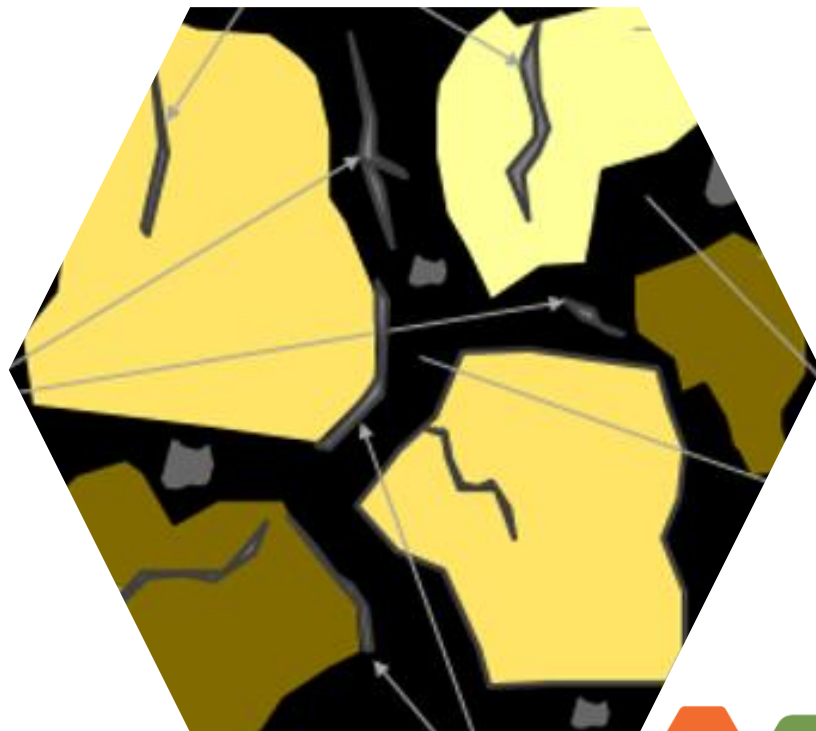


Tæknileg skýrsla

Frostþíðupróf fyrir malbik

Verkþáttur fyrir Slitlög



ReSource International ehf.

Vallakór 4 - 203 Kópavogi, Iceland

+41 (0)78 200 97 87 | +354 571 5864

resource.is



Um skýrsluna

Titill:

Frostþíðupróf fyrir malbik

Útgáfa: 1.2.2

Dagsetning útgáfu: 19.04.2022

Höfundur:

Marteinn Möller (marteinn@resource.is)

Gæðastjórar:

Jón Örvar G. Jónsson, ReSource International ehf. og Guðrún Fjóla Guðmundsdóttir

Ráðgjafarfyritæki:

ReSource International ehf.

Vallakór 4, 2, hæð

203 Kópavogur, Ísland

+354 571 5864 | +41 (0)78 200 97 87

Viðskiptavinur:

Vegagerðin

Tengiliður:

Ólafur Sveinn Haraldsson

+354 522 1022

olafur.s.haraldsson@vegagerdin.is



Efnisyfirlit

Formáli	1
Inngangur	1
Markmið skýrslunnar	1
Rannsóknarspurning	2
Nýnæmi	2
Frostþíðustaðall steypu	2
Rannsóknir erlendis á frostþíðupoli malbiks	2
Áhrif frostþíðu á eiginleika malbiks	3
Núverandi staðlar með frostþíðuprófunum	6
Frostþíðupróf fyrir malbik - Tilraun	7
Framkvæmdarlýsing	7
Niðurstöður tilraunar	8
Umræða	10
Áframhaldandi rannsóknir og næstu skref	10
Heimildir	11



Formáli

Verkefnið felur í sér að gera grein fyrir hvernig skal útfæra frostþíðupróf sem notuð eru fyrir steypurannsóknir þannig að þau geta verið heimfærð yfir á malbiksannsóknir. Í verkefninu verður fjallað um þjóðir sem hafa útfært sambærilegan staðal og rannsaka hvernig er best að haga útfærslu á umræddum steypustaðli þannig að hann henti fyrir malbiksannsóknir. Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

Inngangur

Á Íslandi eru sveiflur milli frosts og þíðu algengar. Þessar sveiflur eru yfirleitt kallaðar frostþíðu-sveiflur og telst ein sveifla vera þegar hitastig tekur að lækka niður fyrir frostmark og hækkar svo aftur upp í fyrra hitastig. Loftslagið á Íslandi veldur oft fleiri en einni frostþíðusveiflu á dag. Til að bregðast við hálkunni sem myndast í frosti er salt lagt á götur og vegi sem hálkuvörn. Þar að auki gengur iðulega sjór á land sem einnig veldur aukinni seltu. Áhrif frostþíðu-sveiflna og seltu á malbik hefur ekki verið rannsökuð á Íslandi. Hins vegar þá er steypa prófuð fyrir þessum áraunum og er mæling á áhrif frostþíðu á steypu staðlað ferli sem mætti yfirfæra yfir á malbik.

Malbik er að mestu blanda af steinefni, biki, íaukum og loftrými. Við vot skilyrði seytlar vatn inn í opin loftrými í malbikinu og við nægilegan kulda frýs það (Alawneh et al., 2020; Carpenter et al., 1975; Laukkanen et al., 2012). Við frost þennst vatnið út og veldur því sem oft er kallað frostlyfting eða „frostsprenging“ í malbikinu. Við endurteknar frostþíðulotur getur malbikið orðið fyrir skemmdum og rýrnum á gæðum.

Malbikstegundir hafa mismunandi innihald og fara í gegnum mismunandi ferla þegar það er lagt. Tegundirnar hafa því mismunandi eiginleika og gæði sem verða fyrir breytingum með hverri frostþíðulotunni. Eftir því sem eiginleikar malbiks breytast með frostþíðusveiflum getur orðið rýrnun á gæðum malbiksins. Þannig hafa malbikstegundir mismikið frostþíðuþol eftir því hve mikið eiginleikar og gæði þess breytast við hverjar frostþíðusveiflu.

Það er eflaust mismunandi hversu mikil áhrif frostþíða hefur á gæði og styrk malbiks. Eitt vandamálið sem felst í frostþíðu er hvernig áhrifin eru mismunandi eftir dýpt. Ef frost nær eingöngu niður á lítið dýpi á meðan þíða er á yfirborðinu, getur vatn seytlað niður á frosið lag sem virkar þá sem ógegndræp panna. Þegar þyngri bifreiðar aka yfir veginn við þessar kringumstæður væri því tregða á streymi vatns niður fyrir frosna lagið og vatnsþrýstingur myndast í slitlagi malbiksins.

Markmið skýrslunnar

Notast er við fjölmargar tegundir malbiks á Íslandi sem hafa ólíka eiginleika. Engar innlendar rannsóknir fundust um það hvaða áhrif frostþíðan hefur á þessar ólíku malbikstegundir og engin viðmiðunarmörk eru um það hve mikið frostþíðuþol þykir hæfa malbiki miðað við íslenskar aðstæður. Með þessari rannsókn er markmiðið að hefja þróun á rannsóknaraðferð sem nýtist til þess að prófa áhrif malbiks við frostþíðusveiflur. Tilgangur rannsóknarinnar er að gera grein fyrir þeim rannsóknnum sem hafa verið gerðar, hvort og hvernig sé hægt útfæra frostþíðustaðal fyrir steypu þannig að hægt sé að mæla áhrif frostþíðu í malbiki.

Rannsóknarspurning

Leitast verður eftir því að svara eftirfarandi rannsóknarspurningum: Hvernig má gera greinarmun á mismunandi þoli frostþíðu malbiks? Er munur á þoli á milli tegunda malbiks? Hvernig er best að heimfæra staðalinn um frostþíðuþol steypu yfir á malbik.

Nýnæmi

Á Íslandi er ekki gerð krafa á að prófa frostþíðuþol malbiks. Samt sem áður benda rannsóknir til að frostþíða hafi áhrif á endingu malbiks (Alawneh et al., 2020; Barlas, 2013; Cong et al., 2020; Sun et al., 2020). Íslenskt veðurfar herjar því á malbikið hér á landi án þess að vitað sé hve stórvægileg áhrif þess eru.

Frostþíðustaðall steypu

Frostþíðustaðall steinsteypu, sem vísað er í hér, er ÍST CEN/TS 12390-9:2016 (e. Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance - Scaling - Complementary element). Staðallinn prófar frostþíðuþol steinsteypu og er útfærður þannig að steypa er lögð í form og hliðarnar þéttaðar með kíttri. Næst er útbúin saltvatnslausn, hún látin liggja (~1 cm lag) ofaná steypusýninu og þetta látið liggja í frostþíðuskáp í u.þ.b. fjórar vikur. Hitastigið í skápnnum sveiflast milli frosts og þíðu einu sinni á dag (frá $20\pm 5^\circ\text{C}$, niður í $-20\pm 2,5^\circ\text{C}$ og aftur í byrjunarhitastig á 24 klst), en mismunandi frostþíðuþol er mælt út frá því hversu mikið efni kvarnast af yfirborði steypusýnanna (í grömmum).

Rannsóknir erlendis á frostþíðuþoli malbiks

Á undanförunum árum hafa rannsóknir verið framkvæmdar í Mongólíu, Finnlandi, Canada og Nýju Mexico í Bandaríkjunum sem varða þol malbiks fyrir frostþíðusveiflum. Í þessum rannsóknum hefur ekki verið einhugur í vali á aðferðafræði, né heldur hvaða prófanir skulu gerðar á malbikinu. Undirbúningur sýna getur verið af ýmsum toga og þar af leiðandi erfitt að bera saman niðurstöður á milli rannsókna. Til þess að gefa einhverja innsýn inn í þær aðferðir sem notast hefur verið við verður stiklað á stóru yfir nokkur algeng vandamál við mögulega aðferðir hér á eftir.

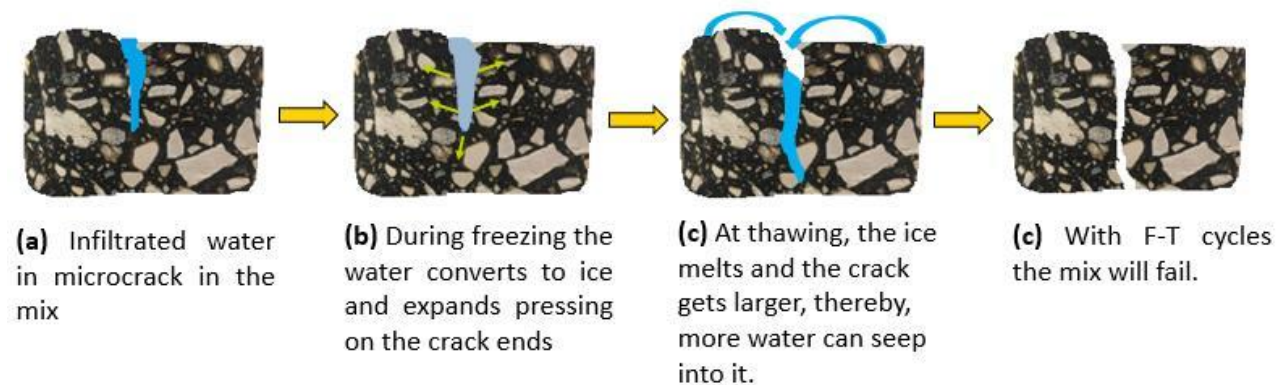
Við undirbúning sýna er yfirleitt leitast til þess að notast við þekktar og prófaðar aðferðir; til að mynda stöðlum um Marshall próf eða kleyfnitogþolsprófun (e. Indirect tensile strength, IDT) (ÍST EN 12697-23:2017; ÍST EN 12697-34:2012). Sýnin geta þá verið sett þurr í frostþíðuklefa eða í vatnsbaði og sett þurr inn en böðuð við þíðu. Vatnið getur verið eimað eða beint af krana og saltblandað, þá með mismikilli seltu. Frostþíðu loturnar geta einnig verið mismargar, mislangar og sveiflurnar misstórar. Það er því ljóst að samanburður rannsókna og meðhöndlun sýna getur reynst flókin og torskilin.

Rannsóknir á áhrifum frostþíðu á malbiki hefur verið til umfjöllunar hjá mörgum rannsakendum á síðastliðnum tveimur áratugum. Óumdeilt er að frostþíða hefur neikvæð áhrif á eiginleika malbiks og því brýnt að setja staðal fyrir malbiksframleiðendur um eiginleika malbiks til að viðhalda lágmarkskröfum eftir frostþíðu (Alawneh et al., 2020; Barlas, 2013; Cong et al., 2020; Epps et al., 2000; Laukkanen et al., 2012; Özgan & Serin, 2013; Sun et al., 2020). Eftir einungis eina frostþíðulotu er tölfraðilega marktækur munur á styrkleika malbiks (Cong et al., 2020; Epps et al., 2000). Styrkleikamissirinn verður greinilegri með hverri frostþíðu tilraunalotunni, upp í a.m.k. 10 – 14 lotur (Cong et al., 2020; Laukkanen et al., 2012; Özgan & Serin, 2013) og áfram upp í 24 – 50 lotur (Alawneh et al., 2020; Özgan & Serin, 2013; Teltayev et al., 2019). Munurinn á milli

malbikstegunda var einnig greinilegur og niðurstöður gefa tilefni til frekari rannsókna (Epps et al., 2000; Özgan & Serin, 2013). Þessar niðurstöður styðja við tilgátuna að staðall fyrir frostþíðuprófanir á malbiki gæti komið að notum við hönnun og endingu bundinna slitlaga á Íslandi.

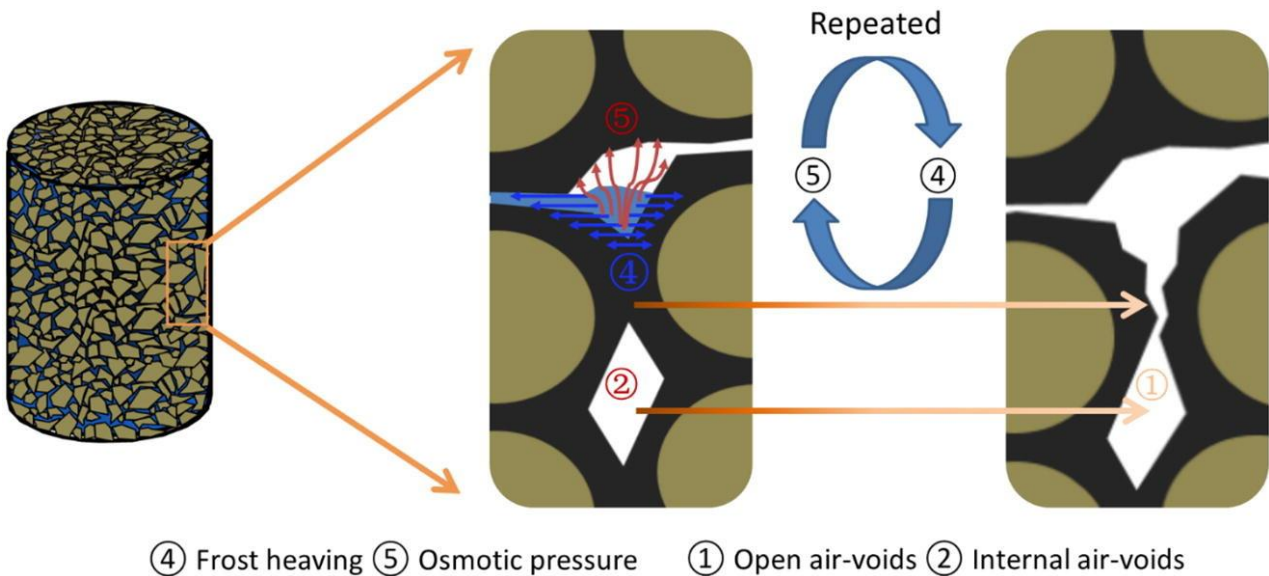
Áhrif frostþíðu á eiginleika malbiks

Það hafa verið lagðar fram þó nokkrar tilgátur um hvernig eiginleikar malbiks breytast við frostþíðusveiflur. Flestar kenningar beinast að því hvernig vatn þenst út við frýstingu og frostsprengir þannig uppbyggingu malbiksins eins og sýnt er á **Mynd 1** (Alawneh et al., 2020; Cong et al., 2020).



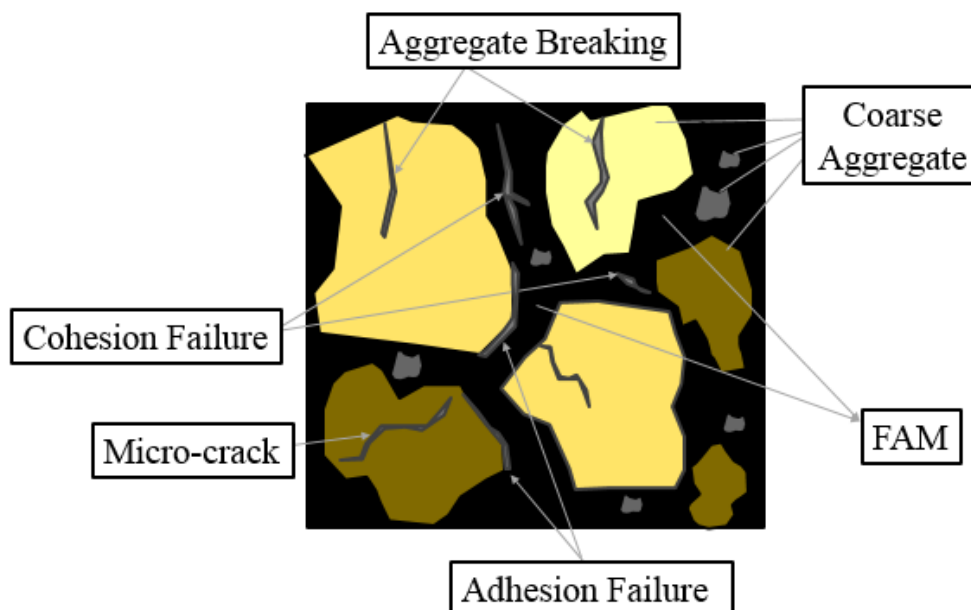
Mynd 1 Ferli frostsprengingar á malbiki (a) vatn smígur inn í smáar glufur í malbikinu, (b) Vatn þenst út við það að frjósa og þrýstir á yfirborð sprungunnar, (c) ísinn þíðnar og skilur eftir sig stærri sprungu en fyrir var, (d) við endurteknar frostþíðulotur brotnar malbikið upp (Fengið úr Alawneh, 2020).

Þetta ferli getur einnig átt sér stað inn í malbikinu og þannig opnað fyrir lokuð loftrými inn í „massanum“ eins og **Mynd 2** sýnir (Cong et al., 2020). Við það minnkar hlutfallslegur eðlismassi (e. Bulk Relative Density) malbiksins og eftir því sem frostþíðuloturnar aukast, minnkar hann síðan áfram. Um leið minnkar kleyfnitogþol og hlutfallslegt togþol malbiksins (e. tensile strength ratio, TSR) sem leiðir til þess að malbikið þolir minni þrýsting áður en það brotnar. Til viðbótar fann Alawneh o.fl., (2020) að samloðunin gat einnig minnkað milli fínni og grófari efna þar sem bindiefni malbiksins þoldi misvel frostþíðuloturnar. Þetta stafar líklega af breytingum í seigjunni við hitastigs breytingarnar og hefur þá frostmark biksins líklega mestu áhrifin þar.



Mynd 2: Sprungumyndun leiðir til aukins holrýmdar en minnkun á lokuðu loftrými. (1) loftrými opin út í andrúmsloft, (2) lokuð loftrými, (4) frostlyfting, (5) flæðiþrýstingur (fengið úr Cong, 2020)

Lítið hefur verið um rannsóknir á styrkleikamissi við frostþíðulotur. Megin þungi rannsókna hafa fremur snúið að því hvernig eiginleikar malbiksins breytast við hitabreytingarnar (Alawneh et al., 2020; Barlas, 2013; Cong et al., 2020; Sun et al., 2020). Þessar hitastigsbreytingar eru bundnar mettunarstigi malbiksins og ber því að gæta þess að vatnsinnihald, við prófanir, sé kvarðað (Alawneh et al., 2020). Breytingar á eiginleikum malbiks má draga saman sem svo: stækkun á loftrúmum, samruni loftrúma og nýmyndun loftrúma en við það bæði eykst holrými malbiks og lokuð loftrúm fækka. Óvíst er hvort varanleg áhrif verði á eiginleikum biksins en uppbrot úr malbikinu eykst við frostþíðuna vegna sprungumyndunnar (**Mynd 3**).



Mynd 3: Breytingar á eiginleikum malbiks við frostþíðu lotur; Sprungumyndanir, uppbot steinefna og brestur á samloðun og viðloðun. (fengið úr Alawneh, 2020)

Ekkert samræmi er á því hvernig best sé að prófa frostþíðuáhrif á malbiki. Sem dæmi sýnir **tafla 1** hluta af þeim margvíslega aðferðum sem eru notaðar og þann fjölbreytileikan breytna í prófunum.

Tafla 1. Mismunandi mælingar á áhrifum frostþíðusveiflna á malbik – samantekt á erlendum rannsóknum

FP-lotur	Varmastigull	Styrkleik apróf	Malbiks gerð	Vökvi	Bleytu aðferð	Heimild
30	1,33°C/min	ekkert	AC og RAP (10%)	Vatn	Vacum 1x	Alawneh, 2020
1	15 klst að ná -18 °C	IDT	HMA	Vatn	óþekkt	Epps, et al., 2000
0 - 10	30 mín að ná -18 °C; haldið við í 16 klst; 30 mín að ná 60 °C; haldið við í 24 klst	IDT, TSR, BRD	HMA	Vatn og þurr	óþekkt	Cong et al., 2020
300	110 mín að ná -18 °C 70 mín að ná 4.4 °C	ekkert	HMA	Vatn	Þýtt í bleytu (2)	Goh and You, 2012
0, 5 og 1 ár utandyra	12 klst að ná -33 °C; haldið við í 12 klst; 12 klst að ná 38 °C; haldið við í 12 klst	ITS (IDT), ITSIR o.fl.	AC	þurr, vatn og saltlausn		Vega-Zamanillo et al., 2020
0 - 24	óuppgefið	Marshall o.fl.	HMA/A C	óuppgefið		Özgan and Serin (2013)

Núverandi staðlar með frostþíðuprófunum

Nokkrir staðlar eru þegar í notkun til að meta áhrif frostþíðu á malbik. Vestanhafs hafa tveir staðlar verið notaðir þar sem notast er við eða minnst á frostþíðupól malbiks. Annars vegar hjá American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) og hins vegar hjá American Society for Testing and Materials (ASTM) (Epps et al., 2000). Í staðli ASTM (ASTM D 4867/D 4867M - 2009) er frostþíðuprófunin valkvæð og hvorki er skilgreindur tíminn sem sýnið skal ná ákveðnu hitastigi undir frostmarki, né að þiðna. Þar að auki er einungis gert ráð fyrir einni frostþíðulotu í báðum þessum stöðlum.

Finnska samgöngustofan (e. Finnish Transport Agency) hefur framkvæmt ítarlegar rannsóknir á frostþíðuprófunum á malbiki (Laukkanen et al., 2012). Þau hafa stuðst við staðalinn ÍST EN 12697-12:2008 um vatnsnæmnispróf á malbiki til að prófa áhrif frostþíðulota á malbik. Það er sagður helsti staðallinn um áhrif veðrunar á malbik en á honum eru ákveðnar takmarkanir sem höfundar benda á og gert skal grein fyrir hér. Í kleyfnitögbolsprófununni eru borin saman samanburðarsýni og sýni sem legið hafa í vatnsbaði. Annað sýnið er fullmettað við prófunina á meðan samanburðarsýnið er það ekki. Sömu höfundar telja að fullmettuð sýni séu sterkari vegna áhrifa mettnarinnar og því sé samanburðurinn ómarktækur. Bera þurfi saman sýni á sama mettnarstigi til þess að niðurstöðurnar séu marktækar.

Finnska samgöngustofan telur einnig að prófanir með saltlausn séu ekki líklegar til árangurs þar sem saltið skilur sig frá ferskvatninu í efstu lögum sýnisins en vatnið á yfirborðinu frýs ósaltað (Laukkanen et al., 2012). Saltið sekkur við frystingu þar til vatnið full-saltmettast en þá fyrst frýs saltvatnið. Saltvatnslausnin frýs því ekki fyrr en neðarlega í sýninu en það leiðir til þess að frystingin er mögulega ólík náttúrulegri frystingu sem á sér stað í opnu rými á meðan sýnin eru í lokuðu rými. Ef prófa eigi áhrif saltvatnslausnar og frostþíðu þyrfti að útfæra prófanirnar á annan hátt. Aðrir rannsakendur eins og Vega-Zamanillo et al. (2020) benda þar að auki á að saltlausnin hefur ekki neikvæð áhrif á niðurstöður úr styrkleika prófunum á malbiki eftir frostþíðulotur. Þvert á móti virðist saltlausnin verja malbikið fyrir verstu áhrifum frostþíðulotunnar og malbikið sterkara eftir frostþíðuprófunina.

Vinnuhópur á vegum samgöngustofu Finnlands og finnska malbikssambandsins (e. Finnish Asphalt Pavement Association) hafa þegar útbúið staðal um prófanir á frostþíðupóli á malbiki í opnu rými (Laukkanen et al., 2012; PANK-4306, 2011). Eins og finnska samgöngustofan styðst vinnuhópurinn við ÍST EN 12697-12:2008 staðalinn um vatnsnæmnispróf til að mæla áhrif frostþíðu á styrk malbiks. Lukkanen et al. (2012) benda þó á galla prófsins (samaber umfjöllun hér að ofan) og mæla með að víkja frá staðlinum varðandi samanburðarsýnið. Þeir mæla með því að undir lok prófunarinnar sé samanburðarsýnið látið í vatnsbað líkt og prófunarsýnin í 30 mínútur (+ 5 mín) til þess að vatnsmettunarstig sýnana sé það sama. Þar að auki telja Laukkanen et al. (2012) nauðsynlegt að geyma samanburðar sýnið við 5°C á meðan frostþíðuprófanirnar eiga sér stað á prófunarsýninu svo að prófanir séu marktækar. Samanburðarsýnin gangist undir hraðari öldrun ef það er geymt við stofuhita á meðan prófunarsýnin séu í kulda, en þetta gæti bjagað niðurstöðunum þar sem samanburðarsýnið gæti verið að tapa eiginleikum vegna öldrunarinnar.

Finnski staðallinn (PANK-4306:2011) lýsir fjórum aðferðum við frostþíðuprófanir, þar sem sýnin eru látin liggja í vatni við frystingu, og á þurru við frystingu (PANK-4306, 2011). Frostþíðuloturnar eru svipaðar og í staðlinum ÍST CEN/TR 15177:2006 um frostþíðupól steinsteypu. Miðað er við að nota sömu prófanir og við ÍST EN 12697-

12:2008 með kleyfnitogþoli. Í finnska staðlinum eru notaðir sérstakir láréttir frostþíðuskápar álíka þeim sem lýst er í bæði ÍST CEN/TS 12390-9:2016 og ÍST CEN/TR 15177:2006 staðlinum, með sjálfvirkri vökva áfyllingu fyrir tvær aðferðir og mælingar rita en tvær aðferðir miðast við svipaðar aðstæður og við að nota frostþíðuklefa.

Finnski staðallinn notast við sjálfvirka vökva áfyllingu til þess að hægt sé að frysta sýnin í þurru umhverfi og endurvæta þau eftir hverja frystingu. Þannig er vökvinn tæmdur úr sýninu við upphaf frystingar og það aftur fært á kaf við upphaf þýðingar. Þetta er gert til að líkja betur eftir eðlilegum aðstæðum malbiksins þar sem sjaldgæft er að malbik sé undir vatnsyfirborði við frystingu.

Eins og fyrr segir er síðan notast við ÍST EN 12697-12:2008 en ekkert er því til fyrirstöðu að nota staðallinn ÍST EN 12697-34:2020 um Marshall próf á malbiki líkt og var gert í þessari rannsókn.

Frostþíðupróf fyrir malbik - Tilraun

Eins og komið hefur fram þá er samstaða vísindafólks um að frostþíðusveiflur myndi sprungur í malbiki og hafa almennt neikvæð áhrif á eiginleika þess. Prófanir og eftirlit með áhrif frostþíðu fyrst tilgang ef munur er á áhrif frostþíðu eftir tegund malbiks því ef frostþíða hefur sömu áhrif á allt malbik er ekki hægt að gera malbik sem þolir frostþíðusveiflur betur. Til þess að mæla áhrif frostþíðu á malbik voru gerðar tilraunir á malbikssýnum í frostþíðuklefa Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands og þau prófuð með Marshall prófi (ÍST EN 12697-34:2012).

Tilgátur tilraunarinnar eru:

- að áhrif frostþíðu séu mælanleg með Marshall prófi og
- að áhrif frostþíðu séu mismikil eftir tegund malbiks.

Framkvæmdarlýsing

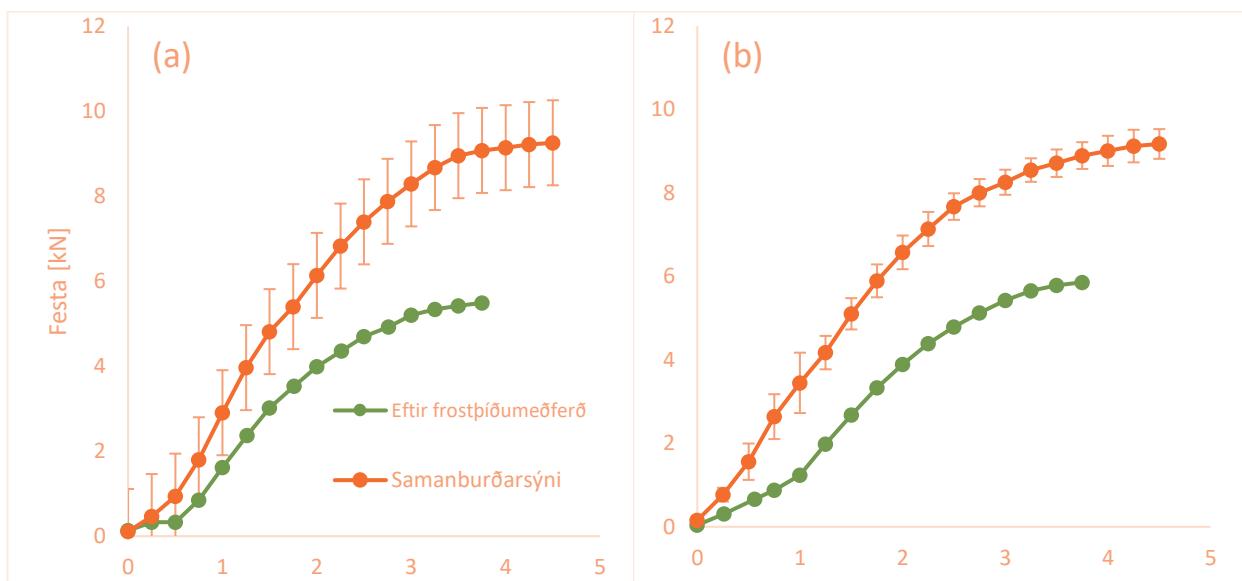
Prófaðar voru fjórar malbiksblöndur, tveir kjarnar fyrir hverja blöndu (átta sýni). Malbikið var blandað samkvæmt staðli ÍST EN 12697-35:2016, kjarnarnir mótaðir samkvæmt staðli ÍST EN 12697-30:2018 og Marshall próf framkvæmt samkvæmt staðli ÍST EN 12697-34:2012. Malbiksblöndurnar sem prófaðar voru innihéldu 94,7% 16 mm Durasplitt steinefni, 5,3% hart bindiefni og þar af 0, 8, 16 og 20% úrgangsplast sem hlutfall af bindiefnainnihaldi hvers blöndu. Blöndurnar voru valdar vegna aðgengileika efna og niðurstaða ýmissa prófa sem framkvæmdar hafa verið á þessum malbiksblöndum.

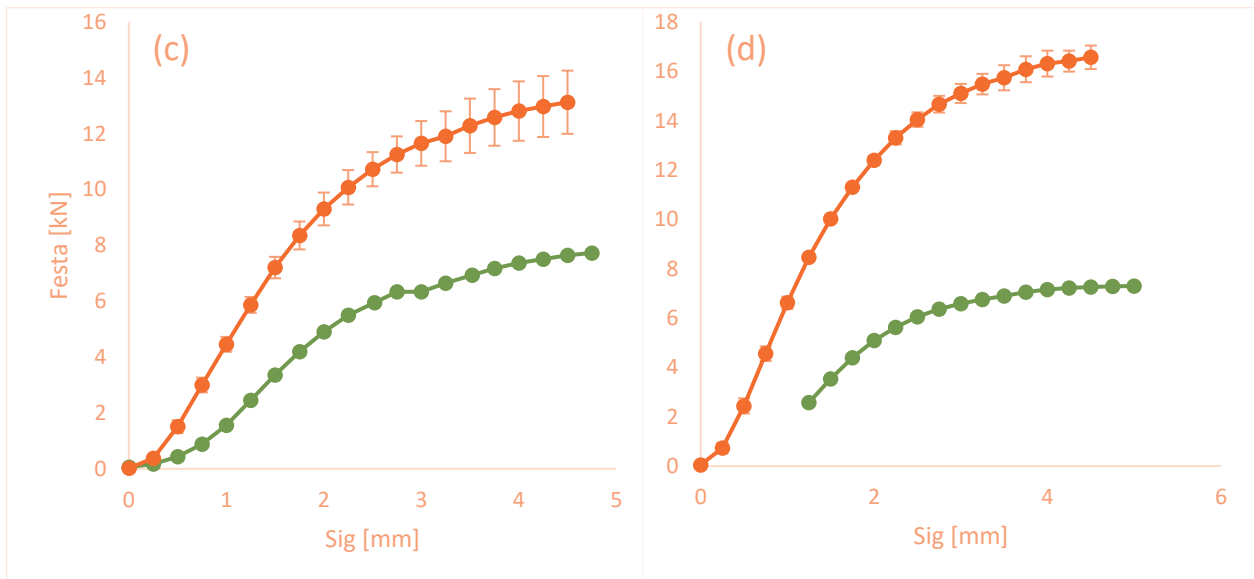
Til þess að mæla áhrif frostþíðu var annar kjarni hvers malbiksblöndu komið fyrir í plastform og hliðarnar þéttaðar með kítu eins og frostþíðustaðall steinsteypu (ÍST CEN/TS 12390-9:2016) tilgreinir. Útbúin var saltvatnslausn (3% salt á móti vatni) og henni hellt yfir sýnin þannig að lausnin næði ~1 cm lag ofaná malbikssýnunum. Sýnin voru látin liggja í frostþíðuskáp í 10 mánuði (frá 8. mars 2021 til 5. janúar 2022), þar sem skápurinn sveiflaðist milli frost og þíðu einu sinni á dag, frá -22°C til 22°C. Þannig sveiflast hitastigið í skápnun milli frosts og þíðu eftir ákveðinni rúttinu sem markast af hitastigsbreytingu á tímaeiningu og hámarks- og lágmarkshitastigi. Þegar frostþíðumeðferðinni er lokið eru sýnin fjarlægð úr klefanum, í þíðu, og látin þorna. Þá eru sýnin vigtuð og meðhöndluð eins og um Marshall-prófanir séu að ræða eftir staðlinum um Marshall próf (ÍST EN 12697-34: 2012).

Þegar sýnin voru fjarlægð úr frostþíðuklefanum var fljótt ljóst að aðferðina þyrfti að aðlaga betur að malbiki. Tvö atriði stóðu þar uppúr. Fyrra atriðið stafaði af því malbik er gegndræpt ólíkt og steinsteypu, því seitlaði saltvatnslausnin til botns á malbikssýninu í stað þess að liggja á yfirborðinu, líkt og hún gerir á steinsteypunni. Seinna atriðið sneri að áferð og eiginleika malbiksins. Mikil spritt lykt var af sýnunum þegar þau komu úr frostþíðuklefanum og malbikið var klístraðara en það er alla jafna. Svo virðist sem bindiefni kjarnanna hafi leysts að hluta upp í kítinu, og því er í raun engin ástæða til að nota kítta þar sem sýnin eru lek eins og var nefnt. Malbikið gæti hafa tapað eiginleikum vegna þessara efnabreytinga sem hefðu þá mögulega áhrif á Marshall prófin.

Niðurstöður tilraunar

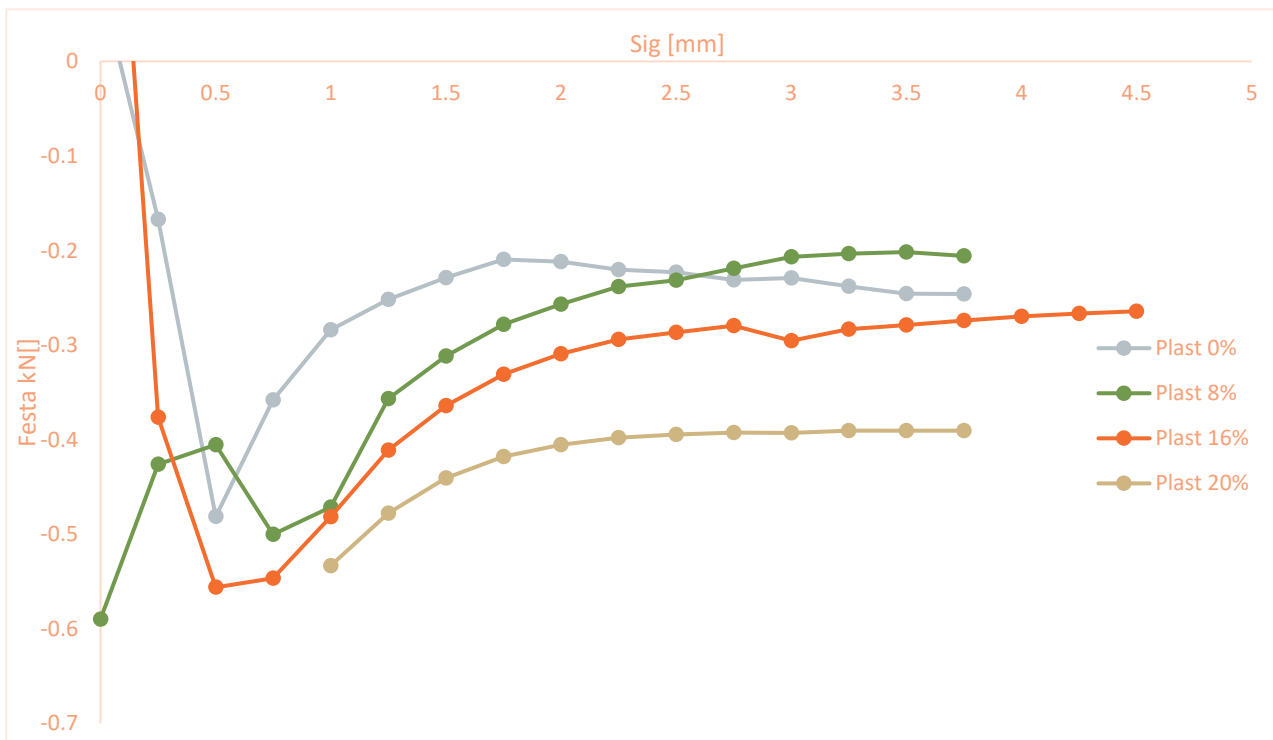
Þrátt fyrir hnökra í prófunum voru niðurstöðurnar nokkuð skýrar. Þegar samanburðarsýni eru borin saman við frostþíðu sýnin eru áhrif frostþíðunnar greinileg. Öll sýnin taka meiri formbreytingu við minna álag ásamt því að bortna við minna álag eftir frostþíðumeðferðina. Þessi munur eykst með plastinnihaldi. Þannig er munurinn á milli samanburðarsýnins og frostþíðusýni mismunandi eftir tegundum malbiks. Eins og var vitað að myndi gerast, brotnuðu malbiksýnin við meira álag eftir því sem plastinnihaldið var meira og sigið var minna. Festa malbiksins jókst við aukið plastinnihald og formbreytingin minnkaði (**Mynd 4**). Malbikið varð þannig stökkara við aukið plastinnihald. Þessar niðurstöður áttu við malbiksýnin sem voru látin sitja frostþíðumeðferð ásamt viðmiðunarsýnunum.





Mynd 4: Mismunur festu eftir plastinnihaldi fyrir og eftir frostþíðu. (a) 0% plastinnihald, (b) 8% plastinnihald, (c) 16% plastinnihald, (d) 20% plastinnihald. Rauða línan táknar samanburðarsýnið og græna lína sýnið sem gekkst við frostþíðumeðferð

Þegar mismunur styrks malbiks, fyrir og eftir frostþíðu, var staðlaður kom í ljós að formbreytingin er að auki hlutfallslega meiri eftir auknu plastinnihaldi (**Mynd 6**). Það er; sig var meira og kleifni minni við brot. Frostþíðumeðferðin hafði meiri áhrif eftir því sem plastinnihaldið var meira, með öðrum orðum - styrkleikamissirinn við frostþíðumeðferð jókst með auknu plastinnihaldi.



Mynd 5: Staðlaður mismunur festu (styrkleika missir) malbiks með mismikið plastinnihald eftir frostþíðumeðferð

Umræða

Ljóst er að frostþíðustaðall steinsteypu gæti nýst við gerð frostþíðustaðal fyrir malbik en aldrei þó að fullu (ÍST CEN/TS 12390-9, 2016). Steinsteypa er ekki gegndræp líkt og malbik, ásamt því að kítta hefur mögulega áhrif á eiginleika bindiefnis malbiks og breyti þannig niðurstöðum styrkleikaprófsins. Undirbúningur sýna þyrfti því að vera öðruvísi og lagaður gegndræpum eiginleikum malbiks. Búnaður og ílát sem notuð eru við prófanir á frostþíðupoli steinsteypu ættu að nýtast frostþíðuprófunum á malbiki þar sem sýni gætu legið í plastbökkum án kítis í vatnsbaði. Niðurstöður þessarar rannsóknar benda því til þess að hægt sé að gera sambærilegar prófanir á frostþíðupoli malbiks og frostþíðupoli steinsteypu.

Við túlkun á niðurstöðum ber að hafa í huga að efni úr kíttinu gætu hafa haft neikvæð áhrif á samloðun malbiksins. Óvíst er hve mikil áhrif öldrun ein og sér hefur en samanburðarsýni voru brotin þremur dögum eftir að kjararnir voru gerðir. Ákveðin styrkleika missir er vænt af öldrun einni og sér. Að öðru leyti er ljóst að frostþíðumeðferðin hafði neikvæð áhrif á styrkleika malbiksins. Styrkleikamissirinn af völdum frostþíðunnar var meiri eftir því sem malbikið var togþolnara. Aukið togþol malbikstegundana stafaði af auknu plastinnihaldi.

Miðað við niðurstöður tilraunarinnar þykir hins vegar ástæða til að kanna og hafa eftirlit með áhrif frostþíðu á malbik. Ástæða þykir vera til þess að innleiða frostþíðustaðal vegna þess hve áhrif frostþíðu reyndist vera mismikil á milli tegunda malbiks, bæði í þessari rannsókn og erlendum (Epps et al., 2000; Özgan & Serin, 2013).

Áframhaldandi rannsóknir og næstu skref

Tilfni til áframhaldandi þróun á frostþíðustaðli fyrir malbik er þannig til staðar. Eins og bent er á, er þegar til staðall frá Finnlandi um frostþíðuprófanir á malbiki sem mætti byggja íslenskan staðal á (Laukkanen et al., 2012). Þróa og ákvarða þyrfti staðlað viðmiðunar fall á leyfilegum styrkleika missi eftir frostþíðumeðferð. Ákvarða þyrfti leyfilegt tap á eiginleikum miðað við settan fjölda frostþíðulota miðað við ráðgerðan endingartíma. Viðmiðunin þyrfti að taka til greina umhverfisaðstæður á hverjum stað. Að auki þyrfti að ákveða hvaða styrkleikapróf væri best að miða við og nefna höfundar sérstaklega til greina veikleika vatnsnæmisprófsins sem greint hefur verið frá. Til þess að ná þessum markmiðum verður að ráðast í áframhaldandi rannsóknir á malbiki notaðar á Íslandi og finna hæfilegar viðmiðanir.

Fyrir áframhaldandi rannsóknir þá er mælt með að :

- Rannsókn á áhrif frostþíðu á malbik skal endurtekin með eftirfarandi breytum:
 - a) án þess að nota kítta
 - b) með samanburðarsýni sem ekki viðgangast frostþíðulotur geymd í kæli (5°C)
 - c) með þurr samanburðarsýni í frostþíðuklefa
 - d) með prófunarsýni sem liggur í saltvatnslausn
 - e) með prófunarsýni sem liggur í ferskvatni
 - f) með prófunarsýni sem liggur í saltvatnslausn við þýðingu en á þurru við frystingu
 - g) með prófunarsýni sem liggur í ferskvatni við þýðingu en á þurru við frystingu
- Það þykir ástæða til að skrá hvernig saltlausn frýs í sýni

- Skoða skal að stytta tilraunátíma og á hvaða tímamarki nægileg áhrif frostþíðu sé komin fram, þ.e. hve markar frostþíðulotur sýnin þurfa að gangast undir.
- Athuga mætti útfærslu finnska staðalsins á:
 - i) meðferð viðmiðunarsýna
 - ii) skolun sýna í saltlausn
 - iii) óvissur í mælingum
- Rannsókn skal prófa hvernig frostþíðumeðferð hefur áhrif á:
 - i) Prall slitþol
 - ii) Niðurstöður hjólfaraprófs
 - iii) Vatnsnæmispróf (eins og lýst er í finnska staðlinum)
 - iv) Marshallpróf
- Rannsókn mætti prófa samspil holrýmdar og frostþíðumeðferðar
- Rannsókn mætti prófa áhrif frostþíðu á burðarlagsmalbik

Heimildir

AASHTO T 283. (2021). *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Alawneh, M. M., Soliman, H., & Anthony, A. (2020). *Investigating the Freeze-Thaw Damage in Asphalt Concrete Using Imaging Techniques* (p. 21). University of Saskatchewan.
<https://trid.trb.org/view/1754895>

ASTM D 4867/D 4867M. (2009). *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

Barlas, G. (2013). *Material Characteristics of Hot Mix Asphalt and Binder Using Freeze-Thaw Conditioning* [Masters, The University of New Mexico]. https://digitalrepository.unm.edu/ce_etds/88

Carpenter, S. H., Lytton, R. L., & Epps, J. A. (1975). *PAVEMENT CRACKING IN WEST TEXAS DUE TO FREEZE-THAW CYCLING* (No. 532; Transportation Research Record, p. 13). Transportation Research Board.

- Cong, L., Ren, M., Shi, J., Yang, F., & Guo, G. (2020). Experimental investigation on performance deterioration of asphalt mixture under freeze–thaw cycles. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 9(3), 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2020.04.004>
- Epps, J. A., Sebaaly, Peter. E., Penaranda, J., Maher, M. R., McCann, M. B., & Hand, A. J. (2000). *Compatibility of a Test for Moisture-induced Damage with Superpave Volumetric Mix Design* (NCHRP Report 444; p. 108). Transportation Research Board. https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_444.pdf
- ÍST CEN/TR 15177. (2006). *Testing the freeze-thaw resistance of concrete—Internal structural damage*. Staðlaráð Íslands. <https://stadlar.is/stadlabudin/vara/?ProductName=IST-CEN-TR-15177-2006>
- ÍST CEN/TS 12390-9. (2016). *Testing hardened concrete—Part 9: Freeze-thaw resistance—Scaling—Complementary element*. Staðlaráð Íslands. <https://stadlar.is/stadlabudin/vara/?ProductName=IST-CEN-TS-12390-9-2016>
- ÍST EN 12697-12. (2008). *Bituminous mixtures—Test methods—Part 12: Determination of the water sensitivity*. Staðlaráð Íslands. <https://stadlar.is/stadlabudin/vara/?ProductName=IST-EN-12697-12-2008>
- ÍST EN 12697-23. (2017). *Bituminous mixtures—Test methods for hot mix asphalt—Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*. <https://stadlar.is/stadlabudin/vara/?ProductName=IST-EN-12697-23-2017>
- ÍST EN 12697-30. (2018). *Bituminous mixtures—Test methods—Part 30: Specimen preparation by impact compactor*. Staðlaráð Íslands. <https://stadlar.is/stadlabudin/vara/?ProductName=IST-EN-12697-30-2018>

- ÍST EN 12697-34. (2012). *Bituminous mixtures—Test methods for hot mix asphalt—Part 34: Marshall test*. Staðlaráð Íslands. <https://stadlar.is/stadlabudin/vara/?productId=3ef53401-1de5-11eb-9122-005056bcebcd>
- ÍST EN 12697-34. (2020). *Bituminous mixtures—Test methods for hot mix asphalt—Part 34: Marshall test*. Staðlaráð Íslands. <https://stadlar.is/stadlabudin/vara/?productId=757a4eb4-1e02-11eb-9122-005056bcebcd>
- ÍST EN 12697-35. (2016). *Bituminous mixtures—Test methods for hot mix asphalt—Part 35: Laboratory mixing*. Staðlaráð Íslands. <https://stadlar.is/stadlabudin/vara/?ProductName=IST-EN-12697-35-2016>
- Laukkanen, K., Halonen, P., & Pyy, E. (2012). *Resistance of asphalt mixture to freeze—Thaw-cycles and combined effect of water and loadings. Asfadur project. Final report* (No. 20/2012; p. 122). Finnish Transport Agency. <https://trid.trb.org/view/1222881>
- Özgan, E., & Serin, S. (2013). Investigation of certain engineering characteristics of asphalt concrete exposed to freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 85, 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.09.003>
- PANK-4306. (2011). *Asfalttimassan jäätyemis-sulamis kestävyys*. PANK Ry. https://www.pank.fi/wp-content/uploads/2020/12/pank_4306-a-b_asf_j-dytys-sulatuskest_final_v2.pdf
- Sun, Y., Deng, M., Ye, Y., Gao, L., Zhang, H., & Ma, Z. (2020). Research of Method for Improving Antifreeze–Thaw Performance Based on Asphalt Mixture Freeze–Thaw Damage Development Process. *Advances in Civil Engineering, Pavement Analysis and Design by Multiphysics 2020*, 12. <https://doi.org/10.1155/2020/8879880>
- Teltayev, B. B., O. Rossi, C., Izmailova, G. G., & Amirbayev, E. D. (2019). Effect of Freeze–Thaw Cycles on Mechanical Characteristics of Bitumens and Stone Mastic Asphalts. *Applied Sciences*, 9(3), 18. <https://doi.org/10.3390/app9030458>

Vega-Zamanillo, Á., Juli-Gándara, L., Calzada-Pérez, M. Á., & Teijón-López-Zuazo, E. (2020). Impact of Temperature Changes and Freeze—Thaw Cycles on the Behaviour of Asphalt Concrete Submerged in Water with Sodium Chloride. *Applied Sciences*, 10(4), 1241. <https://doi.org/10.3390/app10041241>