

---

# VIÐLOÐUNAREIGINLEIKAR REPJUBLANDAÐS BINDIEFNIS

NMI 11-04

Ásbjörn Jóhannesson  
Hafsteinn Hilmarsson  
Oddur Þórðarson  
Pétur Pétursson



---

Rannsóknaverkefni Vegagerðarinnar:

## **Viðlöðunareiginleikar repjúblandaðs bindiefnis.**

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

Tvær aðferðir til að meta viðloðun bindiefnis við steinefni voru reyndar. Önnur þeirra, skolpróf, byggist á því að dæla vatni gegnum sýni af bindiefnishúðuðum steinum, ýmist með sog- eða þrýstikrafti, og líkja á þann hátt eftir aðstæðum á rennblautu slitlagi. Hin aðferðin, úthljóðspróf (ultrasonic testing), er þekkt úr heimildum.

Að svo stöddu er rannsóknin á frumstigi en báðar aðferðirnar gera greinarmun á viðloðunareiginleikum eftir því hvort bindiefnið inniheldur viðloðunarefni eða ekki. Skolprófið í núverandi mynd er dýrt og tímafrekt og kemur tæpast til greina í óbreyttri mynd. Úthljóðsprófið er fremur fljótlegt og nauðsynlegur tækjabúnaður ódýr. Niðurstöður beggja prófunaraðferða byggist á mati á þakningu sem er huglæg aðferð og fremur ónákvæm. Verkefnið er ekki komið svo langt að prófunaraðferðirnar hafi verið reyndar á repjúblönduðu bindiefni og frekari rannsóknir eru nauðsynlegar áður en hægt er að skera úr um notagildi þessara prófunaraðferða.

## FORMÁLI

Þetta verkefni var unnið fyrir styrk úr Rannsókn- og þróunarsjóði Vegagerðarinnar. Í verkefnishóp voru tilnefndir Sigursteinn Hjartarson, Vegagerðinni, og Oddur Þórðarson, Nýsköpunarmiðstöð Íslands, auk Péturs Péturssonar, Nýsköpunarmiðstöð Íslands, sem jafnframt var verkefnisstjóri. Að auki aðstoðuðu tveir aðrir starfsmenn Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands við verkefnið, þeir Hafsteinn Hilmarsson við prófanir og Ásbjörn Jóhannesson, sem skrifaði skýrsluna.

## **EFNISYFIRLIT**

<b>ÁGRIP</b> .....	<b>1</b>
<b>FORMÁLI</b> .....	<b>1</b>
<b>1. INNGANGUR</b> .....	<b>3</b>
<b>2. PRÓFUNARAÐFERÐIR</b> .....	<b>6</b>
2.1 Skolpróf.....	6
2.2 Úthljóðspróf .....	8
2.3 Mat á þakningu.....	9
<b>3. NIÐURSTÖÐUR</b> .....	<b>9</b>
3.1 Skolpróf.....	9
3.2 Úthljóðspróf .....	10
<b>4. UMRÆÐA</b> .....	<b>11</b>
<b>5. ÁLYKTANIR</b> .....	<b>12</b>
<b>HEIMILDIR</b> .....	<b>13</b>

### **VIÐAUKI**

Frumdrög að smíðateikningum að mælibúnaði fyrir skolpróf.

## 1. INNGANGUR

Fyrir slitlagagerð þar sem bik í einhverri mynd er notað sem bindiefni, skiptir viðloðun bindiefnisins við steinefnið miklu máli. Þetta er sér í lagi mikilvægt þegar klæðingar eiga í hlut, því í þeim er engin efja til að halda slitlaginu saman og bindiefnið er það eina sem heldur steinunum á sínum stað í slitlaginu. Án nægilegrar viðloðunar bindiefnisins við steinanna eyðileggst klæðingin á stuttum tíma. Það er því augljóslega mikilvægt að ráða yfir, eða finna að öðrum kosti, prófunaraðferðir sem henta til að mæla viðloðun bindiefnis við steinefni. Þessi skýrsla lýsir tilraunum til að meta notagildi tveggja slíkra prófunaraðferða.

Í þessu verkefni var lagt til grundvallar að prófunaraðferðin hentaði til að mæla viðloðun milli steinefnis og repjúblandaðs bindiefnis í klæðingum. Rannsóknir sem nú standa yfir á Nýsköpunarmiðstöð Íslands hafa gefið til kynna að hrærslupróf í sinni núverandi mynd þarfnist endurskoðunar þegar repjúblandað bindiefni er notað í viðloðunarprófunum í stað vegolúu, eins og prófunaraðferðin mælir fyrir um. Þess vegna var farið inn þá braut að prófa aðrar aðferðir til viðloðunarprófana en hér hefur tíðkast að nota, þó að því tilskildu að þær væru líklegar til að vera nothæfar fyrir repjúblandað bindiefni til jafns við aðrar bindiefnisgerðir sem eru notaðar í klæðingar.

Samkvæmt heimildum virðist mega rekja margvíslegar skemmdir á bikbundnum slitlögum til sameiginlegra áhrifa vatns og umferðar á slitlagið [Kandhal 2001, Schmidt 1971, Santucci 2010]. Erlendis hefur mikil áhersla verið lögð á að finna aðferðir til að spá um rakaskemmdir á slitlögum vegna þess að slíkar skemmdir eru tiltölulega algengar. Ástæður rakaskemmda eru einkum tvenns konar, annars vegar brestur á samloðun í efju slitlagsins, hins vegar brestur á viðloðun milli steinefnis og bindiefnis. Eins og áður segir er lítil sem engin efja í klæðingarslitlögum og þar af leiðandi er ekki um samloðunarbrest að ræða í þeim. Hitt er augljóst að viðloðun milli steinefnis og bindiefnis skiptir verulegu máli fyrir endingu klæðingar.

Vatn hefur að öðru jöfnu neikvæð áhrif á viðloðun bindiefnis við steinefni [Kema-Nord, án ártals]. Bindiefnið er vatnsfælið en steinefnið yfirleitt vatnsdrægt. Af þessu leiðir að komist vatn inn fyrir bindiefnishimnuna á steinefninu leitast það við að mynda skil milli steinefnis og bindiefnis og flysja bindiefnið af steinefninu ef ekkert er að gert. Á þessum forsendum er rökrétt að prófa viðloðun bindiefnis við steinefni með vatn til staðar.

Fyrstu prófunaraðferðir til að segja fyrir um þol slitlaga gegn áhrifum vatns og umferðar komu fram erlendis um 1930 og síðan hefur aragrúi af slíkum aðferðum bæst við. Árangurinn hefur verið misjafn, prófunaraðferðunum hefur jafnvel verið lýst sem svo að þær séu hraklegar [Lemminkäinen, án ártals]. Aðrir eru hófsamari, segja sem svo að engin ein prófunaraðferð geti spáð fyrir um hegðun slitlagsgerðar gagnvart áhrifum vatns og umferðar undir flestum eða öllum kringumstæðum [Solaimanian 2003, bls. 82]. Af þessu virðist sem val á prófunaraðferð sé að svo stöddu dæmt til að draga dóm af staðháttum.

Hérlendis hefur hrærsluprófið verið notað um áratuga skeið til að meta viðloðun milli steinefnis og vegolúu. Síðan hefur verið gert ráð fyrir að niðurstöðurnar gefi mynd af viðloðunareiginleikum steinefnisins án tillits til þess hvert bindiefnið er. Á þessum forsendum hefur hrærsluprófið verið notað hérlendis til að meta viðloðunareiginleika steinefnis í klæðingar.

Bindiefni í klæðingar er þunnbik (cutback), yfirleitt blanda af mjúku stífbiki, blandað með hvítspíra (white spirit). Á allra síðustu árum hefur repjuolía verið notuð í nokkrum mæli í stað hvítspíra til að þynna stífbikið. Þá bregður svo við að ótímabærar skemmdir hafa komið fram sumstaðar, ekki aðeins á klæðingum með repjúblönduðu

bindiefni, heldur einnig bindiefni sem er blandað hvítspíra, reyndar þó með nokkru lægra hlutfalli af hvítspíra en tíðkast hefur fram til þessa. Grunsemdir hafa hingað til helst beinst að ófullnægjandi viðloðun milli bindiefnis og steinefnis, ef til vill í samspili við viðloðunarefni.

Af þessari ástæðu hafa komið upp efasemdir um að hrærsluprófið í núverandi mynd sé óskeikult próf á viðloðun milli bindiefnis og steinefnis, ef bindiefnið er annað en vegolía. Erlendis hafa mörg önnur próf (sum hver breytt á ýmsa vegu) verið notuð til að mæla viðloðun milli steinefnis og bindiefnis. Meðal þeirra eru [Santucci 2010, Solaimanian, 2003]:

- *Film stripping test.* Blanda af steinefni og bindiefni er látin standa í 15-18 klst við 60 °C. Því næst er blandan kæld niður að stofuhita, látin í glerflösku ásamt eimuðu vatni og henni síðan velt 35 sn/mín í 15 mín. Þakningin er síðan metin í flúrljósi.
- *Static immersion test.* Blanda af steinefni og bindiefni er látin standa í 2 klst við 60 °C. Því næst er blandan kæld niður að stofuhita, látin í glerkrukku, og bætt við 600 ml af eimuðu vatni. Krukkan látin standa við 25 °C í 16-18 klst og þá er þakningin metin.
- *Dynamic immersion test.* Þetta próf er eins og static immersion test, að viðbætttri hrærslu (agitation) til þess að flýta fyrir flögnunaráhrifum.
- *Chemical immersion test.* Þessu prófi svipar til static immersion test, nema hvað vatnið er blandað mismunandi stórum skömmtum af natríum karbónati og áhrif þeirra á þakningu athuguð.
- *Surface reaction test.* Í þessu prófi er notað súrt efnasamband sem framleiðir gasþrýsting þegar það kemst í snertingu við steinefni. Því stærri sem snertiflöturinn er þeim mun meiri verður þrýstingurinn, og hann er notaður sem mælikvarði á þakningu.
- *Texas boiling water test.* Blanda af steinefni og bindiefni er látin út í sjóðandi vatn í 10 mínútur, síðan látin kólna og bindiefni sem flýtur upp er veitt ofan af vatninu. Því er síðan hellt af og það sem eftir verður er sett á pappírspurrku og þakningin metin.
- *Pneumatic pull-off test.* Í þessu prófi er bindiefni roðið á glerplötu og togstyrkur þess ásamt bindikrafti við glerplötuna mældur og skráður sem fall af tímanum sem glerplatan (ásamt bindiefninu) hefur verið í vatni.

Próf sem hafa verið notuð hérlendis eru:

- *Hrærslupróf.* Þetta próf (afbrigði af dynamic immersion test) er sænskt að uppruna og hefur verið notað með góðum árangri til að meta viðloðunareiginleika olíumalarefna eins og áður segir. Steinefnanefnd lét gera athuganir á þessu prófi og ályktaði út frá þeim m.a. að samræmi í þakningarmati tveggja manna virtist vel viðunandi ef þakning er afgerandi góð eða afgerandi slæm. Niðurstöðurnar gefa til kynna að staðalfrávik innan rannsóknastofu sé undir 5% meðan þakningin er undir 20 %, um eða undir 7 % ef þakningin er meiri en 85% en allt að 25 % ef þakning er á bilinu 30-80% [Steinefnanefnd 1994, bls. 84]. Með öðrum orðum gefa þessar niðurstöður til kynna að hrærsluprófið greini á milli efna sem hafa góða (>85%) þakningu og þeirra sem hafa slæma þakningu (<85 %). Sömuleiðis sýna þær að mismunur á tveim mælingum á samskonar sýni innan rannsóknastofu getur verið allt að 20 % án þess að ástæða sé til að rengja niðurstöðurnar.
- *Rúlluflöskupróf* (afbrigði af film stripping test). Sýni af steinefninu er þurr-siktað og stærðin 5,6-8,0 mm er blönduð með bindiefni (stífbiki) þannig að

bindiefnisinnihald blöndunnar verði 3,4 %. Blandan er látin kólna yfir nótt. Þá eru 150 g af blöndunni sett í hverja af þrem glerflöskum af tiltekinni gerð, þær fylltar til axla af eimuðu vatni og settar á rúlluborð þar sem þær eru látnar snúast 40 sn/mín við herbergishita. Þakningin er metin, fyrst eftir 4-6 klst, síðan eftir 24 klst og ef vill eftir 48 og 72 klst. Tveir menn meta þakninguna hverju sinni, óháð hvor öðrum og án aðgangs að fyrri niðurstöðum [Steinefnanefnd 1994].

Í norrænni samanburðarathugun á samkvæmni (repeatability) rúlluflösku-prófsins kom fram að staðalfrávik á niðurstöðum er 5-10 % innan rannsóknastofu og 10-15 % milli rannsóknastofa, breytilegt eftir þakningu [Steinefnanefnd 1994]. Þessar niðurstöður má túlka sem svo að mismunur á tveim mælingum á samskonar sýni geti verið allt að 14-28 % innan rannsóknastofu og 28-42 % milli rannsóknastofa án þess að ástæða sé til að rengja niðurstöðurnar.

Athuganir sem Steinefnanefnd lét gera á niðurstöðum þessa prófs þegar því er beitt á íslensk steinefni bentu til að samkvæmnin væri miklu lakari en í áður nefndri norrænni samanburðarrannsókn [Steinefnanefnd 1994]. Þessar athuganir gáfu til kynna að rúlluflöskuprófið greini ekki með vissu á milli efna í óbreyttri mynd nema mismunur á þakningu sé mjög mikill. Prófið var þó ekki útilokað sem slíkt og bent á að önnur útfærsla af prófinu gæti hugsanlega skilið á milli efna.

- *Suðupróf* (afbrigði af Texas boiling water test). Í hefðbundnu suðuprófi eru 300 g af olíumöl sett í eins lítra bikarglas og það fyllt af köldu vatni. Síðan er hrært í glasinu með glerstaf og athugað hvort bindiefni flýtur upp. Glasið er látið standa óhreyft í sólarhring og þá er athugað á ný hvort bindiefni hefur losnað af sýninu. Að því búnu er glasið hitað og hrært í því eftir hverjar 10 °C sem vatnið hitnar og athugað um leið hvort bindiefni losnar frá sýninu. Hitastig sem veldur verulegri losun bindiefnis er notað sem mælikvarði á viðloðun [Steinefnanefnd 1994].

Steinefnanefnd lét gera athugun á suðuprófi, þar sem sýnin voru ýmist gerð úr þveggu eða óþveggu steinefni (úr 10 námum) og blandan ýmist prófuð í fersku vatni eða saltvatni. Jafnframt var notuð sams konar blanda af steinefni, bindiefni og viðloðunarefni eins og í hrærsluprófi. Niðurstöðurnar reyndust ekki sannfærandi, mismunur á hitastigi í suðuprófi reyndist ekki heppilegur mælikvarði á viðloðun [Steinefnanefnd 1994].

Steinefnanefnd lét einnig gera tilraunir með að nota prófið í breyttri mynd. M.a. var notað stífbik sem bindiefni í stað vególú og sýnin látin sæta 500 frost/þíðusveiflum en þakning metin eftir hverjar 100 sveiflur. Að því loknu var sýnið sett í suðupróf eins og lýst er að ofan nema hvað vatnið var blandað 1 % af matarsalti. Samræmi í þakningarmati milli matsmanna reyndist fullnægjandi en munur á niðurstöðum eftir steinefnum var í flestum tilfellum lítill [Steinefnanefnd 1994].

Í þessum þrem prófunaraðferðum byggist niðurstaðan að hluta til á huglægu mati (subjective assessment) á þakningu í hrærsluprófi og rúlluflöskuprófi en í suðuprófi á því sem kallað er „verulegt“ magn af bindiefni. Þetta huglæga mat getur verið breytilegt eftir mönnum og einnig frá degi til dags sem er ótvírætt veikleiki og líklegur til að valda flökki í niðurstöðum.

Af þessum þrem prófum hefur hrærsluprófið verið notað langsamlega mest hérlendis. Á því er þó einn galli, sem raunar er líka á rúlluflöskuprófinu; meðan á prófinu stendur eru steinefnakornin á ferð og flugi hvert innan um annað og nuddast saman í sífellu. Að öllum líkindum byggist áraunin í þessum tveim prófunaraðferðum fyrst og fremst á þessu nuddi. Þetta er að vissu leyti óheppileg eftirlíking af árauninni sem slitlagið verður fyrir. Í slitlaginu mynda steinefnakornin eina heild, þau haldast nokkurn veginn á sama stað og breyta innbyrðis afstöðu sinni aðeins lítillega nema því aðeins að þau losni algerlega frá slitlaginu. Þar er áraun á bindinginn milli steinefnis og bindiefnis fremur að einhverju leyti fólgin í þrýstingsbreytingum sem verða þegar hjólbarði fer yfir slitlagið. Þrýstingur í hjólbarða á stærstu bílum getur verið allt að 9 bar (900 kPa). Þegar hjólbarði fer yfir rennblautt slitlag getur myndast álfka mikill þrýstingur í vatnsfylltum holrúmum í slitlaginu og ekki bara þrýstingur heldur einnig sog [Schmidt 1971, Santucci 2010].

Prófunaraðferðirnar tvær sem er lýst hér á eftir sneiða báðar hjá núningi á milli korna, því þau eru nánast alveg kyrrstæð meðan á prófuninni stendur. Í annarri þeirra er áraunin framkölluð með dælu sem sogar vatn og þrýstir því til skiptis í gegnum holrými í sýninu. Hin aðferðin notar örsmáar en mjög tíðar og öflugar hreyfingar í vatni sem væntanlega reyna verulega á bindinginn milli steinefnis og bindiefnis.

## 2. PRÓFUNARAÐFERÐIR

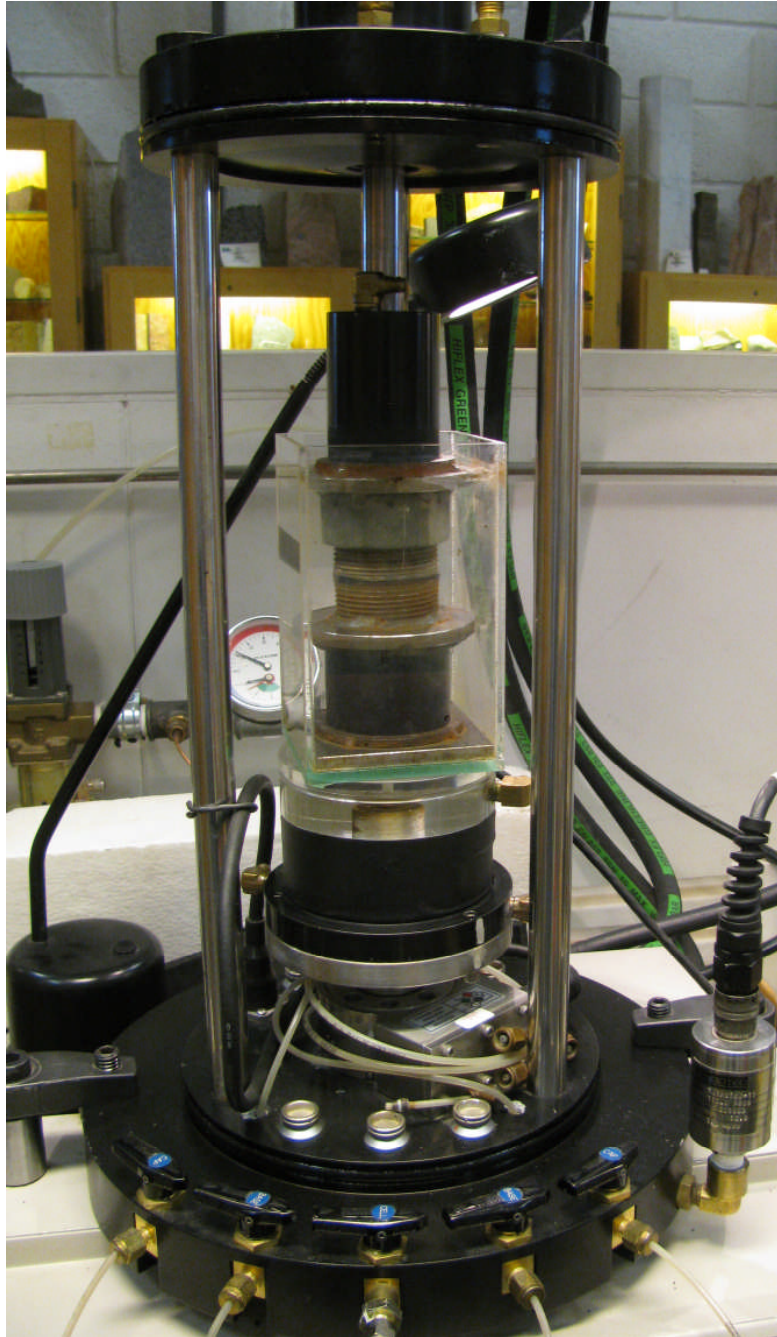
Í þessu verkefni voru reyndar tvær aðferðir til að meta viðloðun bindiefnis við steinefni. Önnur þeirra, sem kalla mætti skolpróf, líkir eftir sog- og þrýstiáhrifum þegar hjól fer yfir rennblautt slitlag. Þá myndast þrýstingur framan við hjólið og undir því, en sog fyrir aftan það um leið og snertingunni sleppir. Hin aðferðin byggist á notkun úthljóðs, og hana mætti kalla úthljóðspróf (ultrasonic method).

### 2.1 Skolpróf

Í skolprófinu er litlu sýni af grófu, bindiefnisblönduðu steinefni komið fyrir í stálhylki og vatni dælt í gegnum það með þrýstingi og sögi til skiptis. Með þessu móti er að vissu marki reynt að líkja eftir áhrifum umferðar á bindinginn milli steinefnis og bindiefnis. Prófunaraðferðina er ekki að finna í stöðlum svo vitað sé og ekki heldur í heimildum. Í stórum dráttum er prófunin á þessa leið:

Bindiefni er hrært saman við steinefni af stærðinni 9,5-12,5 mm. Þegar blandan er orðin köld eru 20-30 steinar (50-70 g) settir í stálhylki sem er hluti af prófunarbúnaðinum. Botn og lok stálhlykisins er gatað þannig að vatn getur flætt inn í stálhylkið og út úr því og leikið um sýnið. Undir stálhlykinu er komið fyrir hólki úr stífu gúmmí sem stendur á stálplötu. Þessum búnaði er komið fyrir í kassa úr gegnsæu plasti sem er opin að ofan. Kassinn er fylltur af vatni og settur í pressu sem getur gefið stillanlegt, sveiflandi álag ofan á stálhylkið og með tíðni sem hægt er að stilla. Mynd 2.1 sýnir búnaðinn og í viðauka I er sýnt frumstætt riss af stálhlykinu ásamt gúmmíhólknun og plastkassanum.





**Mynd 2.1.** Fyrirkomulag búnaðar í skolprófi. Plastkassi ásamt gúmmíhólk og stálhylki fyrir miðju myndarinnar.

Þegar gúmmíhólkurinn undir stálhylkinu pressast saman minnkar rúmmál hans, vatnið þrýstist út úr honum og upp í gegnum stálhylkið og skolar sýnið um leið. Þegar álaginu léttir réttist gúmmíhólkurinn upp, rúmmál rýmisins inni í honum eykst og hann sagnar inn í sig vatn. Með þessu móti sætir rýmið í stálhylkinu stöðugum þrýstingsbreytingum. Þrýstingssveiflan hefur ekki verið mæld en þrýstingurinn er með fullri vissu minni en venjulegur loftþrýstingur þegar hann er minnstur. Að prófinu loknu er þakning á hverjum einstökum steini í hylkinu metin.

Þessi aðferð er á tilraunastigi enn sem komið er, en nokkur afbrigði af henni hafa verið reynd. Sveiflutíðnin hefur ýmist verið 0,5, 1 eða 2 Hz, og slaglengdin í sveiflunni hefur ýmist verið 5 eða 8 mm. Hámarksálag í sveiflunni (ræðst af stífni gúmmíhólksins

og slaglengd) er 1700 N þegar slaglengdin er 5 mm en 2700 N þegar slaglengdin er 8 mm. Sveiflufjöldi í prófinu hefur verið valinn úr mjög breiðu bili, 5.000-120.000 sveiflur.

## 2.2 Úthljóðspróf

Þessi prófunaraðferð er þekkt úr heimildum. Einu afbrigði af henni er lýst í þýsku tímariti [Schmidt 1971] en hún hefur að því er virðist ekki náð fótfestu. Í prófinu er öflugum þrýstiöldum beint að sýninu sem eiga að líkja eftir miklum þrýstingsbreytingum sem slitlagið verður fyrir undir umferð.

Í stórum dráttum er prófuninni lýst þannig í áður nefndri grein að blanda úr fíngerðu steinefni (0,2-0,6 mm) og stífbiki (stungudýpt 80) hafi verið mulin niður í korn og 200 g sett í einföldu lagi í úthljóðsbað ásamt vatni, sem ýmist var eimað eða blandað mismunandi miklu af salti. Úthljóðsbaðið var haft í gangi í 15 mínútur í senn, samtals í eina klst en með 30 mín hvíld á milli til að kæla baðið. Magn bindiefnis sem losnaði var mælt. Í ljós kom að saltið jók losunina til muna en viðloðunarefni drógu úr henni.

Í þessu verkefni var brugðið nokkuð út af aðferðinni eins og henni er lýst í áður nefndri tímaritsgrein. Nánar tiltekið var prófið gert þannig:

Bindiefni er hrært saman við steinefni af stærðinni 9,5-12,5 mm. Þegar blandan er orðin köld eru 30-35 steinar (70-90 g af blöndu) settir í vírnettkörfu í einföldu lagi og körfunni komið þannig fyrir í baðinu að vatn kemst að steinunum öllum megin frá. Síðan er hreinu vatni hellt í úthljóðsbaðið þannig að fljóti vel yfir körfuna. Úthljóðsbaðið er síðan gangsett og látið ganga í tiltekinn tíma (oftast í nokkrum 30 mínútna áföngum). Að því búnu er virkarfan tekin upp og þakning metin á hverjum steini fyrir sig.



**Mynd 2.2.** Úthljóðsbað ásamt vírkörfu og nokkrum bindiefnisþöktum steinum. Á myndinni er ekkert vatn í baðinu.

Úthljóðsbaðið er af gerðinni Branson 1200, model B-1200 E1, 47 kHz og afköstin eru 30 W. Mynd 2.2 sýnir úthljóðsbaðið (án vatns) og vírkörfuna, ásamt fáeinum steinum.

### 2.3 Mat á þakningu

Við mat á þakningu reyndist best að taka steinana upp með flísatöng og velta þeim á kafi í vatni undir sterku ljósi (í einni heimild er mælt með flúrljósi). Þá kemur einna greinilegast fram hvað af yfirborði steinanna er þakið og hvað ekki. Steinunum er raðað í sex flokka eftir þakningu, í einn flokkinn eru settir steinar sem eru alþaktir (100 %) en annars spannar hver flokkur 20 %. Þakningarmeðaltal sýnisins er reiknað og tilgreint í 5 % þrepum. Þó er óvíst að svo mikil nákvæmni eigi rétt á sér, frekari athuganir á prófunaraðferðinni þarf til að skera úr um það.

## 3. NIÐURSTÖÐUR

Tvær gerðir sýna voru prófaðar. Í báðum gerðum var steinefnið frá Seljadal, á stærðabilinu 9,5-12,5 mm. Önnur gerðin (merkt sýni 1 í niðurstöðunum) var blanda af 30 g af vegolú og 1000 g af steinefni, án viðloðunarefnis og án forblöndunar með vatni eins og tíðkast í hrærsluprófi. Hin gerðin (merkt sýni 2) var blanda af 21,2 g af vegolú, 0,64 g Diamin HBG og 1000 g af steinefni sem áður hafði verið blandað 30 g af vatni. Bæði sýnin voru blönduð við stofuhita. Aðrar gerðir sýna en þessar tvær voru ekki prófaðar. Þakning var metin á sama hátt, óháð prófunaraðferð.

### 3.1 Skolpróf

Að loknum fáeinum byrjunartilraunum sem gerðar voru til að ná valdi á prófunaraðferðinni og ákveða ramma fyrir líklegar breytur í prófunarferlinu voru gerðar nokkrar kerfisbundnar tilraunir, þar sem sveiflutíðni, sveiflufjölda og slaglengd í sveiflu var breytt. Niðurstöðurnar eru birtar í töflu 3.1.

**Tafla 3.1.** Niðurstöður prófana með skolprófi. Þakningarbilið sýnir á hvaða bili þakning á einstökum steinum liggur.

Prófun nr.	Sýni, gerð	Sveiflu-tíðni, Hz	Sveiflu-fjöldi	Slaglengd, mm	Þakningarbíl, %	Meðalþakning, %
1	1	1	10.000	5	Óvíst	Óvíst
2	1	2	5.000	5	Óvíst	Óvíst
3	2	2	10.000	5	100	100
4	2	2	120.000	5	100	100
5	1	2	50.000	5	30-100	60
6	1*	1	50.000	5	10-50	30
7	1	0,5	50.000	8	10-30	15
8	1	2	50.000	8	10-50	20
9	2	2	50.000	8	50-90	65

\* Í þessari prófun var sett lítilræði (0,2 ml) af fljótandi sápu í sýnishylkið, ásamt sýninu.

Enda þótt bindiefnið flosni að hluta til af steinunum kemur ekkert bindiefni út úr sýnishylkinu með vatnsstraumnum. Svo er að sjá sem bindiefnið hlaupi frekar í hnökra á steinunum með eyðum á milli. Í lokinu á stálhylkinu má stundum finna bindiefnisdrefjar; verið getur að laust bindiefni lokist þar inni. Vatn í plastkassanum utan sýnishylkisins er nokkurn veginn tært að sjá að prófun lokinni og engin merki um bikþeytu-myndun.

Svo virðist sem vatnið flæði nokkurn veginn jafnt um allt sýnið, þakning á steinum er ekki háð staðsetningu þeirra í sýnishylkinu.

Vatnið sem umkringir sýnið hitnar lítið eitt meðan á prófun stendur. Í einni prófun, nr. 9, hitnaði það úr 20 °C í 27 °C á sjö klukkustundum. Umhverfishiti á þessu tímabili var 20-22 °C. Hvort þessi hitastigsbreyting hefur áhrif á þakninguna er óvíst, en sé hún einhver er líklegra en hitt að minnkandi seigja á bindiefninu verði til þess að það losni frekar af steinefninu.

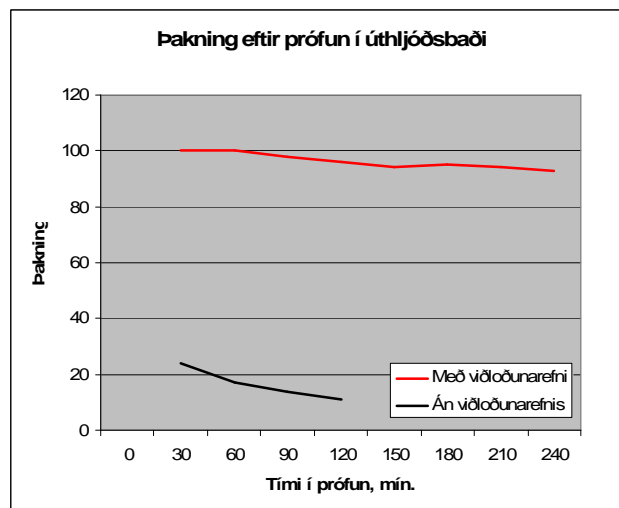
### 3.2 Úthljóðspróf

Í fyrstu voru gerðar nokkar byrjunartilraunir til að ná valdi á prófunaraðferðinni. Síðan voru gerðar fáeinar kerfisbundnar tilraunir. Niðurstöðurnar þeirra eru birtar í töflu 3.2.

**Tafla 3.2.** Niðurstöður prófana með úthljóðsprófi. Þakningarbilið sýnir á hvaða bili þakning á einstökum steinum liggur.

Prófun nr.	Sýnisgerð	Tími í baði, mín	Þakningarbil, %	Meðalþakning, %
1	1	100	10-30	10
2	2	300	10-50	30
3	2	0	70-100	95
4	2	240	70-100	95
5	1	0	30-70	50
6	1	120	10-30	10

Í prófun nr 4 og 6 var þakning sýnanna metin á 30 mínútna fresti. Mynd 3.1 sýnir hvernig þakningin breyttist með tíma í úthljóðsbaði (þakning sýnanna var ekki metin áður en prófun hófst). Myndin gefur til kynna að sýni sem er blandað viðloðunarefni haldi nokkurn veginn óbreyttri þakningu í fjórar klst að minnsta kosti í úthljóðsbaði, en þakningin minnki nokkuð hratt ef sýnið er án viðloðunarefnis.



**Mynd 3.1.** Þakning sýna, með og án viðloðunarefnis, sem fall af tíma í úthljóðsbaði. Þakningin var ekki metin áður en prófun hófst.

Bindiefni sem losnaði af steinefninu flaut upp á yfirborðið í stórum dropum en tvístraðist þar eftir stutta stund og hvarf. Vatnið í baðinu var tært í upphafi prófs en tók smám saman á sig brúnleitan lit sem getur bent til þess að bikþeyta hafi myndast í baðinu.

Hitastig í úthljóðsbaðinu var mælt af og til, að jafnaði hækkaði það um 3-4 °C á hverjum 30 mínútum sem baðið var í gangi. Vera má að hitunin hafi haft einhver áhrif á það hvort og hversu hratt bindiefnið losnaði af steinefninu, en um það er ekkert vitað.

#### 4. UMRÆÐA

Niðurstöðurnar sem hér hafa verið kynntar eru alltof takmarkaðar til að hægt sé að segja af eða á um það hvort önnur hvor prófunaraðferðanna eða báðar séu hæfar til að meta viðloðun milli bindiefnis og steinefnis. Enn sem komið er hefur þeim ekki verið beitt á repjúblandað bindiefni. Í rauninni eru athuganirnar svo skammt á veg komnar að þær geta ekki talist annað en forprófanir.

Meginkostur þessara tveggja prófunaraðferða er að steinarnir í sýninu nuddast ekki saman eins og óhjákvæmilega gerist í hrærsluprófi og rúlluflöskuprófi. Annar kostur við þær báðar er að steinar eru valdir í sýnið áður en prófun hefst, þ.e. meðan þeir eru þaktir bindiefni og þar með er útilokað val á steinum til mats á þakningu ráðist að einhverju leyti af þakningu á þeim líkt og getur hent þegar steinar í þakningarmatið eru valdir að prófi loknu. Hins vegar er það ótvíráður galli að þakningarmatið er huglægt og í núverandi mynd er það fremur ónákvæmt, en reyndar er sami annmarki einnig á hrærsluprófinu og rúlluflöskuprófinu.

Athuganir á nákvæmni þakningarmatsins hafa sýnt að hún er breytileg eftir því hver þakningin er, en nákvæmnin er einna best þegar þakningin er mjög lítil eða mjög mikil. Nákvæmnina er hægt að bæta með því að stækka úrtakið, þ.e. fjölga steinum sem eru skoðaðir. Í núverandi prófunarfyrirmælum er gert ráð fyrir að 20 steinar séu skoðaðir sem er lítið, en stærra úrtak eykur prófunarkostnaðinn. Þarna þarf að finna einhvern hagkvæman milliveg. Annað vandamál þessu skylt er áreiðanleiki þakningarmatsins. Þótt endurtekið mat á þakningu sýnis gefi svipaða eða sömu niðurstöðu og áður er ekki þar með sagt að þakningarmatið sé rétt, það getur verið bjagað vegna kerfisbundinnar skekkju, sem getur m.a. verið breytileg eftir því hver metur þakninguna. Slíkum skekkjum þarf helst að útrýma, til dæmis með því að bera saman við hlutlægt þakningarmat meðan á þjálfun matsmanna stendur. Hvort þessi skekkja er til staðar og hversu mikil hún þá er, er allsendis óljóst.

Íslensk steinefni eru yfirleitt mjög dökk og samlit bindiefninu sem gerir þakningarmatið erfiðara og ónákvæmara en á ljósum steinefnum eins og þeim sem eru víða notuð erlendis, enda hafa niðurstöður rannsókna á nákvæmni í þakningarmati gefið til kynna að hún sé lakari hérlendis en á hinum Norðurlöndunum [Steinefnanefnd, 1994]. Lausn á þessum ágalla getur þó verið handan við hornið; í Svíþjóð er unnið að því að þróa hlutlæga aðferð til að meta þakningu á steinefnum. Annar möguleiki er að nota punktatalningu líkt og þegar loft er talið í sýni af steinsteypu í smásjá. Þá er sýnið fært með færsluborði eftir ákveðnum línunum í fyrirfram ákveðnum áföngum og eftir hverja færslu er athugað hvort þráðkross í smásjanni lendir á loftbólunni í steypunni, efju eða steini. Svipaðan hátt mætti hafa á þakningarathugun á sýni af bindiefnishúðuðum steinum sem er raðað þétt saman á færsluborð. Þessi aðferð er lílega nokkuð tafsöm en hún gæti komið að góðu gagni sem viðmiðunaraðferð (gold standard) við þjálfun í notkun á huglægi en fljótlegari og ódýrari aðferð.

Ef prófunaraðferðirnar (skolpróf og úthljóðspróf) eru bornar saman er ljóst að skolprófið í núverandi mynd er miklu tímafrekara og þar af leiðandi dýrara en úthljóðsprófið. Skolpróf sem miðast við 50.000 sveiflur tekur um 7 klst fyrir utan undirbúning sýna og mat á þakningu (50.000 sveiflur svara til viku umferðar eða svo á fjölfarinni götu). Prófun í úthljóðsbaði er sennilega hægt að ljúka með viðunandi árangri á 1-2 klst, fyrir

utan undirbúning sýna og mat á þakningu. Þar að auki er búnaðurinn sem í þessu verkefni var notaður til að framleiða, stýra og skrá sveifluhreyfinguna í skolprófi (dynamiskur þrías) margfalt dýrari en úthljóðsbað og raunar ekkert því til fyrirstöðu að hafa mörg úthljóðspróf í gangi samtímis því þau þurfa mjög lítið pláss fyrir tækjabúnaðinn.

Hvað skolprófið varðar er sennilega kostur að hafa sýnið talsvert stærra, jafnvel tvöfalt stærra en hér er gert, en þá þarf að hanna prófunarbúnaðinn upp á nýtt, stækka prófunarhylkið að sama skapi og steypa stærri og líklega stífari gúmmihólk. Annað úrræði sem kemur til greina er að hanna og smíða vélbúnað sem getur dælt vatni í báðar áttir í gegnum prófunarhylki þannig að dælingin byggist á sögi og þrýstingi sem skiptir um stefnu allt að tvisvar eða þrisvar á sekúndu. Um leið væri æskilegt að gera ráðstafanir til að auka þrýstingsmismuninn í þrýsti- og sogfasanum. Þriðji möguleikinn er að nota háþrýstidælu sem skýtur með einhverjum hætti vatnsgusum á sýnið og flettir bindiefninu af því, væntanlega í mismiklum mæli eftir því hvað viðloðun bindiefnisins við steinefnið er góð. Galli á síðastnefnda úrræðinu er að þá tapast sogáhrifin sem eiga að líkja að hluta til eftir því sem gerist þegar hjólbarði á þungum bíl fer yfir rennblautt slitlag. Verði haldið áfram að þróa þetta próf þarf að þreifa sig áfram með mismunandi útfærslur og reyna þannig að nálgast þær sem eru líklegastar til að gefa viðunandi árangur.

Í báðum prófunaraðferðunum kemur til álita að blanda einhvers konar salti (matar-salti, matarsóða) eða jafnvel sápu í vatnið. Slík íblöndun er líkleg til að flýta fyrir prófuninni. Prófanir í úthljóðsbaði þar sem vatnið var blandað hálkuvannarsalti í misstórum skömmtum gáfu eindregið til kynna að með vaxandi saltstyrk í vatninu ykist magn bindiefnis sem losnaði frá steinefninu [Schmidt 1971].

Framanskráðar tillögur að breytingum á prófunaraðferðum eru bæði tímafrekar og dýrar í framkvæmd. Auk þess þarf að þrautreyna þá prófunaraðferð sem líklegust þykir til árangurs og bera niðurstöður prófananna saman við reynslu. Meðan þessu er ólokið er ótímabært að taka þessar prófunaraðferðir upp, með eða án breytinga, eða hafna þeim.

## 5. ÁLYKTANIR

- Þær tvær prófunaraðferðir, skolpróf og úthljóðspróf, sem kynntar eru í þessari skýrslu sýnast báðar geta komið til greina til að mæla viðloðun bindiefnis við steinefni.
- Athuganir á notagildi prófunaraðferðanna eru skammt á veg komnar og að svo stöddu er ekki ráðlegt að taka þær upp í stað hrærsluprófs eða rúlluflösku-prófs.
- Niðurstöður prófunaraðferðanna byggist á huglægu mati á þakningu. Matið eins og það er núna er ónákvæmt og þarfnast endurskoðunar.

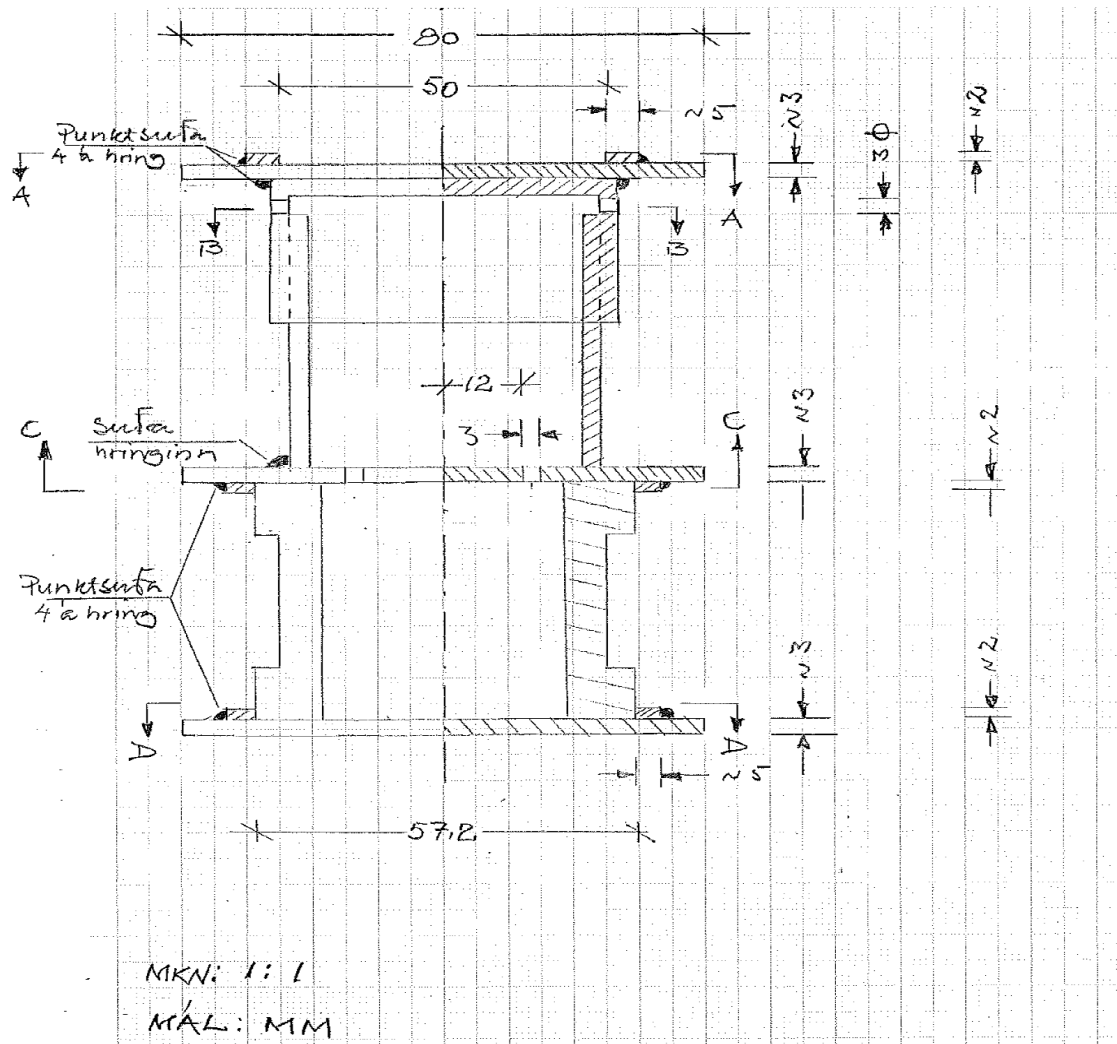
**HEIMILDIR**

- Kandhal, P. S., Rickards, I. J. *Premature Failure of Asphalt Overlays from Stripping: Case Histories*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70, 2001, bls. 301-351. The Association of Asphalt Paving Technologists, 2001.
- KemaNord. *Aminer för vägar*. KemaNord AB, division Specialkemi. Stockholm, án ártals.
- Lemminkäinen. *Asphalt Durability*. Sótt 2011-04-19 á:  
<http://www.sintef.no/units/civil/vs/VV/Pro/Durability/Erfaringer%20fra%20Finland.pdf>  
Án ártals.
- Santucci, L. *Pavement Technology Update*. Technology Transfer Program, Vol. 2, No. 2, 2010. Berkeley, California.
- Schmidt, J., Schniering, A. *Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel auf Mineralstoffen bei hydrodynamischer Beanspruchung und deren Prüfung mit Ultraschall in Tau-salzlösungen*. Strasse und Autobahn, 12/1971, bls. 550-554.
- Solaimanian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M., Tandon, V. *Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements*. Í: Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements. A National Seminar. Transportation Research Board, Washington 2003.
- Steinefnanefnd. *Steinefni í bundin slitlög*. Viðloðunarpróf. Steinefnanefnd, Reykjavík, 1994.

## VIÐAUKI

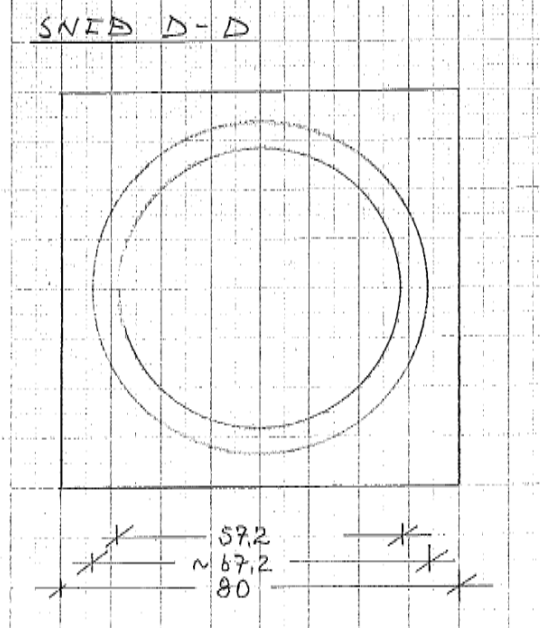
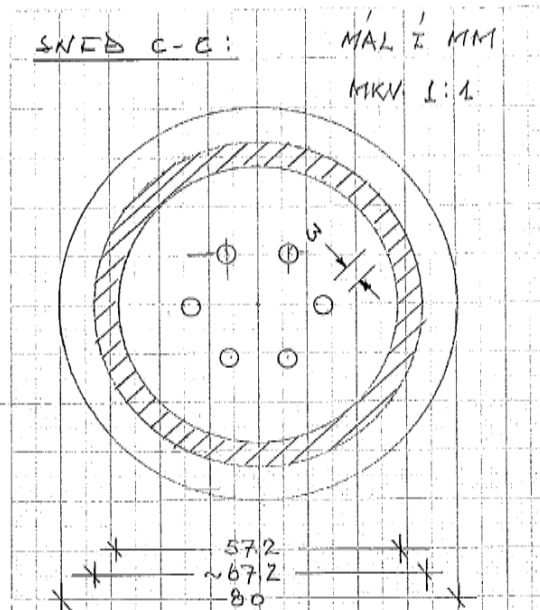
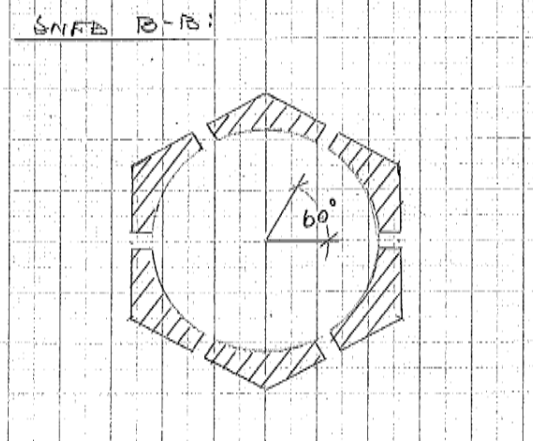
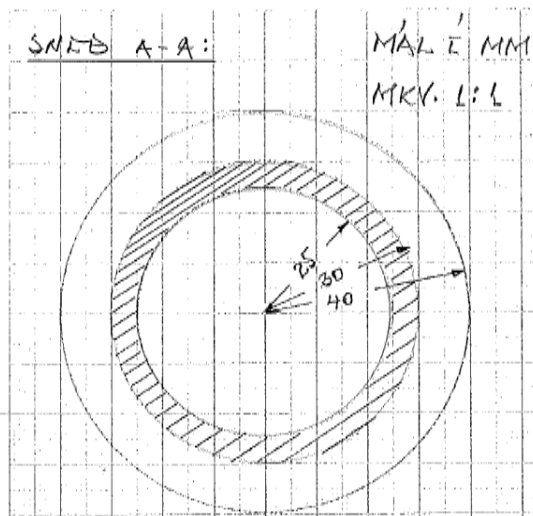
## Frumdrög að smíðateikningum af mælibúnaði fyrir skolpróf.

**Blað 1.** Yfirlitsskissa að prófunarhylki (efri hluti) og gúmmíhólk (neðri hluti). Skissan er minnkuð frá upprunalegri stærð svo að mælikvarðinn á myndinni er ekki 1:1.





**Blað 2.** Skissur að sniðum á blaði 1. Skissurnar eru minnkaðar frá upprunalegri stærð svo að mælikvarðinn á myndinni er ekki 1:1.



**Blað 3.** Skissa að plastkassa. Skissan er minnkuð frá upprunalegri stærð svo að mælikvarðinn á myndinni er ekki 1:1.

