



Hjólför í íslensku malbiki

-Slit og deigar formbreytingar-

Birkir Hrafn Jóakimsson



**Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Háskóli Íslands
2014**

Hjólför í íslensku malbiki

-Slit og deigar formbreytingar-

Birkir Hrafn Jóakimsson

60 eininga ritgerð sem er hluti af
Magister Scientiarum gráðu í byggingarverkfræði

Leiðbeinendur
Dr. Sigurður Erlingsson og Þorsteinn Þorsteinsson

Prófdómari
Bergþóra Kristinsdóttir

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Reykjavík, janúar 2014

Hjólför í íslensku malbiki. Slit og deigar formbreytingar
Hjólför í íslensku malbiki.
60 eininga ritgerð sem er hluti af *Magister Scientiarum* gráðu í byggingarverkfræði

Höfundarréttur © 2014 Birkir Hrafn Jóakimsson
Öll réttindi áskilin

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Hjarðarhagi 2-6
107 Reykjavík

Sími: 525 4600

Skráningarupplýsingar:
Birkir Hrafn Jóakimsson, 2014, *Hjólför í íslensku malbiki. Slit og deigar formbreytingar*,
meistararitgerð, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóli Íslands, 113 bls.

Prentun: Háskólaprent
Reykjavík, janúar 2014

Útdráttur

Hjólframmyndun er umtalsvert vandamál vegum og götum hér á landi. Hjólför myndast vegna slits annars vegar og deigra formbreytinga hins vegar. Slit má rekja til umferðar bifreiða búnum negldum hjólbörðum og formbreytingar, skrið aðallega, má tengja við umferð þungra ökutækja. Þetta verkefni fjallar um hvernig hægt er að spá fyrir um hjólframmyndun í malbiki bæði vegna slits og deigra formbreytinga.

Á Íslandi hefur hingað til ekki verið hægt að spá fyrir um hjólframmyndun vegna nagladekkja. Hjá VTI í Svíþjóð hefur verið þróað spálíkan, *Slitmod*, fyrir slit vegna nagladekkja. Í verkefninu er unnið að staðfæringu líkansins á íslenskar aðstæður. Til að spá fyrir um hjólframmyndun vegna slits þarf að skilgreina nokkrar umhverfis- og umferðar inntaksstærðir. Þessar inntaksstærðir eru til að mynda vegbreidd, ökuhraði, umferðarmagn, fjöldi daga sem notkun negldra hjólbarða er leyfð, hlutfall bifreiða á nagladekkjum og notkun salts til hálkueyðingar. Tvenns konar prófanir, með ýmiskonar steinefnum, voru framkvæmdar á rannsóknarstofu, Prall- og kúlnakvarnarpróf. Þessi próf voru gerð á rannsóknarstofu Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands.

Aflfræðilegar reynsluáferðir (e. mechanistic – empirical) eru notaðar hér til að spá fyrir um hjólframmyndun, deigar formbreytingar, vegna þungaumferðar. Aflfræðilegar reynslu hönnunaraðferðir fyrir malbik fela í sér notkun lögmála aflfræði til að meta svörun vegbyggingar (t.d. spennur, streitur og niðurbeygju). Forsendur til útreikninga á deigum formbreytingum, vegna sigs og skriðs, eru umferðarmagn, þungaumferð, þykkt malbikslaga, efniseiginleikar laga og hitastigsgögn. Nýtt eru hitastigsgögn fengin úr hitastigsmælingum úr malbikslögum frá Vegagerðinni.

Geta til að spá fyrir um hjólframmyndun, bæði vegna slits og varanlegra deigra formbreytinga, gætu haft verulegan fjárhagslegan ábata, stutt við viðhaldsáætlanir (PMS) og umtalsverð áhrif á veggönnun á Íslandi. Það gæti hjálpað til við val á malbiksblöndum og steinefnum í samhengi við umferðarmagn og veðurfar.

Abstract

Rutting in Icelandic roads and streets is one of the main failure modes of pavement structures. Rutting occurs due to two main influencing factors; wear due to studded tires and due to creep. Wear can be related to vehicles fitted with studded tires and deformations, mainly creep, can be linked to traffic of heavy vehicles. This thesis focuses on how to predict the amount of rutting due to both studded tire wear and plastic deformations.

In Iceland there is no method to predict rutting due to studded tire wear. At VTI in Sweden a prediction model has been developed, *Slitmod*, which predicts rutting due to studded tire wear. This project focuses on localizing this model and methodology to Icelandic conditions.

There are several environmental and traffic input parameters to be stated for the prediction model. Such as road width, traffic speed, traffic volume, number of days when studded tire use is permitted, percentage of automobiles that use studded tires and whether salt is used for ice melting. Two tests have to be performed in a laboratory to produce vital input parameters, Prall-value and a value from abrasion test (Nordic abrasion test). These tests are performed at the Innovation Center Iceland.

Mechanical-Empirical design methods are used to predict rutting due to plastic deformations caused by heavy vehicle traffic. Mechanical-Empirical design methods for asphalt pavement involve use of mechanical principles to evaluate the response of the road structure (i.e. strain, stress, and deformations). The prerequisites for calculations of permanent deformations are traffic volume, heavy vehicle traffic, thickness of layers, material properties, and temperature data. The temperature data is gathered from temperature measurements from asphalt layers carried out by the Icelandic Road Administration.

The capability of predicting rutting, due to both wear and deformations, could have substantial economic benefits and significant effect on road design in Iceland. It could help in the selection of asphalt mixtures and aggregates in context with traffic volume and climate.

Efnisyfirlit

Myndir	ix
Töflur	xii
Þakkir	xiii
1 Inngangur	1
2 Vegir og götur	3
3 Malbik	7
3.1 Samsetning malbiks.....	9
3.1.1 Bindiefni	9
3.1.2 Steinefni	10
3.1.3 Íaukar	11
3.2 Malbiksgerðir	11
3.3 Hönnunarstíkar	15
3.4 Helstu brotmyndir malbiks.....	20
4 Hjólför	23
4.1 Áhrifaþættir hjólfaramyndunnar.....	26
4.2 Hjólfaramyndun vegna nagladekkja.....	26
4.3 Hjólfaramyndun vegna deigra formbreytinga	27
4.4 Mælingar á hjólförum.....	30
5 Spennur og streitur	33
5.1 Dekkjaþrýstingur, snertiþrýstingur og snertiflötur	34
5.2 Áhrif af breytingum í umferðarálagi og dekkjaþrýstingi	35
5.3 Svörun vegbyggingar við álagi.....	36
5.3.1 Einsleitir massi.....	36
5.3.2 Spennur og streitur í lagskiptum kerfum	38
5.3.3 Viðlegð hjólaálaga	41
5.4 Kenpave.....	42
6 Slitþol steinefnis	45
6.1 Aflfræði nagladekkja.....	46
6.2 Prófunarbúnaður og prófanir á steinefnum	49
6.2.1 Kúlnakvarnarpróf.....	49
6.2.2 Prallpróf	50
7 Spálíkanið <i>Slitmod</i>	55

7.1	Kynning.....	55
7.2	Fræði og notkun	56
7.3	Útreikningar í <i>Slitmod</i>	63
7.4	Dæmi um notkun á <i>Slitmod</i>	67
8	Útreikningar á hjólfaramyndun vegna deigra formbreytinga	73
8.1	Líkanið	74
8.2	Útreikningar á deigri formbreytingu	87
9	Samlegð hjólfara vegna slits og deigra formbreytinga	91
10	Niðurstöður/lokaorð	93
	Heimildir	97
	Viðauki A	103
	Viðauki B.....	107
	Viðauki C	109
	Viðauki D	111
	Viðauki E.....	113

Myndir

Mynd 2-1 Dæmigerð uppbygging veghlots utan þéttbýlis (Vegagerðin, 2010).....	4
Mynd 3-1 Dæmi um álagsdreifingar í vegi.	7
Mynd 3-2 Dæmigerð uppbygging vega og gatna á höfuðborgarsvæðinu.	8
Mynd 3-3 Þrýsti- og togáraunir í malbiki og í neðri lögum, (formbreyting og sig vegna hjólaálags sýnt ýkt). Hér eru sýndar togstreita, ϵ_t , þrýstistreita, ϵ_c , og lóðrétt spenna σ_z	8
Mynd 3-4 Malbiksplata framleidd á Nýsköpunarmiðstöð Íslands.	9
Mynd 3-5 Markalínur fyrir slitlagsmalbik (SL) og steinríkt malbik (SMA) með 16 mm efri flokkunarstærð (Vegagerðin, 2013).....	13
Mynd 3-6 Einfölduð mynd af því hvernig malbik skiptist í rúmmál steinefnis, virkt/óvirkt bindiefni og loft (Vegagerðin, 2010).....	17
Mynd 3-7 Dæmi um niðurstöður úr marshallprófi (Ingason, 2000).....	18
Mynd 3-8 Markalínur steinefnis í malbiki (Vegagerðin, 1995).	19
Mynd 4-1 Hjólför vegna a) sigs og skriðs, b) slits, c) sigs í undirbyggingu (Mamlouk, 2006).....	23
Mynd 4-2 Hjólför á gatnamótum Miklubrautar og Lönguhlíðar (Google Maps, 2013).....	24
Mynd 4-3 Hjólför á Hafnarfjarðarvegi (Google Maps, 2013).....	25
Mynd 4-4 Þjóðvegur 1, í Flóahrepp asutan við Selfoss (Google Maps, 2013).	25
Mynd 4-5 Algengar formbreytingar í malbiki (Austroads, 1987).	27
Mynd 4-6 Formbreytingar í malbiki vegna a) skriðs, b) sigs og c) sigs og skriðs.	28
Mynd 4-7 Dæmi um hvernig varanleg streita safnast upp sem fall af fjölda álagspúlsa.....	29
Mynd 4-8 Primal hjólfaramælir, a) hjólfaramælir við mælingar, b) skematísk mynd af hjólfaramæli (Erlingsson, 2010).	30
Mynd 4-9 Slitmælir á vegi (Erlingsson, 2010).	31
Mynd 4-10 Skematísk mynd af RST (Erlingsson, 2010).	31

Mynd 5-1 Svörun í malbiki við hjólaálag við mismunandi staðsetningu gagnvart þeim örbút sem til skoðunar er.	34
Mynd 5-2 Dekkjaþrýstingur, snertiþrýstingur og snertiflötur.	35
Mynd 5-3 a) Áhrif af breytilegu álagi. b) Áhrif af breytingum í hjólbarðaprýstingi.	36
Mynd 5-4 Spennur undir ássamhverfu álagi.	37
Mynd 5-5 Kerfi með n-mörgum lögum undir hringlaga álagi.	39
Mynd 5-6 Kerfi með n-lögum í sívalningshnitum.	41
Mynd 5-7 Viðlegð spenna fyrir fjölhjóla álag.	42
Mynd 5-8 Skematísk mynd af algengum hjólauppstillingum.	44
Mynd 5-9 Vegbygging og efniseiginleikar sem útreikningar byggja á og niðurstöður spennu- og streituútreikninga.	45
Mynd 6-1 Fyrstu kynslóðar nagli með einföldum kraga.	47
Mynd 6-2 Fyrstu naglarnir með wolfram karbíð kjarna (Cantz, 1972).	48
Mynd 6-3 Dæmigerðir naglar úr negldum hjólbarða á Íslandi.	48
Mynd 6-4 Skematísk mynd af negldum hjólbarða á hreyfingu.	50
Mynd 6-5 Atlag, I, vegna krafts, F, sem verkar á tíma t.	51
Mynd 6-6 Kúlnakvörn, búnaður og þversnið.	52
Mynd 6-7 Ferlið í Prallprófi.	53
Mynd 6-8 Niðurstöður Prallprófa.	55
Mynd 7-1 Dreifing umferðar fyrir 7 m breiðan veg.	59
Mynd 7-2 Normaliseruð tíðni á staðsetningu hægri hjóls þungra ökutækja, þvert á veg í aksturstefnu þeirra (Erlingsson o.fl., 2013).	60
Mynd 7-3 Veghermir Sænsku Vegtæknistofnunarinnar [mynd VTI].	61
Mynd 7-4 Samband leiðréttingarstuðuls slits og ökuhraða.	62
Mynd 7-5 Notkun nagladekkja veturinn 2001-2002 í Reykjavík.	63
Mynd 7-6 Kornakúrfa efnis sem notað var úr Seljadal til útreikninga í Slitmod.	65
Mynd 7-7 Hliðlægt reiki dagsumferðar með ársdagsumferð 10.000 ökutæki og staðalfrávikið 275 mm.	67

Mynd 7-8 Reiknaðir hjólfaraprófilar fyrir slit eftir 2, 4, 6 og 8 ára slit fengnir með kúlnakvarnargildi.	70
Mynd 7-9 Dýpt hjólfara sem fall af tíma út frá kúlnakvarnargildi.	71
Mynd 7-10 Hjólfaraprófilar eftir 2, 4, 6 og 8 ára slit fengnir út frá Prallgildi.	72
Mynd 7-11 Dýpt hjólfara sem fall af tíma út frá Prallgildi.	72
Mynd 8-1 Dæmiberð vegbygging en hér er einungis verið að skoða efsta lagið.	77
Mynd 8-2 Stífni malbiks sem fall af hitastigi.	80
Mynd 8-3 Flæðirit af líkani til að reikna deiga formbreytingu í malbiki.	82
Mynd 8-4 Samband raunverulegs öxulþunga og 10 tonna jafngildisása.	83
Mynd 8-5 Hliðlægt reiki meðaldagsumferðar, 1200 þungar bifreiðar og staðalfrávik 275 mm.	85
Mynd 8-6 Uppsöfnuð meðalhitastigsdreifing á öllum ársfjórðungum frá 2005-2010.	86
Mynd 8-7 Mælingar á hitastigi malbiks á Reykjanesbraut fyrir árin frá 2005-2010.	87
Mynd 8-8 Klukkustundarmeðaltöl hitastigs á árunum 2005-2010.	88
Mynd 8-9 Uppsafnað umferðarmagn á 10 árum miðað við 1% aukningu.	89
Mynd 8-10 Hjólför vegna deigra formbreytinga.	90
Mynd 8-11 Hjólfaramyndun vegna deigrar formbreytingar sem fall af tíma.	91
Mynd 9-1 Samanlögð hjólför vegna slits og formbreytinga með sama miðgildi, eftir 2, 4, 6 og 8 ár.	93
Mynd 9-2 Samanlögð hjólför þar sem hágildi slits og formbreytingar eru í sama punkti, eftir 2, 4, 6 og 8 ár.	94

Töflur

Tafla 3-1 Leiðbeiningar um val á slitlagsgerðum með hliðsjón af umferð (Vegagerðin, 2013).....	12
Tafla 3-2 Malbiksgerðir, eiginleikar og notkunarvið (Vegagerðin, 2013).	14
Tafla 4-1 Áhrifaþættir nagladekkjaslits.....	26
Tafla 6-1 Niðurstaða kúlnakvarnarprófs.	50
Tafla 6-2 Niðurstöður Prallprófa.....	53
Tafla 7-1 Staðalfrávik veggerða (Jacobson & Wågberg, 2007).....	57
Tafla 7-2 Samband hraða og leiðréttingarstuðuls slits bifreiða á negldum hjólbörðum	60
Tafla 7-3 Inntaksstærðir, tákni og einingar.	64
Tafla 7-4 Gildi inntaksstærða fyrir dæmi.	67
Tafla 7-5 Úrkoma og hitastig, samanburður á Stokkhólmi og Reykjavík (WorldClimate.com, 2013).....	71
Tafla 8-1 Efniseiginleikar malbiks (Erlingsson, 2012)	77
Tafla 8-2 Sýnir stífni malbiks við mismunandi hitastig	77
Tafla 8-3 Efniseiginleikar laga sem nýttir eru í Kenpave	78
Tafla 8-4 Sýnir lóðréttar streitur á 2 og 6 cm dýpi við mismunandi hitastig	79
Tafla 8-5 Meðaltalsgildi 3. ársfjórðungs 2005-2010.....	84
Tafla 8-6 Helstu inntakstærðir í líkan fyrir deigar formbreytingar.	87
Tafla 10-1 Niðurstöður líkana eftir 2, 4, 6 og 8 ár.	93
Tafla 10-2 Hlutfall deigrar formbreytingar í heildarhjólfaramyndun þar sem hágildi slits og formbreytingar eru í sama punkti.....	94

Þakkir

Höfundur vill þakka Vegagerðinni fyrir veittan styrk til vinnslu verkefnisins. Nýsköpunarmiðstöð Íslands er þakkað fyrir aðstöðu og aðstoð við prófanir. Þorsteinn Þorsteinsson og Ábjörn Jóhannesson fá þakkir fyrir yfirlestur og gagnlegar ábendingar. Sérstakar þakkir fær Sigurður Erlingsson, próf., leiðbeinandi höfundar fyrir sýnda þolinmæði, góða leiðsögn og ómetanlega aðstoð við að veita höfundi innsýn í viðfangsefnið. Malbikunarstöðin Höfði hf., Malbikunarstöðin Hlaðbær Colas og Efla Verkfræðistofa fá þakkir fyrir gögn sem hjálpuðu til við vinnslu verkefnisins.

Unnusta höfundar, Jóhanna Vilborg Ingvarsdóttir, fær þakkir fyrir ómælda þolinmæði og stuðning. Höfundur vill einnig þakka vinnuveitanda sínum, Verkís hf., fyrir stuðning og skilning við vinnslu verkefnisins.

1 Inngangur

Vegakerfi er hverju samfélagi mikilvægt. Malbik er mikilvægur hluti vegbyggingar, sérstaklega á þéttbýlli svæðum. Malbik er dýrt efni og unnið úr náttúruauðlind sem er endanleg. Því ber okkur að leitast við að bæta hönnunaraðferðir til að draga úr kostnaði og minnka sóun á þeim náttúruauðlindum sem eru okkur svo mikilvægar.

Íslenska samfélagið eyðir stórum fjárhæðum árlega í vegagerð og viðhald vega. Í samgönguáætlun 2011-2022 er áætlað að á tímabilinu 2011-2014 verði varið tæplega 20 milljörðum króna í viðhald vega (Alþingi, 2008).

Hjólframmyndun (e. rutting) í malbiki á Íslandi verður einna helst rakin til tveggja þátta. Þessir tveir þættir eru slit vegna umferðar ökutækja útbúin negldum hjólbörðum og svo vegna varanlegra, deigra formbreytinga (e. plastic deformations) í einhverju laga vegbyggingarinnar. Á umferðarþungum götum á stór Reykjavíkursvæðinu er hlutur nagladekkjaslits verulegur í hjólframmyndun. Á vegum landsbyggðarinnar, þar sem umferð er minni, er hlutur deigra formbreytinga vegna þunga ökutækja mun stærri. Einnig má velta því fyrir sér með hlýnandi veðurfari og aukinni þungaumferð hvort hlutfall deigra formbreytinga í hjólframmyndun fari hækkandi.

Hægt er að gera greinarmun á hjólframmyndun sem verður vegna slits og hjólframmyndunar sem verður vegna deigra formbreytinga, sigs og skriðs. Þegar um hjólframmyndun vegna slits er að ræða verður yfirborð malbiksins hrjúfara og fylliefnakorn standa víða uppúr yfirborðinu og það myndast eitt mjótt hjólfar án þess að malbikið þrýstist upp til hliða við hjólfarið sjálft, sem yrði ef myndunin væri vegna skriðs.

Yfir vetrarmánuðina á Íslandi eru nagladekk leyfð frá 1. nóvember til og með 14. apríl, skv. reglugerð 822/2004. Á því tímabili má vænta þess að langstærsti hluti hjólframmyndunar eigi sér stað sökum nagladekkjaslits.

Á Íslandi hefur ekki verið hægt að spá fyrir um endingu malbiks m.t.t. nagladekkjaslits. Í Svíþjóð hefur verið þróað spálíkan, *Slitmod* 3.2.03, sem spáir fyrir um hjólframmyndun út frá svokölluðum Prall- og kúlnakvarnargildum, sem fengin eru úr prófunum á tilraunastofu. Auk þessara gilda eru umferðar- og umhverfisþættir teknir til greina svo sem breidd vega, ársdagsumferð, hlutfall ökutækja á nagladekkjum, umferðarhraði, tímabil þegar notkun nagladekkja er leyfð, hvort saltað sé og þess háttar (Jacobson & Wågberg, 2007). Á sumrin er hluti sigs og skriðs hins vegar allsráðandi í hjólframmyndun. Þá er notkun negldra hjólbarða bönnuð og því slit af völdum þeirra ekkert. Á sumrin hækkar hitastig malbiks til muna og þá minnkar stífni malbiksins. Þegar stífni malbiks minnkar eykst hætta á sigi og skriði. Við slíkar aðstæður skapast aðstæður fyrir hjólframmyndun. Hjólframmyndun vegna sigs og skriðs orsakast af umferð þunga ökutækja (stærri flutningabíla og vinnuvéla). Hér er gert ráð fyrir að fólksbifreiðar og minni flutningabílar leggi ekki til hjólframmyndun vegna deigra formbreytinga. Við útreikninga á sigi og skriði er stuðst við aflfræðilegar hönnunaraðferðir.

Verið er að þróa aflfræðilegar hönnunaraðferðir víðs vegar í heiminum í dag. Megin markmið þeirrar vinnu er að gera kleyft að spá fyrir um hvernig ástand vega þróast eftir því sem tímanum líður. Báðar þær aðferðir sem hér er beitt má nýta inn í aflfræðilegar hönnunaraðferðir. Með því móti er hægt að spá fyrir um hrörnun viðkomandi vegar og setja fram viðhaldsáætlun. Einnig geta aflfræðilegar hönnunaraðferðir hjálpað til við að bera saman endingu mismunandi malbiksgerða. Með því móti er hægt að spá fyrir um hrörnun viðkomandi vegar og setja fram viðhaldsáætlun. Einnig geta aflfræðilegar aðferðir hjálpað við að bera saman endingu mismunandi malbiksgerða. Báðar þær aðferðir sem hér er beitt má nýta inn í aflfræðilegar hönnunaraðferðir.

Markmið

Í þessu verkefni er tekin fyrir hjólfaramyndun í malbiki og leitast við að aðlaga aðferðir sem til eru erlendis að íslenskum aðstæðum. Þetta á við um hjólfaramyndun vegna nagladekkjaslits annars vegar og vegna deigra formbreytinga hins vegar. Markmiðið er að geta spáð fyrir um hjólfaramyndun bæði vegna nagladekkjaslits og deigra formbreytinga að gefnum forsendum. Inntaksstærðir sem þarf til að reikna slit eru umferðarmagn, hlutfall umferðar á nagladekkjum, vegtegundir (breidd), söltun vega, hraði umferðar, efniseiginleikar og niðurstöður prófana. Prófanir sem þarf að framkvæma fyrir slitlíkanið eru Prall- og kúlnakvarnarpróf. Farið verður nánar í þessar prófanir í kafla 6.2. Forsendur til útreikninga á varanlegum formbreytingum, vegna sigs og skriðs, eru umferðarmagn, það er þungaumferð, þykkt malbikslaga, efniseiginleikar laga í veghloti og hitastigsgögn malbiksins yfir allt árið.

Að geta spá fyrir um hjólfaramyndun á íslenskum vegum og götum hefur ekki verið gert hingað til og er vonin sú að með þeim möguleika megi gera skilvirkari viðhaldsáætlanir.

Takmarkanir þessa verkefnis eru þær að ekki hafa farið fram markvissar mælingar á hjólfaramyndun, en þessar mælingar þyrfti að framkvæma yfir margra ára tímabil og því er ekki hægt að bera niðurstöður úr reikningum úr þessu verkefni við raunverulegar mælingar í feldi. Hitastigsmælingar í íslensku malbiki eru einungis til frá þremur stöðum og frá einum stað í malbikslaginu.

Í ritgerðinni verður fyrst fjallað almennt um vegi, götur og malbik, svo verður fjallað um þá þætti sem hafa áhrif á hjólfaramyndun í malbik. Í köflum 7 og 8 verður fjallað um líkön til að spá fyrir um hjólfaramyndun með tilliti til slits og svo formbreytinga. Í 9. kafla verður rædd samlegð hjólfara vegna slits annars vegar og svo deigra formbreytinga hins vegar. Að lokum eru helstu niðurstöður dregnar saman í kafla 10.

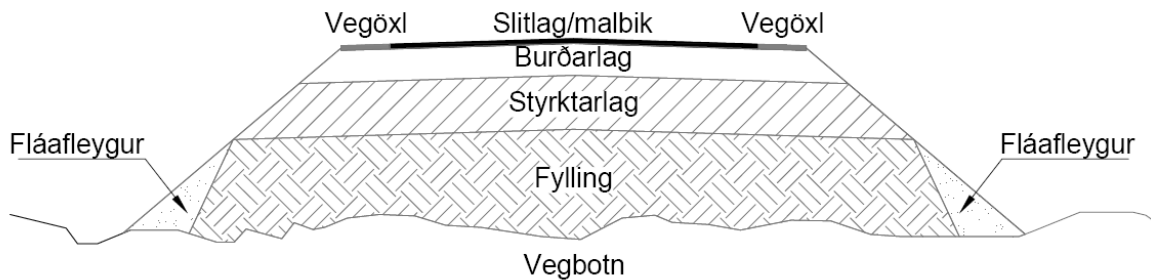
2 Vegir og götur

Íslenska vegakerfið er tæplega 13.000 km langt og þar af eru ríflega 5.300 km lagðir með bundnu slitlagi, það er þá átt við malbik, klæðingu eða steipt yfirborð (Vegakerfið, 2013).

Vegir á Íslandi skiptast að jafnaði upp í vegbotn og fyllingu, sem er nefnd undirbygging; styrktarlag og burðarlag og slitlag, sem nefnd er yfirbygging. Slitlag getur verið malbik, klæðing, malarslitlag eða steipt. Undirbygging og yfirbygging er síðan nefnd í sama orðinu veghlot. Á Íslandi er í lang flestum tilfellum notast við sveigjanleg (e. flexible) slitlög frekar en stífa (e. rigid) vegbyggingu. Sveigjanlegt slitlag getur verið malarslitlag, klæðing eða malbik. Stíf slitlög eru yfirleitt steinsteipt. Í þessu verkefni er nær eingöngu fjallað um malbik og eiginleika þess.

Ástæða fyrir lagskiptingu veghlotsins er sú að gerðar eru mismunandi kröfur til efnisgæða eftir staðsetningu lags í veghlotinu. Efsta lagið verður fyrir mestri áraun og þar verða spennur mestar og þar af leiðandi kröfur um efnisgæði mestar. Kröfurnar minnka svo eftir því sem neðar dregur í veghlotinu, samfara minnkandi áraun og lækkandi spennum. Taka þarf tillit til þess að þau lög sem eru ofan við svokallað frostdýpi, það dýpi í jörðu sem að frost nær til, séu ónæm fyrir áhrifum frostþenslu. Utan þéttbýlis er oftast látið nægja að burðarlag og styrktarlag séu úr efni sem talið er ónæmt fyrir áhrifum frostþenslu, þó svo að frostdýpi sé yfirleitt meira en sem nemur þykkt þessara laga. Í þéttbýli er hins vegar algengt að byggja götur úr frostfríu efni niður fyrir frostdýpi (Vegagerðin, 2010).

Vegir á höfuðborgarsvæðinu og landsbyggðinni eru að mörgu leyti byggðir upp á ólíkan máta. Á höfuðborgarsvæðinu eru vegir og götur oftast í sömu hæð, og umhverfið í kring meðan að vegir á landsbyggðinni, utan þéttbýlis, eru byggðir upp úr landyfirborðinu. Þetta er gert til sparnaðar, að ekki þurfi að fjarlægja efni, og einnig til að minnka snjósöfnun á vegum. Umferð á höfuðborgarsvæðinu er umtalsvert meiri en á landsbyggðinni og í dreifbýli. Því er meiri áhersla lögð á efsta lag vegbyggingarinnar, sem ég nefni malbik í einu orði. Malbik á höfuðborgarsvæðinu er oftast gert úr þremur lögum slitlagi, bindilagi og bikbundnu burðarlagi, sjá nánar í kafla 3. Á mynd 2-1 má svo sjá hefðbundna uppbyggingu vegar á landsbyggðinni.



Mynd 2-1 Dæmigerð uppbygging veghlots utan þéttbýlis (Vegagerðin, 2010).

Hér á eftir verður farið lauslega í uppbyggingu vega en megináhersla er lögð á efsta lag veghlotsins, bikbundna lagið (sjá nánar í kafla 3).

Vegbotn

Vegbotninn er undirstaða vegarins. Í vegbotn eru notuð upprunaleg jarðefni úr vegstæðinu. Hægt er að búa um vegbotninn með eða án grunnstyrkingar.

Fylling

Fyllingin hefur það hlutverk að vera undirstaða undir berandi hluta veghlotsins, sjá mynd 2-1. Fyllingin og vegbotninn þurfa að bera þau lög sem ofan á koma sem og álag vegna umferðar og vinnuumferðar, meðan á byggingu vegarins stendur, án verulegra formbreytinga. Fyllingin jafnar yfirborð vegbotnsins og eftir útlagningu hennar er réttri hæð náð svo hægt sé að leggja yfirbygginguna. Fyllinguna þarf að þjappa nægilega vel. Einnig þarf að útfæra hana með nægilegan halla til að vatn renni af henni. Ysti hluti fyllingarinnar nefnist fláafleygur. Fláafleygur má vera af lakari efnisgæðum en fyllingin sjálf (Vegagerðin, 2010).

Efni sem nota á í fyllingu á að flokka, samkvæmt norskum reglum, í frost- og burðarþölsflokka og ráða þeir flokkar til um þykktir þeirra laga sem koma ofan á fyllinguna.

Fláafleygur

Fláafleygur kemur utan á fyllinguna og má vera af lakari efnisgæðum en fyllingin sjálf. Almennu eru ekki gerðar sérstakar kröfur til efnis í fláafleyg nema að í því skal ekki vera mosi, hrís, torf eða stórgrýti og má efnið ekki innihalda snjó eða ísklumpa. Í fláafleyg má nota efni sem annars eru ónothæf í fyllingu og aðra hluta veghlotsins svo sem mold og moldarblandað efni. Slíkt efni fæst gjarnan þegar jarðvegur er fjarlægður ofan af setlagi sem nýta má til fyllingar (Vegagerðin, 2010).

Styrktarlag

Hlutverk styrktarlags er að dreifa álagi á undirbygginguna. Þegar horft er til burðarþols mismunandi laga í veghlotinu er mikilvægt að ekki sé of mikill munur á styrk milli þeirra. Burðarþol laganna á að aukast eftir sem ofar dregur í veghlotinu. Mikilvægt er einnig að efnisval í styrktarlaginu geri það að verkum að það hafi þann eiginleika að geta leitt vatn burt úr veghlotinu (Vegagerðin, 2010).

Styrktarlagi er stundum skipt upp í tvo hluta, þá eru meiri kröfur gerðar til þess efnis sem er í efri hlutanum. Styrktarlag þarf að standast kröfur um berggæði og um styrk steinefna. Styrktarlag þarf að vera gert úr efni sem er ónæmt fyrir frostáhrifum. Ef styrktarlagi er skipt upp í tvö lög er fyrir neðra lagið fyrst og fremst gerð krafa um ónæmi fyrir frostáhrifum og kornadreifingu en fyrir efra lagið eru gerðar meiri kröfur eins og til styrks og berggæða (Vegagerðin, 2010).

Burðarlag

Óbundið burðarlag er lagið sem kemur beint undir malbikið. Burðarlagið tekur við álagi af umferð og dreifir því niður í styrktarlagið, því eru gerðar meiri kröfur til efnisgæða í burðarlaginu en styrktarlaginu, þar sem að spennur og áraun minnka eftir því sem að neðar dregur í veghlotinu. Burðarlaginu er ætlað að koma í veg fyrir formbreytingar í malbikinu, því þarf burðarlagið að vera stíft og stöðugt. Sem og í styrktarlaginu þurfa steinefni í burðarlaginu að vera ónæm fyrir frostáhrifum (Vegagerðin, 2010).

Eins og fyrir styrktarlag er burðarlaginu stundum skipt upp í tvo hluta, þá er efnið í efra laginu oft og tíðum fínna en í neðra laginu. Ákveðnar kröfur eru gerðar til kornadreifingar efna í þessum lögum, sem þarf að vera í samræmi við þykkt laganna, þ.e.a.s. ekki of gróf eða of fín miðað við þykkina. Grófleiki efnanna er einnig háður þeirri tegund af malbiki sem ofan á kemur. Hægt er að binda efri hluta burðarlagsins með sementi eða biki (Vegagerðin, 2010).

Malbik og slitlag

Efsti hluti veghlotsins getur annað hvort verið bundinn eða óbundinn. Malbik, klæðing og steinsteypa eru dæmi um bundin lög meðan malarslitlag er óbundið. Vegir með malbik og klæðingu eru dæmi um sveigjanlega vegi (e. flexible pavement) meðan vegir með steinsteypu slitlagi eru stífar vegbyggingar (e. rigid pavement). Nánar verður fjallað um malbik í kafla 3. Slitlagi er ætlað að framkalla jafnt og slétt yfirborð en þó þannig að tryggt sé að nægjanlegt viðnám sé á milli slitlagsyfirborðs og yfirborðs hjólbarða ökutækja svo að ökutæki renni ekki til á vegyfirborðinu. Slitlag þarf að hafa ákveðið slitþol til að vinna á móti sliti sem orsakast af umferð. Slitlög þurfa að þola veðrun og vera nægjanlega þétt til að hindra sem mest að vatn komist í undirliggjandi lög (Vegagerðin, 2010). Færst hefur í vöxt að bikbinda axlir vega sem lagðir eru með bikbundnu lagi. Þetta er gert til þess að axlirnar hafi sem líkustu eiginleika og akbrautirnar sjálfar (Vegagerðin, 2010).

Algengt er að notuð sé klæðning á umferðarminni þjóðvegum landsins og vegum í dreifbýli meðan notkun á malbiki er algegnari í þéttbýli (Kristinsdóttir, 1999).

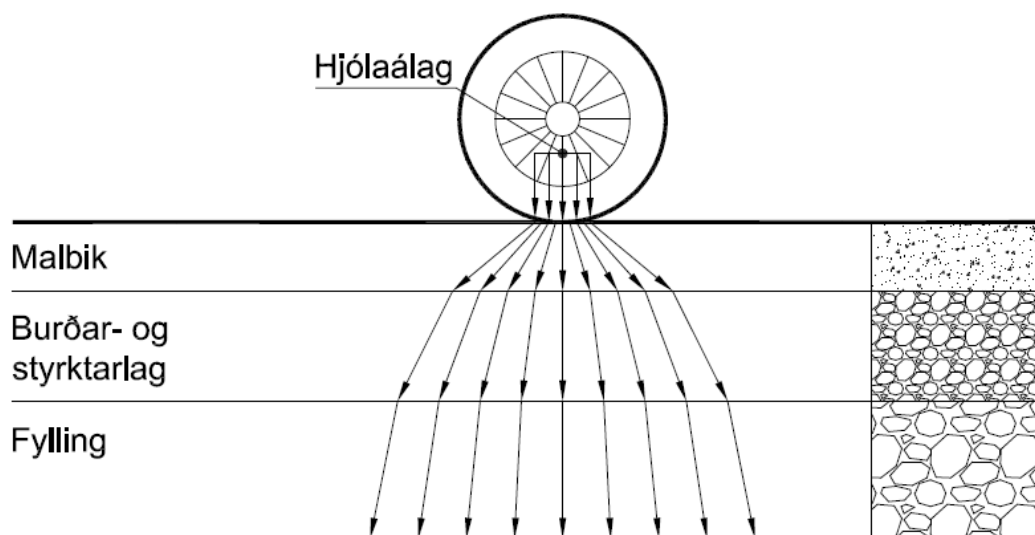
3 Malbik

Malbik er blanda tveggja efna sem hafa ólíka aflfræðilega eiginleika það er biks og steinefni. Steinefni sýnir undir ytra álagi fjaðrandi deiga (e. elastic-plastic) hegðun en á móti sýnir bik seiga deiga (e. visco-plastic) hegðun. Auk þess er hegðun biks afar háð hitastigi. Því sýnir malbik fjaðrandi-seiga-deiga hegðun við ytra álag (Kristinsdóttir, 1999).

Hlutverk malbiks í slitlagi er tvíþætt, það er að mynda slétt yfirborð sem þó veitir núning milli hjólbarða ökutækis og yfirborðs og til að flytja og dreifa spennum frá hjólum ökutækja til undirliggjandi laga.

Í þessum kafla verður leitast við að útskýra uppbyggingu malbiks, úr hverju það er gert og hvernig hvaða hönnunarstikar eru notaðir.

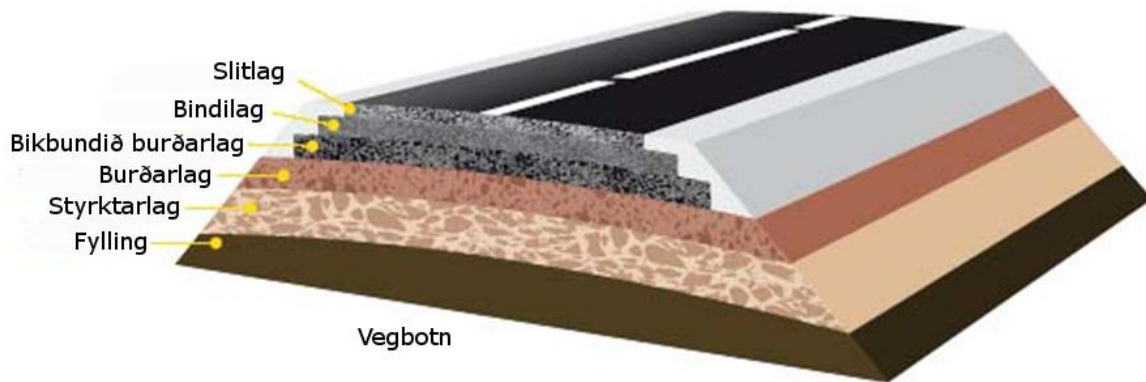
Malbik er sveigjanlegt yfirborð. Malbik er nefnt sveigjanlegt vegna þess að allt malbikslagið gefur eftir eða sveigist við álag umfram það sem steinsteypt slitlag gerir. Sveigjanlegt yfirborð er venjulega byggt upp með nokkrum efnislögum. Hvert lag tekur við álagi frá laginu fyrir ofan og dreifir því og flytur álagið í lagið fyrir neðan. Því neðar sem komið er í vegbygginguna þurfa lögin að bera minna álag, sjá mynd 3-1. Til þess að nýta þessa eiginleika til fulls eru efnislögum raðað þannig að burðargeta laganna minnkar eftir því sem neðar dregur, það er efnið með mestu burðargetuna og einnig dýrast er haft efst en efnið með minnstu burðargetuna, ódýrasta efnið, neðst (WAPA, 2013).



Mynd 3-1 Dæmi um álagsdreifingar í vegi.

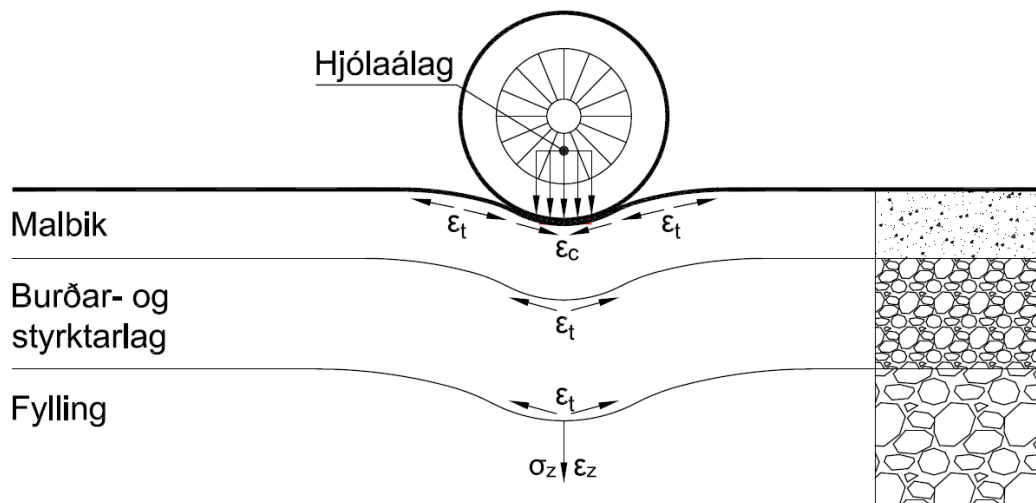
Malbiki er gjarnan skipt upp í þrjú lög, það er slitlag, bindilag og bikbundið burðarlag.

Slitlag (e. surface course) er efsta lag vegarins, lagið sem er í snertingu við hjólbarða bifreiða. Slitlag þarf að hafa hryfi, þó ekki of mikið, og hryfi hefur áhrif á hljóðmengun. Slitlagið myndar vörn gegn hjólfaramyndun, vegna slits, og öðrum skemmdum. Slitlagið þarf að tryggja afrennsli og um leið að hindra að vatn komist neðar í vegbygginguna. Þessu efsta lagi vegbyggingarinnar er oft skipt í tvö lög það er slitlag og bindilag, sjá mynd 3-2 hér að neðan (WAPA, 2013).



Mynd 3-2 Dæmigerð uppbygging vega og gatna á höfuðborgarsvæðinu.

Burðarlag (e. bitumen bound base course) er lagið sem kemur beint undir bindilagið. Það veitir aukna álagsdreifingu. Þetta lag veitir aukna vörn gegn togáraun sem getur leitt til þreytusprungna í neðri brún malbiksins, sjá mynd 3-3 (WAPA, 2013).



Mynd 3-3 Þrýsti- og togáraunir í malbiki og í neðri lögum, (formbreyting og sig vegna hjólaálags sýnt ýkt). Hér eru sýndar togstreita, ϵ_t , þrýstistreita, ϵ_c , og lóðrétt spennan σ_z .

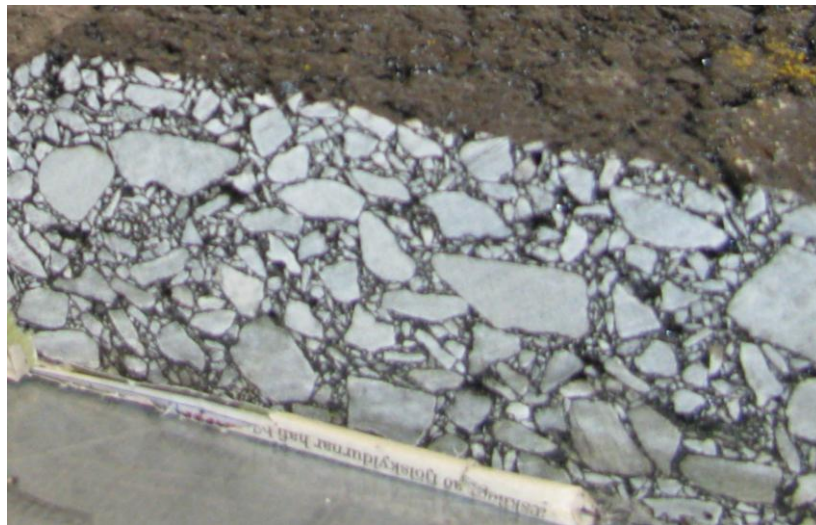
Við nýbyggingu vega er oft viðhaft að leggja fyrst út bindilagið og bikbundna burðarlagið og svo jafnvel ári seinna er efsta lagið, slitlagið, lagt út. Þetta er gert til að fá fram þær formbreytingar, sig, sem verða fyrst eftir að malbikslag er lagt út. Svo þegar slitlagið er lagt út er gert ráð fyrir að sú þjöppun sem verður í þeim lögum sé að miklu leyti komin fram, í bindilagini og bikbundna burðarlaginu. Slitlaginu er svo ætlað að fylla upp í þær formbreytingar sem verða og slétta úr yfirborðinu.

3.1 Samsetning malbiks

Hér verður leitast við að útskýra þá þætti sem malbik er samsett úr, það er bindiefni, steinefni og íaukar.

Malbik er samsett úr tveimur aðalhlutum, steinefni og biki (e. bitumen). Steinefnið gegnir því hlutverki að bera þunga umferðarinnar en bikið bindur steinefnið saman og myndar heild. Því er mikilvægt að bikið gefi góða bindingu og styrkur steinaefna sé næganlegur til að bera þunga umferðarinnar og þá síendurteknu áraun sem henni fylgir. Í slitlagi þarf steinefnið auk þess að þola síendurtekið álag frá nöglum negldra hjólarða. Algengasta framleiðsluaðferð malbiks er að hita bikið og steinefnin sitt í hvoru lagi fyrir blöndun. Þegar blöndun er lokið er hún lögð út á vegstæðið og þjöppuð. Með þjöppun er leitast við að læsa uppbyggingu lagsins þannig að bikið leiti í holrýmið eftir því sem þörf er á (Urbancic, 1998).

Mynd 3-4 sýnir þverskurð í malbiksplötu þar sem sést ágætlega hvernig steinefni og bik blandast.



Mynd 3-4 Malbiksplata framleidd á Nýsköpunarmiðstöð Íslands.

3.1.1 Bindiefni

Bindiefni malbiks er kallað bik. Það er klísturkennt, seigfljótandi vatnsfælið efni sem nær eingöngu er unnið úr jarðolíu með mikið bikinnihald. Farið verður nánar í vinnsluferlið hér að neðan. Í Evrópu er bik flokkað eftir stungudýpt (e. penetration). Stungudýpt er notuð sem mælikvarði á stífnieiginleika biksins. Stungudýptin er sú dýpt sem 100 g nál nær að

stingast inn í bikið á fimm sekúndum við 25 °C. Stífleiki biksins er skilgreindur sem þessi dýpt og mælikvarðinn er tíundi hluti úr mm. Á Íslandi er mest notað bik með stungudýptina 160-220, það er nálin sekkur 16-22 mm. Á götum með mikla umferð og þunga er stundum notað bik með stungudýptina 70-100 (Vegagerðin, 2010).

Jarðbik

Jarðbik er fengið úr náttúrulegum seyrum eða lónum víðs vegar um heiminn eða með eimingu jarðolíu (Garber & Hoel, 2002). Jarðbik kemur sem aukaafurð við eimingu jarðolíu við framleiðslu m.a. smurolíu, steinolíu, díselolíu, bensíns og ýmissa gastegunda. Allt jarðbik sem notað er til vegagerðar hér á landi er fengið með seinni aðferðinni. Jarðolía myndast úr lífrænum leifum djúpt í jörðu, þar sem kjöraðstæður finnast, þ.e. mikill þrýstingur og hiti yfir langan tíma (Vegagerðin, 2010).

Jarðbik er samansett úr kolefni (82-88%), vetni (8-11%), brennistein (0-6%) auk annarra frumefna í minna magni. Efnafraðileg samsetning jarðbiks getur verið mismunandi eftir hvaðan efnið kemur og hreinsunarferlinu (Vegagerðin, 2010).

Áður fyrr við vegagerð var nær eingöngu notað náttúrulegt jarðbik, eftir að hafa verið mýkt með efnum unnum úr jarðolíu. Efniseiginleikar náttúrulegs jarðbiks breytast mjög milli svæða, sérstaklega með tilliti til óleysanlegra efna sem eru í jarðbikinu. Til að mynda í Trinidad inniheldur jarðbikið um 40% óleysanleg lífræn og ólífræn efnasambönd á meðan í Bermuda inniheldur jarðbikið um það bil 6% af slíkum efnasamböndum. Grjótjarðbik (e. rock asphalt) er náttúruleg útfelling sand- eða kalksteins. Slíkar útfellingar hafa fundist t.d. í Kaliforníu, Texas, Oklahoma og Alabama (Garber & Hoel, 2002).

Með þáttaeimingu (e. partial distillation) eru mismunandi rokgjörn efni eimuð úr jarðölfunni við hækkanði hitastig þangað til bikið er eftir. Gufa eða lofttæming eru notuð til að hækka hitastigið smám saman (Garber & Hoel, 2002).

Mjög mismunandi er eftir svæðum hversu hentug jarðolían er til framleiðslu á jarðbiki. Til að mynda kemur mest allt jarðbik sem notað er hér á landi frá Venesúela eða Miðausturlöndum.

3.1.2 Steinefni

Fylliefni eru um 90-95% af massa malbiks og um 75-85% af rúmmáli. Uppbygging og efniseiginleikar fylliefna sjá um að veita viðnám gegn aflögun, formbreytingum, vegna síendurtekna algaspúlva. Berg- og efnafraðileg gerð fylliefna er mikilvæg til að meta mikilvæga efnisfræðilega eiginleika, til að mynda hörku (e. hardness), endingu (e. durability), lögun og líkur á niðurbroti (e. stripping potential) (Tam, 2006).

Fylliefni er skilgreint sem kornótt steinefni til dæmis sandur, möl, skeljar, gjall eða mulinn steinn. Fylliefni er notað með bindiefni, biki, til að mynda malbik eða eitt og sér í undirbyggingu. Þessi fylliefni skiptast í þrjá meginflokkka; náttúruleg, unnin og tilbúin (e. synthetic) fylliefni. Náttúruleg fylliefni eru tekin úr árfarvegum eða eru jökulruðningar. Möl og sandur eru dæmi um náttúruleg fylliefni. Möl er venjulega skilgreind sem korn sem smjúga í gegnum 63 mm sigti en stöðvast í sigti með 2 mm möskvastærð Sandur er þá skilgreindur sem kornin sem fara í gegnum sigti með 2 mm möskvastærð. Þessi fylliefni, í þeirra náttúrulegu lögun, eiga það til að vera slétt og ávalt. Unnið fylliefni, þar með talið möl og sandur sem hafa verið mulin, þvegin, flokkuð eða meðhöndluð á annan hátt eru

gjarnan notuð í malbik til að auka gæði þess. Unnin fylliefni eiga það til að vera hornóttari og hafa því betri læsigetu í vel þjöppuðu ástandi. Tilbúin fylliefni eru ekki fengin úr námum eða efnistöku. Öllu heldur eru þau framleidd með beitingu eðlisfræðilegra eða efnafræðilegra ferla sem annað hvort aðal- eða aukaafurð. Leifturhitað gjall, leir, leirflögur, flöguberg eru dæmi um tilbúin fylliefni (Tam, 2006).

Til viðbótar við þau fylliefni sem nefnd eru hér að ofan hefur það færst í vöxt að nota úrgangsefni í malbik. Tættir hjólbarðar og gler eru algengustu úrgangsefnin sem hafa verið notuð í malbik. Sum úrgangsefni auka gæði malbiks meðan önnur úrgangsefni hafa hvorki neikvæð né jákvæð áhrif á gæðin (Tam, 2006). Á Íslandi hafa ekki verið notuð endurunnin efni í malbik nema þá að endurlögn (e. repave) undanskilinni (Vegagerðin, 2010).

Á Íslandi eru steinefnin að öllu jöfnu flokkuð í þrjá flokka eftir kornastærð. Flokkarnir eru:

- Méla, fínefni með kornastærð minni en 0,063 mm.
- Sandur eða mulningur, þá er kornastærð 0,063-4 mm. Í Evrópustöðlum um bikbundin steinefni eru efri mörk sands 4 mm.
- Perla, flokkuð mól, þá er kornastærð stærri en 4 mm. Perlan er af ýmsum stærðarflokkum, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22 eða 22/32 mm.

Aðrir stærðarflokkar steinefna eru líka notaðir eftir atvikum, svo sem 0/4, 0/8, 0/11 og fleiri. Steinefnið þarf að uppfylla margvíslegar kröfur, til að mynda um styrk, lögun og þess háttar, mismunandi eftir fyrirhugaðri notkun malbiksins (Vegagerðin, 2010).

3.1.3 Íaukar

Til að koma til móts við aukið umferðarálag við fjölbreytt veðurfarsskilyrði og til að sporna við skemmdum í malbiki, til að mynda formbreytingum, sprungum og skemmda vegna vatns hafa verið þróaðir íaukar í malbik. Algengustu íaukarnir í malbiki eru *styrene-butadiene-styrene* (SBS) og *ethylene-vinyl-acetate* (EVA) (Sengoz & Isikyakar, 2008).

SBS er hitapjál og teygjanleg fjölliða sem eykur sveigjanleika malbiks við lágt hitastig og vörn gegn skriði við hátt hitastig (Airey o.fl., 2002). EVA fjölliður eru flokkaðar sem plastefni. EVA fjölliður breyta eiginleikum malbiks með því að mynda sterka og stífa þrívíða keðju sem auka vörn gegn deigum formbreytingum (Sengoz & Isikyakar, 2008).

Viðloðunarefni er notað til blöndunar í bindiefnið og eykur bindingu milli steinefnis og bindiefnis. Þessir íaukar eru einungis notaðir hér á landi í SMA (e. Stone Mastic Asphalt). Stundum er bætt sementi eða fínmöluðum kalksteini í malbiksblöndur til að auka stífleika og hefur þar að auki oft jákvæð áhrif á viðloðun. Fjölliðum er einstaka sinnum bætt í bindiefnið til að breyta seigjueiginleikum, þetta er aðallega gert til að malbikið þoli betur sumarhita til að minnka skrið undan þungaumferð (Vegagerðin, 2010).

3.2 Malbiksgerðir

Þegar velja á malbiksgerð á veg er byrjað að skilgreina umferðarmagn vegarins til að ákvarða þá malbikstegund sem þykir heppilegust. Tafla 3-1 gefur vísbendingar um hvaða malbiksgerð þykir heppilegust fyrir ákveðnar umferðarþyngdir. Valkostir eru merktir 1, 2 eða 3. Valkostur 1 táknar heppilegasta valkostinn fyrir þann umferðarþunga og valkostur 3

Þann sísta. Tekið skal fram að í töflunni er ekki tekið á bindiefnisgerðum heldur einungis kornadreifingu og steinastærðum (Vegagerðin, 2013).

Tafla 3-1 Leiðbeiningar um val á slitlagsgerðum með hliðsjón af umferð (Vegagerðin, 2013).

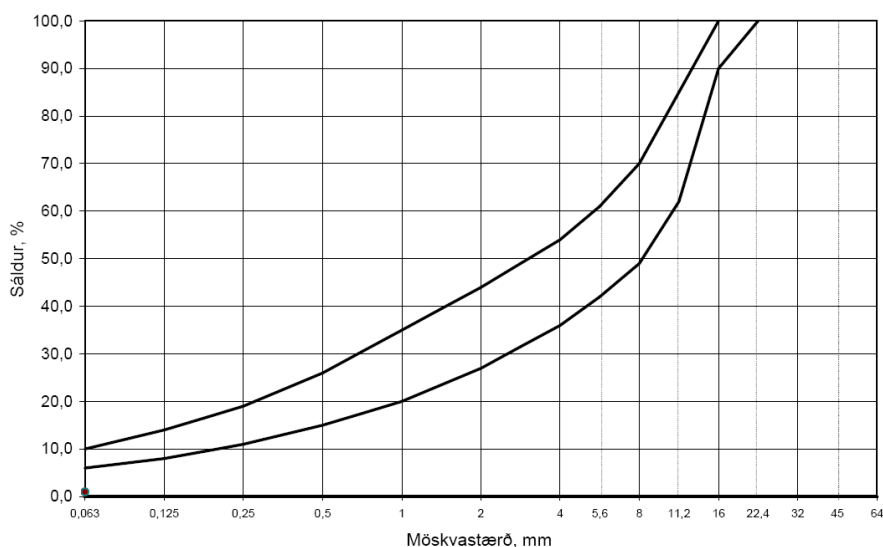
Umferð ÁDU	BNL 11	BNL 16	SL 8	SL 11	SL 16	SMA 8	SMA 11	SMA 16
>15.000					3		2	1
10.000-15.000				3	2		2	1
5.000-10.000				2	1		3	2
2.500-5.000	3	2		2	1			
500-2.500	2	1	3	1		3		
Strætisvagnareinar					3		2	1

BNL = bindilag, SL = slitlag og SMA = steinríkt malbik

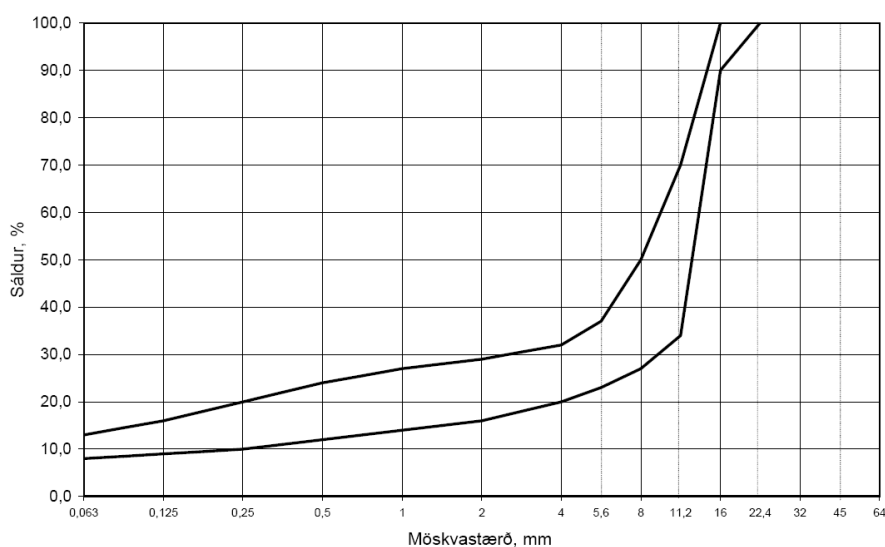
Steinríku malbiki (SMA) má lýsa sem tveggja þátta malbiki myndað úr grófum steinefnum, með opna kornakúrfu, og háu bikinnihaldi. Þessir tveir þættir eiga að bæta stöðuleika og endingu malbiksins. SMA getur veitt góða vörn gegn deigum formbreytingum samanborið við malbik með þétta kornakúrfu. SMA myndar tengingu milli steinefna og myndar einskonar grind þar sem kraftafærslur eru góðar milli korna (Qiu & Lum, 2006).

Á mynd 3-5 sést munur á sáldurferlum fyrir slitlagsmalbik, með efri flokkunarstærð 16 mm, og fyrir SMA, einnig með 16 mm efri flokkunarstærð.

Slitlagsmalbik, SL16



Steinríkt malbik, SMA16



Mynd 3-5 Markalínur fyrir slitlagsmalbik (SL) og steinríkt malbik (SMA) með 16 mm efri flokkunarstærð (Vegagerðin, 2013).

Í töflu 3-2 eru flokkaðar 11 malbiksgerðir, sex sem nota má sem slitlag, tvær sem flokkast sem bindilag sem nota má sem slitlag í vegi sem hafa ársdagsumferð (ÁDU) undir 3000 bifreiðum og þrjár gerðir af burðarlagmalbiki (Vegagerðin, 2013).

Tafla 3-2 Malbiksgerðir, eiginleikar og notkunarsvið (Vegagerðin, 2013).

Malbiksgerð (heiti)	Skýring	Eiginleikar og notkunarsvið
SL 8	Slitlag, efri flokkunarstærð 8 mm	Er slétt og þess vegna hljóðlátt. Hefur að öðru jöfnu lítið slitþol gagnvart negldum hjólbörðum. Hentar sem þunnt yfirlag á húsagötur eða þar sem umferð er lítil, ennfremur til hjólfarafyllinga undir yfirlag og sem þunnt yfirlag á bílastæði.
SL 11	Slitlag, efri flokkunarstærð 11 mm	Hefur að öðru jöfnu meira slitþol gagnvart negldum hjólbörðum en SL 8, þó síðra en SL 16. Er fremur hljóðlátt. Hentar á húsagötur og safngötur eða vegi með umferð upp að 10.000 ÁDU.
SL 16	Slitlag, efri flokkunarstærð 16 mm	Hefur að öðru jöfnu fremur gott slitþol gagnvart negldum hjólbörðum, en fremur hávært þegar það fer að slitna. Hentar á tengibrautir og stofngötur, síður þó þar sem umferð er yfir 15.000 ÁDU.
SMA 8	Slitlag, efri flokkunarstærð 8 mm	Slitþolið malbik miðað við flokkunarstærð, með gott hemlunarviðnám. Hentar sem yfirlag, sem verður að vera þunnt, þar sem umferð er jafnframt tiltölulega mikil.
SMA 11	Slitlag, efri flokkunarstærð 11 mm	Slitþolið malbik með gott hemlunarviðnám. Hentar á safngötur og tengivegi með mikla umferð.
SMA 16	Slitlag, efri flokkunarstærð 16 mm	Slitþolið malbik með gott hemlunarviðnám. Hentar m.a. vel á götur þar sem umferð er mikil.
BNL 11	Bindilag, efri flokkunarstærð 11 mm	Notað sem bindilag undir slitlag án takmarkana á umferð, en einnig sem slitlag á götur eða vegi með umferð undir 3000 ÁDU, en þá með skerptum kröfum.
BNL 16	Bindilag, efri flokkunarstærð 16 mm	Notað sem bindilag undir slitlag án takmarkana á umferð, einnig sem slitlag á götur eða vegi með umferð undir 3000 ÁDU, en þá með skerptum kröfum.
BRL 16	Burðarlag, efri flokkunarstærð 16 mm	Notað sem burðarlag/bindilag, í undantekningartilvikum sem bráðabirgðaslitlag en þá með skerptum kröfum og lagt er yfir ári síðar.
BRL 22	Burðarlag, efri flokkunarstærð 22 mm	Notað sem burðarlag/bindilag, í undantekningartilvikum sem bráðabirgðaslitlag en þá með skerptum kröfum og lagt er yfir ári síðar.
BRL 32	Burðarlag, efri flokkunarstærð 32 mm	Notað sem burðarlag eða bindilag, ekki sem bráðabirgðaslitlag.

3.3 Hönnunarstikar

Hönnunarstikar eru þættir sem taka þarf tillit til og ákvarða til að hlutur standist þær kröfur sem gerðar eru til hans. Malbik hefur nokkra mikilvæga hönnunarstika til að mynda holrýmd, bindiefnisinnihald, festu og sig og fleiri þættir geta komið til greina. Hér á eftir verður gerð stuttlega grein fyrir þessum hönnunarstikum og áhrif þeirra á eiginleika malbiks og vali á þeim við ýmsar aðstæður.

Holrýmd

Það er þekkt að holrýmd malbiks er mikilvægur þáttur þegar kemur að því að vinna á mótí skemmdum í malbiki eins og hjólfaramyndun, þreytusprungum eða sprungum vegna lágs hitastigs. Holrýmd hefur einnig áhrif á endingu malbiks með tilliti til öldrunar og niðurbrots. Há holrýmd eykur áhrif öldrunar á bikið í malbikinu og líkur á að vatn komist í gegnum malbikslagið (Masad o.fl., 2002). En á mótí kemur að of lág holrýmd, vegna til dæmis of mikillar þjöppunar, getur leitt til bæði hjólfaramyndunar og blæðinga (Mamlouk, 2006).

Tvær meginástæður eru fyrir kröfum til holrýmdar. Þær eru annars vegar til að fyrirbyggja að vatn eigi greiða leið niður í bikbundnu lögin í veghlotinu og setjist þar fyrir, frjósi og þiðni á víxl og valdi þannig skemmdum og hins vegar til að lágmarka líkur á að malbikið skriði undan þungaumferð. Þessar tvær ástæður eru ill samrýmanlegar því að þegar malbik hefur litla holrýmd minnka líkur á að vatn safnist fyrir í holrúminu og ef holrýmd er hæfileg vinnur hún gegn skriði. Malbik getur talist þétt þegar holrýmd þess er minni en 3%, nokkuð þétt ef hún er á bilinu 3-5%, lítillaga lekt ef holrýmd er á bilinu 5-8% en lekt við meiri holrýmd. Í Bandaríkjunum er talið að malbik eigi að vera með holrýmd á bilinu 3-8%, ekki undir 3% vegna hættu á skriði og ekki yfir 8% því þá getur súrefni og vatn valdið skemmdum í malbikinu. Súrefni í andrúmsloftinu herðir bindiefnið og gerir það stökkt (Vegagerðin, 2010).

Veðurfar á Íslandi gerir miklar kröfur til veðrunarþols malbiks. Yfir vetrartímamann eru slitlög blaut yfir löng tímabil, vegir og götur víða saltaðar margoft á þeim tíma og sveiflur milli frosts og þíðu margar. Talið er að slit vegna negldra hjólbarða aukist með meiri holrýmd malbiks. Norsk rannsókn gefur til kynna að slit aukist um 50% ef holrýmd í útlögðu malbiki er aukin úr 3% í 7% (Vegagerðin, 2010).

Mjög lág holrýmd eykur líkur á skriði. Skrið hefur mælst hér á landi og rannsókn, sem var smá í sniðum, benti til að skrið væri um 10-25% af hjólfaramyndun. Þó svo að lág holrýmd auki líkur á skriði gefa nokkur atriði til kynna að það sé raunhæft að gera minni kröfur til holrýmdar hér en á hinum norðurlöndunum. Sumur á Íslandi eru öllu svalari en í nágrannalöndunum og miklir sumarhitar, sem auka líkur á skriði, sjaldgæfir. Líkur á skriði ráðast þó ekki af holrýmd einni saman heldur einnig af gerð bindiefnis og samsetningu malbiksblöndunnar. Líkur á að malbik skriði minnka með auknu innihaldi mélu, þá sem hlutfalli af magni bindiefnis, heppilegri kornalögun, auknu innihaldi grófra steinefna, hækkandi brothlutfalli steinefnis og stífara bindiefni (Vegagerðin, 2010).

Önnur lögmál gilda um holrýmd í bindilagi. Hlutverk þess er aðallega að rétta burðarlagið af áður en slitlagið er lagt ofan á, auka burðarþol bikbundna hluta veghlotsins og draga úr líkum á sprungumyndun af völdum hreyfinga í burðarlaginu. Rannsóknir frá Þýskalandi benda til þess að skúfuspennur séu mestar á um 8 cm dýpi og það væri því í bindilaginu þar

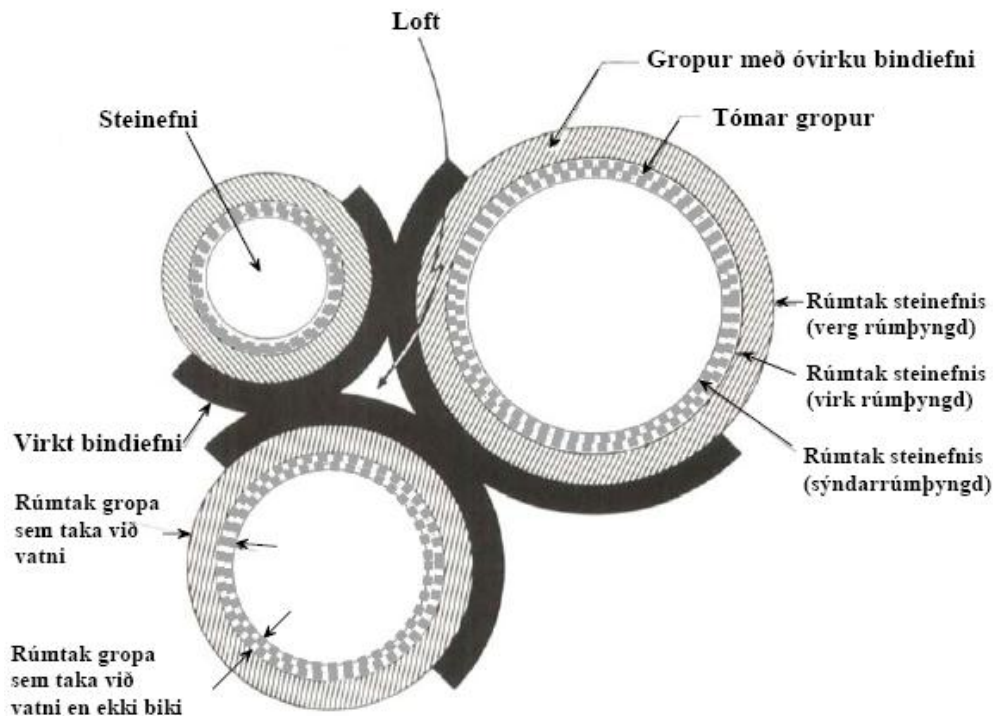
sem það væri. Það er því æskilegt að bindilagið hafi meiri holrýmd en slitlagið og að brothlutfall steinefna sé hátt í bindilaginu. Þetta er gert til að draga úr líkum á skriði í malbikinu (Vegagerðin, 2010).

Bindilagsmalbik er ódýrara en slitlagsmalbik og því kemur fyrir að það er notað sem slitlag þar sem umferð er lítil, það er undir 3000 ÁDU. Þegar það er gert þarf að gæta þess að holrýmdinni sé hliðrað í átt að því sem kröfur fyrir slitlag gera ráð fyrir til að minnka líkur á skriði (Vegagerðin, 2010).

Holrýmd í burðarlagsmalbiki gegnir ekki veigamiklu hlutverki. Líkur á skriði eru mun minni en í efri lögum. Tvær megin ástæður eru fyrir því. Það er að álag frá umferð er farið að dreifast mun meira en ofar og líkur á að hitastig í þessu lagi verði það hátt að hætta á skriði skapist eru hverfandi. Hætta á sigi vegna eftirþjöppunar getur orðið nokkur ef holrýmd er of mikil en ef holrýmd er lítil eykst það þreytuþol burðarlagsins, sem er ákjósanlegt því að burðarlagi er yfirleitt ætlað að endast mun lengur en slit- og bindilag (Vegagerðin, 2010).

Holrýmd í steinefni

Steinefnin sem notuð eru við gerð malbiks, þau íslensku síst undanskilin, eru oft og tíðum gropin. Gropur eru holur í steinefni sem eru annað hvort opnar, þannig að þær geti fyllst af vatni eða af meiru eða minna leyti af biki eða lokaðar þannig að vatn kemst ekki inn í þær. Öllu jöfnu eru gropur það lokaðar að bindiefni getur aðeins fyllt þær að hluta. Mynd 3-6 sýnir hvernig má skipta rúmtaki steinefnis að mestu í þrjá flokka eftir þeim eiginleikum sem hafa áhrif á hönnun malbiks. Steinefnakornin eru sýnd á myndinni sem kúlur, ysta, skástrikaða, lagið sýnir þann hluta þar sem gropur eru nægjanlega víðar til að taka við bindiefni. Lagið þar fyrir innan táknar þann hluta sem gropur eru nægjanlega stórar til að geyma vatn en ekki bindiefni. Innst er sá hluti sem er það þéttur að hann tekur ekki við vatni né bindiefnum. Á milli kúlanna er sýnt autt svæði sem táknar loftrými, hluti af holrýmd malbiksins, svo táknar svarti hlutinn virkt bindiefni (Vegagerðin, 2010).



Mynd 3-6 Einfölduð mynd af því hvernig malbik skiptist í rúmmál steinefnis, virkt/óvirkt bindiefni og loft (Vegagerðin, 2010).

Holrými steinefnis þarf að fylla af mestu leyti af biki en ekki öllu. Ef að allt holrými steinefnis er fyllt af biki myndast hætta á því að bindiefnið þrýstist upp á yfirborðið þegar heitt er í veðri, það kallast blæðingar. Þá verður yfirborðið hált og hætta á skriði undan þungaumferð eykst. Þó þarf að fylla holrými steinefnis það mikið með bindiefninu að malbikslagið verði vatnspétt (Vegagerðin, 2010).

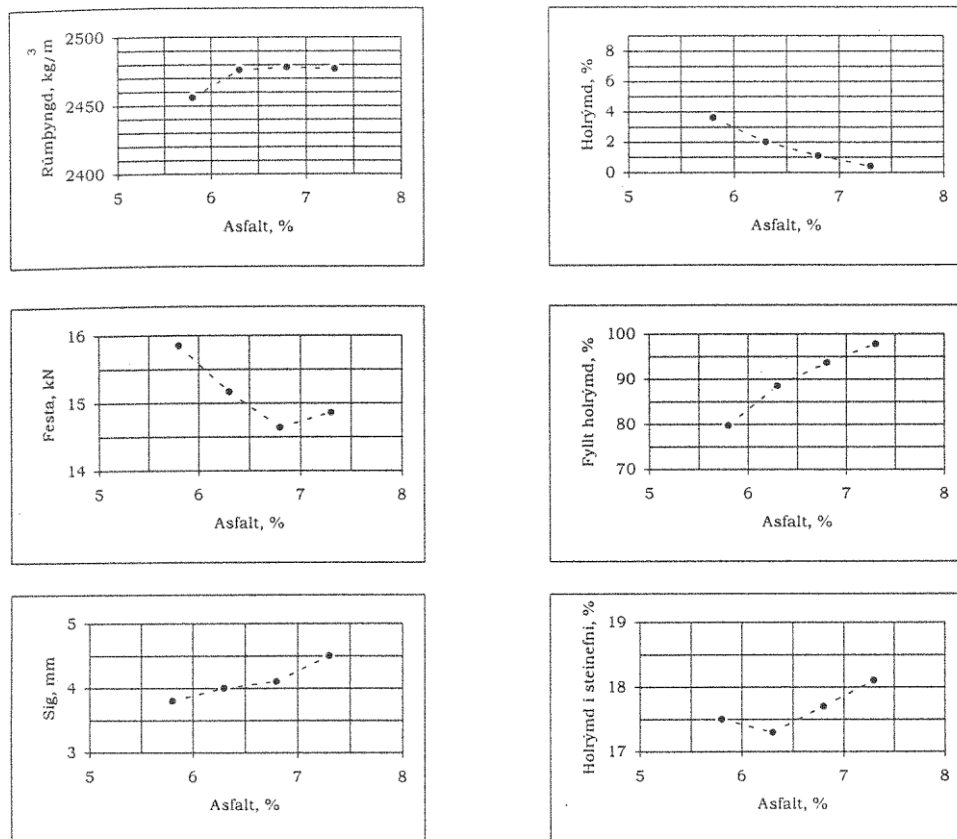
Bindiefnisinnihald

Bindiefnisinnihald malbiks hefur áhrif á ýmsa eiginleika þess, bæði jákvæð og neikvæð. Aukið bindiefnisinnihald hefur annars vegar áhrif á að fyllt holrými steinefna eykst og bindiefnishimna steinefna þykknar. Ef bindiefnisinnihald er hátt eykur það þreytuþol, veðrunarþol og minnkar líkur á viðloðunarskemmdum. Hætta er aftur á móti á að skrið aukist með auknu bindiefnainnihaldi. Þegar að bik þrýstist upp úr yfirborðinu, vegna hás bindiefnainnhalds, við völtun eða undan umferð má búast við minna hemlunarviðnámi þar til negldir hjólbarðar hafa skrapað yfirborðið (Vegagerðin, 2010).

Festa og sig

Marshallaðferðin er ein algengasta af mörgum hönnunaraðferðum fyrir malbiksblöndur, þá með tilliti til festu og sigs. Marshallaðferðin var þróuð upp úr 1940 og er af mörgum talin úrelt, þó er hún enn langalgengasta aðferðin til að ákvarða samsetningu malbiks ekki síst vegna þeirrar miklu reynslu sem hefur skapast af notkun hennar. Superpave aðferðin hefur veitt henni nokkra samkeppni, þó aðallega í Bandaríkjunum, en hún þykir dýr og flókin í framkvæmd. Marshallaðferðin er ætluð fyrir heitblandað malbik með kornastærð að hámarki 25 mm og tiltölulega þetta kornakúrfu. Síðastnefnda ákvæðið gerir það að álitamáli hvort þessi aðferð henti við prófanir og hönnun á SMA malbiki (Vegagerðin, 2010).

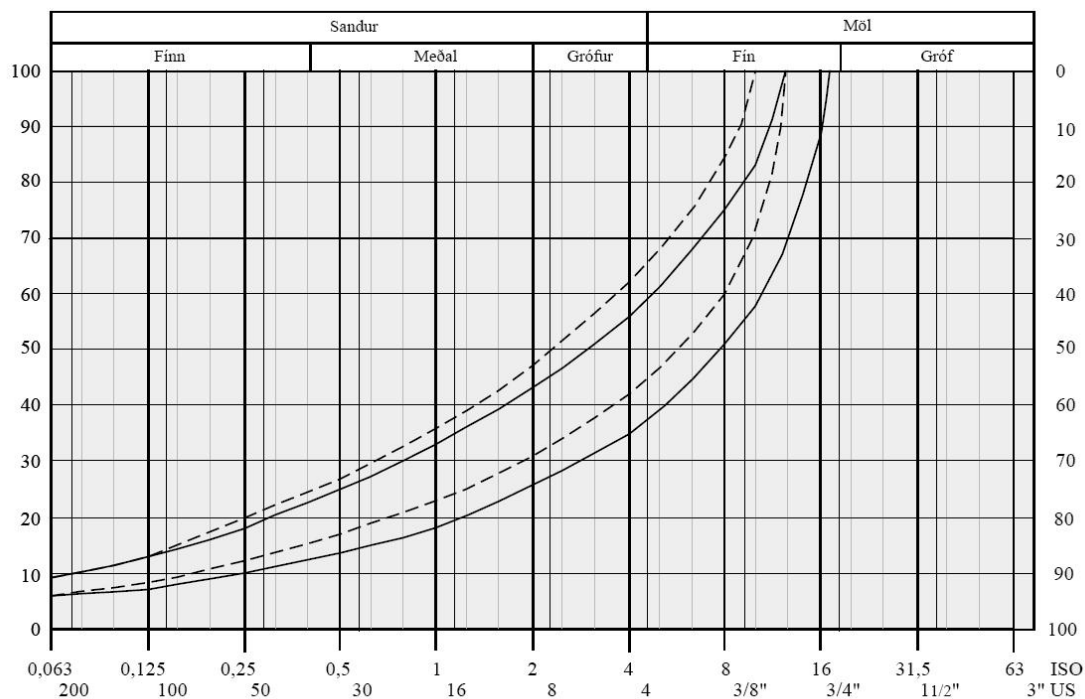
Marshall aðferðinni má lýsa í stuttu máli eins og hún er notuð á Íslandi. Fyrst eru þau steinefni sem koma til greina skoðuð og kannað hvort að þær uppfylli kröfur sem til þeirra eru gerðar. Oft og tíðum er um að ræða blöndu af efni með mismunandi kornastærðir. Þegar ákveðið hefur verið í hvaða hlutföllum steinefni skuli blönduð og áætlað bikmagn eru útbúnir malbikskjarnar (u.þ.b. 60 mm á hæð og 100 mm að þvermáli). Svo er bikinnihaldi breytt þrisvar til fjórum sinnum. Kjarnarnir eru svo þjappaðir með svokölluðum Marshallhamri og brotnir í tilheyrandi álagsbúnaði. Nokkrar mælinga eru gerðar og út frá þeim er bikinnihald ákveðið. Þeir stikar sem eru kannaðir eru rúmþyngd, holrýmnd, festa, fyllt holrýmnd, sig og holrýmnd í steinefni. Dæmi um niðurstöður úr Marshallprófi má sjá á mynd 3-7 hér að neðan (Ingason, 2000).



Mynd 3-7 Dæmi um niðurstöður úr marshallprófi (Ingason, 2000).

Sáldurferill

Sáldurferill, kornakúrfa, er ekki hönnunarstiki í þeim skilningi að ekki er hægt lýsa honum með einni tölu eða tveim, til þess eru kornakúrfur of fjölbreyttar. Kornakúrfur hafa þó afgerandi áhrif á eiginleika malbiks og því er talað um hann sem hönnunarstika (Vegagerðin, 2010).



Mynd 3-8 Markalínur steinefnis í malbiki (Vegagerðin, 1995).

Mynd 3-8 sýnir markalínur kornadreifingar stungubiks. 70% þyngd korna í slitlagi sem eru stærri en 4 mm á að vera með að minnsta kosti einn brotinn flöt. Þetta hlutfall má vera minnst 30% í undirlagi (Vegagerðin, 1995).

Kornakúrfur malbiks geta verið harla mismunandi. Þegar kornakúrfur er ákveðin fyrir tiltekna malbiksblöndu er mikilvægt að hún breytist sem allra minnst. Ef kornakúrfur breytist án þess að aðrir stikar breytist getur það haft mikil áhrif á eiginleika malbiksins og er sjaldan til að bæta eiginleika malbiks sem hannað hefur verið fyrir ákveðnar aðstæður. Taka má sem dæmi að ef kornakúrfur er grófari en forskrift malbiksblöndunar segir til um má búast við meiri holrýmnd og þá má búast við auknum líkum á skemmdum af ýmsu tagi. Því er frávikum frá tiltekinni kornakúrfu malbiksblöndu settar þröngar skorður í framleiðslu (Vegagerðin, 2010).

Hemlunarviðnám

Hemlunarviðnám er mikilvægur eiginleiki malbiks. Þrjú atriði hafa bein eða óbein áhrif á hemlunarviðnám; bindiefnisinnihald, yfirborðseiginleikar steinefna og efri flokkunarstærð steinefna. Hér á eftir verður fjallað stuttlega um þessi þrjú atriði.

Bindiefnisinnihald má ekki vera of hátt miðað við holrýmnd steinefnis í malbikinu. Þá getur farið svo að bindiefnið þrýstist upp úr yfirborðinu annað hvort strax við útlögn eða á heitum sumardeg. Þá geta myndast feitir blettir á yfirborði malbiksins þar sem að hemlunarviðnám minnkar. Ef bindiefnahlutfall er of hátt mun það sem umfram er koma upp á yfirborðið á endanum. Lágð bindiefnainnihald er talið stuðla að betra hemlunarviðnámi (Vegagerðin, 2010).

Yfirborðseiginleikar steinefna skipta máli. Slitþolin steinefni eiga það til að fágast undir umferð, þá minnkar núningsviðnám milli hjólbarða og yfirborðs og þannig minnkað hemlunarviðnámið. Negldir hjólbarðar vinna gegn fágun steinefna (Vegagerðin, 2010).

Efri flokkunarstærð steinefna hefur óbein áhrif á hemlunarviðnám í samspili með notkun negldra hjólbarða ef umferðarhraði er mikill. Ef steinefni er tiltölulega slitþolið þá verður yfirborðið frekar gróft, þar sem steinar standa uppúr. Þetta gerir það að verkum að vatn á tiltölulega greiða leið út úr snertifleti milli yfirborðs og hjólbarða. Þetta hefur jákvæð áhrif á hemlunarvegalegd ökutækja, þá við hærri hraða þegar hætta er á að hjól bifreiða byrji að fljóta (Vegagerðin, 2010).

Meðan notkun negldra hjólbarða er töluverð eru minni líkur á að hemlunarviðnám vega verði of lítið, nema þá á milli þess sem að slitlagið er lagt og þangað til aftur verði leyfilegt að nota neglda hjólbarða. Ef notkun negldra hjólbarða dregst verulega saman má búast við að hemlunarviðnám geti breyst til hins verra í slitlögum á Íslandi (Vegagerðin, 2010).

3.4 Helstu brotmyndir malbiks

Brotmyndir (e. distress) eru skemmdir í malbiki sem hafa áhrif á upplifun ökumanns við akstur, minnka öryggi vegfarenda og auka hættu á tjóni á ökutækjum. Brotmyndir eru af mörgum toga og geta verið frá því að vera það smávægilegar að ökumaður varla taki eftir þeim við akstur upp í að vera það alvarlegar að óakandi verði. Hér á eftir verður farið í nokkrar helstu brotmyndir í malbiki og lögð aðal áhersla á hjólfaramyndun sem verður svo tekin ítarlegar fyrir í kafla 4.

Á umferðarþyngri vegum og götum landsins eru hjólför í slitlagi helsta brotmynd malbiks. Hjólför myndast af tvennum orsökum það er vegna slits af völdum negldra hjólbarða og vegna deigra formbreytinga, sigs og skriðs, af völdum þungaumferðar. Leiða má að því líkur að helsta orsök hjólfara í þéttri byggð með mikla umferð, á höfuðborgarsvæðinu, sé vegna slits en á móti vegna formbreytinga á þjóðvegum, þar sem að hærri hlutfall umferðar er þungaumferð.

Hjólfaramyndun

Hjólfaramyndun í malbiki verður einna helst vegna tveggja þátta, það er slit vegna nagladekkja og deigar formbreytingar í einhverju laganna í veghlotinu.

Hjólfaramyndun vegna nagladekkja verður þegar naglarnir fjarlægja agnir úr yfirborði malbiks. Þegar naglar snerta malbiksyfirborð brjóta þeir oft niður gróf steinefni, sem standa upp úr malbikinu, eða bikkvoðuna, sem samanstendur af biki og fínefnum. Þegar naglinn fer úr snertingu við malbikið verða einskonar rispu áhrif og agnir sem brotnað hafa losna. Hjólfaramyndunin verður þegar margir slíkir atburðir hafa átt sér stað. Einnig getur hjólfaramyndun vegna slits orðið við sambland af efnum sem notuð eru til hálkueyðinga á veturna, salt og sandur, og sliti vegna venjulegra dekkja (Tervahattu o.fl., 2004). Hægt er að gera greinarmun á hjólfaramyndun sem verður vegna slits og hjólfaramyndunar sem verður vegna deigra formbreytinga, það er sigs og skriðs. Þegar um hjólfaramyndun vegna slits er að ræða verður yfirborð malbiksins hrjúfara og fylliefnakorn standa víðs vegar uppúr yfirborðinu og einnig myndast eitt mjótt hjólfar án þess að malbikið þrýstist upp til hliðar við hjólfarið sjálft, sem yrði ef myndunin væri vegna skriðs.

Nánar verður farið í hjólfaramyndun í kafla 4.

Preytubrot

Preytubrot (preytusprungur) í malbiki verða þegar það verður fyrir síendurtekinni togstreitu áraun sem er þó minni en togstyrkur efnisins. Preytubrot myndast yfirleitt fyrst í neðri brún malbikslagsins og stækkar og lengist upp á við þar til hún nær yfirborði og verður sýnileg. Í preytuferlinu verða til örsmáar skemmdir í malbikinu sem stækka með síendurtekinni áraun og safnast saman í stærri sprungur (Doré & Zubeck, 2009). Brotviðmiðið er tengt hversu mörg álagstilfelli malbikssýni þolir á tilraunastofu, m.t.t. togstreitu í neðri brún. Munur á stærð og fjölbreytileika álags, á tilraunastofu og við raunaðstæður, gerir það að verkum að við raunaðstæður þolir malbikið mun fleiri álagstilfelli en sýnið þolir á tilraunastofu. Þetta hefur í för með sér að taka verður tillit til þessa við notkun á upplýsingum sem fást við prófanir á tilraunastofu (Huang, 2004).

Sprungumyndun eða samdráttur sökum lágs hitastigs

Varmasprungur byrja yfirleitt að myndast hornrétt á akstursstefnuna og eru tiltölulega beinar. Slíkar sprungur geta með tímanum í einhverjum tilfellum náð slíkum þéttleika að bil milli sprungna er minna en breidd vegarins. Með tímanum fara að myndast sprungur sem eru samsíða akstursstefnunni á milli sprungnanna sem eru hornréttar á akstursstefnuna. Sprungumyndun við lágt hitastig á yfirleitt upptök sín í bikbundnum lögum en getur einnig átt upptök sín í malbikslagi sem nýtt malbik hefur verið lagt yfir eða í burðarlagi (Doré & Zubeck, 2009).

Þessar sprungur hafa mikil áhrif á þjónustustig (e. serviceability) vega, þ.e. veldur öikumönnum óþægindum við akstur, og opnar leiðir fyrir vatn ofan í undirbygginguna sem getur valdið skemmdum tengdum frostverkun. Ef svona sprungur myndast verður þörf á að framkvæma sprunguviðgerðir árlega vegna þess að sprungurnar munu opnast að nýju á veturna sökum samdráttar við sprungurnar (Doré & Zubeck, 2009).

Penslusprungur

Þegar sprungur hafa myndast, vegna varma- eða umferðaráhrifa, hefst hnignun malbiks. Stífni minnkar í nágrenni við sprungur og burðargeta undirlaga getur minnkað vegna áhrifa vatns, sem kemst í undirlagið í gegnum sprungu og magnar þær skemmdir sem malbikið verður fyrir sökum þungaumferðar. Sökum þessa myndast aukasprungur í nágrenni við aðalsprungurnar og aðalsprungan á það til að leggjast saman og verða misgeng (Doré & Zubeck, 2009).

Öldrun malbiks

Malbik skemmist með tíma og af völdum umferðar- og veðrunaráhrifa. Þessar skemmdir geta annað hvort aukist eða minnkað með öldrun malbiks aðallega vegna uppgufunar rokgjarna efna við heitblöndun og oxun eftir að hafa verið lagt út (Doré & Zubeck, 2009).

Öldrun veldur því að malbik harðnar og stökknar með tíma. Þannig eykst þol malbiksins gagnvart deigum formbreytingum, þ.e. hjólförum vegna skriðs. En á móti kemur þá aukast líkur á sprungumyndun, rakaskemmdum, holumyndun og sliti vegna nagladekkja sem getur vegið upp á móti auknu þoli gagnvart deigum formbreytingum (Doré & Zubeck, 2009).

Eyðing/molnun

Molnun (e. disintegration) malbiks er niðurbrot malbiksuppyggingarinnar. Það á sér þannig stað að samloðun milli fylliefna í malbikinu minnkar. Molnun lýsir sér sem trosnun (e. raveling), (e. stripping) og sem holumyndun (e. potholes). Þetta veldur því að steinar losna úr malbikinu og lausamöl verður á veginum með tilheyrandi hættum. Ástæða þess að molnun á sér stað er meðal annars lágur lofthiti við útlögn, úrkoma og frost þíðu verkun sem gerir þetta vandamál enn alvarlegra í köldu loftslagi (Doré & Zubeck, 2009).

Holumyndun

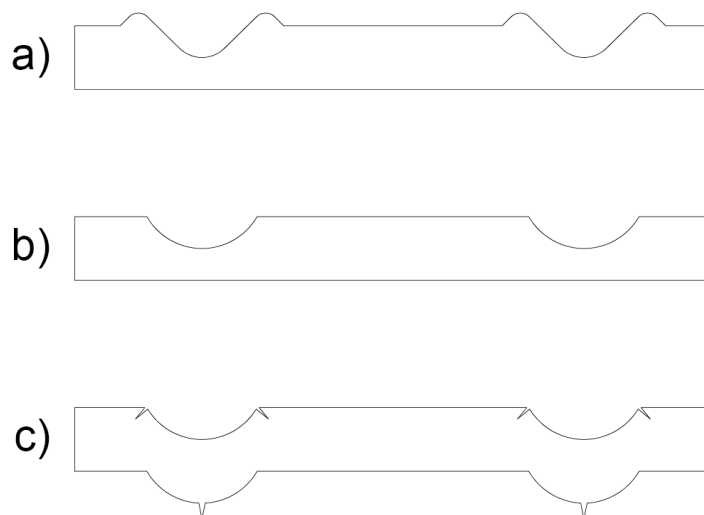
Holur í malbiki eru kringlóttar eða ílangar sem orsakast af staðbundinni molnun malbiksyfirborðsins. Myndun þeirra er ferli sem hefst með veikingu, t.d. sprungumyndun, trosnun eða öldrun. Það þarf þrennt til að holumyndun eigi sér stað; skemmd í malbiki, vatn og umferðaráraun (Doré & Zubeck, 2009).

4 Hjölför

Hjölför í vegum eru á margan hátt mjög óhagstætt ástand. Hjölför hafa í för með sér vandamál sem snerta bæði notendur veganna og eigendur þeirra, ríki og sveitarfélög.

Gagnvart notandanum skapast efnahagsleg og öryggistengd vandamál. Eldsneytisnotkun eykst þegar ekið er eftir vegi með hjölförum og slit á hjólbörðum eykst. Öryggi vegfarenda minnkar því vatn leitast við að sitja í hjölförunum og þá eykst hættan á því að ökutæki fari að fljóta á vatninu sem situr í hjölförunum og minnkar þá stjórn ökumannsins á ökutækinu. Sama getur gerst ef frýs og hálka myndast í hjölförunum.

Það sem snýr að eiganda veganna er efnahagsleg- og samfélagsleg áhætta. Efnahagsleg áhætta felst fyrst og fremst í kostnaði við viðhald. Viðhald vega þar sem hjölför myndast er mikið og kostnaðarsamt og því er eigendum vega mikið í mun að halda hjólfaramyndun í lágmarki. Þetta er gert með ýmsum ráðum svo sem takmörkun nagladekkjanotkunar. Á Íslandi er það gert með því að hvetja fólk til að nota aðra kosti til dæmis harðkornadekk og með að takmarka þann tíma ársins sem að notkun negldra hjólbarða er leyfð. Samfélagsleg ábyrgð eigenda vega er sú að bregðast við skemmdum vega sem ógna öryggi vegfarenda eins fljótt og mögulegt er. Einnig mætti segja að hjólfaramyndun og nagladekkjanotkun snerti efnahagslega tryggingafélög, því um leið og umferðaröryggi hrakar aukast líkur á tjónabótum sem að tryggingafélög þurfa að greiða, sem aftur hækkar tryggingargjöld bifreiðaeigenda.



Mynd 4-1 Hjölför vegna a) sigs og skriðs, b) slits, c) sigs í undirbyggingu (Mamlouk, 2006).

Mynd 4-1 sýnir þrjár mismunandi gerðir hjólfara. Mynd 4-1 a) sýnir hvernig má búast við að þversnið malbiks úr vegi líti út þegar hjólfaramyndun í malbikslögum vegna þungaumferðar er ráðandi. Mynd 4-1 b) sýnir skematíska mynd af hjölförum vegna slits, og mynd 4-1 c) sýnir hvernig má búast við að þversnið malbiks úr vegi líti út þegar hjólfaramyndun í malbikslögum vegna þungaumferðar er ráðandi.

t.d. vegna umferðar ökutækja á negldum hjólbörðum en án þungaumferðar. Ef um væri að ræða hjólfaramyndun vegna bæði þungaumferðar og negldra hjólbarða þá væri einhvers konar sambland af myndum a) og b). Nánar verður farið í samlegð sig, skriðs og slits í kafla 9. Mynd 4-1 c) væri þá ef hönnun og/eða lagning undirbyggingar vegarins væri ekki fullnægjandi. Þá yrði, í miðjum hjólförnum þrýstispenna í efri brún malbikslagsins en togspenna í neðri brún og sprungur yrðu þá í útbrúnum hjólfarsins í yfirborðinu en sprunga undir miðju hjólfarinu í neðri brún.

Hér að neðan má sjá þrjár myndir sem sýna hjólför í vegum og götum. Tvær myndanna eru af höfuðborgarsvæðinu, myndir 4-2 og 4-3, og sú þriðja er tekin í Flóahreppi á Suðurlandi, mynd 4-4. Myndirnar sem teknar voru á höfuðborgarsvæðinu sýna hjólför sem rekja má að mestu leiti til slits vegna nagladekkja en á þeirri þriðju má ætla að deigar formbreytingar séu hærra hlutfall af þeirri hjólfaramyndun.

Á mynd 4-2 má sjá hjólför á gatnamótum Miklubrautar og Lönguhlíðar. Myndirnar voru teknar síðla sumars áður en viðgerðir fóru fram. Þar má sjá skýra litabreytingu á malbikinu í hjólförnum. Þessi hjólför má rekja til slits vegna negldra hjólbarða.



Mynd 4-2 Hjólför á gatnamótum Miklubrautar og Lönguhlíðar (Google Maps, 2013).

Mynd 4-3 er tekin á Hafnarfjarðarvegi, horft til norðurs. Myndin sýnir tvöfalda akrein þar sem aksturstefnan er í suðurátt. Þar má sjá að hjólförin eru talsvert meiri á innri akrein, þar er lengra liðið frá viðgerð. Umferðarmagn á innri akrein er að öllum líkindum ekki meir en á þeirri ytri.



Mynd 4-3 Hjölför á Hafnarfjarðarvegi (Google Maps, 2013).

Mynd 4-4 sýnir Þjóðveg 1 í Flóahreppi, rétt austan við Selfoss. Þar er horft til vestur í átt að Selfossi. Á myndinni sjást mörk þar sem að framkvæmdir hafa verið viðgerðir á slitlaginu í ytra hjólfarinu. Á þjóðvegum á landsbyggðinni má líkum að því leiða að hlutur deigra formbreytinga sé stærri í heildarhjólfaramynduninni.



Mynd 4-4 Þjóðvegur 1, í Flóahrepp asutan við Selfoss (Google Maps, 2013).

4.1 Áhrifaþættir hjólfaramyndunnar

Hjólfaramyndun í malbiki á Íslandi verður einna helst rakin til tveggja þátta. Þessir tveir þættir eru slit vegna umferðar ökutækja útbúin negldum hjólbörðum og svo vegna varanlegra, deigra formbreytinga í einhverju lagi vegbyggingarinnar. Á umferðarpungum götum á höfuðborgarsvæðinu er hlutur nagladekkjaslits verulegur í hjólfaramyndun. Á vegum landsbyggðarinnar, þar sem umferð er minni, er varanleg formbreyting vegna þungra ökutækja ráðandi. Einnig má velta því fyrir sér með hlýnandi veðurfari og aukinni þungaumferð hvort að hlutfall deigra formbreytinga í hjólfaramyndun fari hækkandi.

Hér á eftir verður farið nánar út í hvernig hjólfaramyndun verður með tilliti til slits annars vegar og formbreytinga hins vegar.

4.2 Hjólfaramyndun vegna nagladekkja

Hjólfaramyndun vegna nagladekkja verður þegar naglarnir fjarlægja smám saman agnir úr yfirborði malbiks. Þegar naglar snerta malbiksyfirborð brjóta þeir oft niður gróf steinefni, sem standa upp úr yfirborði slitlaganna. Þegar naglinn fer úr snertingu við malbikið verða einskonar rispuáhrif og agnir sem hafa brotnað losna. Hjólför myndast því þegar margir slíkir atburðir hafa átt sér stað. Einnig getur hjólfaramyndun vegna slits orðið vegna samverkandi áhrifa efna sem notuð eru til hálkueyðinga á veturna, til dæmis salts og sands, og sliti vegna venjulegra dekkja (Tervahattu o.fl., 2004).

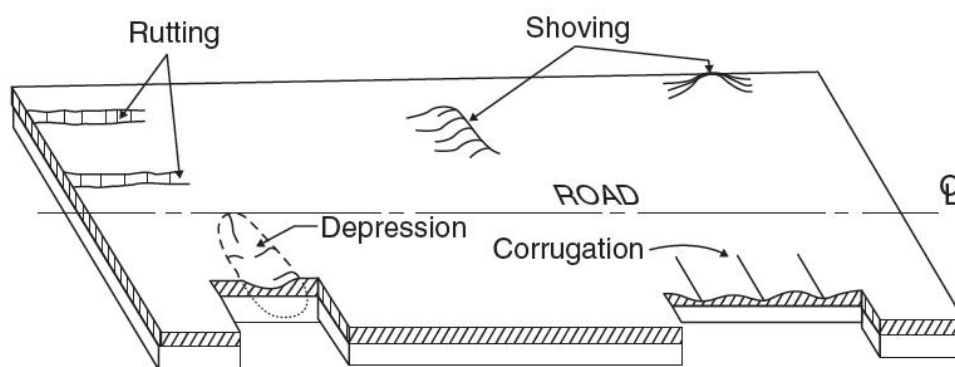
Slit á malbiki er meðal annars tengt eftirfarandi áhrifaþáttum; umferðarmagni, geometrískrar hönnunar, efniseiginleikum og umhverfispáttum. Einstaka þættir hafa meiri áhrif en aðrir og getur áhrifavægi þeirra verið mismunandi eftir vegum og staðsetningu. Í töflu 4-1 eru taldir upp helstu áhrifaþættir nagladekkjaslits.

Tafla 4-1 Áhrifaþættir nagladekkjaslits.

Umferð	Magn Hlutfall ökutækja á nagladekkjum Massi nagla og fjöldi per hjólbarða Hraði bifreiða
Umhverfispættir	Hitastig malbiks Blaut tímabil Tímabil söndunnar Afísun
Geometrísk hönnun vega	Breidd akreina Fjarlægð frá hindrunum í vegkanti (e. roadside obstructions) Hábogar og lágbogar Fjarlægð milli vegamóta Beygjuradíusar/planbogar Þverhalli
Efniseiginleikar blandna	Núningsmótstaða fylliefna, styrkur Innihald grófra agna, kornadreifing fylliefna Efni gegn niðurbroti (e. antistripping agents) Notkun þjálniefna (e. polymer modified)

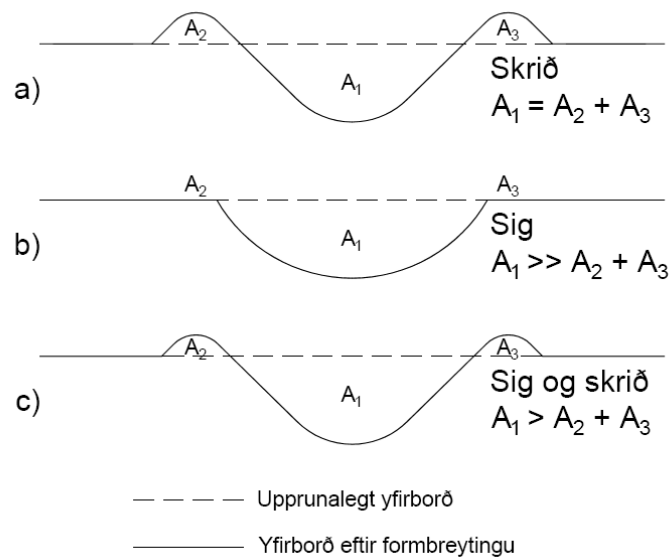
4.3 Hjólfaramyndun vegna deigra formbreytinga

Deig formbreyting er ein mikilvægasta tegund álagstengdra brotmynda í malbiki. Deigar formbreytingar í malbiki eru skilgreindar sem breytingar í yfirborðsprófil malbiks. Þessar breytingar geta haft áhrif á hrýfi malbiksyfirborðs og þar af leiðandi hemlunarviðnám þegar vatn safnast fyrir í formbreytingunum. Formbreytingar geta einnig hraðað sprungumyndun. Algengar formbreytingar eru hjólfaramyndun (e. rutting), bárumyndun (e. corrugations), sig (e. depressions) og skrið (e. shoving), þessar formbreytingar má sjá á mynd 4-5 (Hoque, 2006).



Mynd 4-5 Algengar formbreytingar í malbiki (Austroads, 1987).

Deig formbreyting orsakast af notkun þungra ökutækja. Deig formbreyting samanstendur af tveimur þáttum, sigi og skriði. Mynd 4-6 sýnir hvernig má greina á milli sigs og skriðs út frá þversniðsflatarmálum formbreytinganna. Sig er þétting eða einvíð samþjöppun, sjá mynd 4-6 b). Skrið (e. creep) er lárétt hreyfing eða plasktískt flæði frá hjólaálaginu, sjá mynd 4-6 a). Sig og skrið getur átt sér stað í einu eða fleiri lögum vegbyggingarinnar sem og í fyllingunni. Sig og skrið getur hent samtímis, sjá mynd 4-6 c). Ef að þversniðsflatarmál þess efnis sem ýtist upp vegna skriðs, A_2 og A_3 , er jafnt þversniðsflatarmáli hjólfarsins, A_1 , þá er einungis um skrið að ræða, mynd 4-6 b). Þegar að þversniðsflatarmál hjólfarsins, A_1 , er mikið stærra en flatarmál þess efnis sem ýtist upp við formbreytinguna, A_2 og A_3 , er sig ráðandi valdur formbreytingar. Síðan ef að þversniðsflatarmál hjólfars er stærra en þess efnis sem ýtist upp við hliðar hjólfarsins, en það flatarmál er samt merkjanlegt, þá er um að ræða blöndu af sigi og skriði.



Mynd 4-6 Formbreytingar í malbiki vegna a) skriðs, b) sigs og c) sigs og skriðs.

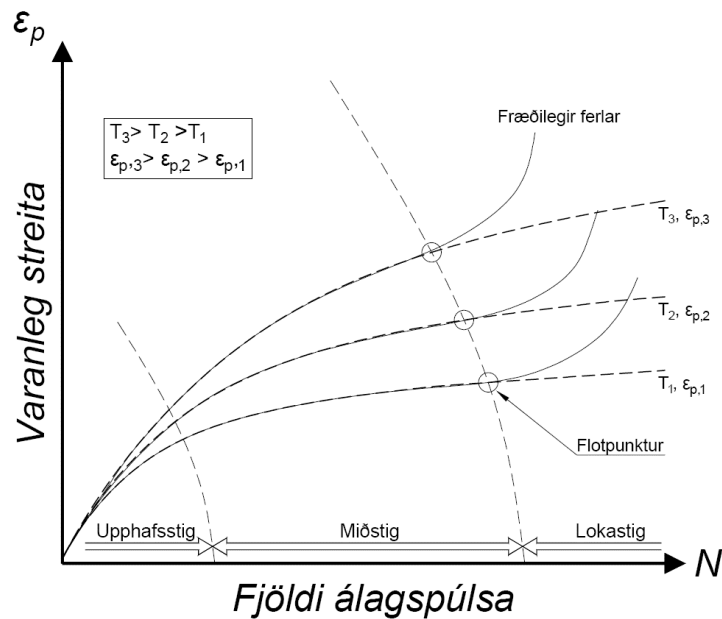
Deigar formbreytingar koma fram sem hjólför og myndast samfara uppsöfnuðum álagstíffellum. Hjólför myndast samsíða akstursstefnu og formbreytingu sem má merkja af því að malbik ýtist örlítið upp í börmum hjólfaranna. Breidd og dýpt hjólfara er síðan háð vegbyggingunni, það er efnisgæði og lagþykkir, álagsmynstri og umferðarmagni ásamt umhverfisþáttum (ARA, 2004).

Óháð því hvaða efni er notað, eru alla jafna þrjú aðskilin stig fyrir hvernig deig formbreyting kemur fram í slitlögum, undir ákveðnu álagi, umhverfisþáttum og efnisvali, sjá mynd 4-7. Þar er þróun varanlegrar streitu skipt upp í þrjú stig; upphafsstig, miðstig og lokastig og má lýsa hverju þeirra stuttlega sem:

Upphafsstig: Mikil hjólfaramyndun með minnkandi hraða á deigum formbreytingum, aðallega aukning þéttleika.

Miðstig: Hæg en jöfn aukning hjólfara sem er einnig tengd þéttleikaaukningu en einnig aukast sker-formbreytingar með auknum hraða.

Lokastig: Mikil hjólfaramyndum sem aðalega á sér stað vegna deigra (sker) formbreytinga með engri rúmmálsbreytingu, þéttleiki helst óbreyttur.



Mynd 4-7 Dæmi um hvernig varanleg streita safnast upp sem fall af fjölda álagspúlva.

Á mynd 4-7 má sjá hvernig varanleg streita eykst með hitastigi, þar sem T_1 er lægsta hitastig en T_3 það hæsta. Sama gildir um streitutilfellin, ε_i , sem verða að völdum hjólaálags.

Hér að neðan er stuttlega rætt um helstu áhrifaþætti deigra formbreytinga.

Vísbendingar eru þess efnis að fylliefni malbiks með þéttar kornakúrfur dragi úr deigri hjólfaramyndun malbiks. Þegar réttri þjöppun er beitt á malbik með þetta kornakúrfu verður minni holrýmd og fleiri snertifletir milli agna fylliefnisins heldur en þegar um opna kornakúrfu er að ræða. Þetta á sérstaklega við þegar hitastig í malbikinu hækkar og stífleiki og burðargeta biksins minnkar (Sousa o.fl., 1991).

Yfirborðsáferð fylliefna gegnir þýðingarmiklu hlutverki til að veita malbiki vörn gegn hjólfaramyndun. Sérstaklega í þykkari bikbundnum lögum og í hlýrra loftslagi er þörf á grófara yfirborði fylliefna. Lögun agnanna í fylliefninu er einnig mikilvæg. Köntuð lögun agna, fengin með mulningi, í fylliefninu hjálpar til við að sporna við hjólfaramyndun (Sousa o.fl., 1991).

Holrýmd í malbiki er einn mikilvægasti eiginleiki malbiks. Malbiksblanda sem er vel hönnuð og þjöppuð á fullnægjandi hátt mun innihalda nægjanlega holrýmd til að draga úr deigum formbreytingum og um leið nægjanlega litla holrýmd til að gera malbikið vatns- og loftþétt. Upphafsgildi holrýmdar ætti ekki að vera meiri en um það bil 8% og ætti ekki að falla undir 3% á líftíma malbiksins. Mikil holrýmd leiðir til lektar, hvarfa við súrefni, trosunar og sprungumyndunar. Lág holrýmd leiðir til hjólfaramyndunar í malbiki (Brown, 1990).

Bikið, bindiefnið, hefur áhrif á hjólfaramyndun en þó í minna mæli en efniseiginleikar fylliefna. Malbik gert með mjúku biki mun verða viðkvæmara fyrir hjólfaramyndun en malbik með stífu biki (bik með mikla seigju). Hjólfaramyndun vegna formbreytinga kemur að jafnaði fram á fyrstu árum malbiksins, innan við fimm ár. Ólíklegra er að formbreyting

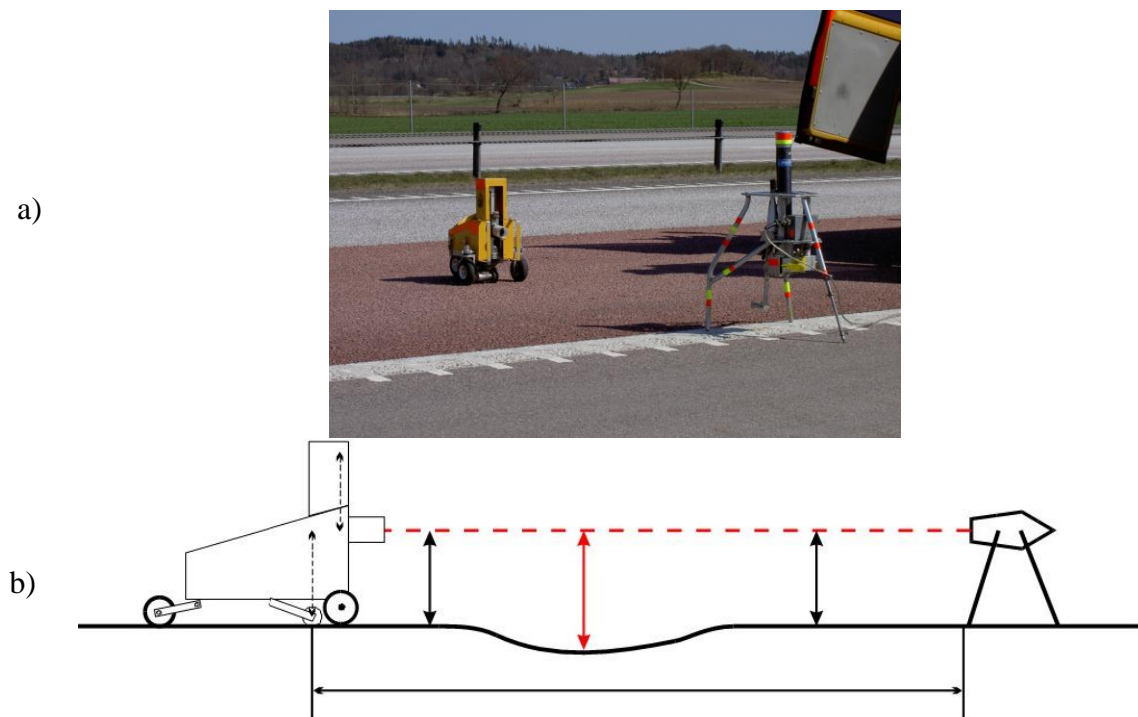
verði eftir að bikið hefur elst eða hvarfast við súrefni, þar sem seigjan hefur þá aukist (Santucci, 2001).

Aðra áhrifaþætti mætti nefna, án þess að þeir verði útskýrðir nánar eins og streitumynstur, áhrif fjölda álagstífla, rakainnihald, sprungumyndun, hvort vegur er á fyllingu eða í skeringu, tegund undirbyggingar, frostþýðuverkun og veðrun, aðallega sólarljós.

4.4 Mælingar á hjólförum

Til að mæla hjólfaramyndun í vegum og götum eru til margar aðferðir. Hér verður gert stuttlega grein fyrir þremur þeirra. Þessar þrjár aðferðir eru þær aðferðir sem að VTI nýtir aðallega við mælingar á hjólförum.

Fyrst ber að nefna svokallaðan Primal prófílmæli (s. profilmätare Primal), sjá mynd 4-8, hann mælir yfirborðsþversnið vega milli tveggja fasta punkta með nákvæmni upp á tíunda hluta úr millimeter með eins til fjögurra centimetra millibili. Föstu endapunktarnir eru þá viðmiðunarpunktur hæðarkerfis (VTI, 2013).



Mynd 4-8 Primal hjólfaramæli, a) hjólfaramæli við mælingar, b) skematísk mynd af hjólfaramæli (Erlingsson, 2010).

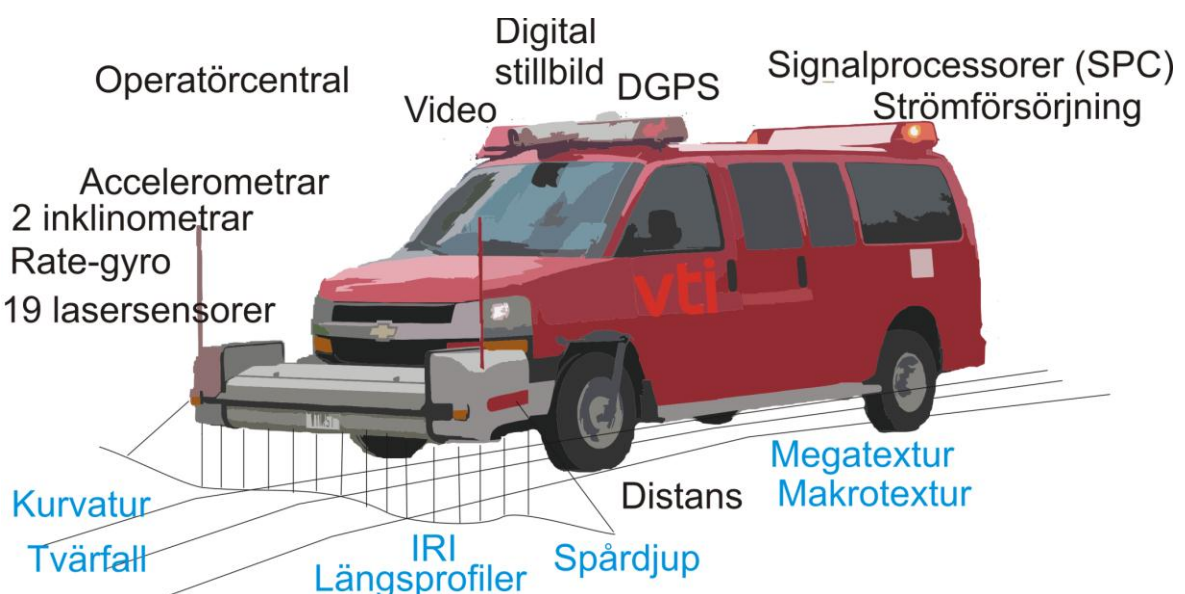
Slitmælir (s. slitageprofilometer), sjá mynd 4-9 gefur þversniðsprófil vegyfirborðs með tilliti til nagladekkjaslits. Prófillinn er mældur í eins meters löngum bilum, að jafnaði þrjú til fjögur til að ná yfir akrein. Slitmælirinn er með nákvæmni upp á 5/100 úr millimetra og

Þéttleiki mælinga er um 400 mælingar á metra. Naglar eru festir í vegyfirborðið og virka þeir sem viðmiðunarpunktur og því mælir tækið einungis slit en ekki annað, svo sem sig og skrið, sem hefur áhrif á vegbygginguna (VTI, 2013). Með því að mæla að hausti og síðan aftur að voru fæst slit viðkomandi vetrar.



Mynd 4-9 Slitmælir á vegi (Erlingsson, 2010).

Á mynd 4-10 sést mynd af bifreið útbúin vegmælíbúnaði (RST) (e. Road Surface Tester). RST er kerfi sem nýtist til að mæla marga eiginleika vega til að mynda áferð (hrýfi), sprungur, ójöfnur, boga, þverhalla og þversnið (hjólför). Þessar mælingar er hægt að framkvæma á eðlilegum umferðarhraða.



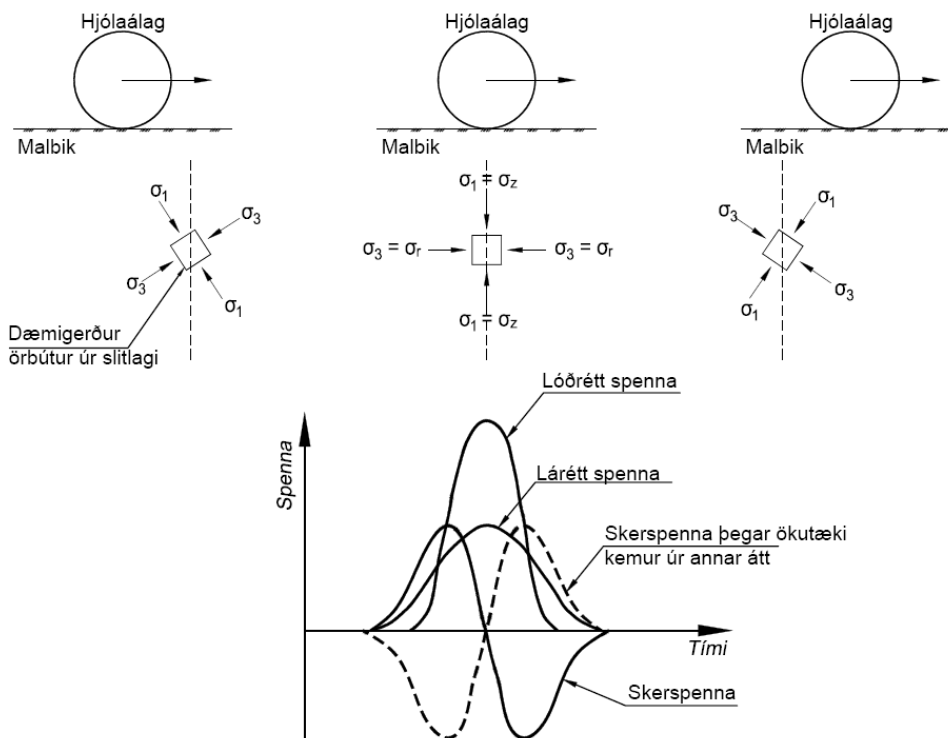
Mynd 4-10 Skematísk mynd af RST (Erlingsson, 2010).

RST er útbúinn 19 leysigeislum til mælinga á yfirborði vega. Þessir leysar mæla vegyfirborðið það er hjólför, þverhalla og IRI gildi (e. International Roughness Index). Leysarnir hafa upplausn upp á 0,06 mm yst og í miðju en 0,03 mm upplausn þar á milli, til móts við hjólin þar sem hjólför myndast (Holen, 2001).

5 Spennur og streitur

Þegar að hjól ferðast eftir vegi verður malbik fyrir álgaspúl. Þessi álgaspúl veldur spennum og streitum í allri vegbyggingunni. Þær spennur og streitur sem verða vegna einstaks álagstilfellis eru mun lægri en þær sem þarf til að valda broti. Samt sem áður þegar þessi álagstilfelli eru endurtekin mörgum sinnum í áranna rás versnar ástand vega þangað til að ástand þeirra er ekki lengur fullnægjandi eða brotástandi er náð. Þannig að magn og fjöldi endurtekninga sem valda spennum og streitum hafa áhrif á gæði vega og ákvarðar líftíma þeirra (Mamlouk, 2006).

Þegar ökutæki ekur á vegyfirborði verður spennuástand sem að lítill örbútur verður fyrir allflókið sjá mynd 5-1. Þegar talað er um spennur í malbiki, þær sem verka á örbútinn, þá eru það þrýsti-, tog- og skúfspennur. Álagsform umferðar samanstendur af stuttum og snöggum álgaspúlsum en síðan fylgir álagslaus tími. Þrýsti-, og togspennur rísa því þegar að ökutæki nálgast og ná hámarki þegar ökutækið er ofan við örbútinn, síðan dregur úr þessum spennum þegar ökutækið fjarlægist bútinn aftur (Shaw, 1980). Stærð þessara spenna er háð þyngd og hraða ökutækis og er fall af tíma. Skúfspenna er flóknara fyrirbæri en þrýsti-, og togspennur, því skúfspennan skiptir um formerki þegar álagsflöturinn er beint yfir athugunarstaðnum, örbútnum (Erlingsson, 1999).

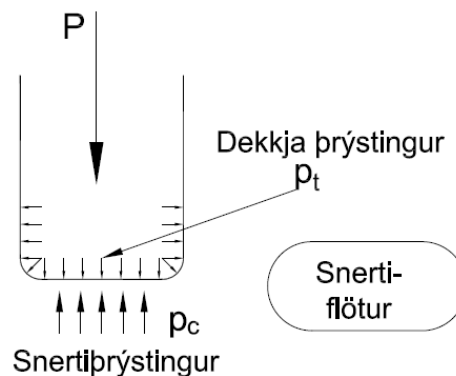


Mynd 5-1 Svörun í malbiki við hjólaálag við mismunandi staðsetningu gagnvart þeim örbút sem til skoðunar er.

5.1 Dekkjaþrýstingur, snertiþrýstingur og snertiflötur

Samspil milli ökutækis og malbiks er flókið þar sem að hrýfi örvar aflfræðilega krafta sem ökutækið veldur og þessir aflfræðilegu kraftar auka samtímis ójöfnur slitlagsins (Mamlouk, 1997).

Núverandi hönnunaraðferðir hafa stuðst við einfaldaðar aðferðir sem fela í sér að líta megi á hjólaálag sem verkar á vegyfirborð sem stöðufræðilegt. Mynd 5-2 sýnir dekkjaþrýstinginn, p_t , snertiþrýstinginn, p_c , og álag á vegyfirborðið.



Mynd 5-2 Dekkjaþrýstingur, snertiþrýstingur og snertiflötur.

Snertiþrýstingurinn milli hjólbarða og vegyfirborðs er annar en dekkjaþrýstingurinn vegna spennu í hliðum hjólbarðans. Dreifing snertiþrýstingsins yfir snertiflötinn er háður loftþrýstingi í hjólbarðanum. Sem dæmi getur snertiþrýstingurinn verið meiri undir miðjum hjólbarðanum, þegar loftþrýstingur er mikill, heldur en undir jöðrum hjólbarðans. Fyrir hjólbarða með lágan loftþrýsting er þessu öfugt farið. Í flestum tilfellum er þó miðað við að snertiþrýstingur sé jafndreifður yfir snertiflötinn og að snertiþrýstingurinn sé jafn loftþrýstingi hjólbarðans, því gildir að:

$$p_c = p_t = p \quad (5-1)$$

Snertiflötinn er nú hægt að tengja við álagið og loftþrýsting hjólbarða með eftirfarandi jöfnu:

$$A = \frac{P}{p} \quad (5-2)$$

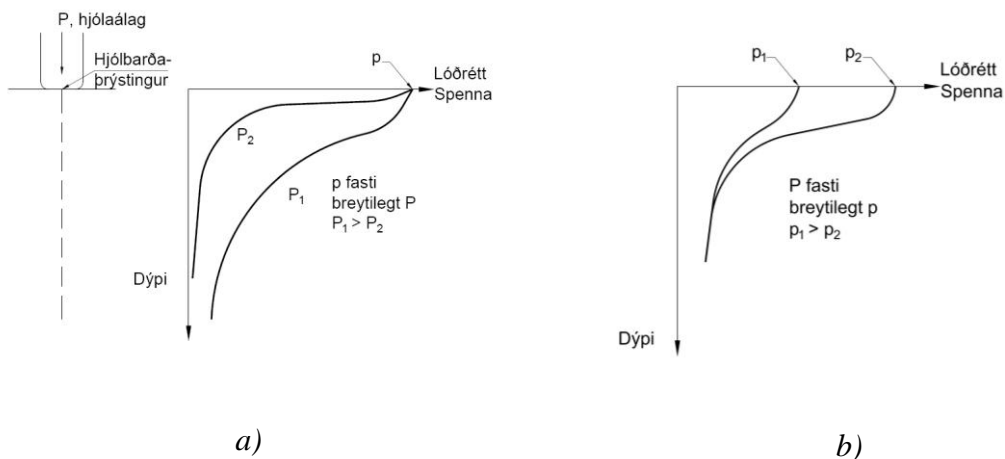
Þar sem A er flatarmál snertiflatarins, P er álagið frá dekkinu og p er loftþrýstingur hjólbarðans. Með því að gera ráð fyrir að snertiflöturinn sé hringlaga er hægt að finna radius snertiflatarins:

$$a = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{P}{p\pi}} \quad (5-3)$$

Önnur form snertiflatar hafa verið fundinn út frá jöfnu (5-2) (Mamlouk, 2006).

5.2 Áhrif af breytingum í umferðarálagi og dekkjaprýstingi

Þegar stöðuálag verkar á vegyfirborð er gert ráð fyrir að lóðréttu spennan við yfirborðið sé jöfn loftþrýstingi í hjólbarðanum. Eftir því sem dýpra er litið í vegbygginguna, og alveg niður í fyllingu, minnkar lóðréttu spennan. Ef hjólaálagið eykst, meðan loftþrýstingnum er haldið óbreyttum breytist lóðréttu spennan við yfirborðið ekki en eykst í neðri lögum, sjá mynd 5-3 a) hér að neðan.



Mynd 5-3 a) Áhrif af breytilegu álagi. b) Áhrif af breytingum í hjólbarðaprýstingi.

En ef hjólaálaginu er haldið stöðugu en loftþrýstingur aukinn eykst lóðréttu spennan í yfirborðinu til jafns við þrýstingsaukninguna en lítil breyting verður þegar neðar í vegbygginguna er komið eins og sést á mynd 5-3 b) hér að ofan. Út frá þessu má draga þá ályktun að hjólaálag hafi áhrif á neðri lög vegbyggingar meðan að loftþrýstingur í hjólbörðum hefur meiri áhrif á vegyfirborðið. Þetta er mikilvægt þegar komið er að veghönnun þar sem að þykkt malbikslaga er háð hjólaálagi á meðan gæði vegyfirborða er háð loftþrýstingi í hjólbörðum (Mamlouk, 2006).

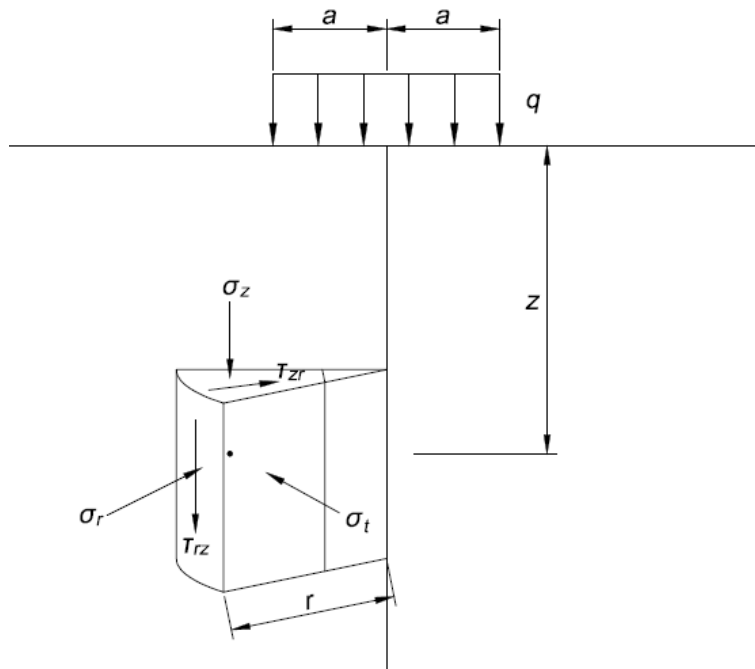
5.3 Svörun vegbyggingar við álagi

Efniseiginleikar vegagerðafna eru flóknir og sýna þeir ólínulega hegðun og háðir ytri skilyrðum og því er erfitt að ákvarða raunverulegar spennur og streitur í vegbyggingum. Ytri skilyrði geta verið t.d. raka- og hitastig vegagerðarefna og álag. Til einföldunar er venja að nota fjaðurfræði og leiðréttá með reynslufórmúlum. Hér á eftir verður farið í fjaðurfræði vegagerðafna fyrst með tilliti til einsleits massa en svo fyrir fjöllumaga kerfi.

5.3.1 Einsleitur massi

Til að lýsa hegðun vegagerðafna sem eru undir hjólálagi er hér byrjað á að lýsa því sem einsleitri hálfrymd. Hálfrymd hefur óendanlegt flatarmál og óendanlega dýpt með fleti fyrir ofan þar sem álagið er. Árið 1885 setti Boussinesq fram kenningu sem byggð var á punktalagi á fjaðrandi hálfrymd. Þessi kenning tengir saman spennur, streitur og færslur í hálfrymdinni. Með heildun er hægt að fá spennur, streitur og færslur sem verða af völdum hringlaga álagssvæðis (Huang, 2004).

Á mynd 5-4 má sjá einsleita hálfrymd sem verður fyrir hringlaga álagi með radíus a og jafndreifðu álagi q . Hálfrymdin hefur fjaðurstuðullinn E og Poisson hlutfallið ν . Til skoðunar er áraun sem myndast á lítinn sívalan örbút með miðju við dýpi z og við fjarlægðina r frá samhverfuásnum. Vegna ássamhverfunar verka einungis þrjár normalspennur σ_z , σ_r og σ_t og ein skúfspanna τ_{rz} sem er jöfn τ_{zr} . Þessar spennur eru allar föll af q , r/a og z/a (Huang, 2004).



Mynd 5-4 Spennur undir ássamhverfu álagi.

Þegar álag er sett á hringlaga flöt myndast hágildi spenna og streita undir miðjum fletinum, það er á samhverfuásnum, þar sem $\tau_{zr} = 0$ og $\sigma_z = \sigma_t$ og σ_z og σ_r eru höfuðspennurnar. Spennur undir miðjum fletinum má finna á eftirfarandi hátt (Huang, 2004):

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1,5}} \right] \quad (5-4)$$

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left[1 + 2\nu - \frac{2(1 + \nu)z}{(a^2 + z^2)^{0,5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1,5}} \right] \quad (5-5)$$

Hér sést að lóðréttu spennan, σ_z , er óháð fjaðurstuðli efnisins, E , og Poissonshlutfalli, ν og að σ_r er einnig óháð E .

Eftir að spennurnar eru fundnar er hægt að fá streitur út frá lögmáli Hookes með eftirfarandi jöfnum:

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (5-6)$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_t + \sigma_z)] \quad (5-7)$$

$$\epsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] \quad (5-8)$$

Ef að snertiflöturinn samanstendur af tveimur hringformum er hægt að reikna spennur og streitur með viðlegð (Huang, 2004).

Þannig að út frá jöfnum 5-6 til 5-8 fást streiturnar:

$$\epsilon_z = \frac{(1 + \nu)q}{E} \left[1 - 2\nu + \frac{2\nu z}{(a^2 + z^2)^{0,5}} - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1,5}} \right] \quad (5-9)$$

$$\epsilon_r = \frac{(1 + \nu)q}{2E} \left[1 - 2\nu - \frac{2(1 - \nu)z}{(a^2 + z^2)^{0,5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1,5}} \right] \quad (5-10)$$

Lóðréttu formbreytinguna, w , er svo hægt að finna með:

$$w = \frac{(1 + \nu)qa}{E} \left\{ \frac{a}{(a^2 + z^2)^{0,5}} + \frac{1 - 2\nu}{a} [(a^2 + z^2)^{0,5} - z] \right\} \quad (5-11)$$

Á yfirborði hálfrymisins, þar sem $z = 0$, er hægt að einfalda jöfnu 5-11 (Huang, 2004):

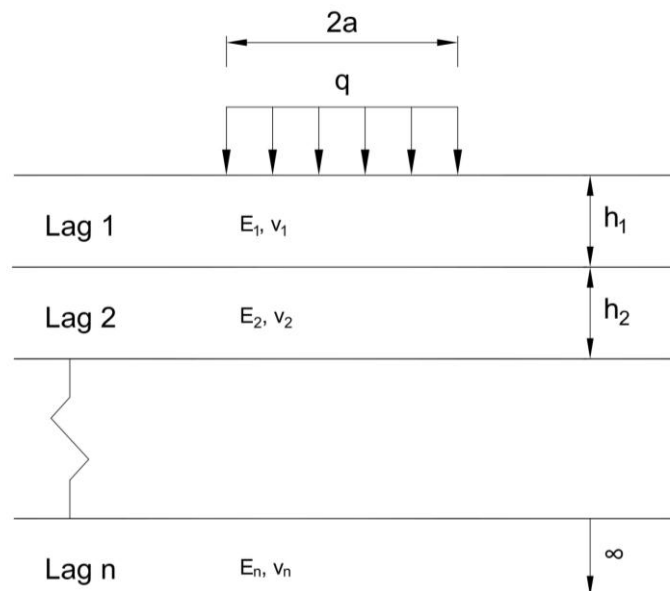
$$w_0 = \frac{2(1 - \nu^2)qa}{E} \quad (5-12)$$

Þessar jöfnur gera ráð fyrir að efni hálfrymisins sé einsleitt, einsátta og línulega fjaðrandi. Því væri hægt einnig að reikna stífina, E , ef að álag og niðurbeygja eru þekktar stærðir.

5.3.2 Spennur og streitur í lagskiptum kerfum

Vegir eru lagskipt kerfi með betri efnum í efri lögum og svo dregur úr kröfum eftir því sem neðar dregur í vegbyggingunni. Lagskiptum kerfum er ekki hægt að lýsa sem einsleitu efni. Árið 1943 kom Burmister fyrst með lausn á tveggja laga kerfi en síðar útvíkkaði hann aðferðina í þriggja laga kerfi (Huang, 2004).

Tölulegar lausnir af lagskiptum kerfum hafa síðan verið þróaðar þar sem spennur, streitur og formbreytingar hafa verið fundnar með góðri nákvæmni. Ólíkar rannsóknir hafa notast við ólíkar nálganir tengdar tegundum álags, efniseiginleikum og jaðarskilyrðum. Með tegundum álags er átt við statískt álag, fast álag á hreyfingu eða dýnamískt álag. Með efniseiginleikum er átt við línulegt og ólínulegt efni með fjaðrandi, seigfjaðrandi og plastískri hegðun. Jaðarskilyrði hafa verið endanleg eða óendanleg dýpt neðsta lags sem og ólík nálgun á núning og tengingu milli laga (Mamlouk, 2006). Slíkar lausnir krefjast mikilla útreikninga. Hafa því verið þróuð forrit til slíks svo sem *Kenpave* (Huang, 2004).



Mynd 5-5 Kerfi með n -mörgum lögum undir hringlaga álagi.

Mynd 5-5 sýnir kerfi með n mörg lög. Þær grunnforsendur sem þarf að uppfylla til að hægt sé að beita aðferðum Burmister eru:

1. Sérhvert lag i er einsleitt, einsátta og línulega fjaðrandi með fjaðurstuðulinn E_i og Poisson hlutfallið ν_i .
2. Efni laganna er þyngdarlaust og óendanlegt að flatarumfangi (e. areal extent).
3. Hvert lag hefur endanlega þykkt h , fyrir utan neðsta lagið sem er óendanlegt að þykkt.
4. Jafndreift þrýstiálag q verkar á hringlaga flöt, með radíus a , á yfirborðinu.
5. Skilyrði um samfelldni eru uppfyllt á mótum laganna með því að lóðrétt spenna, skúfspenna, lóðrétt færsla og færsla í geislastefnu eru þær sömu. Fyrir núninglaus lagamót er samfelldni skúfspennu og færsla í geislastefnu þannig að skúfspennan er núll á hvorri hlið lagmótanna.

Í klassísku kenningunni um fjaðurfræði er gert ráð fyrir að spennufallið ϕ uppfylli eftirfarandi diffurjöfnuna fyrir sérhvert lag:

$$\nabla^4 \phi = 0 \quad (5-13)$$

Fyrir kerfi með ássamhverfa spennudreifingu, þar sem r og z eru sívalningshnit fyrir radíus og dýpi er virkinn gefinn sem:

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (5-14)$$

Þegar spennufallið hefur verið fundið má ákvarða spennurnar og færslur í kerfinu með eftirfarandi jöfnum:

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad (5-15)$$

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right) \quad (5-16)$$

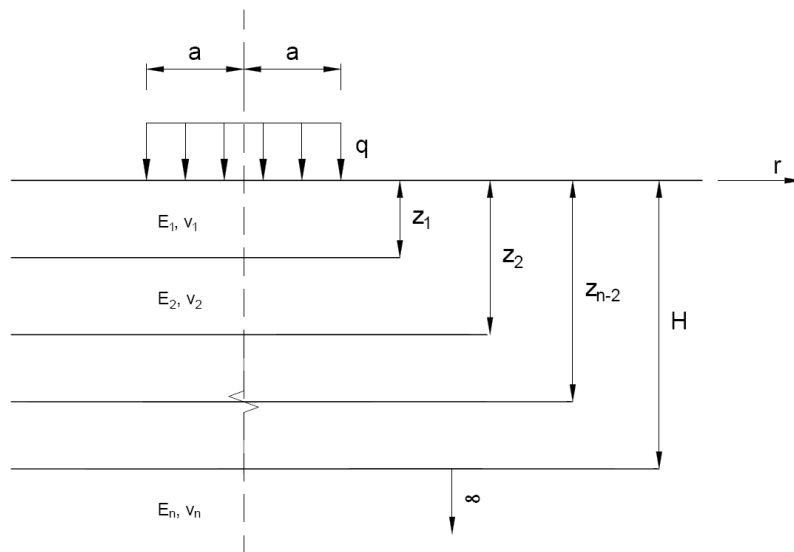
$$\sigma_t = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \phi - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad (5-17)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left[(1 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad (5-18)$$

$$w = \frac{1 + \nu}{E} \left[(1 - 2\nu) \nabla^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] \quad (5-19)$$

$$u = -\frac{1+\nu}{E} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial z} \right) \quad (5-20)$$

Þar sem σ_z er lóðrétta spennan, σ_r er spennan í geisla- eða r -stefnu, σ_t er spenna sem er hornrétt á geislaspenunna, τ_{rz} er skúfspennan, w er lóðrétt færsla og u er færsla í r - eða geislastefnu. Mynd 5-6 sýnir kerfi með n mörg lög í sívalningshnitum, n -ta lagið er þá óendanlegt að þykkt. Fjaðurstuðull og Poisson hlutfall i -ta lags er þá E_i og ν_i (Huang, 2004).



Mynd 5-6 Kerfi með n -lögum í sívalningshnitum.

Fyrir ássamhverft dæmi í fjaðrandi efni er hentugt að gera ráð fyrir spennufalli sem uppfyllir diffurjöfnuna og jaðar- og samfelldniskilyrði. Spennur og færslur er hægt að finna eftir að spennufallið er fundið (Huang, 2004).

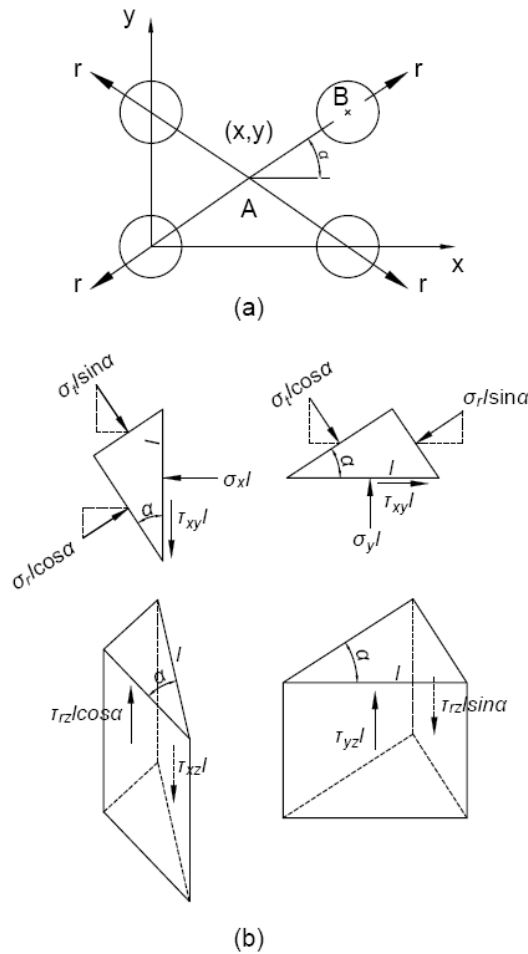
Þar sem jafna (5-14) er fjórða stigs diffurjafna munu spennurnar og færslurnar sem ákvarðaðar eru innihalda fjóra heildunarfasta, fyrir hvert lag; A_i , B_i , C_i og D_i þar sem lágskriftin i stendur fyrir hvaða lag er verið að reikna. Heildunarfastana þarf að ákvarða út frá jaðar- og samfelldniskilyrðum. Af því að spennufallið verður að eyðast út við óendanlega dýpt ættu fastarnir A_n og C_n að vera núll, þ.e. neðsta lagið hefur bara tvo heildunarfasta. Fyrir n -laga kerfi er fjöldi heildunarfasta eða óþekktra stærða $4n-2$ sem þarf að meta með tveimur jaðarskilyrðum og $4(n-1)$ samfelldniskilyrðum. Jaðarskilyrðin tvö eru þau að lóðrétta spennan undir hringlaga álagsfletinum er q og engin skúfspenna er við yfirborðið. Skilyrðin fjögur við hvert af $n-1$ lagmótunum eru samfelldni lóðréttrar spennu, lóðréttrar færslu, skúfspennu og færslu í geislastefnu. Ef lagmótin eru núninglaus er samfelldni skúfspennu og færslu í geislastefnu skipt út fyrir skúfspennu, sem er engin, bæði fyrir ofan og neðan lagmótin (Huang, 2004). Lausn spennufallsins fyrir lag i sem uppfyllir spennufallið, (5-14), er hægt að skrifa á eftirfarandi hátt:

$$\phi_i = \frac{H^3 J_o(m\rho)}{m^2} [A_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - B_i e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} - C_i m \lambda e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i m \lambda e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})}] \quad (5-21)$$

Eftir að heildunarfastarnir hafa verið ákvarðaðir er hægt að leysa kerfið tölulega (Huang, 2004).

5.3.3 Viðlegð hjólaálaga

Lausnir fyrir fjöllumaga kerfi fyrir einfalt álag er hægt að útvíkka með viðlegð (e. superposition) til að finna lausnir þar sem um fleiri álög er að ræða. Mynd 5-7 a) sýnir planlegu tvöfaldrar tvíhjóla uppsetningar. Lóðréttu spennurnar og lóðréttu færslurnar undir punkti A sem verða vegna allra fjögurra álaganna er hægt að reikna með því að leggja saman áhrif hvers álags fyrir sig, vegna þess að þau verka öll í sömu stefnu, z. En ekki er hægt að finna geislaspennuna, σ_r , spennuna σ_t sem er hornrétt á geislaspennuna og skúf spennuna τ_{rz} með samlagningu vegna þess að þær verka ekki í sömu stefnu, eins og þær fjórar geislaspennur, r, á mynd 5-7 a) gefa til kynna. Því þarf að skipta σ_r , σ_t og τ_{rz} upp í þætti í x og y stefnu, sjá mynd 5-7 b), til að finna spennur í punkti A vegna álags í punkti B. Notkun á punkti A er til upplýsinga því það þarf að athuga fleiri punkta til að finna hámarksspennurnar (Huang, 2004).



Mynd 5-7 Viðlegð spenna fyrir fjölhjóla álag.

Þáttun spennna í X og Y stefnu gefur:

$$\sigma_x = \sigma_r \cos^2 \alpha + \sigma_t \sin^2 \alpha \quad (5-22)$$

$$\sigma_y = \sigma_r \sin^2 \alpha + \sigma_t \cos^2 \alpha \quad (5-23)$$

$$\tau_{xy} = (\sigma_r - \sigma_t) \sin \alpha \cos \alpha \quad (5-24)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{rz} \sin \alpha \quad (5-25)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{rz} \cos \alpha \quad (5-26)$$

Þegar spennunum hefur verið skipt í $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ og τ_{xz} þætti er hægt að finna þá sem verða vegna margra álaga með viðlegð (Huang, 2004).

Eftir að búið er að finna $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ og τ_{xz} er hægt að finna þrjár höfuðspennur σ_1, σ_2 og σ_3 með eftirfarandi þriðja stigs jöfnu:

$$\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2)\sigma - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{yz}\tau_{xz}\tau_{xy} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0 \quad (5-27)$$

Þessar höfuðspennur má einnig nota í ólínulega greiningu. Höfuðstreiturnar eru síðan ákvarðaðar með:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E}[\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (5-28)$$


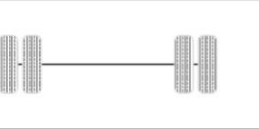



$$\epsilon_2 = \frac{1}{E}[\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)] \quad (5-29)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E}[\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (5-30)$$

5.4 Kenpave

Forritið *Kenpave* fylgir kennslubókinni *Pavement Analysis and Design* (Huang, 2004). Forritið er hannað fyrir svegjanleg slitlög. Undirstaða *Kenpave* er lausn fyrir fjaðrandi fjöllaga kerfi undir álagi frá hringlaga fleti. Lausnirnar eru forsniðnar fyrir margar hjólauppsetningar, ítrun er beitt fyrir ólínuleg kerfi og augnabliksgildi á mismunandi tímum reiknuð fyrir seigfjaðrandi kerfi. Því er hægt að nota *Kenpave* fyrir fjöllaga kerfi

fyrir einfalt, tvöfalt (e. dual), tvíhjól (e. tandem), tvöföld tvíhjól (e. dual tandem) og tvöföld þríhjól (e. dual tridem), sjá mynd 5-8, hvert lag með mismunandi eiginleika, línulega fjaðrandi, ólínulega fjaðrandi eða seigfjaðrandi.

Ás með tveimur hjólum	
Ás með fjórum hjólum	
Tvíás með fjórum hjólum	
Tvíás með átta hjólum	
Þríás með tólf hjólum	

Mynd 5-8 Skematísk mynd af algengum hjólauppstillingum.

Kenpave samanstendur af fjórum forritum; LAYERINP, KENLAYER, SLABSINP OG KENSLABS ásamt öðrum forritum sem sýna myndræna framsetningu. Í þessu verkefni er einungis unnið með LAYERINP og KENLAYER þar sem hin forritin eru til útreikninga á steiptum, stífum slitlögum.

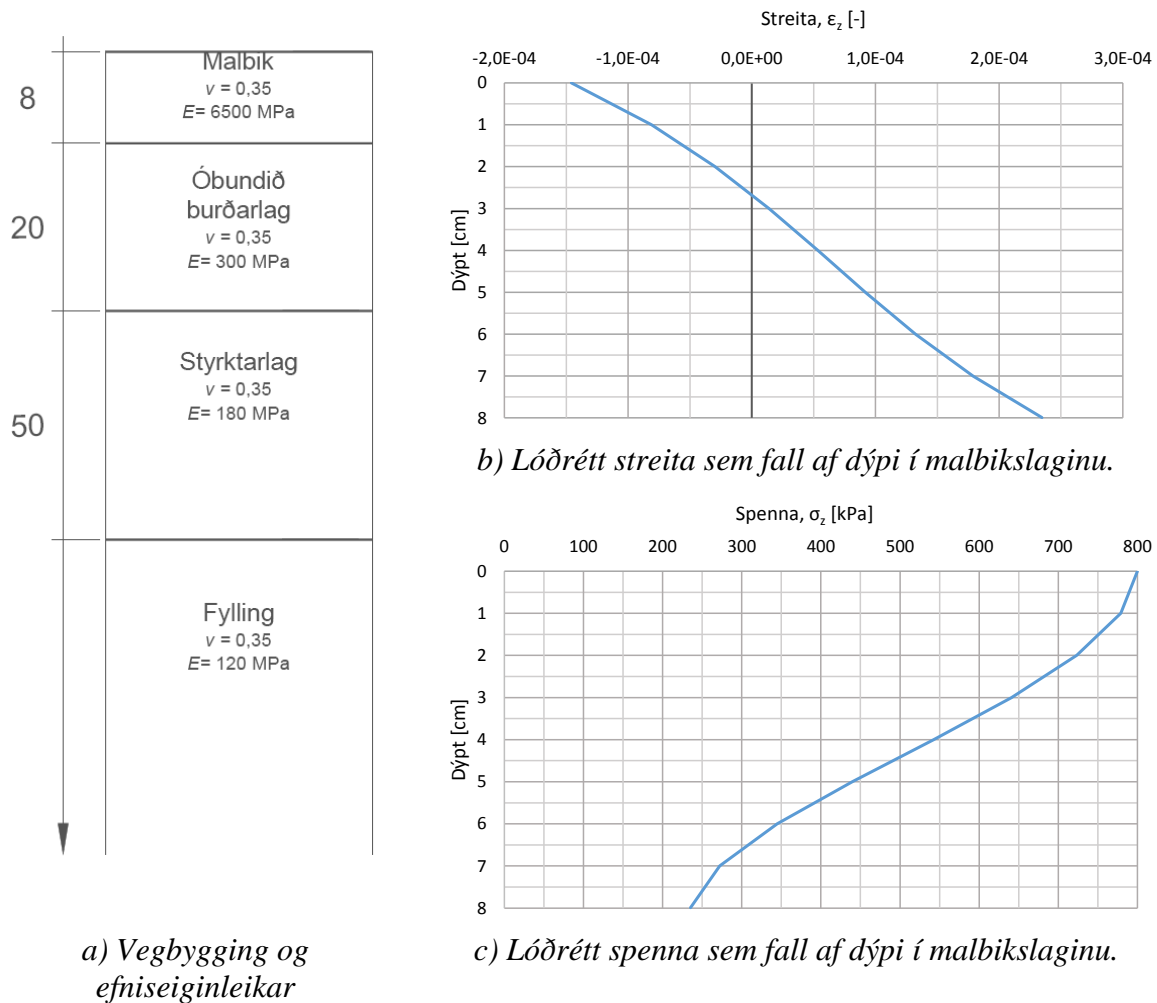
Hér verður sýnt dæmi um útreikninga með forritinu *Kenpave*. Dæmið miðast við að finna spennur og streitur í 8 cm malbikslagi við 10°C. Þessir útreikningar eru svo nýttir í kafla 8. Efnið er skilgreint sem línulega fjaðrandi (e. linear elastic) og samanstendur af 4 lögum. Reiknaðir eru 10 punktar niður eftir vegbyggingunni með 1 cm millibili frá 0 og niður í 7 cm dýpi en svo í 7,99 cm, neðst í malbikslaginu, og svo einn punkt á 15 cm dýpi, í burðarlaginu.

Lögin eru 8 cm malbikslag, 20 cm óbundið burðarlag, 50 cm styrktarlag og fylling með óskilgreinda þykkt, öll með Poisson's hlutfall 0,35. Stífni stuðull þessara laga er 6500 MPa fyrir malbikslagið, 300 MPa fyrir burðarlagið, 180 MPa fyrir styrktarlagið og 120 MPa fyrir fyllinguna. Þetta má einnig sjá á mynd 5-9 a).

Álagstílfellið er ákvarðað sem staðalöxull með fjórum hjólum, sjá mynd 5-8, með hjólbarðaprygting upp á 800 kPa.

Hér fyrir neðan, mynd 5-9 b), sést hvernig streitan í malbikslaginu breytist eftir því sem dýpra er komið.

Einnig má sjá hvernig spennan minnkar í malbikslaginu eftir því sem neðar dregur, mynd 5-9 c). Mynd af spennum í malbikslaginu eru hér einungis til upplýsinga um möguleika á *Kenpave*, því að einungis er stuðst við streituútreikninga þegar fjallað er um deigar formbreytingar.



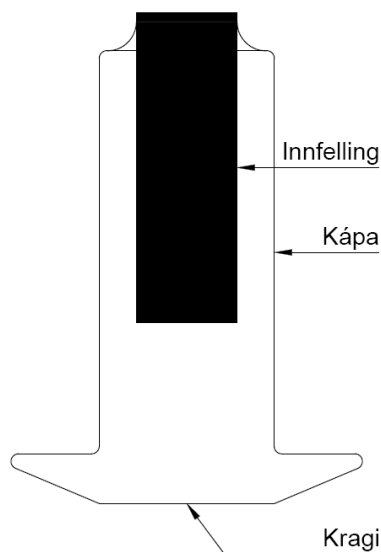
Mynd 5-9 Vegbygging og efniseiginleikar sem útreikningar byggja á og niðurstöður spennu- og streituútreikninga.

Þessir útreikningar eru svo nýttir við útreikninga á hjólfaramyndun vegna deigra formbreytinga með aflfræðilegum aðferðum í kafla 8. Úttaksskrá fyrir þessa útreikninga má finna í viðauka A.

6 Slitþol steinefnis

Þróun negldra hjólbarða og naglategundir

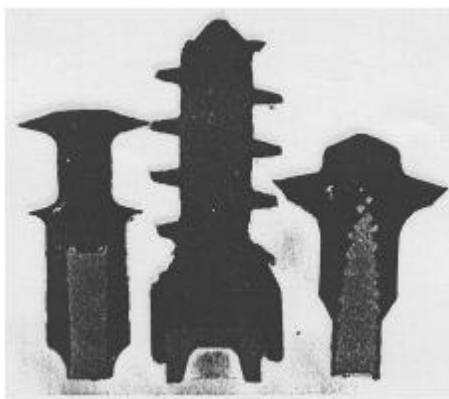
Að negla hjólbarða má rekja aftur til síðasta áratug 19. aldar þegar „málmtakkar“ voru notaðir á loftfyllta hjólbarða. Þessir takkar voru hugsaðir til að auka slitþol hjólbarðanna og veita betri vörn gegn skemmdum þegar ekið var á grófum malarvegum þess tíma. Þessir takkar voru ekki lengi við lýði vegna batnandi vega og dekkja (Angerinos o.fl., 1999).



Mynd 6-1 Fyrstu kynslóðar nagli með einföldum kraga.

Lönd í Evrópu og Skandinavíu voru fyrst til að markaðsetja nagla til almennrar notkunar seint á 6. áratug síðustu aldar. Myndir 6-1 og 6-2 sýnir fyrstu hönnun þessara nagla.

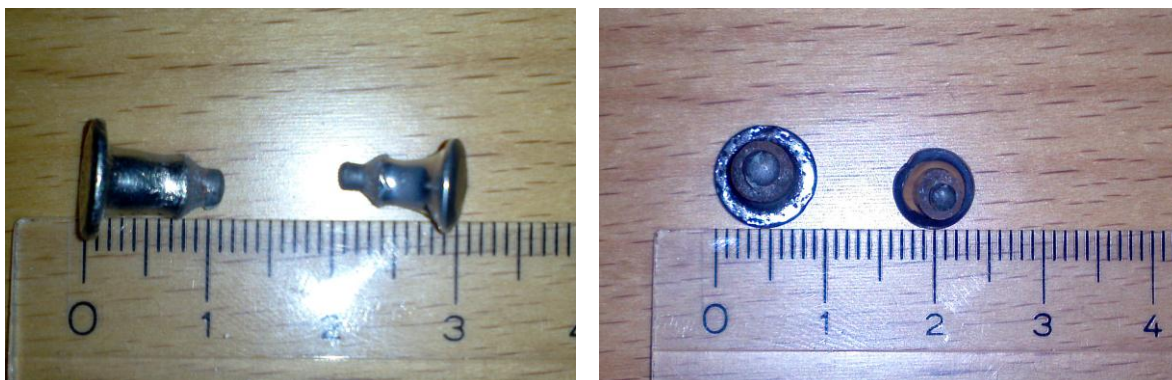
Þeir naglar sem notaðir eru í dag eru byggðir upp af tveimur meginhlutum. Ytri hluti naglans er kallaður kápa (e. jacket) eða hlot (e. body), sem er haldið í gúmmíi hjólbarðans með kraga (e. flange) á botni naglans. Innfellingin/kjarninn eða pinninn er sá hluti naglans sem skagar útfyrir gúmmíið og kemst í snertingu við vegyfirborðið. Mynd 6-1 sýnir nagla af fyrstu kynslóð sem samanstóð af 2,4 mm wolfram karbíð innfellingu, sem skagaði að jafnaði 1,6 mm út úr kápunni, sem var 4,7 mm í þvermál (Miller, 1967). Þessi eins kraga hönnun nagla var notuð sem grunnhönnun af flestum framleiðendum (Angerinos o.fl., 1999).



Mynd 6-2 Fyrstu naglarnir með wolfram karbíð kjarna (Cantz, 1972).

Á Íslandi hófst notkun á negldum hjólbörðum upp úr 1964 og fljótlega voru um 90 – 98% bifreiða í Reykjavík búin negldum hjólbörðum yfir vetrarmánuðina. Reglugerð um notkun negldra hjólbarða tók gildi 20. maí 1973 en fram að því var algengt að um 10% ökutækja ækju um á negldum hjólbörðum yfir sumartímann. Það var um svipað leyti að hafinn var áróður gegn negldum hjólbörðum og hafist var við að salta götur (Ingason & Jóhannesson, 2002).

Mynd 6-3 sýnir dæmigerða nagla tekna úr hjólbörðum bifreiðar höfundar. Naglinn vinstra megin á myndunum er tekinn úr öðrum af fremri hjólbarðum bifreiðar en sá hægra megin úr öðrum af aftari hjólbörðum.



Mynd 6-3 Dæmigerðir naglar úr negldum hjólbarða á Íslandi.

6.1 Aflfræði nagladekkja

Þegar að ökutæki á negldum hjólbörðum ekur eftir götu eða vegi verður yfirborðið fyrir áraun af völdum nagla hjólbarðanna. Að ákvarða þá áraun sem verður á malbiksyfirborð af völdum negldra hjólbarða getur verið vandasamt. Hér á eftir verður reynt að setja áraun af völdum negldra hjólbarða í samhengi við klassíska aflfræði. Taka þarf fram að með því að beita klassískri aflfræði á þetta fyrirbæri getur einungis verið nálgun á flóknu ferli. Það sem þyrfti að hafa í huga er til að mynda dekkjaþrýstingur, mýkt gúmmís, lögun nagla, hversu langt hann gengur til baka inn í gúmmí við árekstur og fleira.

Til að beita klassískri aflfræði má líkja nagla á negldum hjólbarða við ögn á hringhreyfingu. Ögn sem hreyfist eftir hringferli með hraða v hefur miðsóknarhröðunina:

$$a_r = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r \quad (6-1)$$

Þar sem a_r er miðsóknarhröðunin, r er radíus hringferilsins, í þessu tilfalli hjólbarðans. Hornhraði agnarinnar, naglans, er táknuð með ω og hefur einunguna radíana á sekúndu. Ef það er hornhröðun á ögninni, þá er einnig breyting á línulega hraðanum v eftir hringferlinum. Því er hægt að finna snertilþátt hröðunarinnar með:

$$a_t = \alpha r \quad (6-2)$$

Þar sem:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (6-3)$$

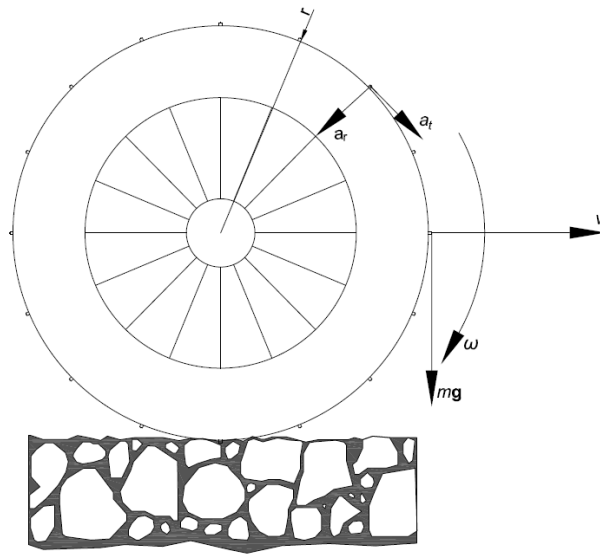
Hér verður einungis átt við hjólbarða sem ferðast með jöfnum hraða, það er að snertilþáttur hröðunarinnar hefur ekki vægi, er núll. Því er heildarhröðun agnarinnar:

$$\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_t \quad (6-4)$$

Eins og sjá má á mynd 6-4 þá er vigrarnir hornréttir því má sjá að hröðunin verður:

$$a = \sqrt{a_r^2 + a_t^2} \quad (6-5)$$

Því er heildarhröðunin jöfn miðsóknarhröðuninni (Benson, 1995).



Mynd 6-4 Skematísk mynd af negldum hjólbarða á hreyfingu..

Annað lögmál Newton's segir að kraftur, F , sé fall af massa, m , og hröðunnar, a :

$$F = ma \quad (6-6)$$

Línulegur skriðþungi (e. linear momentum) er skilgreindur sem margfeldi massa hlutar, m , og hraða hans, v . Því er skriðþungi nagla háður hraða ökutækis og massa sjálfs naglans. Línulegur skriðþungi er vanalega einungis kallaður skriðþungi (e. momentum) og táknaður með p . Eins og hraði er skriðþungi vigurstærð, það er býr yfir stefnu og stærð:

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (6-7)$$

Samkvæmt öðru lögmáli Newtons er kraftur, F , jafn margfeldi massa, m , og hröðunar, a , sjá jöfnu 6-6. Hröðun er hraðabreyting á tíma og má því einnig skrifa sem:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\partial v}{\partial t} \quad (6-8)$$

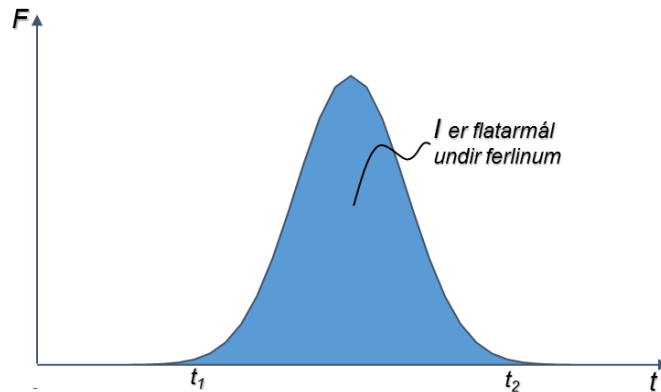
Til að reikna þann kraft sem verkar á malbiksyfirborð má rita jöfnu 6-6 á eftirfarandi hátt með því að nota jöfnu 6-8:

$$\sum \vec{F} = \frac{\partial \vec{p}}{\partial t} \quad (6-9)$$

Atburðurinn þegar að naglar komast í snertingu við malbiksyfirborð er ekki augnabliksatburður, það er tími frá því að naglinn snertir yfirborðið og þangað til honum sleppir. Þennan atburð má túlka með því að finna atlag (e. impulse) naglans. Atlag er samkvæmt öðru lögmáli Newtons skilgreint sem meðalkraftur sem verkar á hlut

margfaldaðann með þeim tíma sem atburðurinn varir, til dæmis frá tíma t_1 til t_2 . Því má skrifa atlag sem eftirfarandi heildi:

$$\vec{I} = \int_{t_1}^{t_2} \sum \vec{F} dt \quad (6-10)$$



Mynd 6-5 Atlag, I , vegna krafts, F , sem verkar á tíma t .

Mynd 6-5 sýnir hvernig áraun sem skapast af nagla á negldum hjólbarða frá tíma t_1 til t_2 . Flatarmálið undir ferlinum er svo atlagið. Atlagið er svo háð lögun naglans, efniseiginleika hjólbarðans og hraða bifreiðar, það er þeirra eiginleika sem ráða tíma atburðarins.

Slitþol steinefnis er síðan mat á mótstöðugetu efnisins, í þessu tilfelli steinefna malbiksins, til að þola síendurtekna álagspúlva eins og á mynd 6-5.

Ekki er til neitt fræðilegt líkan sem metur nagladekkjaslit út frá kraftayfirfærslu eins og hún birtist í jöfnu 6-9 eða frá atlagi naglans/atburðarins, jafna 6-10. Til að meta nagladekkjaslit er því notast við tilraunastofuprófanir á malbikskjörnum og niðurstöður síðan kvarðaðar með reynsluáðferðum við raunverulegt slit í vegi eða götu.

6.2 Prófunarbúnaður og prófanir á steinefnum

Ýmis konar próf eru til sem prófa hörku steinefnis sem notað er til vegagerðar. Hér verður greint frá tveimur algengustu prófununum, kúlnakvarnarprófi og Prallprófi og niðurstöðum þeirra. Prófanir, sem hluti af þessu verkefni, voru síðan framkvæmdar á vormánuðum 2011 í húsakynnum Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands að Keldnaholti.

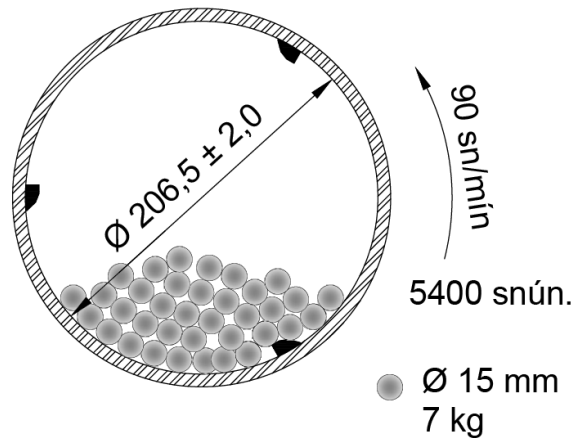
6.2.1 Kúlnakvarnarpróf

Kúlnakvarnagildi er fengið með kúlnakvarnarprófi (ÍST EN 1097-9). Sýnið er flokkað með 11,2, 14 og 16 mm sigtum. Ofnþurkað við 110 °C og um það bil 1000 g vigtuð nákvæmlega, massin fer eftir rúmþyngd steinefnisins. Sýnið sett í kúlnakvörnina, mynd 6-6 a), og prófað. Það byggist á því að sýnið er sett í tromlu ásamt 7 kg af stálkúlum, 1,5 cm í þvermál, og 2 l af vatni, sjá mynd 6-6 b). Tromlan snýst með 90 snúninga/mín í 5400 snúninga. Þetta veldur núningsáraun á sýnið ásamt því að svólítil högg- eða hoppáraun verður vegna þriggja bríka sem er á innra borði tromlunnar. Eftir prófun er sýnið votsigtað

með 2 mm sigti og það efni sem situr eftir, > 2 mm er svo ofnþurrkað. Síðan er efnið vigtað og það hlutfall sem brotnað hefur af, < 2 mm, reiknað. Það er svokallað kúlnakvarnargildi (Vegagerðin, 2010).



a) Kúlnakvörn.



b) Þversnið í kúlnakvörn.

Mynd 6-6 Kúlnakvörn, búnaður og þversnið.

Tafla 6-1 sýnir niðurstöðu kúlnakvarnarprófs á efni úr Seljadalsnámu frá Malbikunarstöðinni Höfða. Þar sést að meðaltalskúlnakvarnargildi úr tveimur prófum, á sama sýninu, er 7,9%.

Tafla 6-1 Niðurstaða kúlnakvarnarprófs.

Sýni	Þyngd fyrir próf [g]	Þyngd eftir próf [g]	Kvarnargildi [%]
I	1130,0	1040,2	7,9%
II	1131,1	1042,9	7,8%
		Meðaltal:	7,9%

Þetta gildi er svo notað þegar að hjólför vegna slits eru reiknuð í kafla 7. Einnig má sjá til samanburðar niðurstöður prófana á fleiri sýnum í viðauka B.

6.2.2 Prallpróf

Prallpróf (ÍST EN 12697-16) er framkvæmt þannig að í stálhólki er komið fyrir sneiðum, sívalningskjörnum, af malbiki. Sneiðarnar eru 100±1 mm í þvermál og 30±1 mm að þykkt, sjá mynd 6-7 a). Í hólknunum eru einnig 40 stálkúlur sem eru 11,50 mm að þvermáli, sjá

mynd 6-7 c) . Á hólkinn er sett lok sem leyfir vatnstreymi yfir sýnið, sjá mynd 6-7 b). Vatnstreymið er 2 l/mín og vatnið er 5 ± 1 °C. Tækið hristir hólkinn upp og niður, 950 sveiflur/mín í 15 mín, og er slaglengdin 43 ± 1 mm (Arason & Pétursson, 2010) (European Committee for Standardization, 1998).



a) Malbikksneiðar tilbúnar til prófunar.



b) Malbikksneið komið fyrir í Pralltækinu.



c) Stálkúlum komið fyrir ofan á malbikksneiðinni.



d) Malbikksneiðar fyrir og eftir prófun.

Mynd 6-1 Ferlið í Prallprófi.

Stærsta steinastærð sýnis skal ekki vera meiri en 22 mm. Sýnin má framleiða á rannsóknastofu í samræmi við prEN 12697 (kafla 30, 31 eða 32) eða nota borkjarna úr vegi sem er fengin í samræmi við prEN 12697 (kafla 27) eða kjörnum sem teknir eru úr plötum skv. prEN12697 (kafla 33) (European Committee for Standardization, 1998). Í hverju Prallprófi eru a.m.k. fjögur hlutasýni og er Prallgildið meðaltal þeirra (Arason & Pétursson, 2010).

Sneiðar sem prófa á eru hafðar í vatnsbaði við 5 ± 2 °C í a.m.k. 5 klukkustundir fyrir próf. Þyngdartapið, sem gefið er í millilítrum eða cm^3 , er fundið með því að þyngd og rúmþyngd mettaðra sýna er mæld fyrir próf og svo þyngdin aftur að prófi loknu (Arason & Pétursson, 2010).

Prallgildið, svörfunargildið Abr_A , er svo reiknað á eftirfarandi hátt:

$$Abr_A = \frac{M_1 - M_2}{\rho_{bssd}} \quad (6-11)$$

Þar sem:

- Abr_A er svörfunargildið, Prall gildið, órúnað í cm^3
- M_1 er massi yfirborðsþurrs vatnsmettaðs sýnis fyrir prófun. M_1 er mælt í grömmum með einum aukastaf
- M_2 er massi yfirborðsþurrs vatnsmettaðs sýnis eftir prófun. M_2 er mælt í grömmum með einum aukastaf
- ρ_{bssd} er eðlisþyngd sýnisins skv. aðferð í prEN 12697 (kafla 6). ρ_{bssd} er í g/cm^3 með þremur aukastöfum (European Committee for Standardization, 1998).

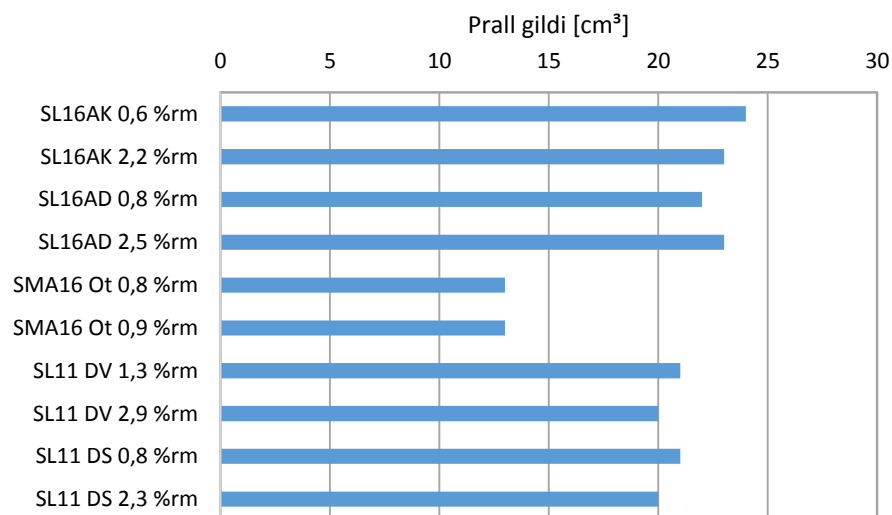
Nákvæmni þessarar prófunaraðferðar er metin sem eftirfarandi; endurtekningarnákvæmni $r = 15\%$ og samanburðarnákvæmni $R = 20\%$.

Tafla 6-2 sýnir niðurstöður Prallprófa fyrir 10 mismunandi malbiksblöndur. Steinefni þessara malbiksblanda koma bæði frá Malbikunarstöðinni Höfða hf. og Malbikunarstöðinni Hlaðbæ Colas hf. Þessar blöndur voru með mismunandi holrúm, merkt %rm, það er hlutfall af rúmmáli.

Tafla 6-2 Niðurstöður Prallprófa.

Slitpolsmælingar - Prall - Meðaltöl			
Sýni blönduð og þjöppuð á rannsóknastofu			
Akureyri: SL16 Krossanes og Durasplitt - Höfði: SMA16 Ottersbo			
Hlaðbær-Colas: SL11 Durasplitt venjulegt og með 3% Sasobit			
Malbiks gerð og holrúm	Efnistap	Rúmþyngd	Meðal Prall
	[g]	[g/cm³]	[cm³]
<i>SL16AK 0,6 %rm</i>	61,4	2,594	24
<i>SL16AK 2,2 %rm</i>	59,6	2,551	23
<i>SL16AD 0,8 %rm</i>	56,0	2,559	22
<i>SL16AD 2,5 %rm</i>	57,4	2,516	23
<i>SMA16 Ot 0,8 %rm</i>	34,4	2,553	13
<i>SMA16 Ot 0,9 %rm</i>	33,1	2,550	13
<i>SL11 DV 1,3 %rm</i>	53,7	2,512	21
<i>SL11 DV 2,9 %rm</i>	48,8	2,471	20
<i>SL11 DS 0,8 %rm</i>	51,8	2,523	21
<i>SL11 DS 2,3 %rm</i>	49,5	2,484	20

Í töflu 6-2 sést að Prallgildin ná frá 24 niður í 13 cm³. Meðaltal þessara prófa er 20 cm³ og er það gildi notað við útreikninga í 7. kafla. Mynd 6-8 sýnir svo línurit af niðurstöðum úr töflu 6-2. Meðaltal Prallgilda er notað þar sem að samanburður prófana, útreikninga í Slitmod og raunverulegra mælinga í felti hafa ekki enn átt sér stað.



Mynd 6-8 Niðurstöður Prallprófa.

Fleiri mæliniðurstöður og nánari útlitun á útreikningum má sjá í viðauka C.

7 Spálíkanið *Slitmod*

7.1 Kynning

Spálíkanið *Slitmod 3.2.03* spáir fyrir um slit og hjólfaramyndun út frá niðurstöðum tilraunaprófana sem á sér stað við áraun af völdum nagladekkja. Spálíkanið er byggt á reynslusamböndum og gert af *VTI* (Sænska veg- og samgöngustofnunin) og nýtir hún gögn sem stofnunin hefur safnað í áratugi. Markmiðið með spálíkaninu er meta slitþol vega. Spálíkanið er unnið í *Excel* og ætti því að vera sem flestum aðgengilegt þó að notkun kunnri að krefjast þekkingar á inntaksstærðum og því sem á að fá út úr líkaninu.

Spálíkanið veitir upplýsingar um slitþol malbiks með teknu tilliti til efniseiginleika, umferðar og umhverfisþátta. Líkanið var takmarkað á fyrstu stigum við að taka einungis inn malbikstegundirnar *ABT (dense-graded asphalt concrete)* og *SMA (stone mastic asphalt)*, þar sem þetta eru tvær langalgengustu slitlagstegundirnar sem notaðar eru á sænskum vegum með mikið umferðaralag (Jacobson & Wågberg, 2007).

Nýjasta útgáfa, *Slitmod 3.2.03*, var þróuð á árinu 2006 og þá var bætt við fleiri vegtegundum, t.d. 2+1 vegum og mjög þröngum vegum. Í þessari nýjstu útgáfu varð það einnig mögulegt að nota útkomur úr *Prall-prófum*, auk *kúlnakvarnarprófs* sem var með í fyrri útgáfu, sem inntaksstærð í líkanið (Jacobson & Wågberg, 2007).

Slitmod 3.2.03 getur stutt við ákvarðanir um endurbætur í einstaka verkefnum sem teknar eru á tæknilegum eða efnahagslegum grundvelli í vali á slitlagi, gæðakröfum á fylliefni o.þ.h. Líkanið getur spáð fyrir um líftíma malbiks og slitlags þangað til endurbætur verða að eiga sér stað. Líkanið er þróað með það að leiðarljósi að meta líftíma vega með tilliti til hjólfaramyndunar. Því gæti líkanið einnig nýst til að gera áætlanir um og forgangsraða hvaða endurbætur ættu að eiga sér stað í hvert skipti. Líkanið spáir fyrir um staðsetningu hjólfara á vegum og því gæti það hjálpað til við ákvarðanir eins og að færa vegmerkingar til að breyta staðsetningu hjólfara og þannig aukið líftíma veganna. Líkanið býður upp á þann möguleika að færa inn kostnaðartölur fyrir efni sem notuð eru við framkvæmdina. Þetta áætlar árlegan kostnað vegna nagladekkjaslits. Einnig getur þetta metið hagkvæmni þess að kaupa betra efni og flytja á staðinn í stað þess að nota ódýrara efni sem er til staðar. Líkanið er einnig hægt að nýta við kennslu til að miðla þekkingu á hvernig ýmsir þættir hafa áhrif á slit og dreifingu þess yfir akreinar (Jacobson & Wågberg, 2007).

Slitmod 3.2.03 er í raun skipt upp í þrjú líkön. Líkan sem reiknar út slit með tilliti til fjölda ökutækja á nagladekkjum. Líkan sem að sýnir hvernig slitið dreifist yfir breidd akbrautar. Að lokum er síðan kostnaðarlíkan sem reiknar út árlegan kostnað byggðan á efnisvali og áætluðum líftíma (Jacobson & Wågberg, 2007).

Líkanið sem reiknar út slit m.t.t. ökutækja á nagladekkjum styðst við gögn sem hefur verið safnað af *VTI* á yfir 20 árum. Megin hluti gagnanna kemur frá plötum sem hefur verið komið fyrir í umferðargötum og frá *Vegahermi VTI* (e. road simulator). Plöturnar hafa verið mismunandi slitlög, með mismunandi efniseiginleikum fylliefna, kornastærðardreifingu o.fl. Nýjasta viðbót líkansins er byggð á gögnum sem fengið hafa

verið með prófunum á “twin slabs” kjörnum í *Vegahermi VTI* (Jacobson & Wågberg, 2007).

7.2 Fræði og notkun

Þær inntakstærðir sem þurfa að vera tiltækar við notkun á spálíkaninu eru vegtegund, umferðarhraði á veginum, umferðaralag, slittímabil, hlutfall ökutækja sem nota nagladekk, hvort vegur sé saltaður, fjöldi ára sem skal reikna og leyfð hjólfaradýpt.

Nýta þarf gögn sem fengin eru við prófanir á tilraunastofu um hörku steinefnis. Annars vegar kúlnakvarnargildi og hins vegar Prallgildi. Þegar sett eru inn gildi úr kúlnakvarnarprófi þarf að hafa upplýsingar um kornakúrfu fylliefnisins og steinastærðir. Þegar Prallgildið er notað til að ákvarða slit þarf að setja inn í líkanið hvaða tegund malbiks var prófuð þegar Prallprófið fór fram.

Hér á eftir er gerð nánari grein fyrir hverri inntaksstærð fyrir sig.

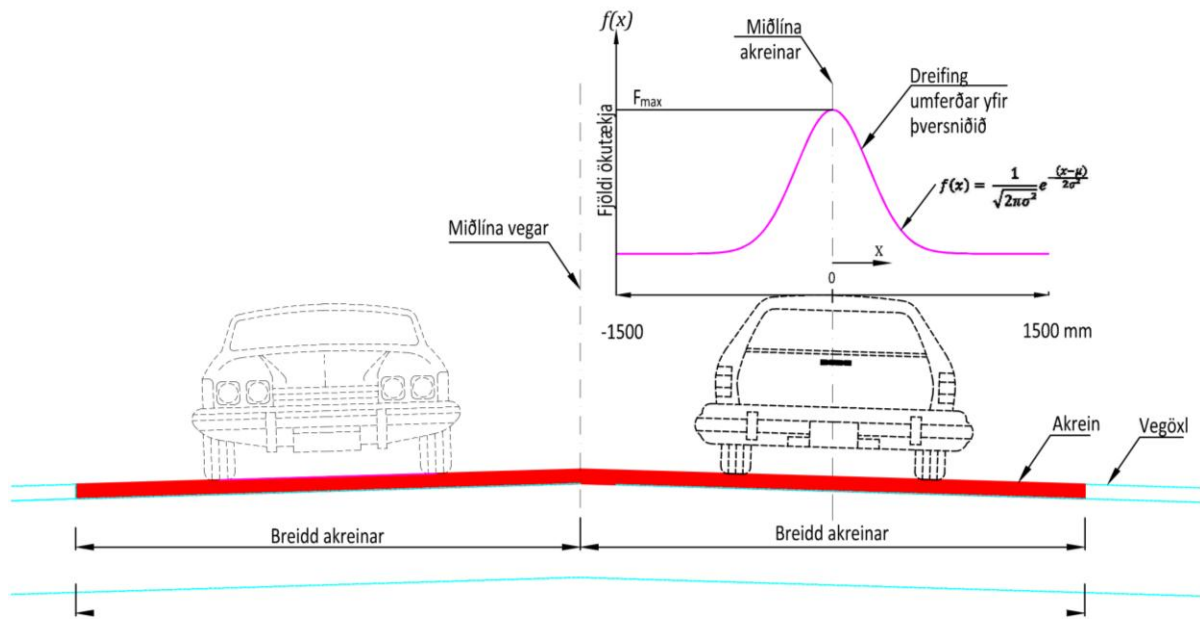
Veggerðir, þversnið og hliðlægt reiki

Gerð vegar hefur áhrif á slitmyndun. Dreifing umferðar þvert á akstursstefnu, hér kallað hliðlægt reiki (e. lateral wander), breytist eftir gerð vegar, það er dreifingin fer eftir breidd vegarins, hvort kantsteinn sé við hlið vegar eða öryggismannvirki sem skilja að akstursstefnur. Eftir því sem dreifingin er meiri minnka slitáhrif umferðar á slitlagið, það er hjólförin verða ekki eins djúp og fyrir minni dreifingu.

Hér er tilgreint hversslags veggerð er verið að spá fyrir um. Vegtegund og þá sérstaklega breidd akreina skiptir höfuðmáli þegar verið er að spá fyrir um dreifingu umferðar á akreinina, því raunin er sú að ekki aka allir eftir miðlínu akreinar. Gengið er út frá því að hliðlægt reiki ökutækja fylgi normaldreifingu. Fall fyrir normaldreifing er skilgreint á eftirfarandi hátt:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7-1)$$

Þar sem σ^2 er dreifni og σ er staðalfrávik. Tafla 7-1 sýnir staðalfrávik fyrir hverja vegtegund sem í boði er. Miðgildið er táknað með μ þ.e. sá punktur sem flest ökutæki aka eftir, í þessu tilfalli miðja akreinar, 0 mm, og x er þá sú staðsetning í þversniðinu sem skoða á í hvert skipti. Dreifingin er því reiknuð með normaldreifingu og gert er ráð fyrir að miðja allra ökutækja falli inn á svæði sem tilgreint er 1500 mm sitt hvoru megin við miðju akreinar, sjá mynd 7-1



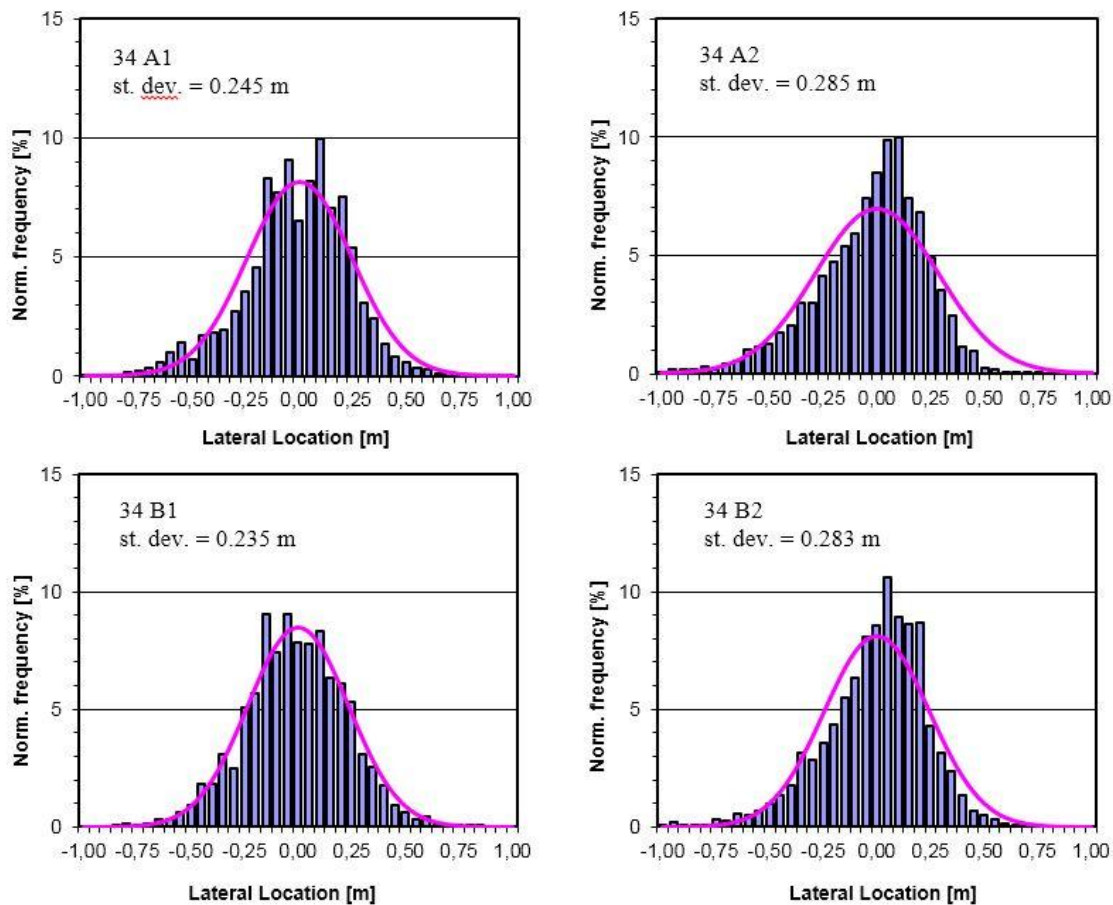
Mynd 7-1 Dreifing umferðar fyrir 7 m breiðan veg.

Tafla 7-1 Staðalfrávik veggerða (Jacobson & Wågberg, 2007).

Númer vegtegundar í líkani	Vegtegund	Breidd akreinar [m]	Staðalfrávik [mm]
1	7 m	3,5	250
2	9 m	3,75	300
3	13 m	6,50	450
4	Breið akrein	6,50	500
5	Þjóðvegur	4,00	250
6	Göng	4,00	225
7	2+1 vegur	3,25	200
8	Mjög mjó akrein	3,00	180

Tafla 7-1 sýnir þær veggerðir sem hægt er að velja um. Val á veggerð hefur áhrif á hliðlægt reiki umferðar. Veggerðir 1 til 5 eru byggðar á raunverulegum mælingum meðan staðalfrávik veggerða 6 til og með 8 eru byggðar á mati forritshöfunda (Jacobson & Wågberg, 2007).

Í töflu 7-1 eru veggerðir sem ekki er gefnin upp breidd fyrir en samkvæmt leiðbeiningum sænsku vegagerðarinnar er til dæmis mjög mjök akrein (s. extremt smala körfält) mjórri en 3,25 m (Trafikverket, 2011).



Mynd 7-2 Normaliseruð tíðni á staðsetningu hægri hjóls þungra ökutækja, þvert á veg í aksturstepnu þeirra. Á myndunum er miðgildið stillt sem núll og staðalfrávik gefið á myndunum sjálfum. Myndir A1 og B1 sýna mælingar á einnar akreina vegi en A2 og B2 sýna mælingar á ytri akrein á tveggja akreina vegi (Erlingsson o.fl., 2013).

Normaldreifing lýsir hliðlægu reiki nokkuð vel. Á mynd 7-2 sést normaliserað hliðlægt reiki hjólaálags á mismunandi stöðum á vegi Rv34 í Svíþjóð. Gera má ráð fyrir að hliðlægt reiki umferðar sé normaldreift og með því að setja miðgildið sem núll (miðju hjólfarsins) er breidd hjólfarsins túlkuð með staðalfrávikinu (Erlingsson o.fl., 2013).

Hraði

Hraði ökutækja hefur áhrif á hversu hratt malbik slitnar, sjá töflu 7-2 hér að neðan. Samband hraða og slits er fengið við prófanir í veghermi. Veghermir, sjá mynd 7-3, er tæki sem prófar þol malbiks gagnvart nagladekkjum, þ.e. mælir slit.

Í einföldu máli er veghermirinn hringekja með áföstum fjórum hjólum sem fara eftir hringlaga braut. Undirlagið og hjólin er hægt að velja eftir hentugleika og hægt er að prófa allt að 14 mismunandi gerðir malbiks og slitlaga í einu. Hægt er að stjórna hita- og rakastigi í prófunarsalnum sem reynist mikilvægt þegar prófa skal slitlag við rétt ytri skilyrði.

Veghermirinn er mikið notaður í dag til að rannsaka mótstöðu ýmissa steinefna gegn sliti og einnig svifrykslosun með tilliti til ólíks efnisvals, mismunandi hjólbarða, hraða og annarra áhrifaþátta. Þetta hefur verið rannsakað með áherslu á bætingu hönnunar á slitlögum sem og efnisvali í slitlög. Einnig hafa verið rannsakaðar mengandi slitagnir af hjólbörðum (Statens väg- og transportforskningsinstitut, 2013).



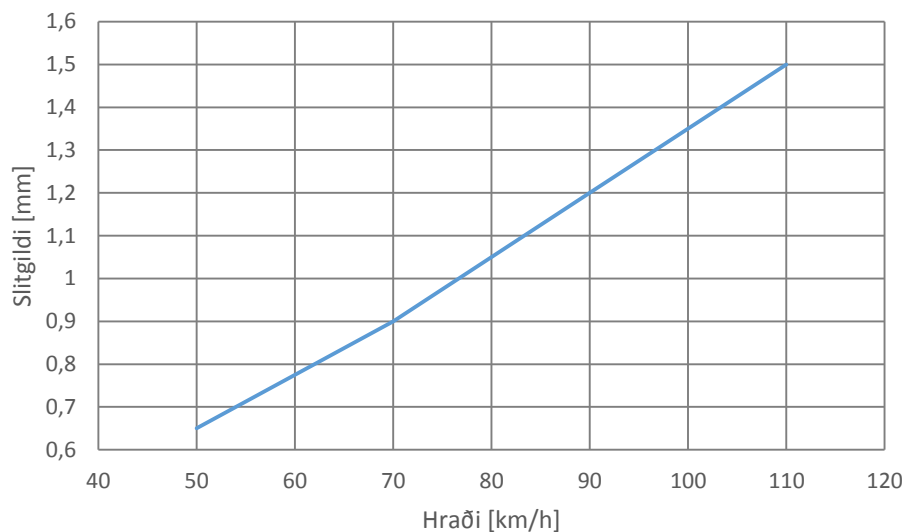
Mynd 7-3 Veghermir Sænsku Vegtæknistofnunarinnar [mynd VTI].

Spálíkanið býður upp á að velja fjóra mismunandi ökuhraða, þ.e. 50, 70, 90 og 110 km/klst, sem allir hafa tiltekin leiðréttingarstuðul slits, S_v .

Tafla 7-2 Samband hraða og leiðréttingarstuðuls slits bifreiða á negldum hjólbörðum (Jacobson & Wågberg, 2007).

Hraði	Leiðréttingarstuðull slits
[km/h]	[-]
50	0,65
70	0,90
90	1,20
110	1,50

Sjá má á mynd 7-4 að samband ökuhraða og leiðréttingarstuðuls slits er nánast línulegt, þar sem slitgildið við 70 km/klst sker sig örlítið úr. Því mætti finna slitgildi fyrir fleiri ökuhraða með einföldum hætti.



Mynd 7-4 Samband leiðréttingarstuðuls slits og ökuhraða.

Meðaldagsumferð (ADT per akrein)

Til að spá fyrir um slit á vegkafla er nauðsynlegt að vita umferðarmagn á þeim tiltekna kafla. Við hönnun vega er umferðarmagn einn mikilvægasti þátturinn þegar áætla þarf slit vega. Meðaldagsumferð, ADT (e. average daily traffic), hefur eininguna ökutæki/dag/akrein. Þessu má ekki rugla saman við ársdagsumferð, AADT (e. annual average daily traffic). ADT er meðaldagsumferð á ákveðnu tímabili, í þessu tilfelli vetrarmánuðina, en AADT er þá meðaltalið yfir árið.

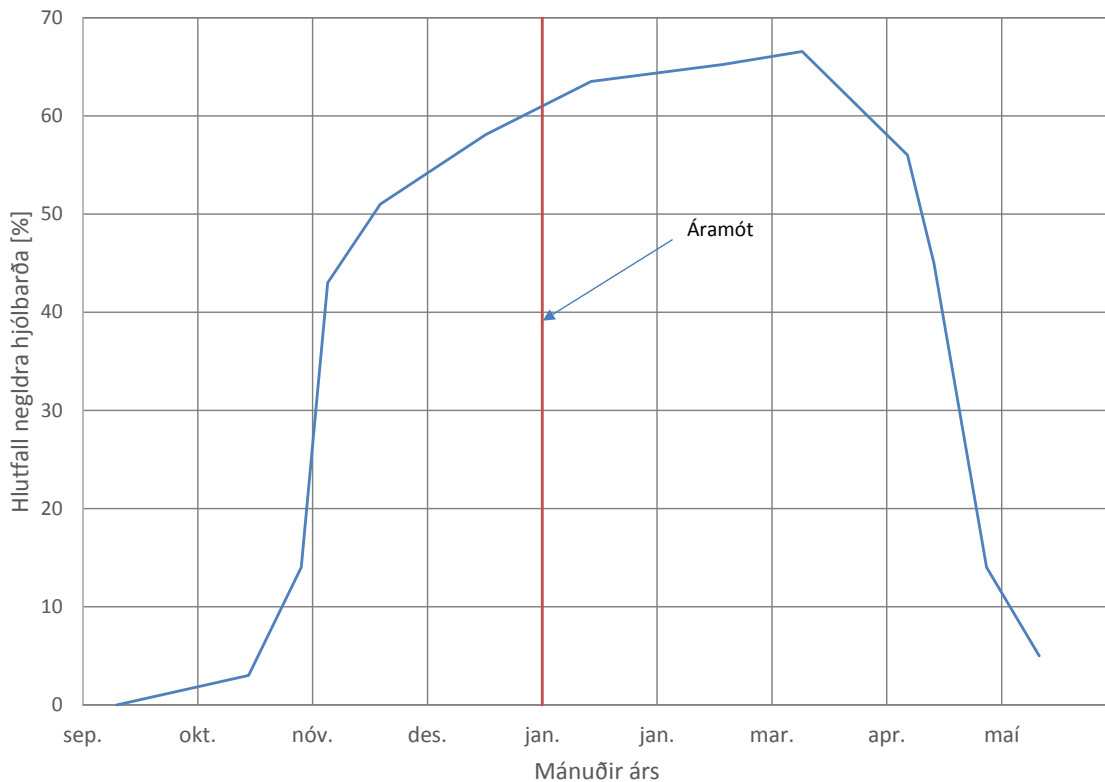
Slittímabil

Slittímabilið er það tímabil þegar notkun negldra hjólbarða er leyfð. Hér á Íslandi er notkun nagladekkja bönnuð frá 15. apríl til 31. október. Því gerir það 168 daga af leyfðri notkun nagladekkja hér á landi en tímabilið er öllu lengra í Svíþjóð, Noregi og Finnlandi.

Hlutfall ökutækja á nagladekkjum

Til að áætla slit vegna ökutækja á nagladekkjum er nauðsynlegt að vita fjölda þeirra. Þetta er gert með talningu.

Talið hefur verið á fjórum stöðum í Reykjavík. Þessir talningastaðir eru bílplön við Háskóla Íslands, Kringluna, Mjódd og í miðbæ Reykjavíkur. Þetta eru staðir þar sem talið er að auðvelt sé að sjá hjólbarða bifreiðanna. Taldir eru negldir hjólbarðar á 1000 ökutækjum í hverri talningu, það er hjólbarðar 250 bifreiða á hverjum talningastað. Reynt hefur verið að telja á öllum talningarstöðum samtímis og þá á miðvikudögum í hverri talningaviku. Sjá má talningu fyrir veturinn 2012-2013 í viðauka D (Bergþóra Kristinsdóttir, tölvupóstsamskipti, 26. sept., 2013).



Mynd 7-5 Notkun nagladekkja veturinn 2001-2002 í Reykjavík.

Sjá má á mynd 7-5 hvernig notkun nagladekkja þróast yfir vetrarmánuðina. Þessi vetur var valinn vegna þess að hann var eina mælitímabilið sem er heilt yfir allan þann tíma sem leyfilegt var að aka um á negldum hjólbörðum. Önnur mælitímabil má svo sjá í viðauka D. Þessar athuganir eru gerðar á vegum Eflu verkfræðistofu fyrir Reykjavíkurborg.

Söltun vega

Söltun hefur áhrif á slit malbiksyfirborðs. Því er hún tekin inn sem hlutfallsleg aukning slits þ.e.a.s. að þegar um söltun er að ræða er svokallaður söltunarstuðull 1,0 en 0,8 ef engin söltun vegarins á sér stað. Söltun vega og gatna til íseyðingar gerir það að verkum að yfirborð veganna er hulið vatni. Þegar malbik er rakt eykst slit en þegar það er hulið ís virkar ísinn sem vörn gegn sliti. Einnig þegar frost þíðu-sveifla gætir þá verður vegyfirborðið fyrir auknu álagi vegna þess vatns sem situr á veginum og þá sérstaklega í hjólförum. Ef sprungur hafa myndast í yfirborðinu þá á vatn greiðari leið inn í malbikslagið og þá myndast sá möguleiki að steinefni losni úr malbikinu.

Í líkaninu er einungis gert ráð fyrir að vegur sé saltaður eða ekki yfir tímabilið. Við þróun hugbúnaðarins voru ekki tiltæk gögn sem lýstu mun á sliti þegar vegur er saltaður eða ekki. Því var stuðst við söltunarstuðull úr leiðbeiningum Sænsku vegagerðarinnar, *Väg 94* (Jacobson & Wågberg, 1997).

Fjöldi reikniára

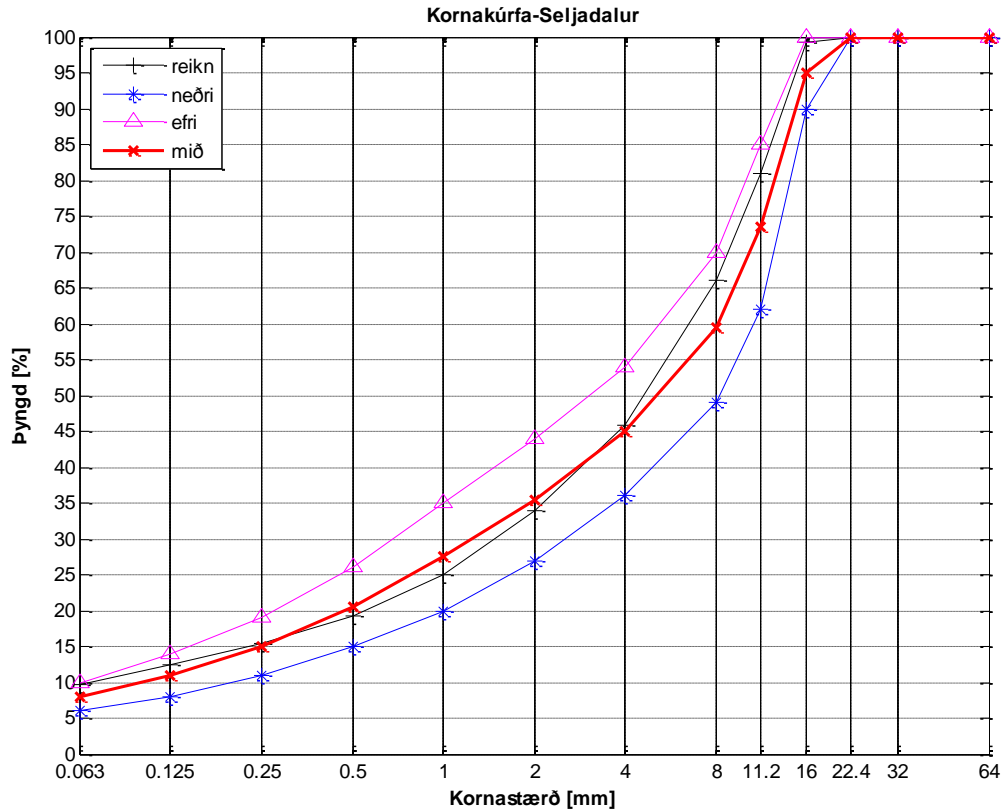
Fjöldi reikniára er sú stærð sem segir fyrir um yfir hversu langt tímabil skal spá fyrir um vegna slits af völdum nagladekkja. Kemur ekki inn í reikninga á líftíma, eða þegar slit vegarins nær því gildi að framkvæma þurfi viðgerð. Þessi fjöldi ára er einungis notaður til að reikna út slitið og til að ákvarða prófilinn, þ.e. teiknar mynd af hjólförunum að þeim fjölda reikniára liðnum.

Leyft slit

Leyfilegt slit er sú dýpt hjólfara þegar að framkvæma þarf viðgerð. Þá er talað um hjólfaradýpt vegna sigs og skriðs og svo vegna slits. Þegar annað slit er dregið frá leyfilegu sliti fæst það slit sem má verða af völdum nagladekkja áður en viðgerða er þörf. Hér er hægt að skilgreina þær kröfur sem gerðar eru til hvernar vegtegundar með tilliti til hjólfaradýptar.

Kornakúrfa

Hlutfall steinefnis [%] sem er stærra en 4 mm þarf að koma fram ásamt stærstu steinastærð. Þessar stærðir eru notaðar við útreikninga á samanburðarsliti út frá kúlnakvarnargildi sem fengið var með bakreikningum við prófanir í *Veghermi VTI* (VTI, 2006). Á mynd 7-6 má sjá kornakúrfu fyrir efni úr Seljadalsnámu sem notað var við prófanir.



Mynd 7-6 Kornakúrfa efnis sem notað var úr Seljadal til útreikninga í Slitmod.

7.3 Útreikningar í Slitmod

Hér að neðan í töflu 7-3 eru inntaksstærðir í slitlíkanið skilgreindar ásamt þeim einingum sem þær hafa. Svo er farið yfir hvernig líkanið er notað til að spá fyrir um hjólfaramyndun vegna nagladekkjaslits.

Tafla 7-3 Inntaksstærðir, tákni og einingar.

Inntaksstærð	Tákni	Eining
Staðalfrávik	σ	mm
Slitgildi vegna hraða	S_v	-
Ársgsumferð	ADT	bílar/dag/akrein
Slittímabil	T	dagar
Hlutfall ökutækja á nagladekkjum	P_s	%
Söltun	S	[já/nei]
Reikniár	N	ár
Leyfð hjólfaramyndun	δ_a	mm
Hlutfall kornastærðar yfir 4 mm	$D_{>4\text{ mm}}$	%
Stærsta steinasærð	D_{max}	mm
Kúlnakvarnargildi	KV	%
Prallgildi	PV	cm ³
Malbiksgerð	PT	-

Byrjað er að reikna út fjölda ökutækja á ári sem notast við nagladekk (F). Til þess þurfa upplýsingar um ársdagsumferð (ADT) að vera til taks. Það sama á við um það tímabil sem nagladekk eru notkun (T) og hlutfall þeirra ökutækja sem notast við nagladekk (P_s). Fjöldi ökutækja sem notast við neglda hjólbarða er fengin með eftirfarandi hætti:

$$F = ADT \cdot T \cdot P_s \quad (7-2)$$

Eining fjölda bifreiða sem notast við neglda hjólbarða er ökutæki/ár.

Næst er reiknað hliðlægt reiki ökutækja eftir þversniði akreinar, dæmi um hliðleikt reiki eftir akrein má sjá mynd 7-1 á bls. 57. Til að reikna hliðlægt reiki er stuðst við normaldreifingu, flest ökutæki aka eftir miðlínu akreinar því er miðgildið (μ) núll, tafla 7-1 sýnir þær veggerðir sem hægt er að velja um.

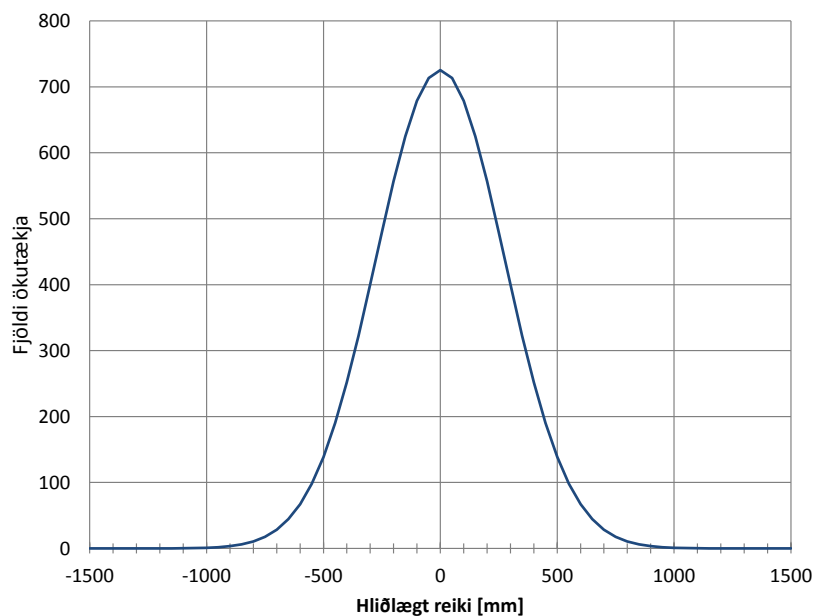
Mynd 7-2 á bls. 58 má sjá normaliserað hliðlægt reiki á þjóðvegi í Svíþjóð. Normaldreifingu er lýst með eftirfarandi jöfnu 7-1. Hér er notast við það staðalfrávik er á

við hverja vegtegund, tafla 7-1 sýnir viðeigandi staðalfrávik fyrir hverja vegtegund sem boðið er upp á að nota í *Slitmod*. Eining normaldreifingarinnar er mm.

Reikna þarf út, með tilliti til þeirrar ársdagsumferðar ökutækja búnum negldum hjólbörðum, þann fjölda sem ekur á hverjum stað eftir þversniðinu. Þá eru, samkvæmt normaldreifingu, flest ökutæki sem aka eftir miðlínu akreinar og svo fækkar bílum þegar komið er fjær frá miðlínunni til beggja handa. Með öðrum orðum aka flestir ökumenn eftir miðjunni, þar af leiðandi í hjólförunum, en fæstir næst köntum hvoru megin. Fjöldi ökutækja sem aka eftir hverjum punkti í þversniðinu er fengin með eftirfarandi jöfnu:

$$f = F \cdot f(x) \cdot \Delta x \quad (7-3)$$

Heildarfjöldi bíla á nagladekkjum er hér margfaldaður með normaldreifingunni og bili milli fyrirfram ákveðinna lína í þversniðinu til að ná öllum þeim bílum sem fara um þversniðið. Sem dæmi má nefna ef breidd þess svæðis sem miðjur bíla falla undir í þversniðinu er frá -1500 mm til +1500 mm, þ.e. á þriggja metra bili, þá er óþarfi að reikna með 1 mm bili og því er ágætt að nota 50 mm og því væri $\Delta x = 50$ mm. Sjá má á mynd 7-7 hvernig umferð 10.000 ökutækja dreifast yfir þversniðið miðað við þær forsendur sem gefnar eru hér á undan. Sjá má að rúmlega 700 ökutæki eða um 7% aka eftir miðlínu vegar.



Mynd 7-7 Hliðlægt reiki dagsumferðar með ársdagsumferð 10.000 ökutæki og staðalfráviknið 275 mm.

Hlutfallslegt slit er reiknað á mismunandi vegu eftir því hvort er verið að nota Kúlnakvarnargildi eða Prallgildi. Þegar bakreikningar voru framkvæmdir við þróun líkansins var notað ABT16 malbik með dílagrjóti (e. porphyry) sem viðmiðunarmalbik. Fylliefnið er fengið frá Älvdal í Svíþjóð. Dílagrjót frá Älvdal (s. Älvdalsporfyr) er hart, rauðleitt berg með hvítum feldspat- og kvartsdílum. Því er það viðmiðunarefni í aðhvarfsgreiningu annarra malbikstegunda með annars konar fylliefni. Sem dæmi ef að notað yrði ABT16 malbik með fylliefni úr Älvdalsporfyr yrði slitgildið 1,0 (Jacobson & Wågberg, 2007).

Aðhvarfslíkanið var fengið með raðbundinni aðhvarfsgreiningu (e. stepwise multiple linear regression) með hlutfallslegt slit sem háðu breytuna (e. dependent variable) (Jacobson & Wågberg, 2007).

Sitt hvort aðhvarfslíkanið fyrir hlutfallslegt slit fékkst ef reiknað er með kúlnakvarnargildi eða Prall-gildi. Hér að neðan eru bæði aðhvarfslíkönin sýnd:

- Kúlnakvarnargildi, hlutfallslegt slit:

$$R_{s,K} = 2,493 + 0,144 \cdot KV - 0,069 \cdot D_{max} - 0,017 \cdot D_{>4\text{ mm}} \quad (7-4)$$

Þar sem að KV er kúlnakvarnargildið, D_{max} er stærsta steinastærð og $D_{>4\text{ mm}}$ er hlutfall steina sem eru yfir 4 mm.

- Prallgildi, hlutfallslegt slit:

$$R_{s,P} = 0,32 + 0,04 \cdot PV \quad (7-5)$$

Þetta aðhvarfslíkan inniheldur einungis Prall-gildið, PV , sem óháða breytu.

Efnisþáttur (s. material faktor) er þáttur sem tekur inn efniseiginleika og utanaðkomandi áhrifaþætti, efnaáraun/veðrun og áhrif umferðar. Hlutfallslegt slit myndi flokkast sem efniseiginleikar. Efnisþátturinn er fenginn með eftirfarandi sambandi:

$$MF = R_{s,i} \cdot S_v \cdot S \cdot J_f \quad (7-6)$$

Þar sem R_s er efnisþátturinn, skv. (7-4) og (7-5), hvort sem er fyrir kúlnakvarnar- eða Prallprófun. Slitgildi vegna hraða er táknað með S_v . Söltun er tekinn inn sem S og hefur annað hvort gildið 1, ef saltað er, eða 0,8 ef ekki er saltað. Taka þarf tillit til þess að naglar hafa minnkað og eru léttari en áður og það er tekið með leiðréttingastuðlinum J_f sem er 0,75 í dag.

Því næst er að finna hið eiginlega slit. Einingin fyrir slit er mm/bíl. Slitið er svo reiknað með eftirfarandi jöfnu.

$$\delta_a = \frac{f \cdot MF \cdot S_{f,v}}{\Delta x} \quad (7-7)$$

$S_{f,v}$ er slit sem hver bifreið veldur á viðmiðunarmalbikið, ABT16 malbik með dílagrjóti.

Þegar malbik er lagt út verður yfirborð þess oft hrjúft, þ.e. nibbur og toppar steinefna standa upp úr yfirborðinu. Einnig getur bikhimna þakið steinefni á yfirborðinu. Þetta yfirborð er veikara fyrir áraun og nibbur og toppar steinefna brotna auðveldlega þegar opnað er fyrir umferð um viðkomandi veg sem og að bik sem hylur yfirborð steinefna

spænist auðveldlega af. Af þessum ástæðum er hægt að segja að malbik slitni hraðar fyrst eftir útlögn heldur en þegar þessar yfirborðsójöfnur eru farnar og slitlagið búið að ná sléttu yfirborði. Gert er ráð fyrir þessu í spálíkaninu með því að áætla að þetta jafngildi því að 300.000 bílar á nagladekkjum séu búnir að slíta malbikinu áður en líkanið spáir fyrir um slitid.

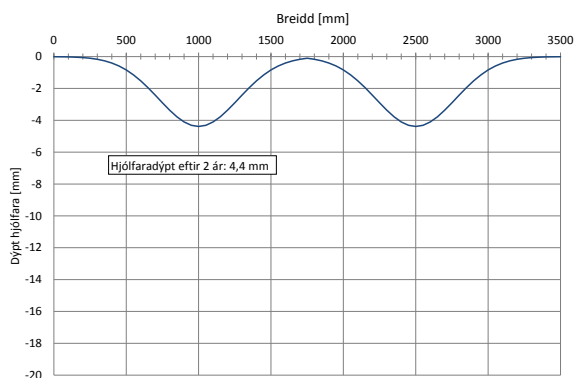
7.4 Dæmi um notkun á *Slitmod*

Hér verður tekið dæmi um útreikninga í *Slitmod*. Tafla 7-4 sýnir þær inntaksstærðir sem notaðir voru við útreikninga. Dæmið er ekki frá ákveðnum stað en getur átt við á umferðarþyngri stöðum höfuðborgarsvæðisins. Prall- og kúlnakvarnargildi eru fengin úr prófunum sem gerð voru á Nýsköpunarmiðstöð Íslands, nánar um þau má sjá í köflum 6.2.1 og 6.2.2.

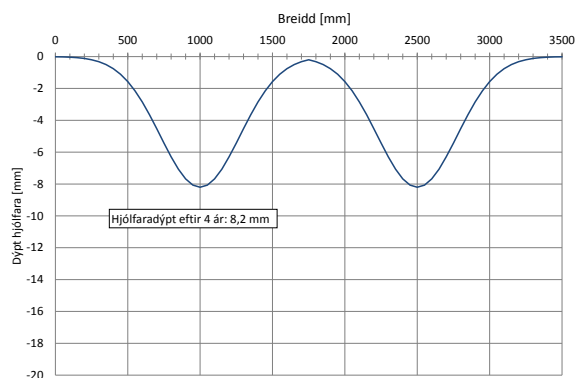
Tafla 7-4 Gildi inntaksstærða fyrir dæmi.

Inntaksstærð		Eining
Veggerð	1	
Breidd akreinar	3,5	m
Staðalfrávik	275	mm
Ökuhraði	90	km/klst
Ársdagsumferð	10.000	ökutæki/dag
Leyfð notkun nagladekkja (slittímabil)	168	dagar/ár
Hlutfall ökutækja á nagladekkjum	60	%
Er salt notað?	Já	
Fjöldi reikniára	8	ár
Kornahlutfall > 4 mm	65	% af massa
Stærsta kornastærð	16	mm
Kúlnakvarnargildi	7,9	%
Prallgildi	20	cm ³

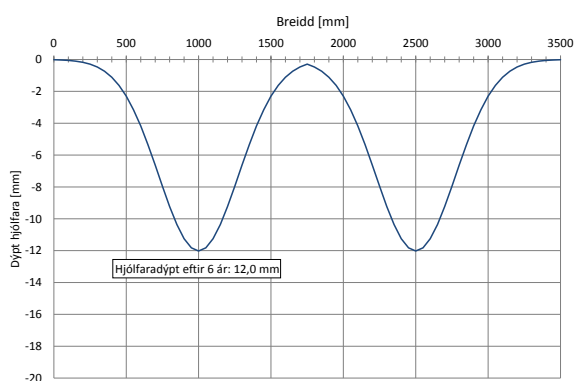
Mynd 7-8 hér að neðan sýnir hjólfaraprófil þegar reiknuð er hjólfaramyndun út frá prófunargildum fengnum úr kúlnakvarnarprófi. Á myndinni er dýpt hjólfara á y-ás og staðsetning slits í þversniði á x-ás. Þar sést að þau hjólför sem myndast hafa vegna nagladekkjaslits á átta árum eru áætluð um 14 mm. Átta ár eru valin til samræmis því sem fram kemur í kafla 8 um deigar formbreytingar í malbiki. Í líkaninu er gert ráð fyrir að slit sé mest fyrsta árið, þegar veiki hluti steinefnisins brotnar af yfirborði og bik sem liggur á yfirborðinu spænist í burtu. Þetta upphafsslit er áætlað að jafngildi umferð 300.000 bifreiða á negldum hjólbörðum. Slitið sem áætlað er að verði til viðbótar fyrst eftir að malbik er nýtt er 0,45 mm. Sú hjólfaradýpt sem líkanið reiknar miðað við gefnar forsendur er 1,68 mm á ári að undanskildu fyrsta árinu þegar slit vegna negldra hjólbarða er 2,13 mm.



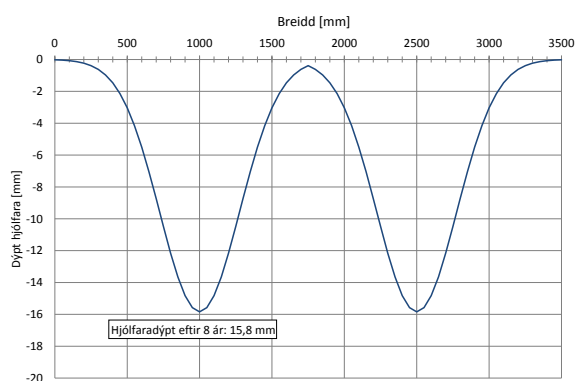
2 ár



4 ár



6 ár

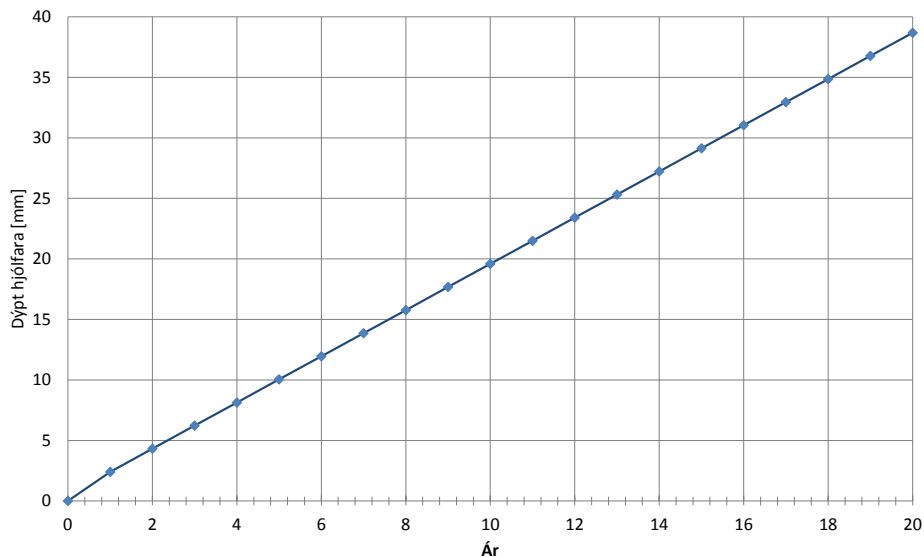


8 ár

Mynd 7-8 Reiknaðir hjólfarapróflar fyrir slit eftir 2, 4, 6 og 8 ára slit fengnir með kúlnakvarnargildi.

Á mynd 7-8 sést þróun hjólfaramyndunar, reiknuð út frá kúlnakvarnargildi, á átta ára tímabili með 2 ára millibili. Miðað við að leyfð hjólfaradýpt á vegi sé 25 mm og miðað við ársslit upp á tæpa 1,91 mm gerir það endingartíma upp á tæp 14 ár. Mismunandi er hve mikil hjólfaradýpt er leyfð en hægt er að breyta þessari tölu að vild í *Slitmod*. Í Svíþjóð er gjarnan miðað við 15 mm hjólfaradýpt.

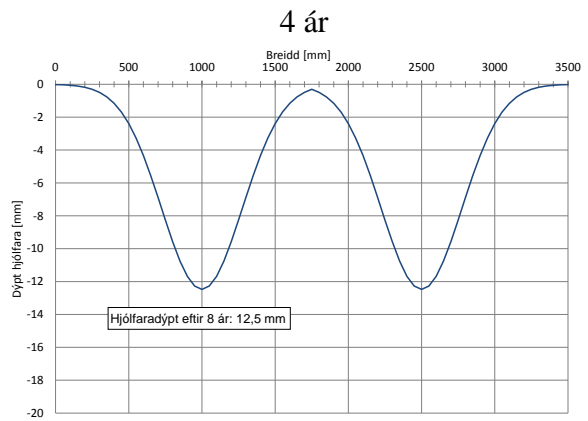
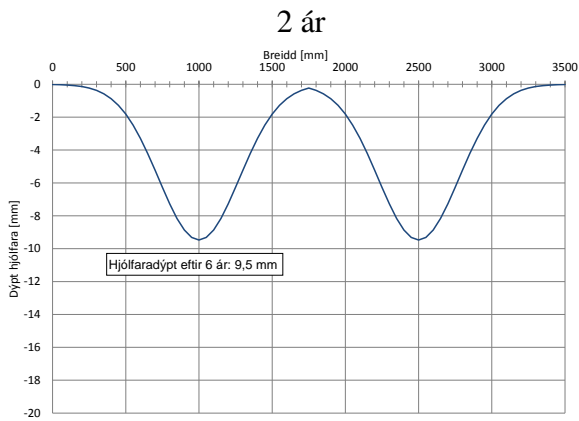
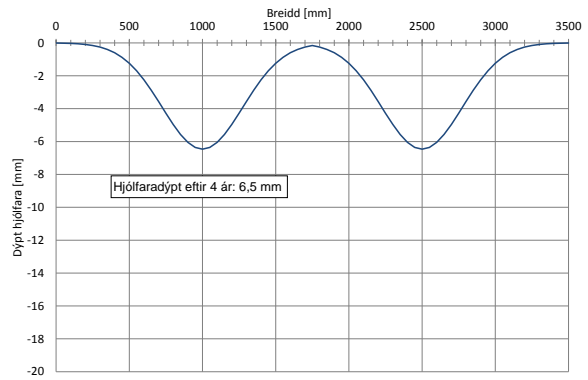
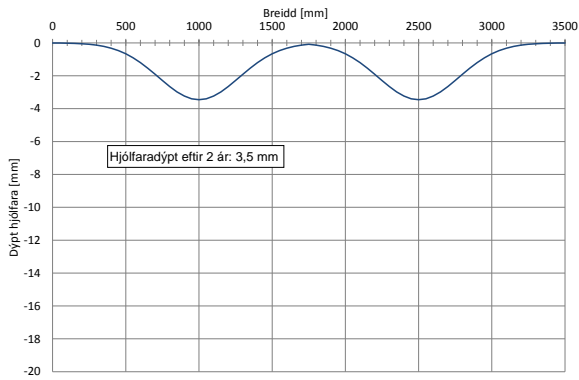
Mynd 7-9 sýnir hjólfaramyndun, reiknaða út frá kúlnakvarnargildi sem fall af tíma. Með þeirri mynd er hægt að sjá hvernig hjólför héldu áfram að þróast ef að engar endurbætur yrðu framkvæmdar á 20 árum. Sjá má á þeirri mynd hvernig slitid er mest fyrsta árið en heldur svo áfram línulega út tímabilið. Einnig sést að ekki er tekið tillit til umferðaraukningar á tímabilinu.



Mynd 7-9 Dýpt hjólfara sem fall af tíma út frá kúlnakvarnargildi.

Mynd 7-10 sýnir þróun hjólfaraprófi yfir 8 ára tímabil sem reiknaður er út frá gildi sem fæst í svo kölluðu Prall – prófi. Þar sést að niðurstöður eru mjög áþekkar því sem að fæst út frá gildum í kúlnakvarnarprófi. Þar er líftími malbiksins einnig 16 ár miðað 25 mm hámarks hjólfaradýpt.

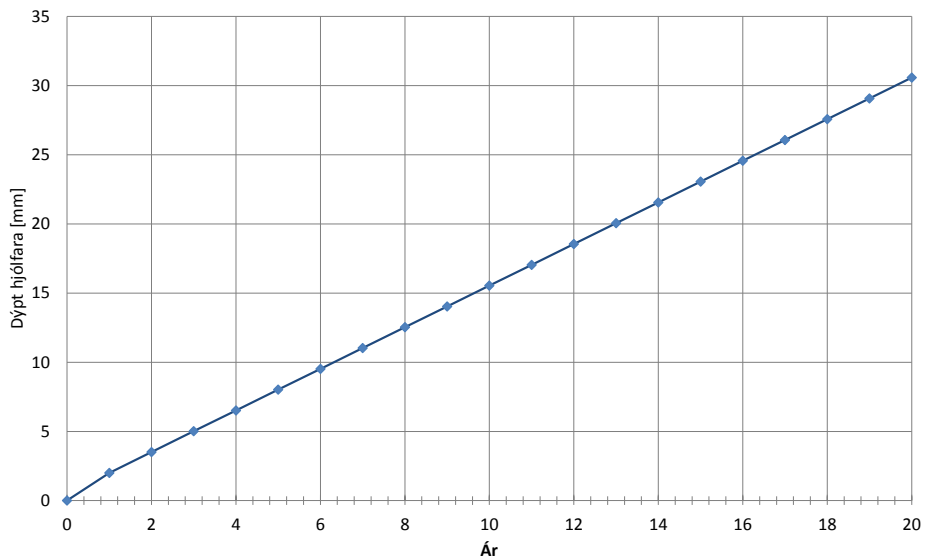
Á mynd 7-11 má sjá hjólfaramyndun reiknaða út frá Prallgildi sem fall af tíma. Sama gildir og um útkomu frá kúlnakvarnargildi að hægt er að sjá hvernig malbik myndi koma til með að mynda hjólför við nagladekkjaáraun í 20 ár ef engar viðgerðir væru framkvæmdar.



6 ár

8 ár

Mynd 7-10 Hjólfaraprófilar eftir 2, 4, 6 og 8 ára slit fengnir út frá Prallgildi.



Mynd 7-11 Dýpt hjólfara sem fall af tíma út frá Prallgildi.

Spálíkanið *Slitmod* er hannað fyrir sænskar aðstæður. Aðstæður á Íslandi og í Svíþjóð eru ekki alveg þær sömu en líkindi má finna. Í töflu 7-5 sést samanburður á hitastigi og úrkomu í Stokkhólmi og Reykjavík. Hitastigsgögn eru meðaltalsgildi, Reykjavík frá 1901-1990 og Stokkhólmi frá 1756-1988. Gögn um úrkomu, Reykjavík frá 1829-1990 og Stokkhólmi frá 1860-1990, eru einnig meðaltalsgildi.

Tafla 7-5 Úrkoma og hitastig, samanburður á Stokkhólmi og Reykjavík
(WorldClimate.com, 2013).

	Stokkhólmur		Reykjavík	
	Úrkoma [mm]	Hiti [°C]	Úrkoma [mm]	Hiti [°C]
Janúar	31,4	-3,5	86,2	-0,3
Febrúar	25,3	-3,5	74,8	0,1
Mars	28,6	-1,3	75,9	0,8
Apríl	33,9	3,5	56,4	2,9
Maí	33,9	9,2	42,3	6,5
Júní	44,0	14,6	44,6	9,3
Júlí	64,4	17,2	50,8	11,1
Ágúst	66,1	16,0	61,7	10,6
September	48,7	11,7	70,9	7,3
Október	50,6	6,5	87,8	4,5
Nóvember	44,0	1,7	82,7	1,7
Desember	39,0	-1,6	84,0	0,2
Meðaltal þegar negldir hjólarðar eru leyfðir	36,1	0,3	78,3	1,4

Neðst í töflu 7-5 má sjá meðalhitastig og úrkomu á báðum stöðum fyrir það tímabil sem notkun negldra hjólarða er leyfð. Meðalúrkoma yfir þetta tímabil er töluvert meiri í Reykjavík en Stokkhólmi. Hitastig beggja staða er álíka þó meðalhiti yfir vetrarmánuðina sé ívið hærri í Reykjavík.

Bæði prófin, Prall og kúlnakvörn, eru stöðluð próf og því framkvæmd eftir ýtrustu kröfum bæði á Íslandi og í Svíþjóð. Sá þáttur ætti því ekki að hafa áhrif á staðfæringu líkansins á íslenskar aðstæður.

Jarðfræði Íslands og Svíþjóðar eru að mörgu leyti ólík og löndin hafa úr ólíkum efnum til vegagerðar að velja. Því eru stöðluð próf á fylliefnum mikilvægt verkfæri til að bera saman kosti slíkra efna, hér eru kúlnakvarnar- og Prallpróf notuð til að taka á þeim samanburði. Því ætti ekkert að vera því til fyrirstöðu að staðfæra sænskt spálíkan á íslenskar aðstæður.

Slitmod á að vera hægt að beita um alla Svíþjóð. Hér er Stokkhólmur einungis valin til samanburðar, hægt væri að velja fleiri staði. Veðráttá á Íslandi er talsvert frábrugðin veðráttu í Svíþjóð, þar sem á Íslandi gæti úthafsloftlags. En með þeim stöðluðu prófunum sem áður hafa verið nefndar og ítarlegri sannreyningu ætti að vera hægt að staðfæra Slitmod á íslenskar aðstæður.

8 Útreikningar á hjólfaramyndun vegna deigra formbreytinga

Deig formbreyting er ein mikilvægasta tegund álagstengdra brotmynda í malbiki. Þessi formbreyting kemur fram sem hjólför sem myndast samfara uppsöfnuðum álagstilfellum sem eiga sér stað. Hjólför myndast samsíða akstursstefnu og formbreytingu má merkja af því að malbik ýtist örlítið upp í börmum hjólfaranna. Breidd og dýpt hjólfara er afar háð vegbyggingunni, það er efnisgæðum og lagþykktum, álagsmynstri og álagsmagni ásamt umhverfisþáttum (ARA, 2004).

Hér verður kynnt einfölduð aðferð til að ákvarða hjólfaramyndun í malbikslögum vegna umferðar þyngri ökutækja. Gengið er út frá prófunum er líkja eftir raunálagi við mismunandi hitastig í malbikslagi og ferilnálgun (e. curve fitting) til að finna mælistika.

Núverandi aðferðir

Malbikshönnun snýst fyrst og fremst um þætti sem snúa að uppbyggingu eins og val á viðeigandi efnun, styrk eða eiginleika til að bera álag og ákvörðun á lagþykktum. Þær aðferðir sem notaðar eru nú til dags, á norðurlöndum og um mest allan heim, hafa stuðst að mestu við reynslusambönd, flokkun efna á grunni vísitalna (e. index) eins og lagstuðla (e. layer coefficients) eða CBR (California Bearing Ratio) gildi sem og verkfræðilega dómgreind við val á hönnunaraðferð. Þessar aðferðir eru byggðar á reynsluaðferðum úr vegprófunum AASHO (The American Association of State Highway Officials), sem fram fóru á 6. áratug síðustu aldar í Ottawa í Illinois í Bandaríkjunum. Síðan þá hefur þungaumferð aukist mikið. Einnig voru vegprófanir AASHO framkvæmdar á einum stað þannig að erfitt er að fella inn mismunandi loftslagsáhrif í útkomur þeirra. Prófanirnar voru takmarkaðar við eina tegund fyllingar og takmarkaðan fjölda burðarlaga og yfirborðs. Þessar takmarkanir ásamt öðrum þáttum eins og þróun í tækni við vegagerð, mismunandi aðstæður afrennslis og langtímaáhrif loftlags og öldrunar gera þessar aðferðir torræðar og erfiðar til notkunar (Erlingsson, 2007).

Aflfræði-reynslu hönnunaraðferðir

Aflfræðilegar-reynslu hönnunaraðferðir fyrir malbik fela í sér notkun lögmála aflfræði til að meta svörun vegbyggingar (t.d. spennur, streitur og niðurbeygju) við umferðarálagi og bættar aðferðir við að spá fyrir um skemmdir eða hvernig notkunarmöguleikar breytast með tíma. Notkun á aðferð sem byggð er á lögmálum aflfræði tryggir grunnskilning á svörun vegbyggingar við tilteknum aðgerðum og álagstilfellum. Þessi raunhæfari aðferðafræði ætti einnig að tryggja nauðsynlegan sveigjanleika, það er að með aðferðinni ætti að vera hægt að bregðast við breyttu efnisvali og öðruvísi álagstilfellum (Erlingsson, 2007).

Mikilvægur þáttur þegar kemur að hönnun byggðri á aflfræði-reynslu aðferðum er að nota réttar prófanir í rannsóknarstofu, sem líkja næganlega vel eftir raunhegðun malbiks. Án þess er ekki hægt að búast við að spár um skemmdir og endingu muni standast.

Mikilvægustu þættir sem hafa áhrif á gæði og þróun niðurbrots malbiksins eru:

1. Þversnið vegbyggingarinnar
2. Veðurfarsskilyrði sem malbikið verður fyrir allan líftíma þess
3. Umferðarálag sem malbikið verður fyrir, öxulþungi
4. Efniseiginleikar þeirra mismunandi laga sem malbikslagið samanstendur af og undirbyggingu þess

Eftir söfnun nauðsynlegra gagna sem tengjast umferð og umferðaraukningu, staðsetningu og loftslagi, efnanna sem nota skal og efniseiginleikar þeirra: Þá er fyrsta skrefið í hönnun að framkvæma reikninga, byggða á lögmálum aflfræði, á svörun vegbyggingarinnar undir mismunandi hjólaálagi og við ýmsar umhverfisaðstæður. Greiningin og þá um leið prófanir þurfa að taka tillit til hreyfifræðilegrar hegðunar álags frá einstökum hjólum það er; fjöldi þeirra, huga þarf að mismunandi þyngd og þrýsting í hjólbörðum sem og umhverfisþáttum eins og hitastigssveiflum, frostþíðu verkun og rakainnihaldi á líftíma malbiksins (Erlingsson, 2007).

Það hefur verið venja í einhverjum aflfræðilegum-reynsluformúlu (e. mechanistic – empirical) hönnunaraðferðum að tengja deiga formbreytingu við miklar streitur í efsta hluta burðarlagsins. Þannig var ályktað að ef slitlagið væri vel hannað og í háum gæðaflokki væri hægt að minnka hjólfaramyndun nægjanlega mikið með því að takmarka lóðréttu streitu sem verkaði á burðarlagið. Þessi aðferð endurspeglar þá sýn að hönnunaraðferðir malbikaðra vega væru einungis miðaðar að því að lágmarka skúfspennur í burðarlögum. En með tíma, tækniframförum og aukinni þekkingu hefur komið berlega í ljós að heildar deigar formbreytingar væru vegna uppsafnaðrar hjólfaramyndunar í öllum lögum vegbyggingarinnar (ARA, 2004).

Helstu kostir sem aflfræðilegar-reynslu hönnunaraðferðir hafa fram yfir hefðbundnar reynslu aðferðir má taka saman:

- Í eðli sínu betur fallnar til að meðhöndla þær ólíku aðstæður sem skapast sökum umhverfisáhrifa og ólíkra álagstilfella
- Möguleiki á að meta ný álagstilfelli, til dæmis hvaða neikvæðu áhrif aukið hjólaálag, hærri loftþrýstingur í hjólbörðum og áhrif fjölhjóla öxla
- Betri nýting efna sem í boði eru
- Árstíðarbundin áhrif geta verið tekin til greina við hönnun

Ennfremur auðveldar aflfræðileg-reynslu hönnunaraðferð að bæta við aukinni og bættri þekkingu framtíðarinnar við þá þekkingu sem til staðar er (Erlingsson o.fl., 2013).

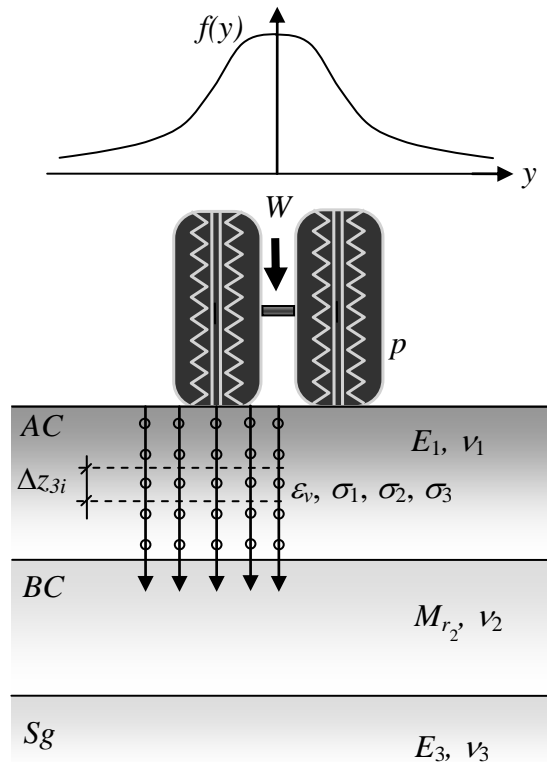
8.1 Líkanið

Sú aðferð sem notuð er hér til að spá fyrir um deigar formbreytingar í malbiki tekur einungis tillit til umferðar og hitastigs en ekki til annarra þátta til að mynda veikleika í vegbotni eða þess háttar. Þessi aðferð tekur á upphafsstigi og miðstigi deigra formbreytinga, sjá mynd 3-5 á bls. 17, þar sem að upphafsstigið er brúað frá hegðun miðstigsins. Lokastigið er ekki reiknað með, í þessu líkani. Að gera prófanir á deigum

formbreytingum sem ná lokastigi er gríðarlega tímafrekt og erfitt í framkvæmd og skortur er á aðferðafræði til að takast á við útreikninga á því stigi (ARA, 2004).

Þetta líkan reiknar uppsafnaða hjólfaramyndun. Þá er átt við að hvert þungt ökutæki (sem ekur á ákveðnu hitastigsbili) leggur sitt til hjólfaramyndunar og leggst það svo saman yfir það tímabil sem til skoðunar er. Hjólfaramyndunin er reiknuð í miðju laginu. Mynd 8-1 sýnir efsta lagið ásamt neðri lögum. Malbikinu (AC) er skipt upp í lög og í miðjum lögnum er reiknuð svörun malbiksins við hjólaálaginu í ákjósanlegri hliðlægri staðsetningu. Efniseiginleikar burðarlagsins (BC) og fyllingarinnar (Sg) eru svo notaðir við útreikninga á svörun malbiksins.

Hjólfaramyndunin er reiknuð með 50 mm millibili þvert yfir akreinina og þá eru aðferðir til útreikninga á hliðlægu reiki nýttar með þeim umferðarupplýsingum sem eru til staðar. Sjá umfjöllun um hliðlægt reiki á bls. 81.



Mynd 8-1 Dæmiberð vegbygging en hér er einungis verið að skoða efsta lagið (Erlingsson, Said, & McGarvey, 2013).

Komnar er fram aðferðir til að reikna hjólfaradýpt vegna deigra formbreytinga í Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide [MEPDG] sem gefinn hefur verið út af AASHTO (ARA, 2004). MEPDG nýtir aðferð sem að hermir bæði upphafs- og miðstigi deigrar formbreytingar, sjá mynd 4-7 á bls. 29. Þar er upphafsstigið framreiknað út frá miðsstiginu en ekki er tekið sértakt tillit til lokastigs í MEPDG, þó mikilvægt sé í

hrörnunarferli malbiks. Að rannsaka deigar formbreytingar sem ná lokastigi eru mjög tímafrekar, erfiðar í framkvæmd og skortur er á aðferðafræði til að tengja það við þá aðferðafræði sem er í MEPDG. Viðamiklar rannsóknir standa yfir með það að markmiði að geta meðhöndlað þessa formbreytingu. Það verður að taka fram að ekki er tekið tillit til raunverulegra sker formbreytinga í líkaninu, í raun taka fá, ef einhver, líkón sem spá fyrir um hjólfaramyndun tillit til lokastigsins (ARA, 2004).

Deig formbreyting í malbiki er mikilvæg brotmynd í malbikuðum vegbyggingum. Óskilyrta sambandið sem notað er í þessu líkani til að spá fyrir um deiga formbreytingu er byggt á kvarðaðri tölfræðilegri greiningu á formbreytingarprófunum, á rannsóknarstofu, með endurteknum álagstilfellum.

Algengasta aðferðafræðin sem notuð er til að spá fyrir um hjólfaramyndun vegna deigra formbreytinga eru byggðar á fjaðurfræði og plastískum streitum sem fengnar eru með álagsprófunum á rannsóknarstofu. Þessi aðferðarfræði var fyrst kynnt af Huekelom og Klomp (1967). Síðan þá hafa verið framkvæmdar margar sambærilegar rannsóknir á jarðvegi, steinefnum og malbiki (Hu o.fl., 2011).

Grundvallar hugtak þessarar aðferðafræði er sú ályktun að uppsafnaða plastíska streitan, ε_p , er í hlutfalli við fjaðrandi streitu, ε_r , og fjölda álagstilfella. Hið óskilyrta lögmál um deiga formbreytingu er hægt að beita á hvaða efni sem er og hvar sem er í vegbyggingunni. Svörun þeirra efna sem á að nota þarf að prófa með tilliti til allra þeirra áhrifa sem efnið kann að verða fyrir í feldi (tíma, hitastig, spennuástand, raka o.fl.) (Hu o.fl., 2011).

Þróun á aflfræðilegu líkani til að spá fyrir um deiga formbreytingu, MEPDG, hefur verið í gangi nokkur undanfarin ár og margar rannsóknir framkvæmdar til að sannreyna þetta samband. Ein af fyrstu rannsóknunum á þessu tiltekna líkani (jafna 8-6) var birt árið 1989 (Leahy, 1989). Þar voru 250 malbiksblöndur prófaðar með tilliti til deigrar formbreytingar við endurtekið álag. Í þessari rannsókn var sýnt fram á að hitastig var óneitanlega mikilvægasta breytan þegar um deigar formbreytingar er að ræða. Síðan hafa verið framkvæmdar fjölmargar til að sannreyna líkanið (ARA, 2004).

Heildar deig formbreyting fyrir hvert tímabil, í þessu tilfelli ársfjórðung, er gefin með eftirfarandi jöfnu:

$$RD = \sum_{i=1}^{nlög} \varepsilon_p^i h^i \quad (8-5)$$

Þar sem RD er deig formbreyting malbiks, $nlög$ er fjöldi laga (2 í þessu tilfelli), ε_p^i er heildar plastísk streita í lagi i og h^i er þykkt laga i . Þetta ferli er svo endurtekið fyrir hvert álagstilfelli, tímabil og hitastigsbil tímabilsins.

Til að finna heildar plastíska streitu er notast við jöfnu 8-6. Þar er ályktað að fjaðrandi streitan, ε_r , sé fasti og óháð fjölda álagstilfella.

Líkanið sem MEPDG leggur til er eftirfarandi (ARA, 2004):

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = a_1 T^{a_2} N^{a_3} \quad (8-6)$$

Þar sem ε_p er uppsöfnuð plastísk streita við N fjölda álagstilfella, ε_r er fjaðrandi streita malbiksins sem er háð efniseiginleikum blöndunnar, hitastigi og tímahlutfalls álagsins, T er hitastig í °C, N er fjöldi álagstilfella og a_i eru ólínulegir aðhvarfsstuðlar, sjá töflu 8-1.

Í líkaninu verður svo jafna 8-6 á þessa leið til að finna þá plastísku streitu sem verður í hverju tímaskrefi og bætist við þá er fyrir er:

$$\Delta\varepsilon_p = a_1 T^{a_2} (N + \Delta N)^{a_3} \varepsilon_r - a_1 T^{a_2} N^{a_3} \varepsilon_r \quad (8-7)$$

Við þessa útreikninga var notast við sama umferðarmagn og áður nema að áætlað magn stærri ökutækja var 12%, 1200 ökutæki per akrein per dag. Til að finna streitu í malbikinu, ε_r , var notast við forritið *Kenpave* þar sem notast var við 100 kN staðalöxul við útreikninga.

Útreikningar úr *Kenpave* eru nýttir fyrir hvert hitastigsbil sem notað er í líkaninu og þar af leiðandi þarf að reikna stífni malbiksins og streitur fyrir hvert bil.

Stífni malbiksins, E_T , við ákveðið hitastig var fundin með eftirfarandi sambandi:

$$E_T = E_{Tref} e^{(-b*(T-Tref))} \quad (8-8)$$

Þar sem T_{ref} er viðmiðunarhitastig, í þessu tilfelli 10°C, og b efnistuðull, sjá töflu 8-1 (Erlingsson, 2010). E_{Tref} er viðmiðunarstífni, við 10°C, 6500 MPa. Í töflu 8-2 má svo sjá reiknaða stífni fyrir mismunandi hitastig.

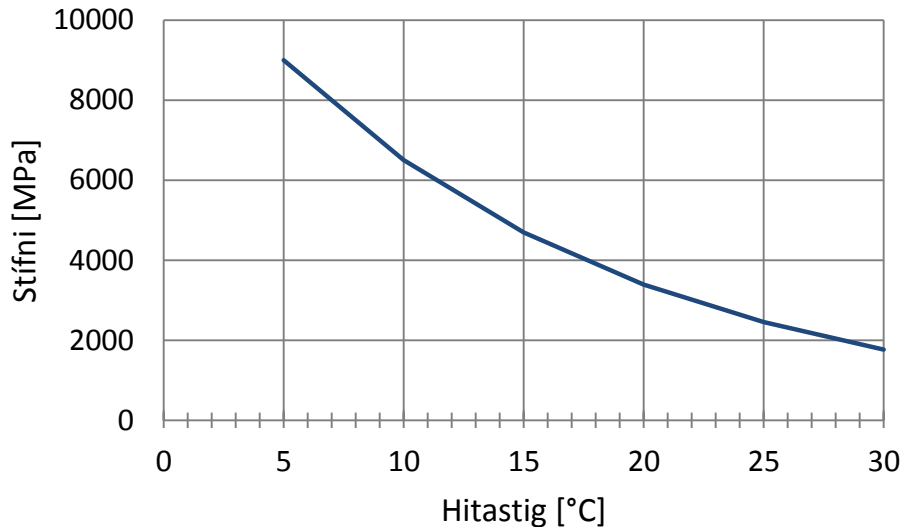
Tafla 8-1 Efniseiginleikar malbiks (Erlingsson, 2012)

E_{Tref} [MPa]	b [-]	a_1 [-]	a_2 [-]	a_3 [-]
6500	0,065	0,17	1,85	0,27

Tafla 8-2 Sýnir stífni malbiks við mismunandi hitastig

T [°C]	E_T [MPa]
5	8996
10	6500
15	4696
20	3393
25	2452

Á mynd 8-2 má sjá samband stífni malbiks sem fall af hitastigi samkvæmt líkingu (8-8) hér að ofan.



Mynd 8-2 Stífni malbiks sem fall af hitastigi.

Á mynd 8-1 hér að ofan má sjá vegbygginguna, þar sem þyngd staðalöxulsins er 100 kN og dekkjaprýstingur 800 kPa. Í *Kenpave* er notast við 4 lög í vegbyggingunni. Tafla 8-3 sýnir helstu efniseiginleika hvers lags fyrir sig, það er þykkt lagsins, Poisson's hlutfall og stífni.

Tafla 8-3 Efniseiginleikar laga sem nýttir eru í *Kenpave*

	Lag	1	2	3	4
		Malbik	Óbundið burðarlag	Styrktarlag	Fylling
Þykkt	[cm]	8	20	50	-
Poisson's hlutfall	[-]	0,35	0,35	0,35	0,35
Stífni	[MPa]	6500	300	180	120

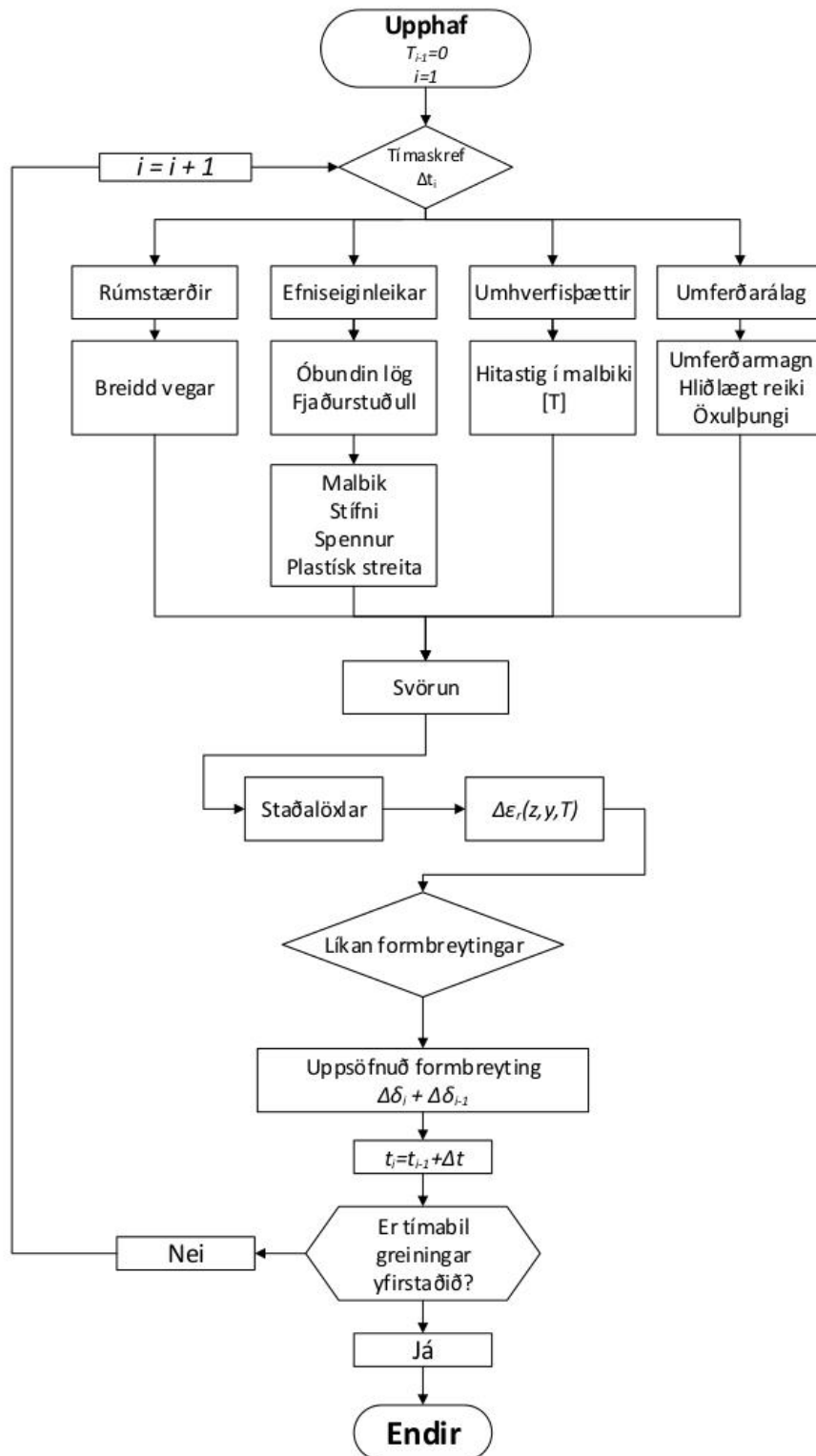
Malbikslaginu er skipt í tvö 4 cm lög, Δz_i , síðan er miðpunktur þeirra beggja greindur nánar með tilliti til deigra formbreytinga, samanber streitur í töflu 8-4.

Þær lóðréttu streitur sem koma fram í töflu 8-4 eru á 2 og 6 cm dýpi í malbikslaginu og eru fengnar með útreikningum í *Kenpave*. Streiturnar eru reiknaðar við mismunandi hitastig frá 5 og upp í 30°C með líkingu (8-7) hér að ofan.

Tafla 8-4 Sýnir lóðréttar streitur á 2 og 6 cm dýpi við mismunandi hitastig

	Dýpi	
	2 cm	6 cm
T	Streitur	
[°C]	ϵ_{h1}	ϵ_{h2}
5	-3,31E-05	1,05E-04
10	-2,98E-05	1,32E-04
15	-2,09E-05	1,67E-04
20	-2,91E-06	2,13E-04
25	2,93E-05	2,73E-04
30	8,32E-05	3,54E-04

Mynd 8-3 sýnir flæðirit af líkaninu sem notað var við útreikninga hér. Þetta líkan nýtir sér þá tækni sem kemur fram í MEPDG. Á mynd 8-3 sést skematísk mynd af líkaninu. Fyrst er skilgreint upphafsskilyrði líkansins, þá er tímaskrefið, Δt , ákvarðað sem og efnis- og umferðareiginleikar fyrir það tímaskref, í þessu tilfalli fjórðungur úr ári, og áhrifaþættir umhverfis, það er veðurfar og þess háttar. Næst eru reiknaðar út spennur, streitur og loks formbreyting á mismunandi dýpi í malbikinu. Niðurstöðum þessa skrefs eru svo bætt við niðurstöður skrefsins á undan, það er 0 fyrir fyrstu útreikninga, $t=0$. Síðan er næsta tímaskref tekið fyrir, Δt , þá er þeim þáttum breytt sem við á, í þessu tilfalli umhverfisþáttum, og niðurstöðum bætt við niðurstöður úr tímaskrefinu á undan. Þetta er endurtekið þar til þeim tíma er náð sem upphaflega til stóð að reikna. Hér á eftir verður farið nánar í hvern þátt líkansins og hann útskýrður.



Mynd 8-3 Flæðirit af líkani til að reikna deiga formbreytingu í malbiki.

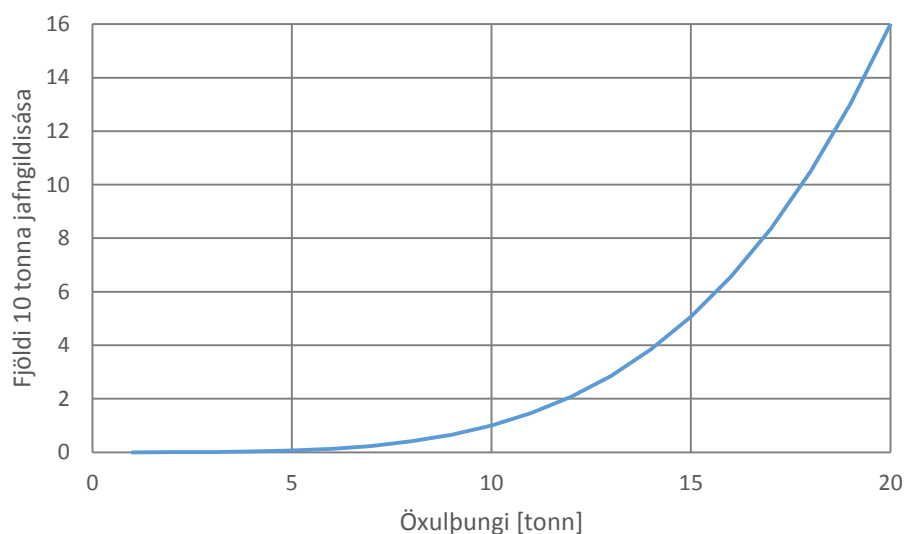
Jafngildisöxlar

Hjólaálag minni ökutækja, fólksbíla, jeppa og minni flutningabíla, valda það litlum deigum formbreytingum í malbikslagi vega að hægt er að sleppa þeim áhrifum við hönnun á þykkt laga í vegbyggingu (Croney & Croney, 1991). Jafngildisálag (Equivalent Axle Load Factor), *LEF*, skilgreinir þann skaða sem hver álagspúls veldur sem samband við þann skaða sem að staðalöxull veldur, 80 kN í Bandaríkjunum en 100 kN öxull í Evrópu. Ef að álagið frá öxlinum er ekki 100 kN eða samanstendur af tveimur eða þremur ásum þarf að breyta þeim í 100 kN staðalöxla með *LEF* stuðli. Fjöldi álagstilfella, frá ein- eða margása tilfelli, þarf svo að margfalda með *LEF* stuðlinum til að fá jafngildisálag sem byggt er á 100 kN einása álagi (Huang, 2004). Jafnan er jafngildisálagið reiknað með svonefndu fjórða veldis lögmáli (e. Fourth Power Law) frá AASHTO. Fjórða veldis lögmálið fyrir jafngildisálag er á forminu:

$$LEF = \left(\frac{W}{W_{eq}} \right)^4 \quad (8-4)$$

Þar sem að *W* er raunverulegur öxulþungi í kN og *W_{eq}* er öxulþungi staðalöxuls einnig í kN (Urbancic, 1998). Fyrir tvíás (e. tandem axle) er *W_{eq}* 180 kN en 240 fyrir þríás (e. tridem axle) (Erlingsson, 2010).

Á mynd 8-4 má sjá hvernig fjórða veldis lögmálið virkar fyrir 10 tonna staðalöxul sem er þyngd staðalöxuls á Íslandi, 11,5 tonn fyrir driföxul (Alþingi, 2007). Til að mynda þarf 10 þúsund bíla með 1 tonna öxulþunga til að jafngilda einu ökutæki með 10 tonna öxul.



Mynd 8-4 Samband raunverulegs öxulþunga og 10 tonna jafngildisása.

Hliðlægt reiki

Hliðlægt reiki (e. lateral wander) umferðar hefur áhrif á niðurbrot (e. deterioration) malbiks. Áhrif hliðlægs reikis á líftíma malbiks er flókið fyrirbæri og malbikshönnuðir hafa ekki góðar aðferðir til að meta áhrifamagn af mismunandi dreifingu hliðlægs reikis. Mismunandi malbiksmannvirki (e. facilities) hafa mismunandi reikieiginleika. Vegir með breiðar akreinar og axlir hafa tilhneigingu til að hafa meiri dreifingu hliðlægs reikis meðan

Þröngar akbrautir án axla geta haft umferðarmynstur sem einkennist af litlu hliðlægu reiki (Erlingsson o.fl., 2013). Hliðlægt reiki umferðar hefur áhrif á fjölda þeirra öxla sem aka yfir punkt sem notaður er til að spá fyrir um formbreytingu í malbiki. Óalgengt er og ekki talið praktískt að nota raunverulegt hliðlægt reiki umferðar yfir vegbyggingunni, það er að mæla hvert dæmi fyrir sig. Því er talin góð nálgun að gera ráð fyrir að hliðlægt reiki umferðar sé normal dreift (ARA, 2004).

Hér að neðan verður farið nánar í það hvernig hliðlægt reiki er reiknað fyrir líkanið sem hér er fjallað um.

Gert er ráð fyrir að umferðin dreifist á 3000 mm, x , svæði eftir akreininni. Reiknaðir punktar eru á 50 mm millibili, frá -1500 mm upp í 1500 mm, og reiknað hversu mörgum staðalfrávikum, σ , tiltekinn punktur er frá miðju akreinarinnar, μ , miðgildinu sem í þessu tilfelli er 0. Þetta kallast staðaleinkunn, z :

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (8-1)$$

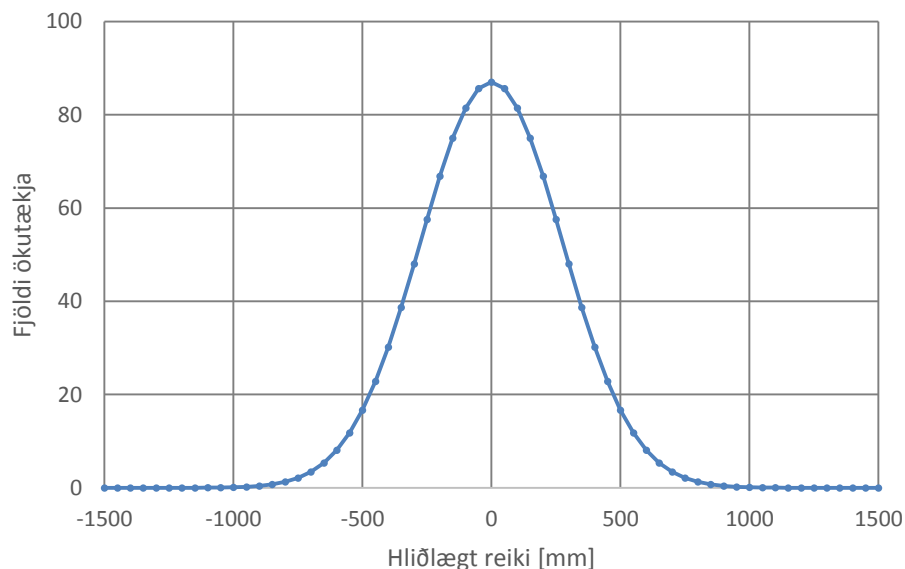
Síðan er fjöldi ökutækja, $F(x)$, sem aka á tilteknum punkti fundinn með því að margfalda dreififallið og meðaldagsumferðina, ADT :

$$F(x) = f(x) \cdot ADT \quad (8-2)$$

Þar sem dreififallið, $f(x)$, er:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8-3)$$

Þá fæst umferð í hverjum punkti þvert á akrein, hliðlægt reiki umferðar, eins og sjá má á mynd 8-5 hér að neðan, þar sem meðaldagsumferðin er 1200 þung ökutæki og staðalfrávik, σ , er 275 mm. Ef að staðalfrávikid hækkaði yrði reikið víðar, það er aksturslína ökutækja myndi dreifast víðar þvert á aksturstefnu og færri ökutæki aka eftir miðju akbrautar.

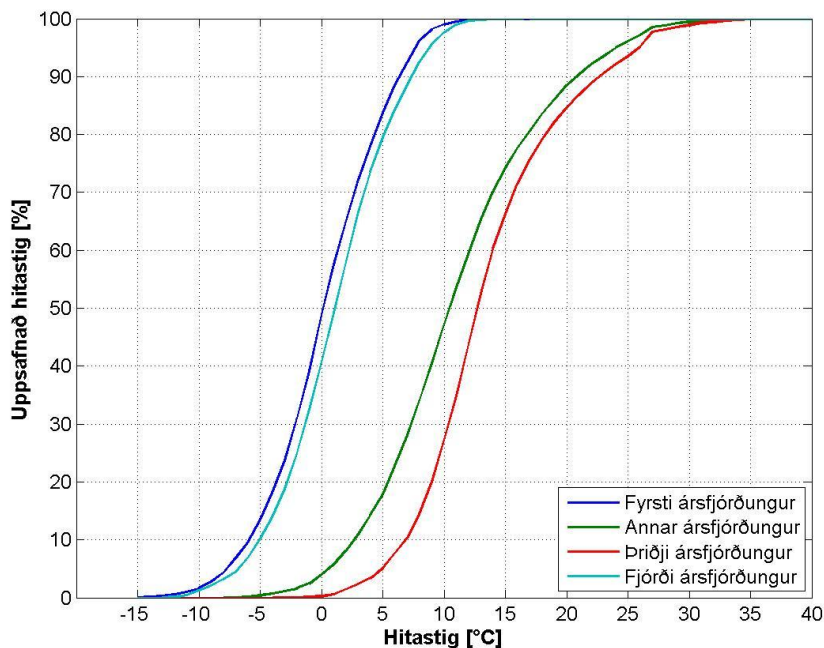


Mynd 8-5 Hliðlægt reiki meðaldagsumferðar, 1200 þungar bifur og staðalfrávik 275 mm.

Hitastig

Gögn um veghita voru fengin frá Vegagerðinni fyrir 6 ár, frá 2005 til og með 2010. Gögn voru tiltæk frá Reykjanesbraut, af Kjalarnesi og úr porti Vegagerðarinnar við Borgartún. Mælt var ofan í malbikslaginu. Hér er stuðst við mælingar frá Reykjanesbraut. Þetta voru gildi á tíu mínútna fresti frá 1.1.2005 til 31.12.2010. Flokka þurfti þessi gögn fyrir hvert ár fyrir sig og svo skipta hverju ári niður á ársfjórðunga. Reiknað var uppsafnað hitastig fyrir hvern ársfjórðung, sjá t.d. mynd 8-6 sem sýnir uppsafnaða hitastigsdreifingu frá 2005 til 2010.

Hitastig hefur bein áhrif á stífnni malbiks, E_T , það er að stífnin minnkar eftir því sem hitastig hækkar.



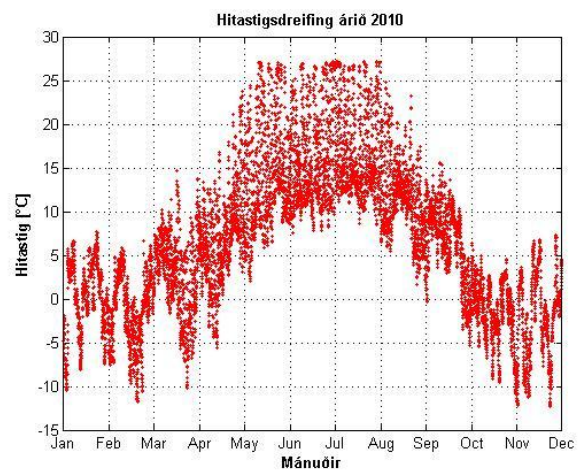
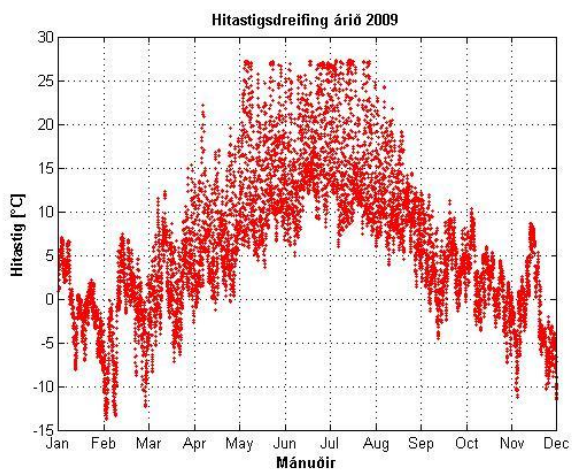
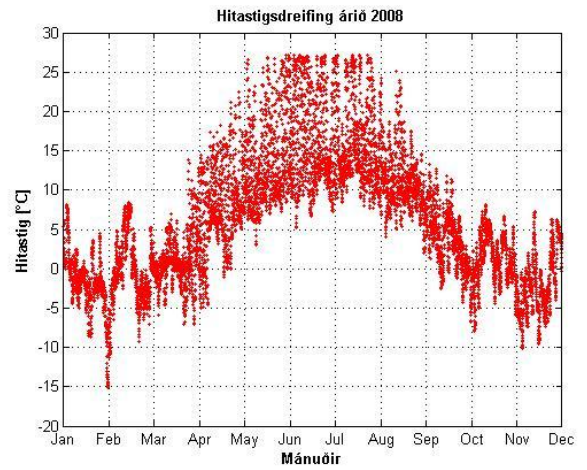
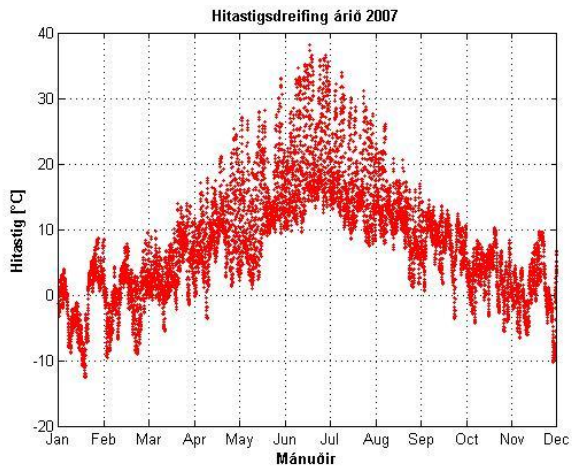
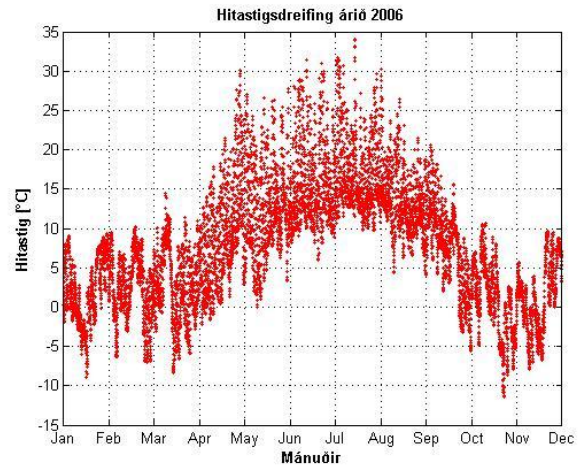
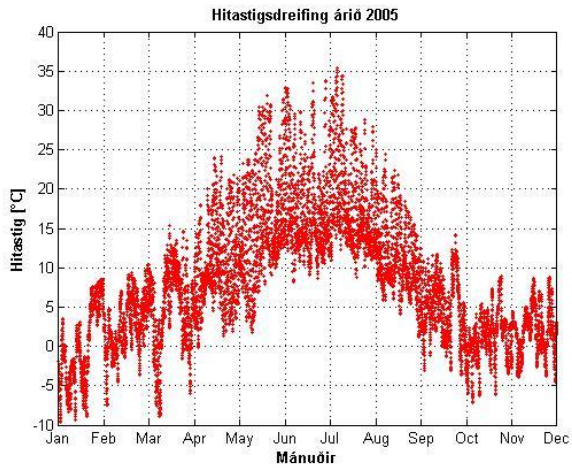
Mynd 8-6 Uppsöfnuð meðalhitastigsdreifing á öllum ársfjórðungum frá 2005-2010.

Hitastigsdreifing fyrir árin 2005-2010 má sjá á mynd 8-7 svo má sjá samanlagða hitastigsdreifingu frá árunum 2005-2010 á mynd 8-8. Tafla 8-1 sýnir uppsafnað hitastig á 3. ársfjórðungi að meðaltali á árunum 2005-2010, fyrsti dálkur sýnir hitastigsbilin, annar dálkur sýnir uppsafnaðan fjölda klukkustunda fyrir hvert bil á tímabilinu svo sýnir þriðji dálkurinn hlutfall af heildarfjöldanum á tímabilinu.

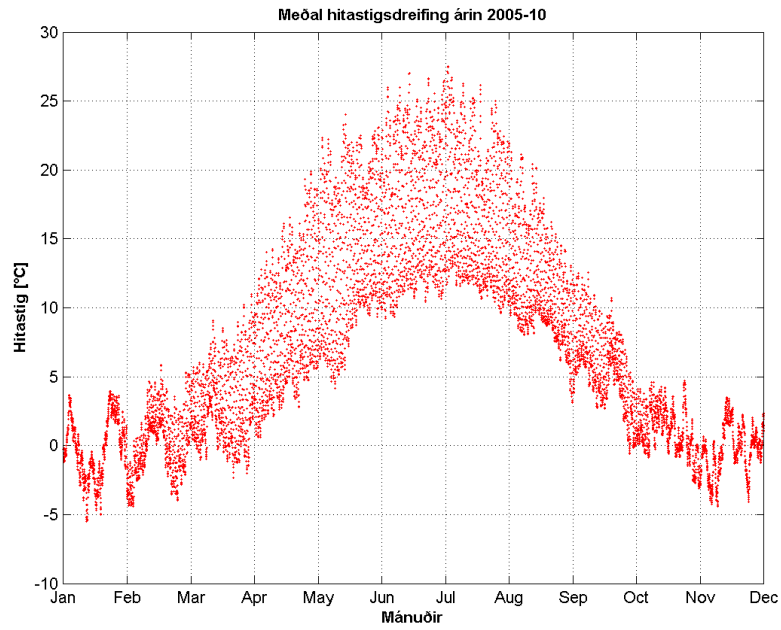
Tafla 8-5 Meðaltalsgildi 3. ársfjórðungs 2005-2010.

Hitastig [°C]	Uppsafnaður fjöldi [klst í ársfjórðungi]	Hlutfall [%]
0	5,8	0
5	112,2	5
10	598,0	27
15	1452,0	66
20	1853,2	85
25	2050,7	94
30	2168,0	99
35	2189,8	100
36	2191,3	100
37	2191,8	100
38	2192,0	100
39	2192,0	100
40	2192,0	100

Hitastig undir 5 °C er hunsað í útreikningum þar sem ólíklegt þykir að deigar formbreytingar eigi sér stað við svo lágt hitastig, þar sem stífni malbiksins er of mikil.



Mynd 8-7 Mælingar á hitastigi malbiks á Reykjanesbraut fyrir árin frá 2005-2010.



Mynd 8-8 Klukkustundarmeðaltöl hitastigs á árunum 2005-2010.

Klukkustundarmeðaltöl mælds hitastigs frá árunum 2005-2010 eru sýnd á mynd 8-8 hér að ofan.

8.2 Útreikningar á deigri formbreytingu

Tafla 8-6 sýnir helstu inntaksstærðir sem notaðar eru við útreikninga á deigri formbreytingu. Þar á eftir koma niðurstöður úr spálíkani um deiga formbreytingu.

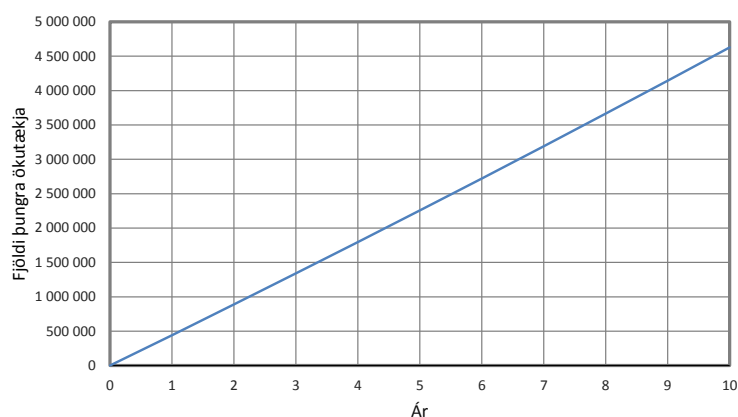
Tafla 8-6 Helstu inntakstærðir í líkan fyrir deigar formbreytingar.

Ársgdagsumferð (AADT)	10000	ökutæki
Þung ökutæki (HV)	12%	
Þung ökutæki (HV-AADT)	1200	Þung ökutæki á dag
aukning (r):	1%	Umferðaraukning á ári
Þykkt malbiks	8	cm
Δz_1	4	cm
Δz_2	4	cm
Dagar í ári	365	
Öxulálag, W	100	kN
Dekkjaþrýstingur, p	800	kPa
Staðalfrávik reikis	275	mm

Á mynd mynd 8-9 sést hvernig umferðarmagn, ADT, eykst þegar gert er ráð fyrir 1% aukningu á ári hverju í 10 ár. Þetta er miðað við að umferð samanstandi í upphafi af 10000 ökutækjum þar af 1200 þungum ökutækjum eða 12%. Umferðaraukning er reiknuð með eftirfarandi jöfnu:

$$ADT = ADT_0 \left(1 + \frac{r}{100}\right)^n \quad (8-4)$$

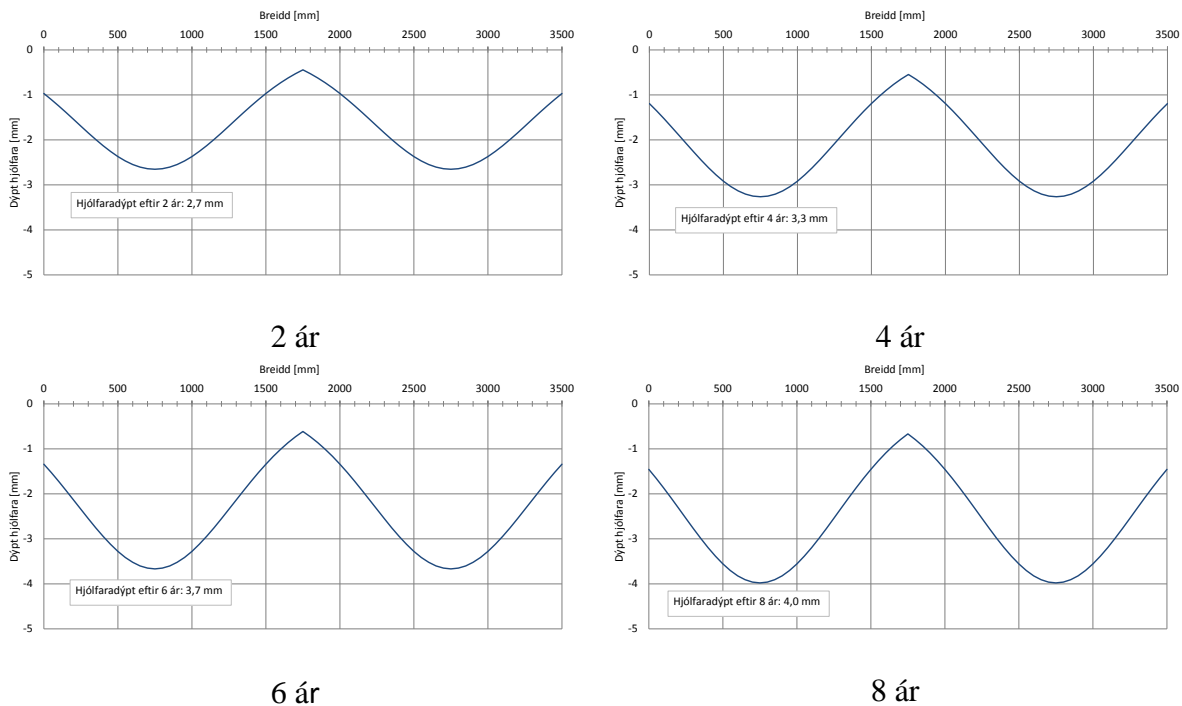
Þar sem ADT_0 er upphafleg meðaldagsumferð, r er umferðaraukningin í % og n er sá árafjöldi sem á að reikna.



Mynd 8-9 Uppsafnað umferðarmagn á 10 árum miðað við 1% aukningu.

Á mynd 8-9 sést að ferillinn er nálægt því að vera bein lína það er vegna þess hvað gert er ráð fyrir lítilli aukningu, 1%, og hversu stutt tímabil er til athugunar.

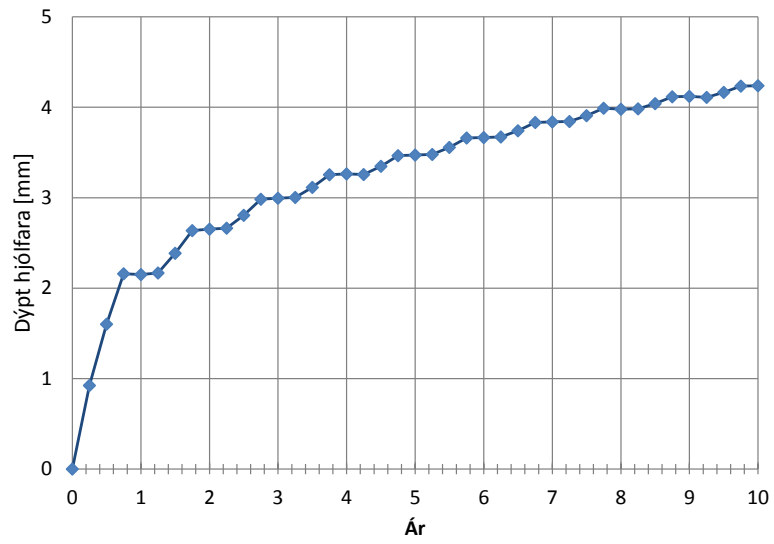
Sjá má hjólfaraprófil vegna deigra formbreytinga á mynd 8-10. Myndin sýnir deiga formbreytingu vegna þunga umferðar yfir 8 ára tímabil, sýnd fyrir annað hvert ár. Breidd akreinar er sú sama og notuð er í *Slitmod* eða 3,75 m. Algeng breidd milli hjóla á þungum vöruflutningabílum er um 2,5 m milli ytri brúna framhjóla (Scania, 2013), því er gert ráð fyrir að breidd milli miðju hjólanna sé 2 m.



Mynd 8-10 Hjólför vegna deigra formbreytinga.

Sjá má á mynd 8-10 hvernig hjólförin ná út fyrir breidd akreinarinnar. Hliðlægt reiki þunga umferðar er látið fylgja sömu dreifingu og umferð fólksbíla, með staðalfráviknið 275 mm. Færa mætti rök fyrir því að staðalfrávik vegna hliðlægs reikis þungaumferðar ætti að vera lægra, þar sem til dæmis ökutæki sem er 2,5 m að breidd ekur eftir akrein sem að er 3,5 m að breidd. Á slíkri akrein hefur fólksbíl sem er um 1,8 m að breidd mun meira rými til að reika eftir veglínunni. Ekki var þó tekið tillit til þess hér.

Mynd 8-11 sýnir hjólfaramyndun vegna deigra formbreytinga sem fall af tíma. Sjá má að formbreytingar eru mestar fyrsta árið en svo smá hægist á þeim. Það má rekja þessa öru formbreytingu í upphafi aðallega til þéttingar (minnkunar á holrýmd) í malbiki en einnig til deigra formbreytinga. Þegar hægir á þessari hröðu hjólfaramyndun taka við sker formbreytingar.

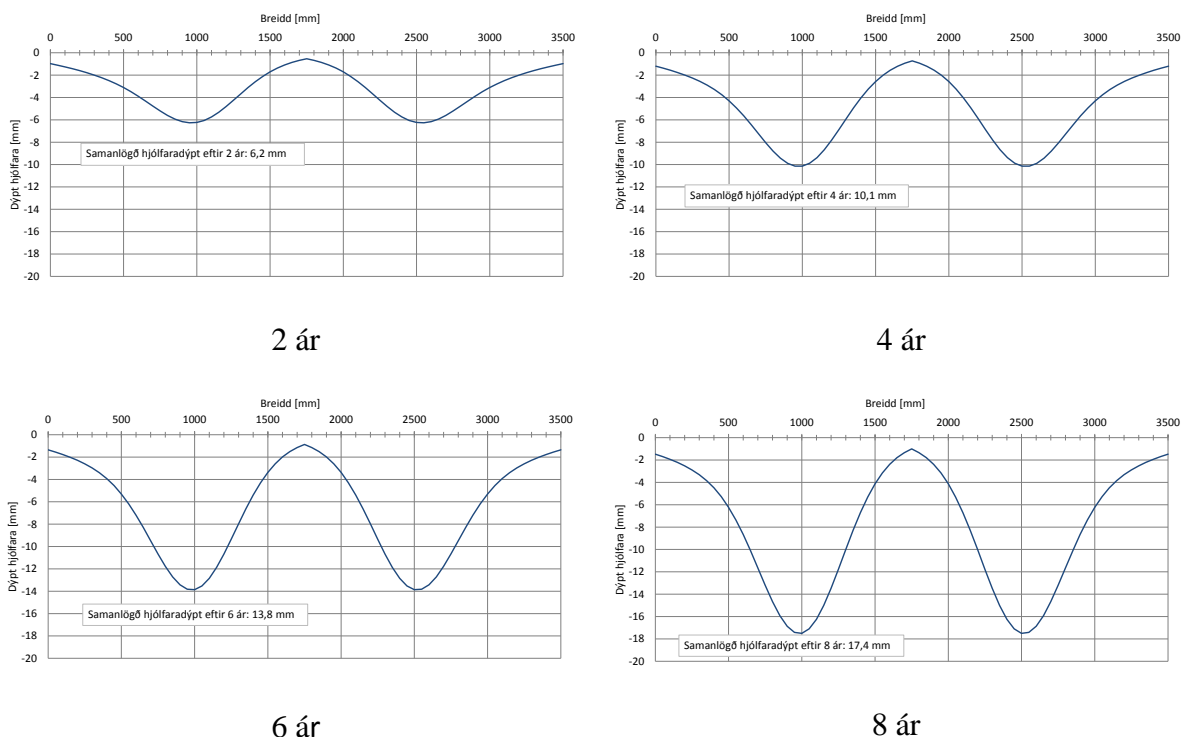


Mynd 8-11 Hjólfaramyndun vegna deigrar formbreytingar sem fall af tíma.

9 Samlegð hjólfara vegna slits og deigra formbreytinga

Í vegi eru raunveruleg hjólför vegna bæði slits nagladekkja og deigra formbreytinga. Þar sem slit vegna nagladekkja er ráðandi á veturna en deigar formbreytingar að sumarlagi. Til að ákvarða heildarhjólfaramyndun þarf því að leggja þessa tvo þætti saman.

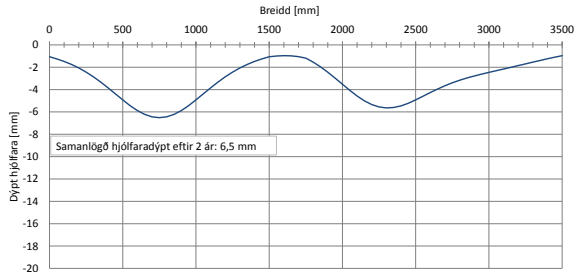
Þegar áætla á hjólfaramyndun út frá samlegðaráhrifum slits, vegna nagladekkja, og deigra formbreytinga koma nokkrar aðferðir til greina. Ein er sú að leggja slit og formbreytingar beint saman og gera ráð fyrir að fólksbílar og þyngri ökutæki fylgja sama sporinu, það er að miðja normaldreifingar beggja tegunda yrði á miðri akreininni. Þá verður samanlögð hjólför eins og á mynd 9-1. Ef mynd 9-1 er borin saman við myndir 7-8 og 7-10 þá sést að mesta samanlagða hjólfaramyndun er í sama punkti og hæsta slitgildið.



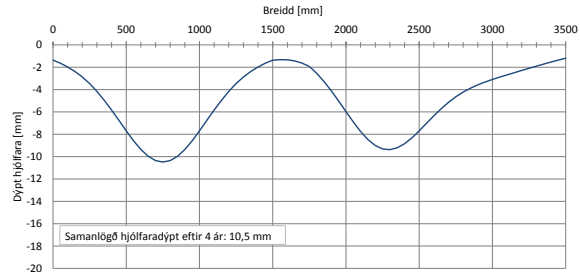
Mynd 9-1 Samanlögð hjólför vegna slits og formbreytinga með sama miðgildi, eftir 2, 4, 6 og 8 ár.

Að leggja ferlana saman á þennan hátt kann að vera órökrétt því eftir útlagningu byrja að myndast hjólför vegna deigra formbreytinga. Ökumenn fólksbíla hafa tilhneigingu til að aka í öðru hjólfarinu sem hefur myndast vegna þyngri umferðar. Því væri ef til vill rökréttara að færa miðgildi hliðlægs reikis fólksbifreiða þannig að hágildi slitsins verði á sama stað í þversniðinu og hágildi deigu formbreytingarinnar. Á umferðarþungum götum í þéttbýli, á höfuðborgarsvæðinu, þar sem að kantur eða önnur hindrun er á hægri hönd ökumanns má færa rök fyrir því að ökumaður hafi frekar tilhneigingu til að aka eftir

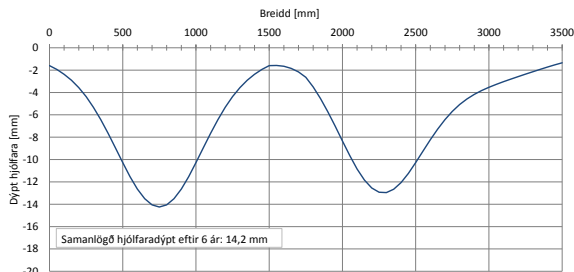
hjólfarinu sem að myndast vegna vinstri hjóla ökutækja. Á þjóðvegum og vegum sem byggðir eru með öxlum má búast við því að ökumenn haldi sig frekar fjær miðju vegar og fylgi því þeim hjólförum sem myndast vegna hægri hjóla ökutækja. Mynd 9-2 sýnir samanlögð hjólför þegar að gert er ráð fyrir að ökumenn hafi þá tilhneigingu að aka eftir vinstra hjólfarinu.



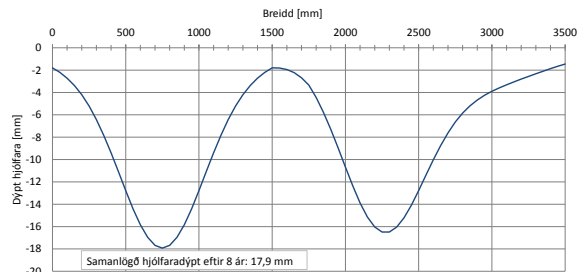
2 ár



4 ár



6 ár



8 ár

Mynd 9-2 Samanlögð hjólför þar sem hágildi slits og formbreytingar eru í sama punkti, eftir 2, 4, 6 og 8 ár.

Þessi aðferð við samlagningu hjólfara vegna slits og deigrar formbreytingar gefur versta mögulegu hjólfaramyndun. Leggja mætti þessa ferla saman með hágildum hægri hjólfars fyrir þjóðvegi.

Gera má ráð fyrir að ekki allir ökumenn leitist við að aka í hjólfari sem þegar hefur myndast og því má gera ráð fyrir að raunveruleg hjólfaradýpt sé einhvers staðar á milli þessara tveggja aðferða en þó nær því sem sést á mynd 9-2.

10 Niðurstöður/lokaorð

Hjólframmyndun (e. rutting) í malbiki á Íslandi verður einna helst rakin til tveggja þátta. Þessir tveir þættir eru slit vegna umferðar ökutækja útbúin negldum hjólbörðum og svo vegna varanlegra, deigra formbreytinga (e. plastic deformations) í einhverju laga vegbyggingarinnar. Á umferðarþungum götum á stór Reykjavíkursvæðinu er hlutur nagladekkjaslits verulegur í hjólframmyndun. Á vegum landsbyggðarinnar, þar sem umferð er minni, er hlutur deigra formbreytinga vegna þunga ökutækja mun stærri. Einnig má velta því fyrir sér með hlýnandi veðurfari og aukinni þungaumferð hvort hlutfall deigra formbreytinga í hjólframmyndun fari hækkandi.

Þegar kemur að hönnun malbikslaga vega er gott að geta áætlað hjólframmyndun vegna slits af völdum negldra hjólbarða og deigra formbreytinga. Á Íslandi eru hjólför ein algengasta ástæða fyrir viðhaldi á vegum og götum. Val á hentugu steinefni sem hentar hverju verkefni fyrir sig er mjög mikilvægt. Einnig þarf að velja viðunandi þykkt á malbikslögum fyrir gefna þungaumferð til að lágmarka deigar formbreytingar.

Formbreytingar samkvæmt þeim spálíkönnum sem beitt var í ritgerðinni má sjá í töflu 10-1. Þar má sjá að reiknuð hjólframmyndun með Prallgildi er ögn hærra en út frá kúlnakvarnargildi. Það skýrist einna helst vegna þess að meðatal Prallgilda var nýtt við útreikninga og með kvörðun líkansins ætti munurinn að vera ómarktækur.

Tafla 10-1 Niðurstöður líkana eftir 2, 4, 6 og 8 ár.

Tími	Hjólframmyndun út frá kúlnakvarnargildi	Hjólframmyndun út frá Prallgildi	Hjólframmyndun út vegna deigra formbreytinga
[ár]	[mm]	[mm]	[mm]
2	4,4	3,5	2,7
4	8,2	6,5	3,3
6	12,0	9,5	3,7
8	15,8	12,5	4,0

Samkvæmt þeim reikningum sem hafa verið framkvæmdir er hlutfall deigra formbreytinga í heildarhjólfaramyndun breytilegt sem fall af tíma. Deigar formbreytingar þróast með þeim hætti að þær eru mestar fyrst eftir útlagningu malbiks en jafnast svo út með tímanum meðan hjólframmyndun vegna slits er jöfn yfir tímabilið. Því er hlutfall deigra formbreytinga hærra í byrjun en minnkar svo eftir sem líður á það tímabil sem er til skoðunar. Miðað við þá aðferð að leggja saman hjólför með hágildi slits og deigra formbreytinga í sama punkti, í miðju öðru hjólfarinu, þá fer hlutfall deigar formbreytingar úr 41,5% eftir 2 ár í 22,3% eftir 8 ár, sjá töflu 10-2.

Tafla 10-2 Hlutfall deigrar formbreytingar í heildarhjólfaramyndun þar sem hágildi slits og formbreytingar eru í sama punkti.

Tími	Hjólfaramyndun vegna deigrar formbreytingar	Heildarhjólför	Hlutfall deigrar formbreytingar í heildarhjólfaramyndun
[ár]	[mm]	[mm]	[%]
2	2,7	6,5	41,5
4	3,3	10,5	31,4
6	3,7	14,2	26,1
8	4,0	17,9	22,3

Hluti deigra formbreytinga í hjólfaramyndun hefur að öllum líkindum verið vanmetin hér á landi. Talið hefur verið að kalt loftslag hafi að mestu komið í veg fyrir deigar formbreytingar og því hefur verið notað tiltölulega mjúkt bik (pen 180-200), jafnvel á umferðarpunga vegi (Þorsteinsson, 1999). Niðurstöður þeirra takmörkuðu rannsókna sem hafa farið fram benda þó til að skrið sé á bilinu 10-25% (Jóhannesson o.fl., 1998). Samkvæmt niðurstöðum þeirra líkana sem beitt hefur verið í þessari ritgerð er hlutfall deigrar formbreytingar í samræmi við niðurstöður eldri rannsókna. Þó skal taka fram að full sannreyning þessara líkana með mælingum og kvörðunum hefur ekki farið fram, því kann að vera að þetta hlutfall breytist við það.

Slitmod er ekki þróað með tilliti til íslenskra aðstæðna. Að sannreyna til fulls þessar aðferðir og kvarða alla þá stuðla, sem fengnir eru meðal annars með aðhvarfsgreiningu gagna sem safnað er um langt árabíl, er tímafrekt. Þó að sannreyning þessara aðferða sé tímafrek þá þarf hún ekki að vera flókin. Hvernig mælingar á hjólförum eru framkvæmdar getur verið álitamál en mestu máli skiptir að velja aðferð sem sátt ríkir um og að halda sömu aðferð allan mælitímann.

Ýmsar breytur í spálíkani um slit af völdum negldra hjólbarða þarf að skoða sérstaklega þegar kvörðun fer fram. Þessar breytur eru meðal annarra söltunarstuðull og hlutfallsegt slit. Söltunarstuðullinn er annaðhvort 0,8, þegar engin söltun fer fram, eða 1,0 þegar saltað er. Þennan stuðul þyrfti að skoða sérstaklega og sannreyna hvort hann lýsi ástandi vegar nægjanlega þegar íseyðing á sér stað. Hlutfallslegt slit af völdum nagladekkja er fundið með prófunum í veghermi VTI og upplagt væri að geta sent íslenskt steinefni út til Svíþjóðar til að fá samanburð.

Spálíkan um hjólfaramyndun vegna deigra formbreytinga hefur einnig sínar takmarkanir. Þær eru einna helst að mæla þyrfti hitastig á fleiri stöðum (dýptum) í malbikslaginu til að fá nákvæmari mynd af hvert hitastig hvers lags sem reiknað er fyrir er í raun og veru. Fleiri prófanir þyrfti að gera á íslensku malbiki með tilliti til líkansins.

Til að sannreyna spálíkön um hjólfaramyndun í malbiki þarf að framkvæma mælingar. Mæling hjólfara með það að takmarki að geta greint á milli hjólfara sem verða vegna slits annars vegar og deigra formbreytinga hins vegar er gerð að minnsta kosti tvisvar á ári. Gera má ráð fyrir að sú hjólfaramyndun sem verður vegna nagladekkjaslits verði á veturna, þegar notkun negldra hjólbarða er leyfð, en þá er litið svo á að of kalt sé til að formbreytingar verði vegna þungaumferðar, stífni malbiksins of mikil fyrir deigar formbreytingar. Hjólför vegna þungaumferðar, formbreytinga, komi hins vegar fyrst og

fremst fram á sumrin, þegar að hlýrra er í veðri og notkun negldra hjólbarða ekki leyfð. Því þyrfti að mæla hjólfaramyndun á ákveðnum stað á vorin og haustin, til dæmis á þeim tíma sem að nagladekk eru tekin í notkun og svo þegar að bann við þeim tekur gildi.

Einnig væri góð hugmynd að staðsetja þennan mælistað við umferðargreini, svo safna megi og vinna úr ítarlegri upplýsingum svo sem hlutfall stórra ökutækja og hraða. Einnig koma fyrir veðurstöð sem að minnsta kosti mældi hitastig. Með nýtingu umferðargreinis er hægt að reikna hvern og einn öxul fyrir sig og fá þannig nákvæmara samband milli líkansins og raunverulegrar formbreytingar í malbikinu. Einnig er hægt að fá nákvæmari mynd af hraða ökutækja sem aka um mælistaðinn. Samfara mælingum þyrfti að gera ítarlega næmnigreiningu á inntakstærðum og breytum og ákvarða hvort einhverja þætti beri að athuga betur.

Í Oregon, BNA, hefur farið fram vinna við að þróa tækni sem getur greint fjölda bifreiða sem aka um á negldum hjólbörðum. Þetta er gert með því að koma fyrir hljóðstreymisnema sem nemur streitubylgju (e. stress wave) sem myndast þegar að ekið er á negldum hjólbarða yfir mælistaðinn. Þessi tækni er enn í þróun en í framtíðinni ætti að reynast auðvelt að fá nákvæmt hlutfall ökutækja á negldum hjólbörðum (Schumacher o.fl., 2010).

Ekki þarf að gera sömu kröfur til malbiksblendna sem lagðar eru á fjölfarna stofnæð í Reykjavík og bílastæði við íbúðarhús. Því getur sú aðferðafræði hér nýst til að koma í veg fyrir að götur og vegir séu hvorki undir- eða ofhannaðir. Að ekki séu notuð of góð, þar af leiðandi dýr, steinefni í vegi og götur með lítilli umferð og lágum hraða og öflugt. Einnig getur þessi aðferðafræði orðið til þess að malbikslög þykkni, við hönnun, sem annars væru of þunn til að sporna við deigum formbreytingum. Allt getur þetta komið til sparnaðar á fjármunum bæði við byggingu vega og viðhald.

Að geta spáð fyrir um endingu malbiks með tilliti til hjólfaramyndunar getur verið til hagsbóta fyrir þá aðila sem koma að byggingu, rekstri og notkun vega. Sú aðferðafræði sem lögð er fram í þessari ritgerð gerir það að verkum að hægt verður að spá fyrir um hjólfaramyndun í vegum og götum hér á landi bæði með tilliti til slits vegna nagladekkja og deigra formbreytinga vegna umferðar þyngrri ökutækja.

Þessa aðferðafræði gætu eigendur vega og gatna, ríki og sveitafélög, nýtt sér við gerð viðhaldsáætlana. Það gæti reynst vel að geta gert nákvæmari viðhaldsáætlanir þar sem ólíklegra er að það þurfi að framkvæma óvæntar viðgerðir vegna hjólfaramyndunar fyrr en áætlað er. Þá geta spár um hjólfaramyndun nýst sem inntaksstærð í forrit til viðhaldsáætlana (PMS). Þessa aðferðafræði er hægt að nýta við nýbyggingu vega og þegar malbikslag vega er endurnýjað. Því er möguleiki að gera betri viðhaldsáætlanir yfir allan líftíma vega og gatna.

Ef að um alútboð væri að ræða gæti verkkaupi farið fram á að prófanir á malbiki yrðu framkvæmdar með tilliti til spár um hjólfaramyndun og því gert kröfur um endingu gagnvart hjólfaramyndun. Einnig væri hægt að gera kröfur á verktaka um endingartíma vega og gatna.

Malbiksframleiðendur gætu einnig nýtt sér þessa aðferðafræði við að þróa vöru sína og við val á steinefni í blöndur sínar. Þessi aðferðafræði býður upp á að flokka malbiksblöndur eftir slitþoli.

Umhverfisáhrif slits af völdum negldra hjólbarða er einna helst í formi svifryks. Svifryk eru fínar agnir sem losna þegar að negldir hjólbarðar slíta mabliki. Í spálíkani um hjólfaramyndun af völdum negldra hjólbarða er hægt að reikna magn efnis sem slitnar við nagladekkjaáraun. Slíkar upplýsingar geta nýst við frekari rannsóknir á svifryksmengum af völdum nagladekkjanotkunar.

Þegar staðfæringu og sannreyningu líkananna er lokið verður hægt að sjá hvert raunverulegt hlutfall deigra formbreytinga er í heildarhjólfaramyndun á Íslandi

Enginn vafi er á að öryggi vegfarenda minnkar samfara auknum hjólförum í vegum og götum. Því er það mikið hagsmunamál að minnka hjólfaramyndun eins mikið og unnt er. Leiða má að því líkum að notkun negldra hjólbarða mun ekki stöðvast á næstunni, þó svo að æ fleiri kjósi að nýta sér aðra valkosti við að ná gripri á hálu vegyfirborði. Því er mikilvægt að halda áfram að leitast við að minnka hjólfaramyndum eins og kostur er með fleiri möguleikum þegar kemur að hönnun vega og gatna. Negldir hjólbarðar eru að öllum líkindum komnir til að vera. Því er væntanlega farsælast að reyna að minnka áhrif þeirra á vegi og götur fremur en að beita boðum og bönnum, sem að væri pólitísk frekar en verkfræðileg ákvörðun.

Heimildir

- Airey, G. D., Singleton, T. M., & Collop, A. C. (2002). Properties of Polymer Modified Bitumen after Rubber-Bitumen Interaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(4), bls. 344-354.
- Alþingi. (2007). *Reglugerð um stærð og þyngd ökutækja Nr. 155*. Reykjavík: Alþingi.
- Alþingi. (2008). *Þingsályktun um samgönguáætlun fyrir árin 2011-2022*. Reykjavík: Alþingi.
- Angerinos, M. J., Mahoney, J. P., Moore, R. L., & O'Brien, A. J. (1999). *A Synthesis on Studded Tires*. Washington: U.S. Department of Transportation.
- ARA. (2004). *Guide for Mechanistic Empirical Design of New and Rehabilitated pavement structures*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board & National Research Council. Washington D.C: Transportation Research Board of the National Academics.
- Arason, Ó. A., & Pétursson, P. (2010). *Mat á eiginleikum malbiks fyrir íslenskar aðstæður, Áfangaskýrsla II*. Reykjavík: Nýsköpunarmiðstöð Íslands.
- Austrroads. (1987). *A Guide to the Visual Assessment of Pavement Condition*. Sydney: Austrroads.
- Benson, H. (1995). *University Physics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Bjarnason, G., Erlingsson, S., & Pétursson, P. (1999). *Aggregate resistance to fragmentation. weathering and abrasion*. Skýrsla E-37. Reykjavík: BUSL.
- Brown, E. R. (1990). *Density of Asphalt Concrete - How Much is Needed*. Washington, DC: The Transportation Research Board.
- Cantz, R. (1972). New Tire Stud Developments. Í *Highway Research Record no. 418*. Washington: Highway Research Board, National Research Council.
- Croney, D., & Croney, P. (1991). *The Design and Performance of Road Pavements*. Berkshire: McGraw-Hill.
- Doré, G., & Zubeck, H. K. (2009). *Cold Regions Pavement Engineering*. Reston, Virginia: ASCE Press & McGraw-Hill.
- Erlingsson, S. (1999). Efniseiginleikar íslenskra malbikslitlaga. *Árbók VFÍ/TFÍ 1998/1999*, bls. 310-317.

- Erlingsson, S. (2007). Mechanistic Pavement Design - A Road to Better Understanding of Pavement Performance. *Proceedings of the International seminar on pavement design systems and pavement performance models*, (11 bls.). Reykjavík.
- Erlingsson, S. (2010). Assessment of pavement damage or Quantitative measurement techniques. *Fyrirlestur við KTH*.
- Erlingsson, S. (2010). Characterization of Heavy Traffic on the Swedish Road Network. *Proceeding of the 11th International Conference on Asphalt Pavements 2010* (bls. 1704-1711). Nagoya: Curran Associates, Inc.
- Erlingsson, S. (2012). Rutting development in a flexible pavement. *Road Materials and Pavement Design*. Vol. 13(2), bls. 218-234.
- Erlingsson, S., & Ahmed, W. A. (2013). Fast layered elastic response program for the analysis of flexible pavement structures. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 14(1), bls. 196-210.
- Erlingsson, S., & Urbancic, E. S. (1997). *Resilient modulus of an Icelandic bituminous mix estimated from indirect tensile test*. Skýrsla E-17. Reykjavík: BUSL.
- Erlingsson, S., Said, S., & McGarvey, T. (2013). Influence of heavy traffic lateral wander on pavement deterioration. *Proceeding of the 4th European Pavement and Asset Management Conference – EPAM*. Malmö.
- Erlingsson, S. (2010). *Pavement Performance Models - Part 2; Project Level - Modelling of rutting performance - Comparison with LTPP road section*. NordFoU.
- European Committee for Standardization. (1998). *prEN 12697-16*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Evensen, R., & Senstad, P. (1992). *Distress and damage factors for flexible pavements*. Oslo: Directorate of Public Roads.
- Garber, J. N., & Hoel, A. L. (2002). *Traffic and Highway Engineering* (3. útg.). Pacific Grove: Brooks/Cole, Thomson Learning.
- Google Maps. *Google Maps-Street View*. (2013). Sótt frá Google: <http://maps.google.is>.
- Hoque, Z. (2006). *The Handbook of Highway Engineering*. (T. F. Fwa, Ritstj.) Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.
- Holen, Å. (2001). *Mätning med Laser RST på betongvägar*. Linköping: VTI.
- Hu, S., Zhou, F., & Scullion, T. (2011). Development, Calibration, and Validation of a New M-E Rutting Model for HMA Overlay Design and Analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23(2), bls. 89-99.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (2 útg.). Upper Saddle River, New Jersey, Bandaríki Norður-Ameríku: Pearson Prentice Hall.

- Huekelom, W., & Klomp, A. J. G. (1967). Consideration of calculated strains at various depths in connection with the stability of asphalt pavements. *Proceedings of the 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements* (bls. 107-123). Ann Arbor. University of Michigan.
- Ingason, Þ. (2000). *Hönnun malbiks*. Skýrsla S-18. Reykjavík: BUSL.
- Ingason, Þ., & Jóhannesson, Á. (2002). *Úttekt á stöðu nagladekkjamála - nýjar naglagerðir, önnur þróun*. Skýrsla S-23. Reykjavík: BUSL.
- Jacobson, T., & Wågberg, L.-G. (1997). *Utveckling av prognosmodell för beläggnings-slitage, slitageprofil och årskostnad*. Linköping: Statens väg- och transportforskningsinstitut.
- Jacobson, T., & Wågberg, L.-G. (2007). *Utveckling och uppgradering av prognosmodell för beläggnings-slitage från dubbade däck samt en kunskapsöversikt över inverkan faktorer – Version 3.2.03*. Linköping: VTI.
- Jóhannesson, Á., & Ingason, Þ. (2002). *Ending malbiksslitlaga á Reykjanesbraut*. Skýrsla S-24. Reykjavík: BUSL.
- Jóhannesson, Á., Hjartarson, S., & Guðmundsson, V. (1998). *Hjólframmyndun í malbiki að sumarlagi - lokaskýrsla*. Skýrsla S-5. Reykjavík: BUSL.
- Jóhannesson, Á., Hjartarson, S., & Valgeirsson, V. (1999). *Slit á Vesturlandsvegi ofan Mosfellsbæjar - áfangaskýrsla 1*. Skýrsla S-13. Reykjavík: BUSL.
- Kristinsdóttir, B. (1999). *Íslenskt malbik ákvörðun aflfræðilegra eiginleika*. Reykjavík: Háskóli Íslands.
- Leahy, R.B. (1989). *Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete*. College Park: University of Maryland.
- Mamlouk, M. S. (1997). General Outlook of Pavement and Vehicle Dynamics. *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 123(6), bls. 515-517.
- Mamlouk, M. S. (2006). Design of Flexible Pavements. Í T. F. Fwa (Ritstj.), *The Handbook of Highway Engineering*. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group.
- Masad, E., Jandhyala, V. K., Dasgupta, N., Somadevan, N., & Shashidhar, N. (2002). Characterization of Air Void Distribution in Asphalt Mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14(2), bls. 116-121.
- Miller, P. W. (1967). *Principles of Winter Tire Studs*. Washington D.C.: Highway Research Board, Division of Engineering, National Research Council.
- NCHRP Design Guide*. (2013). Sótt frá Mechanistic-Empirical Design of New & Rehabilitated Pavement Structures:
<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/guide.htm>

- Qiu, Y. F., & Lum, K. M. (2006). Design and Performance of Stone Mastic Asphalt. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 132(12), bls. 956-963.
- Santucci, L. (2001). *Rut Resistant Asphalt Pavements*. Berkeley: Berkeley's Institute of Transportation.
- Scania. (september 2013). Sótt frá Trucks Specification Sheets: <http://www.scania.co.za/trucks/trucks-specification-sheets/>
- Scania R580 CA8X4 SPECIFICATION. (september 2013). Sótt frá Scania: http://www.scania.co.za/Images/R580%20CA8x4%20EHZ%20Heavy%20Hauler_tcm103-136641.pdf
- Sengoz, B., & Isikyakar, G. (2008). Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1897-1905.
- Shaw, P. (1980). *Stress-Strain Relationship for Granular Materials under Repeated Loading*. Nottingham: University of Nottingham.
- Schumacher, T., Higgins, C. C., & Lovejoy, S. C. (2010). Detection of Vehicles with Studded Tires Using Acoustic Emission Sensors Mounted to Highway Bridges. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 136 (SPECIAL ISSUE: Applications of Advanced Technologies in Transportation), bls. 480-487.
- Sousa, J. B., Craus, J., & Monismith, C. L. (1991). *Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete*. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- Statens väg- och transportforskningsinstitut. (2013). *FORSKNINGSOMRÅDEN*. Sótt 16. Febrúar 2013 frá Statens väg- och transportforskningsinstitut: <http://www.vti.se/sv/forskningsomraden/miljo/luftforeningar-och-luftkvalitet/provvagsmaskinen/>
- Tam, W. O. (2006). Highway Materials. Í T. F. Fwa (Ritstj.), *The Handbook of Highway Engineering*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Tervahattu, H., Kupiainen, K., Räisänen, M., Mäkelä, T., Aurela, M., & Hillamo, R. (2004). The influence of studded tires and traction sanding on dust emissions from road abrasion. *Proceedings of Winter Cities 2004 Conference*. Anchorage.
- Trafikverket. (2011). *Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion*. Stokkhólmur: Trafikverket.
- Urbancic, E. S. (1998). *Aflfræðilegir eiginleikar íslensks slitlags*. Reykjavík: Háskóli Íslands.
- Vegagerðin. (1995). *Alverk '95*. Reykjavík: Vegagerðin.
- Vegagerðin. (2010). *Efnisrannsóknir og efniskröfur, leiðbeiningar við hönnun, framleiðslu og framkvæmd*. Reykjavík: Vegagerðin.

- Vegagerðin. (2013). *Efnisrannsóknir og efniskröfur*. Reykjavík: Vegagerðin.
- Vegakerfið. (22. ágúst 2013). Sótt frá vefsíðu Vegagerðarinnar: <http://www.vegagerdin.is/vegakerfid/>
- VTI. (Október 2006). Slitmod 3.2.03-Prognosmodell för beläggningsslitage. Linköping, Svíþjóð.
- VTI. (Nóvember 2013). *Mätning av profil med slitageprofilometer*: Sótt frá heimasíðu VTI. Mätning av profil med slitageprofilometer: <http://www.vti.se/sv/vti-erbjuder/vagtillstandsmatning/profilmatning/slitageprofilometer/>
- VTI. (Nóvember 2013). *Mätning av profil med profilmätare Primal*. Sótt frá heimasíðu VTI: <http://www.vti.se/sv/vti-erbjuder/vagtillstandsmatning/profilmatning/profilmatare-primal/>
- VTI. (Nóvember 2013). *Vägtillståndsmätning – Vägytemätning*. Sótt frá heimasíðu VTI: <http://www.vti.se/sv/vti-erbjuder/vagtillstandsmatning/vagytematning/>
- WAPA. (2013). *Washington Asphalt Pavement Association's Asphalt Pavement Guide*. Sótt 25. apríl 2013 frá The Washington Asphalt Pavement Association (WAPA): <http://www.asphaltwa.com/2010/09/17/pavement-structure/>
- WorldClimate.com*. (september 2013). Sótt frá <http://www.worldclimate.com/>
- Yilidrim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 21, 66-72.
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Þorsteinsson, Þ. (1999). *Sig og skrið í asfaltbundnum slitlögum*. Skýrsla S-9. Reykjavík: BUSL.

Viðauki A

Dæmi um úttaksskrá úr *Kenpave* við 10°C.

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -tiuc

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED
SYSTEM

NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED

NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1

NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1

TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0

NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 4

NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 10

LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80

COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9

SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m³, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 8 20 50

POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0,35 0,35 0,35
0,35

VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 1 2 3 4 5 6 7 7,99
15

ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 6,500E+06 2 3,000E+05
3 1,800E+05 4 1,200E+05

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS

CONTACT RADIUS (CR)----- = 10

CONTACT PRESSURE (CP)----- = 800

NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- =
3

WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0

WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 34

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0,000 17,000 2 0,000 0,000
3 0,000 10,000

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPL. (HORIZONTAL P. STRAIN)	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE PRINCIPAL STRESS (STRAIN)
1	0	0,04044	0	1534,24	1,18	427,263
	(STRAIN)	-1,69E-05	-1,05E-04	2,13E-04	-1,05E-04	-1,69E-05
1	1	0,04054	4,822	1175,336	4,822	423,726
	(STRAIN)	1,64E-06	-8,54E-05	1,58E-04	-8,54E-05	1,64E-06
1	2	0,04061	18,934	828,938	18,934	388,108
	(STRAIN)	1,41E-05	-6,26E-05	1,06E-04	-6,26E-05	1,41E-05
1	3	0,04066	41,223	490,53	41,223	325,523
	(STRAIN)	2,15E-05	-3,76E-05	5,57E-05	-3,76E-05	2,15E-05
1	4	0,04069	69,193	244,894	69,193	156,507
	(STRAIN)	7,17E-06	-1,10E-05	2,55E-05	-1,10E-05	7,17E-06
1	5	0,04068	99,119	157,798	-176,601	99,119
	(STRAIN)	-4,10E-05	1,63E-05	2,85E-05	-4,10E-05	1,63E-05
1	6	4,07E-02	1,27E+02	1,27E+02	-512,117	77,772
	(STRAIN)	-8,98E-05	4,29E-05	4,29E-05	-8,98E-05	3,27E-05
1	7	4,06E-02	1,46E+02	1,46E+02	-853,184	19,721
	(STRAIN)	-1,40E-04	6,74E-05	6,74E-05	-1,40E-04	4,11E-05
1	7,99	4,05E-02	1,53E+02	1,53E+02	-1199,159	-0,531
	(STRAIN)	-1,93E-04	8,82E-05	8,82E-05	-1,93E-04	5,62E-05
1	15	3,77E-02	1,34E+02	1,34E+02	-2,159	33,215
	(STRAIN)	-2,02E-04	4,10E-04	4,10E-04	-2,02E-04	-4,28E-05
2	0	0,04077	800	2579,267	736,864	2234,934
	(STRAIN)	1,65E-04	-1,46E-04	2,37E-04	-1,46E-04	1,65E-04
2	1	0,04088	779,076	1994,515	778,976	1737,455
	(STRAIN)	1,18E-04	-8,11E-05	1,71E-04	-8,11E-05	1,18E-04
2	2	0,04094	723,194	1396,727	722,575	1224,379
	(STRAIN)	7,41E-05	-2,98E-05	1,10E-04	-3,00E-05	7,43E-05
2	3	4,09E-02	6,41E+02	8,30E+02	635,647	744,861
	(STRAIN)	3,46E-05	1,41E-05	5,34E-05	1,30E-05	3,57E-05
2	4	4,09E-02	5,43E+02	5,45E+02	270,439	282,239
	(STRAIN)	-2,39E-06	5,36E-05	5,41E-05	-2,95E-06	-5,02E-07
2	5	4,08E-02	4,40E+02	4,41E+02	-260,233	-189,642
	(STRAIN)	-5,36E-05	9,18E-05	9,21E-05	-5,36E-05	-3,89E-05
2	6	4,07E-02	3,45E+02	3,46E+02	-812,231	-659,845

	(STRAIN)	-1,08E-04	1,32E-04	1,32E-04	-1,08E-04	-7,64E-05
2	7	4,06E-02	2,72E+02	2,73E+02	-1389,517	-1154,563
	(STRAIN)	-1,66E-04	1,79E-04	1,79E-04	-1,66E-04	-1,18E-04
2	7,99	0,04037	235,366	235,598	-2001,582	-1683,394
	(STRAIN)	-2,30E-04	2,35E-04	2,35E-04	-2,30E-04	-1,64E-04
2	15	3,62E-02	1,54E+02	1,57E+02	-1,541	11,394
	(STRAIN)	-2,02E-04	4,97E-04	5,13E-04	-2,02E-04	-1,44E-04
3	0	4,11E-02	8,00E+02	2,08E+03	400,936	1180,218
	(STRAIN)	4,81E-05	-1,14E-04	2,35E-04	-1,14E-04	4,81E-05
3	1	4,12E-02	3,82E+02	1,53E+03	223,171	1121,821
	(STRAIN)	4,54E-05	-7,52E-05	1,62E-04	-1,08E-04	7,84E-05
3	2	4,13E-02	3,55E+02	1,05E+03	109,391	981,022
	(STRAIN)	3,73E-05	-4,16E-05	1,03E-04	-9,27E-05	8,83E-05
3	3	0,04128	323,453	833,189	-6,547	614,296
	(STRAIN)	2,69E-05	-1,04E-05	9,55E-05	-7,90E-05	5,00E-05
3	4	0,04127	289,075	679,564	-120,173	193,297
	(STRAIN)	-3,83E-07	1,95E-05	1,01E-04	-6,55E-05	-3,83E-07
3	5	0,04124	255,152	523,978	-230,512	-222,45
	(STRAIN)	-5,00E-05	4,92E-05	1,05E-04	-5,17E-05	-5,00E-05
3	6	0,04117	224,663	374,888	-644,014	-341,344
	(STRAIN)	-1,01E-04	7,95E-05	1,11E-04	-1,01E-04	-3,80E-05
3	7	0,04108	200,838	251,092	-1082,526	-466,388
	(STRAIN)	-1,55E-04	1,12E-04	1,22E-04	-1,55E-04	-2,70E-05
3	7,99	0,04095	187,455	188,185	-1545,332	-632,972
	(STRAIN)	-2,14E-04	1,46E-04	1,46E-04	-2,14E-04	-2,43E-05
3	15	0,03756	143,397	143,443	-1,995	27,186
	(STRAIN)	-2,06E-04	4,49E-04	4,49E-04	-2,06E-04	-7,44E-05

Viðauki B

Niðurstöður kúlnakvarnarprófa, efni frá Malbikunarstöðinni Hlaðbæ Colas og Malbikunarstöðinni Höfða.

Malbikunarstöðina Hlaðbæ-Colas hf.

Náma:	Durasplitt		
Sýni	Þyngd fyrir próf	Þyngd eftir próf	Kvarnargildi
	[g]	[g]	[%]
I	1042,1	974,8	6,5%
II	1041,9	967,6	7,1%
		Meðaltal:	6,8%

Náma:	Flugvöllurinn Akureyri		
Sýni	Þyngd fyrir próf	Þyngd eftir próf	Kvarnargildi
	[g]	[g]	[%]
I	1043,0	974,4	6,6%
II	1043,8	971,6	6,9%
		Meðaltal:	6,7%

Náma:	Durasplitt		
Sýni	Þyngd fyrir próf	Þyngd eftir próf	Kvarnargildi
	[g]	[g]	[%]
I	1041,1	959,8	7,8%
II	1041,0	968,6	7,0%
		Meðaltal:	7,4%

Náma:	Durasplitt		
Sýni	Þyngd fyrir próf	Þyngd eftir próf	Kvarnargildi
	[g]	[g]	[%]
I	1041,0	974,8	6,4%
II	1040,9	973,4	6,5%
		Meðaltal:	6,4%

Malbikunarstöðin Höfði hf

Náma:	Björgun		
Sýni	Þyngd fyrir próf	Þyngd eftir próf	Kvarnargildi
	[g]	[g]	[%]
I	1084,9	984,7	9,2%
II	1085,4	985,0	9,3%
		Meðaltal:	9,2%

Náma:	Seljadalur		
Sýni	Þyngd fyrir próf	Þyngd eftir próf	Kvarnargildi
	[g]	[g]	[%]
I	1130,0	1040,2	7,9%
II	1131,1	1042,9	7,8%
		Meðaltal:	7,9%

Viðauki C

Niðurstöður Prallprófana.

Rúmþyngdir sívalninga sem þjappaðir voru vegna Prallprófana

Mælingar fyrir sögun

Akureyri: SL16 Krossanes og Durasplitt - Höfði: SMA16 Ottersbo

Hlaðbær-Colas: SL11 Durasplitt venjulegt og með 3% Sasobit

Hiti vatns:		21 °C		Rþ vatns 0,9981		g/cm ³			
Sívaln- ingur	Þurr- sýni [g]	Sýni í vatni [g]	Yþþ. sýni [g]	Ryður vatni [g]	Rúm- mál [cm ³]	Rúm- þyngd [g/cm ³]	Meðal- rúmþ. [g/cm ³]	Rþ. malbiks [g/cm ³]	Hol- rúm [rm%]
A01	1296,1	798,2	1296,9	498,7	499,6	2,594			SL16
A02	1293,1	795,7	1294,2	498,5	499,4	2,589			AK
A03	1294,7	798,4	1295,9	497,5	498,4	2,597	2,594	2,610	0,6
A04	1255,5	768,6	1259,5	490,9	491,8	2,553			SL16
A05	1254,8	768,5	1257,2	488,7	489,6	2,563			AK
A06	1254,8	764,6	1257,9	493,3	494,2	2,539	2,551	2,610	2,2
A07	1278,6	780,7	1279,4	498,7	499,6	2,559			SL16
A08	1280,6	781,7	1281,2	499,5	500,5	2,559			AD
A09	1281,4	782,4	1282,0	499,6	500,6	2,560	2,559	2,580	0,8
A10	1245,4	753,9	1247,5	493,6	494,5	2,518			SL16
A11	1244,6	753,0	1246,5	493,5	494,4	2,517			AD
A12	1244,2	751,7	1246,0	494,3	495,2	2,512	2,516	2,580	2,5
H01	1277,3	778,9	1278,1	499,2	500,2	2,554			SMA16
H02	1273,6	776,8	1274,2	497,4	498,3	2,556			Ot
H03	1279,0	779,1	1280,0	500,9	501,9	2,549	2,553	2,573	0,8
H04	1243,2	756,6	1244,3	487,7	488,6	2,544			SMA16
H05	1243,7	759,8	1244,9	485,1	486,0	2,559			Ot
H06	1243,5	757,5	1244,8	487,3	488,2	2,547	2,550	2,573	0,9
C01	1265,2	762,9	1265,6	502,7	503,7	2,512			SL11
C02	1264,6	763,1	1265,5	502,4	503,4	2,512			DV
C03	1266,5	764,1	1267,2	503,1	504,1	2,513	2,512	2,545	1,3
C04	1229,3	734,3	1230,9	496,6	497,5	2,471			SL11
C05	1228,7	733,6	1230,5	496,9	497,8	2,468			DV
C06	1229,5	735,3	1231,4	496,1	497,0	2,474	2,471	2,545	2,9
C07	1266,3	765,6	1267,0	501,4	502,4	2,521			SL11
C08	1265,1	765,2	1265,6	500,4	501,4	2,523			DS
C09	1264,8	765,3	1265,5	500,2	501,2	2,524	2,523	2,543	0,8
C10	1228,4	737,8	1230,8	493,0	493,9	2,487			SL11
C11	1227,9	737,2	1229,8	492,6	493,5	2,488			DS
C12	1228,0	735,3	1230,0	494,7	495,6	2,478	2,484	2,543	2,3

Slitþolsmælingar - Prall
Sýni þjöppuð á rannsóknastofu

Akureyri: SL16 Krossanes og Durasplitt - Höfði: SMA16 Ottersbo
Hlaðbær-Colas: SL11 Durasplitt venjulegt og með 3% Sasobit

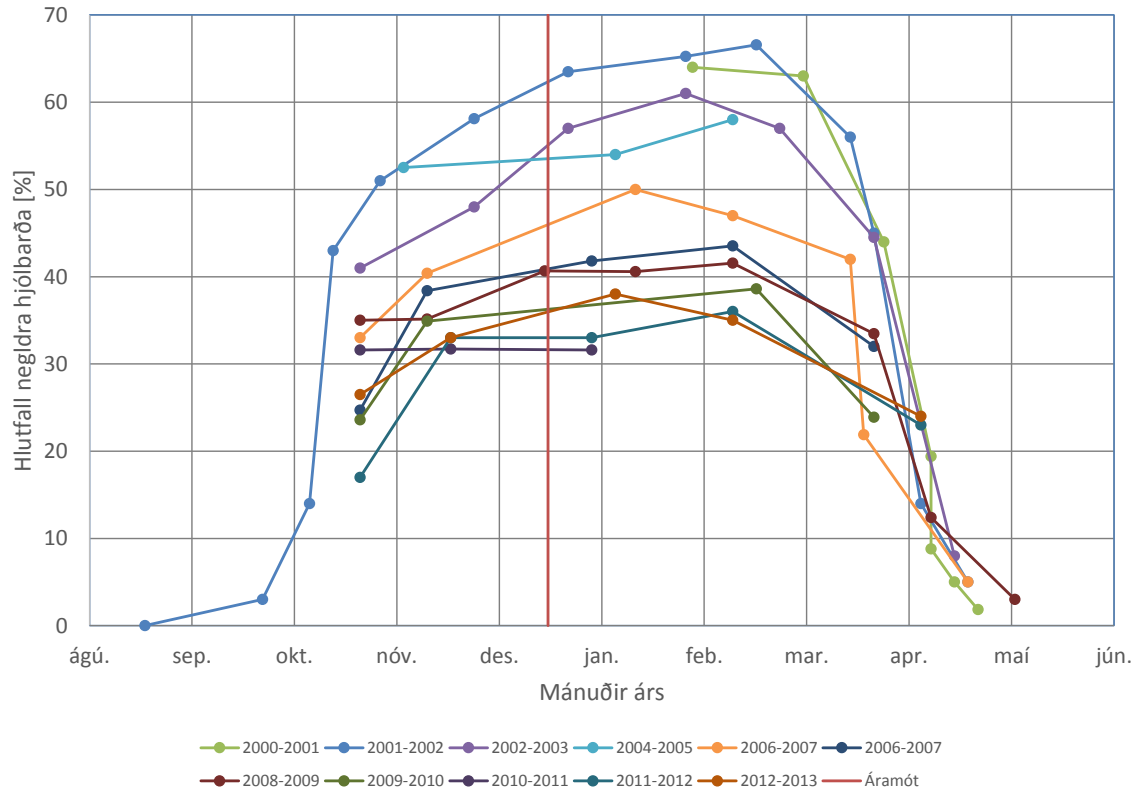
<i>Malbiksgerð og holrúm</i>	<i>Próf-sneið</i>	<i>Ybb fyrir [g]</i>	<i>Ybb eftir [g]</i>	<i>Efnis-tap [g]</i>	<i>Rúm-þyngd* [g/cm³]</i>	<i>Prall gildi [cm³]</i>	<i>Meðal Prall [cm³]</i>
SL16AK 0,6 %rm	A01A	620,5	558,0	62,5	2,594	24	
	A01B	589,5	530,0	59,5	2,594	23	
	A02A	605,0	540,5	64,5	2,594	25	
	A02B	603,0	544,0	59,0	2,594	23	24
SL16AK 2,2 %rm	A04A	590,0	531,0	59,0	2,551	23	
	A04B	583,0	522,5	60,5	2,551	24	
	A05B	585,5	527,5	58,0	2,551	23	
	A06A	595,0	534,0	61,0	2,551	24	23
SL16AD 0,8 %rm	A07A	603,0	549,0	54,0	2,559	21	
	A08A	608,5	556,0	52,5	2,559	21	
	A08B	586,5	532,5	54,0	2,559	21	
	A09B	585,0	521,5	63,5	2,559	25	22
SL16AD 2,5 %rm	A10A	595,5	549,5	46,0	2,516	18	
	A11A	579,0	512,9	66,1	2,516	26	
	A11B	583,0	524,5	58,5	2,516	23	
	A12A	588,5	529,5	59,0	2,516	23	23
SMA16 Ot 0,8 %rm	H01B	601,0	569,5	31,5	2,553	12	
	H02B	583,0	544,0	39,0	2,553	15	
	H03A	588,0	557,5	30,5	2,553	12	
	H03B	607,5	571,0	36,5	2,553	14	13
SMA16 Ot 0,9 %rm	H04A	565,0	533,5	31,5	2,550	12	
	H04B	594,5	559,0	35,5	2,550	14	
	H05A	588,0	558,5	29,5	2,550	12	
	H05B	573,0	537,0	36,0	2,550	14	13
SL11 DV 1,3 %rm	C01A	600,5	546,5	54,0	2,512	21	
	C02B	577,5	522,0	55,5	2,512	22	
	C03A	607,5	551,5	56,0	2,512	22	
	C03B	574,5	525,3	49,2	2,512	20	21
SL11 DV 2,9 %rm	C04B	565,5	516,0	49,5	2,471	20	
	C05A	588,5	540,5	48,0	2,471	19	
	C06A	561,0	512,0	49,0	2,471	20	
	C06B	585,5	537,0	48,5	2,471	20	20
SL11 DS 0,8 %rm	C07A	602,5	551,0	51,5	2,523	20	
	C07B	580,0	529,5	50,5	2,523	20	
	C08A	608,0	553,5	54,5	2,523	22	
	C08B	573,0	522,5	50,5	2,523	20	21
SL11 DS 2,3 %rm	C10A**	584,0	539,5	44,5	2,484	18	
	C10B	561,5	514,0	47,5	2,484	19	
	C11A	587,0	535,5	51,5	2,484	21	
	C11B**	559,0	513,5	45,5	2,484	18	20

* Rúmþyngd er meðaltal sívalninga fyrir sögun, ekki hverrar sneiðar fyrir sig.

** Mæling ekki góð. vegna leka með þakningu.

Viðauki D

Niðurstöður úttektar á notkun negldra hjólbarða í Reykjavík frá 2000-2013, tekið saman af Eflu verkfræðistofu.



Mynd B-1 Samantekt mælinga á notkun nagladekkja frá 2000-2013.

Viðauki E

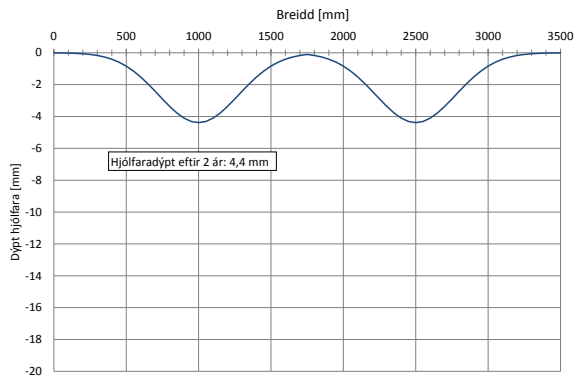
Samantekt inntaksstærða og prófíla fyrir spálíkön.

Tafla E-1 Gildi inntaksstærða fyrir Slitmod

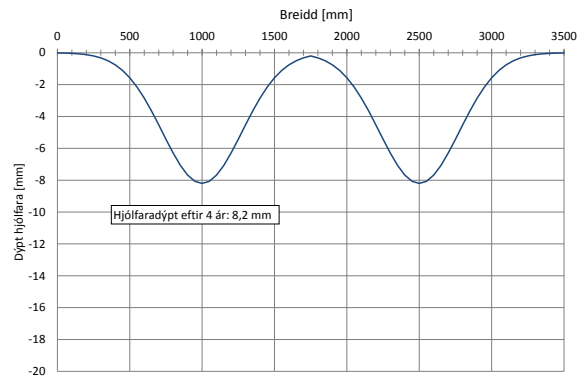
Breidd akreinar	3,5	m
Staðalfrávik	275	mm
Ökuraði	90	km/klst
Ársgsumferð (ADT)	10000	ökutæki/dag
Leyfð notkun nagladekkja (slittímabil)	168	dagar/ár
Hlutfall ökutækja á nagladekkjum	60	%
Er salt notað?	Já	
Fjöldi reikniára	8	ár
Kornahlutfall > 4 mm	65	% af massa
Stærsta kornastærð	16	mm
Kúlnakvarnargildi	7,9	%
Prallgildi	20	cm ³

Tafla E-2 Innatakstærðir í líkan fyrir deigar formbreytingar.

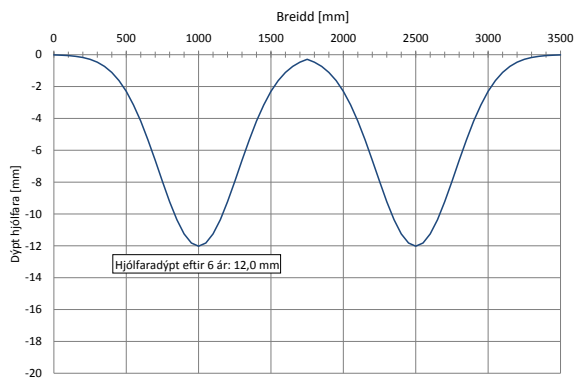
Ársgsumferð (AADT)	10000	ökutæki
Þung ökutæki (HV)	12%	
Þung ökutæki (HV-AADT)	1200	Þung ökutæki á dag
aukning (r):	1%	Umferðaraukning á ári
Þykkt malbiks	8	cm
Δz_1	4	cm
Δz_2	4	cm
Dagar í ári	365	
Öxulálag, W	100	kN
Dekkjaþrýstingur, p	800	kPa
Staðalfrávik reikis	275	mm



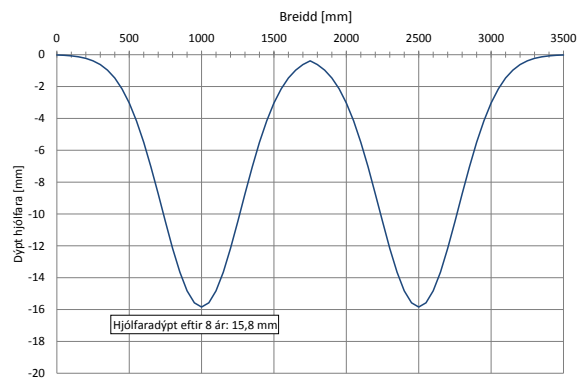
2 ár



4 ár

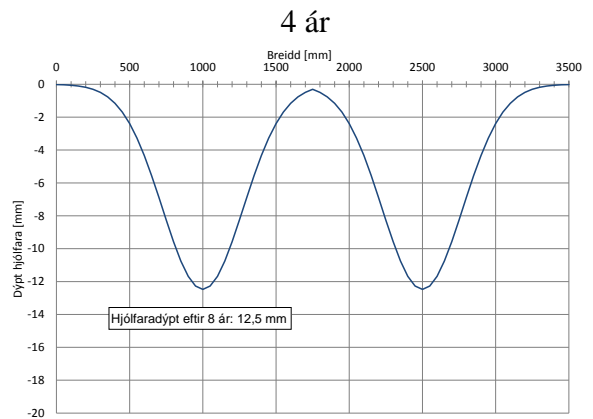
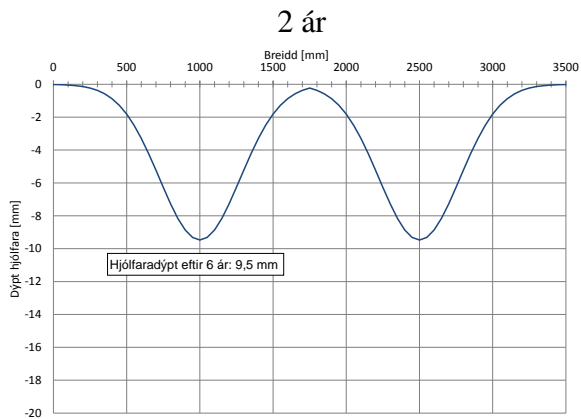
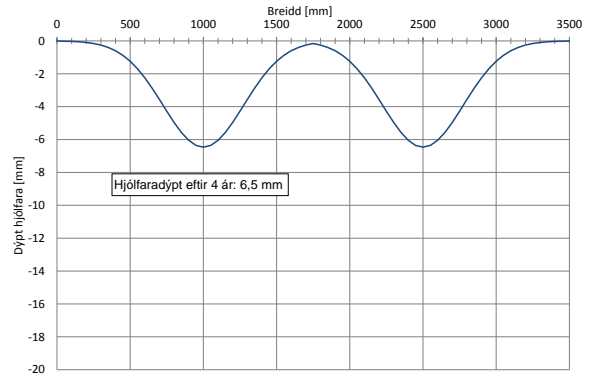
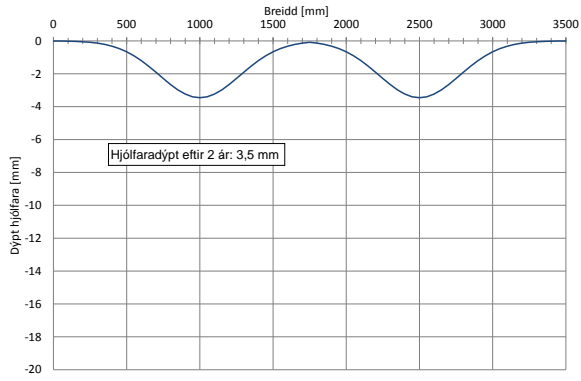


6 ár



8 ár

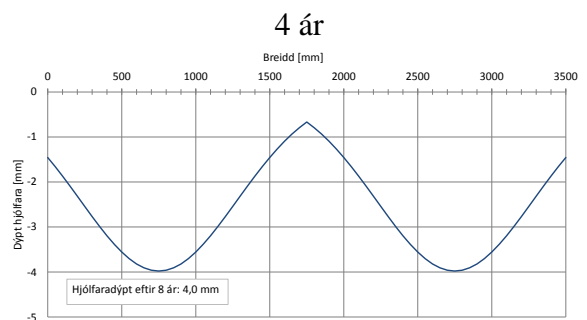
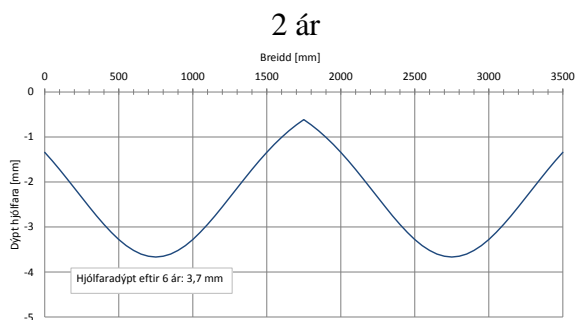
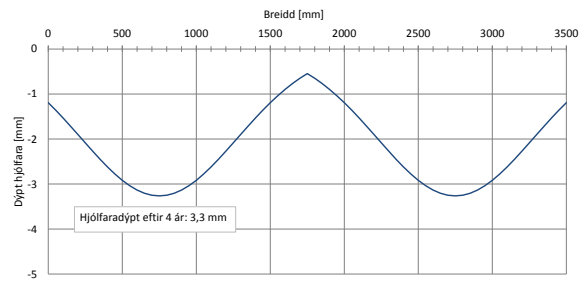
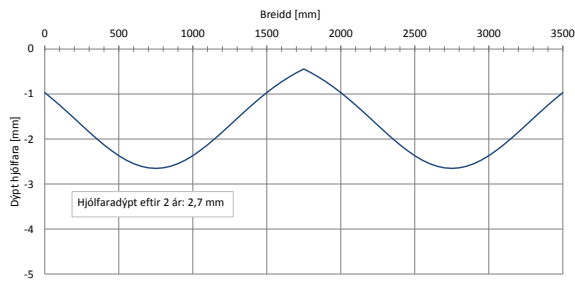
Mynd E-1 Reiknaðir hjólfaraprófílar fyrir slit eftir 2, 4, 6 og 8 ára slit fengir með kúlnakvarnargildi.



6 ár

8 ár

Mynd E-2 Hjólfaraprófilar eftir 2, 4, 6 og 8 ára slit fengnir út frá Prallgildi.



6 ár

8 ár

Mynd E-3 Hjólför vegna deigra formbreytinga.