

# Greining sveigjanlegra vegbygginga

Porbjörg Sævarsdóttir<sup>ab</sup>, Sigurður Erlingsson<sup>ac</sup>

<sup>a</sup>Umhverfis- og byggingarverkfræðideild

<sup>b</sup>Efla verkfræðistofa, Höfðabakka 9, 110 Reykjavík

<sup>c</sup>Swedish Road and Transport Research Institute (VTI), Svíþjóð

## Fyrirspurnir:

Porbjörg Sævarsdóttir  
thorbjorg.saevarsdottir@efla.is

Greinin barst 30. september 2014.  
Samþykkt til birtingar 11. mars 2015.

## ÁGRIP

Aðferðir við burðarþolshönnun vega hafa til langs tíma byggt á reynslu. Þessar aðferðir eru einfaldar en takmarkaðar og niðurstöðurnar oft einhæfar og ógagnsæjar. Viða er verið að þróa nýjar aflfræðilegar hönnunaraðferðir sem spá fyrir um niðurbrotshæðun vega sem fall af tíma. Hegðunin er háð mörgum ólíkum þáttum svo sem álagi, efnisvali, þykkt laga og umhverfisþáttum. Helsti veikleiki aflfræðilegu aðferðanna er takmörkuð þekking á áhrifum ýmissa umhverfisþátta (s.s. hitastigs, raka og frosts/þíðu skipta) á efniseiginleika mismunandi laga vegarins og hver séu tengslin milli niðurbrotshæðun vegarins og umhverfisþátta. Hröðuð álagspróf (APT) þar sem vegbygging var prófuð með þungum bílhermi (HVS) og svörun mæld sem fall af tíma voru notuð til að kanna og greina hvaða áhrif þung umferð og aukinn raki hefðu á vegbygginguna.

**Lýkilord:** Hröðuð álagspróf, svörun vegbygginga, niðurbeygjur vegbygginga, óbundin malarefni, rakaáhrif.

## Abstract

Due to the complex behaviour of pavements most traditional pavement design is done with empirical methods that are based on long-term experience. Due to their simplicity, one of their limitations is that they cannot be extrapolated with confidence beyond the conditions on which they are based. New mechanistic design methods are being developed to predict the behaviour of road structures. The behaviour depends on many factors such as the applied loads, the materials used, the thickness of the layers and the environmental conditions. One of the main limitations is the influence environmental conditions (such as temperature, moisture and frost/thaw variations) have on the materials and deterioration of road structures. Here accelerated pavement tests (APT), where instrumented pavement structures are tested using a heavy vehicle simulator (HVS), are used to examine the influence increased moisture content has on road structures and the accuracy of repeated tests is estimated.

**Key words:** Accelerated pavement testing, pavement response, pavement deformation, unbound granular materials, water impact.

## Inngangur

Íslenska vegakerfið er um 12.900 km árið 2014, byggt upp fyrir um 326.000 fasta íbúa. Hver kílómetri af nýjum vegi með bundnu slitlagi kostar að minnsta kosti 25 milljónir, nýr 20 km vegur kostar því um 500 milljónir eða um 1500 kr á hvern íbúa landsins (Vegagerðin, 2014; Ríkiskassinn, 2014). Þetta eru háar fjárhæðir og þess vegna skiptir hönnun og ending vegbygginga miklu máli.

Í byggingarverkfræði verður brot venjulega þegar álag sem mannvirki verður fyrir er stærra en styrkur þess, þá hrynur mannvirkið eða verulegir brestir koma í það. Umferðarálag sem vegbygging verður fyrir er yfirleitt mun minna heldur en brotstyrkur hennar. Það er því yfirleitt ekki eitt tiltekið álagstilfalli sem brýtur vegbygginguna niður heldur veldur það örsmárri hnignun. Endurtekið umferðarálag veldur því að veginir hrörna smám saman þar til þjónustustig þeirra verður óásættanlegt. Brotmarkaástand vega þarf því að skilgreina með öðrum hætti en fyrir mörg önnur mannvirki.

Vegsnið eru venjulega hönnuð fyrir ákveðinn hönnunartíma, þ.e. tíminn frá byggingu og þangað til þörf er á að ráðast í umfangsmikið viðhald og/eða endurbyggingu. Burðarþolshönnun er framkvæmd til að tryggja að vegsniðið þoli álagið sem það verður fyrir á líftíma sínum, með það að markmiði að ákvarða hagkvæmasta fjölda, gerð (efnissamsetningu) og þykktir einstakra laga vegsniðsins.

Vegakerfið á Íslandi er aðallega byggt upp af sveigjanlegum vegbyggingum og því er aðaláherslan á þær hér, en hegðun þeirra er töluvert frábrugðin stífum vegbyggingum sem hafa sementsbundið slitlag sem situr á þunnu jöfnunarlagi. Sveigjanlegar vegbyggingar eru hins vegar byggðar upp af slitlagi (malbiki, slitlagsklæðingu eða malar-slitlagi), burðarlagi og styrktarlagi, oft óbundin mól eða púkk, sem situr á vegbotni eða fyllingu. Sveigjanlegar vegbyggingar verða fyrir staðbundinni niðurbeygju sem jafnar sig aftur að mestu (rebound) í hvert skipti sem umferðarálag er lagt á og tekið af veginum.

Niðurbrot sveigjanlegra vega er flókið ferli sem er háð mörgum þáttum svo sem öxul- og hjólaálagi, dekkjaþrýstingi, efnisvali, gerð undirlags, þykkt laga, umhverfisskilyrðum, gæðum útlagningar. Tegundir niðurbrots eru einnig margvíslegar svo sem hjólfaramyndun, þreytusprungur og blæðingar. Ef til vill vegna þessa hefur burðarþols-

hönnun vega lengi að mestu byggt á reynsluáðferðum. Helsti kostur slíkra aðferða er einfaldleikinn, en hönnunin verður takmörkuð, niðurstöðurnar einhæfar og erfitt er að uppfæra aðferðirnar á nýjar og/eða óvenjulegar aðstæður þar sem hönnunarferlið er ógegnsett og byggt á staðbundinni reynslu.

Síðustu ár hafa aflfræðilegar hönnunaraðferðir við þolhönnun vega verið að ryðja sér til rúms víða um heim, en slíkar aðferðir krefjast mikilla upplýsinga þar sem áhrifaþættir niðurbrotshæðun vegarins eru margvíslegir. Tilgangur aðferðanna er að spá raunhæft fyrir um niðurbrot vega sem fall af tíma og fá þannig góða yfirsýn yfir hrömun vegarins yfir líftíma hans sem nýtist til dæmis við gerð viðhaldsáætla.

Í dag er helsti veikleiki aflfræðilegra hönnunaraðferða takmörkuð þekking á áhrifum ýmissa umhverfisþátta, s.s. hitastigs, raka og frosts/þíðuskipta, á efniseiginleika og niðurbrotshæðun vegbygginga. Í sveigjanlegum vegbyggingum sýna óbundin burðar- og styrktarlag vegarins ólínulega (spennu- og rakastigsháða) hegðun undir umferðarlagi. Ef aflfræðilegu aðferðirnar eiga að líkja eftir niðurbrotshæðun á raunhæfan hátt er því nauðsynlegt að bera niðurstöður líkananna saman við niðurstöður úr prófunum sem líkja eftir raunhegðun burðar- og styrktarlaganna, fyllingarinnar sem og vegbotnsins í vegbyggingum í notkun. Hröðuð álagspróf (e. Accelerated Pavement Tests – APT) hafa aukið mjög skilning manna á niðurbrotshæðun vegbygginga og byggt grunn fyrir nýjar skilvirkari hönnunaraðferðir.

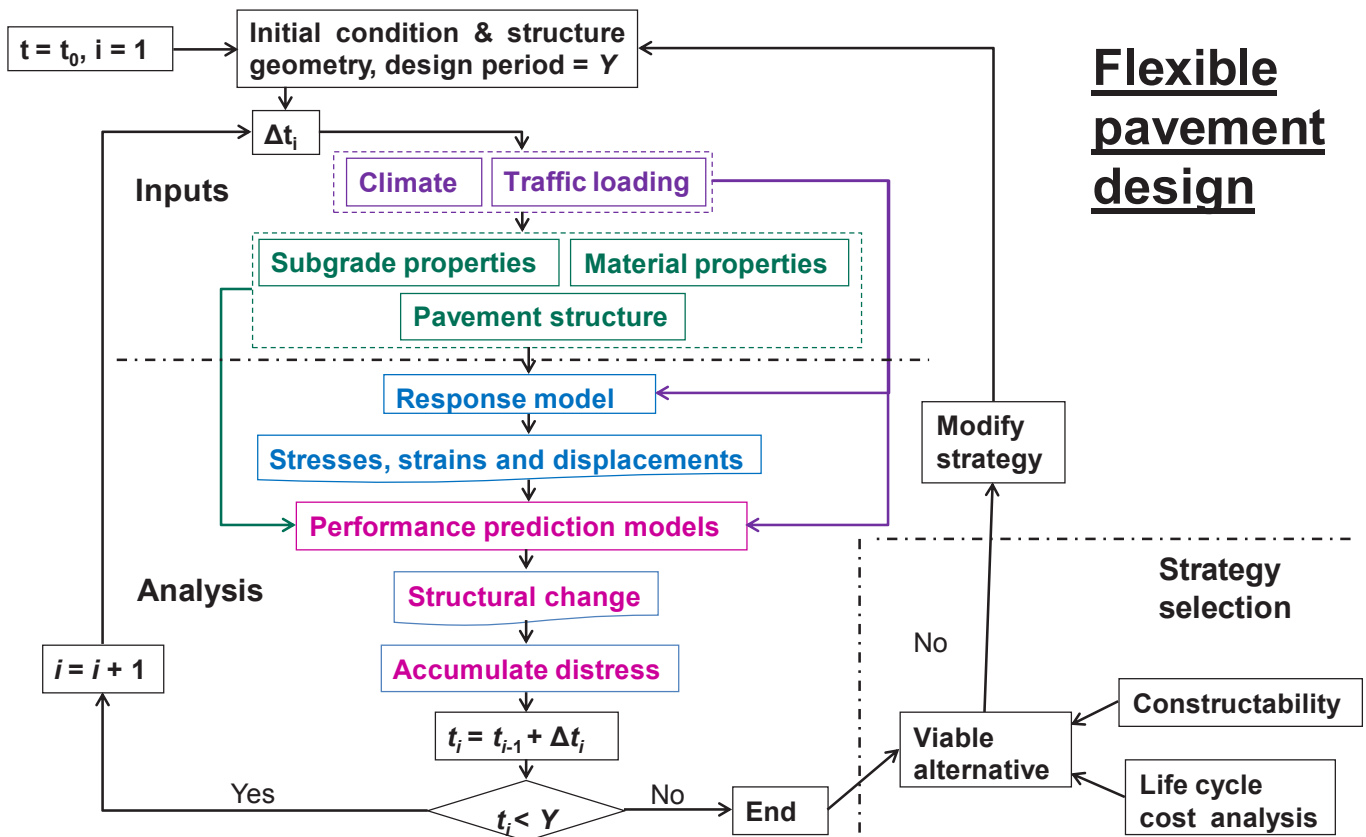
Hérlandis þarf hönnunaraðferðin að taka mið af þunnum vegsniðum í köldu loftslagi. Algengasta brotform íslenskra vega er hjólfaramyndun, og því er mikilvægt að þekkja og geta líkt eftir þróun hjólfaramyndunar við mismunandi aðstæður.

## Hönnunarferlið

Til þess að hægt sé að halda áfram þróun aflfræðilegra hönnunaraðferða þarf að þekkja vel hegðun og eiginleika byggingarefnanna og undirlagsins við mismunandi umhverfisskilyrði. Einnig þarf að þekkja og taka raunhæft tillit til svörunar óbundinna laga vegarins, burðar- og styrktarlags, undir mismunandi umferðarlagi.

Flæðirit af aflfræðilegum hönnunaraðferðunum (e. *Mechanistic Empirical Performance Models*), sem nú eru í þróun og notkun, er sýnt

# Flexible pavement design



Mynd 1 – Flæðirit af hönnunarferli vegbyggingar samkvæmt allfræðilegum aðferðum.

á mynd 1. Líftíma vegbyggingarinnar er skipt upp í stutt tímabil,  $\Delta t$ , þar sem öll lög vegarins eru með ákveðna efniseiginlega háð umhverfis- og umferðarskilyrðum þess tímabils. Þessar inntaksstærðir eru nýttar í svörunarlíkani, sem framkvæmir burðarþolsgreiningu á vegbyggingunni og reiknar spennu, streitu og niðurbeygju, sem byggingin og einstök lög vegarins verða fyrir vegna gefins álags við tiltekin skilyrði. Niðurstöður burðarþolsgreiningarinnar eru notaðar sem inntaksstærðir inn í frammistöðuspálíkan sem áætla hversu mikil áhrif viðkomandi tímaskref komi til með að hafa á hrörnun vegarins. Hrörnun vegarins fyrir hvert tímaskref er safnað saman þar til hönnunarlíftíma vegarins er náð (Ahmed og Erlingsson, 2013; Erlingsson, 2007).

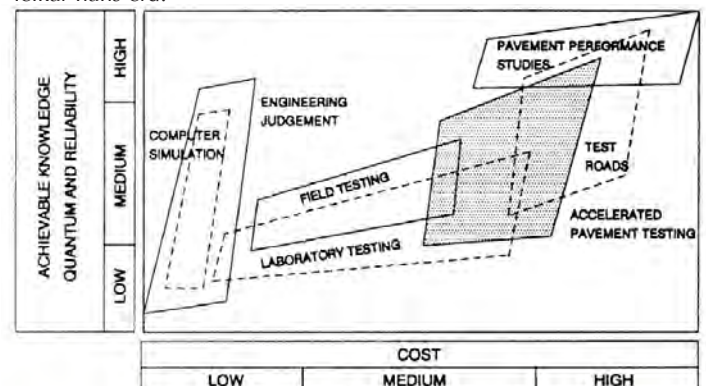
Aðferðin gefur hönnuðum möguleika á að spá fyrir um niðurbrot/hrörnun einstakra laga vegbyggingarinnar sem og vegbyggingarinnar allrar sem fall af tíma. Þannig gefur hún hönnuðum möguleika á að velja og bera saman mismunandi gerðir vegsniða með því að skoða frammistöðu þeirra sem fall af tíma. Hönnuður getur þá valið að nota betri og dýrari efni með lágmarkslagþykktum eða veikara og ódýrari efni, sem þó uppfylla þröskuldsgildi um styrk, með auknum lagþykktum að teknu tilliti til staðsetningar þeirra í uppbyggingunni. Með aðferðinni er einnig hægt að spá fyrir um hvernig vegir aflagast og hrörna og þannig auðveldað gerð langtímaáætlana um viðhald og endurbýggingu. Einnig má meta ávinning og kostnað varðandi notkun nagladekkja, tegund dekkja (t.d. breið dekk eða tvöfalt hjólasett), dekkjaþrýsting, hámarksöxulþunga og tegund vegagerðarefnis. Aðferðin nýtist einnig til að meta áhrif breytts veðurfars á líftíma og endingu vega. Þannig er hægt að hámarka arðsemi vegbygginga og skoða heildarkostnað veghaldara við gerð, viðhald og rekstur vega, þ.e. framkvæma vistferilsgreiningu (e. *Life Cycle Assessment*).

## Hraðaðar álagsprófanir (APT)

Eins og fram kom hér að framan er nauðsynlegt að bera saman niðurstöður líkana við niðurstöður mælinga á spennum, streitu og niðurbeygjum í vegbyggingum í fullri stærð. Í hröðuðu álagsprófi er hægt að líkja eftir álagi sem vegbygging verður fyrir á líftíma sínum á styttrum

tíma. Í stað þess að brjóta niður vegbyggingu með raunálagi, sem getur tekið um 20 ár, er álagið (þungaumferð) lagt á með aukinni tíðni og því hægt að fá niðurstöður á um tveimur til þremur mánuðum. Hjólaálaginu er stýrt, fjöldi yfirferða er skráður og hjólinu er beint yfir nema sem mæla svörun vegbyggingarinnar (s.s. spennur og streitur) og umhverfisskilyrði eru ákveðin. Ástand vegbyggingarinnar er síðan metið með ákveðnu millibili ásamt því að svörunarmælingar eru gerðar. Prófið gefur því nákvæm svörunar- og ástandsögn yfir allan niðurbrotstímann sem nota má til að sannreyna hin allfræðilegu hönnunarlíkon. Hröðuð álagspróf hafa aukið mjög þekkingu á niðurbrotstími vegbygginga en þau eru kostnaðarsöm, sjá mynd 2 (Nokes et al., 2012; du Plessis et al., 2008; NCHRP, 2012; Metcalf, 1996; Kumara, 2005; Korkiala-Tanttu, 2008). Yfirleitt eru hröðuð álagspróf bætt upp með öðrum prófunum eins og til dæmis falllódsmælingum og þríasprófum.

Í eftirfarandi hröðuðu álagsprófi, sem fjallað er um hér, var þungur bílhermir (e. *Heavy Vehicle Simulator; HVS-Nordic*) notaður (mynd 3). Hann er staðsettur hjá VTI (sænska vegagerðarstofnunin) í Svíþjóð og framleiddur í Suður Afríku. HVS-Nordic er hreyfanlegur, 23 m langur, 3,5 m breiður, 4,2 m hár og vegur um 46 tonn. Aðrir tæknilegir eiginleikar hans eru:



Mynd 2 – Samband mismunandi verkfræði aðferða sem saman og hver fyrir sig stuðla að þekkingu (NCHRP, 2004).



Mynd 3 – Pungi bílhermirinn HVS Nordic staðsettur í VTI Svíþjóð.

Hægt er að nota bæði einfalt og tvöfalt hjólasett.

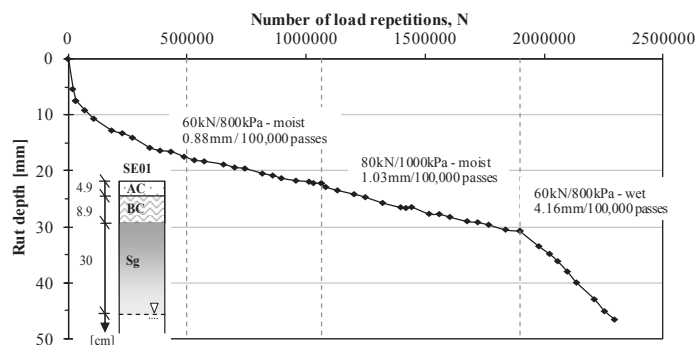
- Álag getur verið í eina eða tvær akstursstefnur.
- Hægt að keyra allt að 25.000 yfirferðir á sólarhring.
- Álagshjólið getur hliðrast um allt að 0,75 m.
- Hjólaálag er mögulegt á bilinu 30-110 kN.
- Keyrsluhraði álagshjólans getur verið allt að 12 km/klst.

Auk þess hefur hann hitastili til að halda stöðugu lofthitastigi sem og hitastigi í vegbyggingunni. Þær prófanir sem hér eru notaðar eru framkvæmdar innandyrja hjá VTI, þ.a. tryggja megi stýrðar umhverfis-aðstæður, en vegsníðin eru byggð með hefðbundnum tækjabúnaði til vegagerðar á gryfju sem er 3 m djúp, 5 m breið og 15 m löng en prófaða vegbyggingin er 6 m löng (Wiman 2006, 2010; Saevarsdóttir o.fl. 2014).

## Áhrif raka á burð vegna

Hönnun og bygging vegna er venjulega gerð með það að leiðarljósi að halda veginum vel afvötnuðum og þurrum, en því miður finnur vatnið oft einhverja leið inni bygginguna sem yfirleitt veldur skertri burðargetu einstakra laga hennar sem og mannvirkisins í heild sinni. Aukið rakainnihald dregur úr stífni (e. resilient modulus) óbundnu malarefnanna, núningskrafti milli efnisagna og mótstöðu gegn hjólaferamyndun, þ.e. varanlegri niðurbeygju (Lekarp et al., 2000a; ARA, 2004; Lekarp et al., 2000b; Theyse, 2002; Li & Baus, 2005; Ekblad, 2007; Charlier et al., 2009; Rahman & Erlingsson, 2012; Salour & Erlingsson, 2013).

Í prófi kallað SE01 hjá VTI (Wiman, 2001), voru umtalsverð áhrif raka staðfest eins og sjá má á mynd 4. Vegbyggingin í prófi SE01 var byggð upp af 49 mm malbikslagi (AC pen 70/100;  $d_{max} = 16$  mm) og 89 mm þykku óbundnu burðarlagi, náttúrulegur jökulruðningur blandaður með grús, sem situr á sendnum vegbotni (mynd 4). Í HVS prófinu var notað tvöfalt hjólaálag:



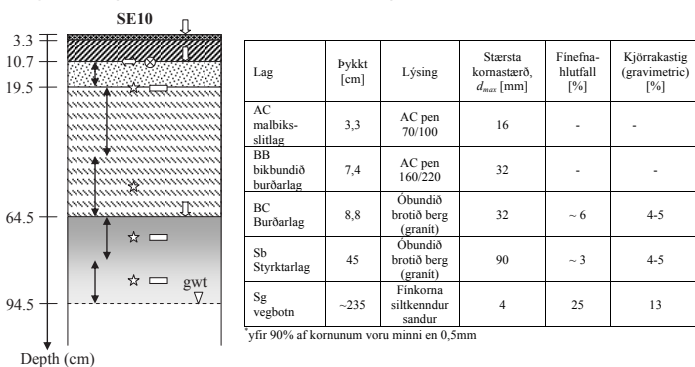
Mynd 4 – Stækkun hjólfars í prófi SE01 (AC – malbik, BC – burðarlag, Sg – vegbotn).

- Fyrstu milljón yfirferðir hjólaálags – 60 kN hjólaálag og 800 kPa dekkjaþrýstingur. Eftir fyrstu 500.000 yfirferðirnar náði aukning hjólaferadýptar jafnvægi við 0,88 mm á hverjar 100.000 yfirferðir.
- Næstu milljón yfirferðirnar var álagið aukið í 80 kN hjólaálag og dekkjaþrýstingurinn aukinn í 1000 kPa. Aukning hjólaferadýptar jókst í 1,03 mm á hverjar 100.000 yfirferðir.
- Það sem eftir var af prófinu var hjólaálagið og dekkjaþrýstingurinn

lækkaður aftur í 60 kN og 800 kPa, en grunnvatnsstaðan hækkuð úr því að vera á miklu dýpi í 30 cm fyrir neðan efri brún undirlagsins. Aukinn raki olli því að aukning hjólaferadýptar jókst í 4,16 mm á hverjar 100.000 yfirferðir.

## Vegbyggingin, prófunarferlið og mælinemarnir

Dæmigerða sveigjanlega vegbyggingu (nefnd SE10) má sjá á mynd 5. Hún er gerð með þunnu malbiksslitlagi, bikbundnu burðarlagi, burðarlagi og styrktarlagi sem hvílir á siltkenndum sandi. Mælinemar sem eru byggðir inn í vegbygginguna eru streitunemar (e.  $\epsilon MU$  coils – strain measuring units), sem mæla lóðréttu streitu í óbundnu lögum vegarins, spennunemar (e. SPC – soil pressure cells), sem mæla lóð-



Mynd 5 – Pverskurðarmynd af vegbyggingunni SE10, ásamt innsettum nemum. Vegbyggingin samanstóð af malbikslagi, bikbundnu burðarlagi, óbundnu burðar- og styrktarlagi og vegbotni.

réttu spennu í óbundnu lögum vegarins, færslunemar (e.  $LVDT$ 's – linear variable differential transducers), til að mæla lóðréttu niðurbeygju, malbiksstreitu nemar (e.  $ASG$  - asphalt strain gauges), sem mæla lárétta streitu í neðri brún bikbundnu laganna og rakastignemar (e. moisture content sensors), sem mæla rúmmálsrakastig (e. volumetric water content). Einnig var notaður leysinemi (e. laser) á réttsekið til að mæla yfirborðsnið vegarins og meta þannig uppsöfnun hjólfars. Uppsetning og nákvæmni mælinga er lýst nánar í Saevarsdóttir o.fl. (2014).

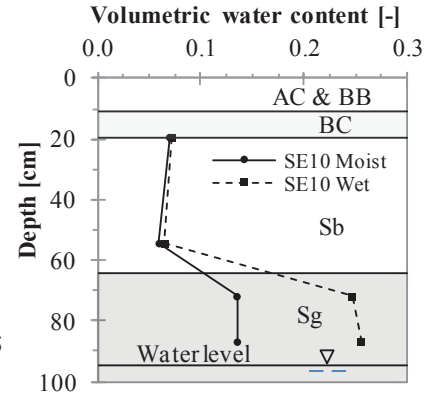
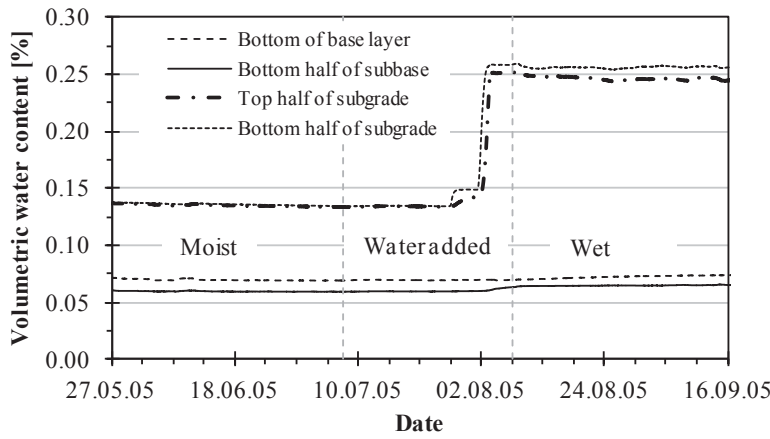
Í hraðaða álagsprófinu (HVS) var ferlinu skipt í þrjú áfangar með ásettu álagi í báðar akstursstefnur (Wiman, 2010). Áfangarnir voru:

Forálagssfas (e. pre-loading phase), með 20.000 yfirferðir hjólaálags og léttu álagi (30 kN einfalt álagshjól (60 kN öxulálag) og 700 kPa dekkjaþrýsting). Jöfn dreifing álags í lárétta stefnu var viðhöfð til að tryggja jafna þjöppun.

Svörunarfas (e. response phase), þar sem svörunin var áætluð frá einföldu og tvöföldu hjólasetti við mismunandi álag og dekkjaþrýsting.

Hraðaður álagssfas (e. main accelerating loading phase), þar sem meira en milljón yfirferðir hjólaálags voru keyrðar á vegbyggingunni. Í öllum tilfellum var notað tvöfalt hjólasett, með 34 cm milli miðju dekkjanna. Dekkin voru af gerðinni 295/80R22.5, álagið var sett fast sem 60 kN tvöfalt hjólaálag (120 kN öxulálag), 800 kPa dekkjaþrýstingur og stöðugt hitastig við 10°C og lárétt hliðrun álagssdekkisins fylgdi normaldreifingu. Í fyrri hluta prófsins var grunnvatnsstaðan á miklu dýpi en eftir tæplega 487 þúsund yfirferðir var vatnsstöðunni breytt þannig að grunnvatnsstaðan var 30 cm fyrir neðan efri brún





Mynd 6 – Breyting á rúmálsrakastigi í SE10 sem fall af tíma og sem fall af dýpi.

vegbotns (mynd 5), en í þeirri stöðu ætti að vera til staðar afrennsliskerfi og því er þetta álitin mögulega staða grunnvatns samkvæmt sænsku vegstöðlunum. Á þennan hátt var hægt að meta áhrif breytts rakainnihalds á einstök lög sem og vegbygginguna í heild þar sem engar aðrar breytingar voru gerðar (Wiman, 2010).

Á mynd 6 má sjá breytingu á rakastigi á skilum burðar- og styrktarlags, í neðri hluta styrktarlagsins og á tveimur stöðum í vegbotninum. Breytingin er mjög lítil í burðar- og styrktarlagi, en greina má hækkun rakastigs í vegbotninum og er hækkunin veruleg þrátt fyrir að nemarnir séu allir fyrir ofan grunnvatnsyfirborðið. Þetta stafar væntanlega af hárpípusogi (e. capillary suction) í óbundnu lögum vegbyggingarinnar.

**Reiknilíkön og greining mældrar svörunar**

Þegar svörun vegbyggingarinnar var reiknuð voru bikbundnu lögin sem og vegbotn meðhöndluð sem efni með línulega svörun en burðar- og styrktarlögin voru meðhöndluð sem spennuháð. Notaðar voru tvær aðferðir til þess að reikna svörun vegbyggingarinnar, greining marglaga kerfa (MLET) og smábútaaðferðin (FE):

Greining marglaga kerfa (e. *Multi Layer Elastic Theory – MLET*) er aðferð sem er mikið notuð við greiningu vegsniða (May & Witczak, 1981; Uzan, 1985; Lekarp et al., 2000a; Huang, 2004). Til að reikna spennuháða stífniustuðulinn,  $E_p$ , er notað staðlað form  $k - \theta$  líkingarinnar:

$$E_r = k_1 p_{ref} \left( \frac{3p}{p_{ref}} \right)^{k_2}$$

þar sem  $k_1$  og  $k_2$  eru fastar, ákvarðaðir með efnisprófunum;  $p$  er meðalnormalspenna (e. *mean normal stress*), ( $\sigma_1, \sigma_2$  og  $\sigma_3$  eru höfuðspennur (e. *principal stresses*) og  $p_{ref}$  er viðmiðunarspenna ( $p_{ref} = 100 \text{ kPa}$ ).

Smábútaaðferð (e. *Finite Element – FE*) hefur ekki verið mikið notuð hingað til við staðlaða veghönnun þrátt fyrir marga kosti aðferðarinnar. Grunnkennistærðir til að reikna stífni,  $E$ , óbundnu spennuháðu burðar- og styrktarlaganna, sem notaðar eru hér eru (e. *hardening soil model*) (Brinkgreve, 2007; Schanz et al., 1999):

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \phi - \sigma'_3 \cdot \sin \phi}{c \cdot \cos \phi + p_{ref} \cdot \sin \phi} \right)^m \text{ Þríasagild} \quad (2)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \phi - \sigma'_1 \cdot \sin \phi}{c \cdot \cos \phi + p_{ref} \cdot \sin \phi} \right)^m \text{ Oedometergildi} \quad (3)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \phi - \sigma'_3 \cdot \sin \phi}{c \cdot \cos \phi + p_{ref} \cdot \sin \phi} \right)^m \text{ Endurhleðslu(álags)gildi} \quad (4)$$

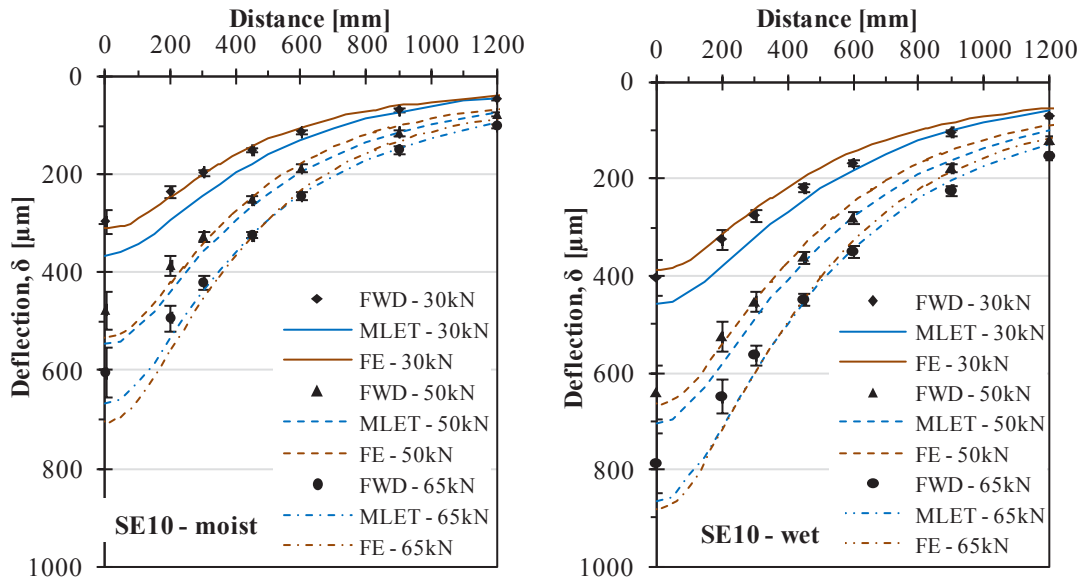
þar sem  $m$  er veldi sem segir til um hversu háð spennustigi stífnin er;  $E_{50}^{ref}$  er sniðilsstífni (e. *secant stiffness*), fundinn í stöðluðu þríasaprófi (e. *standard drained triaxial test*);  $E_{oed}^{ref}$  er snertilsstífni fyrir upphafs oedometer álag;  $E_{ur}^{ref}$  er endurhleðslu(álags)stífni (e. *unloading / reloading*) ( $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$ );  $c$  er samloðun (e. *cohesion*) og  $\phi$  er núningshorn (e. *friction angle*).

Niðurstöður frá þrýstiotg prófum (e. *indirect tension tests, ITT*) bikbundnu laganna, sveiflufraðilegum þríasaprófum (e. *repeated load triaxial test, RLT*) óbundnu efnanna, plötuprófum (e. *plate load test, PL*) og falllööðsmælingum (e. *falling weight deflectometer test, FWD*) voru hafðar til hliðsjónar þegar verið var að ákvarða efnistuðla (efniseiginleika) til að reikna svörun vegbyggingunnar (Wiman, 2010; Saevarsdóttir & Erlingsson, 2013). Efnistuðlarnir sem notaðir voru eru skráðir í töflu 1.

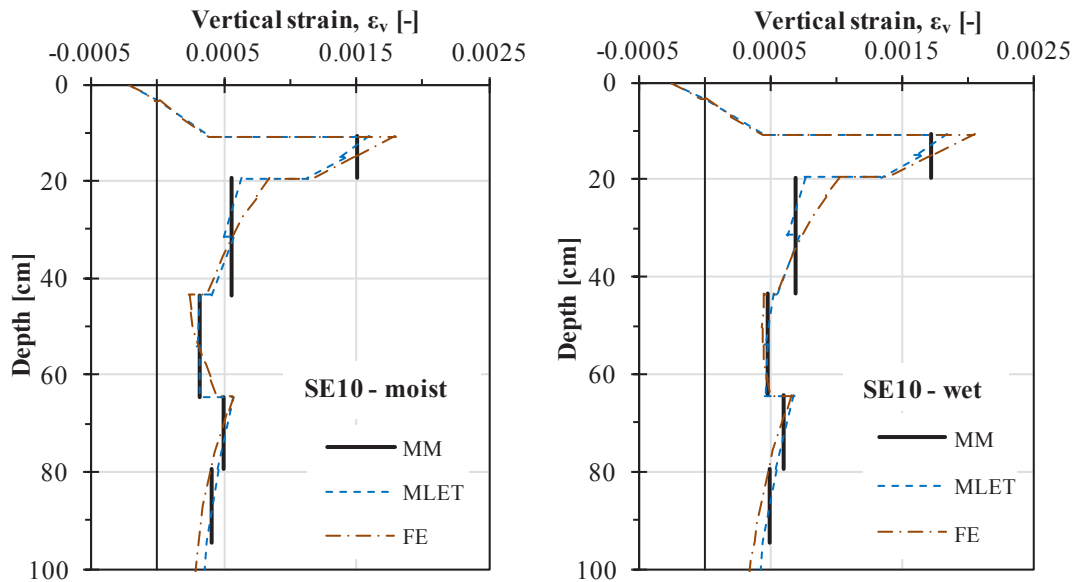
Á mynd 7 má sjá niðurstöður falllööðsmælinga sem gerðar voru við 30, 50 og 65 kN höggálag á stálplötu með 30 cm þvermál. Ásættaleg samsvörun var fundin milli mældra og reiknaðra gilda en aðlaga þurfti efnistuðlana á milli prófunaraðferðanna. Þetta er vegna þess að höggálagið í falllöðsaðferðinni (FWD) er mun hraðara heldur en álagshjólið keyrir í HVS prófunaraðferðinni (12 km/klst). Þessi aukni hraði veldur því að hærri stífni mælist í bikbundnu lögum vegbyggingarinnar sem og vegbotninum. Bikbundnu lögin eru seig (e. *viscous*) og þess vegna eykst stífnin þegar álagshraðinn eykst. Í vegbotninum er það raki sem er lokaður inn í smáholum og á milli efnisagnanna sem veldur aukningunni, þ.e. þegar álagshraðinn verður meiri en rennslishraði rakans, kemst rakinn ekki út og þá eykst vatnsþrýstingurinn í efninu og stífnin um leið. Stífni bikbundnu laganna var aukin frá 3.500 MPa (HVS) í 6.000 MPa (FWD) og stífni undirlagsins var aukin úr 50 MPa (HVS) í 80 MPa (FWD) þegar verið var að prófa í röku ástandi og úr 45 MPa (HVS) í 60 MPa (FWD) í votu ástandi.

Á mynd 8 má sjá lóðréttu streituna sem fall af dýpi þegar vegbyggingin var í röku ástandi (vinstra megin) og síðan í votu ástandi (hægra megin) eftir að grunnvatnsstaðan hafði verið hækkuð. Lóðréttu línurnar sýna mældla meðalstreitu á meðan brotnu línurnar sýna reiknaða streitu sem fengin var með MLET aðferðinni og forritinu ERAPAVE (Erlingsson & Ahmed, 2013) og með FE aðferðinni og forritinu PLAXIS (Brinkgreve, 2007). Ágæt samsvörun fékkst milli reiknaðra og mældra gilda en á myndinni má greinilega sjá hvernig lóðréttu streitan eykst í öllum lögum vegbyggingarinnar eftir að vatnsstaðan var hækkuð og raki hennar jókst (hægra megin).

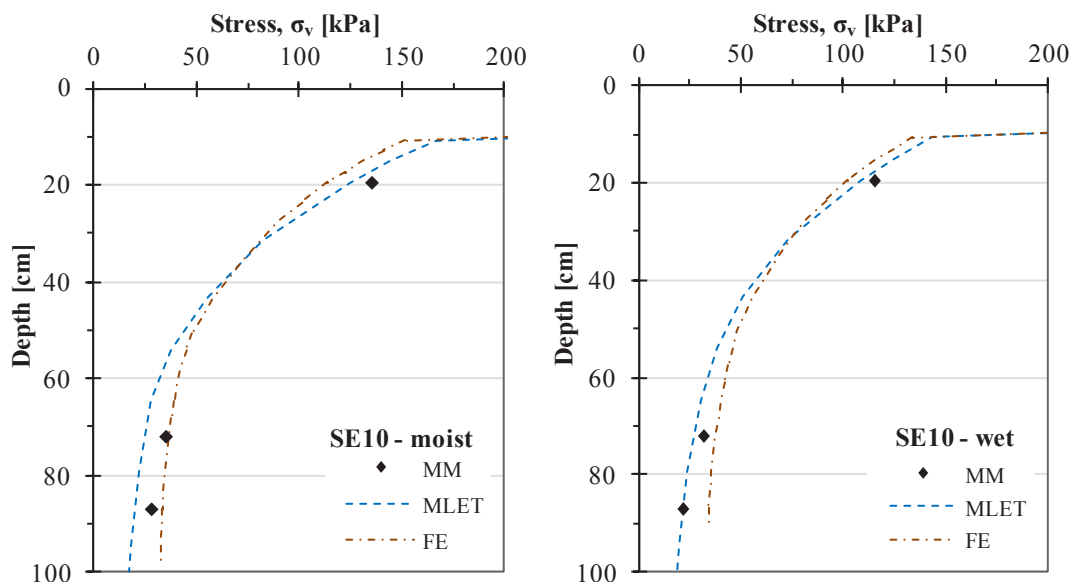
Á mynd 9 má sjá lóðréttu spennu sem fall af dýpi þegar vegbyggingin var í röku ástandi (vinstra megin) og síðan í votu ástandi (hægra megin). Punktarnir eru mæld spenna á tilteknu dýpi á meðan reiknaða spennan er sýnd með brotalínunum. Reikningarnir og mælingarnar pössuðu ágætlega saman en sjá má minnkaða spennu við aukið raka-innihald.



Mynd 7 – Falllöðsmælingar (e. Falling weight deflectometer – FWD) bornar saman við reiknaða (MLET, FE) niðurbeygju við 30, 50 og 65kN falllöðspunga. Vinsta megin er vegbyggingin í röku ástandi en hægri megin í votu ástandi.



Mynd 8 – Mæld (MM) og reiknuð (MLET, FE) lóðrétt streita sem fall af dýpi, í röku ástandi vinstra megin og votu ástandi hægri megin, við 60kN tvöfalt hjólaálag og 800kPa dekkjaþrýsting.



Mynd 9 – Mæld (MM) og reiknuð (MLET, FE) lóðrétt spennu sem fall af dýpi, í röku ástandi vinstra megin og votu ástandi hægri megin, við 60 kN tvöfalt hjólaálag og 800 kPa dekkjaþrýsting.

Þrátt fyrir að rakastig í burðar- og styrktarlagi hafi einungis aukist lítillega má sjá mikil áhrif aukins raka á spennur og streitur allra laga í vegbyggingunni. Hin hækkaða streita og lækkaða spenna bendir til þess að stífni vegbyggingarinnar minnki með auknu rakainnihaldi.

Þrátt fyrir ólíkar reikniaðferðir í MLET og FE var munur á niðurstöðum ekki mjög áþreifanlegur, eins og sjá má á myndum 8 og 9. Farið er nákvæmar í mismun aðferðanna í Saevarsdóttir og Erlingsson (2014).

**Niðurbeygjur og hjólfaramyndun**

Þegar reiknaðar voru niðurbeygjur og hjólfaramyndun voru tvö reiknilikön notuð, annað er spennuháð líkan þróað af Korkiala-Tanttu (KT, 2008 & 2009) og hitt er streituháð líkan sem notað er í MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide) í Bandaríkjunum (ARA, 2004). Líkönin eru:

$$\hat{\epsilon}_p N = C \cdot N \frac{R}{A - R} \quad \text{KT líkani} \quad (5)$$

$$\hat{\epsilon}_p(N) = \beta_1 \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) e^{-\left( \frac{\rho}{N} \right)^b} \epsilon_v \quad \text{MEPDG líkanið} \quad (6)$$

þar sem  $\hat{\epsilon}_p$  er varanleg streita (e. *permanent strain*),  $N$  er fjöldi yfirferða hjólaálags,  $b$  er stuðull fengin með prófunum,  $C$  er efnisstuðull,  $R = \frac{q}{q_f}$  er brothlutfall (e. *failure ratio*), (þar sem  $q$  er

fráviksspenna (e. *deviatoric stress*) og  $q_f$  fráviksspenna við brot (e. *deviatoric stress at failure*),  $q_f = q_0 + m \cdot p$ ,  $p$ ,  $p$  er vökvastöðuspenna (e. *hydrostatic stress*) (kPa),

$$m = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} \text{ og } s = q_0 = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \phi}{3 - \sin \phi},$$

$A$  er hámarksgildi brothlutfallsins  $R$ ,  $\epsilon_r$  er fjaður streita (e. *resilient strain*) sem er lögð á próf í tilraunastofu til að fá  $\epsilon_v$ ,  $\rho$  og  $b$  ( $\rho$ ,  $b$  og  $\epsilon_0/\epsilon_r$  eru fengin með því að nota jöfnur sem hafa verið þróaðar af ARA (2004) og eru skráðar þar);  $\epsilon_v$  er meðaltal lóðréttrar fjaður streitu (e. *average vertical resilient strain*) lagsins sem er fengin með svörunarlíkönunum og  $\beta_1$  er kvörðunarstuðull (e. *calibration*).

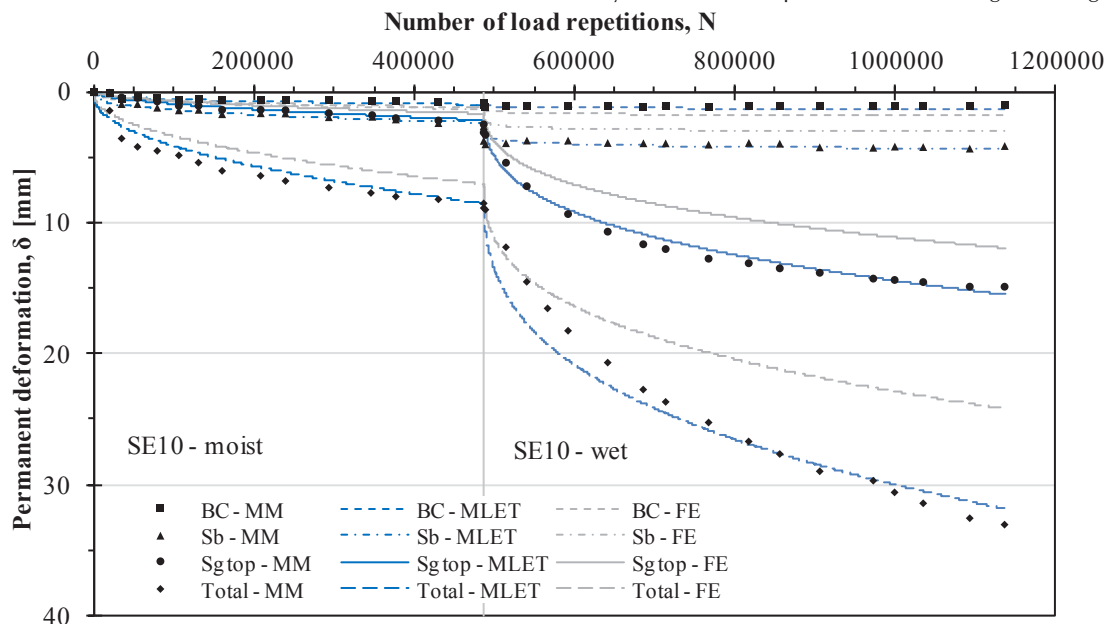
Heildarniðurbeygjan er fengin með því að skipta lögum vegbyggingarinnar í þynnri einingar, reikna niðurbeygju hverrar einingar og leggja þær saman. Varanlegar niðurbeygja hverrar einingar er fengin með því að margfalda varanlegu streituna í miðju einingarinnar með þykkt hennar.

Á mynd 10 má sjá mælda (MM) og reiknaða (MLET, FE) varanlega niðurbeygju einstakra laga vegarins sem og vegbyggingarinnar í heild þegar KT líkanið er notað en á mynd 11 er MEPDG aðferðin notuð. Á myndunum má greinilega sjá að aukið vatn í vegbyggingunni hefur gríðarleg áhrif á varanlega niðurbeygju hennar. Aukningin er mest í undirlaginu þar sem mesta aukningin í rakainnihaldi er mæld en greinilega aukningu má einnig sjá í öðrum lögum vegarins þrátt fyrir litla breytingu á rakainnihaldi. KT líkanið nær að samsvara niðurbeygjufærlinu yfir allt prófunarferlið betur en MEPDG aðferðin, en KT líkanið virðist vera viðkvæmt fyrir litlum breytingum á spennustigi þar sem niðurbeygjan breytist mikið á milli þess hvort notuð er svörun úr FE eða MEPDG aðferðinni, en eins og áður er getið var munur á svörun milli aðferðanna ekki umtalsverður.

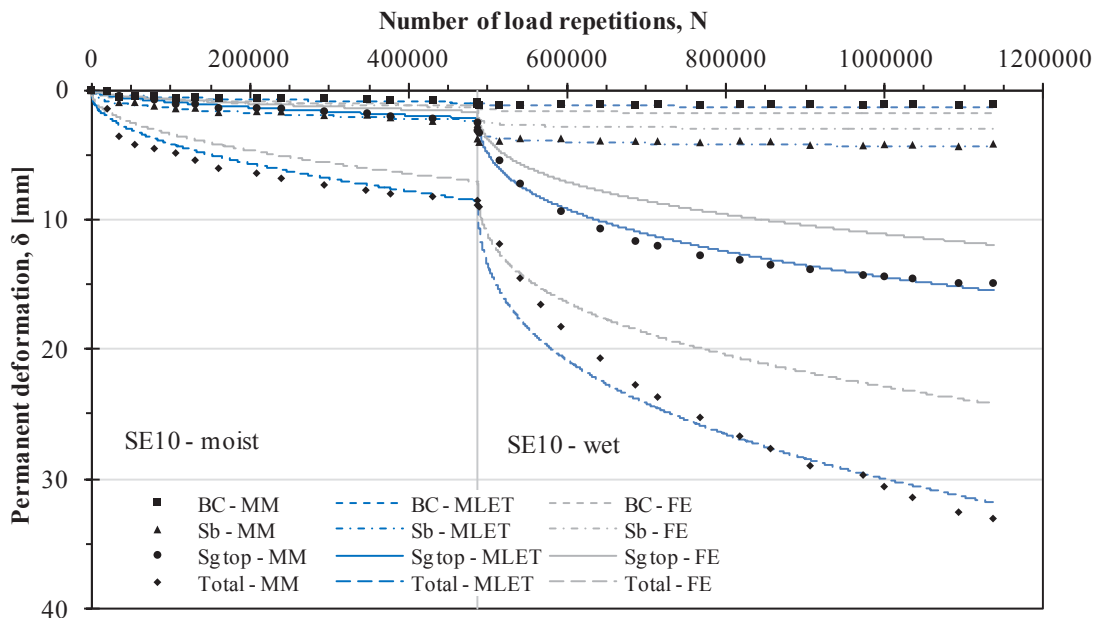
Á mynd 12 má sjá snið hjólfaramyndunarinnar fyrir báðar niðurbeygjaaðferðirnar (KT og MEPDG) þegar notaðar eru svaranir úr bæði MLET og FE aðferðunum. Sæmileg samsvörun var á milli mældra og reiknaðra gilda í bæði röku og votu ástandi. Munurinn var þó sýnu meiri í vota ástandinu. Reikningarnir ná hámarksniðurbeygjunni ágætlega en sniðið er víðara heldur en mælingarnar gefa til kynna og því sýna reikningar of mikla niðurbeygju eftir því sem fjarlægð eykst frá miðju hjólfarsins. Á mynd 12 sést aftur greinilegur munur á milli FE og MLET svaranna þegar verið er að nota KT-líkanið en lögun mældu og reiknuðu ferlanna er svipuð. Þegar verið er að nota MEPDG aðferðina nær hún hámarksniðurbeygjunni í lok raka og vota ástandsins en hún nær ekki réttir myndun hjólfarsins í votu ástandi, þ.e.a.s. aðferðin sýnir of djúpt hjólfar eftir 566.447 yfirferðir hjólaálagsins. Þessi hegðun var einnig sýnileg á mynd 11. Báðar þessar aðferðir, KT og MEPDG, eru enn að hluta til byggðar á reynslu þannig að meiri vinnu þarf að leggja í þróun aðferðanna til að bæta nákvæmni þeirra.

**Lokaorð**

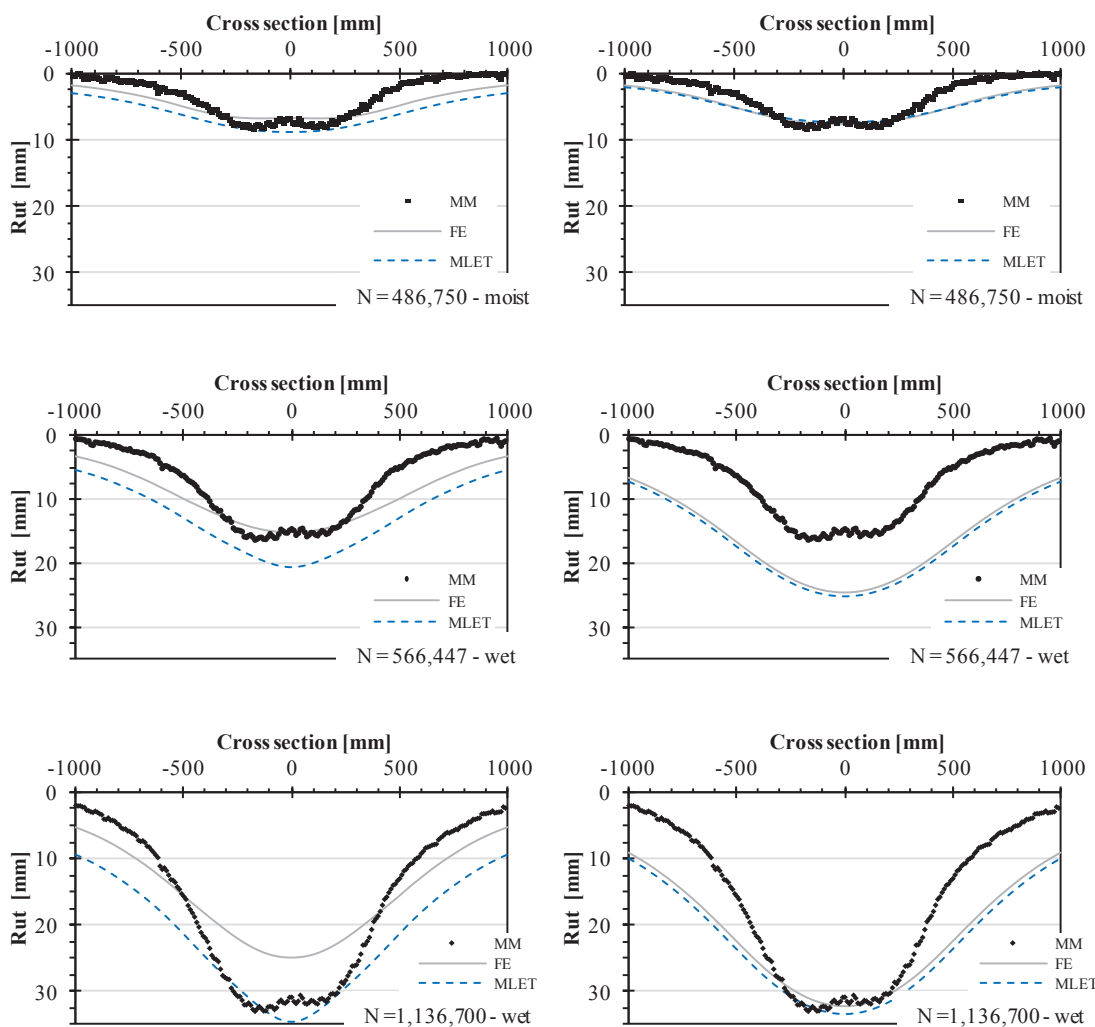
Nýjar aflfræðilegar hönnunaraðferðir eru að ryðja sér til rúms víðs vegar í heiminum og koma trúlega til með að taka við af hefðbundnum reynsluáferðum sem hafa verið notaðar hingað til. Aðferðirnar segja fyrir um niðurbrot vega sem fall af tíma. Til þess að aflfræðilegu aðferðirnar komi að sem mestu gagni þarf að kvarða þær og þekkja niðurbrot einstakra laga vegarins sem og vegbyggingarinnar allrar undir hinum ýmsu umhverfis- og álagsskilyrðum. Hröðuð álagspróf hafa aukið þekkingu og skilning manna til muna á niðurbrotsferli vega með raungögnum, en þó er mikil vinna framundan við að auka þekkingu á áhrifum ýmissa umhverfisþátta svo sem hitastigs, raka og frostsþíðu-



Mynd 10 – Mæld (MM) og reiknuð (MLET, FE) varanleg niðurbeygja með KT líkaninu í burðarlagi (BC), styrktarlagi (Sb), efstu 30cm vegbotnsins (Sg top) sem og niðurbeygja vegbyggingarinnar allrar. Vatnsstöðunni var breytt eftir 486.750 yfirferðar hjólaálags.



Mynd 11 – Mæld (MM) og reiknuð (MLET, FE) varanleg niðurbeygja með MEPDG aðferðinni í burðarlagi (BC), styrktarlagi (Sb), efstu 30cm vegbotnsins (Sg top) sem og niðurbeygja vegbyggingarinnar allrar. Vatnstöðunni var breytt eftir 486.750 yfirferðar hjólaálags.



Mynd 12 – Þversnið af mældri (MM) og reiknaðri (MLET, FE) hjólfaramyndun vegbyggingarinnar eftir 486.750 yfirferðir hjólaálags í röku ástandi og eftir 566.447 og 1.136.700 yfirferðir hjólaálags í votu ástandi. Hægra megin má sjá niðurstöður reikninga þegar KT líkanið var notað en vinstra megin má sjá niðurstöður frá MEPDG aðferðinni.

skipta á efniseiginleika vegarins og tengsl niðurbrots hans við þessa þætti. Allir þessir þættir skipta miklu máli á norðurslóðum og því mikilvægt að þessari vinnu sé framhaldið. Með aukinni þekkingu á eðli vegbygginga undir breytilegu álagi verður vonandi hægt að betrubæta hönnunina og auka hagkvæmni í uppbyggingu og viðhaldi vegakerfisins.

### Þakkir

Þessi vinna er styrkt af Vegagerðinni, Eimskípasjóð Háskóla Íslands, Menningar- og framfarasjóði Ludvigs Storr og Rannsóknamiðstöð Íslands (RANNÍS). Gögn voru fengin frá VTI í Svíþjóð (Swedish National Road and Transport Research Institute), en prófanir voru gerðar í samvinnu við sænsku Vegagerðina (Trafikverket, TRV).

## Heimildir

- Ahmed, A. W. & Erlingsson, S. (2013). Evaluation of permanent deformation models for unbound granular materials using accelerated pavement tests. *Road Materials and Pavement Design*. 14/1, 178-195. doi:10.1080/14680629.2012.755936. (Á ensku).
- ARA Inc. (2004). "Guide for the Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final report, NCHRP 1-37A." Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., USA. (Á ensku).
- Brinkgreve, R.B.J. (2007). PLAXIS 3D foundation, version 2, manual. PLAXIS, Delft, Netherlands. (Á ensku).
- Charlier, R., Hornych, P., Sršen, M., Hermansson, Å., Bjarnason, G., Erlingsson, S. & Pavšić, P. (2009). Water Influence on Bearing Capacity and Pavement Performance: Field Observations. In Dawson (ed.) *Water in Road Structures – Movement, Drainage & Effects*. Springer Science+Business Media. 175-192. (Á ensku).
- Eklblad, J. (2007). Influence of Water on Coarse Granular Road Material Properties. Stockholm, Sweden: Ph.D. thesis, KTH Royal Institute of Technology. (Á ensku).
- Erlingsson, S. (2007). "Mechanistic Pavement Design – A road to better understanding of pavement performance," Proceedings of the International seminar on pavement design systems and pavement performance models, Reykjavik, 22-23 March.
- Erlingsson, S. & Ahmed, A. W. (2013). Fast layered elastic response program for analysis of flexible pavement structures. *Road Materials and Pavement Design*. 14/1, 196-210. doi:10.1080/14680629.2012.757558. (Á ensku).
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. 2<sup>nd</sup> ed. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Pearson Education Inc., Prentice Hall and Education Inc. (Á ensku).
- Korkiala-Tanttu, L. (2008). Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials. Espoo, Finland: VTT Technical Research Centre of Finland. (Á ensku).
- Korkiala-Tanttu, L. (2009) Verification of rutting calculation for unbound road materials, *Transport, Proc. of the Institution of Civil Engineers*, 162/TR2, 107 – 114. (Á ensku).
- Kumara, M. A. W. (2005). Analysis and Verification of Stresses and Strains and Their Relationship to Failure in Concrete Pavements Under Heavy Vehicle Simulator Loading. University of Florida, USA. (Á ensku).
- Lekarp, F., Isacsson, U. & Dawson, A. (2000a). State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE. 126/1, 66-75. (Á ensku).
- Lekarp, F., Isacsson, U. & Dawson, A. (2000b). State of the Art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE. 126/1, 76-83. (Á ensku).
- Li, T. & Baus, R. L. (2005). Nonlinear Parameters for Granular Base Materials from Plate Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 131/7, 907-913. (Á ensku).
- May, R. W. & Witczak, M. W. (1981). Effective granular modulus to model pavement response. *Transportational Research Record* 810. Washington D.C.: National Research Council, 1-9. (Á ensku).
- Metcalf, J.B. (1996). NCHRP Synthesis of Highway Practice 235: Application of Full-Scale Accelerated Pavement Testing. Transportation Research Board (TRB), National Research Council, Washington D.C., USA. (Á ensku).
- NCHRP (2012). NCHRP synthesis 433 – Significant findings from full-scale accelerated pavement testing. Transportation Research Board of the National Academies. Washington, D.C., USA. source: www.trb.org. (Á ensku).
- Nokes, W. A., Mahdavi, M., Burmas, N. I., Holland, T. J., du Plessis, L. & Harvey, J. T. (2012). Developments in evaluating the benefits of implemented accelerated pavement testing results in California. In Harvey, J., Jones, D., Mateos, A. & Al-Qadi, I. (eds.) *Advances in Pavement Design through Full-scale Accelerated Pavement Testing*. Taylor & Francis Group, London. 529-540. (Á ensku)
- du Plessis, L., Coetzee, N. F., Burmas, N., Harvey, J.T. and Monismith, C.L. (2008). The Heavy Vehicle Simulator in Accelerated Pavement Testing – a Historical Overview and New Developments. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Accelerated Pavement Testing (APT), international conference, 1-3 October 2008. Madrid, Spain. (Á ensku)
- Rahman, S. & Erlingsson, S. (2012). Moisture Sensitivity of Unbound Granular Materials. Proceedings of the 4<sup>th</sup> European pavement and asset management conference (EPAM4), 5-7 September 2012. Malmö, Sweden, CD-ROM. (Á ensku).
- Ríkiskassinn (2014). www.rikiskassinn.is. [Sótt 2.september 2014].
- Saevarsdóttir, Th. & Erlingsson, S. (2013). Water impact on the behaviour of flexible pavement structures in an accelerated test. *Road Materials and Pavement Design*. 14/2, 256-277. doi:10.1080/14680629.2013.779308. (Á ensku).
- Saevarsdóttir, Th. & Erlingsson, S. (2014). Modelling of responses and rutting profile of a flexible pavement structure in an HVS test. *Road Materials and Pavement Design*. doi:10.1080/14680629.2014.939698. (Á ensku).
- Saevarsdóttir, Th., Erlingsson, S. & Carlsson, H. (2014). Instrumentation and performance modelling of Heavy Vehicle Simulator tests. Accepted for publication to *International Journal of Pavement Engineering*. (Á ensku).
- Salour, F. & Erlingsson, S. (2013). Investigation of a Pavement Structural Behaviour during Spring Thaw Using Falling Weight Deflectometer. *Road Materials and Pavement Design*. 14/1, 141-158. doi:10.1080/14680629.2012.754600. (Á ensku).
- Schanz, T., Vermeer, P. A. & Bonnier, P. G. (1999). The hardening soil model: Formulation and verification. In Ronald B.J. Brinkgreve (ed.) *Beyond 2000 in Computational Geotechnics- 10 Years of PLAXIS*. A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. (Á ensku).
- Theyse, H. L. (2002). Stiffness, Strength and Performance of Unbound Aggregate Material: Application of South African HVS and Laboratory Results of California Flexible Pavements. Report for the California Pavement Research Program, University of California, Pavement Research Center. (Á ensku).
- Uzan, J. (1985). Characterization of granular materials. *Transportational Research Record* 1022, TRB. Washington, D.C.: National Research Council, 52-59. (Á ensku).
- Vegagerðin (2014). www.vegagerdin.is. [Sótt 2.september 2014].
- Wiman, L. G. (2001). VTI rapport 477A, Accelerated load testing of pavements; HVS-NORDIC tests in Sweden 1999. Linköping, Sweden: Swedish National Road and Transport Research Institute (väg- och transportforskningsinstitut – VTI). (Á ensku).
- Wiman, L. G. (2006). "VTI rapport 544A, Accelerated load testing of pavements, HVS-Nordic tests at VTI Sweden 2003-2004". Swedish National Road and Transport Research Institute (Väg- och transportforskningsinstitut – VTI), Linköping, Svíþjóð. (Á ensku)
- Wiman, L. G. (2010). VTI rapport 628, Accelererad provning av vägonstrukturer; Referensöverbyggnad enligt ATB Väg. Linköping, Sweden: Swedish National Road and Transport Research Institute (Väg- och transportforskningsinstitut – VTI). (Á sænsku)