

Viðauki 8: Ítarefni um malbik

Efni	Bls.
Fróðleikur um bindiefni til vegagerðar.....	2
Val á bindiefni, hart eða mjúkt?.....	11
Áhrif bindiefnisinnihalds á eiginleika malbiks	14
Tillaga að mörkum fyrir bindiefnisinnihald	16
Sáldurferlar og markalínur fyrir malbik.....	18
Um skrið í íslensku malbiki	20
Fróðleikur um festu og sig.....	25
Holrýmd í burðarlagsmalbiki.....	29
Fróðleikur um holrýmd og þjöppunarhlutfall	31
Þjöppunarkröfur fyrir malbik	34
Holrýmd í steinefni og fyllt holrýmd	36
Fróðleikur um viðloðun og viðloðunarpróf.....	37
Fróðleikur um rúlluflöskupróf.....	40
Vatnsnæmi malbiks	42
Um áhrif salts á þreytuþol malbiks.....	44
Hemlunarviðnám.....	47
Bindiefnisslíkja á slitlögum og áhrif hennar á hemlunarviðnám.....	49
Fáein orð um eftirlit	50

FRÓÐLEIKUR UM BINDIEFNI TIL VEGAGERÐAR

1. Inngangur

Uppruni og samsetning. Öll bindiefni (hér er átt við bikbindiefni, þótt fleiri gerðir bindiefna séu notaðar í vegagerð, svo sem sement) sem nú eru notuð hérlendis eru unnin úr jarðolíu (crude oil), en hún er að stofni til lífrænar leifar sem hafa ummyndast djúpt í jörðu á afar löngum tíma við hentug skilyrði, sem fyrst og fremst eru mikill þrýstingur og hitastreymi frá iðrum jarðar. Áður fyrr var einnig notuð tjara (tar)¹ en það er allt annað efni, unnið úr steinkolum. Hún er talin geta valdið krabbameini og notkun hennar hérlendis var hætt fyrir mörgum áratugum.

Jarðolía hentar misvel til framleiðslu á jarðbiki eftir því hvaðan hún er; eiginleikar jarðbiks (bitumen) og gæði fara að nokkru leyti eftir uppruna jarðolíunnar. Hérlendis eru fyrst og fremst notuð bindiefni sem eru unnin úr jarðolíu frá Suður-Ameríku (Venesúela) eða Mið-Austurlöndum. Jarðbik er aukaafurð í olíuöðnaðinum; í stórum dráttum er jarðbik það sem eftir verður af jarðolíunni þegar búið er að eima úr henni hráefni í rokgjarnari og verðmætari vörur, svo sem ýmsar gastegundir, bensín, steinolú, dísilolú og smurolú.

Uppistaðan í jarðbiki er kolefni (82-88 %), vetni (8-11 %), brennisteinn (0-6 %), og auk þess lítilræði af öðrum frumefnum. Samsetningin er breytileg eftir uppruna og getur líka tekið breytingum í framleiðsluferlinu og sömuleiðis á notkunartíma jarðbiksins, m. a. fyrir áhrif sólarljóss og súrefnis í andrúmsloftinu.

Jarðbik og ýmsar afurðir þess eru ekki aðeins notaðar í vegagerð, heldur einnig til fjölmargra annarra hluta, þ. á. m. í landbúnaði, byggingaframkvæmdum, í vatnsvörnum ýmskonar, iðnaði og íþróttamannvirkjum.

Í þessum pistli er fjallað stuttlega um bikbindiefni sem eru notuð í vegagerð hérlendis, þ. e. jarðbik, þjálbik, þunnbik, froðubik og breytt bindiefni.

Hráefni og framleiðsla. Bikbindiefni, sem eru notuð í vegagerð, eru nánast eingöngu framleidd með eimingu á jarðolíu. Þá er jarðolían hituð upp í 300-350 °C svo hún verður að blöndu af gufu og vökva, síðan er hún leidd inn í svokallaðan eimingarturn. Þar skilst jarðolían sundur í eimingarhluta eftir suðumarki, léttustu hlutarnir svo sem gastegundir og brennsluolíur setjast fyrir ofan til í turninum en eimingarleifin verður eftir á botninum. Eimingarleifin, sem er blanda af jarðbiki og þungum olíum, er svo eimuð á nýjan leik. Þá fæst m. a. hið eiginlega jarðbik og eiginleikum þess má stýra að nokkru marki með aðstæðum við eiminguna, svo sem hitastigi og þrýstingi. Jarðbik má síðan blanda aftur með mismunandi eimingarhlutum eða öðrum efnum til að framleiða ýmsar aðrar gerðir bindiefna; þungum olíum til að fá þjálbik (fluxed bitumen), rokgjörnum þynni til að framleiða þunnbik (cutback), eða þeyta saman við vatn til að framleiða bikþeytu (emulsion).

2. Helstu gerðir bindiefna

Jarðbik. Af jarðbiki (líka kallað stungubik) eru til allmargar gerðir sem eru flokkaðar eftir stífni þeirra, nánar tiltekið stungudýpt. Sem stendur eru eingöngu notaðir tveir flokkar hérlendis, jarðbik með stungudýpt 160/220, sem er algengast, og jarðbik með stungudýpt 70/100 sem er stífara en mun minna notað. Til tals hefur komið að taka tvo aðra flokka í notkun, 50/70 og 100/150. Jarðbik er notað í malbik sem er algengasta slitlagsgerðin í þéttbýli

¹ Bindiefnið í íslensku malbiki er stundum kallað tjara, en það er ekki réttnefni, réttara er að nota orðið jarðbik eða bik. Svipaður nafnaruglingur er þekktur erlendis. Orðið bik getur líka valdið misskilningi, því orðið malbik (blanda af jarðbiki og steinefni) er oft stýtt í bik í daglegu tali.

Enska orðið „asphalt“ hefur mismunandi merkingu eftir því hvar það er notað. Í Evrópu er „asphalt“ notað um blöndu af bikbindiefni (sem þar er kallað „bitumen“) og steinefni, en í Norður-Ameríku merkir „asphalt“ jarðbik, unnið úr jarðolíu.

og sem hráefni í þunnbik og bikþeytur. Jarðbik má blanda úr tveim mismunandi stífum gerðum til að fá millistig.

Þunnbik. Það er blanda af jarðbiki, og þynni sem getur verið af ýmsum gerðum. Hérlendis er þunnbik oftast nær gert úr jarðbiki af gerðinni 160/220 með 8-11 % lakkbensín (white spirit) sem þynni og er eingöngu notað í klæðingar. Algengast er að þynnirinn sé 9 % af blöndunni og þá fæst þunnbik sem tilheyrir 5. flokki í flokkunarkerfi prEN 15322 hvað seigju varðar (3. flokki ef miðað er við hlutfall þynnis). Í kaldri veðráttu (á haustin) er hlutfall þynnisins aukið í allt að 11 % en annars er reynt að halda hlutfallinu niðri vegna mengunar frá þynninum. Vonir standa til að hlutfall þynnisins megi minnka enn frekar, jafnvel niður í 6 %. Þar til fyrir nokkrum árum var þunnbik í klæðingar af gerðinni BL 1500 R, sem er blanda af 160/220 og 13-14 % af lakkbensíni. Miðað við seigju svarar þetta þunnbik til 4. flokks í flokkunarkerfi prEN 15322. Notkun þess hefur nú verið hætt vegna mengunar sem fylgir því.

Þjálbik. Það er afbrigði af þunnbiki; þá er jarðbik þynnt með olíum sem gufa hægt upp eða alls ekki, til dæmis svokölluðum þungum olíum, unnum úr jarðolíu og jurtaolíum. Hérlendis hefur þjálbik verið notað í klæðingar, en hingað til aðeins í tilraunaskyni. Bestur árangur hefur náðst með 7,5 % af síaðri repjuolíu á móti 92,5 % af jarðbiki, 160/220. Sem stendur er ekki ljóst hvaða flokki þetta bindiefni tilheyrir skv. prEN 15322, til þess vantar mælingar á eiginleikum þess. Ein gerð þjálbiks er vegolía, bindiefni sem var blandað úr jarðbiki (160/220), svartolíu, þotuelsneyti og lakkbensíni en á hvergi heima í flokkunarkerfi prEN 15322. Þetta bindiefni var fyrr á árum notað í olíumöl, en klæðingar hafa löngu leyst hana af hólmi nema í undantekningartilvikum.

Bikþeyta. Hún er blanda af jarðbiki, oftast með stungudýpt á bilinu 100-250 (hérlendis er algengast að nota 160/220), og vatni, ásamt ýruefnum (emulgators) sem gera kleift að blanda þessu tvennu saman. Tilgangurinn er að þynna bindiefnið án þess að hita það mikið eða blanda það með mengandi efnun. Hlutföllum bindiefnis og vatns má breyta innan vissra marka og sömuleiðis má breyta eiginleikum bikþeytunnar með íaukum, svo sem þynni af einhverju tagi, gerð ýruefnanna og fjölliðum. Með þessu móti má búa til óteljandi gerðir af bikþeytum og haga eiginleikum þeirra eftir aðstæðum þar sem á að nota þær hverju sinni. Bikþeyta er þeirrar náttúru að þegar hún blandast steinefnum, þá hlaupa bikdroparnir saman en vatnið skilst frá og gufar upp eða rennur í burtu eftir aðstæðum.

Öll bikþeyta sem er notuð hérlendis er blönduð innanlands og henni má í stórum dráttum skipta í fjóra flokka.

Til festunar og í kaldblandað malbik. Þessi bikþeyta sem inniheldur um 60 % jarðbik og er að jafnaði um 70 % af bikþeytuframleiðslunni (1000-1600 tonn af blandaðri bikþeytu á ári). Þessi bikþeyta er notuð til að festa burðarlög samhliða fræsun, í kaldblandað malbik sem er notað til breikka slitlög út á axlir, til viðgerða á slitlagsköntum og til að rétta af slitlög sem hafa aflagast einhverra hluta vegna.

Bindiefni í Ralumac (sem er blanda af bikþeytu og fremur fíngerðu steinefni). Um 60 % þessarar bikþeytu er jarðbik og í henni er einnig lítið eitt af þynni (um 1%). Ársnotkunin er 100-350 tonn. Ralumac er notað í grunnar afréttingar undir nýtt slitlag, í þunnar yfirlagnir á axlir og talsvert í viðhald á flugbrautum.

Límefni. Þessi bikþeyta er notuð til límingar milli malbikslaga og jarðbiksinnihaldið er um 50 %. Ársnotkunin er 100-150 tonn.

Bikþeyta í klæðingar. Bikþeyta hefur aðeins verið notuð í klæðingar í tilraunaskyni. Hlutfall jarðbiks í þessari bikþeytu er um 70 %. Undanfarin ár hefur notkunin verið 100-150 tonn (engin árið 2007) en árangurinn hefur verið misjafn og að svo stöddu er óvíst um framhaldið.

Froðubik er ekki sérstakur flokkur bikbindiefna heldur jarðbik eða þjálbik sem er hitað upp í 160 °C eða meira og blandað með vatni rétt áður en því er blandað saman við steinefni. Við það freyðir bindiefnið svo að rúmmál þess eykst 15- til 20-falt í stutta stund, og á meðan er

auðvelt að blanda því saman við steinefnið. Hérlendis er froðubik fyrst og fremst notað til festunar á burðarlögum.

Breytt bindiefni. Það eru hefðbundin bindiefni að stofni til en saman við þau er blandað íaukum sem breyta eiginleikum þeirra, oft þannig að þau þola þunga umferð og langvinna sumarhita betur en ella. Þeim eru gerð nánari skil í sérstökum kafla.

3. Hitastig við geymslu og dælingu

Bindiefni eru sum afar seigfljótandi við stofuhita en mýkjast ávallt með hækkandi hitastigi. Hins vegar er óheppilegt að hita þau meira en nauðsyn krefur, bæði vegna hættu á íkveikju og sömuleiðis geta þau skemmst ef hitastigið er hátt, sér í lagi við langvarandi upphitun og í snertingu við andrúmsloft. Meginreglan er sú að bindiefni skuli geyma og meðhöndla við lágsta hitastig sem samrýmist árangursríkri notkun, svo ekki sé hætta á sjálfkveikju (auto ignition) eða skemmdum.

Þegar jarðbik er geymt óhreyft í tönkum langtímum saman, er rétt að lækka hitastigið niður í sem svarar 20-25 °C yfir mýktarmarki jarðbiksins (sem er mismunandi eftir gerð þess).

Tafla 1 sýnir hitastig fyrir ýmsa meðhöndlun nokkurra bindiefnisgerða. Að jafnaði er heppilegt hitastig fyrir dælingu 10-50 °C hærra en lágmarkið sem tilgreint er í töflunni. Við notkun þarf oft að hita þunnbik upp fyrir blossamark, m.ö.o. getur opinn eldur kveikt í gufum frá því. Þess vegna verður að sýna fyllstu aðgætni við vinnu með þunnbik.

Tafla 1. Leiðbeinandi hitastig fyrir meðhöndlun nokkurra bikbindiefna.

Gerð bindiefnis	Dæling ² , lágmark, °C	Dæmigert hitastig fyrir	
		Blöndun ³ , °C	Útsprautun ⁴ , °C
<i>Jarðbik</i>			
50/70	115	165	-
70/100	110	160	-
100/140	105	155	190
160/220	100	140	175
<i>Þunnbik og þjálbik</i>			
Flokkur 3	20	45	80
Flokkur 4	65	90	140
Flokkur 5	70	100	150
Flokkur 6	75	105	155
Flokkur 7	80	115	160
Flokkur 8	85	120	170
Flokkur 9	95	130	175

Bikþeytur eru að jafnaði geymdar við 10-85 °C eftir gerð þeirra, hvatar (rapid) bikþeytur við hærra hitastig en tregar (slow). Þær mega ekki frjósa (þá er hætta á að þær hlaupi) og hærra hitastig en 85 °C er óheppilegt vegna uppgufunar vatns og seigjuaukningar sem þá fylgir í kjölfarið. Hitunarfleti (spírala o. þ. h.) má mest hita í 96 °C.

² Miðað við að seigjan sé ekki meiri en 2000 cSt (2 Pa.s).

³ Miðað við að seigjan sé kringum 200 cSt (0,2 Pa.s).

⁴ Miðað við að seigjan sé kringum 30 cSt (0,03 Pa.s).

4. Varúðarráðstafanir

Ef varúðarreglum um meðferð bindiefna er fylgt, stafar lítil eða engin hættu af þeim, en vanræksla getur orðið afdrifarík. Mörg bindiefni eru hituð í meira en 100 °C við notkun, svo af þeim getur hlotist gufusprenging ef þau komast í snertingu við vatn. Snerting við heitt bindiefni getur valdið brunasárum, eins þótt hitastigið sé langt undir 100 °C (fimm mínútur í 50 °C heitu vatni valda brunasári á húð). Í gufum frá bindiefnum geta verið eiturefni sem geta valdið heilsuspjöllum við innöndun, svo sem brennisteinsvetni (H₂S). Sama er að segja um gufur frá ýmis konar íaukum; sem dæmi má nefna þynni í þunnbiki, ýruefni (emulgators) og viðloðunarefni. Í sumum tilfellum eru hættuleg efni notuð við rannsóknir á bindiefnum eða malbiki. Styrkur krabbameinsvaldandi efna er mjög lágur í bindiefnum úr jarðbiki og þau eru ekki talin krabbameinsvaldandi ef settum varúðarreglum er fylgt.

Við vinnu með heitt bindiefni þarf að nota tilheyrandi hlífðarföt, sér í lagi hitaþolna hanska með líningum sem falla þétt að ermum svo að bindiefni renni ekki ofan í þá fyrir slysi, hlífðargleraugu, andlitshlífar og samfesting.

Ef heitt bik slettist á hörund á að kæla staðinn með rennandi vatni í minnst 10 mínútur, en alls ekki reyna að ná bikinu af nema það sé laust, og leita læknis sem fyrst. Þegar bikið er orðið kalt gerir það engan frekari skaða og virkar sem dauðhreinsaðar umbúðir þar til það losnar sjálfkrafa af, venjulega eftir fáeina daga.

Þynnir í þunnbiki getur verið mjög eld- og sprengifimur og þess vegna þarf að fara mjög varlega með opinn eld þar sem unnið er með heitt þunnbik. Vatn er ekki heppilegt til að slökkva eld í jarð- eða þunnbiki, duft eða froða er heppilegri.

5. Flokkunarkerfi fyrir bikbindiefni

Upplýsingar um flokkunarkerfin sem hér er lýst eru ýmist sóttar í staðla (ÍST-EN) eða frumvörp að stöðlum (prEN). Flokkunarkerfi þessara staðla fyrir þunnbik og bikþeytur eru mikið breytt frá flokkunarkerfunum sem hafa tíðkast fram til þessa.

Jarðbik er auðkennt með stungudýpt og er flokkað eftir henni (í BNA er flóknara flokkunarkerfi, kennt við Superpave, tekið að ryðja sér til rúms). Stungudýpt segir til um hversu djúpt nál af tiltekinni gerð sekkur í sýni af jarðbiki undir tilteknum kringumstæðum. Því minni sem stungudýptin er þeim mun stífara (harðara) er bikið. Ein eining á stungudýptarmælikvarðanum er 1/10 úr mm, stundum skammstafað dmm. Dæmi; 160/220 táknar jarðbik með stungudýpt á bilinu 160-220 dmm (þ. e. 16-22 mm).

Þunnbik er auðkennt með sex stafa kerfi⁵. Í fyrstu tveim sætunum eru Fm eða Fv (eftir því hvort bikið er þynnt (F) með þynni úr jarðolíu (m) eða jurtum (v)). Í þriðja sætinu er tölustafur á bilinu 2-9 og hann segir til um seigju þunnbiksins. Í fjórða og fimmta sæti eru bókstafir, B í því fyrra sem táknar jarðbik, P í því síðara ef bindiefnið er breytt (modified). Í sjötta sæti er tölustafur. Ef þynnirinn er unninn úr jarðolíu er tölustafurinn á bilinu 2-6 og segir hversu mikið af þynninum gufar upp við 225 °C. Ef þynnirinn er jurtaolía er tölustafurinn á bilinu 27 og vísar til mýktarmarks eimingarleifarinnar (eftir eimingu við 360 °C). Dæmi; Fm 5 B 6 táknar þunnbik (F) með miðlungs seigju (5), gert úr jarðbiki (B) þynntu með þynni úr jarðolíu (m) og 60 % hans gufa upp við eimingu við 225 °C.

Bikþeyta er auðkennd með sjö stafa kerfi. Í fyrsta sætinu er bókstafur sem sýnir hleðslu bikþeytunnar, C táknar jákvætt hlaðna bikþeytu. Í öðru og þriðja sæti er tala sem sýnir hversu mikill hluti (í %) af bikþeytunni er virkt bindiefni (60 % er algengt). Í fjórða sæti (og næstu tveim sætum ef þörf krefur) eru bókstafir, einn eða fleiri. Í fjórða sætinu er B, sem táknar jarðbik. Ef jarðbikið er breytt (með fjölliðum) kemur bókstafurinn P þar á eftir, og síðan bókstafurinn F (annar hvor eða báðir eftir atvikum) ef meira en 2 % af bikþeytunni er þynnir. Í

⁵ Þessi auðkenning er tekin úr frumvarpi að staðli, prEN 15322:2005 sem hefur ekki öðlast fullgildingu. Hún er mikið breytt frá fyrri aðferðum til að auðkenna þunnbik.

fimmta, sjötta eða sjöunda sæti (eftir því hversu mörg sæti hafa verið notuð áður) er tala á bilinu 1-7 sem lýsir hleypieiginleikum bikþeytunnar. Dæmi; C65 BF 3 er jákvætt hlaðin bikþeyta (C) sem er að 65 hundradshlutum úr jarðbiki, blönduð þynni sem vegur meira en 2 % af þyngd bikþeytunnar og hefur hleypieiginleika samkvæmt 3. flokki.

6. Notagildi og eiginleikar

Jarðbik. Það er að langmestu leyti notað í malbik, sem er blandað í malbikunarstöð, flutt heitt (kringum 160 °C) á bílum á útlagnarstað þar sem það er lagt út í hæfilegri þykkt í þar til gerðum vélum. Sem stendur eru aðeins tvær gerðir jarðbiks notaðar hérlendis, B70/100 og B160/220, í daglegu tali kallaðar hart og mjúkt bik. Fyrirnefnda gerðin er stífari (harðari) en sú síðarnefnda. Þessum tveim gerðum má, ef vill, blanda saman til að fá bindiefni með stífni þarna á milli, en það hefur þó ekki verið gert.

Malbik með B70/100 sem bindiefni er fyrst og fremst notað þar sem umferð er mikil og þung (stofnbrautir á höfuðborgarsvæðinu) á hafnarbakka og á staði fyrir þungavöru og gáma vegna þess að það skríður síður í miklum hita en malbik með mýkra bindiefni. B160/220 er notað þar sem umferð er minni og léttari og sem uppistaða í þunnbik og bikþeytur. Að öðru leyti hefur malbik með mjúku bindiefni ýmsa kosti fram yfir malbik með hörðu bindiefni, hið fyrirnefnda er hægt að leggja í kaldara veðri (vegna minni stífni), t. d. að hausti. Sömu leiðis hafa lítilsháttar veilur í undirbyggingu minni afleiðingar þegar mjúkt bik á í hlut vegna þess að það lagar sig fremur að missigi án þess að rifna heldur en malbik með hörðu bindiefni, sem er stökkara, einkum í kuldum. Þessi upptalning á kostum og göllum jarðbiks af mismunandi stífni er þó langt í frá tæmandi.

Malbik kólnar nægilega hratt til að hægt sé að aka á því fáeinum klukkustundum eftir útlögn.

Þunnbik. Þunnbik má blanda á fjölmarga vegu en hérlendis eru mestmegnis notaðar blöndur af 160/220 og lakkbensíni í ýmsum hlutföllum. Repjuolía hefur verið notuð sem þynnir í tilraunaskyni. Þunnbik er nánast eingöngu notað í klæðingar.

Klæðingar úr þunnbiki eru gerðar með því að sprauta heitu þunnbiki á veginn í þunnu lagi og strá steinefni ofan í það strax á eftir. Þunnbikið kólnar mjög hratt og þess vegna er hægt að aka á klæðingum nánast strax og þær hafa verið lagðar. Þynnirinn (lakkbensín) er mjög rokgjarn og gufar upp að mestu, hraðast fyrst, og það sem eftir verður er mestmegnis jarðbik.

Klæðingum úr þunnbiki hættir til að bláða í heitu veðri, og stundum þegar rignir í þær nýlagðar og umferð er mikil. Af þessari ástæðu eru þær nær eingöngu notaðar utan þéttbýlis, þótt dæmi séu um viðunandi reynslu af þeim á húsagötum.

Bikþeyta. Bikþeyta er blanda af vatni og örsmáum bikdropum sem eru asettir rafhleðslum. Rafhleðslurnar meina bikdropunum að sameinast, því þær hrinda hver annarri frá sér. Þegar bikþeyta blandast steinefni afhlaðast bikdroparnir að meira eða minna leyti fyrir áhrif rafhleðslna á yfirborði steinefnisins. Við það dragast bikdroparnir hver að öðrum en vatnið í bikþeytunni skilst frá, bikþeytan hleypur (brotnar) og þekur steinefnið með bindiefnishimnu. Hversu hratt þetta gerist má stýra með samsetningu bikþeytunnar, en hlaupin bikþeyta nær mjög fljótt endanlegri stífni.

Vegna vatnsins þolir bikþeyta hvorki frost né herra hitastig en 90 °C fyrr en hún hefur hlaupið. Þar eð bikþeyta er vatnsleysanleg getur hún skolast af steinefninu í mikilli úrkomu ef hún nær ekki að hlaupa áður. Þunn bikþeyta sem hleypur treglega getur líka runnið af steinefninu að einhverju leyti áður en hún hleypur og kemur þá ekki að fullu gagni.

Hérlendis eru notaðar fjórar gerðir af bikþeytu, allar jákvætt hlaðnar (cationic). Ein er notuð í kaldblandað malbik, önnur til límingar þegar nýtt slitlag er lagt ofan á gamalt, sú þriðja í Ralumac sem er þunn klæðing úr smágerðu steinefni og sú fjórða í klæðingar úr hefðbundnu steinefni. Ralumac hefur lítið slitþol gagnvart negldum hjólbörðum vegna þess hve smágerð steinefnið er.

Tilraunir með bikþeytuklæðingar hafa heppnast misjafnlega hérlendis. Eitt aðalvandamálið er steinlos, oftast á fyrsta vetri, en skemmdir eru litlar eftir það. Einhlikt skýring hefur ekki fundist. Af tilgátum má nefna ryk á steinefnum, hitastig (veður) framleiðsla bikþeytu o. fl.

7. Prófanir á bindiefnum

Jarðbik, sem er uppistaðan í bikbindiefnum, er mjög flókið efni sem auk þess hefur mismunandi eiginleika eftir því hvaðan jarðolían er. Þar við bætist að með blöndun með öðrum efnum, bæði skyldum efnum úr jarðolíu og öðrum óskyldum (jurtaolíu, íaukum) má framleiða nánast óteljandi gerðir bindiefna með afar fjölbreytilegum eiginleikum. Af þessari ástæðu er nauðsynlegt að flokka bikbindiefni eftir eiginleikum þeirra svo að notendur geti valið úr þeim í samræmi við fyrirhugaða notkun. Í þessu skyni eru bindiefni prófuð á ýmsa vegu með stöðluðum aðferðum og flokkuð í samræmi við niðurstöðurnar.

Kröfur til bindiefna og sömuleiðis prófunaraðferðir eru staðlaðar. Hérlendis, eins og víðast hvar í Evrópu, gilda staðlar ÍST EN, en í BNA gilda staðlar kenndir við ASTM. Þar hefur undanfarin ár verið unnið að nýjum aðferðum til að prófa bindiefni og flokka þau eftir frammistöðu (performance)⁶. Nokkrar líkur eru á að þessi þróun muni einnig hafa áhrif á stöðlun bindiefna í Evrópu þegar fram líða stundir (prEN 12591rev).

Hér er jarðbik keypt erlendis frá í skipsförmum og þeim fylgir vottorð um gerð og eiginleika farmsins. Þunnbik og bikþeytur eru á hinn bóginn nær eingöngu blandaðar innanlands. Prófanir á bindiefnum eru æskilegar svo að vissa sé fyrir því að framleiðslan henti til fyrirhugaðrar notkunar.

Hér á eftir er tæpt á nokkrum prófunaraðferðum sem eru mikilvægar fyrir bindiefni. Þeim er lýst í stöðlum ÍST EN eða frumvörpum til þeirra. Ennfremur er drepíð á upplýsingar sem þær gefa um eiginleika bindiefnanna. Upptalningin er langt í frá tæmandi.

Prófanir á jarðbiki. Þessi kafli um prófanir á jarðbiki er að hluta til byggður á prEN 12591rev sem er tillaga að endurskoðun á áður útkomnum staðli, ÍST EN 12591:1999. Tillagan er í formlegri atkvæðagreiðslu þegar þetta er skrifað (september 2007) en yfirgnæfandi líkur eru á að hún verði samþykkt óbreytt.

Stungudýpt mælir hversu djúpt nál af tiltekinni gerð sekkur í sýni af bindiefni undir tilteknum kringumstæðum og er mælikvarði á stífni þess. Mælieiningin er 1/10 mm, stundum skrifuð dmm. Stungudýptin minnkar með vaxandi stífni bindiefnisins, en hún er meðal annars tengd líkum á skriði í malbiki. Prófunarstaðall: ÍST EN 1426.

Mýktarmark mælir svörun bindiefnis við hækkandi hitastigi. Með hækkandi hitastigi breytist jarðbik úr mjög þykkfljótandi efni í þunnfljótandi en hefur ekki skilgreint bræðslumark, og mýktarmark er eins konar staðgengill fyrir bræðslumarkið. Prófið felst í að koma stálkúlu fyrir á sneið af bindiefni sem er fest á jöðrunum í upphengdan ramma og hvorutveggja er komið fyrir í vökva sem er hitaður upp. Með hækkandi hitastigi myndar kúlan dæld í sneiðina og teygir smám saman á henni svo að hún verður að poka. Þegar hann hefur náð tiltekinni dýpt er hitastig vökvans mælt (í °C) og er nefnt mýktarmark. Það kemur m. a. að notum til að meta hættu á skriði í malbiki í hitum. Prófunarstaðall: ÍST EN 1427.

Seigja. Hún er mælikvarði á rennslistregðu bindiefnisins og er mæld við tvö hitastig, 60 °C (prófunarstaðall ÍST EN 12596) og við 135 °C (prófunarstaðall ÍST EN 12595). Þessar tvær mælingar eru notaðar til að finna hvernig seigja bindiefnisins breytist með hitastigi, m. a. til að ákveða hversu mikið þurfi að hita bindiefnið til að dæla því, blanda saman við steinefni eða hversu heitt malbik þarf að vera til að hægt sé að þjappa (valta) það.

Brotmark. Þessari prófun er ætlað að kanna hegðun bindiefnisins við mjög lágt hitastig. Þunnu lagi af bindiefni er roðið á stálþynnu og hún beygð lítilliga og rétt til skiptis og jafnframt er hitastigið umhverfis hana lækkað hægt og bítandi. Hitastigið, þegar bindiefnislagið er orðið svo stökkt að það rifnar, nefnist brotmark og er mælikvarði á lægsta notkunarhitastig

⁶ Sjá til dæmis The Asphalt Institute. 2003. *Superpave. Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing*. Superpave Series No. 1 (SP-1) Third Edition, Revised 2003,

bindiefnisins, til dæmis í malbiki sem á að þola hörð og langvarandi frost. Prófunarstaðall: ÍST EN 12593.

Leysanleiki. Þetta próf sýnir hversu mikið af bindiefninu leysist ekki upp í toluen⁷; er með öðrum orðum fast efni sem ekki nýtist sem bindiefni. Prófunarstaðall: ÍST EN 12592.

Blossamark. Prófið mælir hitastig bindiefnisins þegar gufa frá því er nægileg til að opinn eldur kveikir í henni og er mælikvarði á það hversu mikið má hita bindiefnið án þess að hætta sé á íkveikju. Þetta hitastig hækkar eftir því sem stungudýptin lækkar. Prófunarstaðall: ÍST EN ISO 2592.

Þyngdartap við upphitun. Þyngdartapið gefur til kynna hvort bikið sé blandað rokgjörnum efnunum. Prófunin felst í að vikta sýni með tiltekinni þyngd fyrir og eftir upphitun við tilteknar aðstæður. Að upphitun lokinni má nota sýnið til frekari rannsókna. Niðurstöður prófana á sýni eftir upphitun (svo sem stungudýpt, mýktarmark og brotmark) eru að sumu leyti raunhæfari mælikvarði á eiginleika bindiefnisins eftir blöndun saman við steinefni í malbikunarstöð. Prófunarstaðall: ÍST EN 12607-1.

Prófanir á þunnbiki. Þessi kafli er að hluta til byggður á prEN 15322 sem er tillaga að staðli um kröfur til þunnbiks. Tillagan er enn á frumvarpsstigi og verulegar líkur á að hún muni taka einhverjum breytingum áður en hún tekur gildi sem staðall.

Seigja. Hún er mælikvarði á rennlistregðu þunnbiksins og er mæld við mismunandi hitastig, 25-60 °C, eftir því hvaða seigjuflokkur á í hlut. Mælingin felst í því að láta tiltekið magn af þunnbiki renna í gegnum op með tiltekinni lögun og mæla tímann (í sekúndum) sem það tekur. Seigjan skiptir m. a. máli fyrir val á þunnbiki í klæðingar, ef hún er lítil er viss hætta á að þunnbikið renni af steinunum sem það á að binda saman og komi þannig að takmörkuðu gagni. Seigjan má heldur ekki vera of mikil því þá er hætt við að steinefnið sökki ekki nægilega í bindiefnislagið áður en það kólnar um of. Prófunarstaðall: ÍST EN 13357.

Leysanleiki. Þetta próf sýnir hversu mikið af þunnbikinunni leysist ekki upp í toluen; er með öðrum orðum fast efni sem ekki nýtist sem bindiefni. Prófunarstaðall: ÍST EN 12592.

Blossamark. Prófið mælir hitastig bindiefnisins þegar gufa frá því er orðin nægileg til að opinn eldur kveikir í henni og er mælikvarði á það hversu mikið má hita bindiefnið án þess að hætta sé á íkveikju. Prófunarstaðall: ÍST EN ISO 2719.

Stigeiming. Hún gefur upplýsingar um það hversu rokgjarn þynnirinn í bindiefninu er, þ. e. hversu hratt þunnbikið storknar. Sýni af bindiefninu er hitað í þrepum (í 190 °C, 225 °C, 260 °C, 315 °C og að lokum í 360 °C) og mælt hversu mikið af þynni hefur gufað upp við hvert þrep. Prófunarstaðall: ÍST EN 13358.

Eimingarleifin (það sem eftir verður þegar sýnið hefur verið hitað í 360 °C) er í sumum tilfellum prófuð frekar til að afla upplýsinga um eiginleika bindiefnisins eftir að þynnirinn hefur gufað upp. Í sumum tilfellum er eimingarleifin undirbúin frekar fyrir prófun, t. d. með festun (stabilization) eða öldrun (ageing) eða hvorutveggja. Meðal prófana á eimingarleif má nefna stungudýpt (ÍST EN 1426), mýktarmark (ÍST EN 1427) og seigju (ÍST EN 12595 eða ÍST EN 12596). Ef þunnbikið tilheyrir breyttum bindiefnum koma aðrar prófunaðferðir til álita.

Prófanir á bikþeytum. Þessi kafli er að mestu byggður á ÍST EN 13808 og stöðlum sem þar er vísað til.

Seigja. Hún er mælikvarði á rennlistregðu bikþeytunnar (óhlaupinnar) og er ýmist mæld við 40 °C eða 50 °C, eftir því hvaða flokkur á í hlut. Mælingin felst í því að láta tiltekið magn af bikþeytu renna í gegnum op með tiltekinni lögun (sem er breytileg eftir flokkum) og mæla tímann sem það tekur. Seigjan skiptir m. a. máli fyrir val á bikþeytu í klæðingar; ef hún er lítil er viss hætta á að bikþeytan renni af steinunum sem hún á að binda saman, áður en hún hleypur og komi þannig að takmörkuðu gagni. Sömuleiðis skiptir seigjan máli þegar bikþeytu er dreift með údadreifara, (spray bar), t. d. þegar hún er notuð til límingar. Prófunarstaðall: ÍST EN 12846, í undantekningartilfellum ÍST EN 14896.

⁷ Toluene (C₇H₈) er eitt af uppistöðuefnunum í bensíni, litlaus vökvi, sem meðal annars er notaður í stórum stíl í efnaíðnaði og til að leysa upp eða þynna önnur efni.

Eimingarleif. Prófið er gert til að mæla hlutfall virks bindiefnis í bikþeytunni (sem oftast er á bilinu 40-70 %). Prófunarstaðall: ÍST EN 1428 (eiming rétt undir suðumarki vatns) eða ÍST EN 1431 (sýnið hitað í 260 °C svo að þynnir með lægra suðumark en þetta gufar upp auk vatnsins). Síðarnefndu aðferðinni er beitt þegar á að nota eimingarleifina til að mæla eiginleika jarðbiksins í bikþeytunni, svo sem stungudýpt (ÍST EN 1426), mýkingarmark (ÍST EN 1427), seigjumæling (ÍST EN 13357, ÍST EN 12596 eða ÍST EN 12595) svo þau mikilvægustu séu nefnd.

Hleypistuðull. Þetta gildi (breaking value) er mælt með því að blanda bikþeytuna með mælu. Út í tiltekið magn af bikþeytu er blandað vissri tegund af mælu með jöfnum hraða þar til bikþeytan hefur hlaupið að fullu. Mélumagnið sem hlutfall af bikþeytumagninu er mælikvarði á það hversu hratt bikþeytan hleypur (brotnar) eftir að henni hefur verið dreift eða blandað saman við steinefni. Þessi eiginleiki skiptir miklu máli fyrir notkun bikþeytunnar; ef bikþeyta hleypur treglega tekur að sama skapi langan tíma áður en hægt er að hleypa umferð á slitlag úr bikþeytu, t. d. klæðingu. Ef bikþeytan hleypur of hratt getur farið svo að ekki náist að blanda bikþeytu og steinefni nægilega vel saman áður en hún hleypur. Af sömu ástæðu getur malbik úr bikþeytu hlaupið áður en það hefur verið lagt út. Prófunarstaðall: ÍST EN 13075-1.

Sigtileif. Prófið gefur vísbendingar um ástand bikþeytu eftir geymslu í tiltekinn tíma. Þá er kannað hvort bikdroparnir í henni séu óeðlilega stórir, sem gefur til kynna að hún sé byrjuð að hlaupa umfram það sem eðlilegt getur talist. Prófið gefur einnig vísbendingar um gæði bikþeytunnar án tillits til geymslupols; ef hún stenst ekki prófið getur það bent til mistaka í framleiðsluferlinu.

Geymslupól bikþeytu er prófað með því að láta sýni standa óhreyft í mæliglasi í tiltekinn tíma, oft einn eða fimm sólarhringa. Sýnið er síðan síað á tveim siktum, annað með 0,500 mm og hitt með 0,160 mm möskvastærð. Magn bikþeytu sem verður eftir á siktunum, sem hlutfall af magninu sem hellt er á siktin, er mælikvarði á gæði bikþeytunnar. Prófunarstaðall: ÍST EN 1429.

Prófanir á froðubiki. Froðubik sem slíkt er ekki hægt að prófa vegna þess að það er ekki í freyðandi ástandi nema mjög stutta stund. Jarðbikið, sem er uppistaða í froðubikinu, er hins vegar prófað á hefðbundinn hátt.

Prófanir á breyttum bindiefnum. Við prófanir á breyttum bindiefnum eru að hluta til notaðar hefðbundnar prófunaraðferðir, en einnig prófunaraðferðir sem hafa verið þróaðar sérstaklega fyrir þau. Í ÍST EN 14023:2005 er upptalning á aðferðum til að prófa breytt bindiefni ásamt tilvísunum í viðkomandi staðla. Þar sem breytt bindiefni eru afar lítið notuð hérlendis, enn sem komið er að minnsta kosti, eru þessum prófunaraðferðum ekki gerð frekari skil gerð hér.

8. Breytt bindiefni

Aflfræðilegum eiginleikum bikbindiefna má breyta á ýmsa vegu með því að blanda þau með tilteknum íaukum (additives) sem eru ífræn efnasambönd. Þau geta verið margs konar en algengust eru gúmmíkenndir íaukar (elastomers), hitameyrir íaukar (thermoplastics) og íaukar sem eru bæði hitameyrir og gúmmíkenndir (thermoplastic elastomers). Þessir íaukar samlagast bindiefninu fullkomlega og mynda eins konar þrívítt net sem takmarkar hreyfanleika sameindanna í bindefninu. Þeim er blandað í bindiefnið í fremur litlu magni (3-10 %) og tilgangurinn er að auka þol slitlagsins gagnvart veðurfari, einkum langvarandi sumarhitum og miklum kuldu, og þungri umferð. Með þessu móti verður bindiefnið þjálla við lágt hitastig heldur en óbreytt bindiefni en um leið stífara við hátt hitastig. Þreytuþol slitlagsins eykst og því er síður hætt við að springa í frostum. Sum breytt bindiefni hafa betri viðloðun við steinefni en óbreytt bindiefni.

Breytt bindiefni eru dýrari en hefðbundin bindiefni. Þau eru notuð í nokkrum mæli erlendis, einkum á stöðum þar sem aðstæður, einkum umferð eða veðurfar, gera miklar kröfur til slitlagsins og notkun þeirra fer vaxandi. Hérlendis voru þau notuð lítið eitt í eina gerð klæðinga (Ralumac) um tíma en annars aðeins í tilraunaskyni enn sem komið er.

Algengustu flokkar íauka, sem eru notuð til að breyta bindiefnum, og áhrif þeirra eru:

Gúmmíkennir íaukar. Þessi efni eru gúmmí að stofni til, ýmist í formi dufts eða þeytu (latex) sem er blandað í bindiefnið. Þau auka sveigjanleika malbiks og vinna gegn skriði, en bráðna ekki og geta skemmst við mjög hátt hitastig. Blöndun þeirra í bindiefni getur verið erfiðleikum bundin.

Hitameyrir íaukar. Í þessum flokki eru polyetylen (PE), polypropylen (PP) og sumar gerðir etylenvinylacetats (EVA). Þau bráðna án þess að skemmast og storkna aftur þegar hitastigið lækkar. Hitameyrir íaukar draga fyrst og fremst úr líkum á skriði en hafa lítil áhrif á sveigjanleika malbiksins og þreytuþol.

Hitameyrir og gúmmíkennir íaukar. Þeir sameina eiginleika fyrrnefndu flokkanna eins og nafnið bendir til, bráðna við hátt hitastig en halda fjaðrandi eiginleikum sínum við lágt hitastig. Sum þessara efna eru talin auka slitþol malbiks gagnvart negldum hjólbörðum. Í þessum flokki eru sumar gerðir etylenvinylacetats (EVA), styren-butadien-styren (SBS) og styren-butadien-rubber (SBR).

Að lokum er rétt að taka fram að eiginleikum bindiefna má breyta á ýmsa vegu þótt ekki sé með eiginlegum íaukum eða efnasamböndum sem beinlínis er ætlað að breyta aflfræðilegum eiginleikum þeirra. Eitt dæmi eru viðloðunarefni ýmis konar sem oft er blandað í bindiefni, en það telst ekki til breyttra bindiefna, þótt viðloðunareiginleikar þess breytist. Annað dæmi er tvær gerðir jarðbiks (með mismunandi stífni) sem er blandað saman til að fá bindiefni með stífni sem liggur á milli hinna tveggja. Þunnbik má gera á marga vegu með vali á jarðbiksgerð og eins magni og gerð þynnis; þannig má breyta storknunartíma þunnbiksins og sömuleiðis eiginleikum þess hluta sem eftir verður þegar þynnirinn hefur gufað upp. Bikþeytur má gera á ótal vegu, og sníða þær eftir aðstæðum þar sem á að nota þær, svo sem með vali á jarðbiki og ýruefnum, hlutfalli vatns og jarðbiks og framleiðsluaðferð.

HEIMILDIR

- Hilliges, F. (ritstjóri). 1995. *FAS Asfaltbok*. Föreningen för Asfaltbeläggningar i Sverige. Stockholm.
- Hunter, R. N. (ritstjóri). 1994. *Bituminous mixtures in road construction*. Thomas Telford, London.
- ÍST EN 13075-1:2002. *Bitumen and bituminous binders – Determination of breaking behaviour – Part 1: Determination of breaking value of cationic bitumen emulsions, mineral filler method*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- ÍST EN 13808:2005. *Jarðbik og jarðbiksbindiefni – Grunnur til nota við skilgreiningar á jákvætt hlöðnum jarðbiksblöndum*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- ÍST EN 14023:2005. *Bitumen and bituminous binders – Framework specification for polymer modified bitumens*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- ÍST EN 1429:1999. *Bitumen and bituminous binders – Determination of residue on sieving bitumen emulsions, and determination of storage stability by sieving*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- prEN 12591rev. 2006. *Jarðbik og jarðbiksbindiefni – Eiginleikar jarðbiks til nota í slitlög*. (Á frumvarpsstigi). Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- prEN 12597rev. 2006. *Bitumen and bituminous binders – Terminology*. (Á frumvarpsstigi). Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- prEN 15322. 2005. *Bitumen and bituminous binders – Framework for specifying cut-back and fluxed bituminous binders*. (Á frumvarpsstigi). Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- Shell Bitumen. 1990. *The Shell Bitumen Handbook*. Shell Bitumen U.K. Chertsey.
- Statens vegvesen. 2005. *ASFALT 2005 – materialer og utførelse*. Håndbok 246. Oslo. <http://www.vegvesen.no/vegdekke/filer2006/Hb246-asfaltveiledning-2005-12-17.pdf>
- The Asphalt Institute. 1979. *A Basic Asphalt Emulsion Manual*. Manual Series No 19 (MS-19). Maryland.
- Wallace, Hugh A., Martin, J. Rogers. 1967. *Asphalt Pavement Engineering*. McGraw-Hill Book Company, New York.

VAL Á BINDIEFNI, HART EÐA MJÚKT?

Hérlendis hefur tíðkast að nota tvær bindiefnisgerðir, hart (70/100) og mjúkt (160/220). Fyrri gerðin er einkum notuð í malbik þar sem umferð er mikil og þung, fremur lítið þó. Annars staðar er síðarnefnda bindiefnisgerðin notuð, og einnig sem uppistaða í þunnbik fyrir klæðingar. Til tals hefur komið að tilgreina tvær aðrar bindiefnisgerðir í verklýsingum Vegagerðarinnar, mjög hart bindiefni (50/70) og millistig (100/150). Þessi pistill fjallar um kosti og galla sem slíkar breytingar myndu hafa í för með sér.

- Eftir því sem bindiefni er harðara (stungudýpt bindiefnisins er minni) minnka líkur á skriði í malbiki í miklum hitum. Jafnframt aukast líkur á sprungum í malbikinu í miklu frosti. Val á bindiefni þarf þess vegna að taka mið af líklegu hámarks- og lágmarkshitastigi í malbikinu.

Líkan Superpave [Asphalt Institute 2003, bls. 53] til að reikna út hitastig í slitlagi með hliðsjón af hnattstöðu og veðurfari gefur til kynna að í Reykjavík séu innan við 2 % líkur á að hitastig í slitlagi fari niður fyrir -14 °C eða upp fyrir 30 °C [Ásbjörn Jóhannesson 2005, bls. 26]. Samsvarandi tölur fyrir Egilsstaði eru -21 °C og 34 °C . Þessar líkur eru miðaðar við eins árs tímabil. Rétt er að taka fram að Norðmenn hafa efasemdir um að reikniaðferð Superpave eigi við þar í landi og hafa sett fram reiknilíkan sem þeir telja réttara; taka þó fram að það sé ekki byggt á traustum grunni. Ef reiknilíkan Norðmanna er notað, hækka tölur fyrir hámarkshita í malbiki um 10 °C eða þar um bil.

Tvö íslensk sýni, annað af 70/100 og hitt af 160/220, voru prófuð með aðferðum Superpave til að meta hvaða hitastig í slitlagi þau þola [Tayebali 2004]. Niðurstaðan varð sú að harðara bindiefnið (70/100) hentar við aðstæður þar sem hitastig í slitlagi fer ekki niður fyrir -26 °C og ekki upp fyrir 66 °C . Samsvarandi tölur fyrir mýkra bindiefnið (160/220) eru -30 °C og 58 °C .

Af þessum athugunum sýnist mega álykta að báðar bindiefnisgerðirnar uppfylli kröfur Superpave með tilliti veðurfars og séu meira að segja langt fyrir innan mörkin. Harðara bindiefnið þolir minnst 12 °C meira frost en búast má við í slitlagi í Reykjavík. Og hvað hámarkshitastig í Reykjavík snertir er talsvert borð fyrir báru, jafnvel þótt norska reiknilíkanið sé lagt til grundvallar (minnst 18 °C) og mýkra bindiefnið notað. Þó verður að hafa í huga að einungis tvö sýni verið prófuð með aðferðum Superpave og seigjueiginleikar bindiefnisins geta breyst þótt stungudýptin sé óbreytt [Asphalt Institute 2003, bls. 14].

- Enda þótt ofanskráðar bindiefnisgerðir (70/100 og 180/220) henti vel fyrir íslenskt veðurfar er ekki þar með sagt að skrið sé útilokað. Það verður að teljast ólíklegt að skrið byrji og hætti við ákveðin hitastigsmörk; líklegara er að skrið megi teljast óverulegt upp að hitastigsmarkinu sem reiknilíkan Superpave (eða Norðmanna) tiltekur. Þá vaknar spurningin; hversu mikið minnkar skrið við að nota 50/70 í stað 70/100 eða 100/150 í stað 180/220?

Ef stífni⁸ tveggja eða fleiri bindiefnisgerða er þekkt er hægt að spá um hlutfallslegt skrið í malbiki sem er gert úr þessum bindiefnum, að því tilskildu að malbiksblöndurnar séu eins að öðru leyti [Shell 1990, bls. 105]. Ef stífnin er ekki þekkt má í staðinn nota seigju⁹ bindiefnisins eða PI ¹⁰. Ef þessari samanburðaraðferð er beitt á bindiefnisgerðirnar 50/70, 70/100, 100/150 og 160/220 og gert ráð fyrir að hitastig í slitlagi sé 30 °C kemur í ljós að skrið minnkar um nálega:

- 15 % ef 100/150 er notað í stað 160/220
- 30 % ef 70/100 er notað í stað 160/220
- 35 % ef 50/70 er notað í stað 70/100

⁸ Stífni; á ensku: *stiffness*.

⁹ Seigja; á ensku: *viscosity*.

¹⁰ PI ; skammstöfun fyrir ensku: *penetration index*.

Sams konar útreikningar sýna að hlutfallslegur ávinningur af harðara bindiefni minnkar eftir því sem hitastigið eykst. Svo dæmi sé tekið minnkar skrið aðeins um 20 % ef hitastig í slitlagi er 60 °C og 70/100 er notað í stað 160/220.

- Stungudýpt bindiefnis ein sér er ekki sérlega heppilegur stiki til að spá um skrið [Shell 1990, bls. 107], fylgni milli stungudýptar og festu í Marshallprófi er lítil, sömuleiðis milli stungudýptar og hjólfaraprófs¹¹. Enda nægir stungudýpt ekki til að lýsa eiginleikum bindiefnis nema að takmörkuðu leyti, tvö bindiefni geta sýnt ólíka hegðun við sama hitastig, þótt þau tilheyri sama stungudýptarflokki [Asphalt Institute 2003, bls. 13]. Mýkingarmark¹² sýnist á hinn bóginn vera nothæfur stiki til að spá um skrið [Shell 1990, bls. 107], fylgni festu í Marshallprófi og hjólfaraprófi við mýkingarmark er sterk. Þó verður að taka fram sambandið, sem vísað er til í ofangreindri heimild, takmarkast við mýkingarmark á bilinu 45-65 °C (ívið herra en mýkingarmark í bindiefni sem tíðkast að nota hérlandis). Í sænskri heimild [Hilliges 1995, bls. 149] er ráðlagt að velja bindiefnið þannig að mýkingarmark þess sé álíka hátt og hæsta hitastig sem vænta má í slitlaginu. Mýkingarmark 70/100 er kringum 45 °C og mýkingarmark 160/220 í kringum 35 °C. Báðar bindiefnisgerðirnar ættu því að vera nægilega stífar fyrir íslenskt veðurfar, ef miðað er við aðferðir Superpave til að reikna hámarkshitastig í slitlagi. Sé hins vegar miðað við reiknilíkan Norðmanna er 160/220 tæplega nógu stíft.
- Í undantekningartilfellum getur verið þörf á að nota mjög hart bindiefni, t. d. í malbik á hafnarsvæði, á geymsluplön fyrir gáma og aðra þungavöru, ástæði fyrir þunga bíla og hugsanlega í stórum vöruskemmum.
- Harðara bindiefni gerir kröfur til herra hitastigs við blöndun, útlögn og völtun. Sem dæmi má nefna að hitastig malbiks við blöndun og útlögn þarf að hækka um 10 °C ef skipt er úr 160/220 í 70/100 eða úr 70/100 í 50/70. Malbik kólnar hratt í úrkomu og vindi, því hraðar sem hitamismunur malbiks og umhverfis er meiri og malbik sem hefur kólnað um of áður en það er fullþjappað er líklegra en ella til að skemmast. Þess vegna er áhættusamara að leggja malbik úr hörðu bindiefni en mjúku, sérstaklega snemma að vori eða seint að hausti, vegna hættu á ótímabærum skemmdum.
- Einnig er rétt að minna á að eiginleikar malbiks eru ekkert síður undir samsetningu þess komnir en stungudýpt bindiefnisins.
- Í klæðingar hefur tíðkast að nota 160/220 blandað þynni. Harðara bindiefni myndi sennilega draga úr blæðingum. Á hinn bóginn er það líklegt til að auka hættu á sprungum í klæðingunum ef undirbyggingin er á hreyfingu, t. d. vegna frostlyftinga eða sigs. Burðarþol klæðingarinnar myndi heldur ekki aukast sem neinu nemur vegna þess hve klæðingarslitlög eru þunn.

Af framanskráðu má álykta að ekki sé ýkja mikið unnið við að nota harðara bindiefni en 160/220 í malbik, sér í lagi ef skriðið er lítið, að því gefnu að forsendurnar séu réttar. Sé bindiefni valið á grundvelli mýkingarmarks, er 160/220 nægilega stíft fyrir íslenskar aðstæður svo fremi reiknireglur Superpave fyrir hámarkshitastig í slitlagi séu réttar. Ef bindiefni er valið á forsendum mýkingarmarks og norska reiknilíkaninu er beitt (sem áætla hámarkshitastig í slitlagi um 10 °C herra en reiknilíkan Superpave) er 160/220 þó í mýksta lagi. Hins vegar verður ekki séð af ofanskráðu að þörf sé á harðara bindiefni í malbik en 70/100 nema í undantekningartilfellum, svo sem eins og á hafnarsvæðum, í vörugeymslum eða á stæðum fyrir gáma eða þunga bíla. Hvað klæðingar snertir er hugsanlega hægt að draga eitthvað úr blæðingum með því að nota harðara bindiefni sem uppistöðu, en hart bindiefni gerir meiri kröfur til undirbyggingar en mjúkt.

¹¹ *Hjólfarapróf*; á ensku: *wheel tracking test*.

¹² *Mýkingarmark*; á ensku: *softening point*.

HEIMILDIR

- Asphalt Institute. 2003. *Superpave. Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing*. Superpave Series No. 1 (SP-1). Third Edition, Revised 2003. Asphalt Institute, Lexington.
- Ásbjörn Jóhannesson. 2005. *Superpave*. Unnið fyrir Rannsókn- og þróunarsjóð Vegagerðarinnar. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, skýrsla nr. 05-04. Reykjavík.
- Hilliges, F. (redaktör). 1995. *FAS Asfaltbok*. Föreningen för Asfaltbeläggningar i Sverige. Stockholm.
- Shell. 1990. *The Shell Bitumen Handbook*. Shell Bitumen U.K. Chertsey.
- Tayebali, Akhtarhusein A., Huang, Y. 2004. *Performance Grading of Bitumen B-180 and B-85 Used in Iceland*. Final Report. Department of Civil Engineering, North Carolina State University. Raleigh.

ÁHRIF BINDIEFNISINNIHALDS Á EIGINLEIKA MALBIKS

Bein áhrif bindiefnisinnihalds á malbiksblönduna eru:

- Þykkari bindiefnishúð á steinefnakornum með auknu bindiefnisinnihaldi.
- Hluti fylltrar holrýmdar eykst með auknu bindiefnisinnihaldi.

Óbeint hefur bindiefnisinnihaldið margvísleg áhrif á eiginleika malbiksins. Nokkur þeirra, tekin upp úr skýrslu frá norræna vegtækisambandinu [NVF 33, 1985], eru rakin hér á eftir (blaðsíðutöl í svigum).

- Hátt bindiefnisinnihald minnkar áhrifin af jákvæðum eiginleikum steinefnisins á mótstöðu gegn skriði (15).
- Hæfilegt bindiefnismagn er fall af eiginleikum steinefnis (sáldurferli, lögun, gropu) og þökkun. Eitt og sér er bindiefnisinnihald lélegur mælikvarði á líkur á skriði (17).
- Þegar hefðbundnum hönnunaraðferðum er beitt, er lágmarksholrýmd eða hámarks-rúmþyngd að jafnaði heppilegasti mælikvarðinn á hæfilegt bindiefnisinnihald (18).
- Nágrannalöndin nota ýmist leiðbeinandi gildi fyrir bindiefnisinnihald eða takmörkun-arramma (23).
- Hérlendis hefur lengi tíðkast að nota hátt bindiefnisinnihald. Ástæðan er mikil gropa í steinefnum og kalt veðurfar (23). Hér má bæta við einni ástæðu til; vegir og götur eru blautar langtímum saman að vetrarlagi sem kallar á þykka bindiefnishimnu til að vernda slitlagið fyrir vatni.
- Aukið bindiefnisinnihald eykur að jafnaði endingu (34). Þreytuþol eykst með háu bindiefnisinnihaldi (35).
- Slitþol hámarkast með bindiefnisinnihaldi (47).
- Of þunnar bindiefnishimnur geta valdið viðloðunarskemmdum (53). Líklega á þetta enn frekar við þar sem salt er notað til hálkvarna, það er hugsanlegt að saltblandað vatn smjúgi betur en hreint vatn vegna lægri seigju. Um leið er rétt að hafa í huga að bindiefnishimnan er að jafnaði mjög þunn, 9-25 μm (þessar þykktir eru teknar upp úr annarri heimild, NVF-33, 1984, bls. 18).
- Lélega viðloðun er hægt að bæta upp með meira bindiefni (56, líklega afleiðing af minni holrýmd).
- Lítið eitt skriðandi slitlag getur stuðlað að því að þetta aftur sprungur sem kunna að myndast í því. Sennilega er þetta spurning um mikið bindiefni. Þétt og bindiefnisríkt slitlag hefur jákvæð áhrif á þreytuþol og veðrunarþol (72).

Í skýrslu til Malbikunarstöðvarinnar Höfða hf [Jacobsson 2000, bls. 21] er bent á að oftast nær sé heppilegra að nota of mikið bindiefni í slitlag en of lítið, sérstaklega þar sem veðráttu er rök og köld. Í sömu skýrslu (bls. 22) er mælt með að halda bindiefnisinnihaldinu tiltölulega háu.

Sennilega er meiri hætta á bindiefnislíkju á nýlögðu malbiki ef bindiefnisinnihaldið er hátt. Hitt er svo annað mál hvort hún hefur veruleg áhrif á hemlunarvegalegd og þar með slyshættu. Þó verður að teljast líklegt að þarna sé eitthvert samband á milli, enda finnast dæmi í heimildum um lækkandi viðnámsstuðul með lækkandi bindiefnisinnihaldi [Slyngstad 1972, bls. 7]. Í Finnlandi [NVF-33 2004, bls. 15] eru dæmi um slys á nýlögðu malbiki í rigningu, en í sömu heimild er tekið fram að slys hafi ekki verið rakin til lágs hemlunarviðnám á gömlum slitlögum. Þetta gæti verið vísbending um að bílstjórar ofmeti hemlunarviðnám á nýlögðu slitlagi (með bindiefnislíkju á yfirborðinu).

Croney [1991, bls. 526] gerir hemlunarviðnámi talsverð skil. Slys vegna of lítills hemlunarviðnáms verða fyrst og fremst á blautum slitlögum. Ef hraðinn er 50 km/klst eða meiri skiptir grófa áferðin, þ. e. hinar sýnilegu ójöfnur (macrotecture), mestu fyrir hemlunarviðnámið, annars gerð steinefnisins (microtexture). Hann tekur eitt dæmi af rannsókn, gerðri á fjórða áratug síðustu aldar, sem sýndi að hemlunarviðnám á tiltekinni slitlagsgerð jókst verulega þegar bindiefnisfilman var farin af (viðnámsstuðullinn, SFC, jókst úr 0,3 í 0,7). Þessi breyting tók hins vegar langan tíma, fimm ár, enda var umferðin lítil.

Íslenskar mælingar á viðnámsstuðulum á nokkrum götum í Reykjavík með mikilli umferð [Ásbjörn Ólafsson 2001] gefa til kynna að hemlunarviðnám á nýlögðu slitlagi aukist lítillega (um 0,1) á tímabilinu október-desember. Á stöku stað og stuttum köflum er aukningin þó miklu meiri (um 0,3; í einu tilfalli um 0,5) sem getur bent til að þar hafi verið feitir blettir vegna of mikils bindiefnis. Í þessum mælingum er viðnámsstuðullinn þó hvergi minni en 0,4.

HEIMILDIR

- Ásbjörn Ólafsson. Excel-skrár yfir niðurstöður mælinga á viðnámsstuðli í september, október og desember 2001. Óbirt heimild.
- Croney, D. and P. Croney. 1991. *The Design and Performance of Road Pavements*. Second edition. McGraw-Hill Book Company. London.
- Jacobson, T. 2000. *Utræðing av beläggningsskader på Island (Reykjavik)*. VTI notat 60-2000. Väg- och transportforskningsinstitutet. Linköping.
- NVF-33. 1984. *Massasammansättningens och packningsgradens inverkan på hållbarheten hos asfaltbetong*. Nordiska Vägtekniska Förbundet. Utskott 33 Asfaltbeläggningar.
- NVF-33. 1985. *Materialegenskaper og funksjonskrav for varmblandede dekker og bærelag*. Nordiska Vägtekniska Förbundet. Utskott 33 Asfaltbeläggningar. Rapport nr 5: 1985.
- NVF-33. 2004. *Asfaltbelegningers overflateegenskaper - Friksjon*. Nordiska Vägtekniska Förbundet. Utskott 33 Asfaltbeläggningar. Bráðabirgðautgáfa.
- Slyngstad, T. 1972. *Friksjon*. Internt notat for særkursset. Institutt for veg- og jernbanebygging, Universitetet i Trondheim, Norges Tekniske Högskole.

TILLAGA AÐ MÖRKUM FYRIR BINDIEFNISINNIHALD

Mörk í verklýsingum fyrir bindiefnisinnihald í malbiki þjóna líklega takmörkuðum úlgangi, ef verklýsingarnar gera á annað borð ráð fyrir að malbikið sé hannað eftir Marshallaðferðinni eða öðrum svipuðum aðferðum. Öðru máli gegnir ef hönnunarpættinum er sleppt, eins og stundum gerist, og bindiefnisinnihald er ákvarðað út frá leiðbeinandi gildi með hinum og þessum leiðréttingum. En sé Marshallprófið notað til að hanna malbik er markmið þess meðal annars að ákvarða bindiefnisinnihald malbiksblöndunnar, og þá er takmörkunum á bindiefnisinnihaldi ofaukið í verklýsingum, nema þá helst sem vísbending um líklegt bindiefnisinnihald.

Taflan hér á eftir sýnir útdrátt úr norskum [Statens vegvesen 2005], sænskum [Vägverket 2005] og finnskum verklýsingum [PANK 2000] um viðmiðunartölur fyrir bindiefnisinnihald í malbiki og mörk fyrir bindiefnisinnihald ef einhver slík eru sett. Hér er miðað við að bindiefnið sé 160/220 sem er langalgengasta bindiefni í íslensku malbiki (Svíar auka bindiefnisinnihaldið um 0,4 % eða þar um bil af þyngd blöndu ef 70/100 er notað í stað 160/220). Auk þess er taflan ýmist miðuð við að rúmþyngd steinefnis sé 2,65 (Noregur), 2,66 (Svíþjóð) eða 2,70 (Finnland).

Tafla 1. Viðmiðunartölur fyrir bindiefnisinnihald í norsku, sænsku og finnsku malbiki ásamt hámarks- og lágmarksinnihaldi af bindiefni þar sem það á við.

Slitlag	Noregur		Svíþjóð ¹		Finnland	
	Tillaga %	Mörk %	Tillaga %	Mörk %	VFB ² %	Mörk %
YFL 8	6,2	-	6,3	6,0-6,6	80-90 (85)	5,4-6,4
YFL 11	5,9	-	6,2	5,9-6,5	80-90 (85)	5,2-6,2
YFL 16	5,6	-	6,0	5,7-6,3	80-90 (85)	5,0-6,0
SMA 8	6,7	-	6,5	5,9-7,4	80-90 (85)	7,0-8,0
SMA 11	6,3	-	6,2	5,7-7,2	80-90 (85)	6,5-7,5
SMA 16	6,0	-	6,1	5,5-7,0	80-90 (85)	6,0-7,0
BNL 11	5,6	-	5,2	4,7-5,7	-	-
BNL 16	5,4	-	5,0	4,5-5,5	-	-
BRL 16	4,5	-	4,8	4,5-5,5	-	-
BRL 22	4,5	-	4,5	4,2-5,2	80-90 (85)	4,2-5,2
BRL 32	4,5	-	4,0	3,7-4,7	80-90 (85)	3,8-4,8

¹ Þessi gildi eru mismunandi eftir stungudýpt bindiefnisins, hér eru tekin gildin fyrir 160/220.
² VFB (fyllt holrým) er hönnunarforsenda í finnskum verklýsingum, viðmiðunargildi í sviga.

Sennilega er rúmþyngd íslenskra steinefna (blöndu) sem notuð eru á höfuðborgarsvæðinu í grennd við 2,85. Af því leiðir að bindiefnisinnihaldið í töflunni þarf að lækka um það bil með hlutfallinu 2,66/2,85 eða 0,93 af þessari ástæðu einni til að bindiefnisinnihaldið sé sambærilegt við það sem gerist í Noregi, Svíþjóð og Finnlandi. Þetta svarar um það bil til 0,4 prósentustiga í bindiefnisinnihaldi. Á hinn bóginn eru íslensk steinefni meira eða minna gropin og hluti bindiefnisins fer í að fylla gropur í steinefninu. Lauslega áætlað má gera ráð fyrir að þyngd bindiefnis sem til þess þurfi sé að lágmarki 0,5 % og að hámarki 1,5 % af þyngd blöndunnar. Í undantekningartilfellum er viðbótarþörfin líklega enn meiri, eins og til dæmis í malbiki úr Rauðamels- eða Stapafellsefni [NVF-33 1986, bls. 39].

Þá er íslensku veðurfarari þannig háttað að bindiefnishimna á steinefnunum má og þarf að vera þykkari en tíðkast á hinum Norðurlöndunum. Bæði er veðurfar hér kaldara svo að hætta á skriði er minni og eins er malbik langtímum saman blautt, sérstaklega að vetrarlagi, sem ýtir undir viðloðunarskemmdir, en líkur á þeim minnka með auknu bindiefnisinnihaldi. Hæfileg viðbót í bindiefnisinnihaldi af þessum sökum er áætluð 10 %, en fyrir því er enginn skotheldur rökstuðningur. Tafla 2 er tillaga að viðmiðunargildum fyrir bindiefnisinnihald í íslensku malbiki, og er byggð á sænsku verklýsingunum og forsendunum hér að framan.

Tafla 2. Tillögur að viðmiðunartölum fyrir bindiefnisinnihald í íslensku malbiki, svo og há- og lágmarki þess.

Slitlag	Tillaga %	Mörk %
YFL 8	7,0	6,7-8,0
YFL 11	6,9	6,6-7,9
YFL 16	6,7	6,4-7,7
SMA 8	7,3	6,6-8,3
SMA 11	6,9	6,4-7,9
SMA 16	6,8	6,2-7,8
BNL 11	5,8	5,3-6,8
BNL 16	5,6	5,1-6,6
BRL 16	5,4	5,1-6,4
BRL 22	5,1	4,7-6,1
BRL 32	4,5	4,2-5,5

HEIMILDIR

NVF-33. 1986. *Bruk av porøst steinmateriale til asfaltdekker.* Nordiska Vägtekniska Förbundet. Utskott 33 Asfaltbeläggningar.

PANK. 2000. *Finnish Asphalt Specifications 2000.* Finnish Pavement Technology Advisory Council. Helsinki.

Statens vegvesen. 2005. *Håndbok 018. Vegbygging.* Statens vegvesen. Oslo.

Vägverket. 2005. *ATB VÄG 2005. Kapitel I Typblad, kontrollblad, bindemedel och konstruktionstyper för bitumenbundna lager.* VV Publ 2005:112. Borlänge.

SÁLDURFERLAR OG MARKALÍNUR FYRIR MALBIK

Rétt er að taka strax fram að sáldurferill er ekki stíki í venjulegum skilningi; til að svo væri yrði að vera hægt að lýsa sáldurferli með einni tölu eða tveim, en sáldurferlar í malbiki eru alltof fjölbreyttir til þess. Á hinn bóginn hefur sáldurferillinn afgerandi áhrif á eiginleika malbiksins og af þeirri ástæðu er fjallað um hann sem stíka.

Sáldurferlar í malbiki geta verið mjög mismunandi, en þegar sáldurferill hefur verið ákveðinn fyrir tiltekna blöndu er kappkostað að hann breytist sem allra minnst meðan á framleiðslu malbiksins stendur. Ástæðan er sú að breyting á sáldurferlinum, að öðrum stikum óbreyttum, hefur talsverð áhrif á eiginleika malbiksins og sjaldnast til bóta ef malbikið hefur verið hannað fyrir ákveðnar aðstæður. Svo dæmi sé tekið; ef sáldurferill reynist grófari en blöndunarforskrift malbiksins gerir ráð fyrir, má búast við að holrýmdin aukist, en við það eykst hætta á vatnsskemmdum, minnkandi slitþoli og ótímabærri öldrun malbiksins. Af þessum sökum er leyfilegum vikum frá tilgreindum sáldurferli settar þröngar skorður í framleiðslu malbiks.

Í verklýsingum fyrir malbik er sáldurferillinn alltaf sýndur sem þyngdarhluti sýnisins, sem smýgur tiltekið sikti (sáldur), sem fall af möskvastærð siktisins. Venjulega er möskvastærðin sýnd (í mm) á lárétta ásnum í lograkvarða, en sáldur sýnisins á lóðrétta ásnum (í %). Líka tíðkast að kvarðinn á lárétta ásnum sé í réttu hlutfalli við möskvastærðina (í mm) í veldinu 0,45. Síðarnefnda aðferðin hefur einn kost; ef dregin er bein lína frá upphafspunkti línuritsins (úr horninu neðst til vinstri) að stærstu kornastærð sýnisins við 100 % sáldur, þá táknar þessi lína þéttasta mögulega sáldurferil sýnis með þessa hámarks-kornastærð. Hönnunaraðferð Superpave byggir val sitt á sáldurferli fyrir malbik á þessari framsetningu.

Þrjár eiginleikar sáldurferils öðrum fremur eru mikilvægir fyrir eiginleika malbiksins. Það eru hlutfall mélu (< 0,063 mm) af steinefninu, efri flokkunarstærð þess og lögum sáldurferilsins á milli þessara tveggja punkta á honum.

Méluinnihald í malbiki er oftast valið á bilinu 8-13 % af þyngd steinefnisins. Meginhlutverk melunnar er að minnka holrýmd malbiksins og draga þannig úr vatnsnæmi þess. Jafnframt eykur hún festu malbiksins, því þegar hún blandast bindiefninu gerir hún það seigara, og vinnur þannig gegn skriði. Ef hlutfall mélu og bindiefnis verður mjög hátt er hins vegar hætta á að malbikið verði óþjál og erfitt í útlögn [Frostman 1984, bls. 18] og við það hækkar holrýmdin. Af þessari ástæðu m. a. eru stundum settar takmarkanir á hlutfall mélu og bindiefnis í verklýsingum.

Rannsóknir gefa til kynna að slitþol malbiks aukist með efri flokkunarstærð, þó ekki undantekningarlaust [Frostman 1978, bls. 53; Jacobson 1998, bls. 4; Transportforsknings-delegationen 1975, bls. 63]. Hæmularviðnám fer að öðru jöfnu vaxandi með hámarks kornastærð, einkum á vegum þar sem negldir hjólbarðar eru notaðir á vetrum og umferðarhraði er mikill. Ástæðan er sú að yfirborð slitlagsins verður grófara með stækkandi hámarks-kornastærð og vatn sem verður á milli hjólbarða og slitlags á greiðari leið burt en ella [Hunter 1994, bls. 62]. Á hinn bóginn eru slitlög með lítilli efri flokkunarstærð að öðru jöfnu hljóðlátari en þau sem eru úr grófara steinefni. Eftir því sem efri flokkunarstærð stækkar er meiri hætta á aðskilnaði í malbikin, sem kemur fram í grófum blettum sem hættir til að trosna og verða að holum með tímanum.

Lögum sáldurferilsins (milli punktanna sem ákvarða hámarks kornastærð annars vegar og méluinnihald hins vegar) hefur veruleg áhrif á eiginleika malbiksins. Þéttur sáldurferill hefur margvísleg jákvæð áhrif á eiginleika malbiksins. Festan er að jafnaði mikil (að því gefnu að bindiefnisinnihaldið sé hæfilegt). Malbikið verður þéttara og ver sig betur fyrir vatni. Malbik með þéttum sáldurferli er að öðru jöfnu þjál í útlögn og völtun. Holrýmdin minnkar sem eykur slitþol malbiksins gagnvart negldum hjólbörðum og dregur úr líkum á ótímabærri hörðnun bindiefnis. Á hinn bóginn getur sáldurferillinn orðið of þéttur, þannig að ekki verði nægilegt rúm fyrir bindiefnið og þá gerist annað af tvennu, óskert bindiefnisinnihald spyrnir steinefnagrindinni sundur sem eykur hættu á skriði, eða hitt að slitlagið verður of magurt vegna þess að bindiefnisinnihaldið er haft of lítið. Í þessu efni sem oftast þarf að sigla milli skers og báru þegar þéttleiki sáldurferilsins er ákveðinn.

Stundum er sáldurferillinn af ásettu ráði hafður verulega frábrugðinn þéttasta sáldurferli. Dæmi um þetta er svokallað drenmalbik, sem þó hefur einungis verið lagt í tilraunaskyni héraendis. Sáldurferill drenmalbiks er hafður mjög þinn þannig að vatn geti seytilað gegnum malbikið og út til hliðanna og standi ekki uppi í hjólförum. Holrýmd í slíku malbiki er gjarna höfð 15-20 %. Annað dæmi er SMA; þar er hluti grófs steinefnis aukinn til muna á kostnað grófs sands, þannig að sáldurferillinn verður tiltölulega flatur á bilinu 1-5 mm á sáldurferlinum, en mélu- og bindiefnisinnihaldið er haft hátt til að fylla að hluta upp í holrúmið myndast.

Markalínur EN-staðlanna fyrir malbik [ÍST EN 13108-1:2006, bls. 11 og ÍST EN 13108-5:2006, bls. 10] eru tiltölulega rúmar og leyfa margskonar sáldurferla og fræðilega séð getur hannaður sáldurferill fylgt annarri hvorri markalínunni. Samt sem áður ætti alltaf að vera keppikefli malbikshönnuða að sáldurferillinn liggi sem næst mitt á milli markalínanna, ef því verður við komið, þá verður árangurinn bestur. Jafnframt ber að forðast að sáldurferillinn slangri á milli þeirra.

HEIMILDIR

- Evensen, R. 1970. *Bituminøse vegdekker. Internt notat for grunnkurset 1970*. Institutt for veg- og jernbanebygging. Norges tekniske høgskole, Trondheim.
- Frostman, P. (prosjektledare). 1978. *Slitageundersökningar asfaltbetong*. Samarbetet Neste – Nynäs.
- Frostman, P., Simonsson, B. 1984. *Massasammansætningens och packningsgradens inverkan på hållbarheten hos asfaltbetong*. Rapport till förbundsutskottsmöte i Stockholm 2 och 3 juni 1984. NVF Utskott 33 Asfaltbeläggningar.
- Hunter, Robert N. (editor). 1994. *Bituminous Mixtures in Road Construction*. Thomas Telford, London.
- ÍST EN 13108-1:2006. *Malbiksblöndur – Efnislýsingar – Hluti 1: Malbik*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- ÍST EN 13108-5:2006. *Malbiksblöndur – Efnislýsingar – Hluti 5: Steinríkt malbik (SMA)*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- Jacobson T., Wågberg, L-G. 1998. *Development of prediction model for pavement wear, wear profile and annual cost*. VTI notat 76A-1998. Swedish National Road and Transport Research Institute. Linköping.
- Transportforskningsdelegationen. 1975. *Dubbdäck*. Transportforskningsdelegationen 1975:4. Stockholm.

UM SKRIÐ Í ÍSLENSKU MALBIKI

1. Inngangur

Hjölför eru langalgengasta orsök endurnýjunar á slitlögum hérlendis. Hjölför í malbiki myndast af þrem ástæðum; vegna slits, vegna sigs í undirliggjandi lögum og vegna skriðs.

Hérlendis á slit ótvírætt mestan þátt í hjólfaramyndun. Það stafar nánast eingöngu af notkun negldra hjólbarða og stendur að öðru jöfnu í öfugu hlutfalli við slitþol steinefnisins í malbikinu.

Sig getur stafað af lélegri undirbyggingu slitlagsins, hún lætur smám saman undan og malbikið fylgir á eftir. Ef sigið er mikið og bundið við hjólförin myndast stundum sprungur til hliðar við hjólförin og samsíða þeim. Önnur orsök sigs er lóðrétt samþjöppun í malbikinu vegna minnkandi holrýmdar. Hjölför af þessari ástæðu eru mjög grunn, í mesta lagi 2-3 mm í 50 mm þykku slitlagi, og koma fram á fyrsta sumri eftir útlögn.

Skrið þekkist á því að malbikið skriður til í lárétta stefnu, mestan part þvert á umferðarstefnunna og myndar þá hryggi til hliðar við kröpp hjölför. Malbikið getur líka skriðið til í umferðarstefnunna, einkum þar sem þungir bíla hemla og taka af stað, t. d. við umferðarljós. Skrið getur átt verulegan þátt í hjólfaramyndun en er talið stafa frá umferð þungra bíla að langmestu leyti [Wiman 2000].

Menn greinir á um hvort skrið í íslensku malbiki sé svo mikið að það eigi verulegan hlut í hjólfaramyndun í íslensku malbiki, og þar af leiðandi hvort nauðsynlegt sé að taka sérstakt tillit til skriðs þegar malbik er hannað fyrir íslenskar aðstæður. Í þessum pistli verða talin fram rök með og á móti því að skrið sé marktækur þáttur í hjólfaramyndun í íslensku malbiki, hvaða úrbætur komi til greina ef svo er, ásamt líklegum fylgifygiskum þeirra.

2. Mælingar á skriði í rannsóknastofu

Við Háskóla Íslands [Elísabet S. Urbancic 1998] voru m. a. gerðar skriðprófanir á fimm sýnum af íslensku malbiki 1997. Malbikið var yfirlag 16, tekið af bíl og þjappað í Marshallhamri. Steinefnið var að mestu frá Seljadal, stungudýpt biksins var 89 mm/10, festan 11 kN, sig 5,7 mm og holrýmd 1,1 %. Mælingarnar voru gerðar við 40 °C. Meðaltal skriðs (eftir 3.600 álagspúlva) í þessum fimm Marshallkjörnum var 12.600 µe (staðalfrávik meðaltalsins 2.000 µe). Skriðhraðinn var að meðaltali 0,90 µe/álagspúls (staðalfrávik meðaltalsins 0,14 µe/álagspúls). Elísabet telur niðurstöðurnar sýna að malbikið hafi svipað eiginleika og erlendar malbiksgerðir hvað skrið snertir; hefur þó fyrirvara á niðurstöðunum þar eð sum sýnin höfðu áður verið notuð til annarra prófana.

Þessum rannsóknum við Háskóla Íslands var haldið áfram 1998 [Bergþóra Kristinsdóttir 1999]. Þá var sömuleiðis mælt skrið á Marshallkjörnum gerðum úr malbiki af gerðinni B4-B180¹³ frá Malbikunarstöðinni Höfða hf. Kjarnarnir voru 100 mm í þvermál, þjappaðir í þrem flokkum, einn flokkur með 2 x 35 höggum, annar með 2 x 50 höggum og sá þriðji með 2 x 75 höggum. Þrátt fyrir mismunandi þjöppun reyndust Marshallleiginleikarnir svipaðir í öllum flokkunum, holrýmdin 1,0-1,1 %, festan á bilinu 11-13 kN og sigið á bilinu 3,2-4,1 mm. Mælingar voru gerðar við 40 °C. Skriðið var minnst í kjörnum með 35 högga þjöppun, 10.900 µe, en álíka í hinum flokkunum tveim, um 14.500 µe. Skriðhraðinn var mjög svipaður í öllum flokkunum, kringum 0,5 µe/álagspúls. Staðalfrávik meðtalanna er 800-1.400 µe fyrir skrið en um 0,1 µe/álagspúls fyrir skriðhraða.

Brynildur Magnúsdóttir mældi skrið á allmörgum borkjörnum sem teknir voru úr þrem köflum sem höfðu verið endurlagðir¹⁴ með SMA og einum kafla með venjulegu SMA yfirlagi á gamalt malbik. Endurlögðu kaflarnir voru á Reykjanesbraut, SMA 16, holrýmd 0,6 %; á Kringlumýrarbraut, SMA 16, holrýmd 1,4 % og á Hafnarfjarðarvegi, SMA 16, holrýmd 3,3 %. Kaflinn með hefðbundinni yfirlögn var á Sæbraut, SMA 16, holrýmd 1,7 %. Borkjarnarnir voru 150 mm þvermál og voru prófaðir samkvæmt sænskri verklýsingu [FAS, án ártals]. Úr

¹³ Yfirlagsmalbik, steinefni frá Björgun með efri flokkunarstærð 16 mm, bindiefni 180/220.

¹⁴ Endurlögn; á erlendum málum: *Repave*.

hverjum kafla voru prófaðir sjö borkjarnar. Mælingarnar voru gerðar við Háskóla Íslands og í skýrslu um prófanirnar [Sigurður Erlingsson 2001] kemur fram að skriðið var á bilinu 25.000 til 65.000 μe og skriðhraðinn á bilinu 2,3 til 7,7 $\mu\text{e}/\text{álagspúls}$. Niðurstöðurnar metur Sigurður svo að malbikið á Sæbraut (hefðbundið yfirlag) þoli allt að 1.800 þunga bíla á dag pr. akrein, malbikið á Kringlumýrarbraut og á Reykjanesbraut allt að 900 þunga bíla á dag pr. akrein en malbikið á Hafnarfjarðarvegi minna en 450 þunga bíla á dag pr. akrein. Sigurður tekur fram í skýrslu sinni að niðurstöðurnar verði að skoða m.t.t. þess að prófanirnar séu ekki mjög margar.

Í áður nefndri skýrslu Sigurðar Erlingssonar er stutt yfirlit yfir nokkrar aðrar mælingar á skriði sem hafa verið gerðar við Háskóla Íslands. Í töflu 1 er þeim skipt í tvennt, malbik með bindiefni af gerðinni B85 (70/100) og B180 (160-220). Taflan sýnir að skriðið er heldur minna í sýnum á malbiki með bindiefni af gerðinni B85 (70/100) en mismunurinn er ekki marktækur.

Tafla 1. Niðurstöður skriðprófana á nokkrum malbiksgerðum.

Bindiefnisgerð	B85		B180	
	Skrið μe	Skriðhraði $\mu\text{e}/\text{púls}$	Skrið μe	Skriðhraði $\mu\text{e}/\text{púls}$
A1/B85	52000	8,31		
A2/B85	25400	2,66		
A2/B180			41600	3,13
B1/B85	33900	2,90		
B4/B180			48400	6,19
B5/B180			50500	3,37
B11/B85	39600	2,63		
S11/B180			35800	2,66
<i>Meðaltal</i>	<i>37725</i>	<i>4,12</i>	<i>44075</i>	<i>3,84</i>

Til samanburðar við gildin í töflu 1 má taka kröfur um skriðþol í slitlagsmalbiki úr sænskum viðhaldsverklýsingum [Vägverket 2000, bls. 9]. Ef umferð þungra bíla¹⁵ er minni en ~500 bílar/akrein/dag eru engar kröfur gerðar til skriðþols. Sé hún undir ~2000 bílar/akrein/dag má skriðið mest vera 30.000 μe en fyrir ~4000 bílar/akrein/dag eða meira er hámarkið 15.000 μe .

Niðurstöður skriðmælinganna sem eru tundaðar hér á undan gefa til kynna mjög breytilegt skriðþol fyrir íslenskt malbik, allt frá því að vera mjög mikið (<15.000 μe) niður í mjög lítið (>40.000 μe). Á hinn bóginn er ólíklegt að þung umferð fari yfir 500 bíla/akrein/dag nema þá á nokkrum vegarköflum á höfuðborgarsvæðinu.

3. Mælingar á skriði in situ

Steinefnanefnd lét á sínum tíma mæla aukningu í hjólfaradýpt á einu sumri í fimm tilraunaköflum á Sæbraut [Ásbjörn Jóhannesson 1998; Ásbjörn Jóhannesson 2000]. Allar malbiksgerðirnar voru Y16 en úr mismunandi steinefni; Björgunarefni, holrýmd 0,6 %, festa 11 kN, sig 7,4 mm; Esjubergsefni, holrýmd 0,6 %, festa 10 kN, sig 7,2 mm; Leirvogstunguefni (Leirvogsa), holrýmd 0,0 %, festa 11 kN, sig 8,2 mm; Seljadalsefni, holrýmd 0,6 %, festa 10 kN, sig 6,2 mm og Snasaefni, holrýmd 0,9 %, festa 10 kN, sig 6,8 mm, allt skv. rannsóknum á malbikssýnum frá blöndunarstöð. Holrýmd í borkjörnum var um það bil einu og hálfu prósentu meiri en holrýmd mæld í Marshallprófi á malbikssýnum frá blöndunarstöð.

Hjólfaradýpt á þessum köflum var mæld í tvígang sumarið 1991 (ári eftir útlögn) og aftur sumarið 1992. Þá kom í ljós að hjólförin dýpkuðu marktækt milli mælinga sumarið 1991 (um 0,7-1,8 mm). Þessi dýpkun var á bilinu 15-35 % af aukningu í hjólfaradýpt á sömu stöðum milli sumrana 1991 og 1992 (á einum stað mældist hjólfaraaukningin yfir sumarið meiri en milli sumra, sem fær ekki staðist).

Nokkru seinna lét Steinefnanefnd mæla aukningu í hjólfaradýpt á einu sumri í þrem tilraunaköflum í Reykjavík [Ásbjörn Jóhannesson 1998]. Slitlagið á þessum köflum var SMA,

¹⁵ Bíll er í þessu samhengi skilgreindur sem þungur ef verg þyngd hans er meiri en 3500 kg.

holrýmd 0,0 %, festa 7 kN, sig 5,3 mm; Y16, holrýmd 0,1 %, festa 10 kN, sig 4,3 mm og Y12, holrýmd 1,3 %, festa 9 kN, sig 3,9 mm, allt skv. rannsóknum á malbikssýnum frá blöndunarstöð. Holrýmd í borkjörnum var aðeins mæld á einni gerð, Y16, og reyndist vera 1,0 %.

Niðurstöður mælinga á hjólfaradýpt á þessum köflum benda eindregið til að skrið hafi átt sér stað. Sumarið 1997 jukust hjólförin um 0,6 - 1,0 mm, mest í SMA, minnst í Y16. Hlutur skriðs í hjólfaramyndun var áætlað 10-15 % út frá sliti á samskonar slitlagsgerðum, en þessar tölur eru ónákvæmar.

4. Aðrar vísbendingar með og á móti skriði

Vísbendingar um skrið má fá með því að skoða hjólför [Wiman 2000]. Ef vinstra hjólfarið er staðbundið, en það hægra dreifðara er líklegt að hjólförin megi bæði rekja til slits og skriðs. Ástæðan er sú að bílar sækja í að aka í sama hjólfari vinstra megin, en þar sem þungir bílar eru breiðari en léttir (og yfirleitt ekki á negldum hjólbörðum) falla áhrifin af sliti og skriði ekki saman í hægra hjólfari. Séu bæði hjólför álíka breið og álíka kröpp er líklegt að þau stafi af sliti, sérstaklega ef bilið á milli þeirra er í samræmi við bil á milli hjóla á fólksbílum. Wiman telur enn fremur að nánast allt skrið megi rekja til þungra bíla.

För eftir tvö hjól hlið við hlið í sama hjólfari eru merki um skrið. Hjólfarið lítur þá út eins og mót af tvöföldum afturhjólum á þungaflutningabíl. Stundum má sjá að malbikið hefur pressast upp í hrygg milli hjólanna. Ef malbik hefur ýtt eða dregist til í akstursstefnuna er það sömuleiðis merki um skrið; þetta sést frekast þar sem þungir bílar stansa á ljósastýrðum gatnamótum. Um síðustu aldamót mátti stundum sjá þessi ummerki á ljósastýrðum gatnamótum (t. d. á gatnamótum Grensásvegur og Miklubrautar) en þetta er sjaldgæfara nú orðið eða jafnvel horfið. Sömuleiðis mátti sjá greinileg för eftir tvöföld hjól við strætisvagnabiðskýli (t. d. á Grensásvegi við Hreyfilshúsið og víðar) en þessi ummerki hafa einnig verið sjaldgæfari hin síðari ár eða horfið alveg.

5. Merki um skrið í Reykjavík eftir sumarið 2007

Júlímánuður 2007 var óvenju hlýr, þurr, lygn og sólríkur í Reykjavík sumarið 2007, þótt engin veðurmet væru slegin. Þessi skilyrði ýta undir skrið í malbiki, þar sem yfirborð malbiks getur hitnað langt umfram lofthita þegar sól er hátt á lofti og lofn. Í þessum mánuði mældist hæsta hitastig á yfirborði malbiks hartnær 40 °C á tveim veðurstöðvum Vegagerðarinnar í nágrenni Reykjavíkur (Sandskeið og Reykjanesbraut) og 33 °C á einum stað innanbæjar (Garðabær) á sama tímabili. Hitastig 20 mm undir yfirborði slitlags (viðmiðunardýpt SHRP fyrir hitastig í slitlagi) má reikna út frá yfirborðshita samkvæmt formúlu sem er tilgreind í skýringum við forrit frá Strategic Highway Research Program [SHRP 1995] sem var gert til að spá um hitastig í malbiki við ýmsar aðstæður. Ef þessi formúla er lögð til grundvallar kemur í ljós að hitastig 20 mm undir yfirborði slitlagsins hefur að líkindum komist í 37 °C á Sandskeiði og á Reykjanesbraut, en í 31 °C í Garðabæ í júlí 2007.

Þessar mælingar sýna að hitastig í slitlagi getur orðið talsvert hærra en spá sú sem Íkan Superpave gerir út frá hnattstöðu og veðurfari, sem er 30 °C fyrir Reykjavík [Ásbjörn Jóhannesson 2005, bls. 26]. Engu að síður er þetta hitastig miklu lægra en svo að hætta sé á skriði vegna bindiefnisgerðanna sem eru notaðar hér, prófanir (reyndar aðeins á tveim sýnum) gefa til kynna að hart bindiefni (70/100) muni þola allt að 66 °C í slitlagi og mjúkt (160/220) allt að 58 °C (sama heimild bls. 26).

Samt sem áður má sjá merki um skrið á gatnamótum í Reykjavík sem líklega hefur orðið á áður nefndu tímabili. Þau eru bundin við ljósastýrð gatnamót á miklum umferðargötum, og sjást einungis framan við ljósín, þar sem bílar stansa og taka af stað. Einkennin eru óreglulegar ójöfnur, líkt og malbikið hafi ekist til í umferðarstefnuna. Á milli gatnamóta eru þessi ummerki hvergi sjáanleg.

6. Er íslenskum slitlögum hætt við skriði?

Þessari spurningu verður ekki svarað með neinni vissu nema að undangengnum kerfisbundnum mælingum á skriði. Fyrirliggjandi mælingar á skriði í íslenskum slitlögum, sem að vísu eru mjög takmarkaðar, benda vissulega til skriðs í nokkrum mæli, sömuleiðis ummerki við strætisvagnaskýli og á ljósastýrðum gatnamótum um það leyti sem mælingarnar voru gerðar. Á hinn bóginn voru mælingarnar gerðar fyrir um það bil tíu árum og sýnileg merki um skrið í slitlögum eru vandfundin nú ef þau eru þá nokkur og för eftir tvöföld hjól sjást hvergi nema ef vera skyldi á stæðum fyrir þunga bíla. Prófanir á skriðþoli algengra íslenskra malbiksgerða eru misvísandi hvað skrið snertir, sumar þeirra gefa til kynna að skriðþolið sé mjög mikið (skrið undir 15.000 μe) en aðrar að það sé mjög lítið (skrið yfir 40.000 μe). Umferð þungra bíla er þó víðast hvar miklu minni en svo að nauðsynlegt sé að gera kröfur til skriðþols malbiksins ef mið er tekið af sænskum verklýsingum. Þess má og geta að kornalögun steinefnis hefur verið bætt á síðari árum með heppilegri brjótum og bindiefnisinnihald minnkað um leið. Þá má nefna að bindiefni það sem nú er mest notað (180/220) er að öllum líkindum nægilega stíft með tilliti til skriðþols og íslensks veðurfars, ef tekið er mið af aðferðum Superpave við val á bindiefni [Tayebali 2004].

Eins og málum er nú háttað er hæpið að útiloka að skrið eigi einhvern þátt í hjólfaramyndun í íslenskum slitlögum, en að öllum líkindum er sá þáttur lítill.

7. Ráðstafanir til að minnka skrið

Fyrst af öllu þarf að gera mælingar til að ganga úr skugga um hvort skrið á sér stað í íslenskum slitlögum og, ef svo er, hvort það er svo mikið að það skipti máli fyrir endingu þeirra. Í þessu sambandi þarf einnig að hafa í huga að ráðstafanir sem eiga að draga úr skriði geta haft aðra fylgifiska sem eru neikvæðir fyrir endingu malbiksins.

Aukin holrýmd í malbiki dregur úr líkum á skriði, þó aðeins upp að vissu marki. Hérlandis hefur tíðkast að halda holrýmd niðri eins og kostur er sem eflaust hefur aukið hættu á skriði, en hversu mikið er óvíst. Á hinn bóginn eykst hætta á skemmdum sem rekja má til áhrifa vatns og frosts (fleiddur, holur) ef holrýmdin er há.

Hart bindiefni dregur einnig úr líkum á skriði, því harðara sem bindiefnið er, þeim mun meiri sumarhita þolir malbikið án þess að skriða. Hérlandis hefur yfirleitt verið notað fremur mjúkt bindiefni (180/220) í malbik. Þar með er ekki sagt að bindiefnisvalið sé orsök skriðs, samkvæmt flokkunarkerfi Superpave hentar 160/220 prýðilega fyrir íslenskar veðurfarsaðstæður. Breytt bindiefni¹⁶ hefur svipuð áhrif eins og að nota harðara bindiefni.

Kornalögun og yfirborðsáferð steinefnis hefur áhrif á skrið. „Angularity“ er jákvæður eiginleiki. Hátt brothlutfall (hlutfall brotflata af heildaryfirborði steinefnis) dregur úr líkum á skriði; núíð efni hefur öfug áhrif.

Ef umferð er mikil og þung er heppilegra að sáldurferill malbiksins sé nær neðri hönnunarmörkum en þeim efri, því gróft steinefni hefur að öðru jöfnu meiri mótstöðu gegn skriði en fíngert.

Hátt hlutfall mélu dregur úr líkum á skriði, því malbikið verður stífara með auknu méluinnihaldi. Háu méluinnihaldi eru þó settar skorður, oft með því að tiltaka hámarkshlutfall mélu og bindiefnis. Annars er hætta á að malbikið þjappist illa og þoli síður hreyfingar í undirbyggingu án þess að springa (verði stökkt).

Líkur á skriði eru taldar minnka með aukinni þjöppun, að öðru óbreyttu.

Malbik með of miklu bindiefni hættir til að skriða. Á hinn bóginn hættir malbiki með of litlu bindiefni til að skemmast af völdum vatns og veðurs, svo þarna þarf að fara bil beggja. Reyndur ráðgjafi, Charles Foster, orðar ráðleggingu sína þannig: „...put in all the asphalt the traffic will bear but not too much“ [Foster 1985, bls. 305].

Festa í Marshallprófi er talin vera mælikvarði á það sem kallað er styrkleiki malbiksins, sem væntanlega má túlka sem mótstöðu gegn skriði, og sig í sama prófi er tengt við hættu á skriði [White 1985, bls. 278-279]. Í handbók um hönnun malbiks með Marshallaðferðinni er

¹⁶ Breytt bindiefni; á ensku: *modified binder*.

lögð áhersla á að uppfylla kröfur um festu og sig [Asphalt Institute 1989, bls. 146] nema því aðeins að tryggt sé að frávikin séu saklaus. Þetta bendir til að skriði megi halda í skefjum með því að uppfylla viðhlítandi kröfur um festu og sig. Um gildi Marshallsprófs til að meta líkur á skriði er þó ágreiningur og hefur lengi verið, og aðrar hönnunaraðferðir (m. a. Superpave) hafa verið teknar í notkun í sumum löndum.

8. Ályktanir

Af þeim upplýsingum sem liggja fyrir er engan veginn á hreinu hvort og hversu mikið skrið er í íslensku malbiki, þótt líkur bendi miklu fremur til að það sé lítið en mikið. Til að komast að hinu sanna þarf kerfisbundnar mælingar á skriði, líklega um nokkurra ára skeið. Þá fyrst er tímabært að meta hvort einhverjar gagnráðstafanir eru nauðsynlegar og hverjar henti best. Óraunhæfar kröfur um lágt sig í Marshallprófi eða hækkaða holrýmnd til að draga úr skriði geta haft eftirköst sem koma niður á endingu malbiksins, sérstaklega í slitlögum, og verði kröfunum breytt frá því sem nú er, verður að gæta þess að förna ekki minni hagsmunum fyrir meiri.

HEIMILDIR

- Asphalt Institute. 1989. *The Asphalt Handbook*. Manual Series No. 4 (MS-4). 1989 Edition, Asphalt Institute, Lexington.
- Ásbjörn Jóhannesson, Sigursteinn Hjartarson, Valur Guðmundsson. 1998. *Hjólframmyndun í malbiki að sumarlagi – lokaskýrsla*. BUSL – Slitlaganefnd. Skýrsla S-5, Reykjavík.
- Ásbjörn Jóhannesson, Sigursteinn Hjartarson, Valur Guðmundsson. 2000. *Tilraunakaflar Steinefnanefndar á Sæbraut – lokaskýrsla*. BUSL – Slitlaganefnd. Skýrsla S-15, Reykjavík.
- Ásbjörn Jóhannesson. 2005. *Superpave*. Unnið fyrir Rannsókn- og þróunarsjóð Vegagerðarinnar. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, skýrsla nr. 05-04. Reykjavík.
- Bergþóra Kristinsdóttir. 1999. *Íslenskt malbik – ákvörðun aflfræðilegra eiginleika*. Meistaraverkefni. Umhverfis- og byggingaverkfræðiskor. Verkfræðideild Háskóla Íslands, Reykjavík.
- Elisabet S. Urbancic. 1998. *Aflfræðilegir eiginleikar íslensks slitlags – ákvörðun í tilraunastofu*. MS – verkefni. Háskóli Íslands, verkfræðideild, Reykjavík.
- FAS. Án ártals. *Asfaltbeläggning och –massa. Bestämning av deformationsresistens med dynamisk kryptest*. FAS Metod 468-00. Föreningen för Asfaltbeläggningar i Sverige, Stockholm.
- Foster, Charles R. 1985. *The Strength of Asphalt Pavements*. Asphalt Paving Technology 1985. Proceedings. The Association of Asphalt Paving Technologists, Minneapolis.
- SHRP. 1995. *SHRP Superpave Binder Selection Program: SHRPBIND, Version 2.1*. Developed for Federal Highway Administration, Pavement Performance Division, Virginia, USA.
- Sigurður Erlingsson. 2001. *Skoðun á hegðun slitlaga, lagfærðum með „Repave“ aðferð*. Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, Reykjavík.
- Tayebali, Akhtarhusein A., Huang, Y. 2004. *Performance Grading of Bitumen B-180 and B-85 Used in Iceland*. Final Report. Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh.
- Vägverket. 2000. *Vägunderhåll 2000*. Kapitel 6 Bitumenbundna lager. VV Publ 2000:72. Vägverket, Borlänge.
- White, Thomas D. 1985. *Marshall Procedures for Design and Quality Control of Asphalt Mixtures*. Asphalt Paving Technology 1985. Proceedings. The Association of Asphalt Paving Technologists, Minneapolis.
- Wiman, Leif G. 2000. Upplýsingar í tölvupósti frá Þóri Ingasyni, fengnar hjá Leif G. Wiman, Väg och transportforskningsinstitutet, Linköping. Tölvupóstur dagsettur 2. febrúar 2000.

FRÓÐLEIKUR UM FESTU OG SIG

Mælingar á festu og sigi eru hluti af einni af mörgum hönnunaraðferðum fyrir malbik, Marshallaðferðinni. Festan er mælikvarði á nokkurs konar brotþol malbikssívalnings, sem liggur á hliðinni í sívalningslaga móti sem er opið til endanna en skorið sundur á hliðunum. Sigið er mælikvarði á aflögun malbikssívalningsins þegar álagið nær hámarki í brotþolsprófinu. Aðferðin var þróuð um 1940 og er af mörgum talin úrelt, en er samt sem áður langtum algengasta aðferðin til að ákvarða heppilega samsetningu malbiks, meðal annars vegna þess að með tímanum hefur safnast upp geysimikil reynsla af notkun hennar. Hún er fremur einföld, fljótleg og tiltölulega ódýr og hana er hægt að nota jafnt til hönnunar sem eftirlits. Aðferðin er fyrst og fremst ætluð fyrir heitblandað malbik með hámarks kornastærð 25 mm og tiltölulega þéttan sáldurferil. Síðastnefnda ákvæðið gerir að álitamáli hvort Marshallaðferðin er heppileg til að hanna SMA.

Megintilgangurinn með hönnun eftir Marshallaðferðinni er að ákvarða hæfilegt bindiefnismagn í malbiksblöndu, meðal annars með tilliti til skriðeiginleika og holrýmdar. Á síðari árum hefur „Superpave“-aðferðin veitt henni nokkra samkeppni, en nánast eingöngu vestanhafs.

Tilgangurinn með mælingum á festu og sigi í Marshallprófi er að meta mótstöðu malbiksins gegn skriði [Asphalt Institute 1983, bls. 75] en aðferðin hefur sætt mikilli gagnrýni. Meðal annars er þjöppunin ólík því sem gerist við útlögn, Marshallþjöppunin er eingöngu lóðrétt höggálag en þjöppun með valta er sambland af lóðréttu höggálagi og hnoði. Að þessu leyti er snúð(gyrotory-)þjöppun raunhæfari. Í annan stað er sjálf prófunin óraunhæf; bæði er prófunarhitastigið (60 °C) hærra en gerist í slitlagi í norrænum löndum og álagið í prófuninni er ekkert líkt því sem gerist í slitlagi undir umferð [NVF-33 1985, bls. 18-19]. Aðrar aðferðir til að meta hættu á skriði eru raunhæfari svo sem hjólfarapróf (wheel tracking test), sigpróf (creep test) og sveiflandi ein- eða þríasapróf svo nokkrar séu nefndar. Sú síðastnefnda þarf dýran og flókinn tækjabúnað og hefur því ekki náð víðtækri útbreiðslu enn sem komið er.

Kröfur um lágmarks festu eru gerðar til að takmarka líkur á skriði. Þar með er ekki sagt að mjög há festa sé eftirsóknarverð, hún getur komið niður á endingu malbiksins [Asphalt Institute 1983, bls. 77]. Sveigjanleiki slitlagsins og sig í Marshallprófi eru talin fylgjast að og minna sig en tveir mm er talið óheppilegt, þá verði slitlagið fremur stíft og stökkt og líklegt til að springa. Á hinn bóginn er talið óheppilegt að sig fari yfir 4,5 mm, en það er oft fylgífiskur lágrar festu [Krebs 1971, bls. 399]. Malbik með óeðlilega hárra festu og lágu sigi samtímis er talið óheppilegt á veikburða undirbyggingu vegna skorts á sveigjanleika og hættu á sprungum [Sargious 1975, bls. 218]. Um 1970 lögðu hollenskir vísindamenn til að stífni¹⁷ (hlutfallið milli festu og sigs) yrði notað sem mælikvarði á mótstöðu gegn skriði [Foster 1985, bls. 315]. Þetta hlutfall hefur víða verið tekið upp í kröfur.

Tafla 1. Marshallkröfur í norskum verklýsingum.

Ab svarar til SL og Ag svarar til BRL.

Malbiksgerð	Festa kN	Sig mm	Stífni kN/mm
Ab, ÁDU < 5000	>4,0	1,5-4,6	>1,10
Ab, ÁDU > 5000	>5,5	1,5-4,0	>2,15
SMA, ÁDU < 15000	>4,5	1,5-4,6	>1,60
SMA, ÁDU > 15000	>6,0	1,5-4,0	>2,30
Ag, efra burðarlag	>3,0	-	-
Ag, neðra burðarlag	>2,0	-	-

¹⁷ Það kann að vera álitamál hvort stífni er rétta orðið í þessu sambandi. Norskar verklýsingar nota orðið „stivhet“ fyrir hlutfall festu og sigs en EN-staðlarnir nota „stiffness“ fyrir niðurstöður einásaprófs með sveiflandi álagi.

Í norskum verklýsingum [Statens vegvesen 2005, bls. 218 og 283-284] eru gerðar kröfur til festu, sigs og stífni. Kröfurnar eru mismunandi eftir umferð, sjá töflu 1, og eru miðaðar við 2 x 75 högga þjöppun í Marshallprófi (venjulegra er að miða við 2 x 50 högg).

Í sænskum verklýsingum [Vägverket 2005, bls. 13-19] eru ekki gerðar kröfur til festu eða sigs (þar er Marshallaðferðin eingöngu notuð sem hjálpartæki við ákvörðun á holrýmdareiginleikum malbiksins). Kröfur um skriðmótstöðu er aðeins gerðar til bindilags og þá er einásapróf með sveifluálagi notað til að meta hana [Vägverket 2005, bls. 12].

Finnskar verklýsingar [PANK 2000] gera ekki ráð fyrir mælingum á festu og sigi. Þess í stað er mótstaða gegn skriði metin með hjólfaraprófi (wheel tracking test) eða skriðprófi (repeated load creep test).

Í núgildandi verklýsingum Vegagerðarinnar [Alverk '95, bls. 28] eru gerðar kröfur um festu, sig og stífni eftir þjöppun í Marshallprófi með 2 x 50 höggum, sjá töflu 2.

Tafla 2. Kröfur til festu, sigs og stífni malbiks í Alverk '95.

Malbiksgerð	Festa kN	Sig mm	Festa/sig kN/mm
Slitlagsmalbik	= 4,5	1,5-4,0	=1,0
Undirlagsmalbik	= 3,5	1,5-4,0	=0,8

Í staðli [ÍST EN 13108-1:2006, bls. 20-22] fyrir hefðbundið malbik (asphalt concrete) er ákvæði um festu, sig og stífni. Ákvæðið tekur þó því aðeins gildi að malbikið sé ætlað á flugbrautir. Samsvarandi staðall fyrir SMA [ÍST EN 13108-5:2006] hefur engin ákvæði um festu, sig og stífni. Hins vegar eru ákvæði í báðum stöðlum um prófun á mótstöðu gegn skriði með hjólfaraprófi (wheel tracking test) [ÍST EN 13108-1:2006, bls. 15-17 og ÍST EN 13108-5:2006, bls. 17-19].

Því hefur verið haldið fram að skrið í malbiki sé ekki til teljandi vandræða á Norðurlöndunum, nema undir sérstökum kringumstæðum svo sem á akreinum strætisvagna eða annarsstaðar þar sem umferð þungra bíla er mikil. Á hinn bóginn sé líklegt að hönnunin standi stundum tæpt (a.m.k. í Finnlandi) þannig að lítilsháttar breytingar í bindiefnisinnihaldi eða sáldurferli geti leitt til skriðs sem nemi þriðjungi eða jafnvel helmingi af hjólfaramynduninni í heild. Sömuleiðis geti hluti skriðs af hjólfaramyndun verið margfalt meiri á hlýju og sólríku sumri en í venjulegu veðurfari [NVF-33 1985, bls. 19]. Hérlandis er sjaldgæft að sjá veruleg merki um skrið í malbiki á höfuðborgarsvæðinu nema þá helst á biðstöðvum strætisvagna á einstaka stað. Væg merki um skrið má þó stundum sjá við umferðarljós á gatnamótum og einnig á bílastæðum (sem þar getur líka stafað af sigi í undirbyggingu að einhverju leyti).

Af stöðlum um malbik (ÍST-EN) má sjá að prófanir á skriðþoli með mælingum á festu og sigi eru á undanhaldi en hjólfarapróf og prófanir með sveiflandi álagi að koma í staðinn. Á hinn bóginn skortir okkur nánast alla reynslu af slíkum prófunum og þar sem íslenskt veðurfar er talsvert frábrugðið því sem gerist í nágrannalöndum er ekki sjálfgefið að taka kröfur þeirra til skriðþols upp óbreyttar. Festa og sig hefur verið mælt á sýnum af íslensku malbiki svo áratugum skiptir og þannig hafa safnast upp miklar upplýsingar um þessa eiginleika sem má nota til að setja kröfur um festu og sig með hliðsjón af íslensku veðurfari, svo fremi slíkar kröfur brjóti ekki í bága við ÍST-EN staðlana. En til að svo megi verða vantar tölfraðilega samantekt á niðurstöðunum.

Sem stendur sýnist vænlegast að nota festu og sig sem mælikvarða á skriðmótstöðu malbiks, en taka jafnframt upp prófanir á skriðþoli í samræmi við EN-staðlana og nota næstu ár til samræmingar. Þar sem hitastig í malbiki er lægra hérlandis en í nágrannalöndum ættum við að vera öruggu megin með sömu kröfur til festu og sigs og þar tíðkast, til dæmis í Noregi, sjá töflu 1. Sennilega er auðvelt fyrir okkur að uppfylla norsku kröfurnar um festu og sömuleiðis lægri mörkin fyrir sig. Hærri mörkin fyrir sig eru aftur á móti of lág fyrir íslenskar aðstæður, hér er alvanalegt að sig fari yfir 4,6 mm án þess að það þyki tiltökumál, enda þótt verklýsingar Vegagerðarinnar leyfi ekki meira sig en 4,0 mm. Hátt sig hérlandis stafar vafalítið af háu bindiefnisinnihaldi, sem að sínu leyti má rekja til viðleitni til að halda holrýmdinni niðri eins

og kostur er. Í annan stað getur verið kostur að hafa sig í hærra lagi á þjóðvegum til að forðast sprungumyndun í slitlaginu. Þeir eru stundum byggðir á misjafnri undirstöðu og eiga til að síga með tilheyrandi hættu á sprungum.

Kröfur norsku verklýsinganna til stífni eru vægar meðan umferðin er undir 5000 ÁDU og sennilega auðvelt að uppfylla þær. Öðru máli gegnir þegar umferðin er meiri en 5000 ÁDU, sér í lagi ef SMA á í hlut. Í þessum tilvikum er verulegum erfiðleikum bundið að uppfylla norsku kröfurnar vegna þess að sigið er hærra héraðs en tíðkast í Noregi.

Slitlaganefnd samdi á sínum tíma tillögur að kröfum fyrir festu og sig sem eru sýndar í töflu 3 [Ásbjörn Jóhannesson 2000]. Þær eru miðaðar við 50 högga þjöppun. Nefndin lagði ekki fram tillögur að kröfum um stífni. Rétt er að benda á að krafa um 7,0 kN festu í burðarlagi sýnist vera ríflega til tekin, en hún er sótt í danskar verklýsingar [Vejdirektoratet – Vejregelutvalget 1994, bls. 7 og 13] fyrir burðarlög í vegum með mikla eða þunga umferð.

Tafla 3. Tillögur Slitlaganefndar að kröfum fyrir festu og sig í nokkrum malbiksgerðum.

Malbiksgerð	Festa kN	Sig mm
SL 8	= 4,0	1,5-5,5
SL 11	= 4,0	1,5-5,5
SL 16	= 4,0	1,5-6,0 ¹⁸
SMA 8	= 5,0	1,5-5,5
SMA 11	= 5,0	1,5-5,5
SMA 16	= 5,0	1,5-5,5
BNL 11	= 3,5	1,0-5,0
BNL 16	= 3,5	1,0-5,0
BRL 16	= 3,5 ¹⁹	1,0-5,0
BRL 22	= 3,5 ¹⁹	1,0-5,0

Með hliðsjón af framanskráðu er lagt til að fyrst verði gengið úr skugga um hvort okkur er heimilt að gera kröfur um festu og sig þótt ekki sé gert ráð fyrir þeim í ÍST-EN nema í undantekningartilfellum. Sé svo, er næst að kanna hvaða kröfur er raunhæft að gera til festu og sigs með hliðsjón af mælingum undanfarinna ára og setja þær fram til bráðabirgða. Jafnframt þarf að hefja mælingar, annars vegar á skriðþoli á malbikssýnum í samræmi við ÍST-EN, hins vegar á skriði í samskonar malbiksgerðum undir umferð og veðurfarsaðstæður héraðs. Þegar nægileg reynsla er fengin er hægt að setja fram tillögur að kröfum um skriðþol. Í töflu 4 eru birtar tillögur að kröfum sem má nota í millitíðinni, t. d. í næstu útgáfu af verklýsingum Vegagerðarinnar.

¹⁸ Þessi tala er líklega villa, á sennilega að vera 5,5.

¹⁹ =7,0 kN ef umferð er þung og liggur í hjólförum.

Tafla 4. Tillögur að kröfum til festu, sigs og stífni fyrir nokkrar malbiksgerðir.

Malbiksgerð	Festa kN	Sig mm	Stífni kN/mm
SL 8	= 4,0	1,5-5,5	>1,0
SL 11	= 4,0	1,5-5,5	>1,0
SL 16	= 4,0	1,5-5,5	>1,0
SMA 8	= 5,0	1,5-5,5	>1,2
SMA 11	= 5,0	1,5-5,5	>1,2
SMA 16	= 5,0	1,5-5,5	>1,2
BNL 11	= 3,5	1,0-5,0	>1,5
BNL 16	= 3,5	1,0-5,0	>1,5
BRL 16	= 3,5	1,0-5,0	>2,0
BRL 22	= 3,5	1,0-5,0	>2,0

HEIMILDIR

- Alverk '95. 1995. *Almenn verklýsing fyrir vega- og brúargerð*. Vegagerðin. Reykjavík.
- Asphalt Institute. 1983. *Principles of Construction of Hot-Mix Asphalt Pavements*. The Asphalt Institute Manual Series No. 22. Maryland.
- Ásbjörn Jóhannesson, Sigursteinn Hjartarson og Valur Guðmundsson. 2000. *Endurskoðun á markalínum fyrir malbik – lokaskýrsla*. BUSL – Slitlaganefnd. Skýrsla S-16. Reykjavík.
- Foster, Charles F. 1985. *The Strength of Asphalt Pavements* (discussion). Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists. Ann Arbor.
- ÍST EN 13108-1:2006. *Malbiksblöndur – Efnislýsingar – Hluti 1: Malbik*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- ÍST EN 13108-5:2006. *Malbiksblöndur – Efnislýsingar – Hluti 5: Steinríkt malbik (SMA)*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- Krebs, Robert D., Richard D. Walker. 1971. *Highway Materials*. McGraw-Hill Book Company. New York.
- NVF-33. 1985. *Materialegenskaper og funksjonskrav for varmblandede dekker og bærelag*. Nordisk Vegteknisk Förbund. Utvalg 33 Asfaltbelegninger. Rapport nr. 5.
- PANK. 2000. *Finnish Asphalt Specifications 2000*. Finnish Pavement Technology Advisory Council. Helsinki.
- Sargious, M. 1975. *Pavements and Surfacing for Highways and Airports*. Applied Science Publishers Ltd. London.
- Statens vegvesen. 2005. *Håndbok 018. Vegbygging*. Statens vegvesen. Oslo.
- Vägverket. 2005. *ATB VÄG 2005. Kapitel I Typblad, kontrollblad, bindemedel och konstruktionstyper för bitumenbundna lager*. VV Publ 2005:112. Borlänge.
- Vejdirektoratet – Vejregelutvalget. 1994. *Vejregler. Udbuds- og anlægskrifter. Varmblandet asfalt*. Almindelig arbejdsbeskrivelse (AAB).

HOLRÝMD Í BURÐARLAGSMALBIKI

Meginhugmyndin á bak við tillögurnar í skýrslu Slitlaganefndar [Ásbjörn Jóhannesson o. fl. 2000] var að gera ekki meiri kröfur til sáldurferils malbiks en nauðsynlegt væri, en leggja áherslu á aðra eiginleika til að tryggja nauðsynleg gæði. Á þessari forsendu voru mörk fyrir sáldurferla valin þannig að leyfðir sáldurferlar samkvæmt Alverk '95 svo og norskum og sænskum verklýsingum, rúmuðust innan markanna, þeim stillt upp til bráðabirgða á þeirri forsendu að fyrst vægar kröfur gætu gengið erlendis, þá væri líklegt að þær gætu gengið hér líka. Síðan var reynt að meta hvort þetta væri raunhæf afstaða og mörkin þrengd aftur ef gild ástæða var fyrir hendi. Tillögur að öðrum kröfum, þar á meðal um holrýmd, voru gerðar með tilliti til íslenskar reynslu.

Þegar kröfur eru settar um holrýmd í burðarlagi þarf að hafa í huga að:

- Það getur verið varhugavert að leyfa mjög mikla holrýmd í smágerðu burðarlagsmalbiki vegna þess að þá getur malbikið þjappast saman undir umferð og orsakað hjólför (sig) í slitlaginu. Hvar á að setja mörkin er álitamál, en líkast til gerist þetta ekki að neinu ráði meðan holrýmdin er undir 10 %.
- Það er fremur ólíklegt að hitastigssveiflur verði miklar í burðarlagi (sem liggur 10 cm eða meira undir yfirborði). Ef til vill eru til mælingar á þessu (á Grensásvegi) eða reiknilíkön sem meta þetta. Alténd er minni hætta á skriði í burðarlagi vegna sumarhita en í lögnum fyrir ofan. Sömuleiðis má gera ráð fyrir að mismunur milli landa í hitafari (og veðurfari) hafi minni áhrif á hönnun burðarlags en efri lög í veghlotinu. Á þessari forsendu hefur það nokkuð til síns máls fara ekki niður fyrir lágmarksholrýmd í erlendum verklýsingum, en það sýnist heldur ekki ástæða til að gera strangari kröfur.
- Álagið er væntanlega farið að farið að dreifast verulega þegar komið er niður í bikbundið burðarlag (þá er gert ráð fyrir bindilagi og slitlagi fyrir ofan).
- Hérlendis hefur ekki tíðkast að gera kröfur um sérstakt bikbundið burðarlag (auk bindilags og slitlags) nema þar sem umferð er mikil eða þung. Þar af leiðandi sýnist rökrétt að miða kröfur til bikbundins burðarlags við mikla eða þunga umferð.
- Mikil holrýmd (> 10 %) í burðarlagi hefur eina jákvæða hlið; það er minni hætta á að vatn, sem af einhverri ástæðu kemst niður í gegnum slit- og bindilag, safnist fyrir í eða ofan við burðarlagið. Sennilega er þó lítil hætta á þessu ef allt er með felldu. Svo má líta á þetta frá öðru sjónarmiði; er æskilegt að hafa burðarlagið þétt til að varna vatni að komast neðan frá inn í burðarlag og bindilag? Sennilega á þetta sjónarmið alveg jafn mikinn rétt á sér eins og hitt, því slitlagið er (eða á að vera) þétt.
- Lág holrýmd hefur jákvæð áhrif á þreytuþol malbiks. Ef fyllt holrýmd er meiri en 50 % eru áhrifin þó óveruleg [NVF 33 1985, bls. 35].
- Ef burðarlag er notað sem bráðabirgðaslitlag (veturinn eftir útlögn) er rétt að halda holrýmdinni niðri.

Með hliðsjón af þessum punktum og töflu 1 hér á eftir sýnist ekki skipta ýkja miklu máli hvaða kröfur eru gerðar til holrýmdar í burðarlagi. Í norsku verklýsingunum [Statens vegvesen 2005, bls. 218] er lágmark holrýmdar í burðarlagi sett 2 %, og verður að teljast líklegt að lágmarkið sé valið nægilega hátt til að útiloka skrið. Norsku verklýsingarnar leyfa 8 % hönnunarholrýmd í efra burðarlagi sem sennilega er nokkuð mikið, ekki síst ef þjöppunarkrafan er aðeins 95 %, og helsta ástæðan er möguleiki á sigi (sem er þó léttvæg, því áhrifin frá siginu hverfa með fyrstu yfirlögn). Á hinn bóginn leyfa norsku verklýsingarnar allt að 12 % hönnunarholrýmd í neðra burðarlagi. Með hliðsjón af sænsku verklýsingunum [Vägverket 2005, bls. 4] er þó líklega til bóta að breyta holrýmdarkröfunum frá því sem tilgreint er í S-16 þannig að þær verði:

- Fyrir BRL 16: 2,0-6,0 % (2,0-4,0 sem bráðabirgðaslitlag).
- Fyrir BRL 22: 2,0-6,0 % (2,0-4,0 sem bráðabirgðaslitlag).

Þá ætti holrýmd í útlögðu burðarlagi í hæsta lagi að fara í 11 %, miðað við 95 % þjöppunarhlutfall. Hvað kröfur um holrýmd í bráðabirgðaslitlagi varðar er tæpast ástæða til að hrófla við þeim, hætta á skemmdum á einum vetri er líkast til óveruleg þótt holrýmdin sé 4 % (6 % í útlögðu malbiki, miðað við 98 % þjöppunarhlutfall en það verður að tiltaka í kafla um holrýmd í útlögðu malbiki).

Tafla 1. Hönnunarkröfur til holrýmdar í malbiki, (Marshallholrýmd), takmarkaðar við 160/220 sem bindiefni, teknar úr nokkrum heimildum. Í núgildandi verklýsingum Vegagerðarinnar [Alverk '95] eru ekki settar fram kröfur til holrýmdar í burðarlagsmalbiki.

Verklýsing	BUSL S-16		ATB VÄG 2005		Vegbygging 2005			
	Minnst	Mest	Minnst	Mest	Neðra burðarlag		Efra burðarlag	
Burðarlagsgerð	Minnst	Mest	Minnst	Mest	Minnst	Mest	Minnst	Mest
AG 16			4,0	6,0				
AG 22*			3,0	9,0				
AG 32*			3,0	9,0				
BRL 16	2,0	8,0						
BRL 22	2,0	8,0						
BRL 32	-	-						
AG (<11,2 mm)**					2	14	-	-
AG (>11,2 mm)**					2	12	2	8

*Miðast við sýni úr tilraunakafla í byrjun verks. Taflan sýnir gildi á einstökum sýnum, en meðaltal 5 sýna skal vera á bilinu 3-7 %.

** Marshallþjöppun skal vera 2 x 75 högg.

HEIMILDIR

- Alverk '95. 1995. *Almenn verklýsing fyrir vega- og brúargerð*. Vegagerðin. Reykjavík.
- Ásbjörn Jóhannesson, Sigursteinn Hjartarson og Valur Guðmundsson. 2000. *Endurskoðun á markalínunum fyrir malbik – lokaskýrsla*. BUSL – Slitlaganefnd. Skýrsla S-16.
- NVF 33. 1985. *Materialegenskaper og funktionskrav for varmblandede dekker og bærelag*. Nordisk vegteknisk forbund. Utvalg 33 – Asfaltbelegninger. Rapport nr. 5, 1985.
- Statens vegvesen. 2005. *Håndbok 018 Vegbygging*. Statens vegvesen. Oslo.
- Vägverket. 2005. *ATB VÄG 2005. Kapitel I Typblad, kontrollblad, bindemedel och konstruktionstyper för bitumenbundna lager*. VV Publ 2005:112. Borlänge.

FRÓÐLEIKUR UM HOLRÝMD OG ÞJÖPPUNARHLUTFALL

Algengustu aðferðir til að tilgreina þjöppun eru [Hunter 1994, bls. 210, í lauslegri endursögn]:

- Samanburður á rúmþyngd borkjarna, teknum úr slitlagi, og rúmþyngd sýna sem eru þjöppuð samkvæmt staðli, svo sem Marshallkjarna, þ. e. rúmþyngd í slitlagi í % af rúmþyngd Marshallkjarna (þjöppunarhlutfall²⁰).
- Samanburður á rúmþyngd borkjarna, teknum úr slitlagi, og eðlisþyngd²¹ sama malbiks (þetta er hefðbundna aðferðin hérlendis, tilgreinir rúmmálshluta lofts í borkjarnanum í %).
- Samanburður á rúmþyngd borkjarna, teknum úr slitlagi, og höfnunarrúmþyngd²² sem er ákveðin á rannsóknastofu.

Önnur heimild [Brown 1990, næsta blaðsíða framan við bls. 1] nefnir eina aðferð til viðbótar:

- Hlutfall af þjöppun í tilraunakafla²³.

Þjöppun skiptir ótvírætt miklu máli fyrir endingu malbiks og því til stuðnings má draga fram fjöldann allan af rannsóknaniðurstöðum. Hunter (bls. 219) segir til dæmis að þjöppunin þurfi sérstakrar aðgæslu við, annars sé hættu á verulega skertri endingu. Brown (bls. 1) telur holrýmd í malbiki að öllum líkindum vera mikilvægasta einstaka eiginleika malbiks með tilliti til skila²⁴. Hann vitnar í ýmsar heimildir og kemst að þeirri niðurstöðu að holrýmd eigi að vera á bilinu 3-8 % (þriggja prósentu krafan er miðuð við holrýmd eftir að viðbótarþjöppun frá umferð er um garð gengin). Ekki undir 3 % því þá sé hættu á skriði²⁵ og ekki yfir 8 % því þá verði slitlagið lekt, vatn og loft (súrefni andrúmsloftsins gerir bindiefnið stökkt) geti þá valdið skemmdum á slitlaginu. Frostman (bls. 44) vitnar í þýska rannsókn sem ályktar að malbik sé þétt ef holrýmdin er undir 3 %, svo til þétt (praktískt taget tät) ef holrýmdin er 3-5 %, óverulega lekt (ringa genomslæplig) ef holrýmdin er 5-8 % en lekt ef holrýmdin er meiri.

Hultqvist (bls. 5) kemst svo að orði: „I en tungt trafikerad asfaltbeläggning anses risken för plastisk deformation öka om hålrums halten är < 2 %...“. Í þessu sambandi má taka fram að Svíar hafa lækkað Marshallholrýmd í algengum slitlögum. Í sænskum verklýsingum, ATB VÄG 2005 [Vägverket 2005, bls. 14 og 18] er leyfð holrýmd 1,5-3,5 % í hefðbundnu 11 og 16 mm yfirlagsmalbiki og 2,0-3,5 % í 11 og 16 mm SMA, en í eldri verklýsingum, VÄG 94 [Vägverket 1994, bls. 43-51], sem tók gildi 1994, eru holrýmdarkröfur fyrir sömu malbiksgerðir 2,4-4,4 % (yfirlagsmalbik), 2,9-4,9% (SMA 11) og 2,4-4,4 % (SMA 16) svo holrýmdin virðist hafa verið lækkuð um 1 % eða þar um bil. Í borkjörnum má holrýmd vera á bilinu 1,5-5,5 % í yfirlagsmalbiki og SMA [Vägverket 2005, bls. 13-19]. Áðurnefndar kröfur gilda fyrir malbik með 160/220 (áður B180) sem bindiefni. Allt þetta bendir til þess að Svíar telji mikilvægt að halda holrýmd niðri, ekki síst í ljósi þess að sumarhitar eru meiri þar en hér, og hættu á skriði að sama skapi meiri. Því má bæta við að þjöppunarkrafa, sem var í VÄG 94 hefur verið tekin út í ATB VÄG 2005.

Ekki hefur verið kannað hvort einhverjar svipaðar breytingar á holrýmd hafa verið gerðar í Noregi.

Því má heldur ekki gleyma að eiginleikar steinefnisins svo sem brothlutfall og lögun skipta máli fyrir líkur á skriði, sömuleiðis hlutfall mélu (filler) í steinefninu og bindiefni í malbikinu. Þess vegna er ekki rétt að einblína á holrýmd þegar hættu á skriði er metin. EN-staðlarnir gera líka ráð fyrir að skriðeiginleikar malbiksins séu prófaðir.

Áherslu á þjöppun má túlka þannig að það sé ekki nóg að holrýmdin sé lítil, það þurfi einnig að tryggja að malbikið sé pressað eins vel saman (hátt þjöppunarhlutfall) og hægt er með góðu móti (án þess þó að holrýmdin verði of lítil, það má fyrirbyggja með sáldurferli malbiksins). Að öðrum kosti verði malbikið laust í sér sem býður upp á sig og skrið. Hátt

²⁰ *Þjöppunarhlutfall*; á ensku: *percent of laboratory density*.

²¹ *Eðlisþyngd*; notað hér sem þýðing úr ensku: *theoretical density*.

²² *Höfnunarrúmþyngd*; á ensku: *percentage refusal density*, stundum táknnað PRD.

²³ *Þjöppun í tilraunakafla*; notað hér sem þýðing úr ensku: *percent of control strip*.

²⁴ *Skil*; á ensku: *performance*.

²⁵ *Skrið*; á ensku: *deformation*.

Þjöppunarhlutfall eykur stífní malbiksins [Frostman 1984, bls. 57] en þá er að vísu meiri hætta á að það springi á lélegri undirbyggingu. Á þessari forsendu getur skipt máli að tiltaka þjöppunarhlutfall (ekki bara holrýmd) í útlögðu malbiki, þótt líklegt sé að negldir hjólbarðar muni hafa miklu meiri áhrif á endingu þess en þjöppunarhlutfallið.

Í skýrslu um Superpave [Ásbjörn Jóhannesson 2005, bls. 27] er ályktað að bindiefni það sem mest er notað hérlendis (160/220) henti ágætlega fyrir íslenskar aðstæður og þoli allt að 58 °C en hitafar hérlendis geri aðeins kröfu um 34 °C (46 °C við verstu aðstæður). Það gæti því verið mögulegt að lækka neðri mörk holrýmdar á þessari forsendu, en sem stendur er ekki ljóst hvort svo er, né heldur hvernig hentugast væri að meta það.

Vafalítið er mikilvægt að missa ekki sjónar á sérstöðu okkar hvað veðurfar varðar. Við búum við örar frostþíðusveiflur, blautar götur langtímum saman að vetrarlagi og gropin steinefni. Vísast má færa rök að því að þessar aðstæður reyni mikið á malbikið; lág holrýmd og þykk bindiefnishimna á steinefnunum sé hvort tveggja æskilegt undir þessum kringumstæðum til að koma í veg fyrir skemmdir. Hátt bindiefnisinnihald vinnur líka gegn sprungum í malbiki þar sem undirbyggingin er ekki upp á það besta, malbikið lagar sig þá frekar að hreyfingum í henni. Sömuleiðis er vafasamt að malbik með holrýmd yfir 4-5 % sé nægilega þétt fyrir íslenskar aðstæður, en afgerandi dæmi því til stuðnings eru ekki tiltæk. Þó hefur líka verið sýnt fram á að vatn fer með tímanum gegnum bindiefni sem hefur verið roðið í þunnu lagi á glerplötur, svo það er heldur ekki þétt [Fromm 1974, bls. 217]. Rannsóknir hafa líka sýnt [NVF 33 1985, bls. 55] að saltblandað vatn smýgur gegnum bindiefnishimnuna.

Halldór Torfason hjá Malbikunarstöðinni Höfða hf telur að lauslega áætlað liggi holrýmd í útlögðu malbiki um 1 % ofan við Marshallholrýmd. Hann telur þó að 1 % mismunur (99 % þjöppun) sé naumt skammtað. Hann staðfesti að Torbjörn Jakobson hafi komið hingað fyrir nokkrum árum, skoðað götur og gert skýrslu þar um. Hann hafi ekki sett út á hátt bindiefnisinnihald hérlendis.

Halldór gat þess einnig að hátt bindiefnisinnihald hefði verið kært vegna banaslyss sem varð á Kringlumýrarbraut fyrir nokkrum árum. Hátt bindiefnisinnihald hefur tilhneigingu til að mynda feita bletti í SMA.

Reynsla undanfarinna ára bendir til sveiflukenndrar endingar á malbiki á götum Reykjavíkur. Hún gæti stafað af breytingum á holrýmd eða bindiefnisinnihaldi. Þegar skriðs verður vart er reynt að bæta úr því með hærri holrýmd og þegar skemmdir aukast vegna hárrar holrýmdar er bindiefnisinnihaldið aukið á nýjan leik. Sé það hins vegar rétt að skrið sé 10-15 % af hjólfaramynduninni er það farið að skipta máli í endingu, það svarar um það bil til þess að hún minnki um eitt ár. Vandinn er að finna út hversu langt niður má fara með holrýmdina án þess að það komi verulega að sök, og svarið er vandfundið.

Enn ein hugdetta; er líklegt til árangurs að nota harðara bindiefni og meira af því, vinna þannig samtímis gegn skriði og skemmdum? Gallinn á þessu er sá að þunnum lögnum úr hörðu malbiki hættir við að krossspringa (chicken wire cracking) ef þær liggja á lélegri undirbyggingu.

Að síðustu fáein orð um sambandið milli holrýmdar í útlögðu malbiki og þjöppunarhlutfalls:

- a) Ef áskilið þjöppunarhlutfall (percentage reference density) er miðað við eðlisþyngd rúmþyngd og gefið upp sem p % má finna holrýmdina sem $100-p$.
Dæmi: Ef áskilin þjöppun er 98 % verður holrýmdin 2 %.
- b) Ef áskilið þjöppunarhlutfall (percentage reference density) er miðað við þjöppun á rannsóknastofu (t. d. Marshallþjöppun) og gefið upp sem p % má finna holrýmdina sem $100-p \cdot q/100$ þar sem q er hlutfallsleg þjöppun í Marshallprófi í %. Ef p og q eru hvorutveggja > 95 % má með góðri nálgun finna holrýmd í útlögðu malbiki sem $(100-p)+(100-q)=200-p-q$.

HEIMILDIR

- Ásbjörn Jóhannesson. 2005. *Superpave*. Skýrsla nr. 05-04. Unnið fyrir Rannsókn- og þróunarsjóð Vegagerðarinnar. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins.
- Brown, E. R. 1990. *Density of Asphalt Concrete – How Much is Needed*. NCAT Report No. 90-3. <http://ntl.bts.gov/lib/3000/3800/3898/rep90-3.pdf>
- Fromm, H. J. 1974. *The Mechanisms of Asphalt Stripping from Aggregate Surfaces*. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 43. Ann Arbor.
- Frostman, P. og B. Simonsson. 1984. *Massasammansætningens och packningsgradens inverkan på hållbarheten hos asfaltbetong*. Rapport till förbundsutskottsmötet i Stockholm 2 och 3 juni 1984. NVF Utskott 33 Asfaltbeläggningar.
- Hultqvist, Bengt-Åke. 1993. *Asfaltbelägningars deformationsegenskaper – Kunskapsöversikt*. VTI notat nr. V 205 Väg- och Trafikinstitutet.
- Hunter, Robert N. (editor). 1994. *Bituminous mixtures in road construction*. Thomas Telford, London.
- NVF 33. 1985. *Materialegenskaper og funktionskrav for varmblandede dekker og bærelag*. Nordisk vegteknisk forbund. Utvalg 33 – Asfaltbelegninger. Rapport nr. 5 1985.
- Vägverket. 1994. *Allmän teknisk beskrivning för vägkonstruktioner VÄG 94. 6. Bitumenbundna lager*. VV Publ 1994:26. Borlänge.
- Vägverket. 2005. *ATB VÄG 2005. Kapitel I Typblad, kontrollblad, bindemedel och konstruktionstyper för bitumenbundna lager*. VV Publ 2005:112. Borlänge.

ÞJÖPPUNARKRÖFUR FYRIR MALBIK

Hér kemur tvennt til greina:

- Tiltaka þjöppunarhlutfall, þ. e. rúmpýngd borkjarna úr útlögðu malbiki í % af Marshallrúmpýngd.
- Tiltaka holrýmd í útlögðu malbiki.

Fyrirgreinda aðferðin hefur einn augljósan kost. Hún gefur til kynna hversu mikið malbikið (sem þarf ekki endilega að vera nákvæmlega eins og hönnunin segir fyrir um) hefur verið þjappað miðað við þá þjöppun sem hönnunin gerði ráð fyrir að malbikið fengi. Ókosturinn er sá að þessi aðferð er dýr, auk holrýmdarmælinga á borkjarnanum þarf að hita malbikið upp og þjappa það í Marshallhamri til samanburðar ef vel á að vera. Ef malbikslagið er þunnt getur jafnvel þurft nokkra kjarna til að fá nóg efni í samanburðinn. Annar möguleiki er að miða við Marshallrúmpýngd úr hönnunarprófinu. Það er vafasamari aðferð, því útlagða blandan gæti verið eitthvað öðruvísi en hönnunarblandan og það gæti gefið ranga mynd af þjöppuninni og um þessa aðferð gæti orðið ágreiningur.

Síðarnefnda aðferðin er einfaldari og ódýrari. Gallinn á henni er sá að hún tryggir ekki að malbikið sé vel þjappað, aðeins að holrýmdin sé innan marka. Það er hugsanlegt að lág holrýmd náist með tiltölulega lítilli þjöppun, malbikið getur þess vegna verið laust í sér eftir þjöppun, ef svo má segja, þótt það sé ef til vill langsótt áhyggjuefni.

Þjöppunarkröfur fyrir burðarlagsmalbik samkvæmt fáeinum heimildum eru birtar í töflu 1. Í núgildandi útgáfu af verklýsingum Vegagerðarinnar [Alverk '95] eru engar þjöppunarkröfur tilgreindar fyrir burðarlagsmalbik sérstaklega. Þó segir (á bls. 59) að sé malbik lagt í tveimur lögum (eða fleiri) skuli holrýmd neðra lags (neðri laga) vera minni en 6 % og þetta ákvæði má túlka sem kröfu um holrýmd í burðar- eða bindilagi. Ákvæðið er ekki tekið inn í töflu 1, en í staðinn eru birtar tillögur Slitlaganefndar að kröfum til holrýmdar í burðarlagi [Ásbjörn Jóhannesson o.fl. 2000, bls. 34-39]. Norskar verklýsingar [Statens vegvesen 2005, bls. 281] gera kröfu um að holrýmdar- og þjöppunarkröfur séu uppfylltar samtímis. Sænskar verklýsingar [Vägverket 2005, bls. 5] setja fram holrýmdarmörk. Finnskar verklýsingar [PANK 2000, bls. 67] tiltaka þjöppun með holrýmdarkröfum.

Tafla 1. Þjöppunarkröfur fyrir burðarlagsmalbik samkvæmt nokkrum heimildum, tilgreindar sem holrýmd í borkjörnum eða þjöppunarhlutfall. Holrýmd er miðuð við stök sýni nema annað sé tekið fram. Í töflunni táknar Lm lágmark en Hm hámark.

Heimild	Tillögur Slitlaganefndar ²⁶				Sænskar verklýsingar ²⁷		Norskar verklýsingar ²⁸				Finnskar verklýsingar ²⁹	
	Holrýmd %		Þjöppunarhlutfall %		holrýmd %		Holrýmd %		Þjöppunarhlutfall %		holrýmd %	
Slitlagsgerð	Lm	Hm	Lm	Hm	Lm	Hm	Lm	Hm	Lm	Hm	Lm	Hm
BRL 16			95	-								
BRL 22			95	-								
BRL 32	4	10										
AG 16 ³⁰					3	8						
AG 22 ³⁰					3	8						
AG 32 ³⁰					3	8						
AG, efra b.lag							2	10	95	-		
AG, neðra b.lag							2	15	95	-		
ACB 22											-	8
ACB 32											-	8

²⁶ Ásbjörn Jóhannesson, 2000.

²⁷ Vägverket, 2005.

²⁸ Statens vegvesen, 2005.

²⁹ PANK, 2000.

³⁰ Á við meðaltal holrýmdar í tveim borkjörnum.

Í nágildandi útgáfu af verklýsingum Vegagerðarinnar [Alverk '95] er áskilið að holrýmd í borkjörnum úr slitlagi sé minni en 3 %, og eitt látið yfir allar slitlagsgerðir ganga. Í tillögum Slitlaganefndar [Ásbjörn Jóhannesson 2000] er lagt til að þjöppunarkrafan verði 98 % fyrir allar slitlagsgerðir. Í töflu 2 eru birtar þjöppunarkröfur fyrir slitlagsmalbik samkvæmt fáeinum erlendum heimildum. Á sama hátt og fyrir burðarlagsmalbik gera norskar verklýsingar [Statens vegvesen 2005, bls. 281] kröfu um að holrýmdar- og þjöppunarkröfur séu uppfylltar samtímis. Sænskar verklýsingar [Vägverket 2005, bls. 5] setja fram holrýmdarmörk. Finnscar verklýsingar [PANK 2000, bls. 67] tiltaka þjöppun með holrýmdarkröfum.

Tafla 2. Þjöppunarkröfur fyrir slitlagsmalbik samkvæmt nokkrum heimildum, tilgreindar sem holrýmd í borkjörnum eða þjöppunahlutfall. Kröfurnar eru miðaðar við 160/220 sem bindiefni og lagþykkt =80 kg/m².

Heimild	Sænskar verklýsingar ²⁷ holrýmd [%]		Norskar verklýsingar ²⁸				Finnscar verklýsingar ²⁹ holrýmd [%]	
	Lm	Hm	Holrýmd [%]		Þjöppunarkröfur [%]		Lm	Hm
Slitlagsgerð	Lm	Hm	Lm	Hm	Lm	Hm	Lm	Hm
ABT 8, Ab 8, AC 8	1,5	5,0 ³¹	2	5 ³²	98	-	-	7(8) ³³
ABT 11, Ab11, AC 11	1,5	5,0 ³¹	2	5 ³²	98	-	-	6(7) ³³
ABT 16, Ab 16, AC 16	1,5	5,0 ³¹	2	5 ³²	98	-	-	5(6) ³³
SMA 8, ABS 8	1,5	5,0 ³¹	2	5 ³⁴	98	-	-	5(6) ³³
SMA 11, ABS 11	1,5	5,0 ³¹	2	5 ³⁴	98	-	-	5(6) ³³
SMA 16, ABS 16	1,5	5,0 ³¹	2	5 ³⁴	98	-	-	5(6) ³³

HEIMILDIR

Alverk '95. 1995. *Almenn verklýsing fyrir vega- og brúargerð*. Vegagerðin. Reykjavík.

Ásbjörn Jóhannesson, Sigursteinn Hjartarson og Valur Guðmundsson. 2000. *Endurskoðun á markalínum fyrir malbik – lokaskýrsla*. BUSL – Slitlaganefnd. Skýrsla S-16.

PANK. 2000. *Finnish Asphalt Specifications 2000*. Finnish Pavement Technology Advisory Council. Helsinki.

Statens vegvesen. 2005. *Håndbok 018 Vegbygging*. Statens vegvesen. Oslo.

Vägverket. 2005. *ATB VÅG 2005. Kapitel I Typblad, kontrollblad, bindemedel och konstruktionstyper för bitumenbundna lager*. VV Publ 2005:112. Borlänge.

³¹ Meðaltal af tveim borkjörnum. Hámarkið hækkar í 5,5 ef slitlagið er lagt á óbundið eða óafrétt undirlag.

³² Miðast við staka borkjarna og lagþykktir =80 kg/m². Fyrir minni lagþykktir er hámarksholrýmd hækkuð í 7 %, en lágmarkið er óbreytt. Einnig eru settar kröfur fyrir meðaltal holrýmdar í fimm eða tíu borkjörnum, þá eru efri mörkin færð niður.

³³ Mismunandi eftir umferð, ÁDU. Mörkin miðast við staka borkjarna. Sé tekið meðaltal af fleiri en einum borkjarna eru í sumum tilfellum sett neðri mörk á meðaltalið (1 eða 2 %) og efri mörkin í sumum tilfellum lækkuð um 1 %.

³⁴ Miðast við staka borkjarna og lagþykktir =80 kg/m². Einnig eru settar kröfur fyrir meðaltal holrýmdar í fimm eða tíu borkjörnum, þá eru efri mörkin færð niður.

HOLRÝMD Í STEINEFNI OG FYLLT HOLRÝMD

Með *holrýmd í steinefni* er átt við þann hluta af rúmmáli þjappaðrar malbiksblöndu sem steinefnið fyllir ekki, með öðrum orðum er hún sá rúmmálshluti malbiksblöndunnar sem er bindiefni og loft. Holrýmd í steinefni breytist með hámarksbornastærð blöndunnar, þjöppun malbiksins og að nokkru leyti bindiefnisinnihaldi og öðrum stikum, svo sem lögun steinefnis.

Annað nátengt hugtak er *fyllt holrýmd*. Með fylltri holrýmd er átt við þann hluta af holrýmd í steinefni sem er fylltur með bindiefni. Það sem eftir stendur er þá holrýmd í malbiki, sem í daglegu tali er stýtt í *holrýmd*.

Ef sáldurferillinn er einskorna eða sérstaklega óheppilegur í lögun getur holrýmd í steinefni farið allt upp í 30 %. Ef méluinnihaldið er fram úr hófi hátt í annars grófum sáldurferli, getur holrýmd í steinefni á hinn bóginn farið niður fyrir 10 %. Hæfileg holrýmd í steinefni er alla jafna á bilinu 14-20 %, 15-18 % er algengt í SL 16. Að jafnaði er reynt að halda holrýmd í steinefni eins lágrí og kostur er, þó þannig að þar verði rúm fyrir nægilegt bindiefni og lágmarks holrýmd [Wallace 1967, bls. 67]. Þreytuþol malbiks eykst að jafnaði með lækkanði holrýmd í steinefni, sömuleiðis móttstaðan gegn skriði [Hilliges 1995, bls. 176]. Í verklýsingum eru að jafnaði ekki gerðar kröfur til holrýmdar í steinefni, heldur tilgreind leiðbeinandi gildi. Norskar og sænskar verklýsingar [Statens vegvesen 2005; Vägverket 2005] hafa til dæmis engin ákvæði um holrýmd í steinefni. Í finnskum verklýsingum [PANK 2000, bls. 62] eru hins vegar tilgreind leiðbeinandi mörk, 13-17 % í AC (asphaltic concrete) og 16-20 % í SMA. Í amerískum leiðbeiningabæklingi [Asphalt Institute 1984, bls. 32] er varað við því að holrýmd í steinefni fari niður fyrir ákveðið lágmark, sem er fall af efri flokkunarstærð malbiksins. Fyrir malbik með efri flokkunarstærð 16 mm er þetta lágmark 13-14 %.

Holrýmd í steinefni þarf að fylla að mestu með bindiefni, þó ekki að fullu, því þá er hætta á að bindiefnið pressist upp á yfirborðið í hitum, slitlagið verði hált og skriði undir þungri umferð. Á hinn bóginn þarf að fylla nægilega mikið af holrýmdinni í steinefninu með bindiefni til að slitlagið verði vatnsþétt, með öðrum orðum; svo að holrýmd í malbiki verði hæfileg.

Heppileg fyllt holrýmd er oft á bilinu 75-85 %; fyrir sumar slitlagsgerðir eru efri mörkin stundum höfð hærrí [Hilliges 1995, bls. 176]. Norskar verklýsingar [Statens vegvesen 2005, bls. 283-284] gera kröfu um að fyllt holrýmd í slitlagi (þjöppun 2 x 75 högg í Marshallprófi) sé á bilinu 75-90 % ef umferðin er undir 5000 ÁDU, annars 70-85 %. Í burðarlagi á fyllt holrýmd að vera = 45 % (sama heimild bls. 218). Finnskar verklýsingar [PANK 2000, bls. 62] hafa leiðbeinandi gildi fyrir fyllta holrýmd; 80-90 % fyrir slitlag og bindilag en 70-80 % fyrir burðarlag. Keppikeflið er að fyllt holrýmd sé mitt á milli markanna. Sænskar verklýsingar [Vägverket 2005] hafa engin ákvæði um fyllta holrýmd.

HEIMILDIR

- Asphalt Institute. 1984. *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types*. Manual Series No. 2 (MS-2). May 1984 edition. Maryland.
- Hilliges, F. (redaktör). 1995. *FAS Asfaltbok*. Föreningen för Asfaltbeläggningar i Sverige. Stockholm.
- PANK. 2000. *Finnish Asphalt Specifications 2000*. Finnish Pavement Technology Advisory Council. Helsinki.
- Statens vegvesen. 2005. *Håndbok 018. Vegbygging*. Statens vegvesen. Oslo.
- Vägverket. 2005. *ATB VÄG 2005. Kapitel F Bitumenbundna lager*. VV Publ 2005:112. Borlänge.
- Wallace, Hugh A., Martin, J. Rogers. 1967. *Asphalt Pavement Engineering*. McGraw-Hill Book Company, New York.

FRÓÐLEIKUR UM VIÐLOÐUN OG VIÐLOÐUNARPRÓF

Ef tvö efni komast í nána snertingu hvort við annað eiga þau til að festast eða límast saman. Þessi eiginleiki er kallaður viðloðun. Því haldbetri sem festingin er þeim mun betri er viðloðunin sögð vera [Rannsóknir á viðloðunarefnum, 1966, bls. 2].

Viðloðun í bikbundnum slitlögum má skilgreina sem styrkleika bindingsins milli bindiefnis og steinefnis. Mæling á þessum styrkleika er hins vegar verulegum erfiðleikum bundin og í staðinn er notast við óbeina mælingu, þar sem blöndum af steinefni og bindiefni er raðað eftir svörum þeirra við ákveðinni áraun undir tilteknum kringumstæðum.

Þegar bikbindiefni kemst í snertingu við þurrt steinefni er viðloðunin undantekningarlítið góð. Öðru máli gegnir ef yfirborð steinefnisins er rakt, þá er viðloðunin venjulega slæm. Orsökina er sú að í flestum tilfellum er viðloðun vatns og steinefnis sterkari en viðloðun bindiefnis og steinefnis. Af þessu má draga tvær mikilvægar ályktanir:

- Ef steinn er þakinn vatni loðir venjulegt bindiefni (þ. e. án viðloðunarhvata) illa eða alls ekki við hann.
- Þótt steinninn sé þegar þakinn bindiefni getur vatn samt sem áður hrakið bindiefnið af honum ef vatnið kemst í gegnum bindiefnishimnuna (t. d. ef hún rifnar) og að yfirborði steinsins.

Viðloðun bindiefnis og steinefnis er háð ýmsum eiginleikum beggja efnisþátta. Þessir eru helstir:

- *Kísilsýruinnihald steinefnis.* Að líkindum hafa bergtegundir með hátt kísilssýruinnihald (>60 %) að jafnaði lakari viðloðun en lágt. Sem þumalfingursreglu má nota að ljós steinefni (granít, kvarsít, díorit) hafa yfirleitt lakari viðloðun en dökk (basalt).
- *Gropa.* Stundum er erfitt að þurrka gropin steinefni fullkomlega. Ef ekki tekst að þurrka allt vatn úr gropunum, getur vatnið í þeim þrengt sér milli bindiefnishimunnar og steinsins og rífið hana frá. Ef steinefnið er hins vegar fullþurrt, þrengir bindiefnið sér inn í gropurnar og þá fæst betri viðloðun (stærri snertiflötur) en í gropulausu efni.
- *Kornalögun og yfirborðsáferð.* Á hvössum brúnum steinefnisins er bindiefnishimnan mjög þunn. Þar er hætt við að himnan rifni, vatn komist undir hana og byrji að flysja bindiefnishimnuna frá. Sama máli gegnir um steinefni í yfirborði slitlagsins, þar rofnar bindiefnishimnan af völdum negldra hjólbarða.
- *Hreinleiki.* Ef steinefnið er óhreint (leirugt) getur viðloðun brugðist jafnvel þótt það sé fullkomlega þurrt, vegna þess að óhreinindin varna bindiefninu að komast í fulla snertingu við steinefnið. Þá getur verið til bóta að þvo steinefnið. Veðrunarhúð á steinefninu getur haft samskonar áhrif.
- *Seigja bindiefnis.* Því þynnra sem bindiefnið er, þeim mun auðveldara á það með að væta steinefnið og smjúga inn í gropur. Að sama skapi er auðveldara fyrir vatn að flysja bindiefnishimnuna af, ef það kemst á milli steins og bindiefnis.
- *Efnafræðilegir eiginleikar.* Talið er að sýrustig bindiefnis hafi áhrif á viðloðun þess við steinefni.
- *Íaukar.* Viðloðunarefni, íaukar sem stundum er blandað í bindiefni geta bætt viðloðun til muna.

Viðloðun getur verið tvenns konar:

- *Treg (passive) viðloðun.* Að jafnaði límist bindiefni við þurran stein, þótt það nái engri festingu við hann rakan. Þetta er kölluð treg viðloðun. Þessi gerð af viðloðun er algengust í malbiki.
- *Áleitinn (active) viðloðun.* Ef dropi af bindiefni, sem snertir rakan stein, skriður út yfir steininn þannig að snertiflöturinn stækkar er viðloðunin kölluð áleitinn. Þetta er merki um að viðloðun bindiefnisins við steininn sé meiri en viðloðun vatns við hann. Þegar

viðloðunarefnum er blandað í bindiefni breytist viðloðunin oft úr tregri viðloðun í áleitna.

Viðloðunarefni geta bætt viðloðun til muna, einkum ef bindiefni með litla seigju eiga í hlut. Ef viðloðun verður að vera áleitin, eins og þegar þunnfljótandi bindiefni (svo sem bikþeytu eða vegolú) er blandað í rakt eða hálfþurrkað steinefni verður steinefnið að vera hreint og lítt eða ekki veðrað. Viðloðunarefni eru talin halda virkni sinni svo árum skiptir, a.m.k. þegar malbik á í hlut.

Algengust þeirra viðloðunarefna sem nú eru notuð eru fituamin. Það eru kolvetnakeðjur með aminhóp á öðrum endanum. Sá endi er hlaðinn og binst auðveldlega hleðslum á yfirborði steinefnisins. Hinn endinn er fitusækinn og tengist þess vegna bindiefninu. Þessi virkni getur verið svo öflug að viðloðunin verði áleitin, eins og berlega kemur í ljós þegar viðloðun er prófuð í svokölluðu hrærsluprófi.

Viðloðun getur skipt miklu máli fyrir endingu slitlags og þess vegna hafa verið reyndar ótal aðferðir til að prófa viðloðunareiginleika steinefna og áhrif vatns á malbik. Þessar prófunaraðferðir hafa allar sætt gagnrýni en eru þó, sumar hverjar að minnsta kosti, taldar gefa sterkar vísbendingar um viðloðunareiginleika. Prófunaraðferðunum má skipta í tvo flokka:

- Prófun á viðloðunareiginleikum steinefna. Þá er bindiefni blandað saman við steina, raka eða þurra, og mælt á einhvern hátt hversu vel bindiefnið loðir við þá. Af þeim sem hafa verið notuð hérlendis eru hrærslupróf á viðloðun og rúlluflöskupróf algengust.

Hrærslupróf á viðloðun prófar áleitna viðloðun. Þá er þunnu bindiefni (vegolú), blönduðu viðloðunarefni, hrært saman við blautt steinefni í stærðaflokknum 4-16 mm í fáeinar mínútur í þar til gerðri hrærivél. Síðan er vatni hellt yfir og hrært í klukkustund. Að því búnu er þakningin metin [Ásbjörn Jóhannesson 1977, bls. 31]. Þetta próf hefur reynst vel til að meta viðloðunareiginleika steinefna, sem á að nota í olíumöl og klæðingar.

Rúlluflöskupróf [ÍST EN 12697-11] mælir trega viðloðun. Þurrum steinum í stærðaflokkum á bilinu 5,6-11,2 mm er blandað saman við jarðbik (með eða án viðloðunarefnis). Að því loknu eru steinarnir, einn og einn, fndir upp í 500 ml glerflöskur þar til 150 g eru komin í hverja af þrem flöskum, og þær síðan fylltar að mestu með vatni. Þá eru flöskurnar lagðar á hliðina í vél sem veltir þeim í sífellu. Eftir 6 klst og aftur eftir 24 klst (prófið má einnig framlengja í 48 og 72 klst) eru steinarnir skoðaðir og þakning þeirra metin. Þetta próf hefur verið notað lítið eitt hérlendis en árangurinn orkar tvímælis, nákvæmnin er ekki sérlega mikil.

- Prófun á malbiki. Styrkleiki sýna (borkjarna, Marshallkjarna eða svipaðra sívalninga) af malbiki er borinn saman við styrkleika samskonar sýna sem hafa sætt áraun frá vatni við tiltekið hitastig. Í undantekningartilfellum er bætt við nokkrum frost-þíðusveiflum. Próf af þessu tagi eru kölluð vatnsnæmiþróf og algengasta prófið hérlendis af þessu tagi er kleyfniþróf á viðloðun.

Kleyfniþróf á viðloðun [ÍST EN 12697-23] mælir trega viðloðun og byggist á styrkleikasamanburði sýna sem annars vegar hafa legið í vatni í 3 sólarhringa við 40 °C og hinsvegar sýna sem eru prófuð þurr. Síðan er kleyfniþól (indirect tensile strength) beggja sýnahópa prófað og hlutfallið tekið sem mælikvarði á vatnsnæmi malbiksins. Þetta próf hefur verið notað ofurlítið hérlendis og niðurstöðurnar hafa verið í viðunandi samræmi við reynslu. Engu að síður getur notagildi þess tæpast talist ótvírætt.

Í ljósi þess að aðstæður hérlendis (margar frost-þíðu sveiflur, blaut slitlög vegna úrkomu og hálkueyðingar) gera miklar kröfur til viðloðunar bindiefnis við steinefni og þols slitlaga gagnvart áraun frá vatni, er æskilegt að prófa viðloðunareiginleika slitlaga á einhvern hátt. Þótt viðloðunarpróf séu frumstæð, enn sem komið er, eru þau samt sem áður líkleg til að geta raðað slitlagsgerðum með hliðsjón af viðloðunareiginleikum og gefið vísbendingu um endingu.

HEIMILDIR

Ásbjörn Jóhannesson. 1977. *Viðloðun í olúmöl og malbiki*. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík.

ÍST EN 12697-11:2006. *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.

ÍST EN 12697-23:2003. *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.

Rannsóknir á viðloðunarefnum. 1966. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík.

FRÓÐLEIKUR UM RÚLLUFLÖSKURPRÓF

Árið 1986 voru gerðar viðloðunarprófanir á nokkrum efnum með rúlluflöskuprófi [Nordisk Vegteknisk Forbund 1986, bls. 27-29]. Steinefnið var í stærðaflokknum 9,5-11,2 og þrír rannsóknarnamenn mátu þakninguna. Það var úr ýmsum námum, íslenskum (ÍS), færeyskum (FÆ), norskum (N) og sænskum (SE). Bindiefnið var jarðbik með stungudýpt um 150. Um viðloðunarefni er ekkert tekið fram, né heldur hvort það var notað. Niðurstöður eftir 48 klst. prófun eru sýndar í töflu 1. Í sömu töflu eru einnig sýndar niðurstöður kleyfniþolsprófs á vatnsnæmi malbiks úr sömu steinefnum.

Tafla 1. Niðurstöður rúlluflöskuprófs og kleyfniþolsprófs á viðloðun á nokkrum malbiksefnum með jarðbiki með stungudýpt 150 mm/10. Meðaltal þakningar í rúlluflöskuprófi var metin af þrem mönnum eftir prófun í 48 klst.

Steinefni	Þakning %	Kleyfniþol %	Reynsla
Hundsarabotnur (FÆ)	22	76	Góð
Lambareiði (FÆ)	7	26	Slæm
Porkeri (FÆ)	45	92	Góð
Björgun (ÍS)	3	50	Miðlungs
Selás (ÍS)	9	74	Góð
Snasi (ÍS)	33	98	Góð
Stapafell (ÍS)	7	66	Miðlungs
Vatnsskarð (ÍS)	5	65	Lítið slitþol
Skyggastein (N)	40	58	Lítið slitþol
Steinshögda (N)	26	75	Góð
Granít (SE)	19	71	Óvíst
Kvarsít (SE)	13	68	Óvíst

Taflan gefur í skyn að sambandi milli kleyfniþols og þakningar eftir 48 klst prófun sé ótraust, sömuleiðis er sambandi milli þakningar og reynslu ekki sannfærandi.

Árið 1987 gerði Steinefnanefnd rannsóknir á rúlluflöskuprófi, þar sem steinefni úr sextán námum, langflestum íslenskum, voru prófuð [Steinefnanefnd 1994, bls. 9-10]. Steinefnið var í stærðaflokknum 5,6-8,0 mm, bindiefnið var vegolía, blönduð 1 % af Diamin HBG. Þrjú sýni voru prófuð af hverju steinefni og þrjú menn mátu þakninguna á hverju sýni. Prófununum var hagað þannig að fyrst var fyrsta sýni (ein flaska) af hverju steinefni prófað og þakningin metin af öllum matsmönnum þremur, síðan næsta sýni á sama hátt og að lokum hið þriðja. Í hverri prófun var þakningin metin eftir eina, þrjár, sjö, 24 og 48 klst. Niðurstöðurnar eftir 48 klst prófun eru sýndar í töflu 2, tölur um þakningu eru hækkaðar eða lækkaðar í næsta heila margfeldi af 5.

Á grundvelli þessara prófana var ályktað að munur á þakningarmati einstakra manna væri mikill og þakning steinefna í prófinu væri ekki í samræmi við reynslu af þeim í vegi né heldur niðurstöður annarra prófana. Á þessum forsendum ákvað Steinefnanefnd að gera ekki frekari rannsóknir á rúlluflöskuprófinu.

Niðurstöðurnar úr þessari athugun voru notaðar til að meta nákvæmni rúlluflöskuprófsins. Staðalfrávik (endurtekinn) mælinga er á bilinu 0-23, oftast þó á bilinu 2-7. Frávikshlutfall (staðalfrávik sem hlutfall af mældu gildi) er á bilinu 0-100 %. Mat rannsóknamanna á þakningu er marktækt mismunandi, og hefur meiri áhrif á niðurstöðurnar en steinefnið. Sömuleiðis er marktækur munur á milli prófunarumferðanna þriggja. Rétt er að taka fram að þessar samanburðarprófanir þurfa ekki að vera gildar fyrir prófanir á steinefnum í malbik, þar sem vegolía og ekki jarðbik var notað við prófanirnar.

Tafla 2. Niðurstöður rúlluflöskuprófs á viðloðun á nokkrum malbiksefnum með vegolíu blandaðri viðloðunarefni. Meðaltal þakningar á þrem sýnum, metin af þrem mönnum eftir prófun í 48 klst.

Steinefni	Þakning, %, metin af matsmanni nr:		
	1	2	3
Bakkaá	25	35	30
Björgun	5	10	5
Esjuberg	10	20	10
Granít	5	20	20
Grjóteyrarhæðir	15	20	20
Haukadalsá	5	20	5
Hvalfjarðareyri	10	25	10
Korpúlfsstaðir	5	10	5
Kvarsít	25	35	10
Melar	10	25	10
Núpar	5	15	5
Snasi	30	40	30
Stardalur	25	35	20
Stóra-Fellsöxl	10	30	10
Stóra-Laxá	20	25	15
Vatnsskarð	5	10	5

Í tilefni af endurskoðun á verklýsingum Vegagerðarinnar [Alverk '95] voru gerð rúlluflöskupróf vorið 2007 á viðloðun fjögurra steinefna (Durasplitt, Harðikambur, Hólabrú og Seljadalur) við mjúkt bik, með og án viðloðunarefnis (0,3 % Wetfix I), fyrst og fremst til að kanna nákvæmni prófsins [Arnþór Ó. Arason 2007]. Tveir rannsóknarnámenn mátu þakningu að prófun lokinni, óháð hvor öðrum. Lausleg athugun á niðurstöðunum sýnir lítinn (5 prósentustiga) en marktækan mismun á mati þeirra. Viðloðunarprófin voru ekki endurtekin, en samanburður á niðurstöðum hlutsýna (sem eru þrjú í hverri prófun) gefa til kynna að staðalfrávik þakningar á hlutsýnum sé að meðaltali rúm fjögur prósentustig og að ólíklegt sé að mismunur endurtekinna viðloðunarprófa með þessum hætti fari yfir 10 prósentustig, ef annarhvor áður nefndra rannsóknarmanna prófar.

Í lokin má geta staðals um prófanir á viðloðun í rúlluflöskuprófi [ÍST EN 12697-11:2005]. Þar segir að óformlegar athuganir á rúlluflöskuprófi sýni að „repeatability“ (endurtekingarnákvæmni prófsins innan sömu rannsóknastofu) sé 20 % og „reproducibility“ (endurtekingarnákvæmni prófsins milli rannsóknastofa) sé 30 %. Með öðrum orðum er ekki ástæða til að rengja niðurstöður tveggja prófana samkvæmt staðlinum á sams konar sýnum sem sami maður prófar á sömu stofu með sama tækjabúnaði, meðan mismunur þessara tveggja prófana fer ekki yfir 20 %. Á hliðstæðan hátt er ekki ástæða til að rengja niðurstöður tveggja prófana á samskonar sýnum sem sinn hvor maðurinn prófar, hvor á sinni rannsóknastofu, hvor með sínum tækjabúnaði, meðan mismunur þessara tveggja prófana fer ekki yfir 30 %.

HEIMILDIR

- Alverk '95. 1995. *Almenn verklýsing fyrir vega og brúargerð*. Vegagerðin, Reykjavík.
- Arnþór Ó. Arason. 2007. *Rúlluflöskupróf skv. ÍST EN 12697-11:2005*. Óbirt minnisblöð frá prófunum á Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins.
- ÍST EN 12697-11:2005. *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- Nordisk Vegteknisk Forbund. 1986. *Bruk av poröst steinmateriale til asfaltdekker*. Utvalg 33-Asfaltbelegninger. Rapport nr. 10, 1986. Reykjavík.
- Steinefnanefnd. 1994. *Steinefni í bundin slitlög*. Viðloðunarpróf. Reykjavík.

VATNSNÆMI MALBIKS

Vatnsnæmi er einn þeirra mælikvarða sem notaður er til að meta viðloðun milli milli bindiefnis og steinefnis í malbiki. Prófun á vatnsnæmi byggist í stórum dráttum á því að bera styrkleika (þrýstipól, kleyfnipól, þreytuþól) malbikssýna, sem hafa legið í vatni tiltekinn tíma, með eða án frost-þíðu áraunar, saman við styrkleika samskonar malbikssýna sem hafa verið geymd jafnlengi þurr. Fjölmargar aðferðir hafa verið reyndar til að mæla vatnsnæmi en þær eru allar annmörkum háðar og yfirleitt hefur ekki tekist að sýna fram á sterkt samband milli prófunarniðurstöðu og endingar [Nordisk Industrifond 2004, bls. 60-69]. Sú aðferð sem hefur reynst einna best er kleyfnipróf og hún hefur verið notuð hérlandis, fremur lítið þó. Kostur við þessa aðferð er að hana má nota jafnt á Marshallkjarna sem borkjarna úr slitlagi.

Vatnsnæmi er að líkindum tengt endingu malbiks og sennilega er þörf á að mæla það á einn eða annan hátt. Rökin með eru þau að slitlög hérlandis eru oft blaut langtímum saman á veturna og frost-þíðusveiflur margar. Auk þess er efni í malbik stundum tekið úr sjó, og tilraunir hafa sýnt að malbikskjarnar úr saltblönduðu steinefni, sem hafa legið lengi í vatni, bila miklu fyrr undir sveiflandi álagi en malbikskjarnar úr samskonar steinefni en saltlausu. Ennfremur er talið að kísilsýrurík steinefni (sem er dæmigert fyrir innflutt steinefni) hafi að jafnaði lakari viðloðun en basísk steinefni (svo sem íslenskt basalt). Vegna notkunar negldra hjölbarða rofnar bindiefnishúðin á steinum í yfirborði slitlagsins strax á fyrsta vetri og þar getur vatn komist á milli bindiefnis og steins og rofið bindinginn þar á milli. Mótrökin eru hins vegar þau að holrýmd er af ásettu ráði haldið mjög lágrí í íslensku malbiki, svo það má með nokkrum sanni kallast vatnsþétt, og ætti þess vegna ekki að verða fyrir skemmdum af vatni, nema þá á yfirborðinu. Einnig hefur tíðkast á síðari árum að setja viðloðunarefni í bindiefnið, að minnsta kosti í malbik á götur með mikilli umferð, sem styrkir tengslin milli bindiefnis og steinefnis. Að sögn heldur viðloðunarefnið virkni sinni árum saman [Jacobson 2000, bls. 22].

Sænskar verklýsingar [Vägverket 2005, bls. 22-23] gera kröfu um að vatnsnæmi sé prófað minnst einu sinni á ári á steinefni úr hverri námu í notkun. Sýnið má vera borkjarnar eða Marshallkjarnar úr viðkomandi malbiki. Auk þess eru gerðar kröfur um vatnsnæmiþróf á útlögðu malbiki, ef magnið er meira en 2000 tonn. Fyrir hver byrjuð 8000 tonn í útlögn skal prófa eitt borkjarnasýni. Prófunaraðferðin er kleyfnipróf á viðloðun (sjá ÍST EN 12697-12). Kröfurnar eru mismunandi eftir malbiksgerðum, fyrir slitlag þarf hlutfallið að vera >70 %, fyrir bindilag >75 %, en fyrir afréttingarlag og burðarlag >60 %.

Norskar verklýsingar [Statens vegvesen 2005] hafa engar kröfur til vatnsnæmi.

Samkvæmt finnskum verklýsingunum [PANK 2000, bls. 61] er ekki skylt að mæla vatnsnæmi malbiks nema þess sé talin þörf. Vatnsnæmi er mælt með kleyfniprófi á viðloðun samkvæmt nánari fyrirmælum. Krafa fyrir hefðbundið slitlagmalbik er að hlutfallið sé = 80 % en = 60 % fyrir drenmalbik.

Í verklýsingum Vegagerðarinnar [Alverk '95] eru engar kröfur gerðar um vatnsnæmi.

Með stuðningi í framanskráðu má telja æskilegt að krafa um vatnsnæmi verði tekin upp í Alverk, ekki síst vegna þess að hingað eru flutt ljós steinefni sem að jafnaði eru kísilsýrurík og þess vegna líkleg til að hafa lakari viðloðunareiginleika en íslenska basaltið. Að líkindum er kleyfnipróf á viðloðun [ÍST EN 12697-12] heppilegasta prófunaraðferðin, en nákvæmninni er ábótavant; samkvæmt áðurnefndum staðli er ekki ástæða til að rengja niðurstöður nema mismunur tveggja mælinga sé meiri en 15 %. Reynslan af þessari prófunaraðferð of lítil hérlandis til þess að hægt sé að setja fram rökstuddar tillögur um kröfur og að svo stöddu er líklega heppilegast að taka sænsku kröfurnar upp óbreyttar.

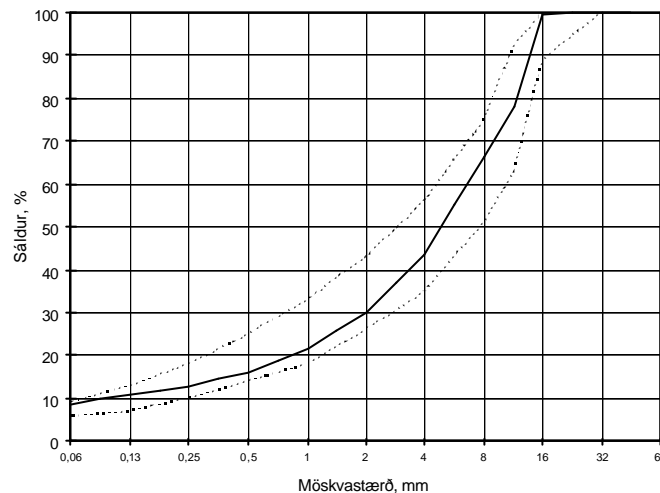
HEIMILDIR

- Alverk '95. 1995. *Almenn verklýsing fyrir vega og brúargerð*. Vegagerðin, Reykjavík.
- Aurstad, J. (verkefnisstjóri). 2004. *Beständighet hos asfaltbeläggningar. State-of-the-art*. Faglig sluttrapport – forprosjekt. Nordisk Industrifond.
- ÍST EN 12697-12:2003. *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- Jacobson, T. 2000. *Utredning av beläggningsskader på Island (Reykjavik)*. VTI notat 60-2000. Väg- och transportforskningsinstitutet. Linköping.
- PANK. 2000. *Finnish Asphalt Specifications 2000*. Finnish Pavement Technology Advisory Council. Helsinki.
- Statens vegvesen. 2005. *Håndbok 018. Vegbygging*. Statens vegvesen. Oslo.
- Vägverket. 2005. *ATB VÄG 2005. Kapitel F Bitumenbundna lager*. VV Publ 2005:112. Borlänge.

UM ÁHRIF SALTS Á ÞREYTUÞOL MALBIKS

Árið 2006 hófust rannsóknir á áhrifum salts á þreytuþol malbiks á Rannsóknastofnun byggingariðnaðarinnar. Þær eru fjármagnaðar af Rannsókn- og þróunarsjóði Vegagerðarinnar og markmiðið er meðal annars að kanna hvort salt í malbiksefnum (teknum úr sjó eða úr flæðarmáli) sé líklegt til að skerða endingu malbiks undir sveiflandi álagi eins og gerist undir umferð. Í fyrsta áfanga voru gerðar nokkrar mælingar til að kanna hvort salt í steinefninu hefði áhrif á þol malbiks í einása sveifluþrófi eftir mismunandi langa geymslu í vatni.

Gerðir voru 32 malbikssívalningar, helmingur þeirra úr hreinu steinefni og hinn helmingurinn úr saltblönduðu steinefni, 10 cm í þvermál og 10 cm háir. Malbikið í þá var blandað úr steinefni frá Seljadal frá Malbikunarstöðinni Höfða hf og mjúku biki (160/220), án viðloðunarefnis. Sáldurferillinn var í samræmi við kröfur til Y16 í verklýsingum Vegagerðarinnar [Alverk '95, bls. 28] og er sýndur á mynd 1 ásamt markalínunum fyrir Y16. Þyngdarhlutfall bindiefnis af blöndu var 5,8 %, holrýmdin 5,9-6,4 % og henni var stýrt með snúðþjöppu (gyratory compactor). Steinefni í helming sívalninganna var látið liggja í 3% vatnslausn af matarsalti, NaCl, í sjö sólarhringa og síðan þurrkað áður en malbikið var blandað. Með stoð í lauslegum útreikningum má ætla að 0,8 g salts séu í hverjum sívalningi, eða 0,4 % af þyngd steinefnis. Hinn helmingur sívalninganna var saltlaus.

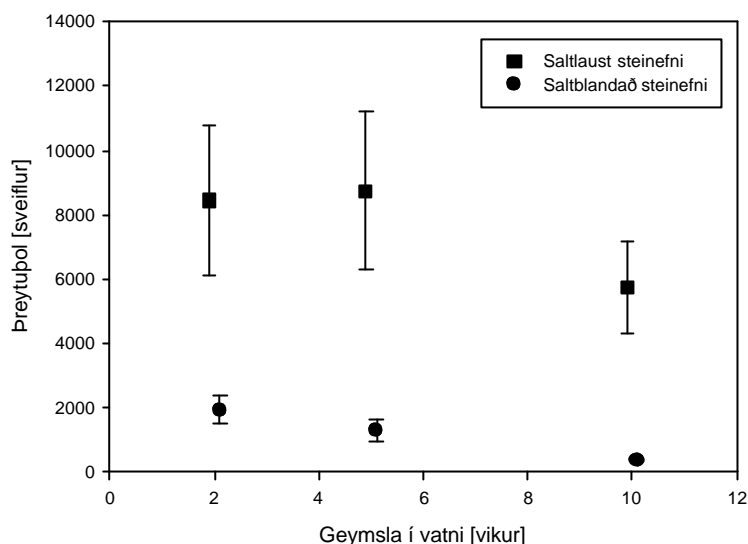


Mynd 1. Sáldurferill steinefnis í malbikssívalningum (heildregin lína) ásamt markalínunum fyrir Y16 (punktalínur).

Sívalningunum var skipt í syrpu þannig að í hverri syrpu voru fjórir sívalningar með saltblönduðu steinefni og aðrir fjórir saltlausir. Sívalningarnir voru valdir í syrpu með hjálp slembitalna. Hver syrpa var látin standa í vatni við stofuhita í tvær, fimm eða tíu vikur, án lofttæmingar. Að því búnu voru sívalningarnir prófaðir.

Prófunaraðferðin er mjög einfölduð útgáfa af sænskri prófunaraðferð [Höbeda 1999, bls. 29]. Þegar sívalningur hafði verið í vatnsbaði tilsettan tíma var honum komið fyrir í þríasatæki undir sveiflandi álagi, án hefðbundins hliðarstuðnings en á kafi í vatni. Hitastigi vatnsins var ekki stýrt meðan á prófun stóð en var um 20 °C. Þrýstingur á yfirborð vatnsins (selluþrýstingur) var hafður 100 kPa. Grunnálag á endafleti sívalninganna var sömuleiðis haft 100 kPa. Síðan var lagt 600 kPa sveiflandi álag (haversine) á endafletina með tíðnina 3 Hz. Mesta aflögun var takmörkuð við 15 mm og hámarksfjöldi sveifla við 100.000. Streita var mæld sem fall af sveifluþjölda.

Órstutt ágríp af niðurstöðum álagssprófananna er sýnt í töflu 1. Þar er þreytuþol metið sem fjöldi álagssveifla sem sívalningur þolir þar til streitan hefur náð 10 %.



Mynd 2. Preytuból malbikssívalninga úr hreinu og saltblönduðu steinefni í prófun undir sveiflandi álagi eftir geymslu í vatni í mismunandi langan tíma. Grönn strik sýna 95 % öryggisbil fyrir meðaltal mælinga á hverri malbiksgerð.

Niðurstöðurnar prófananna gefa eftirfarandi til kynna:

- Ef steinefnið er saltlaust er þreytuþolið áþekkt hvort sem malbikið er geymt í vatni í tvær, fimm eða tíu vikur.
- Preytuból malbiks úr saltlausu steinefni er um það bil fjórfalt til tífalt á við þreytuþól malbiks úr steinefni sem inniheldur um 0,4 % salts af þyngd steinefnis, eftir geymslu í vatni í tvær, fimm eða tíu vikur. Margfeldið hækkar eftir því sem malbikið er geymt lengur í vatni, m.ö.o. eykst mismunurinn á þreytuþoli malbiks úr saltblönduðu steinefni og saltlausu eftir því sem geymslutími malbiksins í vatni eykst.
- Preytuból malbiks úr saltblönduðu steinefni virðist minnka í réttu hlutfalli við geymslutíma í vatni, sjá mynd 2. Dreifing niðurstaðna úr prófunum á samskonar sýnum er mikil og óvíst að munurinn á þreytuþoli sýna úr saltblönduðu steinefni eftir tvær vikur annars vegar og fimm vikur hinsvegar sé marktækur. Hins vegar er samsvarandi mismunur eftir geymslu í vatni í fimm vikur annars vegar og tíu vikur ótvírætt marktækur.

Þess má geta að forprófanir (á samskonar malbikssívalningum og niðurstöðurnar hér á undan byggjast á) sýndu engan mun á þreytuþoli malbiks úr hreinu og saltblönduðu steinefni, ef sívalningarnir höfðu ekki legið í vatni. Þetta bendir til að skert þreytuþól í malbikssýnum sem þessum komi því aðeins fram að steinefnið sé saltblandað og að sýnin hafi legið í vatni.

Í byggingarreglugerð er krafa um að innihald af NaCl í þurrum sandi sem nota á í járnþenta steypu sé ekki meira en 0,6 g/kg og 0,2 g/kg (g/kg samsvarar % af þyngd) ef sandinn á að nota í strengjasteypu. Í þessu ljósi er athyglisvert að 0,4 % saltinnihald skuli hafa jafn afdráttarlaus áhrif á þreytuþól malbiks og ofangreindar niðurstöður gefa til kynna.

Þótt framangreindar niðurstöður sýni ótvíræðan mismun á þreytuþoli, er ekki þar með sagt að þreytuþól malbiks í slitlagi skerðist, þótt steinefnið innihaldi salt og slitlagið sé blautt langtímum saman eins og hér gerist oft. Í fyrsta lagi er holrýmd í útlögðu malbiki að jafnaði langtum lægri en í malbikssýnunum í þessari rannsókn, jafnvel svo að malbikið megi teljast vatnspétt. Í öðru lagi fær malbik í götu oft tækifæri til að þorna af og til sem getur hugsanlega haft jákvæð áhrif á þreytuþolið. Í þriðja lagi getur skipt verulegu máli hvort saltið er fyrir í steinefninu áður en bindiefninu er blandað saman við, eða hvort það kemur utan frá með yfirborðsvatni sem síast inn í malbikið (til dæmis frá hálkueyðingu). Á hinn bóginn er

sennilegt að frost-þíðu sveiflur, sem að jafnaði skipta tugum á höfuðborgarsvæðinu á hverjum vetri, flýti fyrir áhrifum salts á þreytuþol malbiksins.

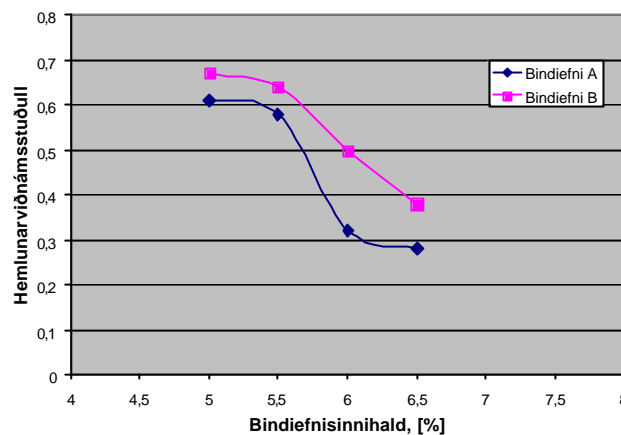
HEIMILDIR

- Alverk '95. 1995. *Almenn verklýsing fyrir vega og brúargerð*. Vegagerðin, Reykjavík.
- Höboda, P., Jerzy Chytla. 1999. *Undersökning av beständigheten hos AG 16 enligt ny metod och effect av vidhäftningsbefrämjande tillsatser*. VTI notat 54-1999. Väg och transportforskningsinstitutet, Linköping.

HEMLUNARVIÐNÁM

Hemlunarviðnám er mikilvægur eiginleiki slitlags. En það getur tæpast talist stiki í malbiks-hönnun, vegna þess að hönnunin ræður litlu um hemlunarviðnámið, ef hún fylgir settum reglum á annað borð. Þó má nefna tvö atriði sem beint eða óbeint hafa einhver áhrif á hemlunarviðnám.

Bindiefnisinnihald. Ef bindiefnisinnihald er of hátt miðað við holrýmd í steinefni (þ. e. ef holrýmd í malbiki er of lítil) getur farið svo að bindiefnið pressist upp úr slitlaginu, til dæmis í sumarhitum eða meðan á útlögn stendur, og þá geta myndast feitir blettir með lágt hemlunarviðnám á yfirborði slitlagsins. Lágt bindiefnisinnihald er talið stuðla að betra hemlunarviðnámi, og sé það of hátt er talið að umfram bindiefni muni fyrr eða síðar koma upp á yfirborðið [Edwards 1983, bls. 1 og 6].



Mynd 1. Dæmi um áhrif bindiefnisinnihalds og bindiefnisgerðar á hemlunarviðnám. Hemlunarviðnám mælt á blautu slitlagi við 50 km/klst.

Mynd 1 sýnir að tiltölulega lítil breyting (0,5 %) í bindiefnisinnihaldi getur undir vissum kringumstæðum nægt til að breyta viðunandi hemlunarviðnámi í ófullnægjandi hemlunarviðnám [Slyngstad 1972, bls. 7].

Yfirborðseiginleikar steinefna. Sum steinefni hafa tilhneigingu til að fágast (polish) undir umferð einkum þau sem eru slitpólin. Þá getur hemlunarviðnámi orðið áfátt vegna lítills núningsviðnáms milli hjólbarða og steinanna í yfirborði slitlagsins. Þetta á þó aðeins við ef slitlagið er blautt; hemlunarviðnám á þurru (og hreinu) malbiki er undir venjulegum kringumstæðum talið nægilegt [Highways Agency 2007, bls. 3/1]. Negldir hjólbarðar vinna gegn fágun steinefnisins.

Ef umferðarhraðinn er lítill hefur fágunin afgerandi áhrif á hemlunarviðnámið. Sé yfirborð slitlagsins nægilega grófgert til að veita burtu vatni, sem verður á milli hjólbarða og slitlags, og steinefnið hrjúft, helst hemlunarviðnámið mikið til óbreytt með auknum hraða. Ef yfirborð vegarins er tiltölulega slétt og hraðinn mikill, getur myndast vatnspúði milli hjólbarða og slitlags. Þá er hætta á að bíll á miklum hraða fljóti upp og skiptir þá litlu máli hvort steinefnið er hrjúft eða fágað.

Hemlunarviðnámsins vegna er æskilegt að steinefni í malbik hafi góða mótstöðu gegn fágun og að hlutfall salla og mulnings upp að 12 mm sé hátt. Mjög gróft steinefni sem sem fágast er óheppilegt, því þá geta myndast fágaðir kollar í yfirborði malbiksins með lágt hemlunarviðnám [Slyngstad 1972, bls. 5-7].

Í verklýsingum Vegagerðarinnar [Alverk '95] eru engar kröfur gerðar um hemlunarviðnám.

Í norskum verklýsingum [Statens vegvesen 2005, bls. 272] er gerð krafa um að hemlunarviðnám, mælt á blautu slitlagi á hraðanum 60 km/klst, skuli minnst vera 0,40. Auk

Þess er gerð krafa um að viðnámsstuðullinn skuli (á auðum vegi) vera hærri en 0,5 ef leyfður umferðarhraði er meiri en 80 km/klst. Kröfurnar eru ekki tengdar hönnun á malbiki.

Í sænskum verklýsingum eru engar kröfur um hemlunarviðnám tengdar hönnun á malbiki. Þar eru hins vegar skilakröfur [Vägverket 2005, bls. 8] og samkvæmt þeim skal meðaltal viðnámsstuðuls á hverjum mældum 20 m kafla á auðu slitlagi vera minnst 0,5.

Í finnskum verklýsingum [PANK 2000, bls. 67] eru gerðar kröfur til hemlunarviðnáms á nýju slitlagi sem skal mælt innan tveggja vikna frá útlögn. Kröfurnar eru mismunandi eftir leyfðum umferðarhraða. Ef hann er = 80 km/klst skal viðnámsstuðullinn vera minnst 0,4, minnst 0,5 ef leyfður hámarkshraði er 100 km/klst og minnst 0,6 ef hámarkshraðinn er 120 km/klst. Í áðurgreindri heimild er ekkert tekið fram um aðstæður þegar mælingin er gerð, en í uppkasti að skýrslu frá Norræna vegtæknisambandinu [NVF 2004] er tekið fram að mælingar á hemlunarviðnámi skuli gerðar á hraðanum 60 km/klst og á blautu slitlagi. Kröfurnar eru heldur ekki tengdar hönnun á malbiki.

Meðan negldir hjólbarðar eru notaðir jafn mikið og nú er (undanfarin ár hefur um fjórðungur umferðarinnar í Reykjavík verið á negldum hjólbörðum að meðaltali yfir árið) er ósennilegt að hemlunarviðnám sé of lítið, nema á tímabilinu frá því að slitlagið er lagt og þar til nagladekkin hafa hreinsað bindiefnislikju og feita bletti af yfirborðinu. Þó er rétt að taka fram að í Noregi hefur mælt fágún á slitlögum yfir sumartímann sem nemur um 0,2 einingum í hemlunarviðnámi [Horvli 2006, bls. 16]. En fari svo að verulega dragi úr notkun negldra hjólbarða, getur hemlunarviðnám breyst til hins verra á íslenskum slitlögum.

Eins og áður segir eru engar kröfur gerðar í verklýsingum Vegagerðarinnar til hemlunarviðnáms. Þar sem nægilegt hemlunarviðnám er snar þáttur í umferðaröryggi, er æskilegt að þar séu að minnsta kosti viðmiðunarreglur um hemlunarviðnám á blautu malbiki. Finnskar, norskar og sænskar kröfur til hemlunarviðnáms er áþekkar hvað viðnámsstuðullinn snertir. Sænsku kröfurnar taka að auki fram að hemlunarviðnám skuli að meðaltali ná lágmarksgildi fyrir hverja 20 m. Það sýnist vera skynsamlegt, enda er 20 m flugháll blettur sennilega alveg nægilega langur til að missa stjórn á bíl.

HEIMILDIR

- Alverk '95. 1995. *Almenn verklýsing fyrir vega og brúargerð*. Vegagerðin, Reykjavík.
- Edwards, John M. 1983. *Design of Bitumen-Aggregate Mixtures*. Residential Course in Flexible Pavements and Bituminous Materials, Lecture H. University of Newcastle upon Tyne, Department of Civil Engineering, Division of Transport Engineering.
- Highways Agency. 2007. *Design Manual for Roads and Bridges*. Surfacing Materials for New and Maintenance Construction. Volume 7, Section 5.
<http://www.standardsforhighways.co.uk/dmrb/vol7/section5/hd3606.pdf>
- Horvli, I., E. Værnes. 2006. *SIV – Steinkvalitet og sporutvikling i vegdekker*. Oppsummeringsrapport. SINTEF Byggeforsk AS. Veg- og jernbaneteknikk. Trondheim.
- NVF. 2004. *Asfaltbelegningers overflateegenskaper – Friksjon*. Nordisk Vegteknisk Forbund. Den Norske Avdeling Utvalg 33 Asfaltbelegninger. (Uppkast að óúttefni skýrslu, án blaðsíðutals).
- PANK. 2000. *Finnish Asphalt Specifications 2000*. Finnish Pavement Technology Advisory Council. Helsinki.
- Slyngstad, T. 1972. *Friksjon*. Internt notat for særkursset. Institutt for veg- og jernbanebygging. Norges tekniske høgskole, Trondheim.
- Statens vegvesen. 2005. *Håndbok 018. Vegbygging*. Statens vegvesen. Oslo.
- Vägverket. 2005. *ATB VÄG 2005. Kapitel A Gemensamma förutsättningar*. VV Publ 2005:112. Borlänge.

BINDIEFNISLIKJA Á SLITLÖGUM OG ÁHRIF HENNAR Á HEMLUNARVIÐNÁM

Á nýlögðu malbiki er oft sliksja af bindiefni á yfirborðinu, sem getur minnkað hemlunarviðnám til muna þegar slitlagið er blautt. Þetta á einkum við um efjurík (efja: blanda af bindiefni og mélu) slitlög, svo sem SMA, sér í lagi ef bindiefnisinnihaldið er hátt og holrýmdin lág, þá getur efjan pressast upp á yfirborð slitlagsins þegar það er valtað. Þar til naglar hafa skrapað sliksjuna af er viss slysaáhætta af henni, ekki síst úti á þjóðvegum þar sem umferðarhraði er mikill.

Sú spurning hefur komið upp hvað það taki langan tíma að skrapa bindiefnishimnuna burtu. Sumir telja að svarið fari eftir umferð, naglanotkun og hvenær ársins slitlagið var lagt, svo eitthvað sé nefnt. Aðrir álíta að naglarnir skipti ekki meginmáli, hjólbarðarnir, þótt ónegldir séu, kroppi bindiefnisliksjuna fljótlega af.

Reynslan bendir til þess að bindiefnishimnan sé farin af í hjólförum á fjölförnum götum í Reykjavík (Miklubraut, Kringlumýrarbraut) kringum mánaðamótin nóvember-desember. Setjum svo að umferð á hverri akrein á þessum götum sé 10.000 ÁDU. Gerum enn fremur ráð fyrir að naglanotkun vaxi úr engri í fyrstu viku nóvember í 40 % í fyrstu viku desember, sé orðin 50 % um miðjan desember og verði ekki meiri. Ef þessar forsendur eru réttar þarf um 60.000 bíla á nögum til að skrapa bindiefnishimnuna af hjólförum á hverri akrein.

Úti á þjóðvegum er umferðin miklu minni og þar tekur lengri tíma að hreinsa bindiefnishimnuna af. Tökum Reykjanesbrautina með fjórar akreinar vestan við Straumsvík sem dæmi. Þar er umferðin um 10.000 ÁDU, þ. e. a. s. um 2500 ÁDU á akrein. Á veginum austur fyrir fjall er umferðin um 8000 ÁDU á tveim akreinum, þ. e. a. s. um 4000 ÁDU á akrein.

Miðað við framangreindar forsendur ætti bindiefnishimnan að vera horfin í hjólförum um mánaðamótin nóvember-desember á Hringbrautinni, upp úr miðjum desember á veginum austur fyrir fjall og um það bil viku af janúar á Reykjanesbrautinni, svo dæmi séu tekin.

Síðan þarf að svara spurningunni hvað bindiefnisliksja í hjólförum hefur mikil áhrif á hemlunarviðnám. Snöggsóðin heimildakönnun bar heldur lítinn árangur. Í ágripi af fyrirlestri um hemlunarviðnám [Slyngstad 1972, bls. 7] er birt tafla (frumheimild er ekki tilgreind) sem dæmi um áhrif bindiefnisinnihalds á hemlunarviðnám. Hún sýnir að viðnámsstuðull breytist úr 0,6-0,7 í 0,3-0,4 þegar bindiefnisinnihald eykst úr 5,0 í 6,5 %. Í skýrslu frá nefnd 33 í Norræna vegtækisambandinu [NVF 1981, bls. 27] er sagt að áhrif fínhrýfis (microtextur) á hemlunarviðnám geti horfið ef bindiefni á slitlagsyfirborðinu er of mikið og jafnvel áhrif grófhrýfis (macrotextur) að einhverju leyti, og þetta geti haft alvarlegar afleiðingar, að minnsta kosti í bleytu. Á sama stað er nefnt að of mikið bindiefnisinnihald samfara lágri holrýmd geti haft þessi áhrif. Þar er einnig minnst á hálfu að vetrarlagi sem sé síst minna vandamál.

Í sænskri skýrslu [VTI 2001, bls. 30] er sýnt á mynd hvernig hlutfallsleg slysaáhætta vex með minnkandi hemlunarviðnámi, hún breytist mjög lítið meðan viðnámsstuðullinn (mældur með pendúl) er yfir 0,5 en áhættan eykst mjög hratt þar fyrir neðan. Heimildakönnunin leiddi ekkert í ljós um samband viðnámsstuðuls og holrýmdar né heldur um viðnámsstuðul á slitlagi með bindiefnisliksju. Um síðarnefnda atriðið er hægt vandi að afla upplýsinga, þar sem Vegagerðin á tæki til að mæla viðnámsstuðul á slitlögum.

HEIMILDIR

- NVF. 1981. *Beläggningars funktionstid och funktionsegenskaper*. Nordiska Vägtekniska Förbundet. Utskott 33 Asfaltbeläggningar. Rapport nr 2: 1982.
- Slyngstad, T. 1972. *Friksjon*. Internt notat for særkurset. Institutt for veg- og jernbanebygging, Universitetet i Trondheim, Norges Tekniske Høgskole.
- Wallman, C.G., H. Åström. 2001. *Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety*. A literature review. VTI meddelande 911A. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.

FÁEIN ORÐ UM EFTIRLIT

Hér er tæpt á hugmyndum um malbikseftirlit (með framleiðslu og útlögn). Þær eru alls ekki fastmótaðar og eru settar fram til umræðu í þeirri von að þær geti, að lokinni gagnrýni og endurskoðun, orðið grundvöllur að ákvæðum um sama efni í Alverk. Það má vel vera að hér séu flóknir hlutir einfaldaðir um of, en úr því má auðveldlega bæta ef nauðsyn krefur. Meginboðskapurinn er á þann veg að betra sé að stilla kröfum um prófanatíðni í hóf og fylgja þeim eftir án undanbragða, heldur en að íþyngja verktakanum með kröfum um prófanatíðni umfram það sem nauðsynlegt er og getur talist sanngjarnt frá sjónarmiði beggja. Hið síðarnefnda býður heim hættu á að tíðnikröfurnar verði að meira eða minna leyti hundsáðar þegar fram í sækir.

1. Hér er ekki talið skipta neinu máli hvaðan prófananiðurstöður eru komnar, svo lengi sem verkkaupinn treystir þeim. Að þeirri forsendu gefinni er engin ástæða til að verkkaupinn (eða fulltrúi hans, eftirlitsmaður) taki og rannsaki sams konar sýni og verktakinn er þegar búinn að gera.
2. Gert er ráð fyrir að verktakinn sé algerlega frjálst að því hvað hann tekur mörg sýni af hráefnum sínum eða framleiðslu sinni, nema hvað hann þarf auðvitað að uppfylla kröfur staðla ef hann selur framleiðslu sína sem CE-merkta.
3. Þar af leiðandi virðist liggja beint við að verkkaupi geri tvennskona kröfur til prófanatíðni, annars vegar ef framleiðslan er CE-merkt, hins vegar ef hún er það ekki.
4. Ef framleiðsla er CE-merkt verður að teljast ósanngjarnt að gera kröfur um að verktaki taki og prófi sýni umfram það sem CE-merkingin krefst. En að sjálfsögðu getur verkkaupi tekið sýni aukalega af framleiðslunni ef honum sýnist svo, en þá verður að teljast sanngjarnt að hann geri það á eigin kostnað.
5. Með rökstuðningi í framangreindum atriðum sýnist réttmætt að verkkaupi eigi aðeins að tiltaka hvaða tíðnikröfur hann setur til prófana sem taka til einstakra framleiðsluþátta. Síðan gangi eftirlitsmaðurinn eftir niðurstöðum hjá verktakanum, en bæti við eigin sýnum til að uppfylla tíðnikröfuna, ef tíðni verktakasýna nægir ekki. Ef eftirlitsmaðurinn telur fleiri sýni nauðsynleg en tíðnikröfur kveða á um, þá sér hann um að þau séu tekin og rannsökuð á kostnað verkkaupa. Ef framleiðslan stenst ekki kröfur er réttmætt að verktakinn greiði kostnað við umframsýni, enda kemur þá væntanlega til kasta frádráttarkvæða hvort sem er.
6. Þetta fyrirkomulag mun að öllum líkindum hvetja verktaka til að hafa gott eftirlit með eigin framleiðslu, sem jafnframt sparar verkkaupa fé og fyrirhöfn, þar sem hann þarf þá aðeins að taka sýni með lágmarkstíðni.