resp. yta) och mellan 6 till 12 upprepade mätningar inom varje nivå (provyta). Tabell 1 sammanfattar beräkningarna uppdelat på lagertyp och delsträcka.

Tabell 1. Repeterbarhetsstandardavvikelse för de olika delsträckorna [MPa]

	Förstärkningslager				Bärlager		
	1	2	3	4	1	2	3
Geogauge	4,4	5,3	2,1	4,3	7,8	4,5	11,1
lätt fallvikt	3,6	7,4	1,6	4,0	3,7	3,1	5,4

För att undersöka eventuell skillnad i standardavvikelse mellan de olika mätmetoderna genomfördes en variansanalys (ANOVA). För att hantera eventuell skillnad mellan lagertyperna var den statistiska modellen ett sk. blockförsök med mätmetod som huvudeffekt och lagertyperna utgjorde block. Utfallet från variansanalysen ger ingen signifikans för vare sig metod eller lager dvs. samtliga skillnader kan förklaras med slumpmässiga variationer. Det totala medelvärdet för repeterbarhetsstandardavvikelsen blir 4,9 MPa, vilket medför att repeterbarheten blir:

$$r = 14 \text{ MPa}$$

Denna gräns avser maximal skillnad mellan två upprepade mätningar med 95 % sannolikhet genomförda på identiska prov. Vad avser ytor på verkliga konstruktioner är det uppenbart att det är svårt att säkerställa att provningen sker på identiska prov, vilket får beaktas vid bedömning av mätkvaliteten.

3.2. JÄMFÖRELSE GEOGAUGE OCH LÄTT FALLVIKT

En viktig del av denna undersökning avsåg att jämföra mätningar utförda med lätt fallvikt respektive Geogauge. Som tidigare beskrivits utfördes mätningar med båda dessa metoder i samma punkter på ett antal olika delsträckor. Inledningsvis kan det konstateras att det föreligger en statistiskt signifikant samvariation mellan

styvhetsmodul bestämd med Geogauge och lätt fallvikt (Pearson korrelation = 0,48). Detta föranleder en djupare analys av samvariation och eventuella skillnader. Denna typ av mätningar kan bedömas statistiskt med ett sk. t -test med parvisa observationer (eller matchade sampel). De enskilda mätningarna i varje punkt, med de olika metoderna, kan anses höra samman dvs. de är beroende.

T -test med parvisa observationer baseras på skillnaden, D , mellan observationer (mätningar med Geogauge resp. lätt fallvikt) i varje punkt enligt:

$$D = S_{GG} - S_{fv} \quad 12$$

För att pröva om det är sannolikt att det finns en skillnad används hypotesprövning. Den sk. nollhypotesen, som skall prövas, innebär att det inte finns någon skillnad mellan mätningar med Geogauge och lätt fallvikt dvs. medelvärdet (μ_D) av skillnaderna är noll:

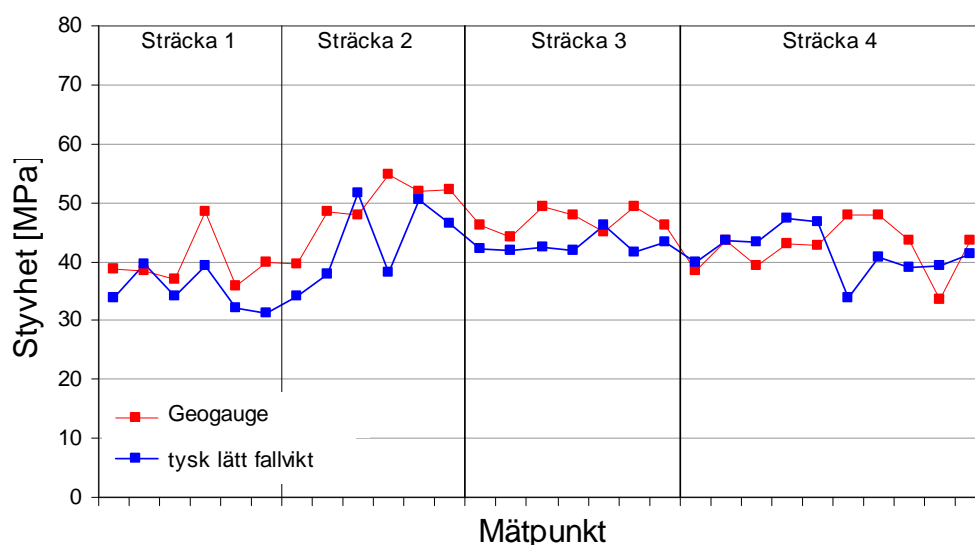
$$H_0: \quad \mu_D = 0$$

Mothypotesen är då att det faktiskt finns skillnad dvs.:

$$H_1: \quad \mu_D \neq 0$$

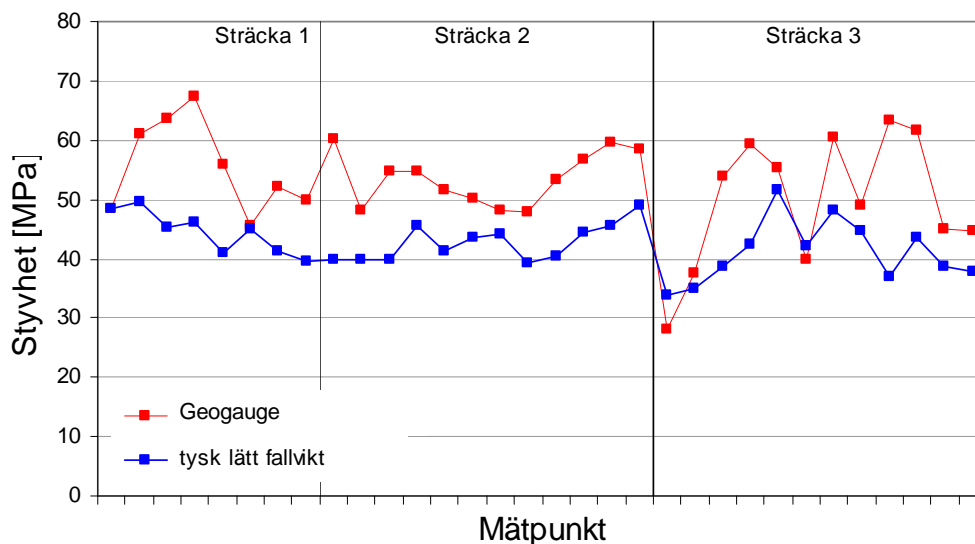
Signifikansnivå är sannolikheten att vid en prövning förkasta nollhypotesen om den är sann dvs. i detta fall risken att säga att det är skillnad mellan mätningar med Geogauge och lätt fallvikt, när det i själva verket inte finns någon skillnad. Vid statistisk hypotesprövning sätts vanligtvis denna nivå till 5 % ($\alpha = 0,05$) vilket innebär 95 % sannolikhet.

Resultaten sammanfattas i figur 11 för de olika delsträckorna på förstärkningslagret och i figur 12 sammanfattas bärlagret.



Figur 11. Jämförelse mellan Geogauge och tysk lätt fallvikt på förstärkningslager.

Mätningar med de olika utrustningarna synes vara tämligen samstämmiga på förstärkningslagret. Det kan även observeras att de i regel samvarierar även om detta inte är tydligt delvis beroende på att styvhetsintervallet är begränsat.



Figur 12. Jämförelse mellan Geogauge och tysk lätt fallvikt på bärlager.

På bärlagret förefaller det vara skillnad mellan mätningarna med Geogauge jämfört med lätt fallvikt. Samvariationen är inte heller tydlig. Variationen mellan provplatser verkar vara större för Geogauge jämfört med lätt fallvikt även om, som tidigare konstaterats, denna skillnad inte är statistiskt signifikant.

Resultatet av den statistiska analysen visar att det är en statistiskt signifikant skillnad mellan Geogauge och lätt fallvikt. Styvhetsmodulen mätt med Geogauge är i genomsnitt 7 MPa högre (med 95 % säkerhet mellan 5-9 MPa). Det framgår dessutom att det är signifikant skillnad mellan lagren: på förstärkningslagret ger Geogauge i genomsnitt 3 MPa högre styvhetsmodul och på bärlagret 10 MPa. Även om skillnaderna är statistiskt signifikanta är de, i relation till repeterbarheten, tämligen måttliga, framförallt på förstärkningslagret.

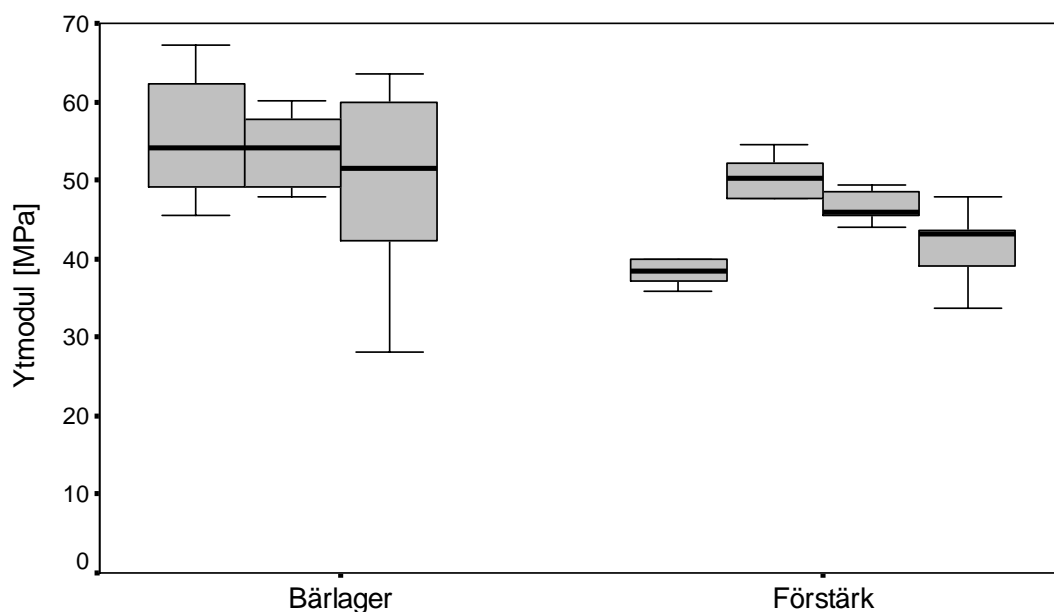
Som nämnts i tidigare avsnitt redovisar Alshibli m.fl. (2005) resultat som ansluter till de mätningar och jämförelser som genomförts i detta projekt men täcker ett vidare intervall av ytmoduler, varför en mer utförlig redovisning och utökad analys av deras resultat ges i detta avsnitt. De utförde mätningar med Geogauge, lätt fallvikt och statisk plattbelastning. Vad avser statiskt plattbelastning användes en något annorlunda beräkningsprocedur än den i standardmetoden, vilket dock inte bör påverka korrelationen i någon nämnvärd grad men påverkar absolutnivån av modulbestämningarna. Redovisade resultat från deras undersökning har i denna rapport analyserats med avseende på korrelation och eventuella skillnader i nivå av uppmätta ytmoduler. Mätningar utfördes på en rad olika ytor, från leror till obundna friktionsmaterial och krossad/granulerad asfalt, med styvhetsmoduler varierande från

kring 20 MPa till ungefär 300 MPa. Erhållna resultat indikerar statistisk signifikans (Pearson) mellan samtliga metoder dvs. metoderna samvarierar. För att skatta skillnader i modulnivå mellan de olika metoderna genomfördes ett matchat *t*-test (enligt ovan). Resultaten av denna statistiska analys indikerar att moduler bestämda med tung fallvikt är systematiskt lägre jämfört med Geogauge och lätt fallvikt som sinsemellan ger samma resultat.

3.3. YTMODUL FÖR DE OLIKA LAGREN

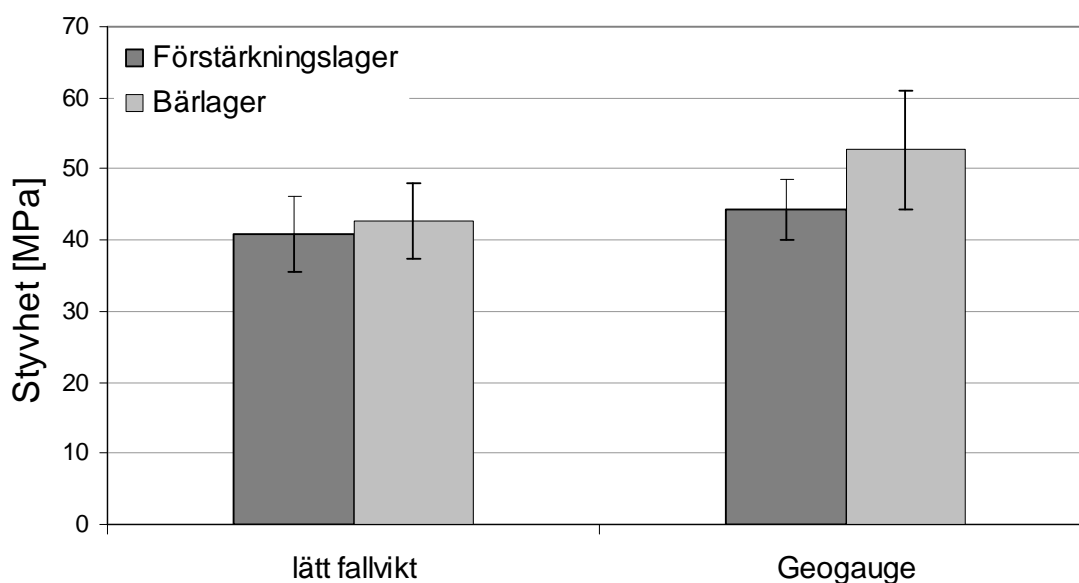
Som framgår av figur 11 och Figur 12 verkar det vara skillnad i uppmätt styvhetsmodul, (mätt som ytmodul) mellan förstärknings- och bärlager. Det verkar även vara så att de olika utrustningarna skiljer i styvhetsbestämning mellan de olika lagren; på förstärkningslagret är skillnaden liten medan den på bärlagret synes vara något större.

Figur 13 sammanfattar mätningar med Geogauge på delsträckorna på förstärknings- resp. bärlager. Figuren visar medianvärde, undre och övre kvartilen samt minimum och maximum för respektive delsträcka (boxplot eller låddiagram).



Figur 13. Boxplot för ytmodul mätt med Geogauge på de olika sträckorna indelat efter lager.

Figur 13 indikerar skillnad mellan bär- och förstärkningslager även om en viss spridning är synlig. Mätningar med lätt fallvikt visar ett liknande mönster men med en mindre tydlig skillnad mellan bär- och förstärkningslager. Mätningar på de olika lagren med de två metoderna sammanfattas i figur 14.



Figur 14. Medelvärde av ytmodul för resp. lager med de olika mätmetoderna.

Båda metoderna indikerar en styvhetsökning på bärlager jämfört med förstärkningslager. För att undersöka om ytans bärighet ökat efter påbyggnad av bärlagret jämfördes ytmodulerna på bär- och förstärkningslager med ett *t*-test dvs. medelvärden på respektive yta jämfördes med avseende på om ytmodulen skiljer. Detta genomfördes för båda mätmetoderna. Det kan konstateras att för lätt fallvikt är skillnaden inte statistiskt signifikant; den kan förklaras med slumpfel. Mätningar med Geogauge ger en något annorlunda bild. Geogauge ger i medeltal 8,5 MPa högre ytmodul på bärlager jämfört med förstärkningslager. Med 95 % sannolikhet är ökningen mellan 5 MPa till 12 MPa.

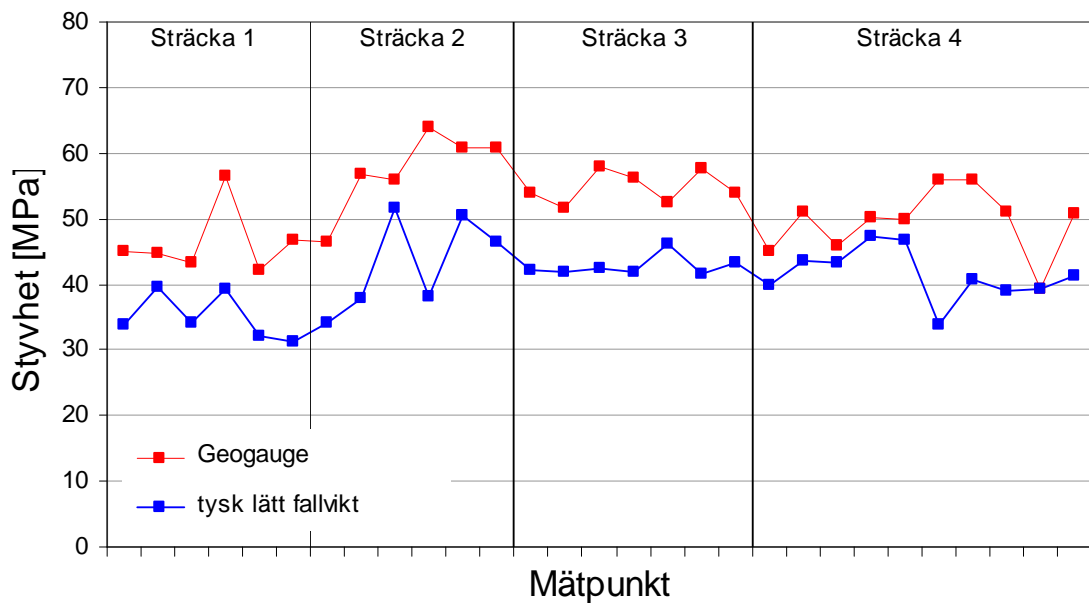
4. DISKUSSION OCH SLUTSATSER

För att kunna bedöma ett mätvärde är det viktigt att beakta mätmetodens precision dvs. hur stor skillnad kan förväntas mellan till synes identiska provningar. Detta är av extra stor vikt när det gäller mätningar i relation till krav. För att en metod skall anses tillförlitlig och användbar är det önskvärt att precisionen är hög. Denna undersökning indikerar ingen avgörande skillnad vad avser precision, mellan mätningar med Geogauge och lätt fallvikt. Som mätningarna är utförda i denna undersökning baseras i båda fallen, mätvärdet på tre repeterade bestämningar i en mätpunkt. Även tidigare undersökningar t.ex. Rahman m.fl. (2008) och Alshibli m.fl. (2005) har indikerat ungefärligen samma variationer i mätningar med Geogauge som med lätt fallvikt. Även om precisionsmåttens definitionsmässigt baseras på identiska prover är detta villkor omöjligt att uppfylla i praktiken. Precisionsmättet innehåller med nödvändighet en del

av provvariabiliteten pga. materialens heterogena och grova struktur i förhållande till provningsgeometri.

Vad avser mätningar av bärighet med olika instrument är verkansdjupet en viktig faktor att beakta. Humboldt anger i instruktionen för Geogauge att verkansdjupet är 9 till 12 tum (220-310 mm). Det är dock oklart på vad denna uppgift baseras. Det finns ingen teoretisk gräns för verkansdjupet. Som indikeras i figur 3 faller spänningen asymptotiskt mot noll med ökat djup. Detta gäller även för förskjutningar och töjningar. Däremot finns det en icke-skarp gräns under vilken påverkan på ytan blir ytterst liten och i praktiken försumbar. Lenke m.fl. (2001) genomförde laborieförsök för att undersöka det praktiska verkansdjupet för mätningar med Geogauge. De studerade även inverkan av störningar i form av styva lager vertikalt och horisontellt. Mätningar utfördes på ökande tjocklek av ett obundet lager ovan ett mjukt och absorberande lager. Dessa mätningar indikerar att vid tjocklekar över ung. 40 cm liknar uppträdandet en oändlig halvrymd, dvs. den bestämda styvheten är tämligen konstant. I sidled verkar inflytandet av störningar klinga av vid avstånd över ungefär 20 cm. En snarlik undersökning genomfördes av Maher m.fl. (2002) på en något större laborieuppställning. Även vid dessa försök ökades lagertjockleken stegvis och grundantagandet är att när uppmätt modul förefaller konstant med ökat djup, så uppträder det mätta lagret i praktiken som en oändlig halvrymd vid aktuell belastning. Enligt författarna indikerar resultaten ett verkansdjup kring 15-25 cm. Detta synes dock vara en något underskattande slutsats; redovisade resultat indikerar ett något större verkansdjup. Maher m.fl. noterade även en indikation på att praktiskt verkansdjup varierar med markens styvhet, vilket förefaller rimligt. Mätningarna indikerar att för styva material är verkansdjupet större jämfört med mindre packade lager (och därmed lägre styvhet). Sawangsuriya m.fl. (2002) redovisar numerisk modellering (FEM) av Geogauge-mätningar begänsade i sidled som indikerar att för aktuella frekvenser är påverkan ungefär 20 cm i sidled. Vad avser verkansdjupet genomförde Sawangsuriya m.fl. laborieförsök med ökande tjocklek och fann att modulen verkar vara konstant vid djup över 30-40 cm. De undersökte även effekten av olika material i lager och drog slutsatsen att ett material med avvikande styvhet får genomslag först vid tjocklekar överstigande ca 10 cm. Denna slutsats får endast begränsat stöd av redovisat material och överensstämmer inte med resultat från denna undersökning. Resultat från denna undersökning visar att mätningar med Geogauge påvisar en förstyvande effekt av bärlager jämfört med mätningar på förstärkningslager; en effekt som inte uppmättes med lätt fallvikt.

Det är viktigt att göra en bedömning av de grundläggande förutsättningarna i beräkningsmodellen (ytbelastad oändlig halvrymd av isotropt linjärt elastiskt material). Framförallt gäller detta skattningen av Poissons tal, vilket ger direkt utslag vid bestämningen av styvhetsmodul. I figur 15 visas skillnaden mellan Geogauge och lätt fallvikt där styvhetsmodulen beräknats med standardantagandet att Poissons tal är 0,35 jämfört med beräkningen för lätt fallvikt där Poissons tal är 0,5.



Figur 15. Jämförelse mellan Geogauge och lätt fallvikt: Poissons tal för Geogauge 0,35 och för lätt fallvikt 0,5 (jämför figur 11).

Som synes vid en jämförelse med figur 11, är styvheten mätt med Geogauge högre än den mätt med lätt fallvikt. Detta beror emellertid mest på skillnad i antaget Poissons tal. Av ekvation 10 framgår det att ett lägre Poissons tal ger högre styvhetsmodul. Publikationer i samband med Geogauge ansätter i regel Poissons tal till 0,35, medan metoden för lätt fallvikt föreskriver 0,5. Vid beräkning av ytmodul ger Poissons tal 0,35 17 % högre modul jämfört med Poissons tal 0,5. Det bör noteras att Poissons tal i båda fallen är antagna och inte med nödvändighet riktiga (även om de är rimliga). Vid en jämförelse av bärighet mätt med de båda metoderna är detta en viktig beräkningsförutsättning som ger systematiskt påverkan på beräkningen av styvhetsmodul. I denna undersökning har Poissons tal 0,5 valts som grund för precisionsbestämningar och vid metodjämförelse. Resultaten kan omräknas till andra antagna Poissons tal; inverkans storlek avgörs av ekvation 10 (se sidan 12).

Det är även viktigt att notera att beräknade ytmoduler baseras på antagandet om oändlig halvrymd. Lagrade konstruktioner, som vägar, bryter uppenbart mot detta antagande. Bestämda ytmoduler representerar markens motstånd mot deformationer som vore den bestående av ett material med oändlig utbredning; ytmodulen sammanfattar de olika lagrens material och samverkande effekter i en styvhetsmodul. De enskilda lagrens bidrag kan inte på något lätt sätt bestämmas. Detta hör även samman med verkansdjupet som tidigare diskuterats.

Baserat på resultat erhållna i denna undersökning kan följande slutsatser dras.

- Inom det styvhetsintervall som redovisats är variationsvidden för tre repeterade mätningar av styvhetsmodul med Geogauge i samma punkt 10 MPa.
- Repeterbarheten dvs. skillnaden mellan två upprepade provningar på identiska ytor är 14 MPa för såväl Geogauge som lätt fallvikt. Denna skillnad överskrids i genomsnitt endast i 1 fall av 20.
- Styvhetsmodulen mätt med Geogauge är i genomsnitt 7 MPa högre (med 95 % säkerhet mellan 5-9 MPa) jämfört med mätningar med lätt fallvikt.
- Mätningar med Geogauge indikerar en ökad ytmodul för mätningar på bärlager jämfört med förstärkningslager; en skillnad som inte uppmättes med lätt fallvikt.
- Antaganden i grundmodellen, Boussinesqs oändlig halvrymd av isotropt linjärt elastiskt material, påverkar utfallet av bärighetsberäkningen.
- För att utarbeta en värderingsanvisning krävs ett större antal mätobjekt för att fastställa bedömningsnivåer för terrasser och obundna lager.

Slutligen kan det, med viss försiktighet, konstateras att i denna undersökning är mätningar med Geogauge och lätt fallvikt tämligen samstämmiga, såväl precisions- som resultatmässigt. Detta stöds även av tidigare undersökningar.

REFERENSER

- Alshibli, K.A. Abu-Farsakh, M. Seyman, E. 2005. Laboratory evaluation of the Geogauge and light falling weight deflectometer as construction control tools. *Journal of Materials in Civil Engineering* 17: 560-569.
- Boussinesq, M.J. 1885. *Application des potentiels a l' etude de l' equilibre et du mouvement des solides elastiques*. Gauthier-Villars, Paris.
- George, K.P. 2003. *Falling weight deflectometer for estimating subgrade moduli*. FHWA/MS-DOT-RD-03-153. University of Mississippi, Dept. of Civil Engineering.
- Humboldt. 2007. *Geogauge user guide*. Humboldt Mfg. Co, Norridge Illinois.
- Lenke, L.L. McKeen, R.G. Grush, M. 2001. *Evaluation of a mechanical stiffness gauge for compaction control of granular media*. Report No.: NM99MSC-07.2. New Mexico State Highway & Transportation Department, Research Bureau.
- Maher, A. Bennert, T. Gucunski, N. 2002. *Evaluation of the Humboldt stiffness gauge*. FHWA-NJ-2002-002. New Jersey Dept. of transportation.
- Poulos, H.G. Davis, E.H. 1974. *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. John Wiley and Sons.
- Rahman, F. Hossain, M. Hunt, M.M. Romanoschi, S.A. 2008. Soil stiffness evaluation for compaction control of cohesionless embankments. *Geotechnical Testing Journal* 31.
- Sawanguriya, A. Bosscher, P.J. Edil, T.B. 2002. Laboratory evaluation of the soil stiffness gauge. *Transportation Research Record* 1808: 30-37.
- Sawanguriya, A. Edil, T.B. Bosscher, P.J. 2003. Relationship between soil stiffness gauge modulus and other test moduli for granular soils. *Transportation Research Record* 1849: 3-10.
- Svensk standard SS-ISO 5725-2. (2003). *Noggrannhet (riktighet och precision) för mätmetoder och mätresultat- Del 2: Grundläggande metod för bestämning av en standardiserad mätmetods repeterbarhet och reproducerbarhet*. SIS, Swedish Standards Institute.
- Svensk standard SS-ISO 5725-6. (2003). *Noggrannhet (riktighet och precision) för mätmetoder och mätresultat- Del 6: Praktisk användning av noggrannhetsvärden*. SIS, Swedish Standards Institute.

BILAGA 1. HANDHAVANDE GEOGAUGE (LARS BERGSTRÖM)

- Inspektera GeoGauge
 - Kontrollera att foten är någorlunda ren från sand och grus.
 - Gummistrumpan som fäster foten vid Gaugen ska vara i god kondition, dvs. ren utan funktionsnedsättande smuts.
- Ström på.
- Vid första användandet välj ”mode” och Poissons ratio. Detta värde ligger sedan kvar och behöver ej registreras igen. (Värdet erhålls från laboratorie för det aktuella materialet. Vanligtvis runt 0,35 för obundet material i väggkropp).
- Placera apparaten på punkten för mätningen.
 - Var noggrann med att uppnå tillräcklig kontakt mellan fot och mark, dvs. minst 60 % anläggningsyta. Vid grovt material kan fuktad sand med en maximal tjocklek av 1 cm användas för att få god kontakt. Försök utförda i USA har visat att det främst är anläggningsytan som avgör de skillnader i mätresultat som kan erhållas vid en och samma punkt.
- Tryck på knappen MEAS och tag ett steg bort från apparaten. Mätningen påbörjas med att en kontroll av störande vibrationer från omgivningen registreras.

Inspect GeoGauge

Power On

Select Mode & Poisson's Ratio

Seat the Foot

- > 60% Direct Contact
- Moist Sand Assisted (3 to 6 mm thick)
- Rough & Irregular Surfaces
- Smooth Hard Surfaces

Take the Measurement:

- 75 Seconds (15 sec. Noise + 60 sec. Signal)
- Results Displayed
- Signal/Noise: > 3/1 (10 db)
- Standard Deviation: a Measure of Foot Contact
- Average Stiffness or Modulus (English or SI)

Examine the Foot Print

Save Data