VERKEFNI ÞETTA ER AÐ HLUTA TIL STYRKT AF
BYGGÐARÞRÓUNARSJÓÐI EVRÓPUSAMBANDSINS

ROADEX III
NORTHERN PERIPHERY

Andrew Dawson, Pauli Kolisoja

HJÓLFARAMYNDUN Á FÁFÖRNUM VEGUM

Samantekt

Hjólfaramyndun á fáförnum vegum
SAMANTEKT

Júlí 2006

Andrew Dawson
Nottingham Centre for Pavement Engineering

Pauli Kolisoja
Tampere University of Technology

Þýðandi: Sverrir Örvar Sverrisson
Vegagerðin Reykjavík

FORMÁLI

Skýrsla sú er hér gefur að líta er samantekt af ROADEX II skýrslu um “Permanent Deformation” frá árinu 2005. Markmið hennar er að vera leiðbeiningar og útskýra ástæður þess að hjólför myndast á fáförnum vegum. Markmið skýrslunnar er að veita ráðleggingar til eigenda vega, og þeirra er sjá um þá, um aðferðir sem má beita við hönnun nýrra og endurbyggðra vega til þess að komast hjá hjólfaramyndun og hvernig má meta hvort að hjólför myndist í núverandi slitlögum.

Skýrslunni er ekki ætlað það hlutverk að koma í stað fræðirita, leiðbeininga eða staðlabóka sem til eru um málefnið. Vonir standa þó til þess að efni skýrslunnar veiti lesandanum meiri skilning á vandamálum og lausnum og sérstaklega mikilvægi þessa málefnis vandamáls sem svo margt er á huldu um.

Skýrslan var skrifuð af Andrew Dawson hjá Nottingham Centre for Pavement Engineering við University of Nottingham Englandi og Pauli Kolisoja frá Tampere University of Technology, Finnlandi. Ron Munro veitti leiðsögn og hélt utan um verkið sem stjórnandi ROADEX III verkefnisins. Mika Pyhähuhta frá Laboratorio Uleåborg hannaði útlit skýrslunnar.

Höfundur vill þakka ROADEX III stýrinefndinni fyrir stuðning og leiðbeiningar við gerð þessarar skýrslu.

Copyright © 2006 Roadex III Project

All rights reserved.

ROADEX III Lead Partner: The Swedish Road Administration, Northern Region, Box 809, S-971 25 Luleå. Project co-ordinator: Mr. Krister Palo.

EFNISYFIRLIT

FORMÁLI 3

1 INNGANGUR 6

2 HJÓLFARAMYNDUN 7

2.1 ALMENNT 7

2.2 GERÐ 0 8

2.3 GERÐ 1 9

2.4 GERÐ 2 10

2.5 GERÐ 3 11

2.6 SAMVERKANDI GERÐIR 11

3 MALARLÖG 13

4 ÁHRIF VEÐURFARS 15

4.1 ÚRKOMA 15

4.2 FROST 15

5 RANNSÓKNIR Á TILRAUNASTOFU OG GREINING 17

5.1 RANNSÓKNARAÐFERÐIR 17

5.2 EFNI 18

5.3 PRÓFUNARAÐFERÐIR 18

5.4 NIÐURSTÖÐUR PRÓFANNA 18

Stífleika hegðun 18

Formbreytingar hegðun 19

5.5 GREINING VEGAR 20

5.6 NIÐURSTÖÐUR GREININGARINNAR 20

Athuganir á hjólfaramyndun í burðarlagi (Gerð 1) 20

Athuganir á hjólfaramyndun í undirlagi (Gerð 2) 21

6 EINFÖLDUÐ AÐFERÐ TIL AÐGERÐA 22

7 STYRKING VEGA **25**

8 LOKAORÐ **26**

1 Inngangur

Á norðurjaðarsvæðunum eru malarslitlög eða þunn bundin slitlög mjög algeng. Venjulega eru vegir þessir byggðir úr einu eða fleiri lögum af muldu efni sem lagt er ofan á jarðveginn (mynd 1.1). Yfirborð veganna er annaðhvort möl eða þunn bikklæðing sem í er blandað steinum af svipaðri stærð. Í báðum tilfellum skapa malarlögin mestan hluta burðar vegarins.

Mynd 1.1 Þversnið vegar með þunnri klæðingu (Mörkin milli burðarlaga eru merkt með málningu) (mynd: S Erlingsson)

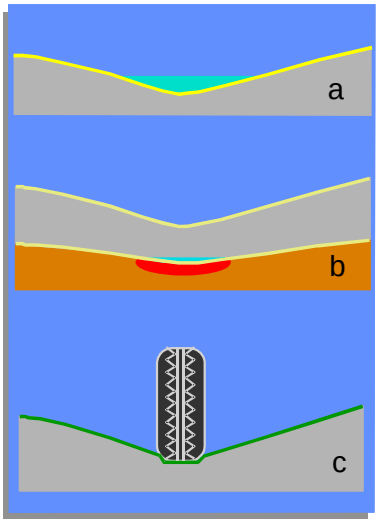
Samanþjöppuð möl er sveigjanlegt efni. Ef það er of veikbyggt hefur það tilhneigingu til þess að formbreytast eða afmyndast, þar sem örlítil afmyndun verður undan hverju hjóli er fer yfir það. Smátt og smátt safnast þessi afmyndun saman og hjólför byrja að myndast. Þessi hegðun á sér stað í öllum lögum vegarins. Mest er myndun hjólfara þegar álag undan hverju hjóli er mikið.

Skýrsla þessi miðar að því að sýna fram á af hverju hjólför myndast, þá þætti sem hafa áhrif á það ferli og hvernig veghaldarar og aðrir sem sjá um viðhald vega geta tekið á því svo að áhrif þess minnki.

2 Hjólfaramyndun

2.1 ALMENNT

Venjulega eru hjólför óboðinn gestur á vegyfborði og fyrir því er margar ástæður (sjá mynd 2.1). Hjólför valda vegnotendum vandamálum með því að auka eldsneytiseyðslu og hættuna á að missa vegrip (á vatni og í hálku) – sjá mynd 2.2. Þau valda einnig veghaldara vandamálum þar sem vatn smýgur frekar niður í veginn ef það liggur í hjólförum, í stað þess að fljóta af yfirborðinu, og leiðir þetta til hraðara niðurbrots vegarins. Það vatn sem nær að smjúga inn í veginn á þennan hátt getur safnast saman í 'undirliggjandi hjólfar' í jarðveginum, (sjá mynd 2.1) og/eða dregur úr burðarþoli burðarlaganna. Þetta seinasta atriði er umfjöllunarefni þessarar skýrslu.



Mynd 2.1. Ástæður þess að myndun hjólfara er óæskileg: (a=vatn í hjólfari hefur áhrif á umferð; b=vatn er smýgur í neðri lög veikir þau; c=aukið dekkjaslit)

Auk þessa getur hjólfaramyndun í burðarlögum og/eða í jarðvegi leitt til skemmda í bundna slitlaginu (Mynd 2.3). Óbein áhrif hjólfaramyndunar geta verið að þau myndast ekki jafnt eftir veginum og skapa ójöfnur sem valda ökumönnum óþægindum.

Meiri mótspyrna myndast við vegg dekksins er leiðir til aukinnar eldsneytiseyðslu og meira dekkjaslits.

Mynd 2.2. Vatn safnast saman í hjólfari þunnrar klæðingar

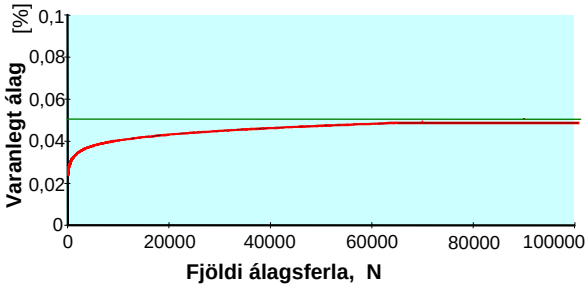
Mynd 2.3. Hjólfaramyndun í burðarlögum leiðir til slitlagsskemmda

Margar ástæður geta legið að baki hjólfaramyndun. Í grunninn eru fjórir þættir er valda hjólförum sem hér eru kallaðir gerðir 0, 1, 2 og 3. Í raunveruleikanum myndast hjólför oftast vegna samverkandi áhrifa þáttanna. Hér er hver þáttur fyrir sig skoðaður.

2.2 GERÐ 0

Þjöppun efnis í veginum getur valdið hjólförum (mynd 2.4). Venjulega er talið nóg að þjappa efnið áður en umferð er hleypt á veginn. Auk þess nær þessi þáttur jafnvægi – þ.e.a.s þjöppun undan umferð kemur í veg fyrir frekari samþjöppun (mynd 2.5). Þjöppun efnisins veldur því líka að efnið stífnar og dreifir því þunganum betur. Betri þungadreifing leiðir til þess að minna álag verður á undirliggjandi jarðveg og dregur þar með úr hjólfaramyndun og hættunni á hjólfaramyndun þar.

Mynd 2.4. Gerð 0 Hjólfaramyndun – aðeins þjöppun malarlaga.



Mynd 2.5. Varanleg álagsþróun í möluðu granodiorite

Þessa gerð hjólfaramyndunar má sjá á yfirborði vegar sem litla sigdæld (mynd 2.4). Efnið sem verður fyrir áhrifum er mestmegnis nálægt hjólfarinu. Af þessari ástæðu er takmörkuð myndun hjólfara að þessu tagi af hinu góða. Góð þjöppun lágmarkar hjólfaramyndun.

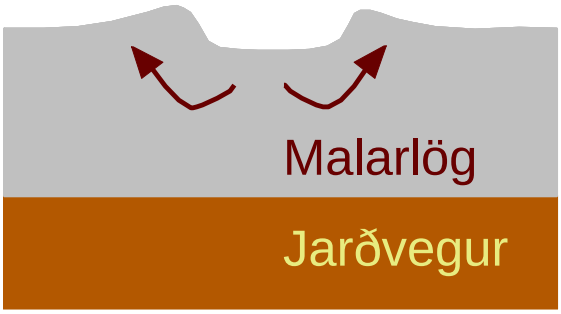
Í þeim héruðum sem verða fyrir hvað mestum kulda hvern vetur veldur frost og raki frostlyftingu. Nýjustu rannsóknir sýna að þó að frostlyftingin verði oftast í undirliggjandi jarðvegi getur hún einnig átt sér stað í burðarlögum og þá sér í lagi þar sem vatn hefur áður smogið inn í óbundið burðarlag. Lyftingin veldur því að losnar um malarlög. Á vorin, þegar burðarlögin og jarðvegurinn þiðnar, verður meiri þjöppun möguleg sem veldur hjólfaramyndun að gerð 0. Náttúrulegur breytileiki undirliggjandi jarðvegs leiðir til breytilegrar lyftingar í langsniði vegarins og þar af leiðandi breytilegrar hjólfaramyndunar.

Brúnamyndanir (fjallað um að neðan sem gerð 1) má tengja við vorþíður þar sem laus möl er mun veikari en þegar hún er vel þjöppuð. Getur þetta leitt til mikilla hjólfara eftir nokkur vorþíðutímabil.

2.3 GERÐ 1

Í veikari malarlögum, getur staðbundin brún myndast við hjólið. Þetta leiðir til lyftingar til hliðar við hjólfarið (mynd 2.6). Svona hjólfaramyndun er að mestu leyti afleiðing ónógs skriðstyrks í malarlögum nálægt yfirborði vegarins. Reynsla frá tilraunaköflum og rannsóknir hafa sýnt fram á að hámarks skriðhreyfing verður á dýpi sem samsvarar 1/3ja af breidd dekks (eða breidd tvöfalds dekks þar sem slíkt er notað) – þ.e.a.s á dýpinu ⊄15-20 cm. Á vegum þar sem engin greinileg stýring er á umferð (breiðar akreinar, engar yfirborðsmerkingar, vegir án hjólfara) getur dýptin verið örlítið meiri. Á vegum sem hafa frekar þykkt biklag er þessi dýpt líkleg til að liggja örlítið dýpra en einn þriðja af dekki vegna þeirra áhrifa biksins að breyta álagsdreifingu innan vegbyggingarinnar.

Myndir 2.7 og 2.8 sýna skoskan veg sem sýnir merki álagsskemmda. Takið sérstaklega eftir lyftingu axlarinnar sem er algeng í þessum tilfellum. Svona vegir geta litið út eins og sá á mynd 2.9. Hér er staðbunda skriðið er veldur ‘öxlinni’ greinilegt. Ekki er hægt að sjá að afmyndun eigi sér stað í jarðveginum (gulu línurnar hafa verið sprautaðar á til þess að skýra mörkin í myndinni).

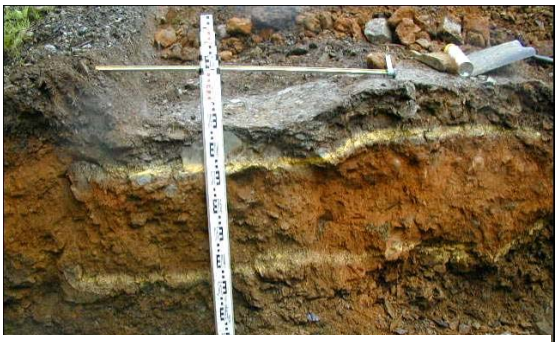


Mynd 2.6.Gerð 1 Brúnamyndun hjólfars í malarlögum vegar, nálægt yfirborði.

Mynd 2.7. Skoskur skógarvegur með hjólfaramyndun af gerð 1 (mynd: W Tyrrell)

Mynd 2.8. Nærmynd af hjólfari á skoskum skógarvegi. (mynd: W Tyrrell)

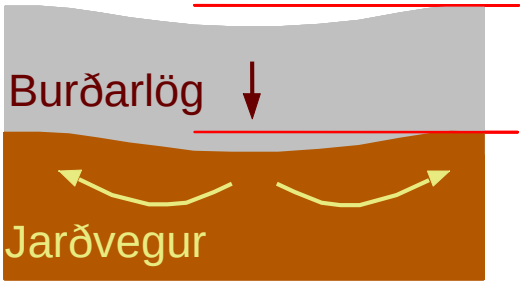
Engin hjólfaramyndun ætti að vera greinanleg í undirliggjandi jarðvegi í þessari gerð. Þessi gerð hjólfaramyndunar er algeng í norðrinu á svæðum sem búa við árstíðabundið frost. Í mörgum tilfellum er þessi gerð líkleg til að vera aðal valdur samsöfnunar hjólfara þegar mölin er léleg af gæðum. Sérstaklega þegar dregur úr burðarþoli yfir styttri tíma þegar á vorþýðum stendur og raki er of mikill í burðarlögunum. Hinn hluta ársins er sama efnið, endurþjappað (sjá gerð 0 fyrir ofan) og í réttu rakaástandi, mjög líklegt til að sýna ásættanlega frammistöðu.



Mynd 2.9. Þversniðsmynd af veginum úr myndum 2.7 og 2.8. (Mörk laga merkt með málningu) (mynd: W Tyrrell)

Það eina sem getur komið í veg fyrir slíka hjólfaramyndun er að bæta malarlögin eða að draga úr álagi því er stafar af dekkjum. Að skipta út jarðvegi hefur engin áhrif á þessa gerð hjólfaramyndunar. Malarefnið er hægt að bæta með þjöppun (innan marka), með því að koma því í jafnvægi, með notkun styrkinga með gerfiefnum (geosynthetic reinforcement) eða með því að bæta ástandið sem stjórnar hegðun þess – t.d. með endurbótum á afvötnun. Skýrsla sú sem þessi samantekt er unnin upp úr býr yfir frekari upplýsingum um þessi atriði [sjá Dawson & Kolisoja, 2005]. Ef ekkert af þessum aðgerðum skilar árangri getur verið nauðsynlegt að skipta út malarlögunum. Einnig má reyna að lækka loftþrýsting í dekkjum.

2.4 GERÐ 2



Mynd 2.10. Hjólfaramyndun af gerð 2 – Afmyndun vegna skriðs í jarðvegi þar sem malarlagið fylgir jarðveginum.

Mynd 2.11. Áberandi hjólfaramyndun af gerð 2 í sundurgröfnum vegi er liggur á mjög veiku undirlagi. (mynd: W Tyrrell)

Þar sem gæði malarlaga eru betri getur myndast hjólfar í vegbyggingunni sem heild. Mynd 2.10 skýrir út hvernig undirliggjandi jarðvegur afmyndast á meðan malarlögin hreyfast með (án nokkurrar þynningar). Yfirborðseinkenni slíkrar hjólfaramyndunar er breitt hjólfar með örlitla ýfingu yst (þar sem það er hreyfing jarðvegs sem veldur þessu). Öfgakennt dæmi um þessa gerð skemmdar má sjá á mynd 2.11. Í þessu tilfelli hefur yfirborðshjólfarið verið endurfyllt en hjólfaramyndun í jarðveginum hefur haldið áfram og malarlögin fylgt með. Jarðvegurinn hefur orðið að þrýstast upp milli hjólfarsins og jaðarins – mjög skýrt dæmi um skrið innan jarðvegar, sýnt með örvum á mynd 2.10.

Á svæðum sem búa við djúpstætt árstíðabundið frost getur vorþíðuvandamálið, sem áður hefur verið fjallað um, leitt til hjólfaramyndunar af gerð 2 í jarðvegi. Í slíkum tilvikum getur verið að hjólfaramyndunar af gerð 2 verði aðeins vart á vorin þegar jarðvegur linast í nokkrar vikur vegna of mikils raka sem myndast vegna þíðunnar.

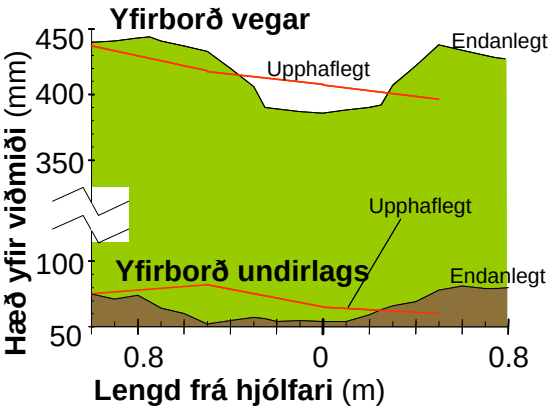
Lausnin til að losna við slíka hjólfaramyndun er bæta eða þykkja malarlögin þannig að álagið dreifist betur og minnkaa þar með álagið á jarðveginn. Önnur aðferð er að setja öxulþungatakmarkanir (ekki álag undan hverju dekki) þar sem öxulþungi er aðal álagsvaldur á undirliggjandi jarðveg.

2.5 GERÐ 3

Slitskemmdir (t.d. rof eða slit, kannski vegna nagladekkja) getur valdið sömu yfirborðseinkennum og sjá má í gerð 0 (mynd 2.4) þrátt fyrir að ferlið sé náttúrlega allt annað. Ef of mikið af fínefni myndast á yfirborði geta loftæmin í malarlögunum stíflast og þau orðið rakadrægari.

2.6 SAMVERKANDI GERÐIR

Í raunveruleikanum er hjólfaramyndun afleiðing samverkandi áhrifa allra ofangreindra gerða. Gögn úr uppgröfnum tilraunaköflum í Skotlandi sýndu bæði þynningu malarlagana (gerð 1) og sig jarðvegar (gerð 2) – sjá mynd 2.12. Staðbundin ýfing (eða ‘öxlin’) nálægt hjólfarinu er greinileg og eins að jarðvegurinn er minna siginn en yfirborð vegarins



Mynd 2.12. Hjólfar í sundurgröfnum vegi

Búast má við því og víða er það greinilegt að gerð 1 er líklegri að myndast þar sem ekið er í sömu förunum (t.d. eins og er í tilviki margra skógarvega), þar sem akstur upp úr förunum færir ekki til baka, eða þjappar, mölina (gerð 0). Aftur á móti ætti gerð 2 að vera meira áberandi þar sem umferð er ekki í ákveðnum förum og líklegra að gerð 0 eigi þátt í hjólfaramyndun þar sem “hnoðun” dekkja sem aka ekki í förum er virkara sem samfelld þjöppun.

3 Malarlög

Burðarlög vega sem rætt er um í þessari skýrslu eru næstum því eingöngu byggð upp af þjöppuðu, kornóttu, malarkenndu efni. Efni þetta er komið úr áreyrum, jökulsöndum, malarnámum eða grjótnámum (myndir 3.1 – 3.4) og síðar mulið að hluta eða að fullu. Oft þýða langar vegalengdir frá framleiðslustöðum malarefna að þrýstingur er á að finna efni nær framkvæmdarsvæði, til að draga úr kostnaði. Undir slíkum kringumstæðum getur verið að efnið sem notast er við sé ekki í háum gæðaflokki.

Mynd 3.1. Jökulborið malaefni sem verið er að grafa úr jökulruðningi, Svíþjóð.

Mynd 3.2. Myndbreytt berg í grjótnámu (greywacke-shale) í Balunton, Skotlandi. (mynd: W Tyrrell).

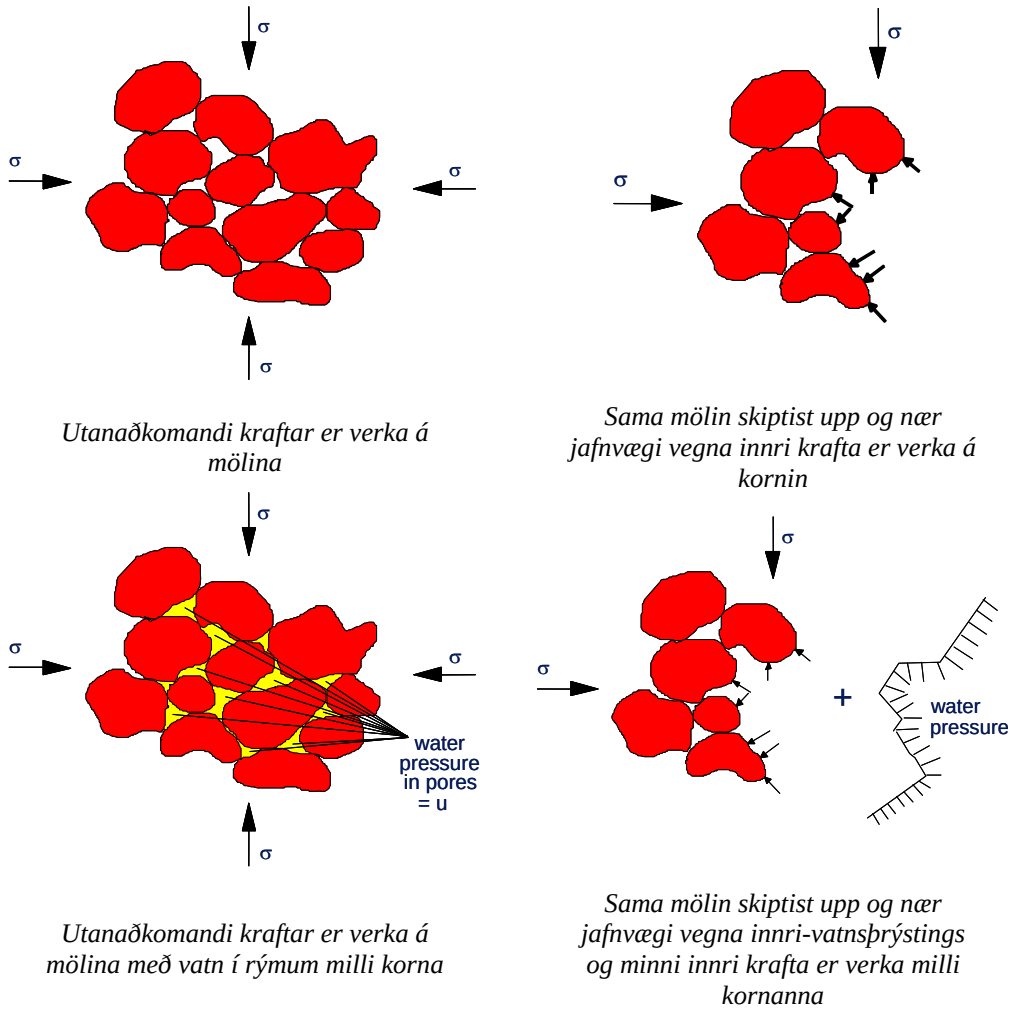
Mynd 3.3. Möl úr áreyri eftir hlutmölun.

Mynd 3.4. Hlutmöluð áreyrarmöl á vegi sem ekki hefur verið lagður bundnu slitlagi.

Vegna þess að möl er jarðefni býr það yfir sömu takmörkunum og annar jarðvegur – sérstaklega er þar átt við veikingu vegna of mikils vatns í rýminu milli kornanna. Undir umferðarálagi skapast þrýstingur í vatninu og þessi þrýstingur í rýminu milli kornanna vinnur gegn álaginu sem heldur kornunum saman (mynd 3.5). Afleiðingin er að sambindikraftarnir milli kornanna verða ekki eins miklir og þeir gætu verið.

Auk þess er núningskraftar milli kornanna minni en nægjanlegt getur talist sem þýðir að dregur úr núningsstyrk og mótstöðu gegn afmyndun frá ásættanlegu ástandi. Þannig má segja að vatn í rýmunum á milli kornanna getur breytt hágæða malarefni í lélegt efni.

Annað áhyggjuefni snýst um stærð malarkornanna sem mynda malarlagið. Ef steinarnir eru stórir þá er tilhneiging til þess að rýmin á milli þeirra séu einnig stór. Vatn rennur auðveldlega á milli þeirra og þar af leiðir að mótstaða gegn hjólfaramyndun, jafnvel í töluverðri bleytu, er venjulega nokkuð góð. Á hinn bóginn er tilheiging hjá fínkornóttu efni til þess að halda í sér vatni (jafnvel draga að sér vatn inn í rýmin með hárpípukröftum) og þar af leiðandi eru slík efni léleg í votu veðurfari, sérstaklega á meðan frost er að fara úr jörðu.



Mynd 3.5. Mikilvægi lágs vatnsþrýstings til þess að tryggja gott kraftajafnvægi milli korna og þar af leiðandi góð núningseinkenni.

4 Áhrif veðurfars

Veðurfar hefur töluverð áhrif á allar byggingarframkvæmdir á norðurjaðarsvæðunum. Engin undanþága er gerð vegna vegalagningar frá þessari reglu. Tveir þættir eru aðaláhyggjuefni:

4.1 ÚRKOMA

Regnvatn hefur tilhneigingu til þess að smjúga inn í vegbygginguna. Í fínkornóttum malarlögum hjálpa hárpípukraftar við að draga vatnið inn í veginn. Þessi áhrif geta verið minni þegar yfirborðinu er lokað með biki, en sprungur myndast auðveldlega í slíkum slitlögum og þá á vatnið greiða leið inn. Það er ómögulegt að forðast þetta vandamál algerlega en með grófgerðri möl, miklum vatnshalla (>4%) og bundnu slitlagi (eða malarslitlagi með þjöppuðu fínefni í yfirborði) er hægt að takmarka innstreymi regnvatns. Afvötnun er einnig mikilvægt. Flestir vegir eru byggðir með einhverskonar afrennsli, oft vegrás. Takmarkað fjármagn getur valdið því að viðhaldi er ekki sinnt og með tímanum hættir afrennslið að virka sem skyldi. Það er næsta víst að ákveðið “það sem ekki sést þarf ekki að hafa áhyggjur af” hugarfar stýrir þessum brest í athygli. Önnur ROADEX II skýrsla [Berntsen et al, 2005] tekur á afvötnun og skýrir þessi atriði af meiri nákvæmni. Einnig er til samantekt um afvötnun af sama tagi og þessi sem hér gefur að líta [Aho & Saarenketo, 2006].

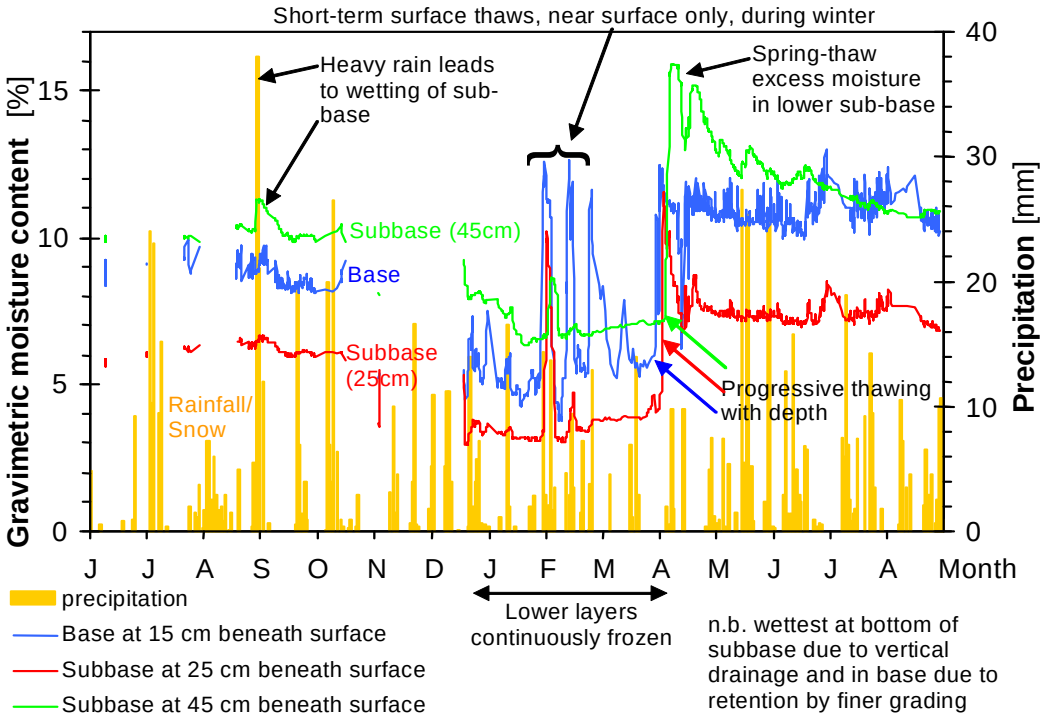
4.2 FROST

Í köldu veðri frýs vatn innan vegbyggingarinnar. Þegar frostið færist neðar í vegi, yfir langa frostakafla, myndast sog er dregur vatn að því efni sem frosið er. Þetta þýðir að of mikið vatn safnast saman í veginum sem ís. Þegar vorþíður hefjast vill þetta vatn festast inn í rýminu milli kornanna og kemst ekki út þar sem afrennsliskerfið er enn frosið. Enn og aftur getur mögulegt ráð verið grófgerðara malarefni, þar sem sogkraftar eiga erfiðara með að myndast í því. Sérstaklega getur grófgert malarefni í neðsta lagi virkað sem hindrun á hárpípuáhrif og stöðvað það ferli að vatn sogist að frosnum efri lögum.

Í báðum tilvikum er vandamálið að vatnið dregur úr núningsstyrk (mynd 3.5) og veldur þar af leiðandi hraðari og/eða verri hjólfaramyndun.

Mynd 4.1 sýnir hitastig, rigningarmagn og rakastig í veginum. Áhrif frosts og mikils rakainnihalds strax eftir þíðu er greinilegt. Áhrif mikilli votviðra má einnig sjá sem tímabundna aukningu í rakainnihaldi vegbyggarinnar. Einnig má sjá að hátt

fínefnainnihald í undirliggjandi lögum leiðir til hærra rakainnihalds yfir höfuð og meiri mótstöðu gagnvart því að vegurinn þurkki sig eftir að mikill raki myndast.



Mynd 4.1. Umhverfisgögn fyrir veghluta yfir 14 mánaða tímabil er sýnir samfellda mælingu á rakainnihald (free gravimetric moisture content), mælt með TDR mæli á þremur dýptum, ásamt úrkomumagni. [COURAGE, 1999]

Mynd 4.1 gefur til að kynna að, jafnvel yfir vetrartímann, er eitthvað ófrosið vatn í veginum, allt að 5%. Þessi tala er næsta víst ónákvæm vegna takmarkana í tækjabúnaði og túlkunaraðferðum. Ófrosið vatn ætti í raun að vera minna en 0,5% af rúmmáli jarðvegar.

5 Rannsóknir á tilraunastofu og greining

Markmið rannsóknarinnar er eins og áður sagði að veita ráðleggingar til veghaldara og þeirra er sjá um vegi um aðferðir til viðhalds og efnisvals sem geta tryggt betri frammistöðu vega og jafnframt skýrt út hvað getur valdið slakri frammistöðu. Miðað er að því að þróa einfalda matsaðferð til þess að meta líkurnar á afmyndun vega. Þetta er gert til þess að veghaldarar eigi greiðan aðgang að aðferð til þess að meta núverandi vegi, til þess að styrkja hönnun, til þess að tölvuhanna opinbera fáfarna vegi og skógarvegi í einkaeign og til þess að setja viðeigandi þungatakmörk þegar vegir eru í slæmu ástandi.

Til þess að ná þessu markmiði var ákveðið að nota gögn um margar gerðir malarefna og úr mörgum verkefnum. Auk þess voru prófuð tvö malarefni með mismunandi kornastærð og rakainnihaldi til samanburðar. Niðurstöðurnar voru notaðar til þess að reikna álagsaðstæður í veginum miðað við hefbundna þungaumferð og út frá þessu var hægt að meta líkunar á hjólfaramyndun.

5.1 RANNSÓKNARAÐFERÐIR

Rannsóknaraðferðirnar fólust að mestu í því að:

- prófa malarefnið til þess að finna út hvaða áhrif álag hafði á það,
- nota niðurstöðurnar er fengust til þess að reikna álag í vegi byggðum úr því malarefni,
- greina þá hluta vegbyggarinnar sem myndu afmyndast varanlega,
- reikna hversu mikið af veginum myndi afmyndast undir álaginu, og þar af leiðandi mynda hjólför,
- tengja niðurstöður einfaldra matsaðferða við þær sem komu úr prófunum á malarefninu í verkefninu. Þetta var gert til að hægt væri að meta vegbyggingarefnið eða undirliggjandi jarðveg með tilliti til hjólfaramyndunar án þess að þurfa að leggjast í viðamiklar tilraunaprófanir,
- draga almenna niðurstöðu úr niðurstöðum rannsóknar og móta tillögur, sérstaklega er lúta að þróa hönnunar og matsferla.

Ekki gefst rými hér í þessari samantekt til þess að kynna öll smáatriði þessarar vinnu. Auk þess væru þær upplýsingar líklegar til þess að skyggja á það markmið að veita skýrt yfirlit. Þess vegna er lítið um smáatriði í hér og er lesendum bent á frumskýrsluna [Dawson & Kolisoja, 2005], sem samantektin er unnin upp, úr ef þá fýsir að vita meira um prófanir og greiningu.

5.2 EFNI

Tvö malarefni voru prófuð sérstaklega vegna þessa verkefnis. Annað var myndbreytt malarefni í meðalgæðum og hitt var hágæða norskt malað efni. Auk þess hafa höfundarnir nýtt sér gögn um önnur efni, frá nokkrum löndum, m.a þau sem notuð eru við mælistöð er fylgist með umhverfis- og vegástandi ('Percostation') í norður Finnlandi. Þegar gögnin eru tvinnuð saman taka gögnin yfir breitt svið jarðfræðilegs uppruna, kornastærðar, berggæða, forms o.s.frv. Meirihluti efnana ,sem skýrslan dregur niðurstöður af, á sér uppruna í möluðu bergi, en eitthvað af sand- og malargerðum hafa líka verið kannaðar. Efnin voru prófuð við ýmist rakainnihald og kornastærðir á meðan sum voru prófuð eftir frost og þýðu ferla.

5.3 PRÓFUNARAÐFERÐIR

Algengast prófið sem notað var endurtekið þríöxla álagspróf (repeated load triaxial test) er mælir þróun varanlegrar afmyndunar. Þetta er rannsóknartæki getur líkt eftir áhrifum umferðar þúsunda bifreiða yfir malarlag. Hermirinn getur náð þessum áhrifum á nokkrum klukkustundum. Efninu má halda í álags- og rakaaðstæðum svipuðum þeim sem finna má í vegi. Próf voru gerð á mismunandi efni, við mismunandi rakastig, sum eftir frost og þíðu ferla, og við mismunandi álagsstig – þar sem hver álagspúls var endurtekinn oft. Nokkur önnur próf voru gerð m.a styrk og stífleika (modulus) próf, skiljupróf (grading tests), þjöppunarpróf og tvískauta rafleiðni próf (dielectric gildi mælt með Tube suction tækinu).

5.4 NIÐURSTÖÐUR PRÓFANNA

Niðurstöður prófanna sýna að rafleiðnigildið getur gefið óbeina vísbendingum um frammistöðu efnis. Með tilliti til þessa er lagt til að miðað sé við rafleiðnigildi (Saarenketo, et al. 1998) sem útilokar að lélegasta malarefnið sé notað í vegagerð. Gildi >9 eru líklega tengd slakri mótstöðu gagnvart varanlegri afmyndun. Leiðir þetta að öllum líkindum til óásættanlegrar hegðunar á svæðum er búa við frost-þíðu ferla yfir vetrartímann. Gildi >16 er örugglega tengd við efni er búa yfir lélegri mótstöðu gagnvart formbreytingu í öllu loftslagi.

Stífleika hegðun

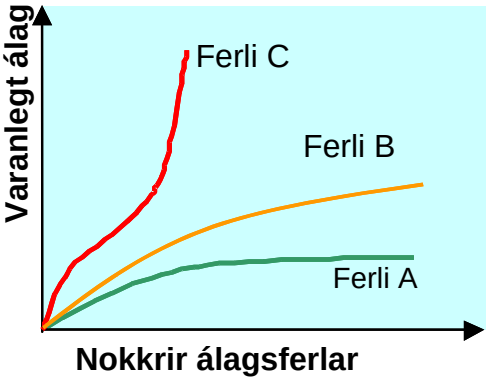
Prófið sýndi mjög greinilega breytingu í hegðun með auknu hlutfalli fínefna og auknum raka. Það kom í ljós að efni með fínni kornum náðu mun hærra vatnsinnihaldi vegna þess að fínni rýmin milli kornanna náðu að halda í sér meira vatni en grófgerðara efni.

Eftir því sem meira vatn er sett í sýni dregur úr stífleika efnisins. Þetta þýðir í raun að fínefni hafa tilhneigingu til þess að vera blautari og burðarlög í vegi er

samanstanda af slíkum efnum dreifa álagi illa. Auk þess veldur þetta því að álagið á undirliggjandi jarðveg verður meira. Meira álag á jarðveginn leiðir til aukningar í hjólfaramyndun í honum (skemmd af gerð 2 eins og lýst var í kafla 2).

Formbreytingar hegðun

Þegar vegur lendir í mörgum álagsferlum, eins og gerist þegar umferð fer um veg, safnast afmyndun saman smátt og smátt. Mynd 5.1 sýnir viðbrögð sem greinanleg voru. Hegðunarferli A er hagstæðast, þar sem afmyndun (er sést á vegyfirborðinu sem hjólfaramyndun) byrjar en stöðvast svo. Það stig afmyndunar, (hjólfaramyndunar) sem verður í hegðunarferli A áður en jafnvægi er náð, er mjög háð því hversu mikið vatn er í efninu.



Mynd 5.1.Möguleg varanleg álagshegðun

Greining og reynsla af vegum byggðum úr möl sýna að fá, ef nokkur, malarefni sýna hegðunarferil A þegar umferð er um veginn. Þess í stað er B ferillinn líklegri fyrir ágæta malarvegi eða vegi með þunnri klæðingu. Ferill A getur átt sér stað í vegum með þykku malbiki (t.d. > 80mm). Takmark verkfræðings er vinnur með malarveg eða þunna klæðingu ætti því að vera að reyna að ná hegðunarferli B, ekki ferli C sem leiðir til hraðs niðurbrots vegarins. Auk þessi þarf verkfræðingurinn að halda ferli B eins flötu og mögulegt er og þar með lengja líftíma vegarins.

Það kom í ljós að nálægð við það ástand að efnið gefi eftir er mjög mikilvægt í afmyndun þess. Þegar ákveðið álag var oft lagt á á efnissýni varð það fyrir ákveðinni afmyndun. Þegar efni í sama rakaástandi og kornastærð var látið gangast undir hærra endurtekið álag var afmyndun enn meiri. Það kom því í ljós að afmyndun í efni hleðst upp í nokkuð beinu samhengi við álagsþröskuld efnisins, sem samvarar því að það gefi eftir undan einu álagsferli.

Þegar gögn úr rannsókn þessari á efnum og önnur gögn eru tekin saman má sjá að afmyndun í efni eykst:

- Þegar efnið verður blautara,
- Þegar efnið hefur verið frosið og það þiðnar á ný.
- Þegar álagið nær álagsþröskuldi efnisins.

Þegar litið er til hönnunar, og niðurstöðurnar hér fyrir ofan teknar með í reikninginn, ætti að vera ljóst að tryggja verður að það álag sem hvert svæði malarefnis verður fyrir í veginum sé ekki meira en ákveðið hlutfall álagsþröskuldsins. Fyrri rannsóknir benda til að “deviatoric” (eða skrið) álag sé takmarkað við 70% af álagþröskuldinum sem veldur því að efni gefur eftir í sama ástandi. Gögnin úr þessari rannsókn gefa

til kynna að þetta standist. Samt sem áður gefur efnið, sem var prófað í þessu verkefni, vísbendingar um að mörkin ættu jafnvel að vera lægri ef að á að halda hjólfaramyndun í lágmarki. Ætti að miða við 50-55% þegar malarefnið er mjög blautt og fínefni hindra afrennsli, eða á meðan á þýðutímabilum stendur. Tube Suction niðurstöður er einnig hægt að nota til þess að ákvarða hvort að efnið er 'blautt/fínt' eða 'venjulegt' (þ.e.a.s gildir 50-55% álagsviðmiðið eða 70% viðmiðið?). Niðurstöðurnar gefa til kynna að rafleiðnigildi <9 (oft tengt við tómarúmshlutfall >0.33) sé nothæft til að skilgreina þessi mörk.

5.5 GREINING VEGAR

Styrkgildin (modulus values) sem fundin voru út með prófunum voru notuð í tölvulíkani til þess að spá fyrir um álagsstig í mismunandi gerðum og þykktum vegbygginga. Greiningin var gerð með bikþykktum frá hérumbil núlli (1mm) til 200mm, en einungis niðurstöður þynnri lagana eru raunverulegar nothæfar í þessu verkefni.

5.6 NIÐURSTÖÐUR GREININGARINNAR

Með tölvugreiningu á vegi er mögulegt að reikna álagið innan burðarlaganna. Sá útreikningur er töluvert flókin þar sem malarefni hefur stífleika (modulus) sem veltur á álaginu sem verkar á það og álagið ræðst líka, að hluta, af stífninni, þannig að fjölþáttagreiningar er þörf. Þegar álags og stífleikagildi hafa verið fundin er hægt að meta líklega upphleðslu afmyndunar í vegbyggingarefninu með því að nota gögnin úr endurtekna þríöxla álagsprófinu (repeated load triaxial test data).

Athuganir á hjólfaramyndun í burðarlagi (Gerð 1)

Útreikningarnir sýndu að klæðing þarf að vera þykkara en viðmiðunarþykktin (kannski >4cm) ef það á að ná raunverulegri virkni við að dreifa álaginu og þar með draga merkjanlega úr álagi á neðri burðarlög. Annars virkar það sem lok en er ekki áhrifaríkt í að vernda burðarlögin frá álagi vegna umferðar.

Eins og útskýrt var í kafla 5.4 er nálægð við það stig er efni gefur eftir nátengt myndun hjólfara. Greiningin sýndi að efnið er næst álagsþröskuldi á 10cm eða 15cm dýpi (í kringum 9 og 14cm niður í lagið). Því er þetta dýptin sem hönnuður vegarins verður að minnka álagið á, færa það frá álagsþröskuldinum, til þess að draga úr hjólfaramyndun innan burðarlagsins. Þetta má gera með því að færa álagþröskuldinn (þ.e.a.s bæta ástand malarefnisins með því t.d. að laga afvötnun eða koma efninu í betra jafnvægi) eða með því að leggja þykkari klæðingu til þess að færa álagsþröskuld burðarlagsins neðar.

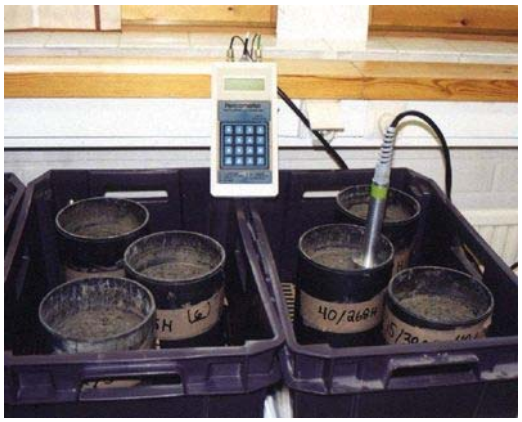
Sem dæmi má nefna að þessari aðferð var beitt á skoskt malarlag. Þegar það var í frekar þurru ástandi með meðal magni af fínefnum var hámarksálag u.þ.b 65% (2cm klæðing) til 80% (1cm klæðing) af álagsþröskuldi. Athuganir á vettvangi á hegðan efnisins sýndu fram á að tilhneiging var til hjólfaramyndunar undan umferð, sérstaklega í votviðri. Með tilliti til reynslunnar frá vettvangi var gefið sér að forsendan 75-80% af álagþröskuldi væri viðeigandi til þess að koma í veg fyrir hjólfaramyndun. Samræmist þetta prósentugildum úr öðrum heimildum.

Athuganir á hjólfaramyndun í undirlagi (Gerð 2)

Þegar malarlagið er gert þykkara þá dregur úr álagi á undirliggjandi jarðveg. Greining var gerð á mismunandi þykktum malarlagsins og álagið á efsta hluta undirlagsins var reiknað miðað við margar mismunandi malartegundir, prófaðar á tilraunastofu. Niðurstöðurnar sýna mjög greinilega að minni raki og minna hlutfall fínefna leiðir af sér efni sem dreifir umferðarþunga betur og dregur þar með úr álagi á undirlagið. Útreikningarnir sýna einnig að þykkt burðarlaganna verður að auka um milli 14% og 73% frá þeirri þykkt sem nokkuð þurr, opin, malarlög þurfa. Aukning í þykkt milli 85% og 92% var reiknað fyrir malarlög sem höfðu verið frosin en höfðu þiðnað. Malarlög með hærra hlutfalli af fínefnum sýndu að svipaðra þykkta var þörf og í tilfelli blautra laga. Þetta sýnir að, hreinni og þurrari efni má nota í þynnri lögum til þess að ná sömu frammistöðu með tilliti til gerðar 2 (undirlags) af hjólfaramyndun. Stundum má allt að helminga þykktina og ná sömu frammistöðu þegar kemur að hjólfaramyndum.

6 Einfölduð aðferð til aðgerða

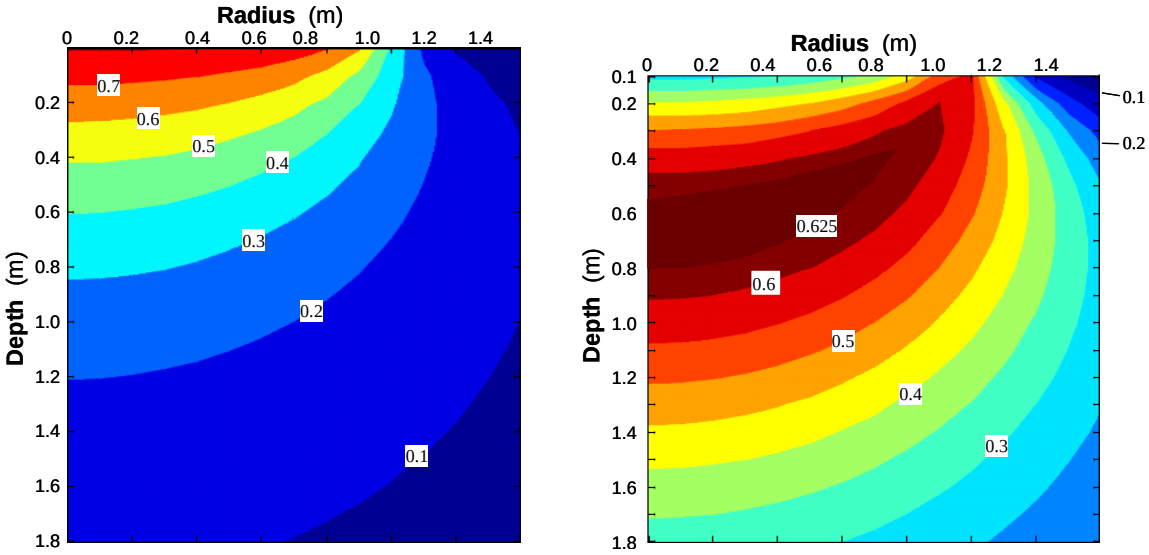
Með því að byggja á niðurstöðum prófana á rannsóknarstofu, tölvugreiningar, áður útgefnu efni og reynslu rannsóknarhópsins var unnt að þróa ferli til þess að hægt væri að notast við niðurstöðurnar. Í raun hefur hér verið þróuð einfölduð aðferð er reynir að sameina grunnskilning um hegðun jarðefna, gerðir hjólfaramyndunar og álagsgreiningar á þann hátt að hagkvæmt sé að nota hana fyrir verkfræðinga á norðurjaðar-svæðunum. Það er mjög ólíklegt að slíkir verkfræðingar hafi tíma, fjármuni, sérfræðiþekkingu eða aðgang að tækjum til þess að takast á hendur rannsókn eins og gert var í þessu verkefni. Þannig að það vinnuferli sem lagt er til er einfölduð útgáfa af aðferðinni sem var kynnt í kafla 5.



Mynd 6.1 Tube Suction próf

Meta á rakadrægni með Tube Suction prófinu (sjá mynd. 6.1) (þó að tómarúms hlutfall megi nota sem fyrsta mat á útþurrkunarhæfni). Malarsýni er þjappað, bleytt og svo leyft að þorna. Ef að rafleiðnigildin (dielectric) úr Tube Suction prófinu eru há eftir þetta þá má gera ráð fyrir slakri frammistöðu efnisins. Hvernig frammistaðan er (góð eða slæm) er hægt að athuga á eftirfarandi hátt.

Til þess að vita hvaða álag er í burðarlögum vegarins, nálægt hjólfari, er hér boðið upp á töflur yfir það álag sem líklegt er að finna í veginum og eiga þessar töflur að koma í stað Finite Element greiningar (mynd 6.2). Notkun þessara taflna er lýst af



Mynd 6.2. Álag (táknað sem hlutfall af loftþrýstingi í dekki)á svæði sem er 1m í radíus
Vinstri = meðalálag. Hægri = deviatoric álag

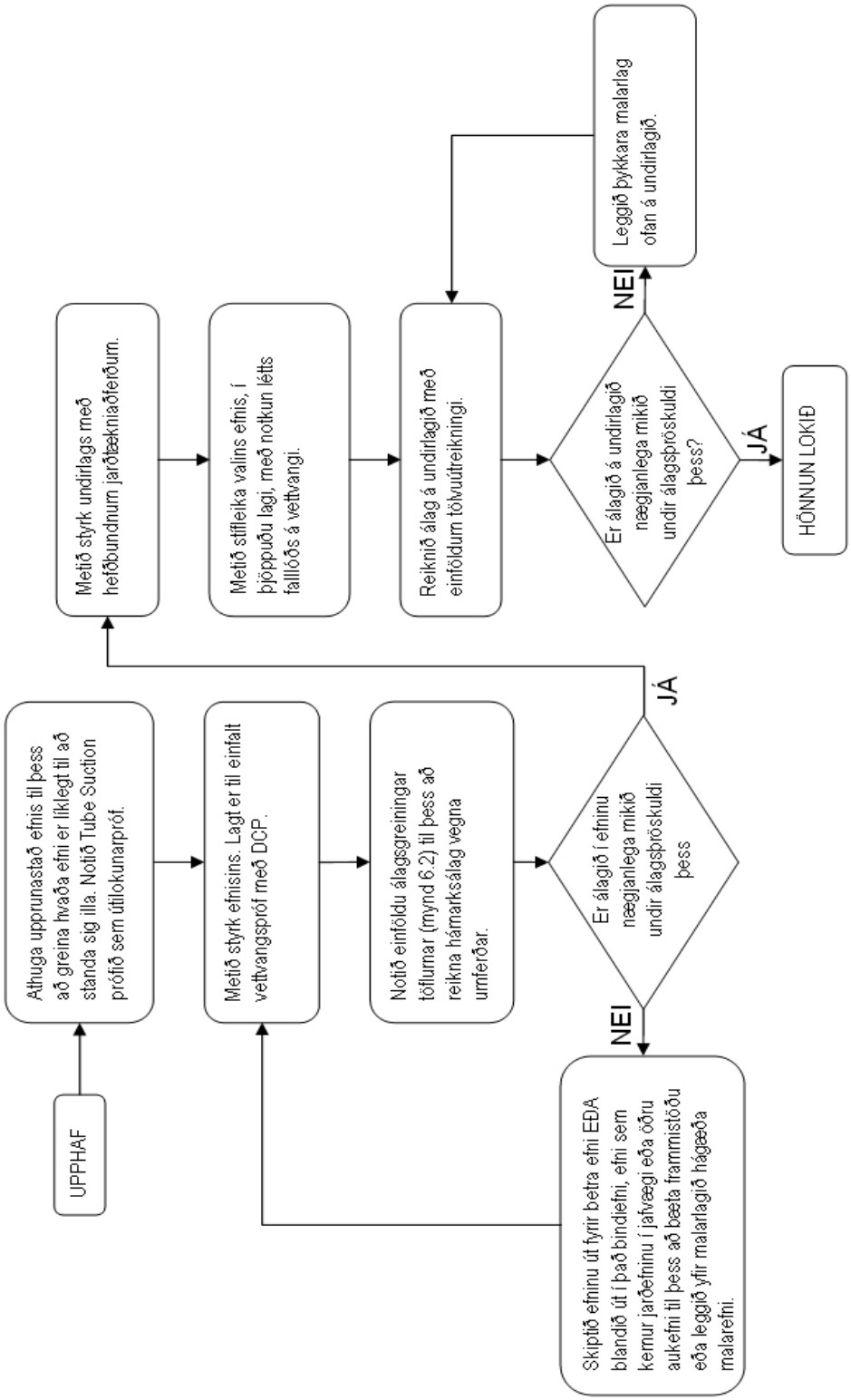
meiri nákvæmni í skýrslu þeirri sem þessi skýrsla hér er samantekt úr [Dawson & Kolisoja, 2005]. Álagsgreining Boussinesq er grunnur taflnanna þar sem ekki er nauðsynlegt að vita stífleika (modulus) gildi malarefnisins til þess að nota þá greiningu. Þessi aðferð virkar ekki á bundið slitlag þar sem greining Boussinesqs gerir ráð fyrir að það sé aðeins eitt lag í vegbyggingunni, en það finnur nokkurn veginn út álagið á malarlagið sem er mikilvægt.

Mynd 6.3 Kónpróf (DCP)

Til þess að meta styrkt malarefnisins er mælt með notkun kónprófs (Dynamic Cone Penetrometer, mynd 6.3). Það er einfalt próf sem nota má á vettvangi og gefur skjóta (en ekki alltaf mjög nákvæma) mælingu. Síðan má bera álagið saman við styrk malarefnisins og meta hvort að það dugir sem vegbyggingarefni.

Þessi skref gera það mögulegt að meta malarefnið og ef nauðsyn krefur endurbæta það, eða draga úr álaginu á það (t.d með að leggja bundið slitlag). Til að reikna álagið á undirliggjandi jarðveg má nota einfalt tölvuforrit sem aðgengilegt almenningi. Styrk undirlagsins má mæla með (t.d) vane prófi fyrir leirkenndann jarðveg. Samanburð þessara tveggja gilda má svo nota til að þykkja malarlagið þar til álag á undirlagið er orðið ásættanlegt.

Allt ferlið, með aðferðum þeim sem hér hafa verið kynntar, er tekið saman í flæðiriti í mynd 6.4



Mynd 6.4 Flæðirit er tekur saman og sýnir hönnunar/mats ferla

7 Styrking vega

Margir verkfræðingar hafa meiri áhuga á að viðhalda og styrkja núverandi vegi fremur en að byggja nýja. Í grunninn má nota sömu aðferðir – meta vegi á vettvangi með kónprófi (malarefni) og vane prófi (leir og silt undirlag) og spá fyrir um frammistöðu á sama hátt og áður. Ef hönnunarþykkt vegarins er of lítil, og hjólfaramyndun í undirlagi kemur fram, þá má yfirleggja veginn til þess að öðlast þykktina sem þarf. Ef gæði malarefnisins er lágt má leggja út auka lag efnis á yfirborðið og svo nota aðferðina sem var verið að kynna til sögunnar til þess að athuga hvort að álagið sem lagt er á gamla burðarlagið sé ásættanlegt.

Einnig má framkvæma Tube Suction próf á malarefninu til þess að athuga rakadrægni.

Almennt má segja að það sé nauðsynlegt fyrir verkfræðinginn að tryggja að efnissýnin sem unnið er með séu tekin úr veginum. Þetta getur reynst erfitt verkefni þar sem aðskilnaður malarlaga vegna umferðar og vegheflunar getur haft óeðlilega samsetningu malarefnis í för með sér á meðan frostlyfting, sig og hjólfaramyndun getur valdið ójafnri dreifingu fínefna í gegnum allt þversnið vegarins.

8 Lokaorð

Sú rannsókn, tilraunastofupróf, tölvugreining og túlkum sem hér er kynnt miða að því að þróa einfalda aðferð, er byggir á traustum fræðilegum grunni, sem hægt er að nota við hönnun fáfarinna vega á norðurjaðarsvæðum Evrópu. Aðferðir er byggja á reynslu eru dýrmætar en aðstoða ekki við að skapa skilning á lykilhugtökum, áhrifum og viðbrögðum. Með því að blanda saman því besta úr fræðunum og úr reynsluheiminum leitast aðferðin sem lýst er hér við að þróa nothæfan grunn fyrir verkfræðideildir er sjá um fáfarna vegi norður Evrópu.

Þörf er á frekari vinnu til þess að fínstilla gildin sem mælt er með hér fyrir raunverulega vegi. Samt sem áður standa vonir til þess að upplýsingar þær er hér gefur að líta leiði til þess að vegbyggingarefni verði metið á þann hátt sem mælt er með og að frammistaða vegarins uppfyllir kröfur. Ef hægt er að nota efni í vegi, sem óvissa var um að stæðust kröfur, með meiri vissu um að frammistaða þess undir álagi sé góð má skapa langtíma ávinning, þ.e.a.s að hjólfaramyndun á yfirborði verði í lágmarki. Auk þess er langtíma ávinningur fólgin í því, ef að notast má við slík efni, að forðast megi hjólfaramyndun í undirliggjandi jarðvegi.