



BIG – Branschsamverkan i grunden

Forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av vägar och järnvägar

Projekt A2014:03

Deformationer i undergrund

Litteratursammanställning och analys



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



TRAFIKVERKET



LULEÅ
TEKNISKA
UNIVERSITET



BIG – Branschsamverkan i grunden
Forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av vägar och järnvägar

Rapport BIG projekt A2014:03

Deformationer i undergrund

Litteratursammanställning och analys



Framtagen inom ramen för BIG av Luleå Tekniska Universitet

Luleå 2015

BIG projekt Rapport Branschsamverkan i grunden

Beställning Web: www.big-geo.se

Upplaga Digital

Förord

Denna rapport är del 1 i projektet Deformationerna i undergrund från tung trafik och utgörs av en litteraturstudie över faktorer som påverkar permanenta deformationer i undergrunden från tung trafik.

Den här studien har finansierats av Trafikverkets forsknings- och utvecklingsprogram Byggande I Grunden (BIG). Trafikverkets representant är Andreas Ramström.

Tommy Edeskär
Luleå 2015-06-29

Sammanfattning

Det är troligt att tyngre bruttovikter kommer att tillåtas på åtminstone delar av vägnätet och andelen dispenstrafik har ökat. I denna rapport har en kartläggning över effekter av tung trafik och axelgrupper på undergrunden.

Utifrån litteraturgenomgången kan man dra slutsatsen att det ur ett vägnedbrytningsperspektiv är bättre, för samma bruttovikt, att fördela lasten på fler axlar. För belastningen i beläggningen är det i allmänhet bättre att ha lasten fördelad på flera axlar i axelgruppen. För undergrunden är det inte självklart så. Det finns en rad faktorer som verkar för ökade permanenta deformationer när lasten fördelas på axelgrupper med flera axlar genom olika effekter av samverkan mellan belastningspunkterna längre ner i konstruktionen.

För att minska de permanenta deformationerna i undergrunden är det önskvärt att maximera avståndet mellan belastningspunkterna, öka lastspridningen och minska vattenkvoten i undergrundsmaterialet. Lastspridningen kan ökas genom förstärkning av överbyggnad kvalitetsmässigt eller ökad tjockleken på överbyggnaden. Dränering är den andra insatsen som kan genomföras för att minska de permanenta deformationerna.

Laboratoriestudier visar att packning på den torra sidan om optimal vattenkvot bestämd genom Proctorförsök ger mindre permanenta deformationer vid cyklisk belastning. Det bör utredas närmare med tanke på att gängse praxis i Sverige är att packa med vattenöverskott eftersom det är gynnsamt för att nå optimal vattenkvot.

Innehåll

FÖRORD.....	I
SAMMANFATTNING	II
INNEHÅLL	III
1 INLEDNING.....	1
1.1 Syfte och mål.....	1
1.2 Avgränsningar.....	1
2 LITTERATURGENOMGÅNG	1
2.1 Dimensionering och permanenta deformationer	1
2.2 Plastiska deformationer i undergrundsmaterial	3
2.3 Spänningstillstånd	3
2.4 Effekt av packning.....	4
2.5 Axelkonfiguration.....	4
3 DISKUSSION	6
4 SLUTSATSER.....	7
5 LITTERATURFÖRTECKNING	8

1 Inledning

I Sverige går vi mot en ökning av lasterna från tung trafik genom dispenstrafik och en trolig ökning tillåtelse av bruttovikt på delar av vägnätet. Tung trafik står för merparten av nedbrytningen av det befintliga vägnätet. Nedbrytningen är starkt kopplat till axellasterna. Som en tumregel används den s.k. "Fyrapotensregeln" för att uppskatta nedbrytningseffekten av vägar. En relativ ökning av axellasten innebär en ökad nedbrytningseffekt med potensen fyra. Idag finns det en önskan att från näringslivet vid tex. gruv- och vindkraftsetableringar att få dispenstrafik för tyngre fordon. Det kommer ytterligare att öka nedbrytningstakten på det befintliga vägnätet.

Förenklat ska en vägöverbyggnad dels fördela last så att töjningar i undergrunden blir acceptabla för konstruktionen i kort och långt perspektiv och dels vara tillräckligt styv för att beläggningen ska upprätthålla sin funktion under dimensioneringstiden. Idag är möjligheterna relativt goda att bedöma effekterna av tung trafik på beläggningar och även i stor utsträckning åtgärda dessa även om det kan vara kostsamt. Kunskapsläget är sämre vad gäller påverkan på undergrunden. I denna inledande studie är avsikten att identifiera de viktigaste faktorerna för påkänning av tung trafik i undergrunden samt uppdatera kunskapsläget för ackumulerade deformationer orsakade av trafiklast på undergrundsmaterial.

1.1 Syfte och mål

Syftet med rapporten att sammanställa kunskapsläget för inverkan av tung trafik på undergrunden. Målet är att identifiera vilka faktorer som påverkar deformationen i undergrunden, kartlägga kunskapsluckor och ge förslag på frågor och åtgärder som bör studeras närmare för ett vägnät som bättre klarar framtidens utmaningar vad gäller laster.

1.2 Avgränsningar

Rapporten behandlar enbart effekter på flexibel överbyggnad av tung trafik. Klassisk geoteknisk dimensionering behandlas inte utan fokus ligger på utvecklandet av permanenta deformationer som ett resultat av trafiklast.

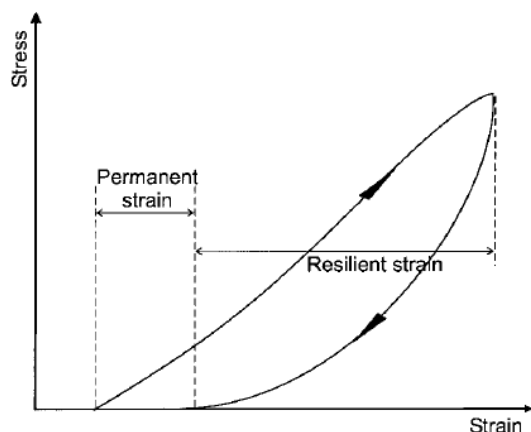
2 Litteraturgenomgång

2.1 Dimensionering och permanenta deformationer

Undergrundsmaterial (terrass) belastas genom trafik med ett stort antal belastningscykler under materialets skjuvhållfasthet. Är överbyggnaden rätt dimensionerad för trafiklasten utgör huvuddelen av deformationerna i undergrunden av elastisk deformation och de plastiska deformationerna är små (Gräbe & Clayton, 2014). Permanent deformation i terrass och undergrund går inte att undvika men ska minimeras. Permanent deformation av terrassen och i undergrunden accelererar nedbrytning av överbyggnaden. I mekaniskt-empirisk design används resilient modul, M_r (ekv 1), för att beskriva terrassmaterials egenskaper, figur 1. Den resilienta modulen beskriver bara delvis den plastiska deformationen.

$$M_r = \frac{q_r}{\epsilon_r}$$

Ekv 1.



Figur 1. Elastisk (resilient) och plastisk deformation under en belastningscykel. (Lekarp, Isacsson, & Dawson, State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates, 2000)

I mekanistisk dimensionering av överbyggnader används den elastiska vertikala deformationen som dimensioneringskriterium för kvarstående deformationer i alla överbyggnadslager. Det förklaras i (Huang, 2004) genom att elastiska deformationer är proportionella mot de plastiska, och genom att begränsa den elastiska töjningen i terrassen kommer även de (starkare) överliggande lagren också kontrolleras mot plastiska deformationer. Genom det kommer automatisk även beläggningen att kontrolleras vid överbyggnadsdimensionering.

De två vanligaste angreppssätten att modellera spårbildning i beläggningssytan är att antingen utgå från att all deformation uppkommer i undergrunden eller att de uppkommer i varje enskilt. Två spridda modeller som utgår från att spårbildningen enbart sker i undergrunden är Asphalt Institute (AI) (Shook, Finn, Witczak, & Monismith, 1982) och Shell Petroleum (Claussen, Edwards, Sommer, & Uge, 1977). Modellantagandet att all vertikal deformation uppkommer enbart i undergrunden är realistiskt. Under 1990-talet utvecklades modeller där deformationen definierades för varje enskilt lager, t.ex. (Kim H. B., 1999). Utmaningen i dessa modeller är att de blir komplexa och svåra att få tillförlitlig data till på en projektnivå och behöver kalibreras empiriskt. De flesta studier pekar på att huvuddelen av de vertikala deformationerna sker i undergrunden om överbyggnaden är korrekt dimensionerad men det finns exempel på andra resultat också, t.ex. från AASHO-försöken (Ullditz, 1987), se tabell 1.

Tabell 1. Andel av den totala observerade andelen av spårbildning i AASHO-testen. (Ullditz, 1987)

Överbyggnadslager	Andel av observerad spårbildning [%]
Bitumenbunden beläggning	32
Bärlager	14
Förstärkningslager	25
Undergrund	9

Det finns alternativ till traditionella mekanistiska modeller som är lämpade för att analysera effekter av multipla axlar på tunga fordon. Dissipated Energy-concept har visat sig fungera väl för att beräkna deformationer för beläggningar (Chatti, Manik, Salama, El Mohtar, & Lee, Effect of Michigan multi-axle trucks on pavement distress. Volume II Flexible pavements,

2009), men inga försök att använda metoden för att prognosticera effekterna på undergrunden med denna metod har hittats.

2.2 Plastiska deformationer i undergrundsmaterial

De flesta studier som rör deformationer i framförallt friktionsmaterial vid cyklisk belastning har fokuserat på att definiera elastiskt beteende (Lekarp, Isacsson, & Dawson, State of the art. II: Permanent strain response of unbound aggregates, 2000). För grovkorniga material är de viktigaste processerna för plastisk deformation omlagring/nedbrytning av partiklar och skjuvdeformationer (Hoff, 1999) (Lekarp & Dawson, Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials, 1998).

För finkorniga material är skjuvdeformationer och konsolidering de huvudsakliga processerna för plastisk deformation (Brown, Lashine, & Hyde, 1975) (Elliot, Dennis, & Qiu, 1998) (Horvli, 1979) (Puppala, Saride, & Chomtid, 2009) (Lekarp, Isacsson, & Dawson, State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates, 2000). De viktigaste faktorerna som påverkar storleken på dessa är:

- Belastningshistorik
- Vattenkvot
- Packningsgrad

För både finkorniga och grovkorniga undergrundsmaterial gäller att ackumulering av plastiska deformationer i huvudsak beror av:

- Deviatorspänning
- Effektiv medelspänning
- Antal lastcykler
- Rotation av huvudspänningsriktningar

Dynamiska triaxialförsök på lera, silt och sand visar en ökning i den resilienta styvhetsmodulen efter 10000 belastningscykler som förklaras genom fenomenet strain-hardening (Puppala, Saride, & Chomtid, 2009). (Kim & R, 2007) diskuterar om M_r bestämt i standardiserade dynamiska triaxialförsök är representativa för rehabiliteringsprojekt av den anledningen utan enbart bör användas för nyinvestering. Strain-hardening-effekten innebär att experimentellt bestämda M_r är konservativa i rehabiliteringsprojekt, förutsatt att dräneringssituationen är tillfredsställande.

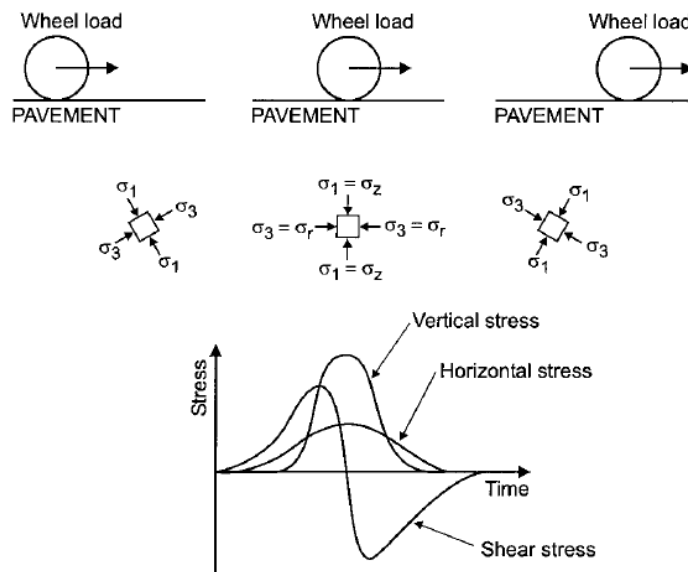
2.3 Spänningstillstånd

Spänningstillståndet styr de elastiska och plastiska deformationerna. Efter initial konsolidering så innebär ökad effektiv medelspänning att de plastiska deformationerna minskar, d.v.s. M_r ökar. Större inverkan på plastisk deformation har deviatorspänningen (Gräbe & Clayton, 2014).

Det finns en gränsspänning Ökad deviatorspänning ger ökade plastiska deformationer vid cyklisk belastning (Puppala, Saride, & Chomtid, 2009). Denna gränsspänning kallas shakedown-limit. Deviatorspänningar vid cyklisk belastning under denna spänningsnivå ger en elastisk respons och om den överskrider så ökar de plastiska deformationerna (Lekarp, Isacsson, & Dawson, State of the art. II: Permanent strain response of unbound aggregates, 2000).

En effekt av lasten är rörlig i horisontalplanet är att huvudspänningsriktningarna roterar när ett fordon passerar (Lekarp, Isacsson, & Dawson, State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates, 2000), se figur 2. Denna effekt beaktas inte i standardiserade materialtest som dynamiska triaxialförsök. Rotation av huvudspänningsriktningarna, som orsakas av rörlig hjulbelastning, reducerar M_r (Gräbe & Clayton, 2014). Multipla axlar innebär

att rotationen av huvudspänningsriktningar sker upprepade gånger under ett kort tidsförlopp vilket bidrar till högre deformationer.



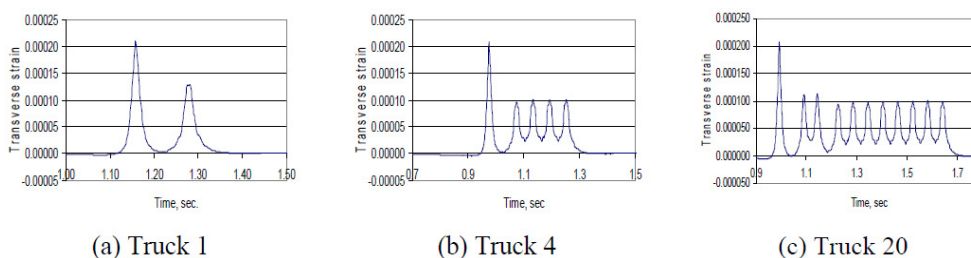
Figur 2. Rotation av huvudspänningsriktningar orsakad av "Moving wheel load". (Lekarp, Isacsson, & Dawson, State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates, 2000).

2.4 Effekt av packning

En väl packad undergrund utvecklar mindre permanenta deformationer jämfört med en dåligt packad. I gängse praxis i Sverige packas vi undergrunden med visst vattenöverskott för att med mindre packningsinsats uppnå maximalt packningsresultat. En intressant observation av (Puppala, Saride, & Chomtid, 2009) och (Kim & R, 2007) är att sand, silt och lera som packats vid vattenkvoter över den optimala vattenkvoten i proctorförsök har högre potential för stora permanenta deformationer dynamiska triaxialförsök än när samma material packats vid lägre vattenkvot än den optimala givet samma packningsgrad. Om dessa observationer är generaliserbara innebär det att anläggningspraxis är utformad för själva anläggandet och inte för funktionen för anläggningen, här vägen. Studierna indikerar att det kan vara bättre att använda mer packningsenergi och mindre vatten vid packning.

2.5 Axelkonfiguration

Genom att fördela lasten på flera närliggande axlar kan belastningen minskas på överbyggnaden. Vid passage av ett fordon sker belastningen genom ett antal belastningspulser som motsvaras av axelpositionerna. I figur 3 visas de vertikala deflektionerna i vägytan. Den första pulsen som ger störst utslag är styraxlen. Deflektionen för de följande grupperade axelkombinationerna blir lägre.



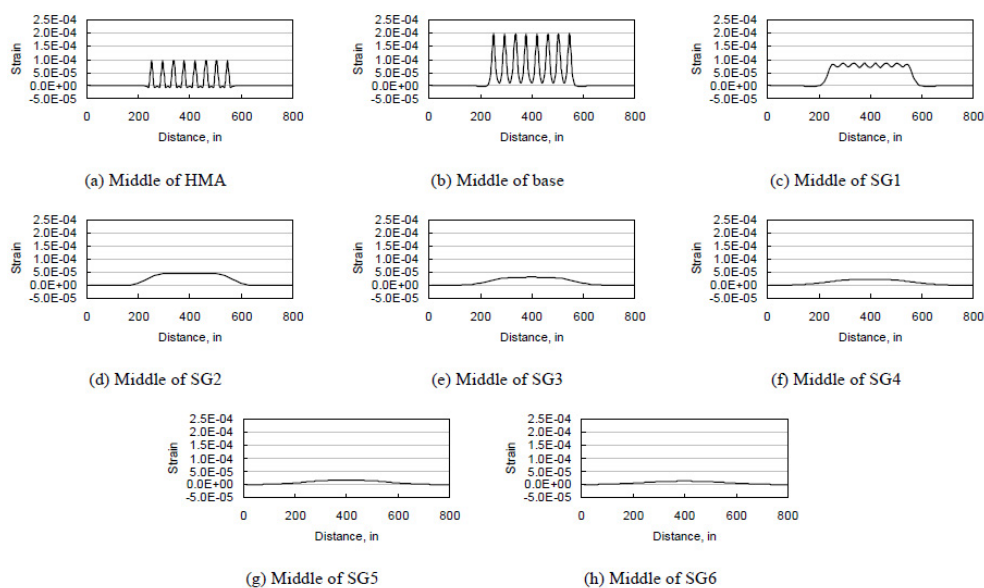
Figur 3. Vertikal deformation i vägytan från a) två singelaxlar, b) styraxel och två dubbelmontage, c) styraxel, dubbelmontage och 8-axlig gruppering. (Chatti, Manik, Salama, Haider, Brake, & El Mohtar, Effect of Michigan multi-axle trucks on pavement distress. Volume 1 - Literature review and analysis of in-service performance data, 2009)

Multipla axlar minskar utmattningsskador (sprickbildning i beläggning) men ökar permanenta deformationer i överbyggnaderna (Chatti, Manik, Salama, El Mohtar, & Lee, Effect of Michigan multi-axle trucks on pavement distress. Volume II Flexible pavements, 2009) och (Salama & Chatti, Evaluating flexible pavement rut damage caused by multiple axle and truck configurations, 2011). Permanenta deformationer (spårbildning) är proportionellt mot antalet axlar. Det finns indikationer att 4-potensregeln underskattar påkänningarna för ökat antal multipla axlar. Slutsatserna från studierna är att effekten på töjningar i beläggningen var ungefär densamma för alla axelkonfigurationer för samma last. Det innebär att nedbrytningstillskottet för varje enskilt hjulpar var lägre i en axelkombination jämfört med en med färre axlar. Samverkan från belastning från olika axelkonfigurationer ökade nedbrytningseffekterna för det enskilda fordonet. Belastningen genom superposition blev högre för kombinationer med många axlar. Huvudslutsatserna stöds i av flera studier.

Effekten av olika axelkonfigurationer på lågvolymvägar med tunn beläggning, jämförbart med svenska förhållanden, har studerats av bl.a. (Kim & Lee, 2011). Genom FEM-analys har effekten av singel, tandem och trippelaxlar studerats för beläggningen och undergrunden. I analysen har samma kontaktryck (0,55 MPa) använts för varje enskilt hjul. Den totala belastningen över en tandemaxel är alltså dubbelt så stor som för en singelaxel och trippelaxelns belastning är tre gånger så stor. Slutsatserna i studien är att:

- Ytdeflektion är störst från trippelaxeln följt av dubbelaxel och singelaxel.
- En tunn beläggning är känsligare för variationer i överbyggnadsmaterial och undergrund
- Undergrundens egenskaper påverkar ytdeflektionen mer än de obundna lagrens egenskaper
- Singelaxeln har störst påverkan på undergrunden (töjning). Minst effekt har trippelaxeln.

Figur 4 visar effekten av en 8-axlig kombination på olika nivåer i en vägkonstruktion som vertikal töjning. i det individuella lagret (Chatti, Manik, Salama, El Mohtar, & Lee, Effect of Michigan multi-axle trucks on pavement distress. Volume II Flexible pavements, 2009). I beläggningen (a) och i bärlagret (b) ger passagen av de individuella axlarna upphov till en elastisk respons med fullständig återgång vid avlastning. SG1-SG6, d.v.s. (c) till (h) är en indelning i 6 stycken 40 tum (102 cm) mäktiga lager för undergrundsmaterialet. Ytligt i undergrunden (c) kan effekten av de enskilda axlarna fortfarande urskiljas. Men det sker ingen fullständig avlastning mellan axlarna utan det finns ackumulerade deformationer under hela den tid som axelkonfigurationen passerar tvärsnittet. Deflektionerna avtar med djupet i undergrunden och den det går inte att urskilja effekten av enskilda axlar på ett djup motsvarande ca 60 cm ner i undergrunden. Värt att notera är att dynamiska triaxialförsök väl beskriver lastsituationen för beläggningsslagret och bärlagret men inte för undergrunden. Där är belastningstiden lika med hela axelkonfigurationens tid att passera.



Figur 4. Simulering av vertikala deformationer i ett tvärsnitt av en flexibel överbyggnad med tunn beläggning för en grupp av 8-axlar; a) beläggning, b) bärlager, (Chatti, Manik, Salama, El Mohtar, & Lee, Effect of Michigan multi-axle trucks on pavement distress. Volume II Flexible pavements, 2009). SG1-SG6 är nivåer i undergrunden med 40 tum avstånd emellan.

Axelkombinationer med två eller flera axlar ökar den totala belastningstiden på undergrundsnivån. Utvecklingen av permanenta deformationer i undergrundsmaterial är beroende av belastningstiden (Ahmad, Alwash, & Faleh Degan, 2013). (Lekarp, Isacson, & Dawson, State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates, 2000) behandlar frågan tidsberoende av M_r och kommer till slutsatsen att ökad belastningstid leder till en reduktion av M_r men att den effekten är relativt liten.

3 Diskussion

Frågeställningen hur tung trafik och olika axelkonfigurationer påverkar nedbrytningen av vägarna är inte ny. Från 1990-talet och framåt har analys- och testmetoder utvecklats som gör det möjligt att studera fenomenet.

För att kompensera inverkan av ökad last på vägkonstruktionen fördelas lasten ut på fler axlar, i olika axelkonfigurationer, på dubbelmontage eller bredare däck (supersingles) för att minska kontaktrycket. Vanligast är tandem- och trippelaxlar men det finns axelkombinationer upp till 8-11 axlar i kommersiell trafik internationellt. Utifrån litteraturgenomgången kan man dra slutsatsen att det ur ett vägnedbrytningsperspektiv är bättre, för samma bruttovikt, fördela lasten på fler axlar. För belastningen i beläggningen är det i allmänhet bättre än att ha lasten fördelad på få axlar. För undergrunden är det inte entydigt så.

Undergrundens egenskaper är de viktigaste för lågvolympvägar när det gäller deflektion av vägytan (Kim & Lee, 2011). Ju fler axlar desto högre total deflektion. Det innebär nödvändigtvis inte att dragtöjningarna i beläggningen blir större, det kan kompenseras av en flackare nedböjning av ytan. För undergrunden blir den vertikala töjningen lägre med fler axlar.

Det finns flera studier på inverkan på överbyggnaden och undergrunden av olika axelkonfigurationer för tung trafik. Multipla axlar reducerar belastningen på beläggning (Kim & Lee, 2011) och (Salama & Chatti, Evaluating flexible pavement rut damage caused by

multiple axle and truck configurations, 2011) genom att lasten fördelas i flera belastningspulser. Belastningspulserna interagerar i liten utsträckning i beläggningslagren. Tunna beläggningar, som är vanliga i Sverige, ger en ökad känslighet för deformationen i vägytan genom att inverkan av de obundna lagren och undergrunden blir relativt sett större.

Även undergrunden utsätts för definierade belastningspulser. Den totala deflektionen blir mindre med multipla axlar. Men genom superposition och rotation av huvudspänningsriktningar så avlastas inte undergrunden som beläggningsen gör genom fördelningen av lasten mellan axlarna inom en axelkombination. Det gör att belastningens längd tidsmässigt förlängs.

Om inte spänningstillskottet blir för stort kommer den dynamiska styvheten i undergrunden att öka något genom strain-hardening (Puppala, Saride, & Chomtid, 2009) vilket verkar positivt för hela konstruktionens kapacitet. En deviatorspänningsgräns som inte bör överskridas för undergrundsmaterialet är shakedown-limit. Var den gränsen går är materialspecifikt och det finns inget sammanställt underlag att utgå från som man kan använda för konsekvensbedömning idag.

Det finns en rad faktorer som verkar för ökade vertikala deformationer. Ökad belastningstid, som en konsekvens av superposition mellan axlarna inom axelkonfigurationen ger ökade deformationer (Ahmad, Alwash, & Faleh Degan, 2013). Hur stora deformationerna är svårt att ta ställning till eftersom dagens metoder för att bestämma de resilienta egenskaperna för undergrund sker med kortare belastningscykler.

Den upprepade rotationen av huvudspänningsriktningar i undergrunden som en konsekvens av flera närliggande axlar ger en ökning av permanenta deformationer (Gräbe & Clayton, 2014). För att kunna analysera storleksordningen av denna effekt krävs numeriska analyser med "moving-wheel-load" och verifiering av materialegenskaper i triaxialförsök.

Det finns få studier som fokuserar på plastiska deformationer av undergrundsmaterial orsakade av trafiklast. I fokus har istället elastisk respons prioriterats som används som underlag i mekanistiska dimensioneringsmodeller. Standardiserade dynamiska triaxialförsök för bestämning av resilient styvhetsmodul för obundna materials belastningscykel överensstämmer dåligt med den belastningssituation som undergrunden utsätts för av tung trafik med multipla axlar.

Laborariestudier visar att packning på den torra sidan om optimal vattenkvot bestämd genom Proctorförsök ger mindre permanenta deformationer vid cyklisk belastning. Det bör utredas närmare med tanke på att gängse praxis i Sverige är att packa med vattenöverskott eftersom det är gynnsamt för att nå optimal vattenkvot.

4 Slutsatser

Utifrån litteraturgenomgången kan man dra slutsatsen att det ur ett vägnedbrytningsperspektiv är bättre, för samma bruttovikt, fördela lasten på fler axlar. För belastningen i beläggningsen är det i allmänhet bättre än att ha lasten fördelad på flera axlar. För undergrunden är det inte självklart så. Det finns en rad faktorer som verkar för ökade permanenta deformationer när lasten fördelas på axelgrupper med flera axlar genom olika effekter av samverkan mellan belastningspunkterna längre ner i konstruktionen. Tunna beläggningar ökar genomslaget av ökade permanenta deformationer i underliggande obundna lager och undergrunden.

För att minska de permanenta deformationerna i undergrunden är det önskvärt att maximera avståndet mellan belastningspunkterna, öka lastspridningen och minska vattenkvoten i

undergrundsmaterialet. Lastspridningen kan ökas genom förstärkning av överbyggnad kvalitetsmässigt eller ökad tjockleken på överbyggnaden. Dränering är den andra insatsen som kan genomföras för att minska de permanenta deformationerna.

Laboratoriestudier visar att packning på den torra sidan om optimal vattenkvot bestämd genom Proctorförsök ger mindre permanenta deformationer vid cyklisk belastning. Det bör utredas närmare med tanke på att gängse praxis i Sverige är att packa med vattenöverskott eftersom det är gynnsamt för att nå optimal vattenkvot.

5 Litteraturförteckning

- Ahmad, N. Y., Alwash, A. A., & Faleh Degan, A. (2013). Characterization of permanent deformation of subgrade soils using cyclic loading test. *University of Babylon Journal*.
- Brown, S. F., Lashine, A. F., & Hyde, A. L. (1975). Repeated load triaxial test of a silty clay. *Geotechnique*, 25(1), 95-114.
- Chatti, K., Manik, A., Salama, H., El Mohtar, C., & Lee, H. S. (2009). *Effect of Michigan multi-axle trucks on pavement distress. Volume II Flexible pavements*. Lansing: Michigan State University.
- Chatti, K., Manik, A., Salama, H., Haider, S. W., Brake, N., & El Mohtar, C. (2009). *Effect of Michigan multi-axle trucks on pavement distress. Volume 1 - Literature review and analysis of in-service performance data*. Lansing: Michigan State University.
- Claussen, A. I., Edwards, J. M., Sommer, P., & Uge, P. (1977). Asphalt Pavement Design - The Shell Method. *Proceedings of the 4th International Conference on the structure Design of Asphalt Pavements*, (ss. 39-74).
- Elliot, R. P., Dennis, N., & Qiu, Y. (1998). *Permanent deformation of subgrade soil, Phase II: Repeated load testing of four soils*. Springfield: National Technical Information Service.
- Gräbe, P. J., & Clayton, C. R. (2014). Effects of principal stress rotation on resilient behavior in rail track foundations. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng*, 140, 1-10.
- Hoff, I. (1999). *Material properties of unbound aggregates for structures*. Trondheim: NTNU.
- Horvli, I. (1979). *Dynamisk prövning av leire for dimensionering av vegeer*. Trondheim: NTNU.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd edition uppl.). Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.
- Kim, D., & R, K. J. (2007). Resilient behavior of compacted subgrade soils under the repeated triaxial test. *Construction and Building Materials*, 21, 1470-1479.
- Kim, H. B. (1999). *Framework for incorporating rutting prediction model in the reliabilitybased design of flexible pavements*. East Lansing: Michigan State University.
- Kim, M., & Lee, J. H. (2011). Study on nonlinear pavement responses of low volume roadways subjected to multiple wheel loads. *J. Civil Engineering and Management*, 17:1, 45-54.
- Lekarp, F., & Dawson, A. (1998). Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *Construction and Building Materials*, 12(1), 9-17.
- Lekarp, F., Isacsson, U., & Dawson, A. (2000). State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates. *J. Transportation Engineering*, 126(1), 66-75.
- Lekarp, F., Isacsson, U., & Dawson, A. (2000). State of the art. II: Permanent strain response of unbound aggregates. *J. Transportation Engineering*, 126(1), 76-83.
- Puppala, A. J., Saride, S., & Chomtid, S. (2009). Experimental and modeling studies of permanent strains of subgrade soils. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135, 1379-1389.
- Salama, H., & Chatti, K. (2011). Evaluating flexible pavement rut damage caused by multiple axle and truck configurations. *Int. J. Pavement Engineering*, 12(1), 25-36.
- Salama, H., & Chatti, K. (2011). Evaluating flexible pavement rut damage caused by multiple axle and truck configurations. *In. J. Pavement Engineering*, 12(1), 25-36.

Shook, J. F., Finn, F. N., Witczak, M. W., & Monismith, C. L. (1982). Thickness Design of Asphalt Pavement - The Asphalt Institute Method. *Proceedings of the 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement*, (ss. 17-44).

Ullditz, P. (1987). *Pavement analysis*. Elsevier.



BIG – Branschsamverkan i grunden

Forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av vägar och järnvägar

BIG

BIG – Branschsamverkan i grunden - är ett forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av transportsystemets infrastruktur. Programmet etablerades under senhösten 2013, och påbörjade sin verksamhet den 1 januari, 2014.

Målsättningen är att sänka kostnader för byggande och underhåll av transportsystemets infrastruktur genom ett långsiktigt och systematiskt utvecklingsarbete inom geoteknikområdet.

I BIG samverkar Trafikverket, Chalmers tekniska högskola, Luleå tekniska universitet, Kungliga tekniska högskolan och Statens geotekniska institut.

Publicerade rapporter

- A2014:03 Deformationer i undergrund – Litteratursammanställning och analys
- A2014:07 Grundvattensänkning i morän
- A2014:13 Höghastighetsspår i Sverige – på bank