



SEMENTSFESTUN BURÐARLAGA

Kristján Ingi Arnarsson

Lokaverkefni í byggingartæknifræði BSc

2011

Höfundur: Kristján Ingi Arnarsson

Kennitala: 091088-2669

Leiðbeinandi: Ingvi Árnason

Tækni- og verkfræðideild

School of Science and Engineering

Tækni- og verkfræðideild

Heiti verkefnis:

Sementsfestun burðarlaga

Námsbraut:

Byggingartæknifræði BSc

Tegund verkefnis:

Lokaverkefni í tæknifræði BSc

Önn:

7. önn

Námskeið:

BT LOK 1012

Höfundur:

Kristján Ingí Arnarsson

Umsjónarkennarar:

Fjóla Guðrún Sigtryggssdóttir og
Guðbrandur Steinþórsson

Leiðbeinandi:

Ingvi Árnason

Fyrirtæki/stofnun:

Ágrip:

Sementsfestun burðarlaga er blöndun lítils magns segments og vatns við steinefni til styrkingar. Aðferðin er vel þekkt erlendis en aðeins hafa nokkrar slíkar verið framkvæmdar á Íslandi. Blöndun á staðnum (e. in situ mixing) fellst í fræsingu á burðarlagi sem fyrir er. Í það er blandað sement og vatni og blandan svo þjöppuð. Útkoman er rakafráhrindandi og sterkt burðarlag sem eykur styrk sinn með tímanum. Aðferðafræðin sem notuð hefur verið er 15 ára gömul og þróun verið lítil. Eins er þörf á endurskoðun á efnislegum eiginleikum festuninnar. Upplýsinga verður aflað með erlendri heimildarvinnu, með áherslu á Bandaríkin. Farið verður yfir helstu atriði allt frá forprófunum og hönnun til mælinga og mati á árangri festuninnar. Dregin verða út þau atriði sem betur mætti skoða eða taka megi upp hér á landi.

Dagsetning:

07-12-2011

Lykilorð íslensk:

Sement
Vegagerð
Sementsfestun

Lykilorð ensk:

Cement Stabilization

Dreifing:

opin



lokuð



til:

Formáli

Val á lokaverkefni hafði verið mikill höfuðverkur þangað til allt í einu flaug mér í hug nokkuð sem ég hafði brotið heilann um og hafði áhuga á, steinsteyptir vegir. Þegar þessi gerð slitlags bar á góma í hversdagsumræðum var ég yfirleitt einn um að finnast þetta sniðugt fyrirbæri. Leiðinlegu steinsteyptu kaflarnir voru alltaf ofarlega í huga en ég þreyttist seint á að benda á endingu þeirra góðu. Ég er enn þeirrar skoðunar að tilurð lélegu kaflanna sé slæm grundun og að hægt sé að gera almennilegann steypuveg ef rétt er að því staðið.

Vorið 2011 hafði ég samband við Björn Ólafsson, starfsmann Vegagerðarinnar og stundakennara við HR, sem hafði kennt mér í tveim vegagerðarkúrsum. Björn virðist hafa verið með fingurnar í flest öllu sem viðkemur íslenskri vegagerð og því lá beint við að leita upplýsinga hjá honum. Eftir að hafa ráðfært sig við kollega sína kom hann með uppástungu að verkefninu sem þú, lesandi góður, handleikur nú. Steinsteypit slitlag var ekkert í sérstakri skoðun hjá Vegagerðinni en sementsfestun var nokkuð sem áhugi var á að skoða nánar. Sumarið áður höfðu tilraunakaflar verið lagðir og ætlunin að halda því áfram sumarið á eftir.

Björn vísaði mér á samstarfsmann sinn í Borgarnesi, Ingva Árnason, sem leiðbeinanda. Hann hafði haft umsjón með festuninni 2010 og manna fróðastur um fræðin og aðferðir.

Ég vil þakka öllum þeim sem veittu mér stuðning við gerð þessa verkefnis, hvort sem það var með yfirlestri, þýðingu frasa, tæknilegri aðstoð eða skilning, þegar maður var of upptekinn við ritgerðaskrif til að sinna öðru.

Efnisyfirlit

| | |
|--|----|
| Myndalisti | 5 |
| Töflulisti | 5 |
| 1 Inngangur | 6 |
| 2 Hönnun og aðferðarfræði | 8 |
| 2.1 Sementsfestun innanlands | 8 |
| 2.1.1 Saga sementsfestunar á Íslandi | 8 |
| 2.1.2 Helstu stærðir og hönnun festunar | 9 |
| 2.1.3 Almenn aðferðarfræði | 10 |
| 2.1.4 Vandamál, mögulegar lausnir | 11 |
| 2.2 Sementsfestun erlendis | 12 |
| 2.2.1 Hönnun festunar, helstu atriði | 12 |
| 2.2.2 Almenn aðferðarfræði | 13 |
| 2.2.3 Reynslan í tímans rás | 15 |
| 3 Efnislegir eiginleikar | 16 |
| 3.1 Sýnataka og eftirlit | 16 |
| 3.1.1 Forþrófanir | 16 |
| 3.1.2 Tilraunir og eftirlit á framkvæmdatíma | 19 |
| 3.1.3 Mælingar eftir að framkvæmdum lýkur | 23 |
| 3.2 Burðarþol | 24 |
| 3.2.1 Reynsla af þróun burðarþols með árunum | 24 |
| 3.2.2 Sements- og vatnsmagn | 25 |
| 3.2.3 Rúmpyngd | 25 |
| 3.3 Sprungumyndanir | 25 |
| 3.3.1 Hvernig myndast sprungurnar? | 26 |
| 3.3.2 Forvarnir gegn sprungumyndunum | 27 |
| 3.4 Mælikvarði á góða sementsfestun | 31 |
| 4 Kostir og aðstæður | 32 |
| 4.1 Samanburður froðubiks og sementsfestunar | 32 |
| 4.2 Sementsfestun næstu árin á Íslandi | 33 |
| 5 Samantekt og Niðurstöður | 34 |
| 6 Heimildir | 37 |
| Viðauki A | 38 |

Myndalisti

| | |
|--|----|
| Mynd 1 - Efnið rétt eftir blöndun. Límist saman en er ekki eðja..... | 10 |
| Mynd 2 - Tjald minnkar rykmyndun..... | 14 |
| Mynd 3 - Þjöppun og lokafrágangur..... | 14 |
| Mynd 4 - Marklínur efna sem best þykja til sementsfestunar..... | 17 |
| Mynd 5 - Niðurstöður modified proctor-prófs. Æskilegt rakastig sett sem 8%..... | 17 |
| Mynd 6 - Nálgun með hefðbundinni jarðtækni og steypufræðileg nálgun. | 22 |
| Mynd 8 - Styrking mismunandi sýna með tíma..... | 24 |
| Mynd 7 - Brotþolsmæling gamalla vega..... | 24 |
| Mynd 9 - Þrjár gerðir streitulosandi laga | 27 |
| Mynd 10 -Samanburður styrks og allra sprungna..... | 28 |
| Mynd 11 -Samanburður styrks og þversp..... | 29 |
| Mynd 12 -Munur á rýrnun sýna. | 30 |
| Mynd 14- Munur á mestu rúmþyngd..... | 30 |
| Mynd 13- Munur á langtímastyrk | 30 |
| Mynd 15- Bikfest burðarlag, ending.... | 31 |
| Mynd 16- Sementsfest burðarlag, ending..... | 32 |
| Mynd 17- Bikfest burðarlag, umferðarþol.... | 32 |
| Mynd 18- Sementsfest burðarlag, umferðaþol..... | 33 |
| Mynd 19 - Sprungukort fyrir verklega tilraun í fullri stærð..... | 39 |
| Mynd 20 - Myndir af brotvöltun, úr skýrslu um samanburðartilraun. | 40 |
| Mynd 21 - Súlurit, sýni brotin á mismunandi tímum. Samanburður á 28d styrk. | 41 |
| Mynd 22 - Styrkur sýnis sem brotið er eftir 24 tíma hörnun. | 41 |

Töflulisti

| | |
|---|----|
| Tafla 1 - Tíðni mælinga á þjöppun burðarlags..... | 20 |
| Tafla 2 - samanburður efnisgerðar, sementsmagns, styrks og ástands..... | 28 |
| Tafla 3 - Samanburður stífnimælinga, brotvaltaðir kaflar..... | 38 |
| Tafla 4 - Samanburður á sprungumyndunum sementsfestra kafla. | 38 |

1 Inngangur

Með aukinni umferð, og þá sérstaklega þungaumferð, hefur álag á vegakerfið hér á Íslandi stóraukist. Þetta aukna álag leiðir til aukins niðurbrots á vegum sem ekki voru hannaðir fyrir slíkt álag og hraða því skemmdum á vegum almennt. Meginhluti núverandi vegakefis er byggður upp á síðustu 30 – 40 árum og þeir lagðir bundnu slitlagi. Eitt af því sem hrjáð hefur þessa kynslóð íslenskra vega er of lítill styrkur í efta burðarlagi¹. Veikleikan má rekja til of mikilla fínefnefna í burðarlaginu sem gerir efnið vatnsdrægt. Dæmigerð einkenni skemmda eru aflögur á yfirboði, netasprungur í slitlagi, fínefnasmit gegnum klæðningu. Slitlagið brotnar upp og holur myndast. Slíkt ástand kallar á mikinn viðhaldskostnað og er því nauðsynlegt að styrkja veginn

Að því gefun að neðri lög vegarins séu í lagi gæti viðgerð falist í efnisskiptum, þ.e. lélegu efni mokað upp og önnur, sem standast kröfur, sett í staðinn. Einnig væri hægt að bæta nýju burðarlagi ofan á veginn. Ókostirnir við þessar aðgerðir er mikill flutningur á eftum sem bæði er dýr, mengandi og skapa aukið álag á vegkerfið í kring. Samfara hækjun vegar þarf jafnframt að breikka veginn og bæta efni í fláa svo þeir standist kröfur um réttann halla. Við efnisskipti þarf að flytja gamla efnið á losunarstað og koma því fyrir, það kostar peninga. Þriðja leiðin til viðgerða á efta burðarlegi er að festa veginn, sem er einmitt það sem fjallað verður um hér. Með festun er burður efsta burðarlagsins aukinn og á hann lagt nýtt slitlag. Eftir slíka viðgerð þarf aðeins lámarksviðhald til að halda veginum í viðunandi ástandi.

Festun (e. stabilization) felur í sér blöndun bindiefnis til styrkingar á burðarlaginu sem fyrir er. Þetta hefur tíðkast um margra ára skeið erlendis bæði í nýframkvæmdum sem og í viðgerðum. Til þessa hafa mörg íblöndunarefni verið notuð og má þar helst nefna: kalk, ösku (e. flyash), sement og bik. Í þessu verkefni verður fjallað um festun með íblöndun sements, eða sementsfestun.

Sementsbundin burðarlög eru notuð víða um heim. Ýmist blönduð á staðnum eða í þar til gerðum blöndunarstöðvum. Í slíkum stöðvum er bindiefninu, blandað í burðarlagið og ekið á framkvæmdastaðinn og lagt út. Hér á landi gæti þessi aðferð hentað í nýframkvæmdir.. Hér á landi hafa sementsbundin burðarlög nær eingöngu verið blönduð á staðnum ef frá eru talin nokkur tilvik tilrauna. Ætlum við því að einbeita okkur að blöndun á staðnum (e. in-situ mixing) í þessari yfirferð á sementsefstun (e. full-depth reclamation).

Taka skal fram að ekki er um “steypa” plötu að ræða eins og við þekkjam í byggingum eða steypum slitlögum. Um lítið hlutfall sements er að ræða sem gefur veika blöndu og lágan brotstyrk og því verður lagið að einhverskonar mulningi kallað sements-unnið burðarlag (e. CTB, cement treated base). Malarefnið er bundið saman af sementi, en ólíkt hefðbundinni steypu eru efnisagninar ekki þaktar sementslími (George, 2002).

¹ Efsta lag vega (undir slitlagi), oft um 10-15 cm af malaðri möl eða /bergi.

Eftirfarandi upptalning er áherslalisti frá leiðbeinanda, Ingva Árnasyni. Ritgerðinn er heimildaritgerð um sementsfestun burðarlaga á staðnum.

- A. Heimildarkönnun erlendis á blöndun á staðnum (*In situ mixing*)
 - a. Almennt um aðferðafræði
 - b. Reynsla í tímans rás, ending.
 - c. Aðferðin við mismunandi aðstæður:
 - i. Mjúkt undirlag og frostreyfingar (sprungur, flekamyndun)
 - ii. Fast undirlag (líklega engin vandamál)
- B. Undirættir
 - a. Blöndunarhlutföll eftir efnisgerðum, hvernig eru þau ákvörðuð?
 - b. Hörnunartími blöndunnar? (reiknað út frá daggráðum)
 - i. Hvenær þarf frágangi og þjóppun að vera lokið?
 - c. Hvenær er tímabært að spennulosa (brjóta)?
 - i. Hörnun nægjanleg til að ná fram broti?
 - d. Kröfur um brotsyrk blandaðs efnis.
 - e. Sýnataka úr sementsfestu efni, aðferðir.
 - f. Binding slitlags við sementsbundið burðarlag, vandamál?
 - i. Þarf að líma?

2 Hönnun og aðferðarfræði

Í þessum kafla verður farið yfir helstu þætti hönnunar sementsfestunar og aðferðafræði við útlögn hérlendis annars vegar og erlendis hins vegar.

2.1 Sementsfestun innanlands

Þó sementsfestun burðarlaga hafi verið stunduð lengi og sé algeng erlendis, þá er þessi aðferð rétt að ryðja sér til rúms hérlendis. Aðdragandinn hefur verið langur og einhverjir tilraunakaflar verið lagðir. Bikfestun hefur verið ráðandi hér á landi vegna hagkvæmni en á síðustu árum hefur bik hækka mikið og er nú svo komið að semantsfestun er orðin mun hagkvæmari kostur.

2.1.1 Saga sementsfestunar á Íslandi

Fyrsta sementsfestun sem framkvæmd var á Íslandi var árið 1967. Það var á 400 m kafla Setbergsbrekkunni við Hafnarfjörð. Sementspokum var dreift í vegkantana og var blandað á staðnum. Henry Þór Henrysson sá um eftirlit og segir hann verkið hafi tekist vel og að engir gallar hafi komið í ljós. Hún hafi verið sem ný þegar grafið var í veginn fyrir fáum árum (Njörður Tryggvason, 1996).

Sementsfestun var framkvæd öðru sinni í nýframkvæmd 1993 á 150 m kafla við Hafnir á Suðurnesjum (Þórir Ingason og Karsten Iversen, 1995). Þar var burðarlagssefninu keyrt í gegnum steypustöð og keyrt á verkstað á opnum vörubílum. Það var svo lagt út með malbikunarvél í 15 cm þykku lagi. Íslenskir aðalverktakar og Sementsverksmiðjan stóðu undir kostnaði við framkvæmdina. Hún þótti takast mjög vel og var áætluðu þrystibrotþoli náð samkvæmt borkjörnum sem teknir voru. Framkvæmdin var rannsóknarverkefni á vegum BUSL² sem sá um rannsóknir, prófanir og mælingar.

Það var svo árið 1996 sem framkvæmd var styrking á eldri veg, þar sem hann var fræstur upp og festur með sementi, þ.e. blöndun á staðnum. Tilraunakaflinn var 5,4 km og var hann á þjóvegi 1 í Langadal (Þórir Ingason, 1997). Kaflinn var orðinn 20 ára og hafði hann verið klæddur 15 árum fyrir framkvæmdina. Hann var lítið sem ekkert siginn en það hafði orðið vart við netasprungur. Verkið var samvinnuverkefni Vegagerðarinnar, Sérsteypunar³, Mats sf., Íslenskra Aðalverktaka og Rannsóknastofu byggingariðnaðarins. Samningur var gerður um leigu og innflutning á tækjum, BOMAG fræsara og sementsdreifara frá Lorenz-Reisll. Með tækjunum komu vélamenn sem kenndu á tækin, eins kom þýskur sérfræðingur sem var innan handa fyrstu daga festuninnar. BUSL sá um rannsóknir á efnum, forprófun og mælingar að verki loknu. Nokkrir byrjunarhnökrar komu upp, en ekkert sem ekki var hægt að leysa. Sýnt þótti fram á að verkið væri vel framkvæmanlegt, þó svo að umferð hafi verið á

² Þáverandi samstarf: Vegagerðarinnar, Borgarverkfræðingsins í Reykjavík, Rannsóknastofa byggingar- iðnaðarins, Verkfræðideildar Háum rannsókna- og þróunarverkefni á sviði vega- og gatnagerðar.

³ Félag, þá í eigu Járnblandifélagsins og Sementsverksmiðju Ríkisins.

vegi á verktíma (Valgeir Valgeirsson, 1997). Árangurinn var góður og varð styrkur yfir kröfum og sléttleiki ásættanlegur. Í dag er töluvert um langsprungur á kaflanum og nokkur aflögun á einum stað.

Þessi aðferð var nokkuð dýrari en hin hefðbundna bikfestun. Báðir valkostir voru í boði, sements- og bikfestun, árin á eftir en vegna lægri kostnaðar varð bikfestunin alltaf valin. Árið 2010 var farið að skoða möguleika á sementsfestun aftur. Miklar hækkanir höfðu orðið á olíu og biki og sýndu útreikningar að semetsfestun væri hagkvæmari en bikfestun (Ingvi Árnason, samtal, 29. september 2011).

Sumarið 2010 bauð Vegagerðin út fræsingu og festun á 3 tilraunaköflum á þjóðvegi 1, samtals 4,3 km, tveir í Víðidal og einn í Hörgárdal (Guðmundur I. Waage, 2011). Borgarverk átti hagstæðasta tilboð í verkið og var samið við þá um framkvæmdina og fluttu þeir inn BOMAG sementsdreifara fyrir verkin. Vegna biðar eftir dreifaránnum gat verkið ekki hafist fyrr en um miðjann ágúst og stóð framkvæmdin til mánaðarmóta september/október. Þrátt fyrir það tókst verkið vel og varð ekki mikil truflun vegna veðurs, en ekki er æskilegt að rigning sé mikil við famkvæmd sementsfestunar.

Sumarið 2011 voru einnig boðnir út kaflar á hringveginum, frá Norðurárdal norður í Hörgárdal. Framkvæmdin á því með svipuðu sniði og árið áður. Þá voru alls festir um 7,5 km végar, 7 – 8 m breiðum.

2.1.2 Helstu stærðir og hönnun festunar

Ýmsar tölur eru að baki sementsfestunar og er sumar ákveðnar út frá reynslutöllum en aðrar reiknaðar út í prófunum. Hér ætla ég útlista stærðum úr skýrslu Guðmundar I. Waage (2011), fyrir festunina 2010.

Dýpt festuninnar var 15 cm, sem byggð var á reynslu af bikbundnu burðarlagi á lámarks styrk. Rakastigið er ákveðið, út frá prófunum í tilraunarstofu, þannig að sem mest rúmþyngd fáist. Fyrir þetta tiltekna efni var það 8% raki. Einnig voru gerðar tilraunir með 3 mismunandi hlutföll af sementi, 4,5%, 5,5% og 6,5%. Prófaður var brotstyrkur sýna með þessu hlutföllum úr mismunandi fyllefnum. Niðurstaðan var 5% sem gaf nægan styrk miðað við kröfur, sem er 5 MPa í 7 daga brotpolsstyrk.

Bæði árin 2010 og 2011 voru framkvæmdir hafnar um miðjann ágúst. Á umferðaþungum vegum þarf að reyna að vinna verkið þegar umferðin er sem minnst. Afköst festuninar sjálfrar er um hálfur kílómeter á dag, en geta verið meiri ef vel gengur og ekkert tefur verkið. Þá tvo daga sem líða að brotvöltun þarf að hlúa vel að festuninni og halda henni rakri. Þetta er gert með vatnsbíl og þarf að passa þetta sérstaklega þegar heitt er í veðri og vindur mikill. Eftir brotvöltun má loka festuninni sem fyrst með klæðningu og þarf að fylla í holur sem kunna að hafa myndast vegna umferðar. Eins og sést þarf verktíminn ekki að vera mikill fyrir styrti kafla nema þeim mun meiri undirbúningsvinna hangi við eins og breikkun végar, auka lag til að laga hæðarlegu, ræsagerð o.s.frv.

2.1.3 Almenn aðferðarfræði

Aðferðafræðin sem notast er við á Íslandi í dag er uppfærð útgáfa af þeirri sem notuð var 1996 í Langadal. Ákveðin þekking hlaust af þeirri framkvæmd þar sem sérfræðingur og vélamenn komu og leiðbeindu verktakanum (Valgeir Valgeirsson, 1997).

Helstu verkliðir sjálfarar framkvæmdarinnar eru eftirfarandi (Guðmundur I. Waage, 2011), tæmandi listi og nánari útskyringar eru í kafla 2.2.2 um aðferðafræðina erlendis:

- **Purrfræsun** – Vegurinn er fræstur heldur grynnra en festunin á að ná, um 12cm. Þetta er gert til að tryggja að vatn sé ekki undir sementsfesta laginu. Raki í steinefnunum er mældur til vita hversu miklu vatni þurfi að bæta í.
- **Jöfnun** – Yfirborðið er jafnað og þverhalli fenginn réttur með hefli. Blandað efni er sett í röst og lagt út þurrt til að fá yfirborðið sem réttast og til grjóthreinsunar.
- **Sementsdreifing** – Venjulegu Portland sementi er dreift á veginn í sömu breidd og vinnslubreidd fræsarans.
- **Blöndun** – Fræsari kemur 10 – 15 m eftir dreifaranum og blandar saman sementinu, steinefnunum og bætir við því vatni sem þarf til að fá æskilegan raka í blönduna. Á Mynd 1 má sjá blandað efni.
- **Bleyting** – Fræsarinn dregur á eftir sér vatnsbíl sem sér honum fyrir vatni. Annar vatnsbíll fóðrar þann sem fræsarinn dregur.
- **Þjöppun** – Efninu er þjappað niður og er mikilvægt að næg þjöppun nái til að fá sem mestan styrk í festunina.
- **Brotvöltun** – Um 2 dögum eftir festun er vegurinn valtaður með titurvaltara til að brjóta efnið upp. Þetta er gert til að koma í veg fyrir fleka- og sprungumyndanir.



Mynd 1 - Efnið rétt eftir blöndun. Límist saman en er ekki eðja.

2.1.4 Vandamál, mögulegar lausnir

Nokkur vandamál hafa komið upp við framkvæmd sementsfestana hér á landi. Flest vandamáлanna hafa verið leyst og hefur ekkert þeirra hamlað verkunum af ráði. Nánari úrlausn vandamála í verkinu 2010 má sjá í skýrslu Guðmundar I. Waage (2011).

Dreifarinn, sem keyptur var til landsins, var ekki með neinum aflestri til að sjá hversu mikið væri í honum. Með honum fylgdi hins vegar tafla sem sýndi dreifimagn miðað við ákveðinn snúning driftskafts og hraða dráttavélarinnar. Verktakinn þarf því að hafa dráttavél með stillanlegum snúning á driftskafti og hefur skriðstilli, þar sem hægt er að setja vélina á ákveðinn fastann hraða. Það þurfti að setja rennu aftan á dreifarann svo allt sementið færi á vinnslubreidd fræsarans, en vinnslubreidd dreifarans var meiri.

Erfitt hefur reynst að fylgjast með því hvort réttu magni af sementi sé dreift á veginn. Reynt hefur verið að setja bakka undir dreifarann og meta þannig magnið sem fer á hvern fermetra. Hann hefur þó átt það að dragast með gúmmímottunum, sem varna því að sementið fjúki á leið sinni til jarðar. Reynt var að áætla magnið með því að giska á hversu mikið væri í dreifaránnum eftir hvern kafla og reikna svo út fræðilegt dreifimagn og bera saman við það sem í raun fór úr dreifaránnum. Í verkinu 2010 var mesti munurinn 81% og 124%, en yfirleitt var munurinn $\pm 5\%$ af fyrirskrifluðu sementsmagni. Þessi aðferð býður ekki upp á eftirlit í rauntíma en hægt er að aðlaga hraða vélarinnar að niðurstöðu kaflans á undan.

Mikilvægt er að ekki fari of mikið vatn í blönduna við festun. Þá geta myndast mjúkir blettir sem ekki næst að þjappa nægilega. Blautir kaflar sem skildir voru eftir í kant jöfnuðu sig en hætta var á ójöfnum kringum þá, því er nauðsynlegt að laga þá bletti sem koma í akstursbraut. Með því að hefla blettina upp og blanda við nærliggjandi efni var hægt að laga þá flesta. Stærri bletti má líka fræsa upp aftur og blanda við sementi. Það var gert 1997 þegar of mikið vatn fór á einn kafla, en sú viðgerð tókst vel og komu engin vandamál upp við þá framkvæmd.

Festanirnar 1996, 2010 og 2011 voru allar framkvæmdar meðan umferð var á veginum. Annar veghelmingurinn var tekinn fyrir í einu og var umferð stýrt yfir á hinn helminginn á meðan. Eftir að burðarlagið hafði verið þjappað var umferðinn hleypt á það í nokkra daga áður en klæðning var lögð á kaflann. Ljóst er að sementsfestanir hérlandis verða framkvæmdar á sama hátt, þ.e. með umferð á. Á þessum tíma er hætta á að bílar fái á sig sementshúð, en hættan er mun meiri ef það er rigning og holumyndun mikil. Nokkuð barst af kvörtunum eftir festunina 2010 og þurfti að hreinsa þá bíla sem verst fóru.

2.2 Sementsfestun erlendis

Fyrsta skráða sementsfestunin var framkvæmd árið 1935 í Bandaríkjunum, nánar tiltekið í Johnsonville í South Carolina, og er sá vegur enn í nothæfu ástandi. Bandaríkjumenn hafa alltaf verið framarlega í þróun sementsfestunar. Helstu ástæður þess að sementsfestun hefur orðið fyrir valinu þar er árangur við bætingu eiginleika burðarlaga, framboð á markaði, einfaldleiki framkvæmdarinnar og lítill efniskostnaður (Puppala, Griffin, Hoyos, og Chomtid, 2004). Sementsfestun er til dæmis mikið framkvæmd í Bandaríkjunum, Þýskalandi, Ástralíu, Noregi, Danmörk og Finnlandi.

2.2.1 Hönnun festunar, helstu atriði

Þar sem mikil hefð er fyrir sementsfestun erlendis er hönnunin fastmótað ferli og mikið til að leiðbeiningaritum og reglum. Ferlið hefst með sýnatökum og rannsóknum sem nánar verður fjallað um síðar í kafla 3.1. Niðurstöður þeirra ráða mestu um hvernig efniseiginleikar festuninnar verða. Fljótlega í hönnunarferlinu er ráðlagt að skoða hvort þörf sé á breytingu á legu eða uppbyggingu vegarins og hvort bæta þurfi við vegbúnaði. Sementsfestun er varanleg og lítið hægt að breyta veginum eftir að hún hefur verið framkvæmd. Helstu atriðin sem þarf að hafa í huga eru breidd vegarins, þverhalli hans og veglínan sjálf (Luhr, Adaska, og Halsted, 2008).

Þegar ákveða á þykkt festuninnar þarf að hafa margt í huga. Styrkur þarf að vera nægur til að uppfylla burðarbols- og rakadrægniskröfur, en af sama skapi má hann ekki vera of mikill vegna hættu á sprungumyndun. Hönnunin þarf því að vera jafnvægisstillt (e. balanced design). Fræðilega þolir þunn og sterk festun jafn mikið og þykk veik festun. Sú síðari er þó æskilegri því að þunn og sterk festun er stökk og mikil hætta er á fleka- og sprungumyndunum. Með nútíma fræsurum og vinnuvélum er framkvæmd og auka kostnaður við dýpri festun lítill. Í lang festum tilfellum eru festanir á bilinu 6 til 12 tommu djúpar, 15 – 30 cm. Erfitt er að þjappa burðarlag þykkara en 30 cm og því ekki ráðlegt að dýptin sé meiri en það (Luhr, Adaska, og Halsted, 2008).

Við hönnun á styrk og þykkt festunar í Bandaríkjunum eru helstu áhrifaþættirnir burður undirlagsins, hönnunartími vegarins, umferðaþungi (flokkaður í staðal öxlafjölda), burðarefnið sem notað í festunina og þykkt slitlagsins (PCA, 2001).

Burður undirlagsins þarf að vera þekktur og er hann mikilvæg stærð í hönnun festuninnar. Hægt er að mæla burðinn með Wetergaard – stuðlinum um viðbrögð undirlags. Þ.e. hefðbundið plötupróf sem gefur okkur gildið, k. Ákveða þarf hönnunartíma vegarins, sem almennt er hafður 20 ár. Þegar umferðaþungi er skoðaður þarf að skoða árdagsumferðina, ÁDU. Þetta er gert með hefðbundinni talningu eða með útreikningum frá mælistöðvum í grenndinni. Hönnuður þarf að gefa sér umferðaaukningu á hönnunartímanum, % á ári. Hlutfall þungaflutninga þarf að vera þekkt og áætla þarf öxulbunga þungra bíla með mælingum eða af reynslu. Notuð er aðferð fjölda staðal-öxla, sem byggir á mismunandi þreytstuðli fyrir hvern þyngdarflokk. Heildar þreytstuðull fyrir umferðarálagið

er fundinn og hann, ásamt burði undirlagsins, notaður til að finna þykkt burðarlagsins. Ef slitlagið er þykkara en 5 cm er þykkt festuninnar reiknuð niður. Hefðbundin íslensk klæðning nær þessari þykkt ekki. Þetta á aðeins við þar sem þykkt malbik er lagt yfir burðarlagið. Töflur og gröf sem stuðst er við í þessari hönnunaraðferð má finna í skýrslu PCA (PCA, Thickness Design for Soil-Cement Pavements (EB068.02), 2001).

Eins og sést tekur þessi hönnunaraðferð mesti tillit til þungaumferðar og burðarþoli undirlagsins. Aðferðin miðar við festun með 28d styrk 400 – 900 psi (2,8 – 6,2 MPa). Þetta er aðeins ein leið af mörgum til að ákveða þykkt festunar. Margir þættir, aðrir en þykktin, koma inn í hönnun festuninnar. Má þar helst nefna rakastig, sementshlutfall og rúmþyngd. Nánar er fjallað um þessi atriðið í kafla, 3.2 sem er um burðarþol festuninnar.

2.2.2 Almenn aðferðarfræði

Heimildakönnun hefur leitt í ljós að aðferðafræðin sem notuð hefur verið hér á landi sé heilt á litið sambærileg við þá sem notuð er erlendis. Það eru þó ýmis atriði sem við gætum tekið upp hér til viðbótar því sem áður hefur verið gert. Hér kemur samantekt úr bandarísku leiðbeiningariti sem gefið er út af PCA, Portland Cement Association (Luhr, Adaska, og Halsted, 2008):

Ef hækka á ákveðna kafla vegarins eða hann breikkaður, þarf að gera það fyrst. Sama gildir um allar framkvæmdir og viðgerðir á vegsvæði, hvort sem það sé ræsi, fláar o.s.frv. Athuga skal að ekki má festa ef burðarlagið er frosið eða þegar lofthitinn er minni en 4°C. Eiginleg festun hefst með **þurrfræsun** og þarf hún að ná a.m.k. í niður fyrir slitlag. Slitlag vegarins má ekki vera þykkara en dýpt festuninnar (í lagi fyrir lítil svæði þar sem viðgerðarblettur hefur verið sett á veg). Ef það er tilfellið þarf að fræsa slitlagið upp og keyra hluta af því burt til notkunar síðar. Restinni má þá fræsa ásamt burðarlaginu undir. Þurrfræsun í fulla dýpt festuninnar er aðeins nauðsynleg ef raki burðarlagsins er $\pm 3\%$ frá ákjósanlegu rakastigi eða ef sementinu er dreift á veginn í vökvaformi (e. slurry application of cement). Ef malarblandan verður ekki einsleit eftir eina umferð þarf að fara aðra umferð, það er þó sjaldgæft. Innanbæjar þarf að fjarlæga brunna, niðurföll, krana og annan niðurgraffinn vegbúnað niður fyrir dýpt festuninnar. Plötur eru þá settar yfir til að verja brunnana og eru þeir svo grafnir upp fyrir lokafrágang. Þetta eykur flækjustig framkvæmdarinnar töluvert.

Þegar allt efni er orðið laust er **vegurinn jafnaður** hann settur í hönnunarhæð og -halla. Það gæti þurft að fjarlæga efni til að endaleg hæð verði rétt þegar slitlag hefur verið lagt á festunina, þetta á helst við innanbæjar. Efnið er þjappað lítillega til að auðvelda umferð vinnuvéla um svæðið og til að koma í veg fyrir rásamyndanir eftir vélar. Rásir geta haft áhrif á dreifingu sementsins.

Tvær leiðir eru til að **dreifa sementi** á veginn, í sínu hefðbundna þurra formi og í vökvaformi. Magnið sem dreift er á veginn er mælt í kg/m². Ekki er æskilegt að dreifa sementinu með þrýstilofti af hættu við rykmengun. Mesta rykmyndun verður þegar sementið fellur á jörðina, hægt er að setja sérstakar varnir til að minnka dreifingu sementsryks, sjá Mynd 2. Sementið þarf að dreifast jafnt á veginn til að fá festunina sem einsleitasta. Þegar því er dreift á vökvaformi skila forðast pollamyndun. Frá því að sementinu er blandað í vatn og þangað til því er dreift á veginn meiga mest líða 60 mínútur.



Mynd 2 - Tjald minnkar rykmyndun.

Sem fyrst, eigi síðar en 30 mínútur frá dreifingu, þarf **blöndun** á sementi og malarefni að hafa átt sér stað. Til þess er notaður fræsara og er vatni blandað í eftir þörfum til að ná æskilegu rakastig á blönduna. Kröfur segja að rakinn þurfi að vera $\pm 2\%$ frá æskilegu gildi við byrjun þjóppunar, þetta bil mætti vera mun minna. Eftirlit er haft með þessu, sem og sementsmagni- og dreifingu. Til að bæta eiginleika blöndunnar má setja viðbótarefni á veginn fyrir blöndun, svo lengi sem gert var ráð fyrir því í hönnunarferlinu. Blandan þarf að vera einlita og einsleit í fulla dýpt festuninnar. Blöndun er haldið áfram þar til þessum kröfum hefur verið náð.

Að blöndun lokinni fer fram **þjóppun** á blöndunni. Til þess má nota hefðbundinn/stáltromlu valtara, sem eru lang algengastir hér á landi. Í forþjóppun má nota takkavaltara og í lokaþjóppun dekkjavaltara. Kafli þarf að vera orðinn fullþjappaður innan við 2 klukkustunda frá blöndun. Einstakir kaflar skulu ekki vera látnir óhreyfðir í meira en 30 mínútur. Árangur þjóppuninnar hefur mikil áhrif á styrk festuninnar og því er mikilvægt að jöfn þjóppun náist yfir allann vegflötinn.

Hlaupandi meðaltal fimm mælinga í röð má minnst vera 98% af mestri þurri rúmþyngd og hver einstök mæling ekki undir 96%. Þurr rúmþyngd er fundin með forþrófunum, nánar í kafla 3.1.1. Fjallað verður um framkvæmd mælinga í kafla 3.1.2. Áður en þjóppun líkur hefst næsta skref.



Mynd 3 - Þjóppun og lokafrágangur.

Lokafrágangur fellst í sléttun og yfirborðsins. Með hefli þarf að afmá öll förl sem tæki, þá sérstaklega valtarar, kunna að hafa skilið eftir sig. Þjóppun er haldið áfram þar til ofangreindum rúmþyngdarkröfum hefur verið náð. Með því að bleyta yfirborðið fyrir síðustu umferðina má ná betri árangri í að loka yfirborðinu. Það á að vera slétt og þétt, laust við öll förl, hryggi, lausar efnisagnir og sprungur. Öllum lokafrágang og –völtun á að vera lokið innan við 4 klukkustundum frá blöndun.

Ferlið frá lokafrágangi burðarlagsins til lagningu slitlags kallast **umönnun**. Yfirborðinu þarf að halda röku þangað til slitlag er lagt yfir eða í minnst 7 daga. Ef burðarlagið ofþornar myndast sprungur og styrking þess með tímanum verður ekki eins mikil. Að halda yfirborðinu röku er því mikilvæg fornvörn gegn sprungumyndunum. Það má gera með hefðbundunum vatnsdreifibíl eða „sprinkler“kerfi. Varast skal að hafa vökvun það mikla að hætta sé á útskolun fínefna. Hægt er að hylja yfirborðið með þunnu tjörulagi, eigi síðar en 24 tímum eftir lokafrágang festuninnar. Tjörunni þarf að dreifa á slétt og rakt burðarlagið. Þetta er góð vörn gegn þornun og hlíf ef von er á rigningu sem skolað gæti burt eftum. Ef hleypa á umferð á verndarlagið áður en það nær að harna er hægt að dreifa í það sandi. Lagið er mjög svipað klæðningu, nema þynnri. Í stað þess að setja varnarlag á burðarlagið mætti því klæða það fljótlega. Þar sem von er á frosti þarf að verja burðarlagið gegn því í minnst 7 daga eftir festun.

Í leiðbeiningariti þessu er ekkert um brotvöltun, sem losar um spennu í burðarlaginu. Þetta hefur verið gert hér á landi og er einnig orðin venja erlendis. Þetta er gert um 2 dögum eftir lokafrágang, fyrir lagningu slitlags. Ítarlega verður fjallað um brotvöltun í kafla 3.3.2.

Hentugast er að leggja **slitlag** á veginn sem fyrst, til að komast hjá óþarfa kostnaði við umönnun. Það má gera um leið og burðarlagið er orðið stöðugt og skríður ekki til við stöðuga umferð, getur verið 4 – 48 klukkustundum eftir að lagið er orðið klárt. Slitlagið getur verið klæðning, malvik eða hefðbundin steypa. Fyrir klæðningu þarf burðarlagið að vera án lausra efnisagna, bétt og rakt til að hindra inngöngu biks í burðarlagið.

Umferð er yfirleitt stýrt á annarri akreininni meðan unnið er á hinni. Fullkláraðri sementsfestun þarf að verja fyrir á lagi frá tækjum sem gætu aflagað burðarlagið eða tætt yfirborð þess. Strax eftir lokafrágang má hleypa létri og hægri umferð á, en þungaumferð er ekki æskileg fyrr en eftir 7 daga hörnun. Tjörfilmur er góð vörn gegn sliti á burðarlagi frá umferðinni. Ef skipta þarf um unnu efni skal það gert fyrir alla dýpt festuninnar með lóðréttum skurði og fersk blanda sett í staðinn. Engar blettanir eru leyfilegar.

2.2.3 Reynslan í tímans rás

Sementsfestun vega er hvergi á undanhaldi, sérstakalega ekki í bandaríkjunum. Mikil reynsla og þróunarvinna gerir þessa framkvæmd auðvelda í framkvæmd. Hönnunarferlið er þekkt og hefur verið rannsakað í þaula og allur tækjakostur er til staðar. Þessi mikla reynsla hefur skila sér í miklu magni af gömlum sementsfestum vegum. Mælingar og skoðanir hafa sýnt að þeir haldi lögur og styrk mjög vel. Þar hjálpar stöðug styrking burðarlagsins, nána um það í kafla 3.2.1. Sprungumyndanir hafa þó stundum verið vandamál, en rannsóknir hafa verið gerðar og aðferðir þróaðar til að stemma stigum við því. Í kafla 3.3 verður farið yfir áhættubætti og forvarnir varðandi sprungumyndanir í sementsfestum burðarlögum.

Sementsfestur vegur á að geta haldist mikið til viðhaldsfrír hönnunartíma festuninnar og gott betur, fyrir utan endurnýjun slitlags. Nú þegar höfum við vegkafla sem hægt er að fylgjast með og verður fróðlegt að sjá hvernig þeir standast íslenskt veðurfar.

3 Efnislegir eiginleikar

Sementsfestun er aðferð sem notuð er til að bæta eiginleika burðarlaga, sem standast ekki þær kröfur sem staðlar kalla eftir eða ef burðarlag hefur ekki staðist það umferðaálag sem á því hefur verið. Með blöndun sements er verið að bæta vörn þess gegn raka og auka burð efra burðarlagsins. Eiginleika þess til að taka við á lagi og dreifa því í neðri burðarlög vegarins aukast. Með því að minnka vatnsdrægni⁴ burðarlagsins er verið að koma í veg fyrir eitt helsta vandamál þeirra (Garber, Rasmussen, og Harrington, 2011).

3.1 Sýnataka og eftirlit

Nauðsynlegur þáttur allra verka, hvort sem þau eru í byggingargeiranum, vegagerð eða lagnavinnu er gæðaeftirlit og rannsóknir þannig að hægt sé að taka upplýstar ákvarðanir um hönnun. Þessum hluta verksins er hér skipt í þrjá hluta: forþófanir, tilraunir og eftirlit á verktíma og mælingar eftir að framkvæmdum lýkur. Fjallað er um hvern hluta fyrir sig, bæði hvernig staðið hefur verið að þessu hér á landi og svo hvernig hlutirnir eru erlendis.

Sementsfestanirnar 1993 og 1996 voru tilraunarverkefni á vegum BUSL. Nefndin sá um forrannsóknir, tilraunir og mælingar ásamt Vegagerðinni. 2010 og 2011 sá Vegagerðin um þennan hluta framkvæmdanna en fyrra árið voru steyptir sívalningar á verkstað sem sendir voru í prófanir hjá NMÍ. Í sömu framkvæmd átti að taka kjarnasýni til að staðfesta að brotstyrkurinn væri yfir 5 MPa eftir 7 daga hörnun. Það tókst hins vegar hvorki að taka sýni með kjarnabor eða með því að saga kubb. Sýnataka fór því ekki fram fyrr en um 5 mánuðum eftir festunina og voru þá teknir 30 kjarnar og voru af þeim 20 nothæfir í brot (Guðmundur I. Waage, 2011).

3.1.1 Forþófanir

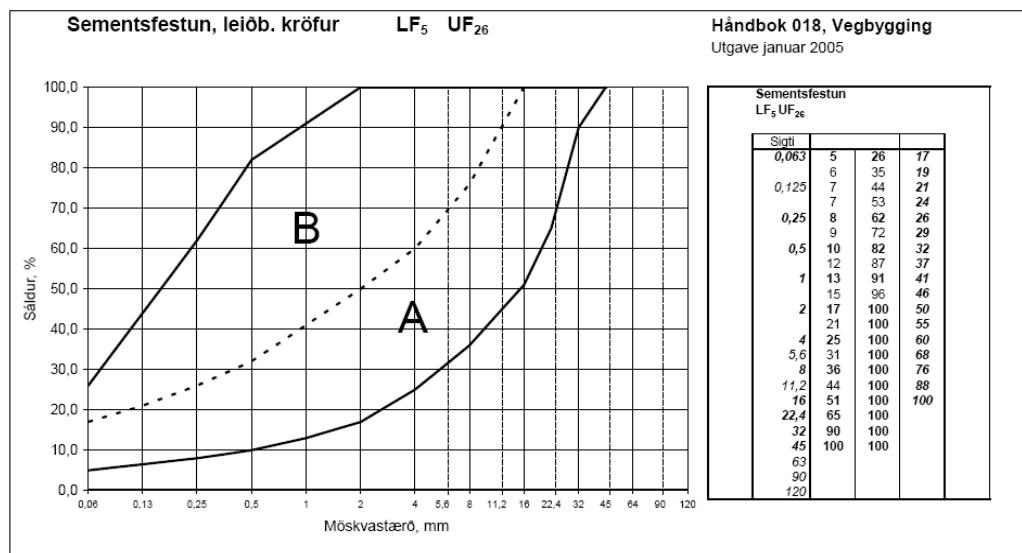
Hver sementsfestun er í flestum tilfellum sérstök að því leiti að efni eru misjöfn og forsendur og aðstæður ekki alltaf þær sömu. Þegar undirbúa á sementsfestun á staðnum þarf að skoða efniseiginleika burðarlaga vegarins. Til að ná sem mestum gæðum úr sementsfestuninni þurfa blöndunarhlutföll að vera sérsviðin fyrir hvert verk. Með tímanum má minnka umsvif forrannsókna og styðjast við reynslutölur fyrir ákveðnar efnisgerðir og eiginleika. Aldrei er þó hægt að sleppa þessu mikilvæga skrefi framkvæmdarinnar.

Forþófanir vegna festunar 2010

Nákvæmar leiðbeiningar um undirbúning sementsfestana liggja ekki fyrir hjá Vegagerðinni. Þau atriði sem þar eru koma úr handbók norsku vegagerðarinnar. Meðal þess er graf sem sýnir viðmið fyrir kornadreifingu steinefna, sjá Mynd 4. Efni innan svæði A eru

⁴ Þegar efni dregur til sín raka í frosti. Mikið vandamál á Íslandi.

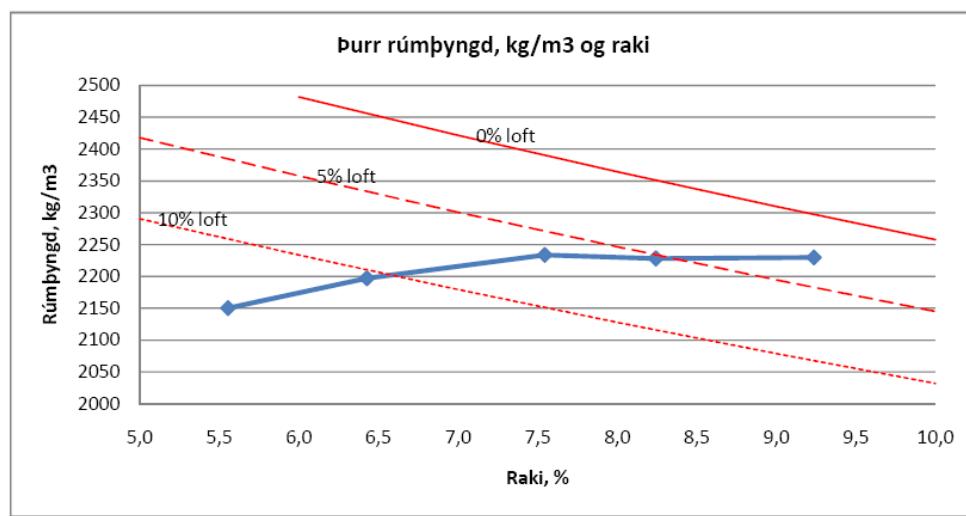
heppilegust til festunar en efni á svæði B er vel hægt að festa, en vegna magns fínefna þarf meira cement (Steinefna- og vegtæknideild - Nýsköpunarmiðstöð Íslands, 2007).



Mynd 4 - Marklínur efna sem best þykja til sementsfestunar.

Ítarleg og góð forrannókn var framkvæmd fyrir festunina 2010 af NMÍ (Guðmundur I. Waage, 2011). Tekin voru sýni úr burðarlögum og klæðningu kaflanna sem átti að festa. Voru þau flokkuð í A, B og C eftir því hvaðan þau voru tekin. Steinar yfir 22,4 mm voru sigtaðir úr til að auðvelda gerð sýna og til að auka nákvæmni niðurstaðnanna. Raki og kornadreifing blöndunnar var mæld. Sýnum af klæðningunni var blandað saman og tætt. Því var bætt við steinefnin þannig að það væri 17% (æskilegra að hafa það 20%, skv athugasemdu í skýrslu NMÍ) af þyngd heildar sýnisins. Efnismagn hefði mátt vera meira en það þótti há rannóknaraðilum hversu fá sýni var hægt að gera úr efninu.

Modified proctorpróf var gert á efni B og voru gerðar 5 blöndur með mismunandi raka, 5,6% til 9,2%. Þannig mátti sjá við hvaða rakastig efnið næði mestu þjöppun (í þessu tilfelli 2410kg/m³, rök rúmþyngd). Niðurstaðan var 8% raki, en það er kallað æskilegt rakastig. Þetta próf er mikilvægt til að hafa réttann raka í blöndun festunar en það er einn af mikilvægustu þáttum hennar.



Mynd 5 - Niðurstöður modified proctor-prófs. Æskilegt rakastig sett sem 8%.

Til að finna heppilegt sementshlutfall var ákveðið að gera tilraunir með 4,5; 5,5 og 6,5% sementi, hlutfallið miðað við þunga þurrefnis í steinefnablöndunni. Eftir tilraunir með svökölldum kango-hamri og breytilegri þyngd blandna var ákveðið að þjappa sýnin í sívalninga með snúningsþjöppu, goryþjöppu, og hafa blöndurnar 6,5 kg auk sements sem var breytilegt. Þannig yrðu sívalningarnir 16 cm háir með þvermálið 15 cm. Ákveðið var að hafa sama þjóppunarálag á öll sýnin í stað þess að stefna að fyrirfram ákveðinni rúmpyngd. Sjö daga brotstyrkur var mældur með einföldu einása þrýstiprófi. Aðeins var eitt sýni brotið af hverri gerð, en það of lítið til að niðurstöðurnar séu fullkomlega marktækjar. Áberandi samband sást á milli aukins þrýstibols með auknu sementsmagni en sýnin brotnuðu við 5,5 til 10,7 MPa. Samkvæmt leiðbeiningum Vegagerðarinnar er lámarks 7 daga þrýstibol 5 MPa, fyrir sívalning 150mm í þvermáli og 150 mm að hæð. Aðeins var skoðaður 28 daga brotstyrkur fyrir efnisblöndu C og var aukningin á brotstyrk milli 7d og 28d, 10 – 33%. Ákveðið var að nota hlutfallið 5%, en það þótti gefa nægan styrk.

Forprófanir erlendis

Þar sem saga sementsfestunar erlendis er läng þá eru til ógrynni gagna um hvernig hanna eigi sementsfestun miðað við ákveðinn burðarefni og aðstæður. Ítarleg leiðbeiningarit og handbækur eru gefnar út, af samtökum og háskólum, þar sem rannsóknir eru stundaðar á sementsbundnum burðarlögum. Úr leiðbeiningaritum PCA er farið yfir helstu atriði forprófana (vísað í rit eftir hverja málsgrein):

Efniseiginleikar burðarlagana og bygging vegarins eru athuguð fyrst. Kornadreifing burðarlagsins sem festa á þarf að uppfylla eftirfarandi: allt fari í gegnum 75mm sigtið, minnst 95% gegnum 50mm sigtið og 55% gegnum 4,75mm sigtið. Ef steinar yfir 100mm í þvermáli er innan þess þarf að taka tillit til seinkunar og kostnaði sem hlýst af því að fjarlægja þá. Mikið magn fínefna kallað á meira sement og vatn vegna aukins yfirborðsflöt efnisagnanna. Allur lífrænn jarðvegur, rætur og annað sem hefur slæm áhrif á efnahvörf sementsins er óæskilegt. Þetta þarf að skoða eða vera ljóst áður en ákveðið er að ráðst í sementsfestun á burðarlagi (Luhr, Adaska, og Halsted, 2008).

Sýni eru tekin með því að brjóta upp slitlagið, með fleyg, og ná upp hluta af burðarlaginu, með t.d. staurabor. Ef sýni eru tekin með kjarnabor sést ástand slitlagsins betur og þykkt laga. Taka þarf sýni á 0,4 km fresti til að fá marktæka og fullnægjandi mynd af eiginleikum efna í veginum. Lengra má vera milli sýna ef vitað er að efni sé einleit í vedi. Þykkt slitlagsins og efra burðarlagsins er mæld á hverjum stað. Nóg er að skrá niður áferð og grófleika efna í bæði efra og neðra burðarlagi. Af dæmigerðum sýnatökustað, sem endurspeglar efni vegarins, er takið efni til frekari rannsókna. Ef fyrra yfirlit sýnir að efniseiginleikar séu breytilegir þarf að taka sýni til rannsókna frá fleiri en einni stöð. Sýnum til rannsókna er safnað með því að grafa litla holu, 30x30 cm, niður í áætlaða festidýpt. Um 45 kg, samsvarar 20L, af efni er nóg fyrir flestar þær tilraunir sem framkvæma þarf. Best er að halda slitlaginu og burðarefninu aðskildu, þannig að hægt sé að búa til breytileg blöndunarhlutföll. Það gæti verið nauðsynlegt þegar skoðaðar eru mismunandi festidýptir, því slitlag er minna hlutfall af blöndunni fyrir dýpri festanir (Luhr, Adaska, og Halsted, 2008).

Í tilraunastofu eru búin til nokkur sýni með mismunandi raka svo hægt sé að finna æskilegt rakastig, sem gefur mestu rúmþyngd. Þar sem sementshlutfall blöndunnar er ekki þekkt er áætluðu magni sements sett í blönduna miðað við fyrri reynslu. Þegar semtentsmagnið er orðið þekkt er ráðlegt að gera annað raka-rúmþyngdarpróf. Aðstæður eru líkastar því sem þær eru á verkstað ef sýnin eru þjöppuð í sívalning með modified proctor (ASTM D 1557). Hann gefur meiri þjöppun heldur en standar proctor, hvoru tveggja eru staðlaðar þjöppunaraðferðir framkvæmdar í rannsóknarstofum. Til samanburðar notar Modified proctor $2.700 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ á móti $600 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ í standard proctor. Til að fá nákvæmari niðurstöður er betra að nota hólk með þvermálið 6" (150 mm) í stað 4" (100 mm), hæð sýnisins er jafn hátt þvermáli þess, eða 150 mm. Áætlað magn efnis í slíkan hólk er um 6-7 kg, sem er það magnið sem þarf í hverja blöndu. Eftir þjöppun eru sýnin vigtuð, blaut og þurr rúmþyngd þeirra reiknuð og raunrakastig þeirra mælt með því að ofnþurrka efnið. Rúmþyngd sýna á móti raka er sett í graf og sést þá hvaða raki gefur mesta þjöppun. Sá raki kallast æskilegt rakastig og er notað til viðmiðunar í festuninni. Hægt að setja inn mettunarlínu efnisins, en hún er gott viðmið til að átta sig á loftinnihaldi sýna hverju sinni. Helsta markmið með þjöppun sementsfestunar er að hafa hlutfall lofts sem allra minnst. Yfirleitt er þurr rúmþyngd notuð til að túlka niðurstöður rannsókna og prófana í almennum jarðtækniverkefnum. Þegar unnið er við sementsblöndun er heppilegra að nota blauta rúmþyngd. Þar sem sementsfestunin harnar eftir að hún hefur verið lög endurspeglar blaut rúmþyngd efnisins raunrúmþyngdina betur. Eins gefur það betri mynd á lofthlutfall burðarlagsins ef notuð er blaut rúmþyngd (PCA, Roller-Compacted Concrete Density: Principles and Practices, IS541, 2004)

Til að finna heppilegt sementsmagn eru gerðar blöndur með þremur mismunandi hlutföllum, oft 3, 5 og 7%. Til að fá sem besta niðurstöðu er æskilegt að hafa 2 sýni fyrir hvert hlutfall og eru þau þjöppuð með sömu aðferð og rakasýnin, með modified proctor. Sýnin eru látin í rakageymslu í 7 daga þar sem þau harna. Þau er brotin og línurit sem sýnir breytilegan styrk eftir sementsmagni gert. Frost-þýðni próf eru stundum framkvæmt, en blanda sem uppfyllir burðarþolskröfur er talin standast öll veðrunar- og rofáhrif. Þegar von er að burðarlagið lendi í vatnsbaði eða unnið er með rakaviðkvæm efni, efni sem innahalda mikið af fínefnum, þarf að framkvæma TST (Tube Suction Test). Það er tæki sem mælir hreyfingu vatns í sýninu og er þannig hægt að sjá hvort nóg sementi sé í blönduna til að yfirvinna gegndræpi og hárpípu krafta fínefna burðarefnisins (Luhr, Adaska, og Halsted, 2008).

Það er í valdi hönnuða að ákveða sementshlutfall sem uppfyllir kröfur og viðmið. Nánar verður fjallað um viðmið og áhrifa þætti síðar.

3.1.2 Tilraunir og eftirlit á framkvæmdatíma

Þegar hafist er handar við framkvæmdina þarf að fylgjast með því hvort hún sé í samræmi við þær stærðir sem ákveðnar hafa verið, þ.e. gæðaeftirlit þarf að vera virkt. Eftirlit er mikilvægur þáttur festuninnar því stærðir eins og sementsmagn, rakastig og dýpt festunar eru viðkvæmar fyrir breytingum í aðstæðum og erfitt að fylgjast með nema með mælingum

og útreikningum. Ekki þarf að hafa miklar áhyggjur af dýpt festuninnar ef nýlegur fræsari er notaður en þeir mjög nákvæmir og stillanlegir eftir þörfum.

Leiðbeiningar Vegagerðarinnar

Almennar leiðbeiningar og reglur Vegagerðarinnar (Steinefna- og veggæknideild - Nýsköpunarmiðstöð Íslands, 2007) um útlagningu burðarlaga gætu átt við hér, en þar má finna nokkur atriði sem koma beint að festum burðarlögum.

Tíðni prófana þar sem burðarefni er blandað á staðnum eru 500 m og skulu sýni vera tekin úr sitt hvorri akrein. Sýnin eru tekin þegar nýbúið er að blanda efninu saman við sementið, fyrir jöfnun og þjöppun. Þau skulu þjöppuð á staðnum með Kango-hamri í sívalninga. Að 7 dögum liðnum er þrýstibrotþol þeirra kannað, líkt og í forprófunum. Fylgjast þarf með sementsmagni og skal það gert við byrjun verks og a.m.k. daglega eftir það. Það sé gert með því að setja pakka undir dreifara, en eins og áður hefur komið fram hefur það ekki reynst vel. Eftirlitsmaður þarf því að fylgjast með aðfluttum förmum af sementi og reikna svo rúmmál fests burðarlags. Þannig má reikna hlutfallið og bera það við fyrirskrifað magn. Frávik frá fyrirskrifuðu sementsmagni má mest vera $\pm 1 \text{ kg/m}^2$.

Efni sem blandað er við cement í stöð skal kannað einu sinni fyrir hver 500 tonn sem framleidd eru. Í blöndunni skal mæla kornadreifingu steinefnis, húmusinnihald, sementsmagn og sýni skal þjappað til könnunar á brotþoli.

Til að kanna sléttleika yfirborðs eru mæld þriggja punkta þversnið, í köntum og miðju vegar, til að meta hvort frávik séu frá hönnuðu yfirborði. Kröfur um frávik eru mimunandi eftir vegflokkum. Sléttleiki er mældur með 3 m réttskeiði, bæði þvert á akstursstefnum og langsum. Þessar mælingar eru gerðar með 20 m millibili eftir veginum. Með sjónmati á yfirborð skal metið hvort það hafi fullnægjandi afvötnun, rastir séu á því og að engar pollamyndanir geti átt sér stað.

Tíðni mælingu á þjöppun burðarlagsins skal vera samkvæmt Tafla 1.

Tafla 1 - Tíðni mælinga á þjöppun burðarlags.

| Aðferð | Vegtegund | | |
|---|--------------|--------------|--------------|
| | A-B1 | B2-B3 | C |
| <i>Plötupróf</i> | | | |
| <i>Rúmþyngdarmæling</i> | | | |
| <i>Hæðarmæling (bil milli svæða, sjá lýsingu í viðauka)</i> | Á 100 m bili | Á 300 m bili | Á 500 m bili |

Nokkrar aðferðir eru taldar upp til að mæla þjöppun lagsins: rúmþyngdarmælingar (geislamæling og sandkeilupróf), plötupróf og/eða hæðarmæling. Það síðastnefnda er lítið notað og í þessu tilviki hentar það illa til að fylgjast með hvort forskrifaraðri þjöppun hafi verið náð. Sandkeiluprófið felur í sér tímafrekann uppgröft á efninu og niðurstöður liggja ekki fyrir fyrr en á þriðja degi eftir framkvæmd prófsins. Sú aðferð er því útilokuð þegar kanna á þjöppun festuninnar. Í miðri framkvæmd er geislamælingar hentugastar, en með þeim má fylgjast með rúmþyngd jafnóðum. Slíkir mælar takmarkast við kornastærð 25-30 mm, en viðunandi árangur hefur náðst þó kornastærð sé allt að 50 mm. Kröfur miða við að mæld

rúmþyngd með geislamæli sé 97% af rúmþyngd kjarna sem þjappaður er á rannsóknastofu með Kango-hamri. Þjöppunarmæla í völturum hafa reynst gagnlegir, en með þeim er hægt að sjá breytinguna sem verður milli umferða. Venjuleg ófest burðarlög er hætt að þjappa þegar munur milli umferða er minni en 5%. Á fullkomnari völturum er GPS-staðsetningartæki og geta þeir skráð þjöppunina fyrir hvern stað fyrir sig. Með reglulegum geislamælingum er hægt að kvarða mælirinn í valtaranum og hefur vélamaðurinn þá viðmið á þjöppunina.

Eftirlit með festun 2010, stutt yfirlit

Sjónrænt eftirliti fellst í vöktun á jafnri dreifingu sements og að blöndun sé viðunandi. Milli umferða meiga ekki verða eftir ræmur sem ekki eru blandaðar með sementi. Fylgjast var með að tíminn sem efnið lægi óhreyft væri ekki yfir 30 mínútum og að efnið væri orðið fullþjappað innan við 2 tímum frá blöndun. Hönnuðir hér á landi hafa mælst til þess að rakastigið, sem fest er við, sé 2% undir æskilegum raka. Þumalputtaaðferðin í eftirliti er að taka líkufylli af blönduðu efni og kreista það. Ef það loðir nokkurn veginn saman var rakainnihaldið mátulegt. Til staðfestingar voru reglulega tekin sýni sem þurrkuð voru í örbylgjuofni og vigtuð á grammavog til að meta rakastig blöndunnar. Það kom í ljós að efnið í Öxnalendum var viðkvæmara fyrir raka, því var rakinn minnkaður úr 8% í 7% til að koma í veg fyrir lina bletti. (Guðmundur I. Waage, 2011).

Mæling á sementsmagni með skúffu, 0,25 m², þótti gróf og erfið í framkvæmd. Gúmmímottur sem hindra fok á sementinu drógu skúffuna með og var mælingin aldrei marktæk. Aðferð, sem lýst var í kafla 2.1.4 var því notuð til að fylgjast með sementsmagninu. Óljóst var með loka árangur í þjöppun, fylgst var með gildum á innbyggðum mæli í valtara. Virkara eftirlit þyrfti að vera með þessum hluta framkvæmdarinnar og nota til þess gerð mælitæki og aðferðir eins og lýst er í kaflanum hér á eftir.

Tilraunir og eftirlit erlendis

Í Bandaríkjunum er virkt eftirlit með framkvæmdum og sýni tekin til að staðfesta árangur festuninnar. Til að mynda hefur verið gefin út handbók sérstaklega ætluð eftirlitsmönum sementsfestana. Hún er því miður ekki fáanleg á rafrænu og því voru aðrar heimildir notaðar við vinnslu á þessum hluta.

Þar (PCA, Roller-Compacted Concrete Density: Principles and Practices, IS541, 2004) kemur fram að ef loftinnihald blöndu, sem þjöppuð er í rannsóknastofu, reiknað sem 3,5%. Ef þetta efni væri þjappað í viðunandi rúmþyngd, 98% af mestu þjöppun, verður hlutfall lofts 5,5%. Til að fá sterkt burðarlag þarf loftinnihald þess að vera sem allra minnst. Það og aukinn vinnanleiki efnisins eru ástæður þess að best sé að hafa raka efnisins aðeins hærra en æskilega rakastigið, sem fundið var í forþrófunum. Meira vatnsinnihald fyllir upp í rúmin sem annars væru loft, þetta má sjá þegar rúmþyngdar- og mettunarlína eru sett saman í graf. Þjöppun þykkra laga gengur betur því aukið vatn „smyr“ kornin. Auka vatnið eykur líka hörnun blöndunnar og því kemur það ekki niður á styrknum svo lengi sem setti rúmþyngd er náð. Blanda með rakann um 1% yfir æskilegur gildi veitir því mestan vinnanleika, mikla rúmþyngd og minnsta loftinnihald.

Líkt og hérlendis er geislamælir (e. nuclear density gauge) notaður til að mæla rúmþyngd burðarlagsins við þjöppun. Mæligildið er borið saman við mestu þjöppun/rúmþyngd sem náðist í rannsóknastofunni með modified proctor-prófinu. Eins og greint var frá í kaflanum um aðferðafræðina má hlaupandi meðaltal 5 mælinga með geislamælinum minnst vera 98% af mestri rúmþyngd og stakt gildi minnst 96%. Hvað burðarþol varðar er þetta einn af mikilvægustu þáttum eftirlitsins, að þjöppun festunar sé samkvæmt kröfum.

Ein leiðin til að fylgjast með rúmþyngd festunar er að reikna fræðilega loftlausu rúmþyngd. Eitt af því sem hefur áhrif á blauta rúmþyngd er hlutfall loftsins í blöndunni, og er erfitt að mæla það á verkstað. Með vöktunar á þessari gerð rúmþyngdar er þessi óvissuháttur útilokaður. Stærðir eins og kornarúmþyngd steinefnisins og vatnsupptaka þess þegar það er mettað en yfirborðsþurrt eru notað við reikning á loftlausu rúmþyngdinni. Stuðst er við aðferð steypufræðinnar í stað hefðbundinnar jarðtækni. Munurinn er sá að í stað þess að vigta ofnþurrkað malarefni og cement er það vigtað mettað og yfirborðsþurrt. Vatnið sem mettar malarefnið er því talið með efnunum meðan aukavatnið (e. free water) er haft sér, samanber Mynd 6:

| Soil Mechanics | | | Volumetric Concrete Proportions | | |
|---------------------|-------------------------------------|-----------|---------------------------------|---|--------|
| Volume | Unit Volume (1 ft ³) | Weight | Weight | Unit Volume (1 ft ³) | Volume |
| 0.0347 | Air | 0.0 lb | 0.0 lb | Air | 0.0352 |
| 0.1598 | Water | 9.97 lb | 7.82 lb | Water | 0.1252 |
| 0.7279 | Solids _(Dry) | | (1.09 + 1.06 lb absorbed) | Solids _(SSD) Includes Absorbed Water in Aggregate | |
| 0.0776 | Soil | 127.17 lb | 127.17 lb | Aggregate | 0.7618 |
| 0.0000 | Cement Pozzolan | 15.26 lb | 15.26 lb | Cement | 0.0778 |
| | Total | 152.40 lb | 152.40 lb | Pozzolan | 0.0000 |
| 1.0 ft ³ | | | 1.0 ft ³ | Total | |

Mynd 6 - Nálgun með hefðbundinni jarðtækni og steypufræðileg nálgun.

Krafan er að fræðileg loftlaus rúmþyngd sé á bilinu 96% - 98% af mestu loftlausu rúmþyngdinni og að ekkert gildi sé undir 95%. Þessi aðferð er gott að beita með öðrum til að fylgjast með efniseiginleikum blöndunnar.

Önnur aðferð er að taka sýni úr blöndunni og þjappa, í staðlaðann 6" stálhólk 12" háann (150 mm x 300 mm), á staðnum eða rannsóknastofu ef hún er í grendinni. Heppilegra er að hafa hæð sýnanna jafna þvermálinu, eða 150 mm. Þá þarf ekki að leiðréttu þrýstibrotþol sýnanna þegar þau eru brotin. Þjöppun má framkvæma á nokkra vegu:

- Fleyghamar (ASTM D 1435)
- Vebe – aðferðinni (ASTM C 1176)
- Modified proctor – prófi (ASTM D 1557)
- Loftknúin þjappa (ekki til staðall fyrir verkfæri)

Þessar þjöppunar-aðferðir hafa þótt líkja nokkuð vel eftir þjöppun festra burðarlaga á verkstað. Rúmþyngd sýnanna er mæld og sést þá hvort fyrirskrifuð þjöppun náist og þannig hægt að sjá hvort efnið eiginleikar séu réttir. Með því að brjóta sýnin má fá góða mynd á styrk burðarlagsins.

Priðja aðferðin til að hafa eftirlit með þjöppun burðarlagsins er að þjappa tilraunakafla þar sem sementsfest burðarlag er þjappa með nokkrum gerðum af þjöppum og mismargar umferðir farnar á hverju tæki. Meðaltal hæstu rúmþyngdanna, mælt með geislamæli, er reiknað og er sú rúmþyngd og fjöldi umferða notað sem viðmið á verktíma. Ef þessi aðferð er notað þarf að fylgjast grannt með efnislegum eiginleikum því þjöppun gæti verið fullnægt án þess að næg rúmþyngd hafi náðst ef blandan er of þurr eða blaut. Undirbúninngur aðferðarinnar er bæði dýr og tímafrekur. Verk hér á Íslandi eru almennt lítil miðað við það sem gerist út í Bandaríkjum, því verður þessi aðferð seint hagkvæm.

Í þessu riti (PCA, Roller-Compacted Concrete Density: Principles and Practices, IS541, 2004) er ekki minnst á aðferðir til að fylgjast með sements- eða vatnsmagni. Þær aðferðir sem notaðar hafa verið hér hafa reynst vel. Viðmiðun við æskilegt rakastig þyrfti samt að endurskoða m.t.t. burðarþols og sprungumyndana, en það verður rætt síðar.

3.1.3 Mælingar eftir að framkvæmdum lýkur

Til að meta árangur sementsfestunar burðarlags eru tvær leiðir. Annars vegar með broti á sívalningum sem steypir/þjappaðir hafa verið á verktíma og svo með beinum burðarþolsmælingum á veginum. Með því að skoða 7 daga brotþolsstyrk sívalninganna er hægt að sjá hvort blandan standist kröfur um minnsta bortþolsstyrk, sem eins og áður sagði er hér á landi er 5 MPa. Í Bandaríkjum er almennt miðað við að 7 daga brotþolsstyrkur sé milli 300 og 400 psi (2,1 og 2,8 MPa) (Luhr, Adaska, og Halsted, 2008). Ástæðan fyrir þessum mun verður skýrð síðar. Með sjónmati má sjá hvort sprungumyndun sé meiri en eðlilegt geti talist og með mælingum er hægt að staðfesta að lögun vegarins sé rétt.

Mat á árangri 2010

Steyptir voru 7 sívalningar á verktíma sem síðar voru brotnir hjá Nýsköpunarmiðstöðinni. Þetta var gert með sömu aðferðum og lýst var hér áður, með rafmagnsvél með plötu framan á. Efnið var þjappað í tveim lögum og var hæð sívalninganna minnst 15 cm. Sjö daga styrkur var mismunandi, 4,91 – 8,95 MPa. Tvö sýni voru brotin seinna, annað 12 daga (7,65 MPa) og hitt 23 daga (9,65 MPa).

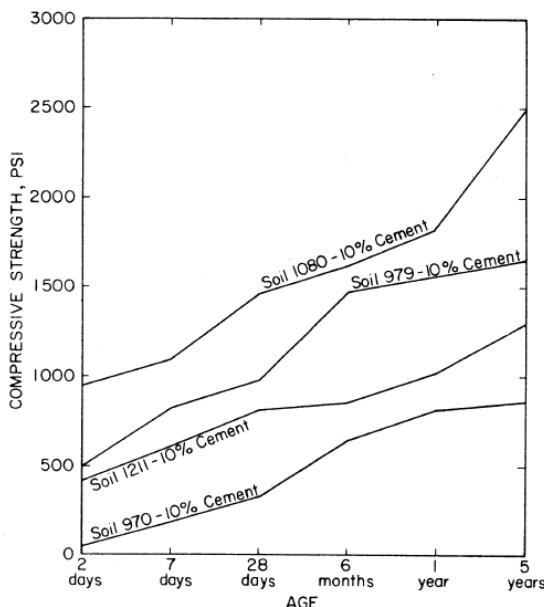
Í útboðslýsingu kom fram að taka ætti sýni með kjarnabor. Það reyndist hins vegar ekki farmkvæmanlegt eftir fyrirskrifatímum, 7 daga. Kjarnar voru teknir 5 mánuðar seinna, gekk það vel og voru þeir brotnir til að meta styrk lagsins. Burðarþolsmælingar með fallhamri sýndu að árangur festuninnar hefði verið viðunandi (Guðmundur I. Waage, 2011).

3.2 Burðarþol

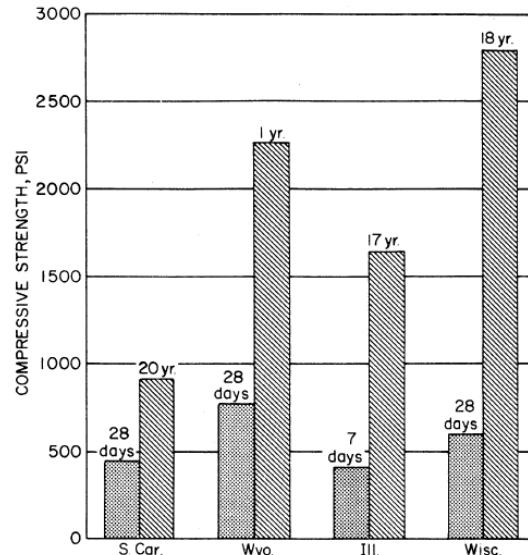
Helsti tilgangur með sementsfestun burðarlaga er að bæta styrk/burðarþol þeirra. Tilraunir hafa sýnt að vegir sem standast fyrirsksrifað burðarþol dreifi álagi ekki aðeins vel heldur þola þeir vel veðrarnir og rof, eins og frost-þýðuáhrif og hitabreytingar (George, 2002). Brotþolsmælingar eru því mælikvarði á fleira en aðeins burðarþolið. Allt frá hönnun að framkvæmd miði að því að sem mestu burðarþol náist. Kröfur um burðarþol eru misjafnar eftir löndum. Í Danmörk, Noregi og hér á Íslandi er krafan fyrir 7 daga brotþolsstyrk 5 MPa. Í Bandaríkjum er þessi krafa lægri og er hún í raun breytileg eftir hönnunarforsendum og stofnunum. Hver stofnun hefur fundið hvað hentar þeim best en 7 daga styrkurinn er frá 300 til 800 psi (2,1 til 5,5 MPa) (Garber, Rasmussen, og Harrington, 2011). Algengara er að hann sé við lægri mörkin, en mismunur á efnum og aðstæðum gætu skýrt þennan mun. Takmörkun á burðarþoli í Bandaríkjum er vegna hættu á þurrkrýrnun burðarlagsins með tilheyrandi sprungumyndunum. Með nokkrum ráðum má koma í veg fyrir þetta vandamál, en það verður rætt nánar í kafla 3.3.

3.2.1 Reynsla af þróun burðarþols með árunum

Sementsfestir vegir í Bandaríkjum hafa komið mjög vel út til langa tíma. Á línuritinu á Mynd 7 sést hvernig brotþolsstyrkur sýna á tilraunarstofu eykst með tímanum. Mynd 8 sýnir súlurit sem ber saman byrjunarstyrk og styrk eftir nokkurra ára notkun. Svo lengi sem sprungumyndun sé innan marka hafa sementsfestir vegir í Bandaríkjum reynst mjög endingargóðir (PCA, Thickness Design for Soil-Cement Pavements (EB068.02), 2001).



Mynd 8 - Styrking mismunandi sýna með tíma



Mynd 7 - Brotþolsmæling gamalla vega

3.2.2 Sements- og vatnsmagn

Þegar hanna á sementsfest burðarlag þarf, eins og áður hefur komið fram, að ákveða sementsmagn blöndunnar og finna æskilegt rakastig með þjöppun sýna. Rakastig blöndunar er túlkað sem hlutfall af þurrum massa efnisins, að sementinu frátöldu (Luhr, Adaska, og Halsted, 2008).

$$vatnsinnihald, w(\%) = \frac{\text{massi vatns í blöndu}}{\text{massi af ofnþurrkuðu efni}} \cdot 100$$

Í eftirliti á verkstað er sýni tekið og það vigtað. Eftir þurrkun er deilt í massamismuninn með massa blöndunar eftir þurrkun. Það er ákvörðun hönnuðar og eftirlitsmanna hvoru megin við æskilegt rakastig gildið eigi að vera og hver skekkjumörkin séu.

Sementsmagn blöndunnar hefur mesta að segja um styrk festuninnar. Þegar velja á hlutfall eru bornar saman niðurstöður úr forprófunum og kröfur eða hönnunarforsendur. Valið hlutfall verður að gefa nægilega mikinn styrk. Allt sement umfram það er auka tilkostnaður og skilar of stífu burðarlagi sem hætt er á að brotni upp. Sementshlutfallið er túlkað, líkt og vatnið, sem hlutfall af þurrum massa efnisins, að sementinu frátöldu (Luhr, Adaska, og Halsted, 2008).

$$sementsinnihald, c(\%) = \frac{\text{massi sements í blöndu}}{\text{massi af ofnþurrkuðu efni}} \cdot 100$$

Þegar sementi er dreift á veg er magnið túlkað sem kg/m². Þurr rúmþyngd burðarlagsins, fyrir festun, er mæld og margfölduð með sementshlutfallinu til að fá sementsmagnið í kg/m³. Það er margfaldað með þykkt festuninnar, í metrum, og er þá vitað hversu mörg kílógrömm af sementi fara á hvern fermetra.

3.2.3 Rúmþyngd

Gæði sementsfestunar fara eftir því hversu vel tekst til við þjöppun. Til þess þarf að skilgreina hver mesta rúmþyngdin er. Besta aðferðin til þess er að gera modified proctor – próf. Yfirleitt er þurr rúmþyngd er notið til að túlka þjöppunina, en eins og áður hefur komið fram er spurning hvort rök rúmþyngd eigi betur við. Þjöppun sem næst á verkstað er táknuð sem hlutfall af fyrirskrifadri rúmþyngd. Kröfur eru misjafnar en almennt er miðað við að meðaltalið sé ekki minna en 98% og allar mælingar yfir 95-96%.

3.3 Sprungumyndanir

Helsta vandamál sementsfesta burðarlaga er sprungumyndun. Sprungumyndun í burðarlagi getur orðið það mikil að klæðning rifnar og endurspeglir þannig sprungurnar í burðarlaginu. Sprungur geta gert yfirborð óslétt, dregið úr hæfni burðarlagsins til að dreifa umferðarálaginu og síðast en ekki síst hleypt vatni niður í neðri burðarlög. Vatn í neðri burðarlögum veikir þau og hefst þá niðurbrot sem upphaflega átti að hindra með sementsfestun vegarins. Það er sama hvernig samsetning vegarins er, um leið og vatn hefur

gott aðgengi um sprungur hefst rof og niðurbrot í burðarlögum. Þrengri sprungur, innan við 2,5 mm, skapa ekki vandamál og geta þær verið til staðar árum saman án þess að það þurfi að grípa til sérstakra ráðstafanna. Fyrir sementsfesta möl eru þessir 2,5 mm viðmiðið fyrir mesta leyfða sprunguvídd (George, 2002). Mælingar hafa leitt í ljós að virkni burðareiginleika lagsins getur minnkað um 35% þegar sprungur verða víðari en 2,5 mm. Með því að takmarka vídd sprungnanna má koma í fyrir þessi neikvæðu áhrif.

Viðgerð á sprungum er í flestum tilfellum yfirlögn með klæðningu. Það geta verið „bætur“ fyrir lítið útbreidd sprungusvæði til heilklæðningar, ef vegurinn er mjög illa farinn. Með þessu má koma í veg fyrir að vatn gangi niður um sprungurnar, en skertur burður á selementsfesta laginu er enn til staðar.

3.3.1 Hvernig myndast sprungurnar?

Í selementsfest burðarlög myndast þversprungur á 2,4 – 6 m millibili og er þetta vegna rýrnunar (PCA, 2003). Mesta rýrnunin kemur fram á fyrstu mánuðum festuninnar og eru helstu orsakirnar efnahvörf selementsins, hitabreytingar og þornun. Þetta eru merki um hörnun burðarlagsins og því nokkuð eðlilegur fylgikvilli. Burðarlagið undir myndar viðnám við rýrnuninni og þar sem togkraftur selementsfesta burðarlagsins er lítt rifnar það. Því meira sem þetta viðnám er, því fleiri og grennri spurngur myndast á burðarlaginu. Viðnám er meira þegar blandað er á staðnum, en þegar efni er blandað í stöð og keyrt á áður þjappað undirlag er þetta viðnám minna og því hætt við víðum sprungum með lengra millibili. Rannsóknir hafa sýnt að gleiðar/óæskilegar sprungur myndist mest vegna vatnsskorts/þornunar á burðarlaginu. Myndun gleiðra þversprungna getur valdið sprungumyndun samsíða akstursstefnu. Þær hafa mikil áhrif á getu burðarlagsins og geta leitt til aflögunar á yfirborði. Helstu atriðin sem hafa áhrif á sprungumyndun í selementsfestu burðarlagi eru (PCA, 2003):

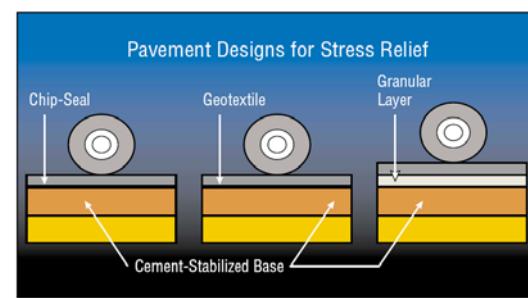
- Burðarlagið þjappað við meira en æskilegan raka. Vatnsinnihald efnisins er meira og því getur það þornað meira eftir útlögn/frágang.
- Efnið sem er fest inniheldur mikið af fínefnum. Fínefni eru vatnsdræg og auka því vatnsinnihald blöndunnar. Æskilegt er þó að hafa nokkuð magn fínefna í efninu því þau hjálpa til við bindingu og fyllir í tómarum þar sem annars væri loft.
- Of lítil vökvun eftir útlögn, þ.e. burðarlagið ofþornar. Þetta veldur bæði meiri rýrnun vegna vökvaskorts og einnig getur það leitt til hægari hörnun selementsins.
- Burðarlag sem ekki nær lámarksþjöppun inniheldur mikið af loftrými. Meira svigrúm er þá til rýrnunar heldur en ef agninar lægju þétt saman. Eins er stuðningur í vel þjöppuðu burðarlagi meiri ef sprungur myndast.
- Of mikið selementsagn skilar sér í meiri efnahvörfum þegar það harnar, sem skapar meiri rýrnun. Það sem hefur þó meiri áhrif er aukinn styrkur blöndunnar sem gefur meiri heildarstyrk, m.a. togstyrk. Afleiðing hærri togstyrks eru færri og gleiðari sprungur með tilheyrandi niðurbrotsáhrifum.

Sementsfestun í heitu og þurru veðri skal forðast eins og kostur er. Votveður getur líka haft slæm áhrif á berskjálðað yfirborð festuninnar. Með því að hafa þessi helstu atriði í huga má minnka líkurnar á skaðlegum sprungumyndunum.

3.3.2 Forvarnir gegn sprungumyndunum

Það er ekki hægt að koma alfarið í veg fyrir sprungumyndanir í sementsfestum lögum. Þó er hægt er að minnka þær þannig að þær hafi sem minnst áhrif á burð og endingu vegarins. Mörg milljónir mílna hafa verið lagðar af sementsfestum burðarlögum í Bandaríkjunum og hafa þar verið þróaðar aðferðir til að minnka rýrnun (PCA, 2003):

- Mikilvægi góðs eftirlits er einn þáttur í því. Rétt magn vatns og sements þarf að vera í blöndunni, hún nágu vel blönduð, þjöppuð og umönnun þarf að vera næg til að halda burðarlaginu röku. Tímarammi framkvæmdarinnar þar líka að standast, þ.e. ekki taka of langann tíma (tímaramma má sjá í kafla 2.2.2 um aðferðafræðina erlendis).
- Þjappa burðarlagið við lægri raka en æskilegt rakastig. Eins og áður sagði veldur of mikið vatn í blöndu meiri rýrnun. Raki blöndunnar ætti því aldrei að vera hærra en æskilegt rakastig, helst að vera allt að 2% undir. Þetta er í mótsögn það sem áður kom fram, í kafla 3.1.2 undir tilraunum og eftirliti erlendis. Þar var mælst til þess að rakinn sé hafður rétt yfir til að ná aukinni rúmbýngd. Í þessu, eins og svo mörgu öðru, er það millivegurinn og áherslur sem gilda.
- Hægt er að minnka hlutfall fínefna með því að blanda grófu aðkeyrðu efni saman við. Þetta getur verið kostnaðarsamt og betra að fylgjast sérstaklega vel með vatnsinnihaldi blöndunnar ef fínefni er stórt hlutfall burðarlagins.
- Það má koma í veg fyrir hluta af rýrnuninni með því að nota þenslusement, sem vinnur þá á móti rýrnuninni. Í næsta undirkafla verður rætt um takmörkun burðarþols með minna sementsmagni.
- Með viðbót aukaefna má minnka rýrnun burðarlagsins. Meðal þessara efna er gifs, flotefni (steypu íblöndunarefni), fínmalað gjall og aska (e. fly ash). Með þessu má minnka vatnsþörfina, auka blöndunina, lengja tíma sem líða má til þjóppunar og geta, sérstaklega fyrir gróf efni, minnkað sementsþörfina. Á næstu síðu verður fjallað nánar um blöndun ösku í festunina. Prófanir hafa verið gerðar á auknum togstyrk með íblöndun trefja. Áhrif á rýrnun voru lítil sem engin.
- Streitulosandi lagi (e. stress relief layer) má setja á milli festa burðarlagsins og klæðningaráinnar. Þannig eru minnkaðar líkurnar á að sprungur í burðarlaginu nái alla leið uppá yfirborð vegarins. Þetta lagi getur verið klæðningarálag (e. chip seal), ef slitlagið er malbik, geotextile – dúkur eða 50 til 100 mm malarlag. Á Mynd 9 má sjá hvernig millilögin þrjú eru útsett.



Mynd 9 - Þrjár gerðir streitulosandi laga

- Eftir að burðarlagið hefur verið þjappað má það aldrei þorna. Ef þurrt er í veðri þarf að vökva það með bíl eða sérhönnuðu „sprinkler“ – kerfi þar til varnarfilma eða slitlag hefur verið lagt á burðarlagið.
- Þar sem lang mesta sprungumyndunin er á byrjun líftíma, má „brúa“ þær sprungur sem myndast hafa með því að leggja slitlagið seint á. Það má til dæmis loka burðarlaginu með einfaldir klæðningu mjög fljótlega, til að koma í veg fyrir þornun og slit vegna umferðar. Seinna lagið kemur síðar, eftir nokkra mánuði eða ár. Þessari aðferð hefur verið beitt hér á landi. Í sumum heimildum er mælst til þess að slitlagi sé lagt sem fyrst til að takmarka sprungumyndunina. Þetta á frekar við þar sem þykkt og burðargefandi malbik er lagt yfir burðarlagið. Enn sem komið er hefur sementsfestun hérlandis aðeins verið beitt þar sem klæðning er lögð á burðarlagið.
- Nýjasta og áhrifaríkasta aðferðin sem notuð hefur verið hérlandis er brotvöltun. Hún fellst í völtun á burðarlaginu eftir 1 – 2 daga hörnun. Upphof hennar má rekja til Austurríkis, en um þessa aðferð verður fjalla nánar í undirkafla hér á eftir.

Mikilvægt er að komið sé í veg fyrir þennan helsta galla, sprungumyndun, sementsfestra burðarlaga með þessum aðferðum ásamt þeim sem á eftir koma. Mikill viðhaldskostnaður getur hlotist af ef sprungumyndun er mikil. Þá er sparnaður með festuninni farinn fyrir lítið.

Takmörkun burðarbols

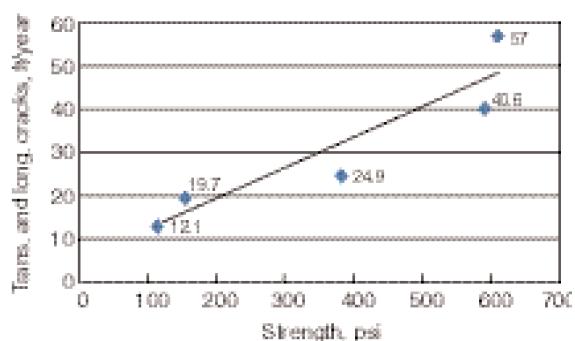
Styrkur burðarlagsins er notaður sem mælieining á endingu þess, hann túlkar hins vegar ekki hættuna á sprungumyndun. Miklar rannsóknir og samantektir hafa verið gerðar á hönnunarbrotþoli sementsfestra vega í Bandaríkjum. Algengt er að 7 daga hönnunar-styrkur sé um 300 – 450 psi (2,1 – 3,1 MPa) (George, 2002). Það gefur sementshlutfallið kringum 2% - 4% þegar festa á venjulega möl, meira ef mikill leir er í efninu. Á töflu 2 hér að neðan er listi yfir raunverulegar sementsfestanir. Þar eru mismunandi sementshlutföll miðað

Tafla 2 - samanburður efnisgerðar, sementsmagns, styrks og ástands.

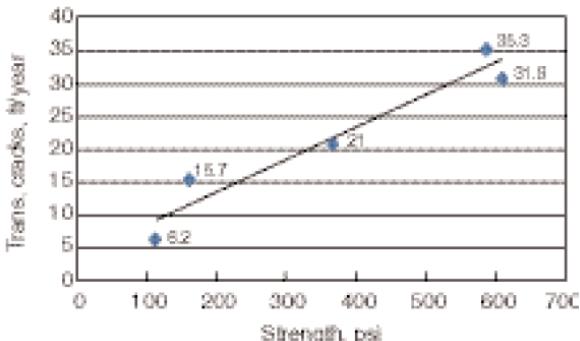
| SL no. | Project ID | Date built | Description of material | Cement % by weight | Design strength/ break strength, psi | Strength using Clegg hammer on 12/17/97, psi | Condition of road |
|--------|--------------------------|------------|--|--------------------|--------------------------------------|--|-----------------------------|
| 1 | Hidden River Parking Lot | 1988 | Shell | 6.0 | 300 / 410 | NA | Badly cracked |
| 2 | X Creek 3rd ext. | 5-29-96 | FDOT Limerock | 6.5 | 500 / 1150 | NA | Cracks 90 ft. apart |
| 3 | X Creek Blvd. | 1-27-97 | FDOT Limerock, 8 in. thick, 2 in. hot mix | 4.5 | 500 / 539 | 600 | Good cond., no cracks |
| 4 | Cory Lake Blvd. | 1-26-97 | FDOT Limerock, 6 in. | 2.5 | 300 / 332 | 410 | Excellent, no cracks |
| 5 | Lake Bernadette | 11-20-96 | FDOT Limerock, 8 in. thick, 2 in. hot mix | 2.5 | 300 / 325 | NA | Excellent, no cracks |
| 6 | Woodbridge apartment | 12-17-96 | FDOT Limerock, 6 in. thick, 1.5 in. hot mix | 2.5 | 300 / 330 | NA | Excellent, no cracks |
| 7 | River Hills Drive | 5-20-94 | Rhodine Road Sand Clay | 6.75 | 300 / 360 | NA | Several longitudinal cracks |
| 8 | Boyette Springs | 10-28-96 | FDOT Limerock | 2.0 | 300 / 322 | 250 | Excellent, no cracks |
| 9 | Sterling Palms | 9-25-96 | FDOT Limerock (Parking Lot) | 2.25 | 300 / 438 | NA | No cracks |
| 10 | Heather Lakes 27 | 6-25-96 | Crushed Concrete (by-product) with sand 5:1 mix | 4.0 | 300 / 520 | NA | Cracks 80–90 ft apart |
| 10a | Heather Lakes 27-2 | 11-7-96 | FDOT Limerock | 4.0 | 300 / 450 | NA | Cracks 15–25 ft apart |
| 11 | Kensington Ridge | | | 2.0 | 300 / 330 | NA | Excellent, no cracks |
| 12 | Ranch Road Grove | 3-15-96 | 70% Rhodine Road Sand + 30% Vulcan FDOT Limerock | 5.0 | 300 / 600 | NA | A few cracks |

við kröfur og efnisgerð burðarlagsins. Í aftasta dálknum má sjá athugasemdir, hvort vegurinn sé sprunginn eður ei. Þar sést að vegir sem mældust með háann styrk eða innihéldu mikið af fínefnum voru sprungnir.

Á þessum myndum sést sambandið milli styrk burðarlagsins og umfang sprungna í vegum úr gagnabanka í Bandaríkjum. Gæði grafan eru léleg, en á x-ás er styrkurinn í psi og á y-ás eru sprungurnar í fet/ári. Mynd (fyrri) sýnir þversprungurnar en hin er fyrir allar sprungur í veginum.



Mynd 10 - Samanburður styrks og allra sprungna



Mynd 11 - Samanburður styrks og þversp.

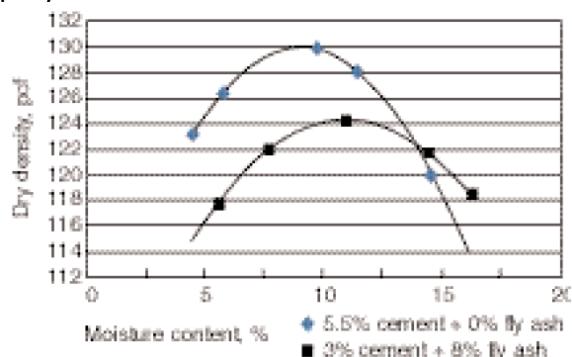
Í Bandaríkjum er brotþolið lækkað til að minnka sprungumyndun. Brotþol upp á 2,07 – 2,76 MPa, borið saman við 5 MPa – kröfurnar hérlandis, er líttill styrkur. Til að halda í veðrunar-, burðar- og slitþolseiginleika burðarlagsins væri betra að beita öðrum aðferðum en að draga úr burðarþoli við að fækka stórum sprungum og flekamyndunum. Með takmörkun á burðarþoli festuninnar er verið að stytta endingatíma viðgerðarinnar (Syed, 2007).

Blöndun flugósku (e. fly ash) í festun

Íblöndun flugósku hefur gefið góðan árangur við minnkun sprungumyndana. Rannsóknir hafa verið gerðar í tilraunastofum og kaflar, þar sem aska var notuð sem íblöndunarefni, hafa verið skoðaðir. Komið hefur í ljós að heppilegast er að skipta hluta sementsins, 1% – 2%, út fyrir fjórfalt meiri ösku. Þetta þýðir að í burðarlagi, sem festa á með 5 % sementi, er sett sem dæmi 4% af sementi og 4% af ösku (George, 2002). Blöndun hennar minnkar ekki aðeins rýrnunina heldur eykur hún líka styrk burðarlagsins. Þar sem korn öskunnar eru kúlulaga auka þau þjálni blöndunnar og minnka þar með vatnsþörfina. Þjöppunareiginleikar lagsins eru því auknir við lægra rakastig en annars þyrfti. Með æskilegt rakastig minna og eiginleikar öskunnar til að geyma í sér vatn minnkar rýrnunin. Meiri rúmbýngd með minna vatni skilar sterkara lagi sem rýrnar minna.

Í samanburðartilraun var vatnstap sýnis, sem ekki var blandað með ösku (5,5% sement), um 60% meira heldur en í sýni sem innihélt ösku (3% sement + 8% aska). Rýrnun blöndunar, með öskunni, var 59% minni. Muninn má sjá á grafinu í Mynd 12, en þar er rýrnunin ($\text{í mm/mm} \times 10^{-6}$) sýnd á móti tímanum sem líður í dögum. Öskublandaða efnið, græna línan, rýrnar umtalsvert minna. Á grafinu í Mynd 14 (næstu síðu) sést aukinn þjöppun

öskublandaða efnisins, bláa línan, við minna rakastig. Á Mynd 13 er styrkur blandanna sýndur á móti tímanum sem líður í dögum. Blöndurnar hafa svipaðann styrk eftir 7 daga hörnun en með tímanum eykst styrkur öskublandaða efnisins, rauða línan, mun meira og er orðinn 57% meiri eftir 90 daga. Burðarlag með svona háann langtímastryrk þolir þunga umferð betur án þess að sýna þreytumerki.



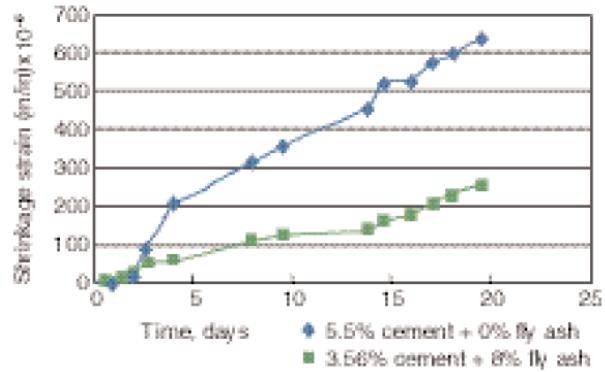
Mynd 14- Munur á mestu rúmpyngd

Blöndun ösku í sementsfestun krefst meiri vinnu við dreifingu. Hægt er að dreifa öskunni sér, en það krefst tveggja dreifara og dráttavéla. Hentugara væri að blanda öskunni og sementinu saman í stöð áður og dreifa þeiri blöndu á veginn. Umfang þess gæti verið tvöfalt það sem annars hefði verið dreift af sementi. Auka kostnaður hlíst af þessu, en á móti kemur sparnaður í innkaupum á sementi. Kostir við blöndun ösku í burðarlagið eru ótvíræðir og vert er að kanna kostnaðar- og framkvæmdalegu hliðar þess hérlandis.

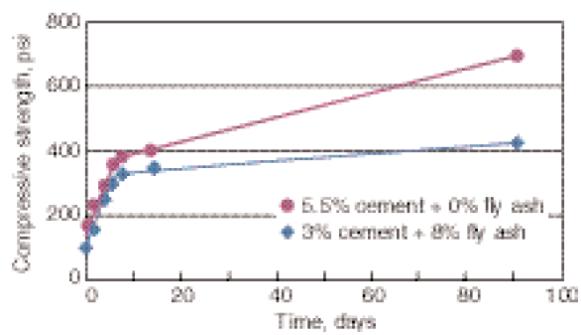
Brotvöltun, spennulosun

Brotvöltun er spennulosun í sementsfestu burðarlagi. Hún er framkvæmd með þungum valtara sem brýtur lagið og myndar net af fínnum sprungum. Verið er að minnka, ef ekki útiloka, hættuna á myndun víðra sprungna. Þetta er gert 24 – 48 klukkustundum eftir að þjóppun lýkur, en nokkrar umferðir þarf til að ná viðunandi árangri. Með margar grannar sprungur eykst sveigjanleiki lagsins því færslur skiptast á fleiri skil. Þar sem brotið fer fram snemma á hörnunartíma burðarlagsins nær það því fljótt aftur fyrri styrk. Þegar þessari aðferð er beitt má styrkur burðarlagsins, sem annars væri takmarkaður vegna hættu á sprungumyndunum, vera hærri. Það skýrir að hluta mun á kröfum um 7 daga styrk hérlandis og í Bandaríkjunum, þar sem ekki alltaf er brotvaltað.

Ítarlegar samanburðartilraunir í fullri stærð hafa verið framkvæmdar til að rannsaka áhrif og framkvæmd brotvöltunar. Til útskýringar verður stuðst við ein slíka sem gerð var í Texas, skráð af Scullion (2001), þar sem 4 kaflar voru sementsfestir. Einn þeirra, Salzburg, var brotinn 24 tímum eftir festun, tveir kaflar, Von Trapp og Neuburg, voru brotnir 2 dögum eftir festun, en sá fjórði, Sophia Lane, var ekki brotinn til samanburðar. Hönnunarreglur í Texas



Mynd 12 - Munur á rýrnun sýna.



Mynd 13- Munur á langtímastryrk

kváðu þá um 500 psi (3,4 MPa) 7 daga styrk. Til að standast þessar kröfur, fyrir léleg malarefni, þarf sementið að vera um 6% til 8% af þyngd festuninnar. Þykkt festuninnar var 6 tommur (150 mm). Öllum köflunum var haldið rökum fram að broti og tveim dögum eftir það. Umönnun/vökvun eftir brot er mjög mikilvæg svo burðarlacið ná aftur upp fyrri styrk.

Stífni burðarlagsins fyrir brot var mæld með falllóðsmælingum og Humboldt stífnimælir, sem sendir titring niður í lagið og greinir endurkast hans. Mælingarstað þarf að merkja svo hægt sé að fylgjast með breytingum stífninnar. Æskileg tíðni mælinga er um 30 metrar. Tólf tonna valtari var láttinn brjóta lagið á 2 mph, 3,2 km/klst, og var titringurinn stillur á lága slaghæð. Sprungurnar sem myndast eru það fínar að erfitt getur verið að koma auga á þær. Þegar valtarinn hefur farið tvær umferðir hefur stífni burðarlagsins minnkað um ca 30%. Viðmiðið er að minnka stífnina um 40% frá því sem hún var fyrir brot. Með mælingum er hægt að fylgjast með því hvort þörf sé á einni eða tveim umferðum enn til að ná því takmarki. Mikilvægt að allur flötur festuninnar, að undanskildum ystu 30 cm í kanti, sé brotinn.

Stífni kaflans, sem var brotinn 24 tímum eftir festun, hafði innan við 50% af upphaflegri stífni eftir 4 umferðir. Eftir einungis tveggja daga umönnun var hún komin upp í 74% af upphafsstífninni. Þetta til marks um mikilvægi góðrar umönnunar fyrstu 2 dagana eftir brot, en það er forsenda þess að burðarlacið nái fyrri styrk. Eftir 6 mánaða hörnun hafði allur stífnimissir gengið til baka og sveigja burðarlagsins minni en fyrir brot. Kaflarnir héldu áfram að auka styrk sinn og virtist brotvöltunin hafa lítil eða engin áhrif á lokastyrk þeirra. Sprungumyndanir voru skoðaðar eftir 6 mánuði og voru kaflarnir sem höfðu verið brotvaltaðir mun minna sprungnir. Óbrotni viðmiðunarkaflinn var mikið sprunginn en taka skal fram að vegna seinkunar á yfirlögn slitlags voru yfirborðssprungur kaflans færri en á sambærilegum festum köflum á svæðinu.

Í viðauka A má finna töflur, súlurit og myndir tengd tilrauninni (Scullion, 2001). Þar má sjá samanburð á stífni og sprungulengd kaflanna. Brotvöltun hefur verið notuð með góðum árangri. Hún var notuð í Langadal 1996 allt til dagsins í dag en lítið hefur verið vitað um árangur þess. Samkvæmt súluriti, sjá viðauka, næst mestur 28 daga styrkur ef brotið fer fram 48 tímum eftir festun. Þá er styrkur nægur til að ná fram broti, en það lítill að burðarlacið nær að jafna sig með tímanum.

3.4 Mælikvarði á góða sementsfestun

Í raun eru gæði hverrar sementsfestunar ekki fullkomlega ljós fyrr en líftími hennar er liðinn. Þeir hlutir sem hægt er að skoða til að sjá hvenig til tókst eru styrkur, stífni, sléttleiki og sprungur á yfirborði. Semetnsfest burðarlag tekur mestum breytingum í upphafi líftímans. Þar eru helstu þættirnir rýrnunin og styrktaraukningin. Eftir ár væri því hægt að meta hvort burðarlacið ná fyrirskrifudum hönnunartíma eða hvort viðhald þurfi til að halda veginum í viðunandi ástandi. Þeir kaflar sem lagðir hafa verið hér lendis hafa ekki sýnt annað en að þeir ætli að standast íslenskar aðstæður.

4 Kostir og aðstæður

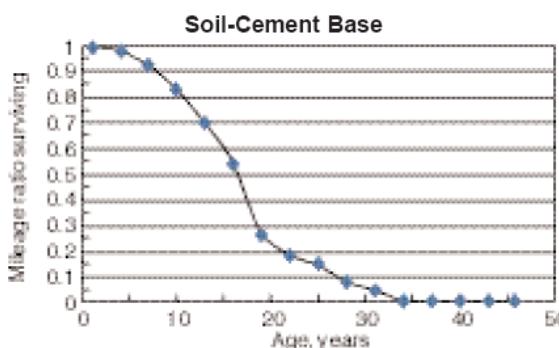
4.1 Samanburður froðubiks og sementsfestunar

Sambærilegt úrræði og sementsfestun hefur verið notað á Íslandi undanfarin ár með góðum árangri. Það er svokalla froðubik, sem byggir á sömu aðferðafræði. Eini munurinn er að í stað sements er biki blandað í með kaldblöndunaraðferðinni. Bik er hitað í 170°C, blandað við 1-2% vatn undir þrýstingi og sprautað í fræsitromluna. Þegar vatnið kemur út úr spíssunum sýður vatnið og bikið freyðir, sem 15-faldar rúmmál þess. Froðan blandast við steinefnin og límir saman (Ingvi Árnason, samtal, 29. september 2011). Til að ná svipuðum styrk þarf minna bik en sement, 2 – 4% bik. Hvað framkvæmdina varðar er hún mjög lík því sem gerist í sementsfestuninni. Helsti kostnaðarmunurinn felst því í innkaupum á hráefnum. Meira sement er notað í festunina en kílóverð biksins er margfalt hærra. Því er sementsfestun hagstæðari kostur. Tilvik hafa komið upp þar sem biksmits í yfirborði slitlags hafi mátt rekja til bikbundins slitlags undir. Í hita hafi umframþik ekki getað leitað niður í burðarlagið og leitað þess í stað á yfirborðið. Þetta hefur verið vandamál á heitum sumardögum.

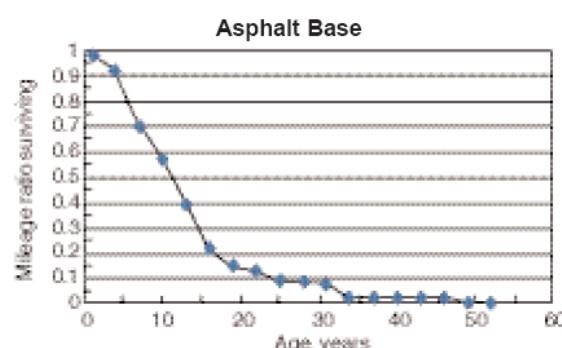
Helsti efnislegi munurinn er sveiganleiki biksins. Sementsfest burðarlag er stíft og þolir það illa hreyfingar á veginum. Burðarlagið undir þarf því að vera nokkuð traust og mest allt sig á veginum þarf að hafa komið fram. Þar sem hætt er við hreyfingum er þó hægt að gera burðarlagið sveiganlegra með því að minnka styrk/sementsmagn þess. Með brotvöltun fæst líka aukin sveigja því búnar eru til margar fínar, en virkar, sprungur. Þannig má sníða hönnun burðarlagsins að aðstæðum hverju sinni.

Sementsfest burðarlög hafa forskot á þau bikbundnu þegar kemur að umhverfisáhrifum. Sement er umhverfisvænna í framleiðslu og förgun eða notkun þess hefur ekki eins skaðleg áhrif á umhverfið. Endurvinnsla burðarlags með seimenti er því umhverfisvænasti kosturinn þegar styrkja þarf veg.

Gerður var samanburður á vegum með 3 gerðum burðarlaga, sementsfest, bikfest og svo ófest malarlag (George, 2002). Upplýsingar úr gagnabanka vegagerðarinnar í Mississippi, allt að 2.000 mílur í heildina. Í fyrstu var skoðað hversu stórt hlutfall af lengd vega var talinn í lagi, lóðrétti ásinn á myndum 15 og 16. Það var sett upp í tímaás, en með því að reikna flatarmálið undir línum má áætla meðallíftíma.

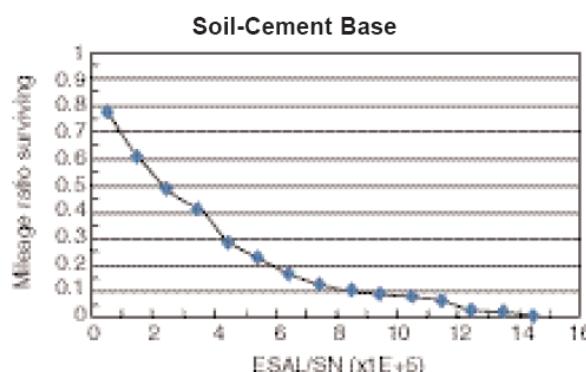


Mynd 15- Bikfest burðarlag, ending

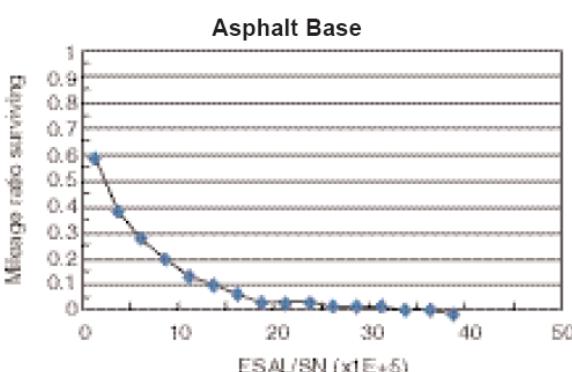


Mynd 16- Sementsfest burðarlag, ending

Fyrir sementfesta burðarlagið var áætlaður meðallíftími 17,1 ár, meðan það bikbundna var aðeins 13,3 ár. Óbundið malarburðarlag hafði áætlaðann meðallíftíma 24,4 ár, en það skýrist mest af lítilli umferð slíkri gerð vega. Til að fá nákvæmari samanburð var ákveðið að taka inn stærðir eins og uppbyggingu og umferðarbunga. Í stað þess að nota tíma í árum var notuð einingin $ESAL/SN \times 10^5$. ESAL er umferðarþungi, skilgreindur sem fjöldi staðalöxla. SN er styrkleikaindex, sem lýsir uppbyggingu vegarins. Þykkt hvers lags og efnisgerð eru lögð saman til að fá styrkleikaindexinn, en í þessu tilfelli er neðra burðarlagið undanskilið. Með þessu má sjá liftímann sem fall af umferðarbunga, þar sem meiri krafa er gerð til þykkari laga. Á lóðréttu ásnum er enn hlutfall vegar í ásættanlegu ástandi (e. mileage ratio surviving).



Mynd 17- Bikfest burðarlag, umferðarþol



Mynd 18- Sementsfest burðarlag, umferðaþol

Með sömu aðferð er flatarmálið undir línunni skoðað á myndum 17 og 18. Fyrir sementsfesta burðarlagið fæst $3,3 \times 10^5$, það bikfesta $2,0 \times 10^5$ og það ófesta $1,2 \times 10^5$.

Svona samanburður er ekki endanlegur úrskurður um gæði ýmissa burðarlaga. Eins er ekkert sem segir að sama niðurstaða fáist ef slíkur samanburður yrði gerður hér á landi. Niðurstöðurnar eru þó vísbendin um að burðargeta og líftími sementsfestra burðarlaga, m.t.t. umferðarbunga og þykktar, sé meiri en burðarlaga af annarri gerð (George, 2002).

4.2 Sementsfestun næstu árin á Íslandi

Meðan sementsfestun er á rannóknastigi hérlendis er mikilvægt að skera ekki af rannsóknahliðinni. Meðan verið er að aðlaga stærðir og aðferðir að íslenskum aðstæðum þarf að vera virkt eftirlit með útkomu og gæðum. Fylgjast þarf vel með þeim köflum sem þegar hafa verið festir með mælingum. Af þeim má læra hvort íslenskar aðstæður séu að hafa einhver óvænt áhrif eiginleika burðarlagana.

Tækakostur til framkvæmdarinnar er til staðar, en samkeppni er ekki mikil. Þekking og reynsla er byrjuð að byggjast upp varðandi hönnun og aðferðafræði. Kostnaður við hönnun og mistök í framkvæmd ættu því að minnka með tímanum. Aðeins með áframhaldandi útboðum, þar sem sementsfestun er valmöguleiki, heldur þróun fræðinnar áfram á Íslandi.

5 Samantekt og Niðurstöður

Í samanburði við aðrar leiðir er sementsfestun þægileg, ódýr og umhverfisvæn leið til viðgerðar á vegum. Með því að endurnýta efni sem fyrir eru í vegstæði má komast hjá miklum kostnaði og umhverfisspjöllum. Aðflutt efni þyrftu að koma úr námum og efni sem ætti að henda þyrfti að urða, en hvoru tveggja er röskun á landi. Flutningur þeirra væri mengandi, kostnaðarsamur og skapaði óþarfa álag á nálæga vegi (Garber, Rasmussen, og Harrington, 2011).

Í inngangi voru settir fram áhersluatriði fyrir verkefnið. Hér verður farið í stuttu máli yfir helstu niðurstöður fyrir hvert atriði.

A. Heimildarkönnun erlendis á blöndun á staðnum (*In situ mixing*)

a. Almennt um aðferðafræði

Helsta niðurstaðan er sú að aðferðafræðin hér á landi samræmist þeirri sem notuð er erlendis. Nokkur atriði skal samt að hafa ofar í huga en önnur. Möguleikan á dreifingu sements í vökvaformi má skoða, en það minnkar rykmengun. Þetta er gæti ráðist á framboði tækja hjá verkata. Reglugerar mælingar, með t.d. geislamæli, á rúmþyngd festuninnar tryggja gæði og ættu að vera sem tíðastar. Fyrir lokaumferð valtara er gott að bleyta yfirborðið örlítið til að fá sléttari og þéttari flöt. Forðast skal ofþornun með reglugeri vökvun og slit á yfirborði minnkað með hraða- og þungatakmörkunum. Ef holur myndast þarf, samkvæmt ströngustu kröfum, að skipta efninu út í fulla dýpt með lóðréttum skurðum. Klæða skal lagið sem allra fyrst, fljótlega eftir brotvöltun. Seinna lagið má bíða meðan mesta sprungumyndunin á sér stað. Nánari upplýsinga má leita í kafla 2.2.2.

b. Reynsla í tímans rás, ending.

Almennt virðist reynsla af sementsfestum burðarlögum verið góð í Bandaríkjunum. Stöku kaflar hafa þurft endurnýjun vegna mikilla sprungumyndana. Nokkur úrræði hafa verið þróuð til að stemma stigum við þessu. Í samanburði hefur sementsfestun verið að koma betur út er önnur burðarlög. Nánar í köflum 2.2.3 og 3.2.1.

c. Aðferðin við mismunandi aðstæður:

i. Mjúkt undirlag og frosthreyfingar (sprungur, flekamyndun)

ii. Fast undirlag (líklega engin vandamál)

Með því að sementsfesta burðarlag er það gert mjög stíft, og þar með mjög viðkvæmt fyrir sigi. Með brotvöltun er sveiganleiki þess þó aukinn með gerð fjölda fínna sprungna sem gefa burðarlaginu færi á smá tilfærslu án þess að brotna í fleka. Þetta er þó ekki nóg fyrir verstu sigkaflana í íslenska vegkerfinu, en minna er um þetta vandamál erlendis. Það er skoðun höfundar að sementsfest burðarlag eigi ekki heima í nýframkvæmdum þar sem líkur eru á missigi. Í endurbýggingu, þegar mest allt sig hefur komið fram, er sementsfestun á upprunalegu burðarlagi

tilvalin til endurnýjunar vegar til langs tíma. Þar sem vegur er á föstu undirlagi er þetta þó ekki vandamál, hvort sem það sé í nýframkvæmd eða endurbyggingu.

B. Undirættir

a. Blöndunarhlutföll eftir efnisgerðum, hvernig eru þau ákvörðuð?

Mælst er til gerð forprófana fyrir hvern kafla þegar ákveða eigi blöndunarhlutföll. Í Bandaríkjunum er þetta gert þó reynsla þar sé mikið og ógrynni til af gögnum. Áhrifaþættinir er fleiri en aðeins kornakúrfa efnisins, þó hafi mest að segja. Með tímanum væri hægt að ákveða sementsmagn út frá kornadreifingu burðarlagsins, þá sérstaklega fínefnamagni. Þó raki sé ekki eins viðkvæm stærð hér og erlendis, vegna minna fínefnainnihalds, skal ávalt finna æskilegann raka með prófunum. Lýsing á forprófunum má finna í kafla 3.1.1.

b. Hörnunartími blöndunnar? (reiknað út frá daggráðum)

i. Hvenær þarf frágangi og þjöppun að vera lokið?

Þjöppun þarf að vera lokið 2 tímum eftir að byrjað er að blanda sementi í burðarlagið. Fjórum tímum eftir blöndun, á frágangi að vera lokið. Þrátt fyrir nokkra leit fundust tölur fyrir daggráður ekki. Þegar lofthiti er hár þarf tími frá blöndun að vera styttri vegna hraðari efnahvarfa og þornunar.

c. Hvenær er tímabært að spennulosa (brjóta)?

i. Hörnun nægjanleg til að ná fram broti?

Samkvæmt tilraunum næst mestur árangur ef burðarlagið er brotvaltað 48 tímum frá lagningu þess, sjá súlurit í viðauka A. Þetta á sérstaklega þegar loftslag er svalt eins og hér á Íslandi. Það er ekki víst að burðarlagið harni nóg á 24 tímum til að ná fram broti. Með stífnimælingum má fylgjast með því hvenær broti er fullnægt. Kröfur og fleiri atriða má leita í lok kafla 3.3.2.

d. Kröfur um brotsyrk blandaðs efnis.

Í Bandaríkjunum er brotstyrkur blandaðs efnis mjög misjafn og er það hluti af hönnunarferlinu að ákveð hann. Hér, og í Norðurlöndunum, er miðað við 7 daga brotþolsstyrk 5 MPa. Samanborið við kröfur í Bandaríkjunum er þetta mikill styrkur. Veðráttan á norðlægum slóðum krefst meiri styrks vegna frost-þýðuáhrifa og vatnsdrægni. Núgildandi viðmið er því heppilegast svo lengi sem sprungumyndun verði ekki vandamál. Það má leysa með öðrum leiðum, eins og brotvöltun og blöndun með flugósku.

e. Sýnataka úr sementsfestu efni, aðferðir.

Höfundur fann engar sérstakar aðferðir til að ná sýnum í 7 daga festu burðarlagi. Sýni sem þjöppuð eru úr blöndu á verktíma gefa mynd á gæði blöndunnar sjálfrar. Mælingar á rúmbýngd lagsins segir þá til um þjöppun þess. Ef hvoru tveggja stenst kröfur ætti lagið að gera það líka. Með því að bora kjarna ákveðið löngum tíma eftir festunina, t.d. 28 dagar eða 2 mánuðir, má búa til viðmið sem notað sé í framtíðinni.

f. Binding slitlags við sementsbundið burðarlag, vandamál?

i. Þarf að líma?

Hvergi, í erlendum leiðbeiningaritum, heimildaritgerðum eða rannóknaritum, hefur verið minnst á að binding burðarlags og slitlags sé vandamál. Yfirborð festuninnar þarf að vera rakt, þétt og laust við efnisagnir þegar klæðning er lögð á það, sjá kafla 2.2.2. Ef slitlagið er malbik er hægt að slíta tenginguna til að koma í veg fyrir endurspeglun sprungna frá burðarlagi í slitlag. Fjallað var um það í kafla 3.3.2 um forvarnir gegn sprungumyndunum. Það má því bera þá ályktun að þetta sé ekki vandamál.

6 Heimildir

- Garber, S., Rasmussen, R. O., & Harrington, D. (2011). *Guide to Cement-Based Intergrated Pavement Solutions, SR035*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- George, K. P. (2002). *Minimizing Cracking in Cement-Treated Materials for Improved Perfomance, RD123*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- Guðmundur I. Waage (2011). *Sementsfestun og breikun á Hringvegi 2010, skýrsla um framkvæmd*. Reykjavík: Vegagerð Ríkisins.
- Luhr, D. R., Adaska, W. S., & Halsted, G. E. (2008). *Guide to Full-Depth Reclamation (FDR) with Cement, EB234*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- Microcracking - Texas Transportation Institute*. (August 2006). Sótt 2. December 2011 frá Texas Transportation Institute:
<http://tti.tamu.edu/publications/catalog/record/?id=28027>
- Njörður Tryggvason (1996). *Sementsfestun burðarlaga - Vegstyrking með sementsfestu - stutt greinargerð, áfangaskýrsla*. Reykjavík: BUSL.
- PCA. (2004). *Roller-Compacted Concrete Density: Principles and Practices, IS541*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- PCA. (2003). *Soil-Cement Information, Reflective Cracking in Cement Stabilized Pavements, IS537*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- PCA. (2001). *Thickness Design for Soil-Cement Pavements (EB068.02)*. Portland Cement Association.
- Puppala, A. J., Griffin, J. A., Hoyos, L. R., & Chomtid, S. (2004). *Studies on Sulfate-Resistant Cement Stabilization Methods to Address Sulfate-Induced Soil Heave*. Reston, Virginia: ASCE.
- Scullion, T. (2001). *Field Investigation: Pre-Cracking of Soil-Cement Bases to Reduce Reflection Cracking*. Washington: Transportation Research Board.
- Sebesta, S., & Scullion, T. (2004). *Effectiveness of minimizing Reflective Cracking in Cement-Treated bases by microcracking*. Austin, Texas: Texas Transportation Institute.
- Steinefna- og vegtæknideild - Nýsköpunarmiðstöð Íslands*. (30. Júní 2007). Sótt 26. Nóvember 2011 frá Nýsköpunarmiðstöði Íslands:
http://nmi.is/files/Efnisranns%C3%B3knir-lei%C3%B0beiningar%20Vegager%C3%B0arinna_924103730.pdf
- Syed, I. M. (2007). *Full-Depth Reclamation with Portland Cement: A Study of Long-Term Performance*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- Valgeir Valgeirsson (1997). *Sementfestun í Langadal*. Reykjavík: Vegagerð Ríkisins.
- Þórir Ingason (1997). *Sementsfestun burðarlaga, tilraunakafli í Langadal*. Reykjavík: BUSL.
- Þórir Ingason og Karsten Iversen (1995). *Sementsfestun burðarlaga - framkvæmdartilraunir á Nesvegi við Hafnir*. Reykjavík: BUSL.

Viðauki A

Þessi tafla (Scullion, 2001) sýnir mælingar á stífni kaflanna sem voru brotvaltaðir. Stífnin eftir 2 og 4 umferðir eru túlkaðar sem hlutfall af upphaflegri stífni burðarlagsins. Stífnin eftir 2 daga umönnun var aðeins mæld fyrir einn kafla.

Tafla 3 - Samanburður stífnimælinga, brotvaltaðir kaflar.

| Street | Age when Cracked (days) | Humboldt Measurement | | | |
|----------------|----------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | Before Cracking | After 2 Passes | After 4 Passes | 2 Day Recovery |
| Salzburg Court | 1 | 56.5 (100%) | 36.7 (65%) | 27.7 (49%) | 41.2 (74%) |
| Von Trapp | 2 | 57.4 (100%) | 43.6 (76%) | 34.6 (60%) | |
| Neuburg CT | 1 | 52.3 (100%) | 33.7 (64%) | 26.1 (50%) | |

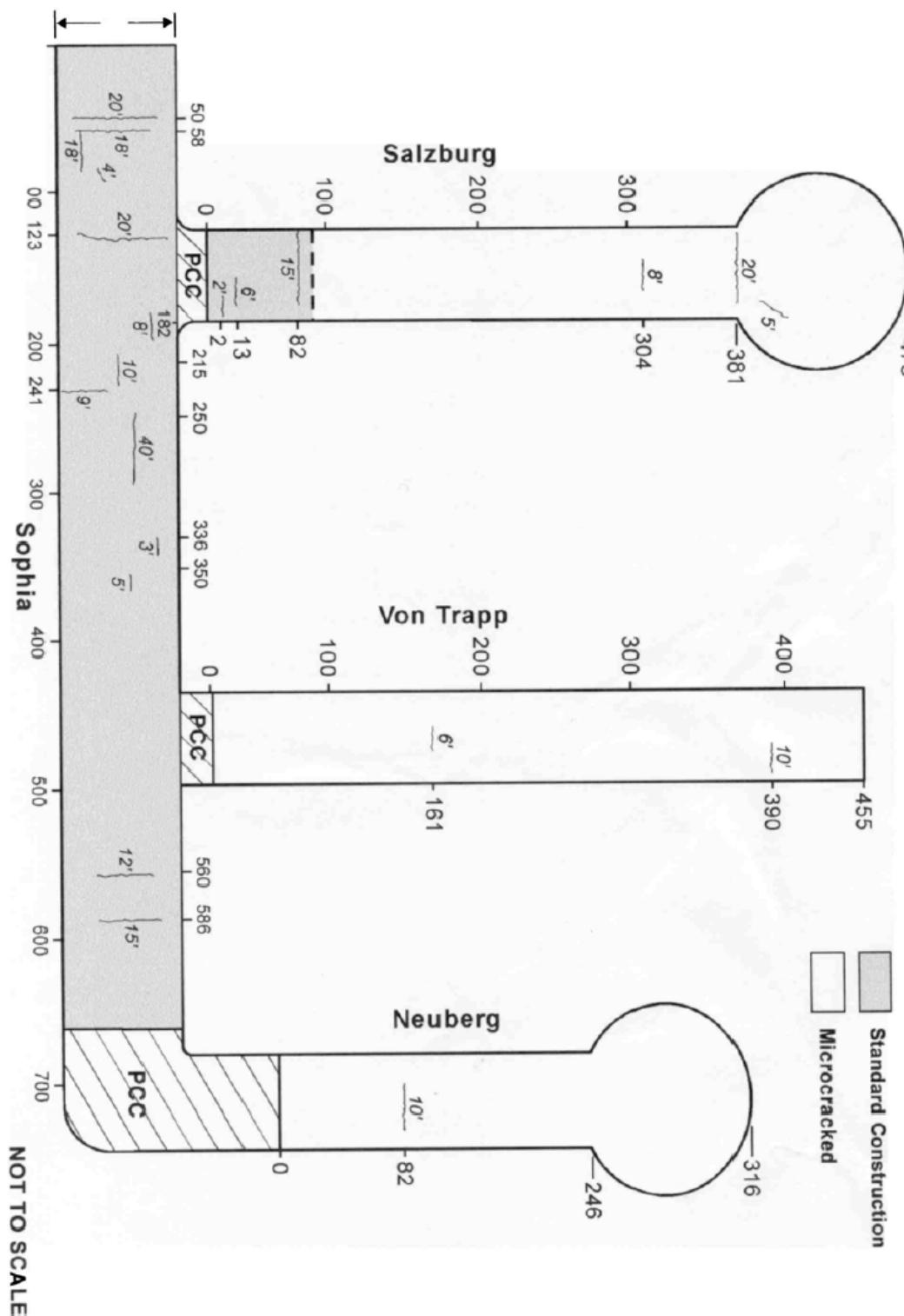
Lengd sprungna á hverjum 100 fetum, eftir 6 mánaða hörnun, var mæld og má sjá niðurstöðurnar í töflunni hér að neðan (Scullion, 2001). Mestur er munurinn meira en tífaldur. Hér sést árangur brotvöltuninnar glögglega. Á myndinni á næstu síðu má sjá sprungumynd fyrir alla kaflanna.

Tafla 4 - Samanburður á sprungumyndunum sementsfestra kafla.

| Street | Crack Length in feet per 100 ft of pavement (2400 sq.ft.) |
|-----------|---|
| Salzburg | 5.6 |
| Von Trapp | 3.5 |
| Neuburg | 2.4 |
| Control | 27.3 |

Sprungumynd allra kaflanna (Scullion, 2001). Sophia er kaflinn sem ekki var brotinn til samanburðar. Salzburg var brotvaltaður 24 tímum eftir festun og hinir tveir, Von Trapp og Neuberg, 48 tímum eftir festun.

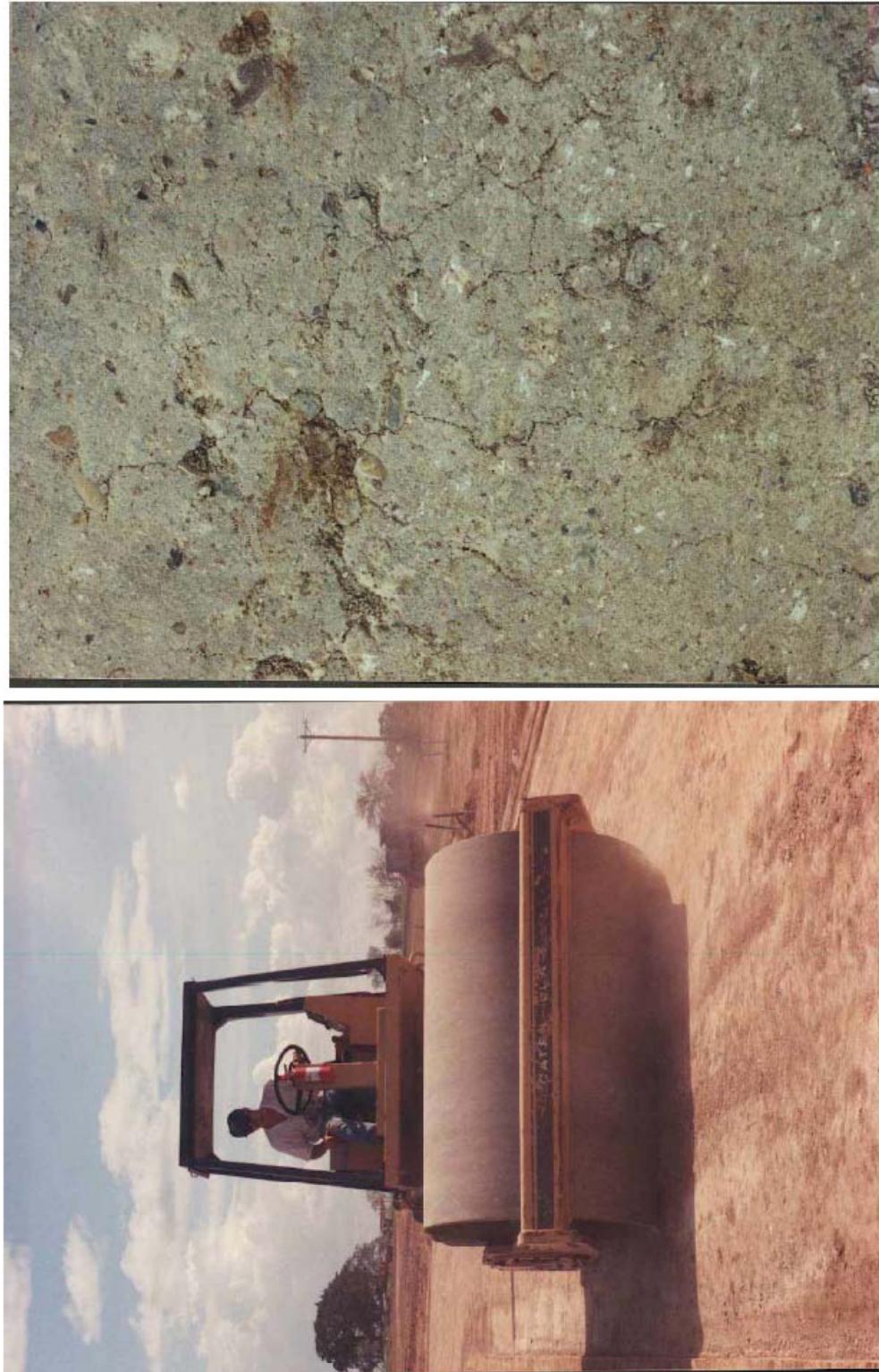
Figure 4. Edelweiss Subdivision – Phase 14 & 16 – College Station, Texas Crack Map 6 Months After Construction.



Mynd 19 - Sprungukort fyrir verklega tilraun í fullri stærð.

Eftirfarandi myndir (Scullion, 2001) sýna brotvöltun í framkvæmd og brotvaltað yfirborð sementsfestuninnar. Árangur brotvöltuninnar sjást ekki alltaf, en á myndinni má greina net af fínum sprungum.

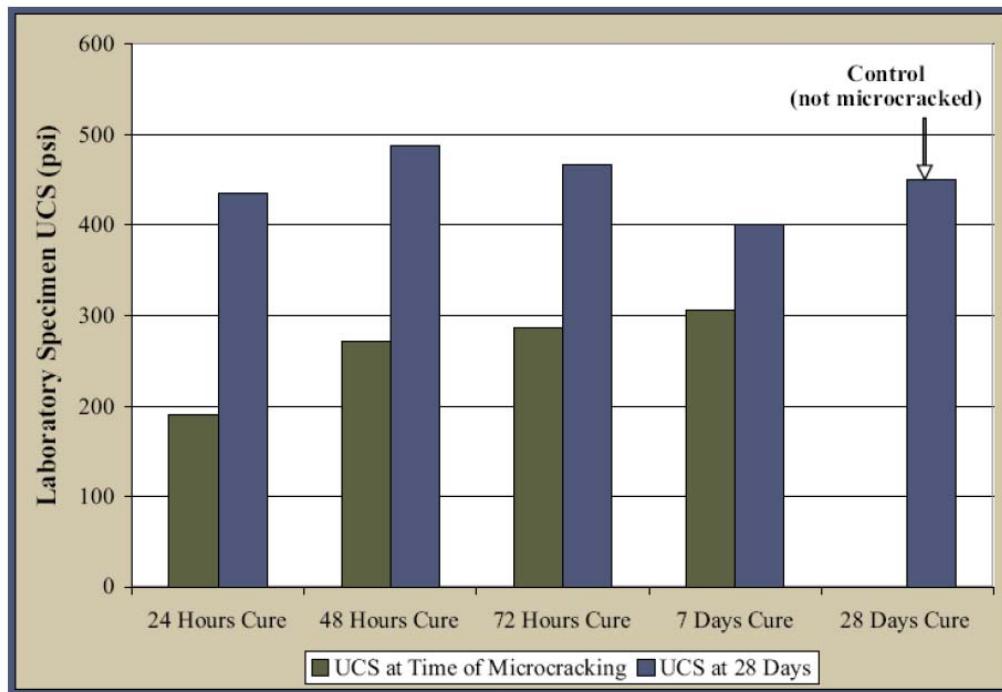
Figure 2. Microcracking of Soil-Cementin Edelweiss subdivision, Oct 2000.



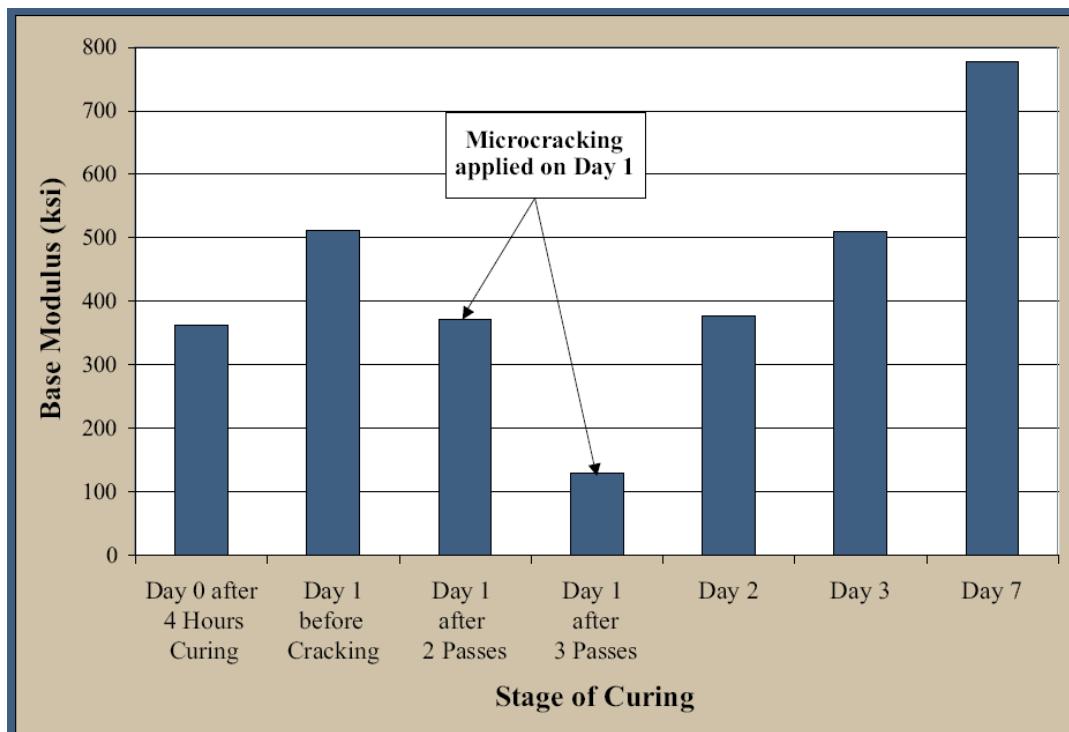
Mynd 20 - Myndir af brotvöltun, úr skýrslu um samanburðartilraun.

- Introduces a network of microcracks into base to avoid major shrinkage cracks.
- First proposed in Austria in early 1990's
- Heavy Steel wheel vibratory roller applied to base 1-2 days after compaction followed by 2 days moist cure.

Á efta súluritinu (Sebesta & Scullion, 2004) má sjá mismunandi 28 daga styrk eftir því hvenær brotvöltun fer fram. Hér sést að mesti 28d styrkur næst með brotvöltun 48 tímum eftir festun. Neðra súluritið, sem er fengið úr bækling vegagerðarinnar í Texas (Microcracking - Texas Transportation Institute, 2006) sýnir þróun styrk sýnis sem er brotvaltað 24 tímum eftir festun. Þar sést að 2 dögum eftir broti hefur sýnið náð upphaflegum styrk fyrir brot.



Mynd 21 - Súlurit, sýni brotin á mismunandi tímum. Samanburður á 28d styrk.



Mynd 22 - Styrkur sýnis sem brotið er eftir 24 tíma hörnun.