
ÁHRIF SALTS Á ÞREYTUÞOL MALBIKS

NMI-1103

Arnþór Óli Arason
Ásbjörn Jóhannesson
Hafsteinn Hilmarsson
Oddur Þórðarson



Rannsóknaverkefni Vegagerðarinnar:

Áhrif salts á þreytuþol malbiks

Reykjavík: Nýsköpunarmiðstöð Íslands 2011

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður skýrslunnar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar né heldur sem álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar skýrslunnar starfa hjá.

ÁGRIP

Markmið verkefnisins var að kanna áhrif salts á þreytuþol malbiks. Með þreytuþoli er átt við mótstöðu malbikssýna gegn sveiflandi álagi og mælikvarði á þreytuþolið er fjöldi álagssveifla þar til nánar tiltekinn veikleiki kemur í ljós. Prófunaraðferðin er ekki stöðluð. Nokkrar sýnasyrpur voru prófaðar. Sumar þeirra voru látnar sæta áhrifum frá salti og aðrar ekki, í því skyni að einangra áhrif saltsins með samanburði á niðurstöðum.

Niðurstöðurnar gefa til kynna að þreytuþol malbiks úr saltmengudu steinefni sé undir vissum kringumstæðum marktækt minna en malbiks úr saltlausu, en að öðru leyti sambærilegu steinefni. Niðurstöðurnar benda jafnframt til þess að malbikssýni úr saltlausu steinefni sem hafa legið í saltvatni í 80 vikur hafi marktækt meira þreytuþol ef bindiefnið er blandað viðloðunarefni en samskonar sýni sem ekki eru blönduð viðloðunarefni, en hafa að öðru leyti sætt sömu meðferð. Hins vegar kom enginn marktækur munur á þreytuþoli í ljós á sýnum úr saltlausu steinefni og án viðloðunarefnis, sem höfðu legið stuttan tíma í bleyti (20 vikur), annars vegar í fersku vatni og hins vegar í saltvatni.

Ýmsir vankantar komu fram á aðferðinni sem notuð var til þreytuþolsprófana. Hún er mjög tímafrek og er þess vegna ónothæf til eftirlitsprófana. Jafnframt kom í ljós að staðalfrávik á niðurstöðum er mjög hátt, og þess vegna er æskilegt að prófa nokkur sýni af hverri gerð, að öðrum kosti verða skekkjumörk á niðurstöðum óheppilega víð. Í skýrslunni eru settar fram nokkrar tillögur um endurbætur á prófunaraðferðinni.

EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	1
1. INNGANGUR	3
2. SKIPULAGNING	5
2.1 Val á prófunaraðferð	5
2.2 Prófunaráfangar	6
2.3 Gerð sýna	6
2.4 Lýsing á prófunaraðferð	9
2.5 Val á þreytuþolsmælikvarða.....	10
3. NIÐURSTÖÐUR MÆLINGA	11
4. ÚRVINNSLA	12
4.1 Þreytuþol	12
4.2 Mettun	14
4.3 Hitastig sýna við prófun	15
4.4 Aukasýni	15
5. UMRÆÐA	16
6. ÁLYKTANIR	18
HEIMILDIR	19
VIÐAUKI I. MÆLIKVARÐAR Á ÞREYTUÞOL	20
VIÐAUKI II. NIÐURSTÖÐUR MÆLINGA	23
VIÐAUKI III. SÆNSK AÐFERÐ TIL AÐ PRÓFA VIÐLOÐUN	27

1. INNGANGUR

Tilgátur um að salt (NaCl), meðal annars frá hálkuvörnum, hafi neikvæð áhrif á endingu malbiks hafa oft verið settar fram. Þessar tilgátur birtast í ýmsum myndum, svo sem að saltið leysi malbikið upp, spilli viðloðun milli steinefnis og bindiefnis eða mýki malbikið til skaða og eru misjafnlega vel rökstuddar.

Í þessari skýrslu er gerð grein fyrir tilraunum til þess að mæla áhrif salts á þreytuþol malbiks, ýmist utanaðkomandi í formi saltvatns, eða sem saltleifar á steinefni, svipað því sem gerist þegar steinefni er tekið úr sjó. Með þreytuþoli er í þessu sambandi átt við móttöðu malbikssívalninga (þvermál 100 mm, hæð 100 mm) gegn endurteknu, sveiflandi álagi þar til þeir brotna eða aflagast til muna. Í þessum tilraunum var jafnframt kannað hvort viðloðunarefni (sem er blandað saman við bindiefnið til að auka viðloðun bindiefnis við steinefni) skipti máli fyrir áhrifin. Enn einn þáttur í þessum tilraunum var að athuga áhrif af mismunandi langri geymslu malbikssýnanna í vatni, söltu eða ósöltu, á þreytuþolið. Mælikvarði á þreytuþol var fjöldi álagssveiflna á sýnin þar til fyrirfram ákveðinni streitu (aflögun) var náð. Þessi streita var 4 % til viðbótar streitu frá forálagi (sjá kafla 2.4). Í þessu samhengi er gert ráð fyrir að skemmdir á malbikssýnunum af völdum salts komi fram sem skert þreytuþol.

Ein af forsendunum fyrir viðunandi endingu bikbundinna slitlaga við íslenskar aðstæður er góð viðloðun milli bindiefnis og steinefnis. Frumskilyrði góðrar viðloðunar er að yfirborð steinefnisins sé lítt eða ekki ummyndað og ennfremur hreint þannig að góð snerting náist milli bindiefnis og steinefnis (stundum kallað væting). Að þessu tilskildu næst góð viðloðun tiltölulega auðveldlega ef raki er ekki til staðar. Því hefur jafnvel verið haldið fram að sé steinefnið þurrkað til fulls, myndist órjúfanlegur bindingur milli steinefnis og bindiefnis [HF 1974, bls. 192]. Ef steinefnið er rakt er öðru máli að gegna, því að steinefni er í flestum tilfellum vatnssækið¹ fremur en olíusækið² [NVF 1985, bls. 55]. Bindiefnið er hins vegar vatnsfælið³. Afleiðingin er sú að vatn myndar sterkari tengsl við steinefnið en bindiefnið og leitast þar af leiðandi við að mynda einskonar skilvegg milli steinefnis og bindiefnis þannig að tengslin á milli bindiefnis og steinefnis verða ótraust. Úr þessu má bæta með notkun viðloðunarefna sem er blandað í bindiefnið. Þau eru gerð úr fremur löngum kolvetnakeðjum þar sem annar endi keðjunnar er fitusækinn (olíusækinn) en á hinum er amínhópur sem myndar jákvæða hleðslu þegar hann kemst í snertingu við vatn. Þessi hleðsla dregst að yfirborði steinefnisins og með þessu móti mynda viðloðunarefni tengsl milli bindiefnis og steinefnis.

Hérlendis hefur lengi tíðkast að nota salt til hálkuvarna og sömuleiðis hefur sumu af því steinefni, sem hérlendis er notað í malbik, verið dælt upp af sjávarbotni eða tekið úr fjöruborði. Að jafnaði er slíkt efni þvegið með fersku vatni en mælingar sýna að steinefnið er engu að síður saltblandað að einhverju leyti.

Því hefur lengi verið haldið fram að salt hafi slæm áhrif á viðloðun bikbindiefnis við steinefni og þessa tilgátu má rökstyðja á eftirfarandi hátt. Ef steinefnið er komið úr sjó og er ekki þvegið hreint af salti, má gera ráð fyrir að á yfirborði steinefnisins séu saltkrystallar sem verða á milli steinefnisins og bindiefnisins við blöndun. Þetta verður til þess að snerting bindiefnisins og steinefnisins verður ófullkomin og þar með bindingurinn milli steinefnisins og bindiefnisins. Ennfremur hafa tilraunir sýnt að vatn

¹ Vatnssækið; á ensku: *hydrophilic*.

² Olíusækið; á ensku: *oleophilic*.

³ Vatnsfælið; á ensku: *hydrophobic*.

sveimar⁴ að því er virðist með tímanum gegnum þunna bindiefnishimnu [HF 1974, bls. 217; PH 1999, bls. 14]. Þar af leiðandi getur bindingurinn milli steinefnis og bindiefnis rofnað síðar meir þótt steinefnið sé þurrt við blöndun. Sér í lagi á þetta við ef steinefnið er tekið úr sjó og notað, lítt eða ekki þvegið, í malbik. Þá má gera ráð fyrir að saltkristallar á yfirborði steinefnisins drekki í sig vatn sem kann að sveima gegnum bindiefnishimnuna, og þar sem salt er vatnsdrægt⁵ er þetta ferli rekið áfram af salti á yfirborði steinefnisins. Undir þessum kringumstæðum er líklegt að vatnshimna myndist á milli bindiefnis og steinefnis og þar sem steinefnið er vatnssækið en bindiefnið vatnsfælið, leitast vatnið við að flysja bindiefnið af steinefninu með neikvæðum afleiðingum fyrir slitlagið. Pumpandi áhrif frá umferðinni eru líkleg til að auka þetta ferli enn frekar, því heldur sem vatnsþrýstingurinn er hugsanlega meiri en snertiþrýstingurinn milli hjólbarða og slitlags [NVF 1985, bls. 55].

Jafnvel þótt steinefnið sé laust við salt getur utanaðkomandi salt (til dæmis frá hálkuvörnum) valdið skemmdum á malbiki undir vissum kringumstæðum. Sænsk rannsókn [PH 1999, bls. 5 og 68] gefur til kynna að umferðin geti við vissar aðstæður að vetrarlagi, þ.e. mikla saltnotkun, mikla úrkomu og margar frostþíðusveiflur, valdið ótímabærum skemmdum á malbiki ef það er nægilega gropið. Þess eru dæmi að malbik mýkist upp, þenjst út tímabundið og borkjarnar úr því grotni í versta falli sundur ef þeir eru settir í vatn. Mýkingin virðist stafa af skertri samloðun í malbiksefjunni. Einkenni á þessum skemmdum eru aukið yfi að vetrarlagi, jafnvel þvottabretti og hjólför, sem síðan ganga til baka þegar malbikið þiðnar og þornar. Í skýrslu um téða rannsókn er sett fram tilgáta um að salt frá hálkuvörnum, sem sest að í holrúmum í malbikinu, ef til vill vegna pumpandi áhrifa frá umferðinni, dragi til sín vatn sem síðan veldur þenslu með tilheyrandi skemmdum í malbikinu þegar það frýs. Í sömu heimild (bls. 27-28) er einnig lýst niðurstöðum prófana þar sem líkt er eftir áður nefndum aðstæðum við undirbúning sýnanna. Þar kemur fram að stífni malbiksins minnkar til mikilla muna við þessar aðstæður.

Íslensk samanburðarrannsókn á malbikssýnum sem annars vegar höfðu legið í saltvatni (3% NaCl) í 61 sólarhring, hins vegar jafn lengi í fersku vatni, öll við stofuhita, sýndu álíka mikið slit í Trögertæki [PI 1988, bls. 5]. Í skýrslunni er ekki tekið fram hver holrýmnd kjarnanna var. Í annari rannsókn þar sem sýnin voru látin sæta hita-sveiflum (ýmist 132 eða 367) á milli + 4°C og - 4 °C, annars vegar í saltvatni, hins vegar í fersku vatni, virtust sýni í saltvatni skemmast heldur meira en sýni í fersku vatni. Skemmdirnar voru metnar skynmati. Þær voru mestar í efjunni, og virtust stafa af þenslu, líklega vegna þess að vatn smýgur inn í fínu kornin (og að minnsta kosti stundum gegnum bindiefnishimnuna) og veldur þenslu í þeim. Stærri steinar virtust lítið skemmast. Holrýmnd í þessum sýnum var áætluð á bilinu 0-1% [PI 1991, bls. 1-4].

Viðloðunareiginleika hefur reynst erfitt að mæla á rannsóknastofu með viðunandi árangri. Mikill fjöldi aðferða hefur verið reyndur en flestar með takmörkuðum árangri. Ein af ástæðunum er sú að tiltækar prófunaraðferðir líkja ekki nægilega vel eftir aðstæðum sem slitlagið býr við á endingartíma sínum, en þær eru afar breytilegar.

Sveiflandi álag í þreytuþolsprófun líkir að nokkru leyti eftir áhrifum umferðar á malbik. Þetta álag veldur mismunarhreyfingum í efjunni og þá reynir á samloðun efjunnar og einnig á bindinginn á skilum steinefnis og bindiefnis. Í þeim þrem dæmum sem nefnd eru hér að ofan um líklegan aðdraganda skemmda (saltleifar á steinefni, utanaðkomandi salt, vatn sem sveimar gegnum bindiefnishimnu á steinefni) er sennilegt að áhrifin komi fram sem skert þreytuþol; eða ef dæminu er snúið við,

⁴ Sveima; á ensku: *diffuse*.

⁵ Vatnsdrægt; á ensku: *hygroscopic*.

þreytuþolið sé nothæfur mælikvarði á mótstöðu malbiksins gegn skemmdum af áður nefndu tagi.

2. SKIPULAGNING

2.1 Val á prófunaraðferð

Fjöl mörgum aðferðum til að prófa viðloðun milli steinefnis og bikbindiefnis hefur verið lýst en þær eiga það allar sameiginlegt að líkja að mjög takmörkuðu leyti eftir raunverulegum aðstæðum í slitlagi. Engin þessara aðferða hefur unnið sér sess sem óskeikul, en nokkrar þeirra eru notaðar í talsverðum mæli, þó með misjöfnum árangri.

Í þessu verkefni var prófunaraðferðin fyrst og fremst valin með tilliti til þess að hún:

- Líkti eftir föngum eftir sveiflandi áhrifum umferðarinnar, fyrst og fremst kröftum frá þeim á bindinginn milli steinefnis og bindiefnis, en einnig sog- og þrýstiáhrifum þeirra á vatn í holrúmum í malbikssýnunum.
- Gæfi salti, hvort heldur það er utanaðkomandi eða blandað steinefninu, tækifæri til að hafa áhrif á niðurstöðurnar.

Fyrir valinu varð aðferð sem er ólík hefðbundnum hefðbundnum aðferðum til að prófa viðloðun. Aðferðin er þó ekki ný; svipuð aðferð (sem er lýst stuttlega í viðauka III) en nokkuð flóknari, hefur verið notuð hjá VTI í Svíþjóð til að mæla áhrif saltupplausnar á burðarlagsmalbik [PH 1999]. Prófunaraðferðina er ekki að finna í stöðlum en hún er í stórum dráttum fólgin í því að gera malbikssýni úr steinefni, hreinu eða saltblönduðu eftir atvikum, láta það liggja tiltekinn tíma í vatni, hreinu eða saltblönduðu eftir atvikum og prófa sýnin síðan á kafi í vatni undir sveiflandi álagi og án hliðarstuðnings. Prófunaraðferðinni er lýst í kafla 2.4, en í stórum dráttum er hlutfallsleg samþjöppun sýnisins (streita) skráð sem fall af tíma frá upphafi prófunarinnar, þ.e. frá því að forálag (sem er ekki sveiflandi) er sett á sýnið og þar til prófuninni lýkur. Sveiflufjöldi þar til sýnið sýnir tiltekin streitumerki er notaður sem mælikvarði á þreytuþol sýnisins. Talning á sveiflunum byrjar þegar (kyrrstæðu) forálagsprepi lýkur og hættir þegar streitan hefur náð 15%. Mælikvarðinn sem hér er notaður á þreytuþol er sveiflufjöldi þar til streitan hefur aukist um 4% frá mældri streitu þegar fullt sveiflandi álag (5600 N) kemur í fyrsta sinn á sýnið. Í viðauka I er gerð nánari grein fyrir nokkrum mögulegum mælikvörðum og valið á þessum mælikvarða rökstutt.

Enda þótt þessi aðferð líki að nokkru leyti eftir aflfræðilegri áraun sem malbik í slitlagi verður fyrir og taki einnig mið af áhrifum saltsins hefur hún marga galla. Í fyrsta lagi er þreytuþolið líklega háð fjölmörgum öðrum áhrifum sem er misjafnlega auðvelt að stjórna. Þar á meðal má nefna hitastig sýnisins við prófun (sem ræður mjög miklu um stífni bindiefnisins og væntanlega þreytuþoli um leið), margvíslega efniseiginleika steinefnis og bindiefnis, svo sem sáldurferil steinefnisins, holrýmd sýnisins, metnun þess sem er forsenda þess að vatn (salt eða ferskt) hafi áhrif á viðloðun bindiefnis við steinefnis, og einsleitni sýnisins (malarhreiður í sýninu geta haft afdrifarík áhrif á niðurstöðuna) svo eitthvað sé nefnt.

Hvað prófunaraðferðina sjálfa snertir líkir hún eftir áhrifum af mjög hægri og þungri umferð. Að nokkru leyti líkir hún einnig eftir pumpandi áhrifum umferðarinnar á rennblautu slitlagi. Hvorutveggja er kostur. Á hinn bóginn er hún vinnu- og tímafrek, krefst sérhæfðs tækjabúnaðar og kemur þess vegna tæpast til greina sem eftirlitsprófun. Þar fyrir utan hafa niðurstöður hennar ekki verið tengdar við reynslu og þar af leiðandi

er hún (enn sem komið er) aðeins nothæf til að bera saman áhrif af þáttum í gerð og prófun sýnanna.

2.2 Prófunaráfangar

Prófanirnar í þessu verkefni voru gerðar í nokkrum áföngum. Á milli áfanga voru gerðar ýmsar breytingar með hliðsjón af fenginni reynslu, fyrst og fremst á gerð sýnanna og undirbúningi þeirra fyrir prófun. Sjálf prófunaraðferðin var óbreytt í öllum áföngunum. Prófunaráfangarnir og helstu markmið þeirra voru sem hér segir:

Fyrsti áfangi. Kanna hvort salt í malbiksefnum (sem svarar því að steinefnin séu tekin úr sjó eða úr flæðarmáli) er líklegt til að skerða þreytuþol malbiks. Vinnutilgátan er á þessa leið: Ef yfirborð steinefnis er að einhverju leyti mengað saltkristöllum eftir þurrkun, má gera ráð fyrir því að þeir verði á milli steinefnis og bindiefnis að blöndun lokinni. Þá má gera ráð fyrir að vatn sveimi með tímanum gegnum bindiefnishimnuna og jafnframt að saltkristallar á yfirborði steinefnisins flýti fyrir þessu ferli og drífi það áfram. Þegar vatn blandast saltinu má gera ráð fyrir að tengslin milli steinefnis og bindiefnis rofni að einhverju leyti. Sé þetta rétt, ætti þetta rof að koma fram sem skert þreytuþol í prófunum þar sem malbikssýnin verða fyrir sveiflukenndu álagi.

Annar áfangi. Kanna hvort utanaðkomandi saltvatn sé líklegt til að skerða þreytuþol malbiks sem er gert úr saltlausu steinefni. Vinnutilgátan er á þá leið að vatn sveimi með tímanum gegnum bindiefnishimnuna á steinefninu og saltblandað vatn (til dæmis vatn blandað salti frá hálkuvörnum) sé líklegra til að veikja bindinginn milli steinefnis og bindiefnis heldur en ferskt vatn. Sé þetta rétt ættu áhrifin að koma fram sem skert þreytuþol sýna sem hafa legið í saltvatni fyrir prófun í samanburði við sýni sem hafa legið jafnlengi í fersku vatni.

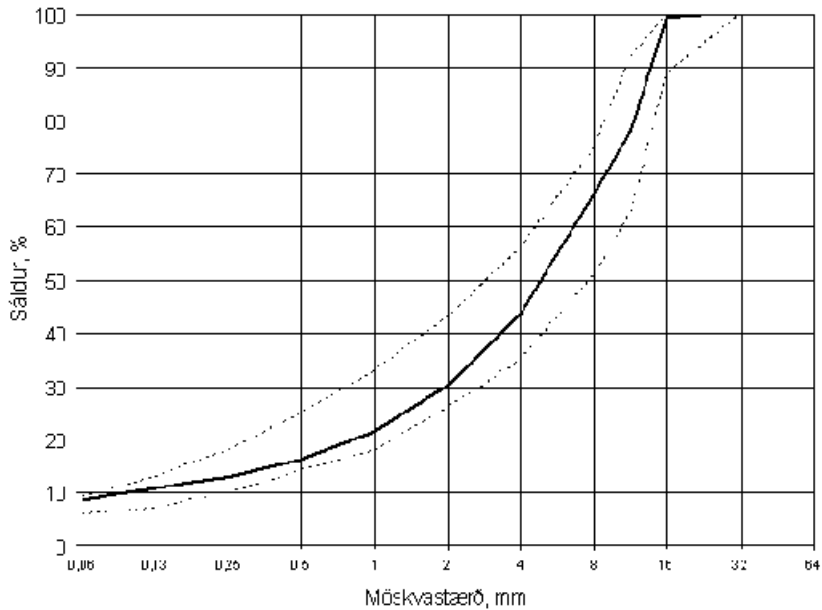
Þriðji áfangi. Kanna hvort viðloðunarefni í malbiki dragi úr áhrifum utanaðkomandi salts á þreytuþol malbiksins. Vinnutilgátan er á þá leið að vatn, salt eða ósalt, sveimi með tímanum gegnum bindiefnishimnuna, en viðloðunarefni, sé það til staðar, varni því að tengslin milli steinefnis og bindiefnis rofni. Með því að beita mismunandi langvarandi geymslu í vatni fáist jafnframt upplýsingar um það hvort viðloðunarefnið er virkt til langframa eða aðeins á meðan blöndun á sér stað (virki aðeins til að „væta“ steinefnið meðan á blöndun stendur).

2.3 Gerð sýna

Prófunaráfangarnir dreifðust á ríflega fjögurra ára tímabil. Sýni í hvern áfanga voru gerð í einni lotu. Lögð var áhersla á að sýnin væru sem líkust milli áfanga (nema að því leyti sem þeim var breytt af ásettu ráði) til þess að mismunur á eiginleikum þeirra truflaði niðurstöður þreytuþolmælinga eins lítið og kostur væri. Í þessu skyni var sama blöndunarskrift notuð við gerð allra sýnanna.

Steinefnið var allt frá Seljadal (frá Malbikunarstöðinni Höfða hf). Það er ferskt, þétt og fínkornótt basalt með góða viðloðunareiginleika. Öll méla í steinefninu er eiginméla. Sáldurferill steinefnisins er sýndur á mynd 2.1 og er í samræmi við kröfur Alverk '95 til Y16 [AV 1995, bls. 28]. Hann er mjög svipaður milli áfanga, nema hvað méluinnihaldið var 8,7% í 1. áfanga en 9,5 og 9,6% í 2. og 3. áfanga.

Í hvert sýni var steinefni skipt með sýnadeili úr fimm hreinsiktuðum stærðaflokkum, <2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm, 8-11,2 og 11,2-16 mm (í 3. áfanga var steinefninu einnig skipt á 0,125 mm). Bindiefnið var mjúkt, stungudýpt 160/220.



Mynd 2.1. Sáldurferill steinefna í prófunarsýnum.
Markalínurnar sýna kröfur Alverk '95 til Y16.

Sýnin voru sívalningar 100 mm að þvermáli og 100 mm á hæð. Hvert sýni var blandað sér; þetta var gert til að forðast breytileika (svo sem í sáldurferli) sem kynni að verða ef malbiki væri mokað í mót upp úr stórri hræru. Bindiefnismagn var 5,8%. Sýnin voru þjöppuð í snúðþjöppu við 600 kPa þrýsting, 16 mrad halla og 30 sn/mín, þar til fyrirhugaðri holrýmd var náð. Að þjöppun lokinni voru sýnin látin kólna á sléttum, hörðum fleti en síðan sett í kæli við 5-10 °C og geymd þar, þangað til þau voru sett í vatn. Sýnum í hverjum áfanga var raðað í prófunarmedferð (geymslutíma í vatni) með hjálp slembitalna⁶. Mismun á sýnunum eftir áföngum, ráðstöfun þeirra til prófana og undirbúningi þeirra fyrir prófun er lýst hér á eftir.

Fyrsti áfangi. Í þessum áfanga voru gerð 32 sýni. Helmingur þeirra var gerður úr fullkomlega saltlausu steinefni. Hinn helmingurinn var gerður úr samskonar steinefni en það var látið liggja í 3% vatnsupplausn af NaCl í sjö sólarhringa og síðan þurrkað. Mestu af þæklinum var hellt af grófari efnunum en ekki þeim hluta sem var smærri en 2 mm. Þækillinn var veginn og með lauslegum reikningum má ætla að 0,8 g salts sé í hverju sýni, eða um 0,04% af þurru steinefni. Til samanburðar má nefna að saltinnihald í sýnum (óþveggnum) upp úr sjó er lauslega áætlað um 0,15% af þurru steinefni með malbikssáldurferli, en aðeins um 0,0025% ef steinefnið er þvegið.

Markgildi holrýmdar var 6% en í reynd varð hún á bilinu 5,9-6,4%, í langflestum þeirra þó á bilinu 5,9-6,2%. Sýnunum var skipt í fjórar syrpur, í hverri syrpu voru fjórir kjarnar úr saltlausu steinefni og aðrir fjórir úr saltmenguguðu steinefni. Þrjár syrpur voru settar í eimað vatn þar til þreytuþol sýnanna prófað. Fyrsta syrpan var prófuð eftir tvær vikur, sú næsta eftir fimm vikur, sú þriðja eftir tíu vikur. Tíminn frá því sýnin voru þjöppuð og þar til þau voru sett í vatn var rúmír þrír mánuðir.

Fjórða syrpan var notuð í forprófanir (til að ná valdi á prófunaraðferðinni og kanna hversu langan tíma prófunin tæki að jafnaði).

⁶ *Slembitölur; á ensku: random numbers.*

Sýnin sem innihéldu salt fengu merkinguna S01-S16, en þau sem voru saltlaus fengu merkinguna H01-H16.

Annar áfangi. Í þessum áfanga voru gerð 32 sýni, öll úr saltlausu steinefni. Holrýmd sýnanna var aukin nokkuð frá 1. áfanga og var á bilinu 6,7-6,8%. Sýnin voru geymd í kæli, sem var stilltur á 5-10 °C, þar til þau voru sett í vatn, en vegna bilana í prófunarbúnaði m. a. dróst það í rúma 17 mánuði. Hluta af þeim tíma (óvíst hversu lengi) var kælirinn bilaður og þá hefur hitastigið í honum væntanlega verið á bilinu 20-30 °C. Sýnunum var skipt í fjórar syrpur (með átta kjarna í hverri). Helmingur sýnanna í hvorri syrpu var látinn liggja í fersku vatni, hinn í 3% vatnsupplausn af NaCl, hvorutveggja við stofuhita þar til þreytuþol þeirra var prófað. Fyrsta syrpan var prófuð eftir tvær vikur, sú næsta eftir fimm vikur, sú þriðja eftir tíu vikur og sú fjórða eftir tuttugu vikur.

Þessi sýni fengu merkinguna C01-C04 og C06-C33 (sýni C5 misheppnaðist og annað var gert í stað þess). Í viðauka II er sýnt hvaða sýni voru látin liggja í fersku vatni fyrir prófun og hvaða sýni voru látin liggja í saltvatni.

Þriðji áfangi. Í þessum áfanga voru gerð 32 sýni, öll úr saltlausu steinefni. Holrýmd sýnanna var aukin frá því sem var í 2. áfanga og var á bilinu 7,7-7,8%. Helmingur kjarnanna var gerður með bindiefni án viðloðunarefnis en í hinum helmingnum var bindiefnið blandað viðloðunarefni, Wetfix BE, 0,3% af þyngd bindiefnis. Viðloðunarefninu var bætt í bikið að morgni fyrir blöndun. Sýnunum var skipt í fjórar (jafnstórar) syrpur þannig að í hverri syrpu voru fjórir kjarnar með viðloðunarefni og aðrir fjórir án viðloðunarefnis. Syrpurnar voru síðan settar í 3% vatnsupplausn af NaCl og þreytuþol prófað eftir misjafnlega langan tíma. Fyrsta syrpan var prófuð eftir 11 vikur⁷, sú næsta eftir 20 vikur, sú þriðja eftir 40 vikur og sú fjórða eftir 80 vikur í saltvatni. Tíminn frá því sýnin voru þjöppuð og þar til þau voru sett í vatn var rúmur mánuður.

Sýnin sem innihéldu viðloðunarefni fengu merkinguna M01-M9 og M11-M17 (M10 misheppnaðist og annað var gert í staðinn), en þau sem voru án viðloðunarefnis fengu merkinguna A01-A16.

Aukasýni í 3. áfanga. Gerð voru fjögur sýni (merkt Þ01-Þ04) úr hreinu biki (án viðloðunarefnis) og sama steinefni og notað var í önnur sýni í 3. áfanga. Þessi sýni voru þreytuþolsprófuð 20 vikum seinna, þurr, nema hvað þau voru um hálfan sólarhring í fersku vatni til hitastillingar áður en þau voru prófuð. Tilgangurinn var að sjá hugsanlegan mismun á þreytuþoli eftir því hvort sýnin voru geymdir þurr eða í fersku vatni.

Önnur fjögur sýni (merkt E01-E04), einnig gerð úr hreinu biki (án viðloðunarefnis) og sama steinefni og notað var í önnur sýni í 3. áfanga, voru höfð 110 mm löng til að hægt væri að saga þunnar sneiðar af báðum endum og slípa þau niður í sömu hæð og önnur sýni í prófanaröðinni. Þessir sýni voru geymd þurr í átta vikur. Þá voru þau sett í 3% vatnsupplausn af NaCl og þreytuþol þeirra prófað eftir 20 vikur þaðan í frá. Tilgangurinn var að kanna hvort endasögun hefði áhrif á þreytuþolið. Eitt þessara sýna (E04) misheppnaðist, bindiefnisinnihald í því var 5,3% í stað 5,8%.

Aukasýnin fengu sömu meðferð og önnur sýni hvað varðar geymslu þar til þau voru sett í vatnsbað og hitastillingu fyrir prófun.

⁷ Prófunin átti að fara fram eftir réttar 10 vikur í saltupplausn, en vegna bilunar í prófunarbúnaði var henni frestað um 9 daga til viðbótar.

2.4 Lýsing á prófunaraðferð

Prófunaraðferðina er ekki að finna í stöðlum, en hún er í stórum dráttum fólgin í því að gera malbikssýni úr steinefni, hreinu eða saltblönduðu eftir atvikum, með eða án viðloðunarefnis, láta það liggja tiltekinn tíma í vatni, hreinu eða saltblönduðu eftir atvikum og prófa sýnin síðan á kafi í vatni undir sveiflandi álagi og án hliðarstuðnings.

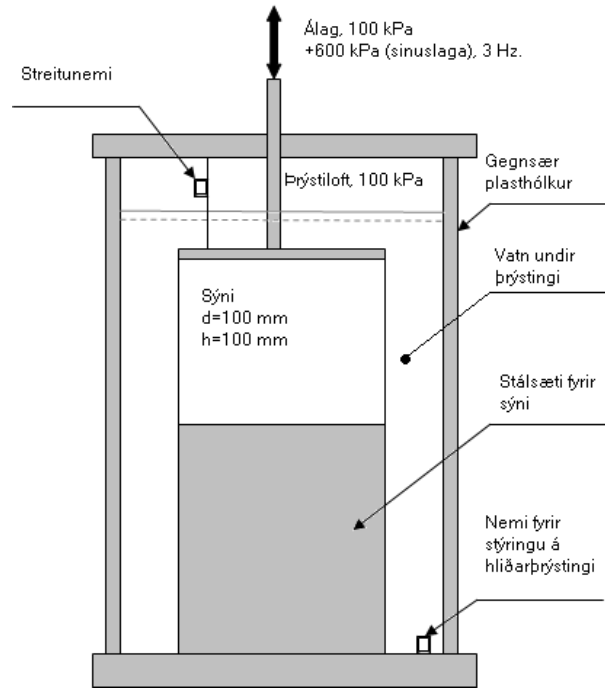
Áður en endanleg prófanalýsing var samin voru gerðar forprófanir sem voru gerðar á einni sýnasyrpu (átta sýnum) úr fyrsta áfanga, fyrst og fremst til að draga úr líkum á óvæntum vanda í prófunarferlinu. Forprófanirnar gáfu til kynna að:

- Lofttæming gæti hugsanlega valið (þenslu)skemmdum á sýnunum. Tvö sýni, annað saltmengað, hitt ekki voru sett í undirþrýsting (<10 kPa) á kafi í vatni. Eftir 72 klst var undirþrýstingnum aflétt og sýnin skoðuð. Þá kom í ljós að nokkur korn höfðu molnað úr saltmengaða sýninu. Á grundvelli þessarar vitneskju var ákveðið að beita ekki lofttæmingu á sýnin í prófunarferlinu. Hins vegar er engan veginn víst að skemmdir á sýninu hafi stafað af undirþrýstingnum.
- Nokkur sýni (ýmist saltmengun eða hrein, þurr eða geymd í vatni í 72 klst, lofttæmd eða ekki) voru þreytuþolsprófuð til að finna líklegan hámarks sveiflufjölda (og þar með hámarkstíma sem hver þreytuþolsprófun kynni að taka). Meðaltal sveiflufjölda þar til sýnin brotnuðu var 7400 með staðalfrávik 5400. Á þessum forsendum var talið ólíklegt að þreytuþol mældist meira en 10^5 sveiflur við fyrirhugaðar prófunaraðstæður.

Við samningu á prófunarlýsingunni var, auk ofanskráðrar vitneskju, höfð hliðsjón af sænskri prófunaraðferð [PH 1999, bls. 26] sem var beitt á burðarlagsmalbik, meðal annars til að kanna áhrif salts á stífni í mögru burðarlagsmalbiki með hárrí holrýmd. Ennfremur var stuðst lítillega við ÍST EN 12697-25 [ÍST 2005] sem fjallar um stífniþrófanir á malbiki. Að öðru leyti er prófunarlýsingin heimatilbúin.

Mynd 2.2 sýnir fyrirkomulag búnaðarins sem var notaður til þreytuþolsmælinga. Öll sýnin voru hitastíllt í fersku vatni við 24 °C í minnst 12 klst áður en prófun hófst⁸. Síðan var sýninu komið fyrir (óvörðu) í lokuðu hylki í þríasatæki á milli tveggja stálplatna sem eru 100 mm í þvermál, en á milli stálplattanna og sýnisins var komið fyrir þunnum skífum úr gúmmíi, sinni við hvorn enda. Hylkið var síðan fyllt með eimuðu vatni, sem einnig hafði verið hitastíllt við 24 °C. Áður en sjálf prófunin hófst var vatnsþrýstingurinn aukinn línulega á 10 mínútum upp í 100 kPa. Að því loknu var sett kyrrstætt forálag á sýnið, grunnálag á endafleti sýnisins var aukið línulega um 100 kPa á 5 mínútum. Streita í sýninu var mæld jafnharðan. Að því loknu hófst sjálf prófunin en þá var 600 kPa sveiflandi álag (haversine) til viðbótar lagt á endafletina með tíðninni 3 Hz. Mæling á streitu hófst um leið og forálag var sett á og var skráð sem fall af tíma og sveiflufjölda meðan á prófun stóð.

⁸ Prófunarhylkið sjálf var ekki búið hitastillingu og raunin varð sú að vatnið í prófunarhylkinu var oft 1-2 °C heitara að prófun lokinni en í byrjun hennar. Þó má telja líklegt að hitastig sýnisins sjálfs hafi breyst heldur minna meðan á prófun stóð (skv. ÍST EN 12697-25 þarf að tempra malbikssýni í 4 klst fyrir stífniþrófun).



Mynd 2.2. Skýringarmynd af búnaði til þreytuþolsmælinga.

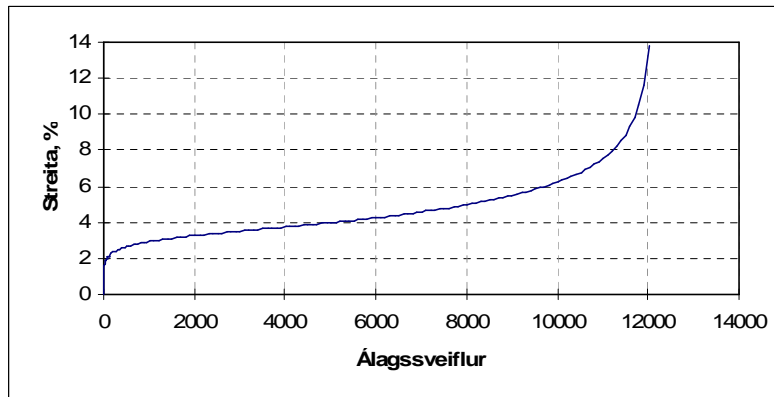
Prófinu var hætt þegar þegar annað tveggja hafði gerst; streitan hafði náð 15% (þá var litið svo á að þreytuþol sýnisins væri á þrotum, enda brotnar það oft um það leyti) eða sveiflufjöldi hafði náð 10^5 . Síðari takmörkunin kom aldrei til framkvæmda, mesti sveiflufjöldi sem mældist í þessu verkefni var tæpar 65.000 sveiflur.

Grunnáglag á endafleti (100 kPa) var valið án annars rökstuðnings en að halda sívalingnum kyrrum í þríasatækinu meðan á prófun stóð. Hámarksþrýstingur í sveiflandi álagi (700 kPa, þ.e. grunnáglag að viðbættu 600 kPa sveiflandi álagi) var valinn með hliðsjón af líklegum þrýstingi þegar hjólbarði á þungum bíl fer yfir slitlagið; leyfður hámarksþrýstingur í hjólbörðum er 800 kPa [RG 2007] en er miklu lægri (oft um 200 kPa) í fólksbíladekkjum. Sveiflutíðnin (3 Hz) endurspeglar ekki venjulega umferð, hún svarar til þess að 5400 bílar fari um akrein á hverri klukkustund, sem er um það bil þreföld möguleg hámarksúmferð á hraðbrautum, en var valin þannig til að prófunin tæki ekki óheyrilega langan tíma. Með þessu fyrirkomulagi má að jafnaði prófa tvö sýni á hverjum vinnudegi.

Fáeinar smávægilegar breytingar voru gerðar á framkvæmd prófsins frá einum áfanga til annars. Þær miðuðu einkum að því að halda hitastigi á sýnunum stöðugu meðan á prófun þeirra stóð. Innan hvers áfanga var framkvæmdin ávallt sú sama.

2.5 Val á þreytuþolsmælikvarða

Mynd 3.1 sýnir dæmigerðan feril fyrir streitu í þreytuþolsprófi sem fall af sveiflufjölda.



Mynd 3.1. Dæmigert samhengi streitu og sveiflufjölda í þreytuþolsprófun.

Ferillinn skiptist í grófum dráttum í þrjá hluta; hraða streituaukningu í byrjun sem síðan fer minnkandi (hér 0-1000 sveiflur), þar á eftir tímabil sem einkennist af nokkurn veginn línulegu samhengi milli streitu og sveiflufjölda (hér 1000-11.000 sveiflur) og að lokum tímabil þar sem streita eykst með sívaxandi hraða með sveiflufjölda (hér > 11.000 sveiflur). Einhversstaðar á miðtímabilinu er vendipunktur á ferlinum; þar til honum er náð fer streituaukningin hægt minnkandi með sveiflufjölda en eftir að honum er náð fer streituaukningin aftur vaxandi, þar til sýnið brotnar. Þessa breytingu má túlka sem svo að allt þar til vendipunktinum er náð sé sýnið að byggja upp þrýstipól vegna samþjöppunar en eftir það fari þrýstipólið minnkandi, m.ö.o. marki vendipunkturinn upphaf bilunar í sýninu.

Með hliðsjón af dæmigerðri hegðun sýna í þreytuþolsprófi koma nokkrir mælikvarðar á þreytuþol einkum til álita:

1. Streita (aflögun) eftir ákveðinn sveiflufjölda, til dæmis eftir 3600 sveiflur (þessi mælikvarði er notaður í ÍST EN 12697-25, en þar er raunar verið að mæla skrið fremur en þreytuþol).
2. Sveiflufjöldi þar til ákveðinni streitu er náð, til dæmis 15%; við þessa streitu má líta svo á sýnið hafi brotnað (ÍST EN 12697-25 nefnir 4% sem viðmiðun).
3. Sveiflufjöldi á milli tveggja streitumarka, t.d. 2% og 6%.
4. Sveiflufjöldi þegar vendipunkturinn í streituferlinum er náð; þá má líta svo á að sýnið sé að byrja að bila (skemmast).
5. Sveiflufjöldi meðan breytingar á streitu í sýninu eru undir einhverju tilteknu lágmarki, með öðrum orðum meðan hallatala ferilsins er undir ákveðnu marki.

Í viðauka I er dregið á kosti og galla hvers mælikvarða um sig. Samanburður á þessum mælikvörðum leiddi ekki í ljós að neinn þeirra væri áberandi heppilegastur. Niðurstaðan varð sú nota sveiflufjölda milli tveggja streitumarka sem mælikvarða á þreytuþol. Fyrri markið er streita um það bil sem sýnið hefur aðlagast fullu álagi (sem gerist strax eða örfáum sveiflum eftir að sveiflandi álag er sett á sýnið). Síðara markið er 4 % streituaukning frá fyrri markinu.

3. NIÐURSTÖÐUR MÆLINGA

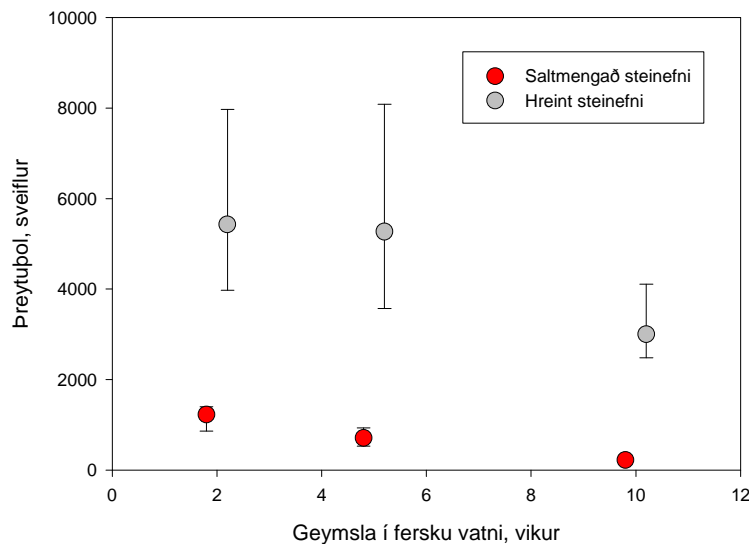
Auk mælinga á þreytuþoli var holrýmd allra sýnanna mæld á hefðbundinn hátt. Þyngd sýnanna fyrir og eftir vatnsgeymslu (til að ákvarða metnun þeirra fyrir prófun) var

mæld á sýnum í 2. og 3. áfanga. Ennfremur var hitastig vatns í prófunarhylki mælt að lokinni þreytuþolsprófun á sýnum í 2. áfanga, en fyrir og eftir þreytuþolsprófun í 3. áfanga. Þessar mæliniðurstöður eru birtar í viðauka II.

4. ÚRVINNSLA

4.1 Þreytuþol

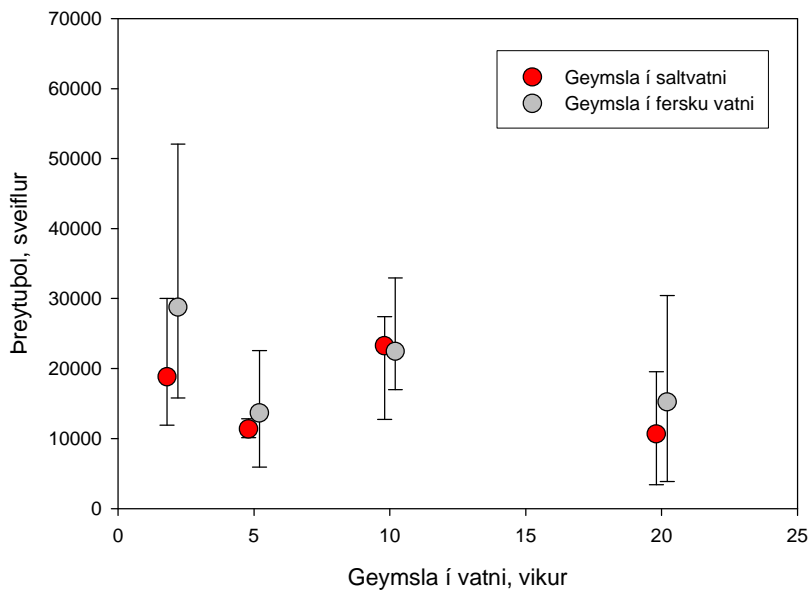
Eins og áður segir var valið að nota sveiflufjölda milli streitumarka (4 %) sem mælikvarða á þreytuþol. Niðurstöður þreytuþolsmælinga eru sýndar í viðauka II. Depillit yfir niðurstöður þreytuþolsprófana úr 1-3. áfanga eru sýnd á myndum 4.1.- 4.3. Depillinn táknar miðgildi⁹ mælinganna (sem með einni undantekningu eru fjórar í hverri mælisyru) og lóðrétt strikið gegnum depilinn spannar öryggisbil fyrir meðaltalið (95% öryggisstig).



Mynd 4.1. Þreytuþol malbikssýna með hreinu eða saltmengudu steinefni, hvorutveggja án viðloðunarefnis, sem fall af geymslutíma í fersku vatni. Depillinn táknar miðgildi mælinganna, lóðrétt strikið gegnum depilinn spannar 95 % öryggisbil fyrir meðaltal þeirra. Saltinnihald í saltmengudu steinefni er um 0,04% af þyngd.

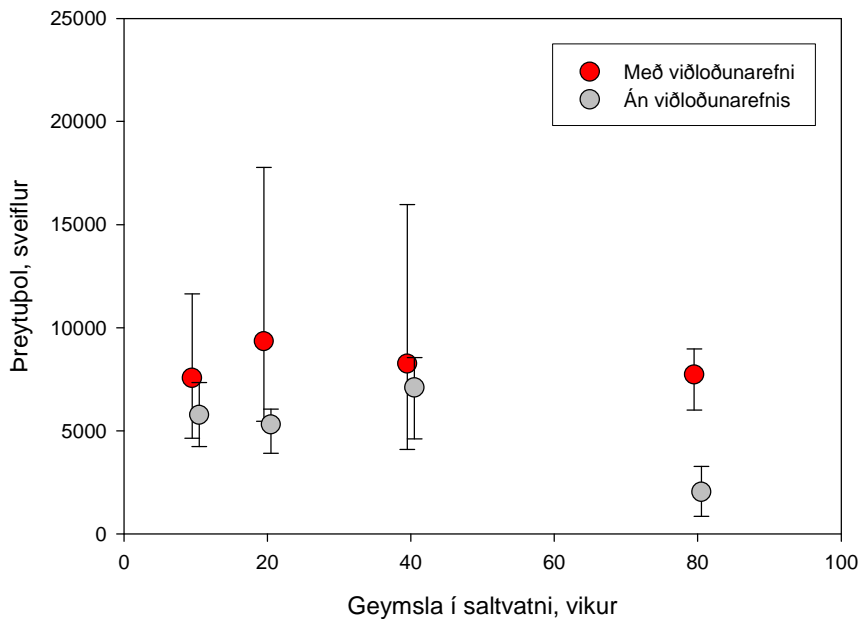
Á mynd 4.1 er borið saman þreytuþol malbikssýna sem annars vegar eru gerð úr hreinu steinefni og hins vegar steinefni sem er mengað af salti. Öll sýnin eru án viðloðunarefnis. Að öllum líkindum myndar saltið húð utan á steinefninu sem drekkur í sig vatn, leysist upp og þar með er líklegt að bindingurinn milli steinefnis og bindiefnis rofni að meira eða minna leyti. Myndin gefur ótvírætt til kynna að sýni úr saltmengudu steinefni hafi miklu minna þreytuþol en sýni úr hreinu steinefni. Jafnframt gefur myndin í skyn að þreytuþolið fari minnkandi eftir því sem vist í vatni lengist þegar saltmengað steinefni á í hlut. Enda þótt myndin sýni svipaða tilhneigingu fyrir hreint steinefni er hún að öllum líkindum tilviljun.

⁹ Miðgildi; á ensku: *median*.



Mynd 4.2. Þreytuþol malbikssýna með hreinu steinefni, án viðloðunarefnis, sem fall af geymslutíma í vatni, fersku eða söltu. Depillinn spannar miðgildi mælinganna, lóðrétta strikið gegnum depilinn táknar 95 % öryggisbil fyrir meðaltal þeirra. Styrkur saltvatnsins er 3 %.

Á mynd 4.2 er borið saman þreytuþol malbikssýna sem öll eru gerð úr hreinu (saltlausu) steinefni og án viðloðunarefnis, en eru ýmist geymd í hreinu vatni eða saltvatni. Á myndinni verður ekki séður neinn mismunur á þreytuþoli, hvorki fyrir áhrif saltvatns né heldur tímalengdar í vatni.



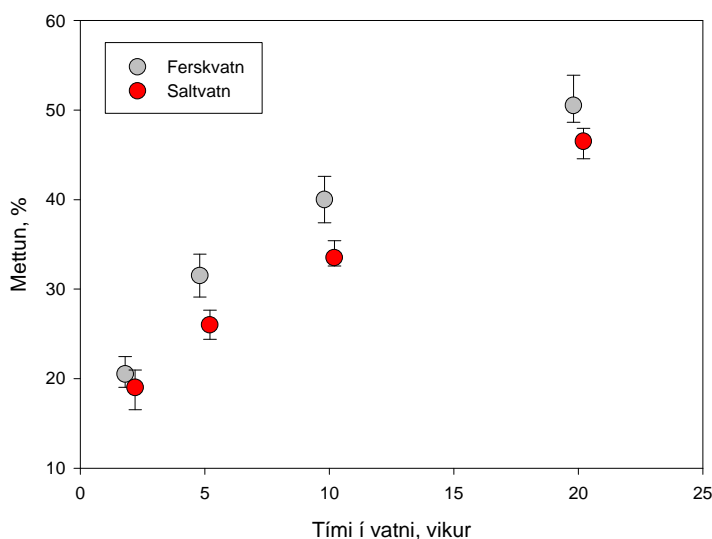
Mynd 4.3. Þreytuþol malbikssýna með hreinu steinefni, blönduð bindiefni með eða án viðloðunarefnis, sem fall af geymslutíma í saltvatni. Depillinn táknar miðgildi mælinganna, lóðrétta strikið gegnum depilinn spannar 95 % öryggisbil fyrir meðaltal þeirra. Styrkur saltvatnsins er 3 %.

Mynd 4.3 sýnir þreytuþol malbikssýna sem öll eru gerð úr hreinu (saltlausu) steinefni en ýmist með eða án viðloðunarefnis. Öll sýnin voru geymd í 3 % saltvatni. Myndin gefur í skyn að þreytuþol malbikssýna sem eru blönduð viðloðunarefni sé meira en hinna sem ekki eru blönduð viðloðunarefni. Mismunurinn er þó aðeins ótvíræður eftir 80 vikur í vatni, fram að því er mismunurinn að öllum líkindum tilviljun.

Þreytuþolsmælingarnar sem liggja til grundvallar myndum 4.1-4.3 eiga það sameiginlegt að dreifing þeirra um meðaltalið er í sumum tilfellum mikil, frávikshlutfallið¹⁰ er á bilinu 10-80 %. Í hverju samtaki¹¹ eru (með einni undantekningu) aðeins fjórar mælingar (þ.e. mælingar á samskonar sýnum) og þar af leiðandi er ekki hægt að slá neinu föstu um dreifingu. Myndirnar gefa þó til kynna að dreifing mælinganna sé oftast en ekki skekkt til hægri. Í flestum tilfellum er ekki heldur hægt að beita stikalausum prófunum. Þar af leiðandi verður ekkert fullyrt um það hvort mismunur á mælisyrrpum er tölfræðilega marktækur eða ekki.

4.2 Mettun

Sýni úr 2. og 3. áfanga (ekki 1. áfanga) voru viktud yfirborðsþurr um leið þau voru tekin úr vatnsbaðinu til prófunar. Með því að bera þessa þyngd saman við upplýsingar sem fengust við þjöppun sýnanna (þurra þyngd og holrýmd) má finna að hve miklu leyti holrýmið í sýnunum mettaðist á meðan sýnin voru í vatni. Niðurstöður mælinganna eru birtar í viðauka II.



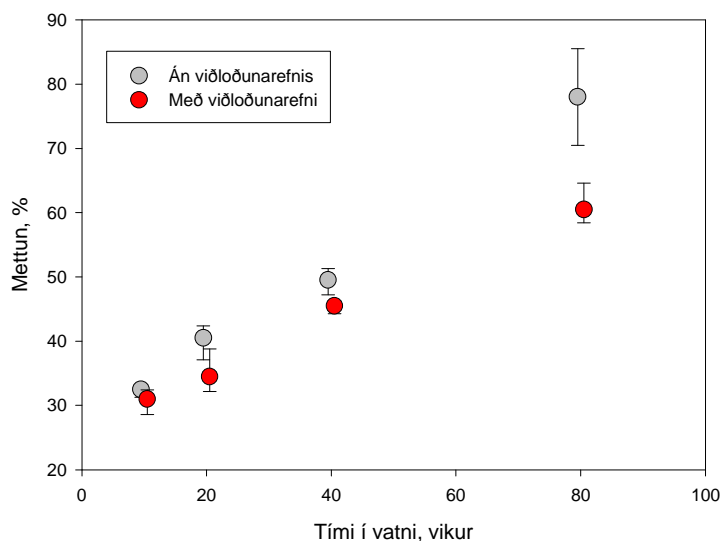
Mynd 4.4. Mettun malbikssýna með hreinu steinefni, án viðloðunarefnis sem fall af tíma í vatni, fersku eða söltu. Depillinn táknar miðgildi mælinganna, lóðrétta strikið gegnum depilinn spannar 95 % öryggisbil fyrir meðaltal þeirra. Styrkur saltvatnsins er 3 %.

Mynd 4.4 sýnir hvernig mettun sýna með hreinu steinefni og án viðloðunarefnis eykst með tíma. Að fyrstu syrþunni undantekinni (eftir tvær vikur í vatni) er mettunin

¹⁰ Frávikshlutfall; á ensku: *coefficient of variation*. Frávikshlutfall er skilgreint sem staðalfrávik mælinga í mælisyrrpu deilt með meðaltali sömu mælinga.

¹¹ Samtak; á ensku: *combination*.

ótvírætt meiri í fersku vatni en söltu. Mettunin hægir á sér með tíma og er aðeins orðin um 50 % eftir 20 vikur, enda var engum undirþrýstingi beitt.



Mynd 4.5. Mettun sýna með hreinu steinefni, blönduð bindiefni með eða án viðloðunarefnis, eftir tíu, tuttugu, fjörutíu og áttatíu vikur í saltvatni. Depillinn táknar miðgildi mælinganna, lóðrétt strikið gegnum depilinn spannar 95 % öryggisbil fyrir meðaltal þeirra. Styrkur saltvatnsins er 3 %.

Mynd 4.5 sýnir hvernig mettnun sýnanna með hreinu steinefni en ýmist með eða án viðloðunarefnis eykst með tíma í saltvatni. Mettunin er minni í sýnum með viðloðunarefni; mismunurinn er óverulegur í fyrstu þrem sýrpunum (10-40 vikur) en talsverður eftir 40 vikur í saltvatni og þá er mettnunin orðin um 80 % fyrir sýni án viðloðunarefnis. Jafnframt er svo að sjá sem mettnunin (sem er án undirþrýstings) sé nokkurn veginn línuleg með tíma.

4.3 Hitastig sýna við prófun

Öll sýnin voru tempruð í vatnsbaði við 24 °C í nokkrar klukkustundir fyrir prófun. Hitastig vatnsins sem umkringir sýnið í prófunarhylkinu (sjá mynd 2.2) var mælt í 2. og 3. áfanga, en ekki í 1. áfanga. Þessar mælingar sýna að hitastigið vatnsins í prófunarhylkinu var breytilegt eða á bilinu 22-27 °C sjá viðauka II.

ÍST EN 12697-25 gerir kröfu um að hitastig við prófun víki ekki meira en 1 °C frá réttu prófunarhitastigi¹². Mælingarnar gefa til kynna að hitastig vatnsins í prófunarhylkinu hafi í mörgum tilfellum verið utan þessara marka. Þó verður að teljast líklegt að hitastig sýnanna hafi verið nær hinu rétta en áður nefndar mælingar sýna þar sem nokkurn tíma tekur fyrir sýnin að laga sig að hitastigi vatnsins í prófunarhylkinu. Engu að síður verður að gera ráð fyrir að hitastigsfrávikin kunni að hafa haft áhrif á niðurstöðurnar.

4.4 Aukasýni

Í 3. áfanga voru gerð fjögur sýni án nokkurra íauka (salts eða viðloðunarefnis) og geymd þurr í 28 vikur nema hvað hitastig þeirra var tempruð í fersku vatni í hálfan

¹² Að öðru jöfnu eykst þreytuþol með lækkandi hitastigi, þ.e. aukinni stífni.

sólarhring fyrir prófun. Holrýmd í þessum sýnum var hin sama og í öðrum sýnum í 3. áfanga (8%). Á þessum hálfra sólarhring tóku sýnin upp vatn sem svaraði 6-8 % af holrými þeirra. Þreytuþol þessara sýna mældist tæpar 10.000 sveiflur að meðaltali, sem er ívið meira en þreytuþol samskonar sýna sem voru geymd í fersku vatni í 20 eða 40 vikur.

Ennfremur voru gerð önnur fjögur sýni, einnig án nokkurra íauka, 110 mm löng í stað 100 mm. Af hvorum enda þessara sýna var söguð um 5 mm sneið og endarnir síðan slípaðir. Sýnin voru síðan geymd í 20 vikur í saltvatni. Tilgangurinn var að kanna hvort þetta frávik í meðferð hefði einhver áhrif á þreytuþolið. Þreytuþol þessara sýna mældist að meðaltali tæpar 11.000 sveiflur, sem talsvert meira (og sennilega marktækt meira) en þreytuþol samskonar sýna sem ekki voru endasöguð og slípuð.

Rétt er að taka fram dreifing niðurstaðna í þreytuþolsprófunum er yfirleitt mikil og fjögur sýni í hverri syrpu gefa afar litlar upplýsingar um mismun á syrpunum.

5. UMRÆÐA

Tilgangur rannsóknarinnar var að mæla þreytuþol malbiks og afla þannig á óbeinan hátt upplýsinga um áhrif salts, vatns og viðloðunarefna á eiginleika malbiks, sem mætti nota til að meta líkur á skemmdum á malbikinu undir nánar tilteknum kringumstæðum.

Niðurstöður þessarar rannsóknar benda til þess að prófunaraðferðin gefi vissar upplýsingar um viðloðun. Með rannsókninni hafa fengist nokkrar vísbendingar um viðloðunareiginleika malbiks við samspil salts, vatns og viðloðunarefnis. Engu að síður bar rannsóknin miklu minni árangur en vonast var til og af ýmsum ástæðum.

Meginástæðan er sú að dreifing á þreytuþoli er mikil (frávikshlutfallið¹³ á endurteknum mælingum er á bilinu 10-80%, þótt algengast sé að það sé á bilinu 20-60%) og endurtekningar miklu færri en svo (fjórar í hverju samtaki¹¹) að raunhæft sé álykta um áhrif meðhöndlunar á tölfræðilegum grundvelli. Þar af leiðandi gefa niðurstöðurnar í flestum tilfellum aðeins óljósar vísbendingar um mismun á þreytuþoli malbiksins við mismunandi kringumstæður.

Í öðru lagi er ljóst af niðurstöðunum að áhrif frá salti á niðurstöður þreytuþolsprófana koma oft ekki fram í prófunum fyrr en sýnin hafa verið geymd lengi í vatni, jafnvel þótt holrýmdin sé há (6-8 %). Ef malbik er blandað úr saltmengudu steinefni benda niðurstöðurnar þó sterklega til þess að þreytuþol skerðist þegar eftir tveggja vikna vist í fersku vatni. Öðru máli gegnir um malbik úr saltlausu steinefni; þá er vafamál að löng vist (20 vikur) í saltvatni hafi nokkur teljandi áhrif og enn síður ef malbikið er blandað viðloðunarefnum, þar eru áhrifin óljós eftir 40 vikna vist í saltvatni (en greinileg eftir 80 vikur í vatni).

Í þriðja lagi líkir prófunin að takmörkuðu leyti eftir raunverulegum aðstæðum í slitlagi. Sem dæmi má nefna að sýnin hafa engan hliðarstuðning meðan á prófuninni stendur líkt og gerist í raunverulegu slitlagi. Holrýmdin er líka miklu meiri en venjulegt er í slitlagi en það er nauðsynlegt til að flýta fyrir áhrifum vatns á sýnið. Þrátt fyrir mikla holrýmd gengur mettunin mjög hægt fyrir sig í prófunarferlinu og vera má að mettunin sé minni heldur en gerist í slitlagi undir umferð. Ef svo er tefur það fyrir áhrifum sem prófuninni er ætlað að draga fram í dagsljósið. Þetta og fleira af svipuðu tagi veikir ályktanagrundvöllinn.

¹³ Frávikshlutfall; á ensku: *coefficient of variation*.

Í fjórða lagi er prófunaraðferðin á tilraunastigi og nánast óreynd. Þess vegna er alls óvíst um það hvernig sambandinu milli niðurstaðna hennar og endingu á slitlagi er háttað.

Niðurstöður þreytuþolsprófananna gefa til kynna að þreytuþol, eins og það er mælt í þessari tilraun, geti verið nothæfur mælikvarði á viðloðun. Mismunur á þreytuþoli í 1. áfanga (þar sem þreytuþol sýna úr saltmengunni steinefni var borið saman við þreytuþol sýna úr hreinu steinefni) verður tæpast rakinn til annars en mismunar á viðloðun bindiefnis við steinefni. Það sem styrkir þessa ályktun enn frekar er að mismunurinn eykst með lengri tíma í vatni, sem væntanlega er bein afleiðing af því að vatnið brýtur sér í vaxandi mæli leið að snertifleti bindiefnis og steinefnis fyrir áhrif frá vökvadrægni saltsins og rýfur bindinginn.

Fleira athyglisvert kemur í ljós þegar niðurstöðurnar eru skoðaðar. Samanburður á þreytuþoli sýna úr 1. og 2. áfanga sem ættu að gefa svipaðar niðurstöður, (hvoru- tveggja sýni sem eru án viðloðunarefnis, gerð úr saltlausu steinefni og geymd í fersku vatni), kemur að einu leyti á óvart; þreytuþol sýnanna úr 2 áfanga er ríflega fjórfalt meira að jafnaði en samsvarandi sýna úr 1. áfanga. Sýni úr 3. áfanga sem voru gerð án viðloðunarefnis og einnig úr saltlausu steinefni (en geymd í saltvatni) hafa að jafnaði svipað þreytuþol og sýnin úr 1. áfanga. Eina tiltæka skýringin á þessum mismun er sú að rúmir 17 mánuðir liðu frá því að sýnin í 2. áfanga voru gerð og þar til þau voru sett í vatn, sjá kafla 2.3, en annars var þessi biðtími 2-3 mánuðir. Vera má að bindiefnið í sýnunum hafi harðnað á biðtímanum, ekki síst þar sem geymsluskilyrði (kæling) sýnanna brugðust að nokkru leyti og þreytuþol eykst með stífni bindiefnisins. Þessi tilgáta er að öðru leyti órökstudd.

Sé langur biðtími ástæðan er ljóst að hann verður að vera svipaður milli sýnahópa til að hægt sé að bera niðurstöður þeirra saman. Sömuleiðis þurfa geymsluaðstæður að vera hinar sömu. Í þessu verkefni var biðtími sýna innan hvers áfanga hinn sami þannig að hann truflar ekki samanburð á niðurstöðum innan áfanganna.

Mettun í sýnunum er afar hægfara. Eftir 40 vikur í vatni er hún aðeins 50 % og eftir 80 vikur um 70 %. Sennilega gengur mettnun þó miklu hraðar fyrir sig í blautu malbiksslitlagi, ef holrýmdin er sú sama, vegna sveiflubundinna þrýstingsáhrifa frá umferðinni. Engar upplýsingar eru tiltækar um mettnun í íslenskum malbiksslitlögum.

Niðurstöðurnar benda einnig til þess að einhverskonar samband sé á milli minnkandi þreytuþols og aukinnar mettnunar sýnanna. Líklegast er að áhrif á viðloðun og þar með þreytuþol, ef einhver eru, komi fyrir fram við meiri og hraðari mettnun. Það er líka hugsanlegt að mettnunin ein og sér dragi úr þreytuþoli á þann hátt að með aukinni mettnun reyni sveiflandi álag meira á sýnin. Loftfyllt holrúm eru líkleg til að dempa álagið í prófinu en vatnsfyllt holrúm eru líkleg til að leiða álagið um sýnið, eigi jafnvel þátt í að spyrna sýnunum sundur undir sveiflandi álagi. Sem stendur er ekki grundvöllur til að meta hvort eða að hve miklu leyti mettnunin ein er orsök breytinga á þreytuþoli.

Prófunaraðferðin er mjög tímafrek og dýr. Af þessum ástæðum m.a. er útilokað að hún verði notuð sem eftirlitspróf. Raunhæfari möguleiki er að nota hana til grunnrannsóknna á sviði viðloðunar biks og steinefna, þó því aðeins að endurbætur verði gerðar á framkvæmd hennar. Hér eru nokkrar tillögur að endurbótum, sem gætu komið að gagni:

- Fjölga endurtekningum. Af myndum 4.1-4.3 er ljóst að dreifing niðurstaðna innan sýnasyrpu (þ.e. á sýnum sem eiga að vera sambærileg og eru prófuð á sama hátt) er í mörgum tilfellum mikil. Meginástæðan er sennilega sú að grófa

steinefnið hafi raðast ójafnt í sýnin sem þar af leiðandi verða misjafnlega sterkbyggð. Úr þessum ágalla verður tæpast bætt út af fyrir sig, en hægt er að vinna gegn áhrifum hans með fjölgun sýna; nákvæmni meðaltalsins tvöfaldast að jafnaði með hverri fjórföldun á sýnafjölda. Í þessari prófun voru aðeins fjögur sýni í hverri syrpu. Til samanburðar má nefna að til mælinga á skriðþoli samkvæmt ÍST EN 12697-25 (cyclic compression test) þarf að lágmarki 5 sýni.

- Ef til vill er hægt að minnka dreifingu á niðurstöðum með því að jafna endafletina á sýnunum (skera þá eða slípa). Í ÍST EN 12697-25 er gerð krafa um að báðir endar séu sléttir (þannig að ekki finnist lýti á þeim þegar fingri er strokið yfir þá), væntanlega til að tryggja að álagið dreifist jafnt um sýnið.
- Kanna hvaða líkindadreifingu þreytuþolsmælingarnar lúta. Þreytuþolsmælingar í þessari prófun vekja grun um að niðurstöðurnar lúti ekki normaldreifingu, en hafi öllu fremur skekka dreifingu (til hægri) eins og raunar er viðbúið um mælingar á endingu. Vitneskja um líkindadreifingu mæliniðurstaðna gerir auðveldara að prófa tilgátur um mismun á niðurstöðum með tölfræðilegum aðferðum.
- Hraða og auka metnun í sýnunum án þess þó að beita svo harkalegum aðferðum, t.d. snarpri lofttæmingu, að þau þenjst út og þrýstipól þeirra minnki.
- Tryggja að öll sýni séu prófuð við sama hitastig (þ.e. innan tiltekinna frávika). Stífni hefur ótvírætt áhrif á þreytuþol og það verður að teljast líklegt að hitastigsfrávik sem nemur nokkrum °C hafi áhrif á stífnina og þar með þreytuþolið.
- Þjappa prófunarsýni þannig að holrýmd þeirra verði ávallt sú sama (þ.e. innan tiltekinna frávika). Þessu markmiði er auðvelt að ná með því að nota snúðþjöppu og auðveldar samanburð á niðurstöðum sem fengnar eru á annars mismunandi sýnasyrpum.
- Auka holrýmd enn frá þeirri sem notuð var í þessari rannsókn (6-8%). Malbik byrjar fyrst að hleypa vatni í gegnum sig þegar holrýmdin er orðin 4% [PH 1999, bls. 8]. Í amerískri heimild sem fjallar um viðloðun [RT 1994, bls. 11] er staðhæft að 8-13 % holrýmd sé einna afdrifaríkust fyrir viðloðunarskemmdir í malbiki. Með því að auka holrýmdina úr 6-8 % í 10 % eða þar um bil verður metnun sýnanna að öllum líkindum hraðari og prófið næmara.
- Setja reglur um geymslu sýnanna frá því að sýnin eru gerð og þar til prófun hefst, bæði um umhverfi þeirra og geymslutíma. Ástæðan er sú að bindiefnið í sýnunum stífnar að líkindum við geymslu sem aftur hefur áhrif á þreytuþolið.
- Endurskoða val á þreytuþolsstika. Ef til vill er hægt að finna heppilegri þreytuþolsstika en hér var notaður.

6. ÁLYKTANIR

Af efni skýrslunnar má draga eftirfarandi ályktanir:

- Niðurstöðurnar gefa sterkar vísbendingar um að malbik úr saltmenguðu steinefni með mikla holrýmd (6%) hafi minna þreytuþol en samskonar malbik úr steinefni sem er ómengað af salti. Að því tilskildu að samband sé á milli endingar og þreytuþols (sem er aðeins tilgáta) verður að teljast líklegt að malbik með mikla holrýmd og úr saltmenguðu steinefni endist skemur í rakamettuðu umhverfi en samskonar malbik úr saltlausu steinefni í sambærilegu umhverfi.
- Niðurstöðurnar gefa ennfremur til kynna að viðloðunarefni hafi jákvæð áhrif á þreytuþol malbiks. Þetta á við malbik með hárra holrýmd (8%) og kemur þá fyrst fram þegar malbikið hefur legið lengi í vatni (80 vikur). Ef gert er ráð fyrir

að skert þreytuþol sé vísbending um skemmri endingu má túlka þetta sem svo að notkun viðloðunarefnis í malbik hafi jákvæð áhrif á endingu, a.m.k. ef holrýmdin er há og malbikið er blautt langtímum saman.

- Prófunaraðferðin er mjög tímafrek og dýr. Hún hentar þess vegna ekki til eftirlitsprófana en getur komið til álita við þróunarrannsóknir. Nákvæmni hennar er heldur ekki viðunandi en ýmsar úrbætur á því sviði eru mögulegar.

HEIMILDIR

- [AV 1995]. *Alverk '95. Almenn verklýsing fyrir vega- og brúargerð*. Vegagerðin. Reykjavík.
- [FAS 1998]. *FAS metoder 1998*. Foreningen för asfaltbeläggningar i Sverige. FAS Service AB, Stockholm.
- [HF 1974]. Fromm, H.J. *The mechanisms of asphalt stripping from aggregate surfaces*. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists, Technical sessions, Volume 43, bls. 191-223.
- [ÍST 2005]. *ÍST EN 12697-25:2005. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test*. Staðlaráð Íslands.
- [NVF 1985]. *Materialegenskaper og funksjonskrav for varmblandade dekker og bærelag*. Nordisk vegteknisk forbund. Utvalg 33 – Asfaltbelegninger. Rapport nr. 5 1985.
- [PH 1999]. Höbeda, P., Chytla, J. *Undersökning av beständigheten hos AG 16 enligt ny metod och effekt av vidhäftningsbefrämjande tillsatser*. VTI notat 54-1999. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- [RG 2007]. Samgönguráðuneytið. *Reglugerð nr 155/2007 um stærð og þyngd ökutækja*. Sótt 2010-07-19 á <http://www.reglugerð.is/interpre/dkm/WebGuard.nsf/key2/155-2007>
- [RT 1994]. Terrel, R. L., Al-Swailmi, S. *Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection*. SHRP-A-403. Strategic Highway Research Program, Washington.
- [ÞI 1988]. Þórir Ingason. *Áhrif salts á slitþol malbiks (forathugun)*. Skýrsla nr. 88-12. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík.
- [ÞI 1991]. Þórir Ingason. *Frost-þíðuþol malbiks – forathugun*. Skýrsla nr. 91-05. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík.

VIÐAUKAR

VIÐAUKI I. MÆLIKVARÐAR Á ÞREYTUÞOL

Með hliðsjón af dæmigerðri hegðun sýna í þreytuþolsprófi koma nokkrir mælikvarðar á þreytuþol einkum til álita:

1. Streita (aflögun) eftir ákveðinn sveiflufjölda, til dæmis eftir 3600 sveiflur (þessi mælikvarði er notaður í ÍST EN 12697-25, en þar er raunar verið að mæla skrið fremur en þreytuþol).
2. Sveiflufjöldi þar til ákveðinni streitu er náð, til dæmis 15%; við þessa streitu má líta svo á sýnið hafi brotnað.
3. Sveiflufjöldi á milli tveggja streitumarka, t.d. 2% og 6%.
4. Sveiflufjöldi þegar vendipunkti í streituferlinum er náð; þá má líta svo á að sýnið sé að byrja að bila (skemmast).
5. Sveiflufjöldi meðan breytingar á streitu í sýninu eru undir einhverju tilteknu lágmarki, með öðrum orðum meðan hallatala ferilsins er undir ákveðnu marki.

Þessir mælikvarðar hafa hver um sig ýmsa kosti og galla:

1. Streita eftir ákveðinn sveiflufjölda er óheppilegur mælikvarði. Fyrir því eru einkum tvær ástæður; í sumum tilfellum brotnar sýnið áður en fjöldamarkinu er náð. Einnig getur streitubreytingin verið mjög hröð á þriðja hluta ferilsins (sjá kafla 3.1) og ef valinn sveiflufjöldi hittir á þennan hluta ferilsins verður þreytuþolsákvörðunin ónákvæm.
2. Sveiflufjöldi frá upphafi prófunar og þar til ákveðinni streitu er náð er að flestu leyti heppilegur mælikvarði. Einfaldasta leiðin er að því er virðist að nota sveiflufjölda frá því að prófun hefst og þar til sýnið brotnar (t.d. þar til streitan er orðin 15%). Þó er æskilegt að undanskilja sveiflur í byrjun meðan sýnið er að staðna. Það er hins vegar nokkrum vandkvæðum bundið vegna þess að sýnin þurfa misjafnlega margar sveiflur til að staðna. Sýni með lítið þreytuþol þurfa tiltölulega fáar sveiflur, en þær geta samt sem áður verið verulegur hluti af heildarfjöldanum. Sýni með mikið þreytuþol virðast hins vegar þurfa talsvert margar sveiflur til að staðna. Þar af leiðandi er ekki hægt að klippa einhvern fastákveðinn sveiflufjölda framan af þreytuþolsferlinum, fremur kemur til greina að nota fastákveðið hlutfall af sveiflufjölda við brot (þ.e. 15% streitu).
3. Sveiflufjöldi þar til vendipunkti á streituferlinum er náð er að sumu leyti athyglisverður mælikvarði, einkum þar sem hann gefur til kynna hversu margar sveiflur sýnið þolir áður en það byrjar að bila. Vandkvæðin við þennan mælikvarða eru (óvirkar) sveiflur í byrjun prófunar meðan sýnið er að staðna. Á hinn bóginn gefa flestir streituferlar til kynna að sýnið eigi talsvert eftir þegar vendipunktinum er náð, sem má túlka sem gæðamerki og bendir til þess að sveiflurnar í þessum hluta ættu að teljast með í þreytuþoli.
4. Sveiflufjölda milli tiltekinna streitumarka er mjög auðvelt að ákvarða, sem er viss kostur, en hins vegar er engan veginn augljóst hvaða streitumörk henta best. Þar sem ferlarnir hafa ákaflega mismunandi lögun er vandkvæðum bundið að finna einhver fastákveðin streitumörk sem geta gilt fyrir þá alla. Einn möguleiki af þessu tagi er að nota sveiflufjöldann frá upphafi prófunar og þar til fastákveðinni streitu til viðbótar þeirri sem mældist í upphafi prófunar (að forálagsþrepi loknu) hefur verið náð, sem

mælikvarða á þreytuþol. Með hliðsjón af ÍST EN 12697-25, § 4.5.7 sýnist koma til greina að velja streituvíðbótina 4% þar sem þá megi teljast líklegt að þá sé vendipunktinum á þreytuþolsferli sýnisins náð (hrörnunarскеið sýnisins byrjar með vendipunktinum). Gallinn á þessum mælikvarða er sá að þreytuþolsferill sterkra sýna getur verið tiltölulega flatur á þeim hluta hans þar sem streituvíðbótin er 4% og þreytuþolsákvörðunin þar af leiðandi ónákvæm.

5. Sveiflufjöldi meðan breytingar á sýninu eru undir tilteknum mörkum (þ.e. meðan hallatalan er undir tilteknu hámarki. Þessi mælikvarði á þreytuþol er einnig athyglisverður þar sem hann lýsir sveiflufjölda sem sýnið þolir án þess að taka miklum breytingum í streitu, eins og gerist í upphafi prófunar og í lok hennar. Þessum mælikvarða svipar að nokkru til ákvörðunar á skriðhraða¹⁴ í ÍST EN 12697-25. Vandkvæðin við þennan mælikvarða er annars vegar hvernig hallatalan skuli ákvörðuð, hins vegar hvaða hámark eigi að setja fyrir hallatöluna. Ef hallatöluhámarkið er valið lágt (af stærðargráðunni 10^{-3}) er hættu á að sum (mjög léleg) sýni heltist úr lestinni vegna þess að hallatalan komist aldrei undir þetta hámark af þeirri ástæðu að streitan breytist hratt í öllu prófunarferlinu. Sé hallatöluhámarkið valið í hærra lagi (af stærðargráðunni 2×10^{-2}) teljast nánast allar sveiflur í sterkum sýnum með. Þar af leiðandi er vandkvæðum bundið að tilgreina hallatöluhámark sem hentar fyrir öll sýni og þessi mælikvarði er því óheppilegur til samanburðar á þreytuþoli sýna.

Í úrvinnslu mæligagnanna voru nokkrir mismunandi mælikvarðar á þreytuþol reyndir, m.a. þessir:

- Vendipunktur (VDPKT)
- Hallatöluhámark 0,02 (H 0,02)
- Hallatöluhámark 0,01 (H 0,01)
- Hallatöluhámark 0,005 (H 0,005)
- Streitumark 4% (STM 4)
- Streitumark 6% (STM 6)
- Streitumark 8% (STM 8)
- Streitumark 10% (STM 10)
- Streitumark 15% (STM 15)

Fylgnistuðlar milli þessara mælikvarða voru reiknaðir og eru birtir í töflu I.1. Af töflunni má sjá að fylgni milli þessara þreytuþolsmælikvarða er mjög nán, síst þó milli sveiflufjölda að vendipunkti og annarra mælikvarða. Að þessu leyti sýnist ekki skipta miklu máli hvaða þreytuþolsstiki er valinn.

Tafla I.1. Fylgnistuðlar fyrir þreytuþolsmælikvarða. Nánari skýring á stikum í texta.

Stiki	VDPKT	H 0,02	H 0,01	H 0,005	STM 4	STM 6	STM 8	STM 10	STM 15
VDPKT	1,00								
H 0,02	0,86	1,00							
H 0,01	0,86	1,00	1,00						
H 0,005	0,86	1,00	1,00	1,00					
STM 4	0,84	0,98	0,98	0,98	1,00				
STM 6	0,85	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00			
STM 8	0,86	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00		
STM 10	0,86	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	
STM 15	0,86	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00

¹⁴ Skriðhraði; á ensku: *creep rate*.

Ekki verður séð að einhver einn þessara stika sé beri af hinum hvað notagildi varðar. Lausleg athugun á frávikshlutfalli¹⁰ gefur til kynna að það sé einna hæst (sem er ókostur) fyrir sveiflufjölda að vendipunkti (VDPKT) og einna lægst fyrir sveiflufjölda að broti (STM 15), en mismunurinn er lítil.

Hér var valið að nota sveiflufjölda frá upphafi prófunar (að loknu forálagsþrepi) og þar til streita mældist 4% meiri en í upphafi hennar. Þar með er ekki sagt að þessi mælikvarði sé endilega betri en aðrir þeir sem lýst hefur verið hér á undan, en sveiflufjöldinn er skýrt afmarkaður og honum svipar að nokkru til mælikvarðans sem er notaður í ÍST EN 12697-25 til ákvörðunar á skriði. Tafla I.1 gefur einnig til kynna að þessi mælikvarði standi í nánú samhengi við sveiflufjöldann þar til sýnið brotnar (STM 15).

VIÐAUKI II. NIÐURSTÖÐUR MÆLINGA

Mælikvarði á þreytuþol er sveiflufjöldi frá upphafi prófunar (að loknu forálagsþrepi) og þar til streita mælist 4% meiri en í upphafi hennar.

1. áfangi, mæliniðurstöður:

Sýni mrk.	Í vatni, vikur	Þreytuþol, svfj.		Hol- rýmd, %	Mett- un %	Hitastig við prófun		Athugasemdir
		Án salts	Með salti			Fyrir, °C	Eftir, °C	
S02	2	-	737	5,9	-	-	-	
S05	2	-	1207	5,9	-	-	-	
S10	2	-	1243	5,9	-	-	-	
S15	2	-	1334	6,0	-	-	-	
H03	2	5859	-	6,1	-	-	-	
H05	2	8800	-	6,0	-	-	-	
H10	2	4233	-	5,9	-	-	-	
H15	2	5001	-	6,0	-	-	-	
S03	5	-	625	5,9	-	-	-	
S06	5	-	528	5,9	-	-	-	
S09	5	-	792	6,0	-	-	-	
S12	5	-	979	6,0	-	-	-	
H02	5	5340	-	6,4	-	-	-	
H06	5	9042	-	6,0	-	-	-	
H09	5	5194	-	6,2	-	-	-	
H12	5	3750	-	5,9	-	-	-	
S04	10	-	198	6,0	-	-	-	
S07	10	-	226	6,0	-	-	-	
S08	10	-	251	5,9	-	-	-	
S11	10	-	209	5,9	-	-	-	
H04	10	4493	-	6,1	-	-	-	
H07	10	3096	-	6,2	-	-	-	
H08	10	2906	-	6,0	-	-	-	
H11	10	2684	-	5,9	-	-	-	

2. áfangi, mæliniðurstöður:

Sýni mrk.	Í vatni, vikur	Þreytuþol, svfj.		Hol- rýmd, %	Mett- un %	Hítastig við prófun		Athugasemdir
		Fersk- vatn	Salt- vatn			Fyrir, °C	Eftir, °C	
C11	2	18983	-	6,8	19	-	24,0	
C13	2	34444	-	6,7	23	-	25,0	
C15	2	23065	-	6,8	21	-	24,0	
C25	2	59333	-	6,7	20	-	24,0	
C03	2	-	13467	6,8	16	-	25,0	
C07	2	-	23283	6,8	20	-	24,0	
C08	2	-	32832	6,7	21	-	25,0	
C33	2	-	14312	6,8	18	-	24,0	
C16	5	19193	-	6,7	34	-	24,5	
C19	5	8077	-	6,7	30	-	25,0	
C20	5	6298	-	6,7	29	-	25,0	Gallað sýni ¹⁵
C23	5	23345	-	6,7	33	-	25,0	
C02	5	-	10898	6,8	24	-	25,0	
C10	5	-	11818	6,7	26	-	25,0	
C24	5	-	10004	6,7	26	-	25,5	
C27	5	-	13166	6,8	28	-	26,0	
C04	10	22268	-	6,8	43	-	24,0	
C12	10	18391	-	6,8	41	-	23,0	
C31	10	22592	-	6,7	39	-	24,0	
C32	10	36579	-	6,8	37	-	23,5	
C01	10	-	9189	6,8	33	-	24,0	
C18	10	-	24590	6,8	33	-	24,5	
C22	10	-	22030	6,8	34	-	24,0	
C26	10	-	24474	6,8	36	-	25,0	
C09	20	33822	-	6,8	55	21,0	23,0	
C17	20	8875	-	6,8	51	-	26,0	
C29	20	4322	-	6,8	50	-	27,0	
C30	20	21575	-	6,8	49	22,0	23,0	
C06	20	-	5368	6,8	47	24,5	27,0	
C14	20	-	20576	6,7	48	21,0	24,0	
C21	20	-	15917	6,8	44	-	24,0	
C28	20	-	4029	6,8	46	-	26,0	

¹⁵ Vantar í kjarnann.

3. áfangi, mæliniðurstöður:

Sýni mrk.	Í vatni, vikur	Þreytuþol, svfj.		Hol- rýmd, %	Mett- un %	Hitastig við prófun		Athugasemdir
		Með viðl.	Án viðl.			Fyrir, °C	Eftir, °C	
A01	10	-	-	7,8	31	23,0	-	
A06	10	-	5767	7,7	32	23,0	23,4	
A09	10	-	4456	7,7	33	23,1	23,2	
A10	10	-	7156	7,7	33	22,5	22,3	
M06	10	7421	-	7,7	32	22,8	23,0	
M08	10	12917	-	7,7	30	22,0	22,3	
M09	10	7712	-	7,8	32	22,7	23,0	
M11	10	4502	-	7,7	28	23,3	23,8	
A03	20	-	4967	7,8	41	22,0	22,4	
A04	20	-	3473	7,8	42	24,2	24,6	
A11	20	-	5847	7,8	40	21,8	22,0	
A13	20	-	5638	7,7	36	23,7	24,2	
M01	20	10346	-	7,7	40	22,0	22,0	
M07	20	8333	-	7,7	33	23,2	23,7	
M13	20	7143	-	7,7	36	23,2	23,7	
M16	20	20641	-	7,7	33	22,0	21,9	
A05	40	-	3761	7,8	48	23,6	23,9	
A08	40	-	7129	7,7	51	22,8	23,3	
A14	40	-	7077	7,8	51	22,7	22,1	
A16	40	-	8367	7,8	47	23,6	24,3	
M02	40	5011	-	7,7	44	24,1	24,8	
M04	40	8872	-	7,7	45	22,2	22,8	
M15	40	18601	-	7,8	46	22,0	22,7	
M17	40	7638	-	7,7	46	24,4	25,0	
A02	80	-	1138	7,7	85	21,7	21,7	
A07	80	-	2928	7,7	71	23,3	23,9	
A12	80	-	915	7,7	84	23,4	23,6	
A15	80	-	3268	7,7	72	22,7	22,9	
M03	80	5517	-	7,7	66	22,9	23,2	
M05	80	8098	-	7,8	59	22,1	22,0	
M12	80	7367	-	7,8	61	23	23,2	
M14	80	8979	-	7,7	60	22,7	22,7	

3. áfangi, mæliniðurstöður, aukasýni:

Sýni mrk.	Í vatni, vikur	Þreytuþol, svfj.		Hol- rýmd, %	Mett- un %	Hitastig við prófun		Athugasemdir
		Ferskt vatn	Salt vatn			Fyrir, °C	Eftir, °C	
E01	20	-	12617	7,8	-	22,2	22,0	
E03	20	-	12757	7,7	-	22,0	22,5	
E02	20	-	8630	7,7	-	23,0	23,4	
E04	20	-	9087	7,8	-	23,6	24,0	
Þ02	0,14	7016	-	7,8	7	23,5	24,0	
Þ04	0,14	6117	-	7,7	8	24,0	24,9	
Þ01	0,14	6364	-	7,7	6	23,5	23,9	
Þ03	0,14	5387	-	7,8	6	24,0	24,6	

VIÐAUKI III. SÆNSK AÐFERÐ TIL AÐ PRÓFA VIÐLOÐUN

Hér á eftir fer stutt endursögn á lýsingu á sænskri aðferð sem hefur verið notuð til að rannsaka viðloðunareiginleika burðarlagsmalbiks [PH 1999, bls. 26]. Aðferðina er ekki að finna í stöðlum og hún er heldur ekki í föstum skorðum, henni er stundum breytt til að líkja eftir aðstæðum.

Malbikssýni með bindiefnisinnihald og holrýmd svipað því sem gerist í sænsku burðarlagsmalbiki (algengt bindiefnisinnihald er 4-5 % og algeng holrýmd er 6-7 %) eru gerð á rannsóknastofu og þjöppuð í snúðþjöppu (þrýstingur 3,6 MPa, snúðhalli 1°). Síðan er um tvær leiðir að velja í framhaldinu, svokallaða gegnflæðisleið (osmotisk metod) og vatnsgeymsluleið (konditionering med vatten) sem er notuð til samanburðar.

A. Gegnflæðisleið:

1. Stífnir sýnanna er mæld undir sveiflandi álagi¹⁶ við 10 °C á þurrum sýnum.
2. Sýnin eru mettuð¹⁷ við undirþrýsting (6,7 kPa í 3 klst) í mettaðri vatnsupplausn af NaCl (350 g NaCl/1 l H₂O).
3. Sýnin eru látin standa í saltupplausninni við 40 °C í 48 klst.
4. Sýnin eru mettuð á ný í eimuðu vatni á sama hátt og áður.
5. Sýnin eru látin standa í eimuðu vatni við 40 °C í 48 klst.
6. Sýnin eru rúmmálmæld (með skíðmáli) til að ganga úr skugga um hvort þau hafi þrútnað við mettunina.
7. Stífnin er mæld undir sveiflandi álagi með sömu aðferð og áður.
8. Sýnin eru látin sæta sjö frost-þíðusveiflum (+/- 20 °C).
9. Sýnin eru rúmmálmæld (með skíðmáli).
10. Stífnin er mæld undir sveiflandi álagi á sama hátt og áður.
11. Sýnin eru látin þorna og jafna sig (áterlækning).
12. Sýnin eru rúmmálmæld (með skíðmáli).
13. Stífnin er mæld undir sveiflandi álagi á sama hátt og áður.

A. Vatnsgeymsluleið:

1. Stífnir sýnanna er mæld undir sveiflandi álagi¹⁶ við 10 °C á þurrum sýnum.
2. Sýnin eru mettuð¹⁷ við undirþrýsting (6,7 kPa í 3 klst) í eimuðu vatni.
3. Sýnin eru látin standa í eimuðu vatni við 40 °C í 48 klst.
4. Sýnin eru rúmmálmæld (með skíðmáli) til að ganga úr skugga um hvort þau hafi þrútnað við mettunina.
5. Stífnin er mæld undir sveiflandi álagi með sömu aðferð og áður.
6. Sýnin eru látin þorna og jafna sig (áterlækning).
7. Sýnin eru rúmmálmæld (með skíðmáli).
8. Stífnin er mæld undir sveiflandi álagi með sömu aðferð og áður.

Tilgangurinn með þessari prófun er að meta að hve miklu leyti malbikið skaðast við áðurnefndar aðstæður, þ.e. fyrir áhrif frá saltvatni annars vegar og eimuðu vatni hins vegar. Hugmyndin með prófunaraðferðinni er að líkja eftir aðstæðum að vetrarlagi þar sem malbik með tiltölulega hárra holrýmd og lágu bindiefnisinnihaldi verður fyrir áraun sem er fólgin í mettun af saltþekli frá hálkuvannarsalti og því næst úrkomu. Mettun með sterkri saltupplausn í undirþrýstingi líkir eftir aðstæðum þegar salti, þurru eða í upplausn er ausið á slitlagið og pumpuáhrif frá umferðinni þrýsta saltlausninni inn í holrými í malbikinu. Næsta þrep, mettun við undirþrýsting í fersku vatni, líkir eftir

¹⁶ Skv. sænskri verklýsingu, FAS 454-98. Sjá heimildalista [FAS 1998].

¹⁷ Skv. sænskri verklýsingu, FAS 446-98, §6. Sjá heimildalista [FAS 1998].

himnuflæði; vökvaflæði frá stöðum með fersku eða lítt söltu vatni til staða þar sem saltlausnin er sterkari með tilheyrandi þenslum ef aðstæður leyfa. Til viðbótar koma svo þenslur vegna frostþíðu áhrifa. Þenslurnar sem af þessu stafa verða til þess að veikja efjuna, en sterk efja er líklega mikilvæg forsenda fyrir góðri endingu malbiks. Mælikvarði á mótstöðu malbiksins er stífni þess. Með samanburði við svipaðan prófunarferil þar sem saltið er undanskilið gefst tækifæri til að meta áhrif saltsins út af fyrir sig.