



Prófun og hönnun á lofttæmiseinangraðri hitaveitupípu

Atli Steinn Friðbjörnsson

Lokaverkefni í vél- og orkutæknifræði BSc

2014

Höfundur: Atli Steinn Friðbjörnsson

Kennitala: 221179-3909

Leiðbeinendur: Indriði Sævar Ríkharðsson og Guðni A. Jóhannesson

Tækni- og verkfræðideild

School of Science and Engineering



Tækni- og verkfræðideild

Heiti verkefnis:

Prófun og hönnun á lofttæmiseinangraðri hitaveitupípu

Námsbraut:

Vél- og orkutæknifræði BSc

Tegund verkefnis:

Lokaverkefni í tæknifræði BSc

Önn:

Haut 2014

Námskeið:

Lokaverkefni

Ágrip:

Markmið verkefnisins var að gera prófanir á því hvaða áhrif lofttæmi hefur á varmaleiðni-stuðul steinullar. Einnig var hönnuð hitaveitupípa með lofttæmdri steinull sem einangrun. Hönnun var byggð á niðurstöðum úr prófunum. Að lokum voru gerðar varma- og spennugreiningar í ANSYS til að ganga úr skugga um að hönnun standist þær áraunir sem krafist er af hitaveitupípum.

Niðurstöður úr prófunum sýndu að með því að lofttæma steinull er hægt að minnka varmaleiðni hennar ferfalt. Greining á hönnun sýnir að lenging pípunar er töluvert minni en á þeim pípum sem í boði eru á markaðnum í dag.

Höfundur:

Atli Steinn Friðbjörnsson

Umsjónarkennari:

Indriði Sævar Ríkharðsson

Leiðbeinandi:

Indriði Sævar Ríkharðsson og
Guðni A. Jóhannesson

Fyrirtæki/stofnun:

Háskólinn í Reykjavík

Dagsetning:

3.12.2014

Lykilorð íslensk:

Lofttæmiseinangrun
Varmagreining
Spennugreining

Lykilorð ensk:

Vacuum insulation
Thermal analysis
Stress analysis

Dreifing:

opin

lokuð

til:

Formáli

Verkefni þetta er unnið sem lokaverkefni í vél- og orkutæknifræði við Háskólann í Reykavík. Hugmyndina að verkefninu á Guðni A. Jóhannesson orkumálastjóri. Verkefnið snýst um það að gera rannsóknir og prófanir á nýrri gerð hitaveituröra, gera frumhönnun og bera saman niðurstöður við vörur sem í boði eru í dag.

Ég vil þakka leiðbeinendum mínum, þeim Indriða Sævari Ríkharðssyni og Guðna A. Jóhannessyni, fyrir þeirra aðstoð við þetta verkefni. Einnig vil ég þakka fyrirtækjunum Set ehf., Steinull hf., og Stjörnuþróun ehf. fyrir þær gjafir sem þau veittu til úrlausnar verkefnisins.

Atli Steinn Friðbjörnsson

Undirskrift

Staður og dagssetning



Ágrip

Markmið verkefnisins var að gera prófanir á því hvaða áhrif lofttæmi hefur á varmaleiðni-
stuðul steinullar. Einnig var hönnuð hitaveitupípa með lofttæmdri steinull sem einangrun.
Hönnun var byggð á niðurstöðum úr prófunum. Að lokum voru gerðar varma- og spennu-
greiningar í ANSYS til að ganga úr skugga um að hönnun standist þær áraunir sem krafist
er af hitaveitupípum.

Niðurstöður úr prófunum sýndu að með því að lofttæma steinull er hægt að minnka varma-
leiðni hennar ferfalt. Greining á hönnun sýnir að lenging pípunar er töluvert minni en á þeim
pípum sem í boði eru á markaðnum í dag.



Efnisyfirlit

Formáli	i
Ágrip	ii
1 Inngangur	1
2 Bakgrunnur	1
2.1 Sagan	1
2.2 Lofttæmiseinangrunarplötur	2
2.3 Hitaveiturör	3
3 Fræðin	5
3.1 Varmaflutningur	5
3.1.1 Varmaleiðni	5
3.1.2 Varmaburður	6
3.1.3 Varmageislun	7
3.1.4 Varmaflutningur í gegnum hringlaga þversnið	7
3.2 Hitapensla	10
3.3 Burðarþol	10
3.4 Efnisfræði	12
3.5 Óvissa í mælingum	12
4 Hönnun, prófun og greining	12
4.1 Hönnun prófunarpípu	12
4.2 Smíði prófunarpípu	14
4.3 Prófanir	17
4.3.1 Búnaður	17
4.3.2 Prófun 1	19
4.3.3 Prófun 2	19
4.3.4 Prófun 3	20
4.3.5 Niðurstöður prófana	21
4.3.6 Varmagreining	21
4.4 Hönnun og greining á raunverulegri pípu	23
4.4.1 Hönnun	23
4.4.2 Niðurstöður hönnunar	31
5 Samantekt og umræður	31
Heimildir	33



Viðauki	34
Viðauki A	34
Viðauki B	35
Viðauki C	38
Viðauki D	40
Viðauki E	43
Viðauki F	47
Viðauki G	50

Myndaskrá

1	Dewar flaska [1]	2
2	Einangrunarplata frá va-Q-tec [2]	2
3	Pípa einangruð með steinull [3]	3
4	Úreðpan einangruð stálrör [4]	4
5	Pípu stillt upp á planka á skurðbakka [5]	4
6	Dæmigerður frágangur í jörð [5]	5
7	Varmaleiðni í gegnum efnislag [6]	6
8	Varmaburður frá yfirborði til vökva á hreyfingu [6]	6
9	Varmageislun [6]	7
10	Varmaburður um útvegg sívalnings [5]	8
11	Varmaviðnám í samsettu þversniði [6]	9
12	Prófunarpípa	14
13	Hér er ytra rörið komið yfir einangrunina	15
14	Vatnsinntak pípunnar	15
15	Vatnsúttak pípunnar	16
16	Pípan tilbúin	16
17	Síriti og nemi	18
18	Hitamælir með nál	18
19	Skjámynd af hugbúnaði	19
20	Fyrsta uppstilling	20
21	Önnur uppstilling	20
22	Greining á varmaflæði	22
23	Greining á varmaflæði	22
24	Spennur	25
25	Spennur innan í pípu	25
26	Samsetning með trekt	26
27	Hitastigsdreifing á pípuenda	27
28	Varmaflæði á enda pípu	28
29	Spennur á pípuenda	28
30	Lenging pípu	29
31	Rifflaður rörendi	30
32	Spennur í riffluðum pípuenda	30

Töfluskra

1	Mæld gildi við prófanir og reiknaður varmaleiðnistuðull	21
---	---	----



1 Inngangur

Nú á dögum er gerð mikil krafa um góða orkunýtingu. Því skiptir miklu máli að varmaorkan sem við nýtum úr jarðhitageyminum komist til neytenda án þess að mikið varmatap til umhverfisins eigi sér stað. Einnig kallar nútímasamfélagið alltaf meira á arðbærni framkvæmda, því er ekki úr vegi að leita aðferða til að minnka kostnað við framkvæmdir. Markmið þessa verkefnis er að þróa nýja gerð af hitaveituröri sem hefur betra einangrunargildi en þær tegundir hitaveiturora sem notast er við í dag. Ætlunin er að hanna pípu sem er gerð úr tveimur rörum hvort innan í öðru. Milli röra verður lofttæmt hólf með samþjappaðri steinull. Með því að loftæma hólfíð á milli röra er mögulega hægt að auka einangrunargildið ferfallt ef ekki fimmfallt. Með því að auka einangrunargildið er hægt að minnka efnisnotkun og þar af leiðandi kostnað verulega.

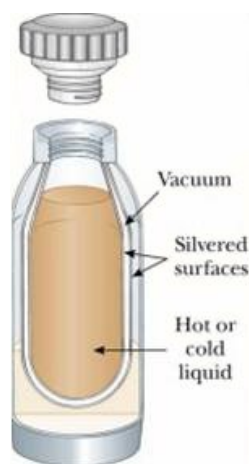
Einnig er hugmyndin sú að ytra rörið sé úr stáli og geti því borið þyngd pípunnar og jarðhitavökvans. Innra rörið getur þá verið mun þynnra og úr tæringaþolnara efni. Vegna þessarar tilhögunar skapast sá kostur að varmaþensla ytra rörsins verður mun minni og því þarf ekki að útbúa eins marga þensluhlykki á lögnina. Með því sparast töluverður efniskostnaður því við hvern þensluhlykk þarf að nota tvær til fjórar beygjur. Einnig er vinna við að koma þensluhlykkjum fyrir mun dýrari á hvern meter lagningar heldur en ef lögnin væri því sem næst lögð bein. Þar sem hólfíð milli ytra og innra rörs þarf að vera algjörlega loftþétt þarf að loka hólfinu með ásoðnum lokum úr málm. Við það myndast kuldabryr á endum pípunnar þar sem lokið skapar tengingu frá innra röri til þess ytra. Með aukinni rörlengd verða áhrif þessara kuldabryra hlufallslega minni.

2 Bakgrunnur

2.1 Sagan

Sú aðferð að nota lofttæmt rými sem einangrun hefur verið þekkt í langan tíma. Dewar flaskan sem við þekkjum í dag sem hitabúsa var til að mynda fundin upp árið 1892 af Sir James Dewar, sjá mynd 1. Brúsinn er byggður upp þannig að stærri flaska er sett utan um minni flösku. Á milli flasknanna er lofttæmt rými sem kemur í veg fyrir varmaleiðni og varmaburð. Þar sem það eru engar efniseindir í rýminu sem geta flutt varmann á milli yfirborða. Þá er aðeins varmageislun sem flytur varmann á milli yfirborða en hana má minnka verulega með því að silfurhúða innra yfirborð flasknanna [7].





Mynd 1: Dewar flaska [1]

2.2 Lofttæmiseinangrunarplötur

Í byggingariðnaðinum í dag er farið að notast við lofttæmiseinangrunarplötur (en. Vacuum insulated panel) í meira mæli. Þessi gerð platna á sér einnig nokkuð langa sögu en fyrsta einkaleyfi fyrir svona plötu var veitt árið 1930 en sú gerð var klædd að utan með gúmmíefni [8]. Árið 1963 var veitt einkaleyfi fyrir svipaðri gerð og við þekkjum í dag. Í þeirri gerð er notast við nano-porous efni sem kjarnaefni sem er svo lofttæmt [8]. Með því að lofttæma kjarnaefnið er hægt að minnka kjarnaefnið allt að fimmfalt [9]. Þessi aðferð er þó alls ekki vandamálum óháð, því gúmmí- og plastefni eru ekki nægilega loftþétt til að halda lofttæminu viðvarandi. Þannig tapast eiginleiki plötunnar til einangrunar, varmaleiðnistuðull hækkar verulega og ávinningurinn nær enginn. Helst þarf að loka plötunum með einhverskonar málm til að plöturnar verði loftþéttar, þá hinsvegar skapast kuldabré á samkeytum og við enda platnanna sem verður til þess að ávinningurinn verður lítil sem enginn. Á síðustu árum hefur þó verið töluverð þróun á því efni sem er notað til að klæða kjarnaefnið með og einnig hvernig gengið er frá endum plötunnar. Gegndræpi mun þó alltaf eiga sér stað ef um plastefni er að ræða, því er líftími þessara platna takmarkaður [9]. Á mynd 2 má sjá lofttæmiseinangrunarplötu frá Va-Q-tec sem er klædd að utan með álfilmu. Hvað varðar pípuna sem um verður fjallað hér, þá eru kuldabréyr sem skapast vegna lokunar lofttæmisrýmisins til endanna mjög takmarkaður hluti af heildaryfirborði pípunnar.



Mynd 2: Einangrunarplata frá va-Q-tec [2]

2.3 Hitaveiturör

Hér á landi er aðallega notast við þrjár gerðir af lögnum fyrir dreifingu heits vatns, það er pípa ofanjarðar einangruð með steinull og klædd með blikki eða áli, sjá má dæmigerðan frágang á steinull á mynd 3, pípa ofanjarðar einangruð með pólýúrepan einangrun með plasthlífðarkápu úr pólýepelíni, sjá mynd 4. Að lokum er sama gerð en niðurgráfin sem er hvað algengust hér á landi [10].



Mynd 3: Pípa einangruð með steinull [3]

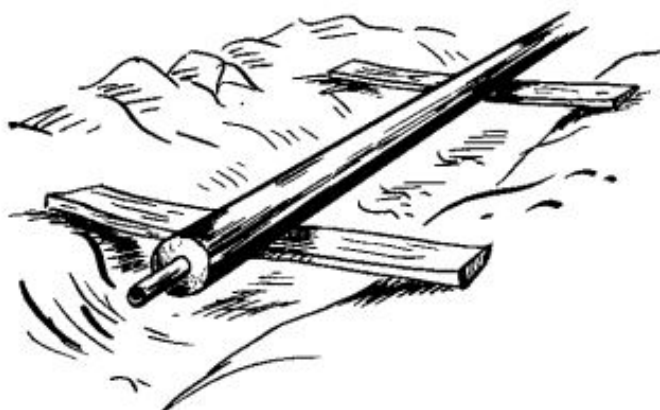
Pípa ofanjarðar einangruð með steinull er helst notuð í gufuaðveitulagnir við jarðvarmavirkjanir en er þó að einhverju leiti notuð við dreifingu hitaveituvatns. Til að mynda er Nesjavallaæðin að miklu leiti til lögð ofanjarðar og einangruð með steinullarstöfum. Einnig má nefna aðveitulögn frá Deildartunguhver í Borgarfirði og svo má lengi telja. Þegar þessi aðferð er notuð þarf að leggja pípu á undirstöður smíðaðar úr stáli og þá myndast kuldabré í gegnum undirstöðuna. Pípunar eru oftast einangraðar með steinull sem er með eðlis- massa upp á $150\text{kg}/\text{m}^3$ og með varmaleiðnistuðulinn $0,033 - 0,053\text{W}/\text{mK}$ [3]. Að leggja pípu ofanjarðar hefur þann kost í för með sér. Það er að pípan hefur meiri sveigjanleika til þenslu þar sem undirstöður pípunnar eru hannaðar þannig að pípan rennur til á sleða ofan á undirstöðunni. Gufuaðveitupípur eru jafnan lagðar á þennan hátt vegna mikillar færslu af völdum hitaþenslu, en gufan í virkjunum hér á landi er yfirleitt í kringum 180°C þannig að breyting á hitastigi pípunnar er um það bil $160 - 170^\circ\text{C}$ eftir að gufunni er hleypt á pípu.

Algengasta aðferðin í dag er að leggja pólýúrepan einangruð stálrör í jörðu. Við þá aðferð skapast engin kuldabré frá pípu. Pípan er jafnan lögð ofan á planku sem liggja þvert yfir skurðinn og soðin saman þar, eins og sést á mynd 5. Því næst er einangrað yfir



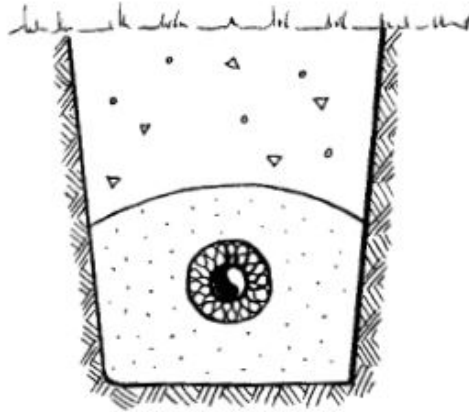
Mynd 4: Úrepan einangruð stálrör [4]

suðusamskeyti og að lokum er pípan hífð ofan í skurðinn með gröfu eða litlum krana. Þetta er frekar einföld og þægileg leið til að leggja pípu. Stærri pípur þarf þó að setja saman á skurðbotninum. Sjaldan er þó notast við svo stórar pípur hér á landi. Hitapol einangrunarinnar er þó ekki nema $149^{\circ}C$ og því ekki hentug til notkunar fyrir gufu. Varmaleiðni einangrunarinnar er $0,028W/mK$. Þessi rör eru framleidd hér á landi og er hægt að fá þau bæði í 6 metra og 12 metra lengjum. Einnig er boðið uppá foreinangruð tengistykki [4].



Mynd 5: Pípu stillt upp á planka á skurðbakka [5]

Við lagningu pípu í jörð fylgir alltaf töluverð jarðvinna þar sem pípan þarf að liggja á sléttum sandpúða. Einnig þarf $15cm$ sandlag þarf að umlykja pípuna. Að lokum er $55cm$ lag af grófari jarðvegi ofan á sandpúðanum, sjá mynd 6.



Mynd 6: Dæmigerður frágangur í jörð [5]

3 Fræðin

3.1 Varmaflutningur

Varmaflutningur getur átt sér stað með þrennskonar hætti, það er varmaleiðni (en. conduction), varmaburður (en. convection) og varmageislun (en. radiation). Í þessu verkefni verður áhersla lögð að mestu á varmaleiðni því þar kemur svokallað λ -gildi inn í reikningana. Til að hindra varmaflutning í gegnum efni er mikilvægt að þetta gildi sé sem lægst, en markmið verkefnissins er að lágmarka λ -gildið.

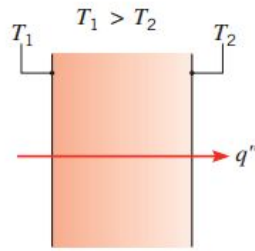
3.1.1 Varmaleiðni

Varmaleiðni á sér stað þannig að ef hitastigsmunur er á milli tveggja yfirborða fasts efnis eða kyrrs vökva mun varmi flytjast frá heitara yfirborði til þess kaldara. Sameindir efnisins flytja varmann á milli sín þar sem heitari og því orkumeiri sameindir rekast á kaldari orkuminni sameindir og flytja þannig varmann á milli yfirborða. Eiginleiki efna til varmaleiðni er mismunandi og eru þau efni sem hafa háan varmaleiðnistuðul (λ) kölluð leiðarar og þau sem hafa lágt λ -gildi kölluð einangrarar. Varmaleiðnistuðullinn segir okkur hversu mörg wött efnið getur flutt á hvern meter þykktar efnis og einnar gráðu mismun á hitastigi, sem útleggst W/mK . Varmaleiðni í gegnum efnislag má sjá á mynd 7.

Varmastreymi í gegnum efnislag reiknast þannig:

$$q'' = -\lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (1)$$

Þar sem q'' er varmastreymi á hvern fermeter yfirborðs, λ er varmaleiðnistuðull, T_1 og T_2 eru hitastig við yfirborð efnislagsins og L er þykkt efnislagsins.



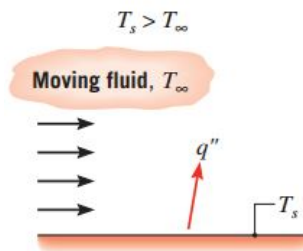
Mynd 7: Varmaleiðni í gegnum efnislag [6]

Til að fá heildarvarmastreymi margföldum við einfaldlega yfirborðsflatarmálið við q'' .

$$q = A \cdot q'' \quad (2)$$

3.1.2 Varmaburður

Varmaburður er þegar varmi flyst frá heitu yfirborði yfir í vökva eða gas á hreyfingu meðfram yfirborðinu og öfugt. Varmaburður samanstendur af tveimur fyrirbærum, það er varmaleiðni og aðstreymi. Til dæmis þegar við hitum upp ofn með heitu vatni fáum við varmaflutning frá vatninu inn í stálið sem ofninn er gerður úr. Þá tekur við varmaleiðni í gegnum stálið, yfirborð ofnsins hitnar og þar af leiðandi hitnar loftið og stígur upp og ber með sér varmann frá sem upphaflega var í vatninu. Vökvar og gös hafa mismunandi eiginleika til að bera varma. Þessum eiginleika er lýst með h -stuðli. Sá stuðull er háður breytingum á hraða og hitastigi vökvans eða gassins. Stuðullinn segir okkur hvað er hægt að bera mörg wött frá vökva eða gasi yfir á hvern fermeter fasts efnis á hverja gráðu hitastigs og útleggst W/m^2K . Lýsingu á varmaburði má sjá á mynd 8.



Mynd 8: Varmaburður frá yfirborði til vökva á hreyfingu [6]

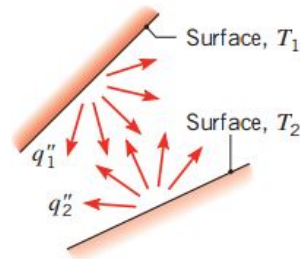
Varmaburður reiknast þannig:

$$q'' = h(T_{\infty} - T_s) \quad (3)$$

Þar sem h er varmaburðarstuðull, T_{∞} er hitastig vökvans. T_s er hitastig yfirborðsins.

3.1.3 Varmageislun

Varmaflutningur getur einnig átt sér stað með varmageislun þar sem varmi berst með rafsegulbylgjum frá einu yfirborði til annars. Varmaflutningur með varmaleiðni og varmaburði krefst einhvers miðils til að flytja varmann á meðan geislun krefst þess ekki, heldur virkar geislun best í lofttæmi. Yfirborð efna hafa misgóða eiginleika til varmageislunar. Þeim eiginleika er lýst með eðlisgeislun ε sem getur verið frá núlli og upp í einn. Lýsingu á varmageislun má sjá á mynd 9.



Mynd 9: Varmageislun [6]

Varmageislun reiknast þannig:

$$q'' = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (4)$$

Þar sem ε er eðlisgeislun yfirborðsins, σ er Stefan Boltzmann fastinn ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), T_s er hitastig yfirborðsins og T_{sur} er hitastig umhverfisins.

3.1.4 Varmaflutningur í gegnum hringlaga þversnið

Varmaflutningur í hringlaga þversniði er frábrugðinn varmaflutningi í gegnum flatan vegg að því leiti að hitastig er ekki línulegt í gegnum efnið í hringlaga þversniði. Heldur er það lógarípmískt.

Varmaflutningi með varmaleiðni er lýst þannig:

$$q = -\lambda A \frac{dT}{dr} = -\lambda(2\pi r L) \frac{dT}{dr} \quad (5)$$

Þar sem r er radíus þess yfirborðs er fjallað er um.

Hitastigi sem falli af radíus er lýst þannig:

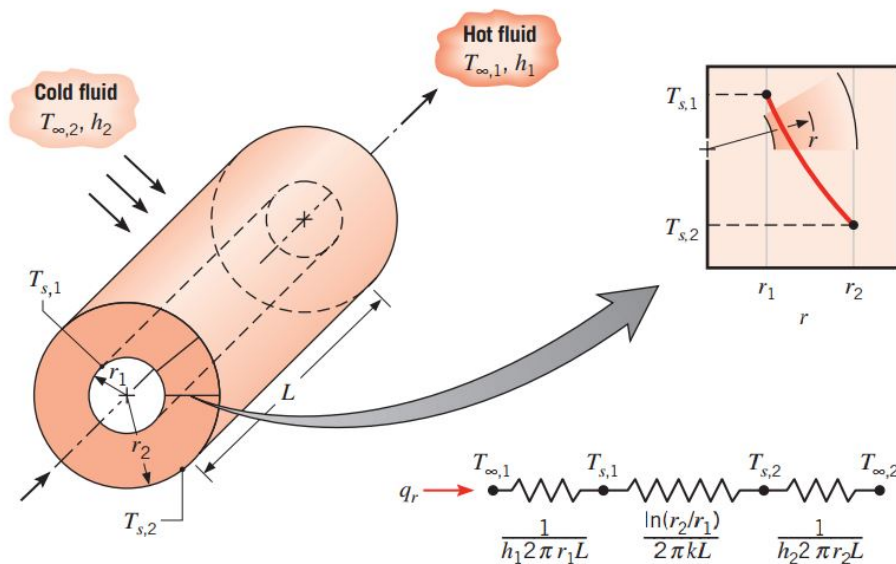
$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln(r_1/r_2)} \ln(r/r_2) + T_{s,2} \quad (6)$$

Þar sem $T_{s,1}$ og $T_{s,2}$ eru yfirborðshitastig flatanna.

Ef við setjum svo jöfnu 6 inn í jöfnu 5 þá fáum við.

$$q = \frac{2\pi L\lambda(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (7)$$

Yfirleitt er þó ekki bara varmaleiðni sem orsakar varmaflutning. Heldur þarf að taka varmaburð með inn í reikninga og þá er best að setja upp varmaviðnámsrás eins og sýnd er á mynd 10 á myndinni er k notað í staðin fyrir λ .



Mynd 10: Varmaburður um útvegg sívalnings [5]

Varmaviðnám við varmaleiðni er lýst þannig:

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L\lambda} \quad (8)$$

Og vegna varmaburðar:

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} = \frac{1}{h2\pi rL} \quad (9)$$

Varmaviðnámsrásin er raðtengd og því eru viðnámin lögð saman til að mynda heildar varma-
viðnám R_{tot} . Ef við skoðum samsett þversnið, líkt og á mynd 11, þá er það sama uppi á ten-
gingnum þar, það er að viðnám mismunandi efna er lagt saman til að fá heildarviðnám.

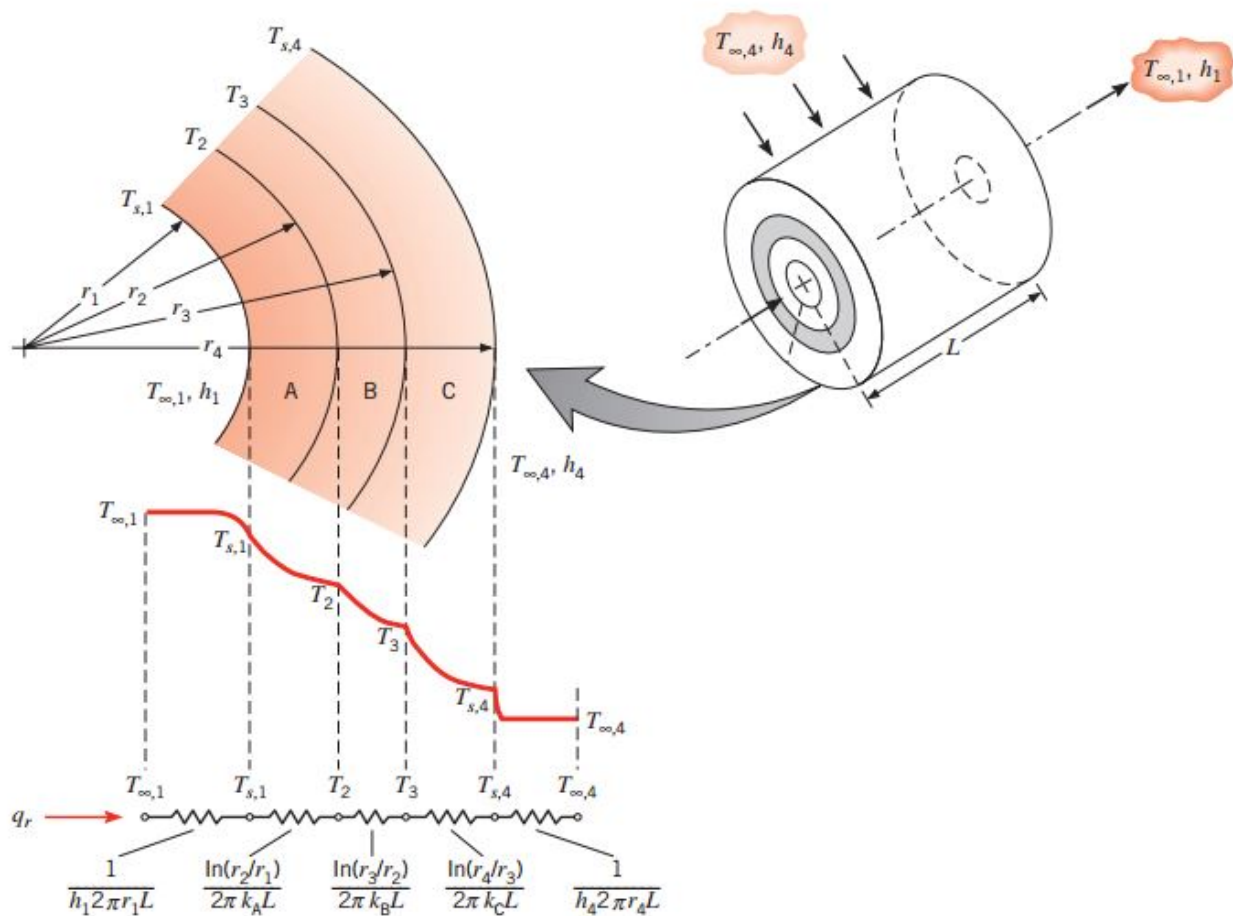
Í þessu verkefni er pípan samsett úr innra röri, einangrun og svo ytra röri, þá reiknast heildar-
varmaviðnámsrásin:

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \lambda_{st} L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \lambda_{ein} L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi \lambda_{st} L} + \frac{1}{h_4 2\pi r_4 L} \quad (10)$$

Til að reikna varmaflutning út úr pípunni notum við eftirfarandi:

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} \quad (11)$$

Þar sem T_{∞} er umhverfishitastig á þeim stað sem skilgreindur er með númeri, sjá mynd 11.



Mynd 11: Varmaviðnám í samsettu þversniði [6]

3.2 Hitapensla

Efni þenjast út og skreppa saman með breyttu hitastigi. Við aukinn hita fara sameindir efnanna að hreyfast hraðar og árekstrar á milli þeirra verða umfangsmeiri og taka meira pláss og því eykst rúmmál efnissins. Þó eru ekki öll efni sem þenjast út en öll föst efni gera það. Í þessu verkefni verður aðeins horft á lengingarþátt þenslunnar, það er línulega hitapenslu. Til að geta reiknað hana út þurfum við að vita hitaþanstuðulinn α . Hann segir okkur hvað efnið getur lengst um marga metra á hvern meter efnis við hverja gráðu í hitastigsmun og er útlistaður þannig $m/m^\circ C$. Í raun stýttast metrarnir út úr einingunni og því er þá eftir $1/^\circ C$ eða $^\circ C^{-1}$.

Þanstuðullinn er ákvarðaður út frá mælingum og reiknast þannig:

$$\alpha = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (12)$$

Þá getum við reiknað út línulega þenslu út frá jöfnu 13

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (13)$$

Þar sem ΔL er breyting á lengd, L er upprunaleg lengd efnisins, α er hitaþanstuðull og ΔT er breyting á hitastigi.

3.3 Burðarþol

Til að vita hvort pípan þolir það álag sem sett er á hana þarf að gera burðarþolsreikninga og þarf því að gera grein fyrir hvaða kraftar eru að verka á pípuna. Þar sem pípan er að jafnaði ekki að taka á sig neitt utanaðkomandi álag þá er það eiginþyngd pípunnar og þess vökva sem hún þarf að bera sem þarf að reikna með. Álagið er því jafndreift yfir alla pípuna. Innra rörið er, eins og hugmyndin er nú, innspennt í báða enda, það er að rörið er fast í allar frelsisgráður. Ytra rörið verður að meðhöndla þannig að það liggur á einföldum undirstöðum til beggja enda.

Þversnið hafa mismunandi tregðu til aflögunar sem er hægt að reikna út á einfaldan hátt og nefnist tregðuvægi (I). Fyrir rör er það reiknað þannig:

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} \quad (14)$$

Þar sem D er ytra þvermál rörsins og d er innra þvermál rörsins.

Krafturinn sem verkar á kerfið reiknast út frá öðru lögmáli Newtons $F = m \cdot a$. Þar sem kerfið er stítt er eina hröðunin þyngdarhröðun jarðar ($g = 9.81m/s^2$). Einnig þarf að ákvarða hversu mörg Newton verka á hvern meter þípunnar (N/m), sem er reiknað þannig:

$$F = \frac{m \cdot g}{L} \quad (15)$$

Þar sem m er heildar massi þípunnar og g er þyngdarhröðun jarðar.

Mesta beygjuvægi innspennts bita má svo reikna þannig:

$$M = \frac{F \cdot L^2}{12} \quad (16)$$

Og mesta niðurbeygja innspennts bita er reiknuð þannig:

$$u_{max} = \frac{F \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (17)$$

Þar sem E er fjaðurstuðull efnisins.

Fyrir einfalt undirstuddan bita er mesta beygjuvægi reiknað þannig:

$$M = \frac{F \cdot L^2}{8} \quad (18)$$

Og mesta niðurbeygja reiknast:

$$u_{max} = \frac{5 \cdot F \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (19)$$

Normalspenna er svo reiknuð þannig:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad (20)$$

Þar sem y er fjarlægðin frá massamiðju bitans.

Og skerspenna er reiknuð þannig:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (21)$$



3.4 Efnisfræði

Þegar efni er valið þarf að gæta þess að það þoli þær aðstæður sem það mun vera notað í. Í þessu tilfalli þarf að gæta þess að efnið hafi nægjanlegt tæringarþol og að efnið sé líka nógu sterkt til að bera þungann sem lagt er á það. Einnig þarf að hafa í huga að betra er að hitaþanstuðullinn sé eins lágur og auðið er.

Engin plastefni eru á listanum yfir brúkleg efni þar sem þetta þarf allt saman að vera loftþétt og það er alltaf eitthvað sveimi gass í gegnum plast og því tapast eiginleikarnir með tímanum [9]. Þess vegna koma aðeins málmtegundir til greina. Plastefni koma þó til greina sem hlífðarkápa yfir einangrun á suðusamskeytum.

Í ytra rörið er líklegast best að notast við svart stál þar sem engin þörf er á tæringarþolnara efni og því er það óþarflega dýrt að nota ryðfrítt stál. Í innra rörið kæmi til greina að nota ryðfrítt stál til að fá eiginleika á borð við tæringarþol og styrk. Ryðfrítt stál hefur þó hærri hitaþanstuðul en venjulegt stál [11], svo það kemur vel til greina að nota venjulegt stál. Svo það er að mörgu að huga þegar velja skal efni.

3.5 Óvissa í mælingum

Þegar prófanir eru gerðar er alltaf einhver óvissa er varðar nákvæmni mælinga. Öll viðurkennd mælitæki hafa skráða skekkju, til dæmis rennimál er yfirleitt gefið upp með skekkju upp á $\Delta x = 0,05mm$.

Til að reikna mestu fræðilegu óvissu er notuð eftirfarandi jafna:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\delta f}{\delta x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta y} \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta z} \Delta z\right)^2} \quad (22)$$

Þar sem f er það fall sem verið er að meta óvissuna á og x, y, z eru þær breytur sem fallið er byggt á.

4 Hönnun, prófun og greining

Hönnuð var prófunarpípa til að geta ákvarðað varmaleiðnistuðulinn. Einnig var hönnuð pípa eins og hún yrði í raunveruleikanum byggð á gildum fengnum úr prófunum á prófunarpípunni.

4.1 Hönnun prófunarpípu

Til að ákvarða hversu hár varmaleiðnistuðullinn yrði, þurfti að hanna og smíða pípu til prófana.

Við hönnun pípunnar var farið eftir eftirfarandi forsendum:

- Að hitastig vatnsins sé mælanlegt.
- Að rennsli vatns í gegnum innra rör sé stýranlegt.
- Að rými milli innra og ytra rörs sé algjörlega loftþétt.
- Að rými milli innra og ytra rörs sé lofttæmanlegt.
- Að loftþrýstingur á milli röra sé mælanlegur.

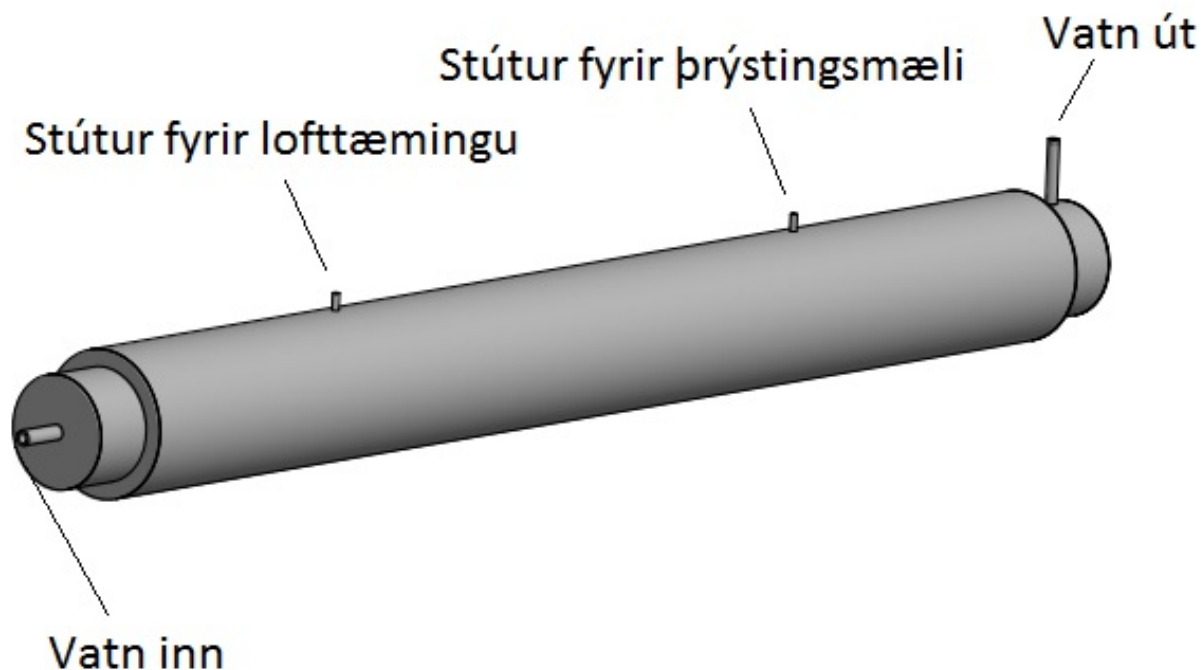
Í samráði við leiðbeinanda var ákveðið að prófunarpípan þyrfti að vera tveggja metra löng til að útiloka það að varmaflutningur um endalok hefði áhrif á miðri pípu. Við hönnun á pípu var hugmyndin sú að það yrði hægt að fylla pípunna af heitu vatni og viðhalda stöðugu hitastigi á vatninu með því að láta nægilega miklu magni af vatni seytla í gegnum innra rör pípunnar. Til að þetta væri mögulegt þyrfti að koma fyrir loki á báða enda innri pípunnar. Á annað lokið var komið fyrir stút sem kúluloki var skrúfaður upp á, slöngutengi var svo skrúfað á lokann á hinn endann til að hleypa vatni inn á pípunna. Á gagnstæðan enda innra rörsins var komið fyrir öðrum stút ofan á pípunna og kúluloki skrúfaður á hann og komið fyrir slöngutengi á lokann, slanga var svo leidd frá lokanum að niðurfalli. Lokinn var hafður ofan á pípunni svo að það loft sem er inni í pípunni komist út, því það er alltaf hætta á að loft safnist saman efst í pípunni ef stúturinn er ekki staðsettur ofan á pípunni. Það myndi hafa það í för með sér að ekki kæmu nógu nákvæmar niðurstöður úr prófunum á pípunni.

Innra rörið er einangrað með $20mm$ þykkum steinullarstöfum. Steinullin er hugsuð sem stuðningur við innra rörið en einnig kemur hún í veg fyrir varmageislun á milli yfirborða röranna. Ytra rörinu er svo smeygt yfir einangrunina og innra rörið. Ytra rörið er $200mm$ styttra en innra rörið. Það er gert svo hægt sé að mæla yfirborðshitastig innra rörsins og einnig til að koma fyrir stút ofan á rörið eins og lýst var hér áður.

Til að rýmið milli röra sé algjörlega loftþétt þarf að setja stállok á enda ytra rörsins. Á lokið var gert gat svo hægt sé að koma því upp á innra rörið. Lokið er svo soðið bæði við ytra- og innra rör allan hringinn.

Á ytra rörið var komið fyrir tveimur götum. Loftventli var komið fyrir á annað gatið til að tengja lofttæmidælu við pípunna. Í hitt gatið var komið fyrir loftþrýstimæli sem mælir undirþrýsting. Þrívíða mynd af hönnun pípunnar má sjá á mynd 12





Mynd 12: Prófunarpípa

4.2 Smíði prófunarpípu

Pegar hönnun var lokið var hafist handa við að smíða pípuna. Set ehf. gaf tvö rör, eitt DN 150 og eitt DN 200. Steinullarverksmiðjan hf. gaf steinullarstafi. Pípan var smíðuð á vélaverkstæði Háskólans í Reykjavík, að því undanskildu að Stjörnublikk ehf. veitti aðstöðu til að skera út endalok pípunnar í plasmaskurðarvél.

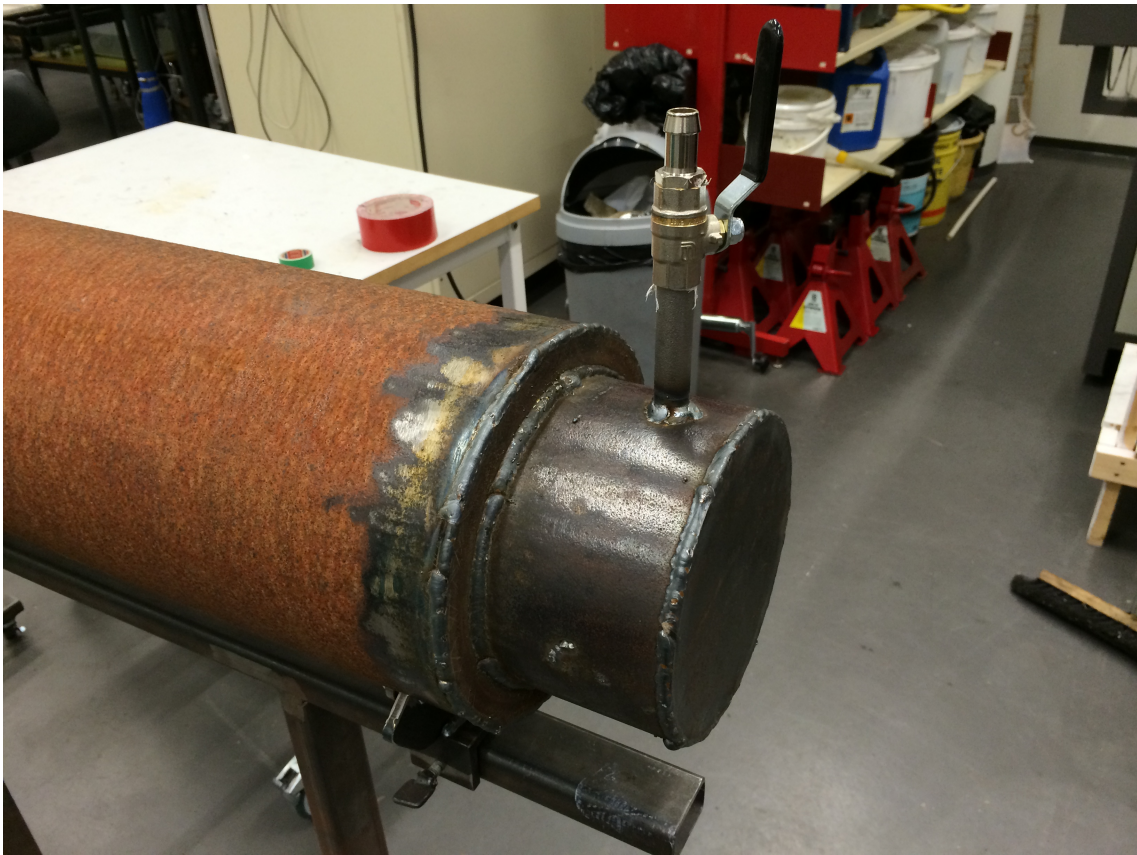
Byrjað var á að sjóða annað lokið sem lokar hólfinu á milli röranna á sinn stað. Því næst var rörið einangrað og ullin reyrð þétt að rörinu og passað upp á að ekkert bil væri á milli stafanna. Því næst var ytra rörinu smeygt yfir einangrunina þétt upp að lokinu, sjá mynd 13. Loki var svo komið fyrir á hinn enda ytra rörsins og öll samskeyti soðin. Endalokum var svo komið fyrir á báða enda innra rörsins og soðin allan hringinn. Því næst voru göt gerð til að koma stútum fyrir og þeir soðnir fastir. Til að ganga úr skugga um að rýmið á milli röra væri loftþétt, var hleypt lofti inn á rýmið til að skapa yfirþrýsting. Sápuvatn var svo borið á suður. Ef göt eru á suðum, freyðir sápuvatnið þar sem loft er að seytla út. Mælum og lokum var svo komið fyrir á stútana eins og sjá má á myndum 14 og 15. Þá var pípan tilbúin til prófana, sjá mynd 16.



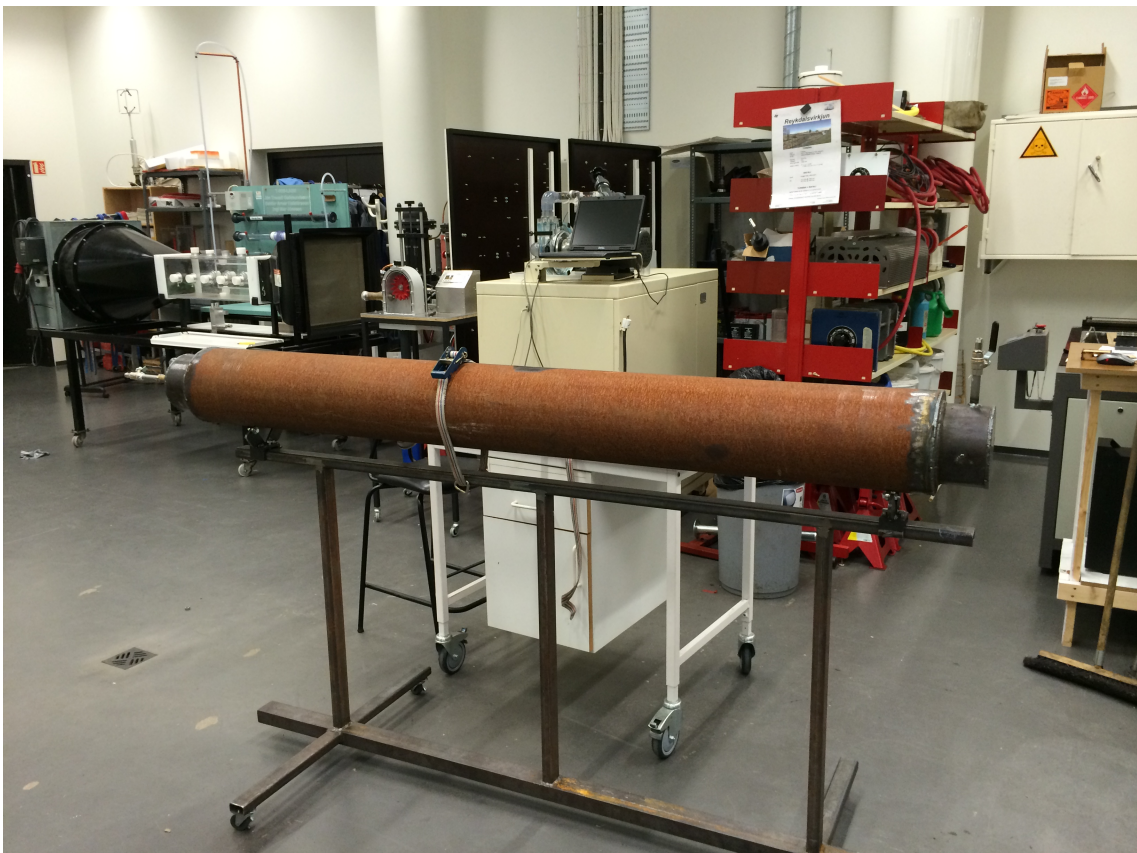
Mynd 13: Hér er ytra rörið komið yfir einangrunina



Mynd 14: Vatnsinntak pípunnar



Mynd 15: Vatnsúttak pípunnar



Mynd 16: Pípan tilbúin

4.3 Prófanir

Til að geta ákvarðað varmaleiðnigildi einangrunarinnar var heitt vatn látið renna í gegnum pípu á fullu rennsli þangað til að pípan virtist vera í stöðugu ástandi. Það er að segja þangað til að hitastig yfirborða beggja enda innra rörsins var það sama. Þegar þessu ástandi var náð, var rennsli inn í pípu minnkað niður í það magn sem þurfti til að viðhalda þessu ástandi. Þetta var gert af þeirri ástæðu að ef rennsli er of mikið er verið að flytja mestan varma út úr pípunni með vatninu. Einungis þarf nógu mikið rennsli til að til að bæta upp þann varma sem tapast út um vegg pípunnar þannig að ástandið sé eins stöðugt og unnt er. Vatnið sem notað var til prófana var aðeins $46^{\circ}C$ heitt en það var talið nægjanlegt þar sem það skapast hitastigsmunur á milli yfirborða og varmi ætti að streyma út um vegg pípunnar.

Gerðar voru prófanir með þremur mismunandi uppsetningum, pípan með einangraða enda $90cm$ inn á pípu, með einangraða enda upp að ytri pípu og óeinangraða enda. Prófanir voru líka gerðar með og án lofttæmi á milli röra, sem gerir þá í heildina sex mismunandi prófanir. Þegar mælingar fóru fram með lofttæmi á milli ytra- og innra rörs var byrjað á að tengja lofttæmidælu við ventilinn á pípunni. Dælan náði mest $0,97bar$ undirþrýstingi, sem er ekki algjört lofttæmi. Algjört lofttæmi er við eitt bar undir loftþrýstingi. Þetta var þó talið viðunandi til að gera tilraunirnar. Þegar stöðugu ástandi var náð, það er þegar hitastig á öllum flötum pípunnar var orðið stöðugt, voru mælingar gerðar á yfirborðshitastigi og varmaflæði á miðju pípunnar. Mælirinn sem notaður var birtir mælingar á tíu sekúndna fresti. Tekið var svo meðaltal af að minnsta kosti hundrað mælingum.

Til útreikninga á varmaleiðnigildi var notast við jöfnur 10 og 11 og þær leystar út fyrir k_{ein} sem er varmaleiðnistuðull einangrunarinnar. Aðrar stærðir þurfa að vera þekktar. Allar óþekktar stærðir voru ákvarðaðar með mælingum.

4.3.1 Búnaður

Hér á eftirfarandi lista er farið yfir þann búnað sem notaður var til prófana:

- Prófunarpípa samsett úr eftirfarandi:
 - DN200 rör $4,5mm$ þykkt, varmaleiðnistuðull $60W/mK$, ytra þvermál $219,1mm$ og innra þvermál $210,1$.
 - DN150 rör $4mm$ þykkt, varmaleiðnistuðull $60W/mK$, ytra þvermál $168,3mm$ og innra þvermál $160,3mm$.
 - Steinullarstafir $20mm$ þykkir, varmaleiðnistuðull $0,036W/mK$.
- Hitamælir af gerðinni Raytek Raynger MX sem mælir yfirborðshita með nál sem lögð er að yfirborði, sjá mynd 18.
- Punnfilmu hita- og varmaflæðinemi af gerðinn Omega HFS-4, sjá mynd 17.



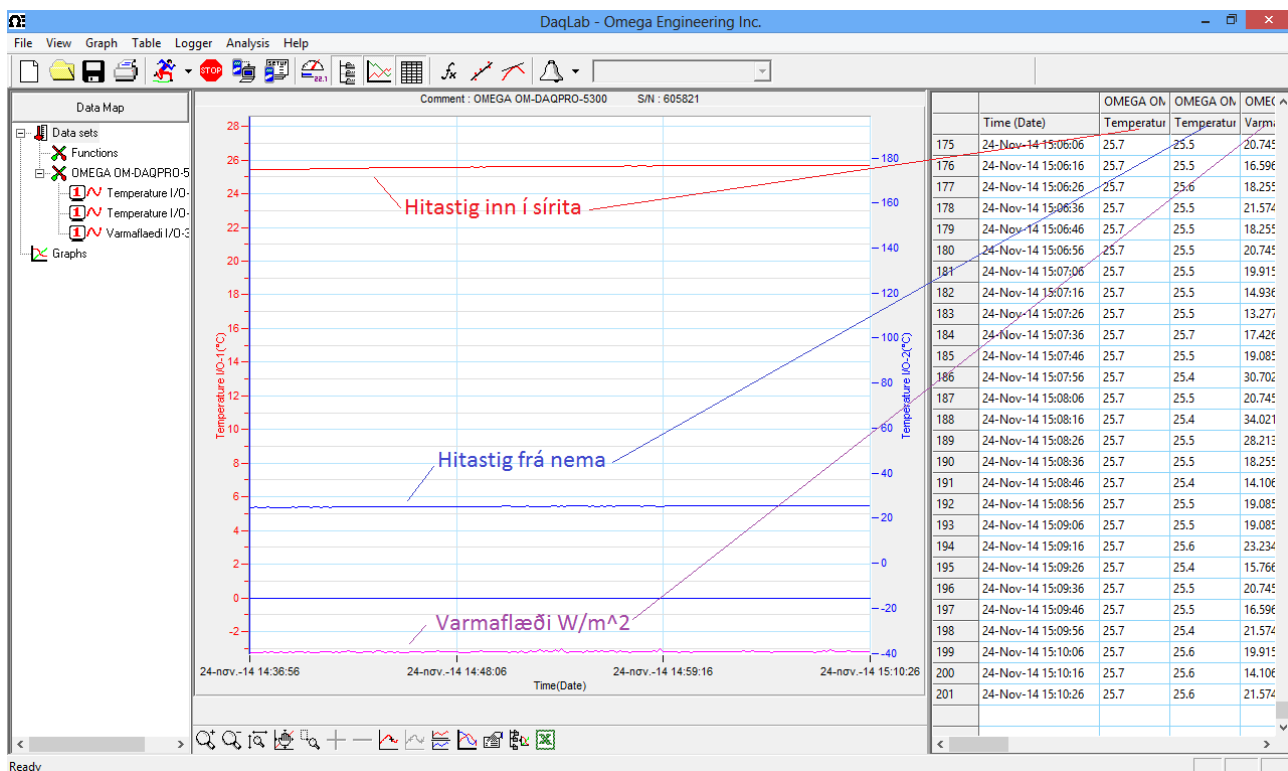
- Síriti af gerðinni Omega OM-DAQPRO-5300 sem tekur við mælingum frá nemanum, sjá mynd 17. Síritinn mælir spennunum á yfirborði í millivoltum. Neminn er gefinn út fyrir að vera með þá stillingu að hvert microvolt er $1W/m^2$.
- Hugbúnaður af gerðinni Omega DaqLab sem tekur við gögnum frá síritanum og ritar þau upp á graf og í töflu, sjá mynd 19.
- Vatnshitamælir sem mælir hitastig á vatninu inn í pípuna.
- Undirþrýstingsmælir sem mælir frá 0 til -1 bar.
- Lofttæmidæla.



Mynd 17: Síriti og nemi



Mynd 18: Hitamælir með nál



Mynd 19: Skjámynd af hugbúnaði

4.3.2 Prófun 1

Við fyrstu uppstillingu voru endar pípunnar voru einangraðir frá umhverfinu. Einangrunin var látin ná 90cm inn á rörið mælt frá enda innra rörsins eins og sjá má á mynd 20. Þetta var gert til að útiloka það að varmi slyppi til umhverfisins út um enda pípunnar. Þetta reyndist þó hafa afleiðingu í för með sér. Í stað þess að varminn færi beint til umhverfisins, þá virtist hann leiðast í gegnum stállokið og ytra rörið þar til hann náði undan einangruninni og streymdi að lokum til umhverfisins. Það er eins með varmann og vatnið að hann leitar alltaf að auðveldustu leið, það er að segja ef varminn lendir á mótstöðu leitar hann í aðrar áttir. Þetta virtist trufla mælingarnar. Til að mælingar séu marktækar þarf hitastigið á ytra röri að vera einsleitt við miðju pípunnar. Ef svo er ekki bendir það til þess að varminn sé að streyma eftir ytra rörinu eins og áður var lýst og endaáhrifin trufla mælingarnar. Eftir sem áður voru mælingar gerðar með og án lofttæmis til samanburðar.

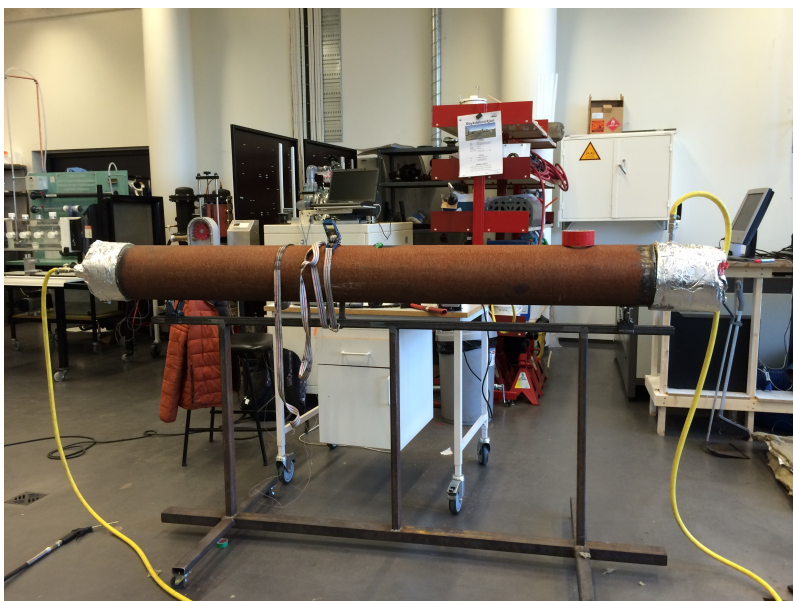
4.3.3 Prófun 2

Önnur uppstilling var á þann hátt að rörendar innra rörsins voru einangraðir upp að loki á ytra röri. Hugmyndin var sú að leyfa varmanum sem leitaði út um lokið að streyma frjálsum til umhverfisins en hefta varmann sem streymir út um enda innra rörsins. Þegar pípan hafði náð stöðugu ástandi voru hitastigsbreytingar á yfirborðinu mældar og virtist sem svo að hitastigið var orðið stöðugt eftir 73cm inn á rörið. Það segir okkur að hitastigið sé einsleitt á rúmlega 50cm kafla um miðja pípu. Það er þó ekki útilokað að varmi sem streymir eftir ytra

rörinu hafi einhver áhrif á mælingar, því hitaáhrif frá endum er í aðeins 25cm fjarlægð frá nemanum. Mælingar voru svo gerðar aftur með og án lofttæmis.



Mynd 20: Fyrsta uppstilling



Mynd 21: Önnur uppstilling

4.3.4 Prófun 3

Að lokum voru gerðar prófanir með pípuendana algerlega óeinangraða. Við þessa tilhögun ætti varminn að leita minna út í ytra rörið og streyma frekar til umhverfisins. Enda sýndu mælingar á yfirborði að hitastig var orðið stöðugt eftir 37cm inn á pípuna. Hitastig var því einsleitt á 125cm kafla um miðja pípuna. Við þessar aðstæður ætti ekki að verða vart við truflanir í mælingum. Mælingar voru svo gerðar líkt og áður.

4.3.5 Niðurstöður prófana

Tafla 1: Mæld gildi við prófanir og reiknaður varmaleiðnistuðull

		$T_{\text{umhverfi}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{vatn}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{yfirborð}} [^{\circ}\text{C}]$	$Q [\text{W}/\text{m}^2]$	$k [\text{W}/\text{mK}]$
Uppstilling 1	Lofttæmt	22,2	46,2	25,86	20,51	0,0245
	Ólofttæmt	22,3	46,1	26,19	29,75	0,0363
Uppstilling 2	Lofttæmt	22,8	45,8	24,21	9,62	0,0108
	Ólofttæmt	22,8	45,7	25,44	25,32	0,032
Uppstilling 3	Lofttæmt	23,1	46,3	23,94	7,31	0,0079
	Ólofttæmt	22,8	43,6	25,68	23,64	0,0272

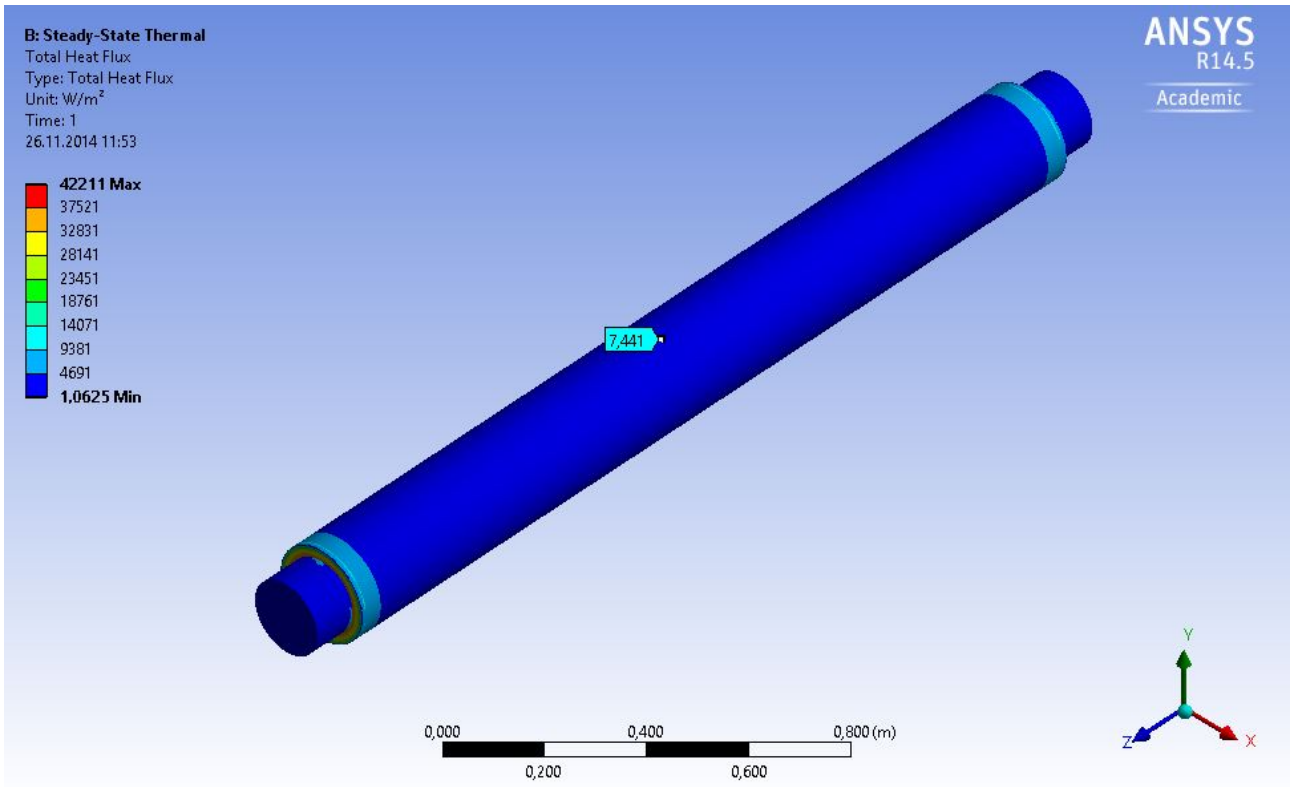
Á töflu 1 má sjá niðurstöður prófana á pípunni. Hitastig og varmaflæði eru mæld gildi og varmaleiðnistuðull reiknaður út frá þeim gildum. Það er eitt sem vekur undrun. Það er að varmaleiðnigildi án lofttæmis er talsvert lægra en uppgefið er af framleiðanda einangrunarinnar. Framleiðandi gefur upp að einangrun hafi varmaleiðnistuðul upp á $0,036\text{W}/\text{mK}$ [12]. Samkvæmt mælingum á uppstillingu tvö og þrjú má sjá að hann mælist $0,032\text{W}/\text{mK}$ og $0,0272\text{W}/\text{mK}$. Skýringin getur verið sú að með loftæmingunni fari allur raki úr steinullinni og varmaleiðnigildi hennar þar af leiðandi minnkað. Samkvæmt niðurstöðum með uppstillingu þrjú og lofttæmi, má sjá að varmaleiðnigildið er meira en ferfalt minna en gildið sem gefið er upp af framleiðanda. Einnig má sjá að varmaleiðnigildið er meira en þrefalt minna með lofttæmi í uppstillingu þrjú heldur en án lofttæmis með sömu uppstillingu.

Eins og áður var nefnt í kafla um prófanir, voru einhverjar truflanir á mælingum vegna endaáhrifa í uppstillingu 1 og 2. Af þeim sökum telur höfundur að niðurstöður úr þeim prófunum séu ómarktækar. Hinsvegar telur höfundur að niðurstöður sem fengust með uppstillingu 3 séu marktækar og verður hönnun á raunverulegri pípu gerð út frá þeim niðurstöðum. Reikninga á varmaleiðnistuðli má sjá í viðauka B og fyrir óvissu í viðauka C.

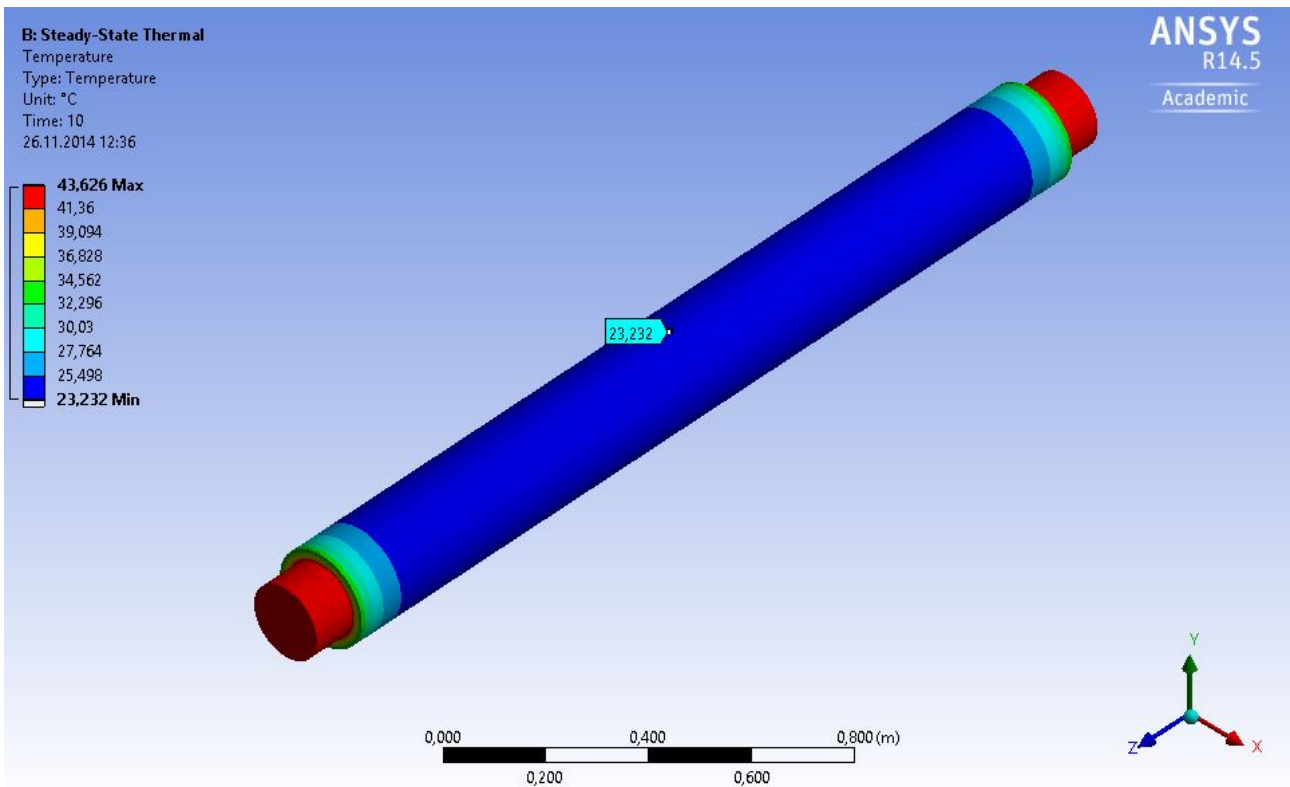
4.3.6 Varmagreining

Til að gera samanburð við mæld og reiknuð gildi var gerð varmagreining í Ansys. Ansys er forrit sem reiknar eftir Finite element method aðferðinni. Sú aðferð byggist á því að stóru módeli er skipt í marga smáa liði, hver liður er svo leystur með örsmæðar reikningum. Forritið getur því reiknað stykki með mjög flókna uppbyggingu. Við greiningu voru forsendur stilltar eins og þær voru við prófanir 3 með lofttæmi. Eins og sjá má á mynd 22 er varmaflæðið í gegnum miðja pípuna nánast það sama og fékkst út úr prófunum. Eins má sjá á mynd 23 að hitastigið á miðri pípunni er líka mjög svipað, örlítið lægra þó. Þetta rennur stoðum undir það að prófun með uppstillingu 3 og lofttæmi sé samkvæmt raunveruleikanum.

Að loknum mælingum var óvissa metin út frá jöfnu 22 og reyndist mesta fræðilega óvissa vera $0,002\text{W}/\text{mK}$.



Mynd 22: Greining á varmaflæði



Mynd 23: Greining á varmaflæði



4.4 Hönnun og greining á raunverulegri pípu

Við hönnun á pípu eins og hún yrði í raunveruleikanum eru ákveðnar forsendur sem verður að fara eftir. Í þessu verkefni er eitt af meginmarkmiðunum að hanna pípu sem hefur samþærileg eða betri varmafræðileg gæði og þær pípur sem til eru á markaðnum í dag. Ef tekið er dæmi um pípur frá Set ehf., þá þarf að ná sömu eiginleikum og þær pípur hafa og helst að gera betur. Til að átta sig betur á þeim eiginleikum þarf að reikna út til dæmis varmaflutning út úr pípunni við gefnar aðstæður.

Ef gert er ráð fyrir að yfirborðshitastig innan í pípunni sé stöðugt $80^{\circ}C$, herbergishitastig sé $22^{\circ}C$ og varmaburðarstuðull loftsins í kringum pípu sé $50W/m^2K$, þá er hægt að reikna varmflutninginn út frá jöfnum 10 og 11. Nema að fyrsta liðnum í jöfnu 10er leppt þar sem hitastigið á innra yfirborði innri pípu er nú þegar skilgreint.

Samkvæmt upplýsingum frá röraverksmiðjunni Set ehf. er varmaleiðnistuðull fyrir pólýúreþan $0,028W/mK$, fyrir plast hlífðarrör $0,43W/mK$ [5]. Set notar stál St. 37-2 sem hefur varmaleiðnistuðulinn $60,5W/mK$ [6]. Einangrunin sem notuð til samanburðar er fengin úr þeim prófunum sem lýst var hér áður eða $0,0079W/mK$.

Ef tekinn er samanburður á pípu í sömu víddum og notuð var til prófana í þessu verkefni, það er að segja DN150 rör inni í DN200 röri og röri frá Set ehf. af sömu innri stærð. Set ehf. framleiðir pípur í þremur mismunandi einangrunarflokkum með mismunandi þykktum.

Til að standast DN150 pípu úr einangrunarflokki eitt sem er sá flokkur sem hefur þynnsta einangrun, þarf $15mm$ einangrun í stað $68mm$ einangrun. Til að standast sömu kröfur og einangrunarflokkur tvö þyrfti $12mm$ einangrun í stað $52mm$ og að lokum til að standast einangrunarflokk þrjú þyrfti $9mm$ þykka einangrun í stað 37. Þó þarf að hafa í huga að það er líklega gáfulegast að hanna pípu þannig að hún sé í stöðluðum stærðum. Þá stjórnast einangrunarþykktin af þeim stærðum. Auk þess gæti verið erfitt að nálgast einangrun sem er þynnri en $20mm$. Reikninga má sjá í viðauka D.

Hönnun pípunnar var unnin samhliða varma- og burðarþolsgreiningu í Ansys. Einnig voru handreikningar hafðir til hliðsjónar.

4.4.1 Hönnun

Lagt var upp með í fyrstu að hanna sex metra langa DN150 pípu innan í DN200 pípu með einangrun og lofttæmi á milli og byggja svo ofan þær niðurstöður hönnun á tólf metra langri pípu.

Hönnunarforsendur eru eftirfarandi:



- Hitastigsbreyting $60^{\circ}C$.
- Loka þarf rýmum á milli röra með málmum svo rýmið verði loftþétt.
- Eins bars undirþrýstingur á milli röra.
- Innra rör er innspennt í báða enda.
- Ytra rör er á einföldum undirstöðum við báða enda.
- Steinullareinangrun á milli röra.
- Eðlismassi $80^{\circ}C$ heits vatns er $972kg/m^3$ [6].
- Eðlismassi stáls St. 37-2 er $7850kg/m^3$ [6].
- Eðlismassi ryðfrís stáls EN. 1.4301 er $7900kg/m^3$ [6].
- Fjaðurstuðull stáls St.37-2 $E = 207GPa$ [13].
- Fjaðurstuðull ryðfrís stáls EN 1.4301 $E = 190GPa$ [13].
- Flotmörk stáls St.37-2 $235MPa$ [11].
- Flotmörk ryðfrís stáls EN 1.4301 $230MPa$ [11].
- Hitapanstuðull stáls St.37-2 er $1.2 \cdot 10^{-5}C^{-1}$ [6].
- Hitapanstuðull ryðfrís stáls EN 1.4301 er $1.7 \cdot 10^{-5}C^{-1}$ [6].
- Varmaleiðnistuðull samkvæmt prófun er $0,008W/mK$.

Byrjað var á að reikna hversu mikil áhrif hitastigsbreytingin hefði á innra rörið. Reikningar sýna að $6m$ rör úr svörtu stáli lengist um $4,2mm$. Við það skapast $150kN$ áslægur kraftur sé miðað við að veggþykkt rörsins sé $2mm$. Sá kraftur myndar normalspennu upp á $144MPa$. Ef notast er við ryðfrítt stál þá er lenging þess vegna hitabreytinga $6,1mm$ sem skapar áslægan kraft upp á $213kN$ og $204MPa$ normalspennu .

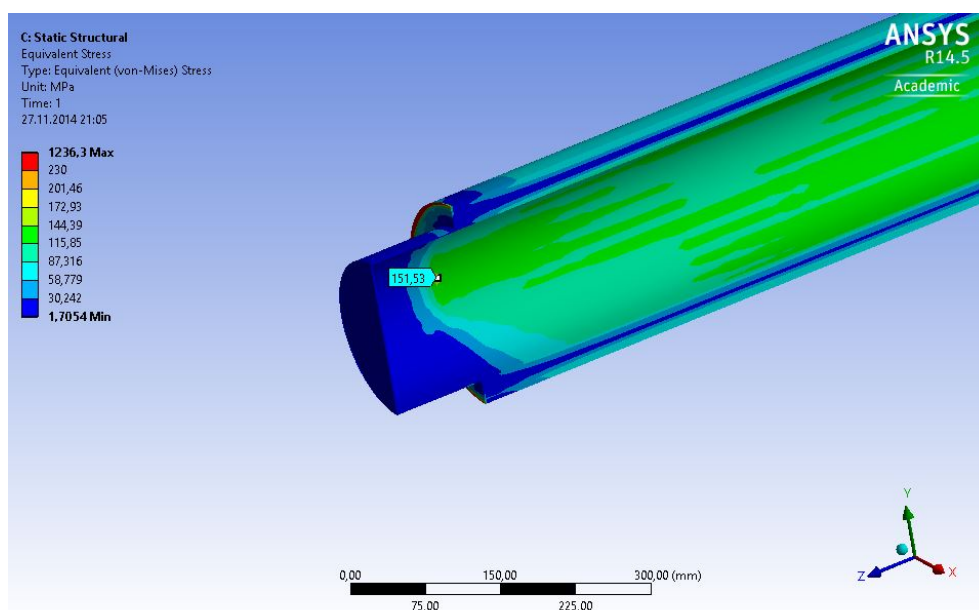
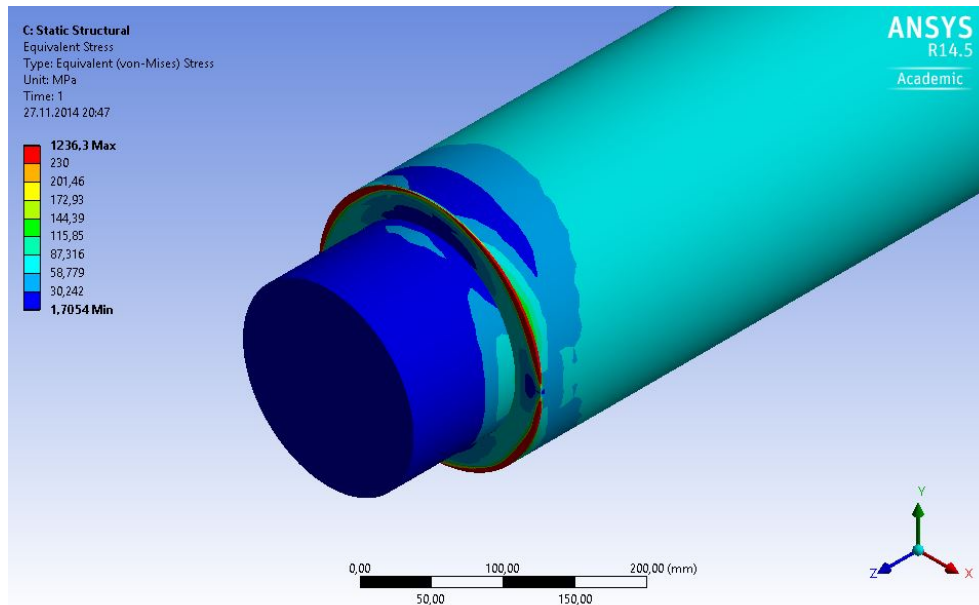
Fyrsta hugmynd að tengingu milli ytra og innra rörs var að hafa slétt lok líkt og var notað á prófunarpípunni. Jafngildisspenna á innra röri fyrir svart stál reiknast þá $163MPa$ fyrir svart stál og fyrir ryðfrítt $224MPa$. Sjá má að ef notast er við ryðfrítt stál þá er jafngildisspennan rétt undir flotmörkum. Sjá má reikninga í viðauka E.

Til samanburðar var gerð greining í Ansys. Einnig hjálpar Ansys til við að reikna spennur sem myndast á lokið og ytra rörið. Greininginn var þannig uppbyggð að fyrst var gerð varma- greining sem skilgreinir hitadreifinguna í pípunni. Ofan á þá greiningu var gerð burðarþols- greining sem tekur mið af hitastigsdreifingunni og reiknar aflögun og spennur í pípunni.

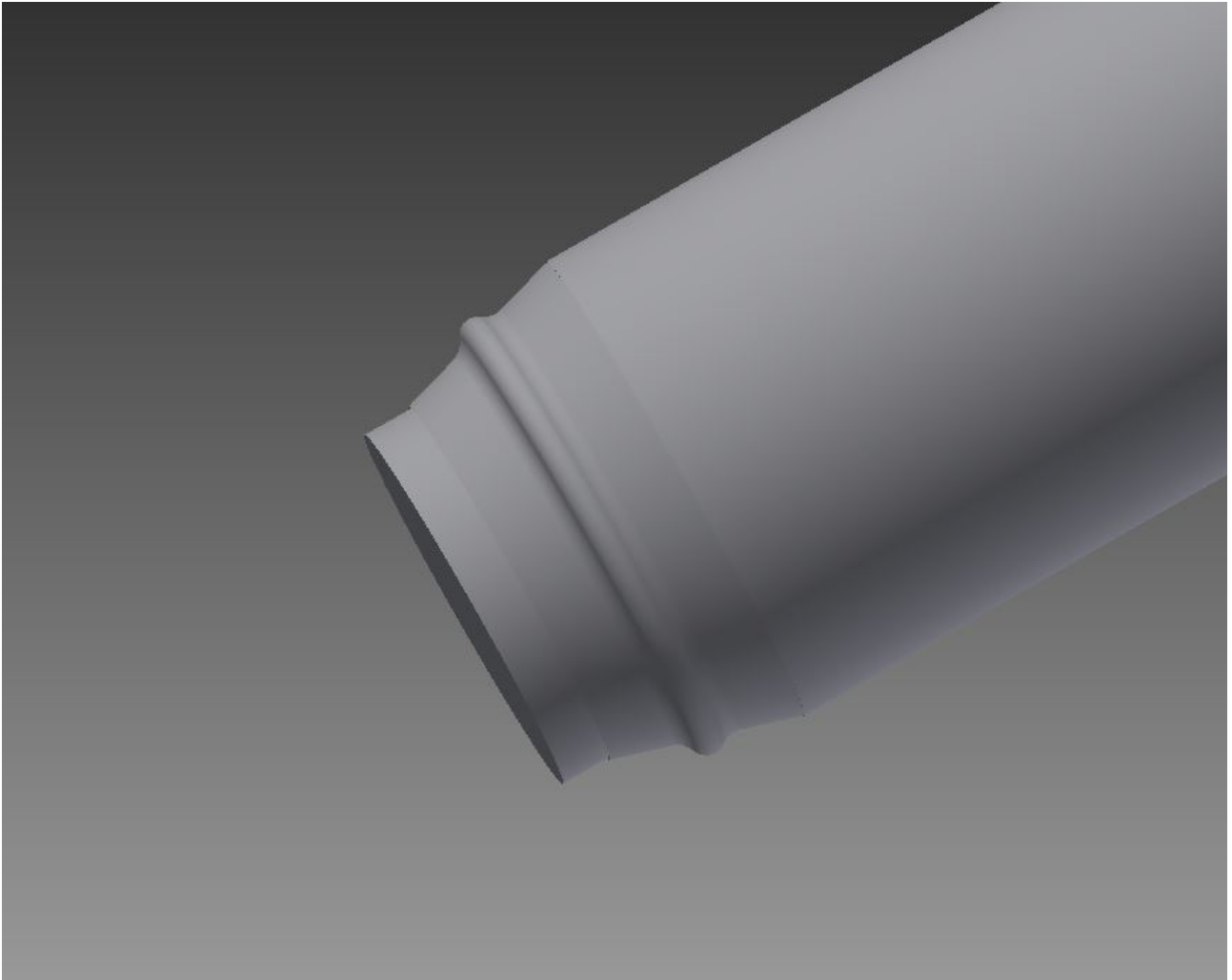


Í greiningunni var skilgreint 80°C hátt hitastig á innra yfirborði innri pípu og 10°C umhverfishita sem er á að giska meðalumhverfishiti á Íslandi þegar verið er að leggja hitaveitulagnir. Undirstöður voru skilgreindar á enda ytra rörsins þannig að pípan hafði frelsi til hreyfinga langsam.

Á mynd 24 sést að spennur á samsetningu við ytra rör fara langt yfir flotmörk. Það þýðir að samsetningin er of stíf. Á öðrum stöðum pípunnar var spennan vel innan marka eins og sjá má á mynd 25. Allsstaðar þar sem rautt er á myndunum eru spennur yfir flotmörkum.



Til að minnka þessar háu spennur á samsetningunni þurfti að koma með hugmynd að einhverskonar samsetningu sem gat tekið við lengingunni á rörinu. Ný hönnun var með því sniði að í staðinn fyrir að nota slétt lok var sett einskonar trekt eða minnkun á enda ytra rörsins sem gengur niður á yfirborð innra rörsins. Til að geta tekið við lengingu innrarörsins, var brugðið á það ráð að setja einskonar bungu á trektina sem myndar sveigjanleika til þenslu, sjá mynd 26. Ákveðið var að hafa trektina úr ryðfríu stáli, vegna þess að það lengist meira við hitastigsbreytingar og mun þar af leiðandi lengjast með rörinu. Einnig hefur ryðfrítt stál fjórfalt minni varmaleiðni heldur en venjulegt stál [6]. Röraefni pípuunnar er úr venjulegu stáli.

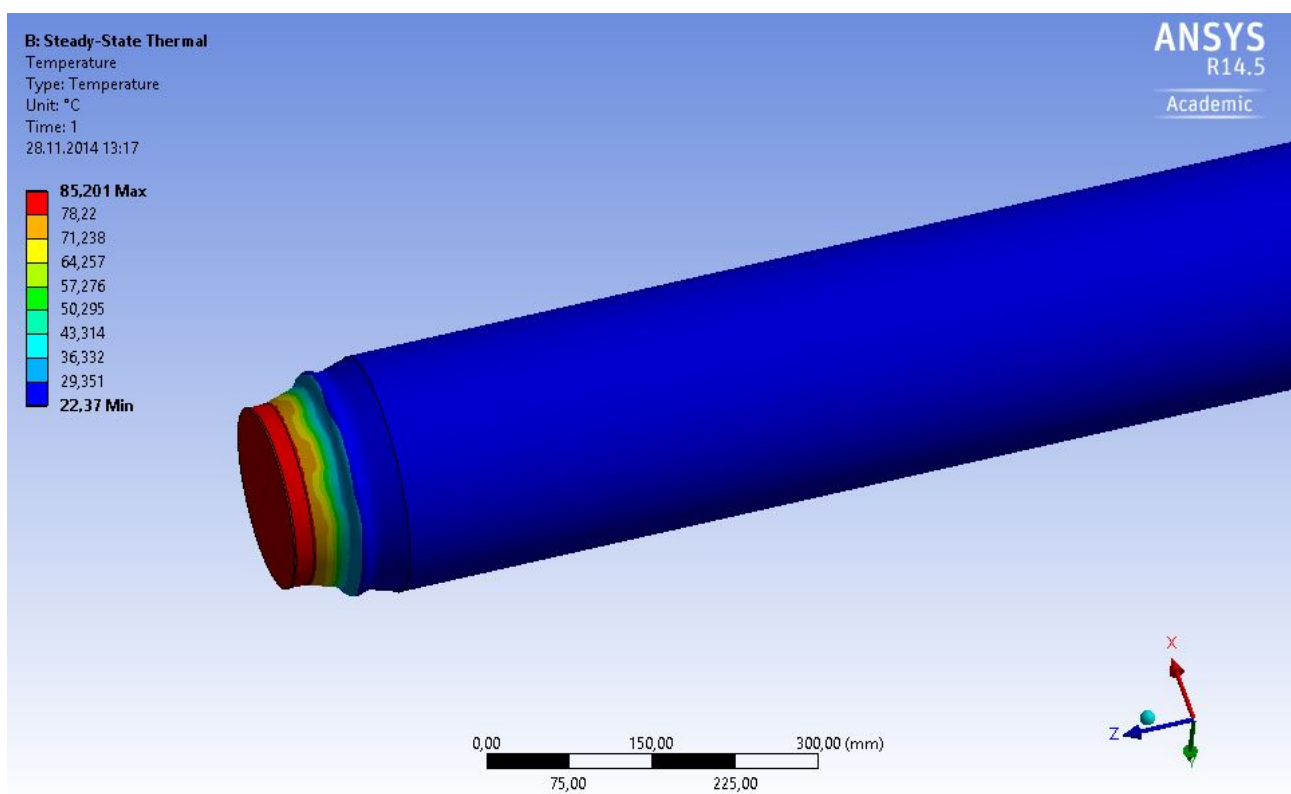


Mynd 26: Samsetning með trekt

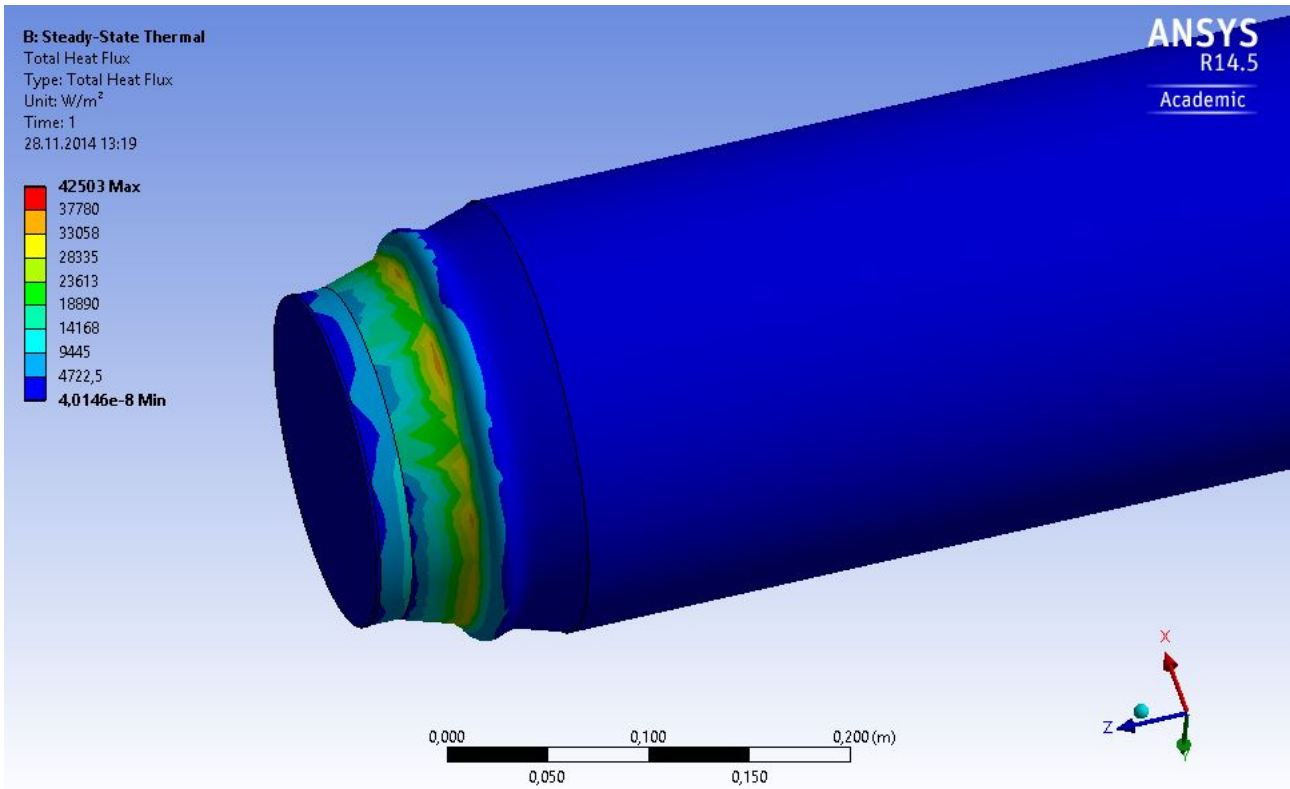
Greining var gerð með sama hætti og áður. Samkvæmt varmagreiningu leiðist hiti í trektina eins og sjá má á mynd 27, sem orsakar þá einhverja lengingu á efninu og takmarkar að einhverju leiti spennumyndun. Á mynd 28 má sjá hvernig varmaflæðið dreifist í pípunni. Taka skal þó fram að pípuendinn er óeinangraður í greiningunni þannig að mestur varminn streymir til umhverfisins frá endanum. Í raunveruleikanum yrði samsetning tveggja röra einangruð sem myndi hindra hluta af varmaflæðinu en einhver hluti varmans myndi flytjast inn í ytra rörið og þaðan til umhverfisins.

Á mynd 29 sést hvernig spennudreifingin er á pípunni. Tilgangurinn með því að notast við trekt með einskonar bungu var að fá spennurnar sem myndast á svæðið í kringum bunguna. Spennur eru frekar háar samanborið við flotmörk efnisins. Hinsvegar þegar efni er kaldmótað hækka flotmörk efnisins á því svæði sem mótunin á sér stað. Það gerist vegna þess að það þarf að fara yfir flotmörk efnisins til að móta það og þegar það hefur gerst haldast mörkin jafn há og spennan sem þarf til að móta það. Álagssveiflur í hitakerfum eru fáar, þannig að þó svo að efnið fari yfir flotmörk er lítil hætta á rofi á efninu vegna þreytu vegna þess hve fáar álagssveiflurnar eru. Skalinn á mynd 29 gefur til kynna að mestu spennur séu mjög háar. Í forritinu er innbyggður bendill sem sýnir spennur á þeim svæðum sem bendillinn er yfir. Ef sá bendill er látinn fara yfir svæðið sem spennur áttu að vera mestar sýndi hann alls ekki sömu niðurstöðu og forritið gaf til kynna. Þetta má að öllum líkindum rekja til þess að þegar forritið skiptir stykkinu upp í liði þá myndast of óreglulegir liðir á svæðinu þar sem skipting mætist úr tveimur áttum. Af þeim sökum geta myndast mjög háar spennur á mjög afmörkuðu svæði.

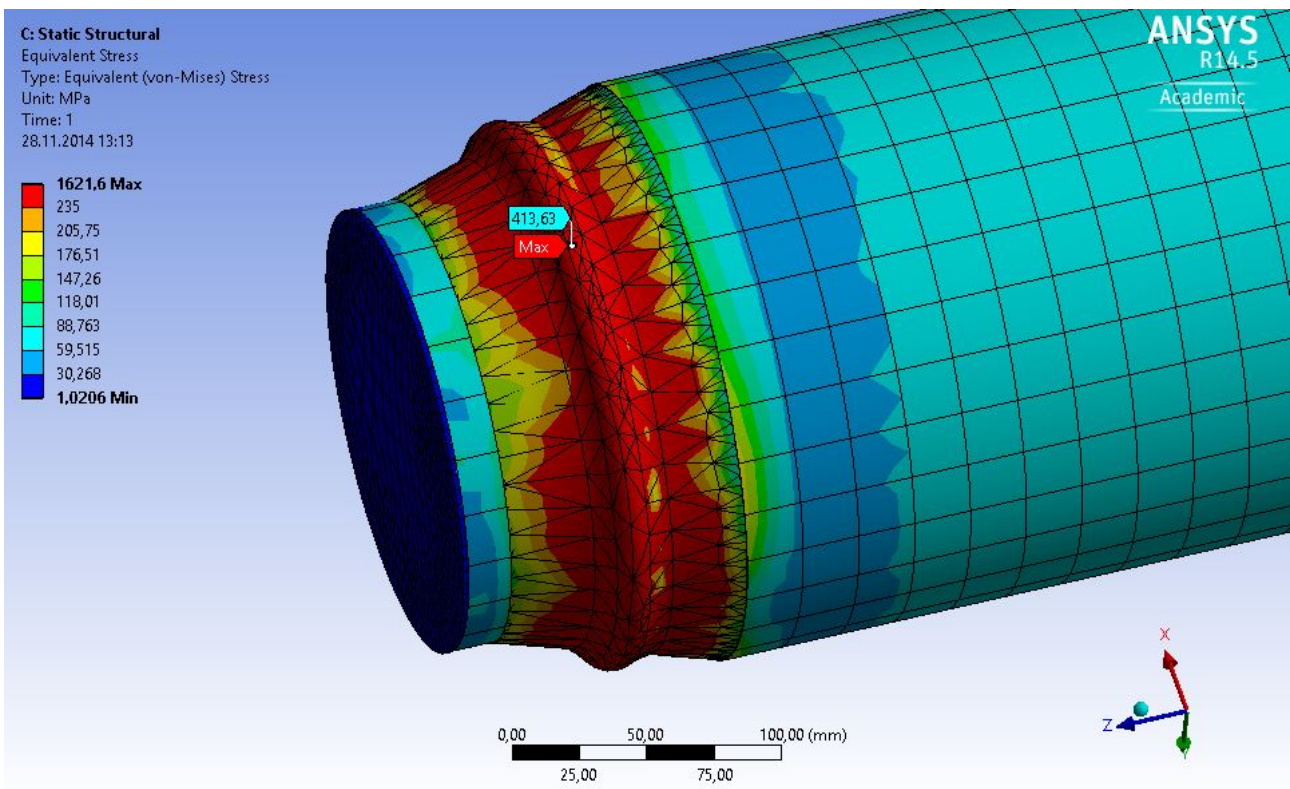
Á mynd 30 má sjá hvernig rörið lengist. Rörið lengist um $1,7\text{mm}$ til beggja átta, sem er töluvert minna en áðurgerðir reikningar sögðu til um. Það er greinilegt að ytra rörið heldur aftur af þenslu innra rörsins í gegnum trektina, sem er líka ástæðan fyrir spennumyndun í trektinni.



Mynd 27: Hitastigsdreifing á pípuenda

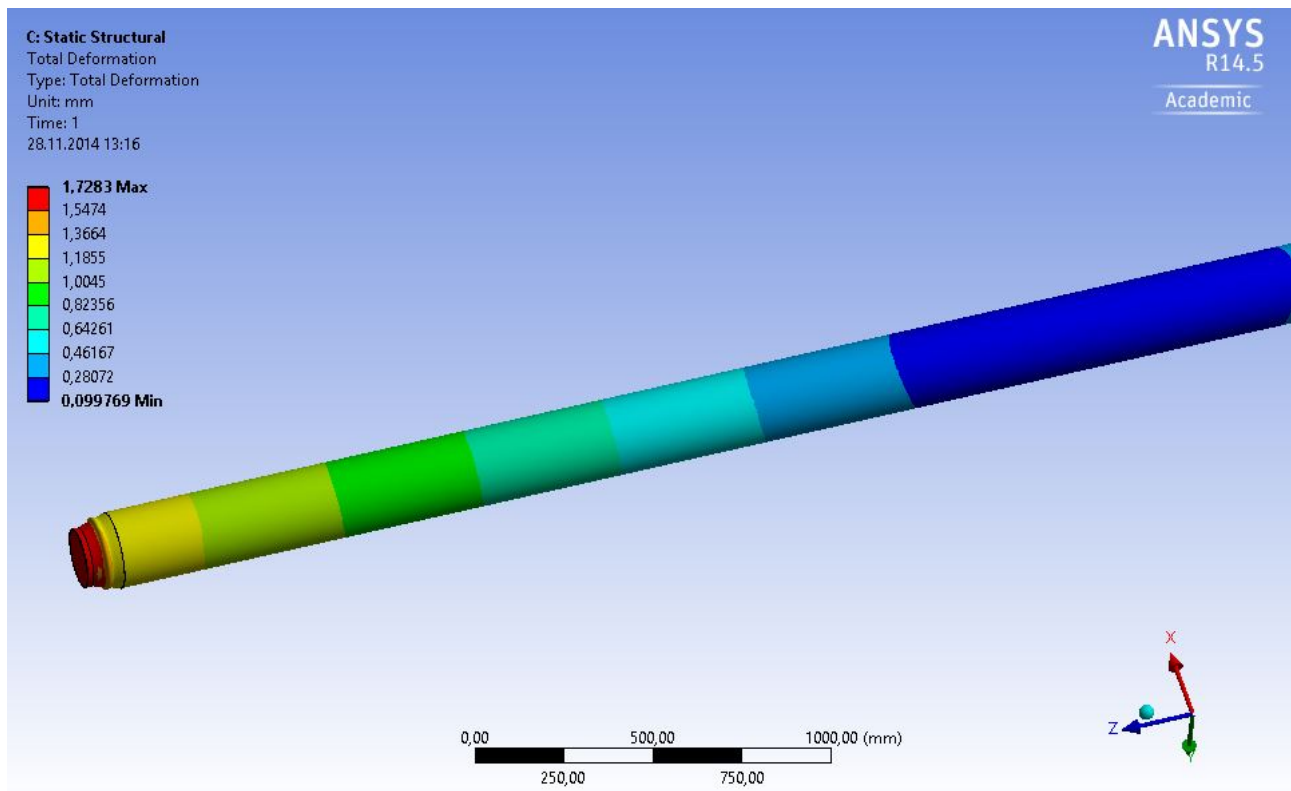


Mynd 28: Varmaflæði á enda pípu



Mynd 29: Spennur á pípuenda



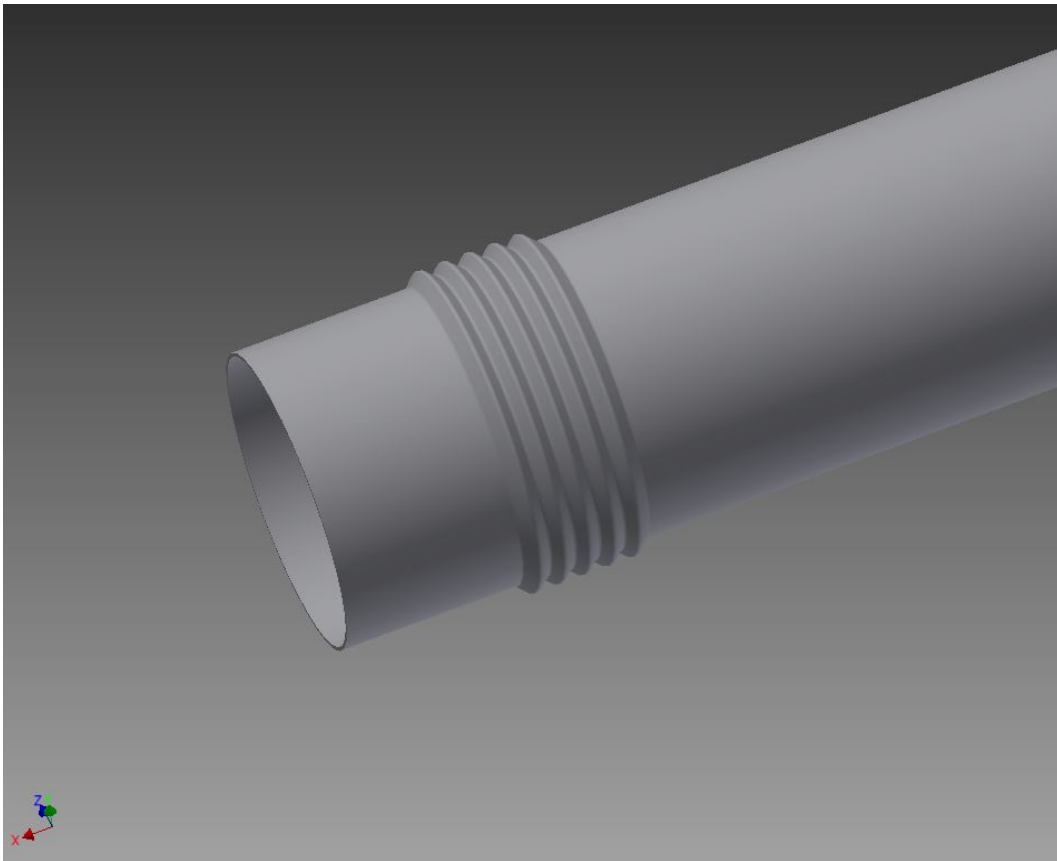


Mynd 30: Lenging pípu

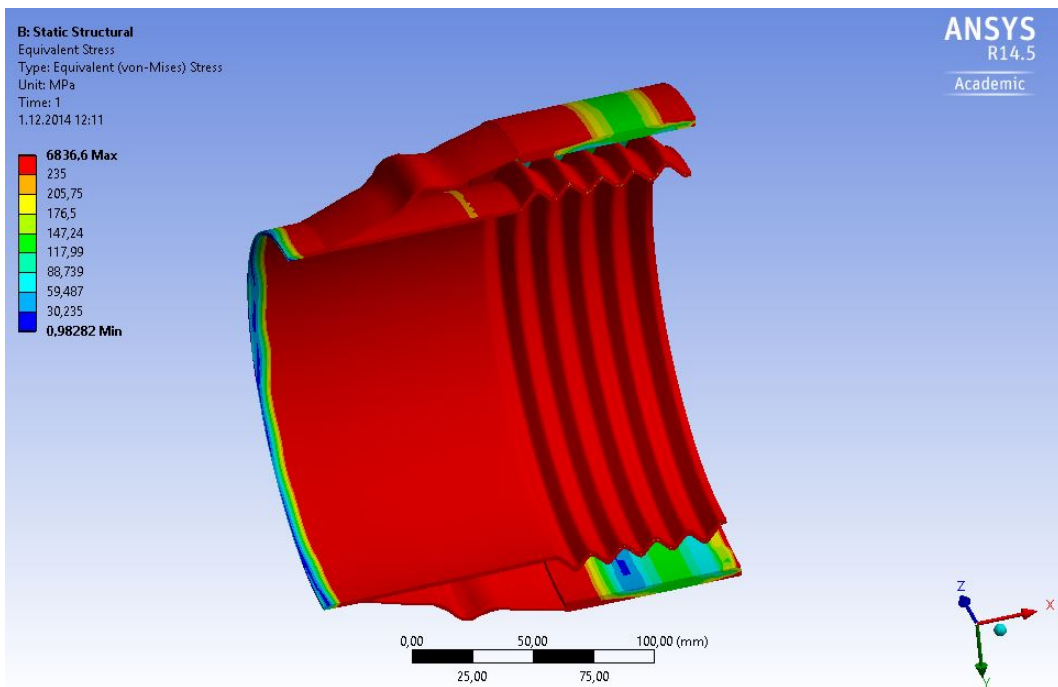
Þar sem markaðurinn býður bæði upp á sex og tólf metra langar pípur var ákveðið að gera greiningu á tólf metra langri pípu í sömu þvermálum og sex metra pípan. Fyrri greining á sex metra langri pípu sýndi að samsetningin er nálægt þolmörkum. Af þeim sökum þurfti að koma með hugmynd af einhverri lausn til að minnka spennuáhrif á trektina. Upp kom sú hugmynd að setja einskonar riffur á báða enda pípunnar eins og sjá má á mynd 31. Hugmyndin gekk út á það að riffurnar myndu gefa eftir og taka til sín stóran hluta af spennunni.

Greining var gerð á endanum á pípunni. Í greiningu kom upp eitt vandamál, það er að með því að hafa rifflaðan enda var uppbygging móðelsins orðin svo flókin að fjöldi liða var kominn upp úr öllu valdi. Þegar fjöldi liða er orðinn mjög mikill þá getur það tekið forritið mjög langan tíma að leysa verkefnið. Þá var brugðið á það ráð að einfalda greininguna. Það var gert með því að skera annan endann af rörinu og gera spennugreiningu á honum einum saman. Lenging rörsins reiknast samkvæmt jöfnu 13 8mm við 60°C hitabreytingu. Ef gert er ráð fyrir að þenslan sé jöfn til beggja enda þá þarf endinn að taka við 4mm þenslu, því var skilgreindur 4mm færsluvektor á enda innra rörsins. Ytra rörið var skilgreint fast þannig að riffurnar og trektin ættu að taka við allri færslu.

Við greiningu kom í ljós að samsetningin var ennþá of stíf. Spennur eru nær allsstaðar yfir flotmörkum eins og sjá má á mynd 32. Allsstaðar þar sem rautt er á myndinni eru spennur yfir flotmörkum.



Mynd 31: Rifflaður rörendi



Mynd 32: Spennur í riffluðum pípuenda

4.4.2 Niðurstöður hönnunar

Það er ljóst að það eru vandamál sem fylgja því að hanna kerfi sem er eins þvingað og pípan sem umræðir í þessu verkefni. Þegar pípa hitnar að innan þá skapast miklir kraftar vegna lengingar rörsins, sem mynda miklar spennur við enda pípunnar. Höfundur telur þó að með þeirri lausn að hafa trekt úr ryðfríu stáli með þenslubungu um miðja trekt á enda sex metra rörs leysi vandamálið. Spennur í pípunni eru undir flotmörkum allstaðar í pípunni að undanskildu því svæði á trektinni þar sem þenslubungan er. Eins og áður var nefnt, hækka flotmörk efnisins við kaldmótun og er því trektinn með töluvert hærri flotmörk en upphafleg efnisgæði segja til um. Annað hvort þyrfti að valsa trektina upp eða móta hana í stansi. Það eru þó viss vonbrigði að ekk fékkst nægilega góð og einföld lausn við hönnun á tólf metra pípu.

5 Samantekt og umræður

Samkvæmt niðurstöðum úr prófunum reiknast varmaleiðnigildið $0,008W/mK$ við $0,97bar$ undirþrýsting, með óvissu upp á $0,002W/mK$ sem er helst til mikil óvissa. Þessa miklu óvissu má skrifa á nákvæmni mælitækja sem notuð voru til prófana. Ef ákvarða ætti varmaleiðnigildið með minni óvissu þyrfti að notast við mun nákvæmari búnað.

Hönnun sýnir að það er vel hægt að framleiða sex metra langa pípu en það er vandkvæðum háð að hanna lengri gerðir, þar sem erfitt er að eiga við þær háu spennur sem myndast vegna varmaþenslu. Með því að notast við ríflaða röraenda næst ekki nægilega mikill sveigjanleiki til þenslu. Þó væri hægt að notast við sérframleidd þenslustykki. Þau stykki eru gerð úr mjög þunnu efni, sem skapar annað vandamál, það er að þenslustykkin þola mjög lítið hliðarálag. Það mætti hinsvegar leysa með því að notast við einhverskonar stoðgrind sem styður við rörið, vegna þess að einangrunin er að öllum líkindum ekki nægilega stíf til að taka við álaginu. Stoðgrind af þessu tagi þyrfti að vera smíðuð úr málmi og af þeim sökum myndast kuldabrá frá innra röri til þess ytra. Þessi útfærsla væri af öllum líkindum of dýr vegna þess hve dýr þenslustykki eru. Greining sýnir að það verður lenging á pípunni, sem er þó minni en ella vegna þess hve pípan er stíf til endanna. Vegna þenslu pípunnar þarf alltaf að gera ráð fyrir þensluhlykkjum eða þenslustykkjum með ákveðnu millibili. Einnig væri hægt að notast við plast til að loka endum, þá þyrfti hinsvegar að loka samsetningu tveggja röra með málmi og lofttæma það rými á verkstað. Sú aðferð skapar mun meiri vinnu við lagningu röranna því hólkur sem notaður yrði við að loka rýminu þyrfti að vera heilsoðinn til beggja enda.

Samsetningar tveggja röra er hægt að einangra með svipuðum hætti og gert er við lagningu úreþaneinangraðra lagna. Líklega væri þó best ef einangrunin myndi ná eitthvað inn á pípuana utanverða til að mynda tregðu til varmaflutnings frá samsetningu ytra og innra rörs.



Hvað varðar framleiðsluaðferð þá væri hægt að stilla innra rörinu upp á búkka og einangra það með einangrunarhólkum úr steinull og rörinu síðan smeygt inn í ytra rörið, trektum komið fyrir á báða enda pípunar. Suðuróbot myndi svo sjá um að sjóða trektarnar við innra- og ytra rörið. Að lokum yrði lofttæmidæla tengd við ventil á ytra rörinu og lok sett á ventilinn og soðið fast. Með þessari aðferð væri einfalt að setja upp framleiðslulínu til að framleiða þessa gerð af pípu.

Markmið verkefnisins var að athuga hvaða áhrif lofttæmi hafi á varmaleiðnistuðul steinullar og gera frumhönnun byggða á niðurstöðum úr prófunum. Höfundur telur að mikilvægt sé að halda áfram með verkefnið, það er að segja að gera mælingar á raunspennum og varmaleiðnistuðli á fullsmíðaðri pípu og jafnvel á tveimur samsettum pípum. Einnig væri óskandi að einhver gæti tekið að sér það verkefni að gera fýsileikagreiningu á framleiðslu þessarar gerðar af hitaveitupípu og hanna framleiðslulínu.

Það skal tekið fram að allar myndir sem ekki er getið heimilda við eru eign höfundar.



Heimildir

- [1] Dewar Flask. (2014, september) *Encyclopedia of Science*. [Rafrænt]. Af: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/D/dewar_flask.html [Sótt: 10. sept. 2014]
- [2] Vacuum Insulated Panels. (2014, September) *Va-QTec*. [Rafrænt]. Af: <http://www.va-q-tec.com/en/va-Q-vip-1119,,2983.html> [Sótt: 15. sept. 2014]
- [3] Steinullarstafir. (2014, september) *Steinull hf.* [Rafrænt]. Af: http://steinull.is/Default.asp?Sid_Id=30385&tld=1&Tre_Rod=&qsr [Sótt: 22. sept. 2014]
- [4] Hitaveituefni, einangruð stálrör og tengistykki. (2014, september) *Set ehf.* [Rafrænt]. Af: http://set.is/vefur/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=5 [Sótt: 21. sept. 2014]
- [5] Hitaveiturör. (2014, september) *Set ehf.* [Rafrænt]. Af: http://set.is/vefur/index.php?option=com_content&view=article&id=9&Itemid=10 [Sótt: 21. sept. 2014]
- [6] Frank P. Incropera, David P. Dewitt Theodore L. Bergman og Adrienne S. Lavine, *Foundations of Heat Transfer*, 6. útg. Jhon Wiley & Sons, 2013.
- [7] History of Cryogenics. (2014, september) *Cryogenic Society of America*. [Rafrænt]. Af: http://www.cryogenicsociety.org/resources/cryo_central/history_of_cryogenics/ [Sótt: 10. sept. 2014]
- [8] Vacuum-insulated panels. (2013, september) *Building Designe*. [Rafrænt]. Af: <http://www.bdonline.co.uk/business/cpd/cpd-19-2013-vacuum-insulated-panels/5060517.article> [Sótt: 12. sept. 2014]
- [9] T. Thorsell, "Advances in thermal insulation," Doktorsritgerð, KTH Royal Institute of Technology, Mars 2012.
- [10] Þorbjörn Karlsson og Wilhelm V. Steindórsson, *Hitaveituhandbók Samorku 6. kafli*. Samorka, 1999.
- [11] H. E. Krex, *Maskin Stábi*, 9. útg. Nyt Teknisk Forlag, 2011.
- [12] Steinullarplötur. (2014, september) *Steinull hf.* [Rafrænt]. Af: <http://steinull.is/einangrun-voruskra/plotur-2/> [Sótt: 21. sept. 2014]
- [13] Richard G Budynas og J. Keith Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 8. útg. McGraw Hill.



Viðauki

Viðauki A

Listi yfir notuð ták

q - Varmaflæði [W]

q'' - Varmaflæði [W/m^2]

λ - Varmaleiðnigildi [W/mK]

h - Varmaburðarstuðull [w/m^2K]

R - Varmaviðnám [K/W]

T - Hitastig [$^{\circ}C$]

L - Lengd [m]

A - Flatarmál [m^2]

α - Hitapanstuðull [$^{\circ}C^{-1}$]

I - Tregðuvægi [m^4]

D - Ytra þvermál [m]

d - innra þvermál [m]

F - Kraftur [N]

m - Massi [kg]

M - Vægi [Nm]

u - Niðurbeygja [m]

σ - Normalspenna [Pa]

τ - Skerspenna [Pa]

Viðauki B

Reikningar á varmaleiðnistuðli Uppstilling 1

Hér reikna ég með Q í wöttum í stað wöttum á fermeter en skilgreini $L=1,45281$ sem samsvarar einum fermeter á lögninni.

Lofttæmt:

$$L := 1.45281 \text{ m} \quad \lambda_s := 60.5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$r1 := 80.15 \text{ mm} \quad r2 := 84.15 \text{ mm} \quad r3 := 105.05 \text{ mm} \quad r4 := 109.55 \text{ mm}$$

$$T1 := 46.2 \text{ }^\circ\text{C} \quad T4 := 25.86 \text{ }^\circ\text{C} \quad Q := 20.51 \text{ W}$$

$$\lambda := \frac{Q \cdot \lambda_s \cdot \ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_s \cdot (T1 - T4) - Q \cdot \left(\ln\left(\frac{r2}{r1}\right) + \ln\left(\frac{r4}{r3}\right)\right)} = 0.0245 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Ólofttæmt:

$$T1 := 46.1 \text{ }^\circ\text{C} \quad T4 := 26.19 \text{ }^\circ\text{C} \quad Q := 29.75 \text{ W}$$

$$\lambda := \frac{Q \cdot \lambda_s \cdot \ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_s \cdot (T1 - T4) - Q \cdot \left(\ln\left(\frac{r2}{r1}\right) + \ln\left(\frac{r4}{r3}\right)\right)} = 0.0363 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$



Reikningar á varmaleiðnistuðli Uppstilling 2

Hér reikna ég með Q í wöttum í stað wöttum á fermeter en skilgreini $L=1,45281\text{m}$ sem samsvarar einum fermeter á lögninni.

Lofttæmt:

$$L := 1.45281 \text{ m} \quad \lambda_s := 60.5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$r1 := 80.15 \text{ mm} \quad r2 := 84.15 \text{ mm} \quad r3 := 105.05 \text{ mm} \quad r4 := 109.55 \text{ mm}$$

$$T1 := 45.8 \text{ }^\circ\text{C} \quad T4 := 24.21 \text{ }^\circ\text{C} \quad Q := 9.62 \text{ W}$$

$$\lambda := \frac{Q \cdot \lambda_s \cdot \ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_s \cdot (T1 - T4) - Q \cdot \left(\ln\left(\frac{r2}{r1}\right) + \ln\left(\frac{r4}{r3}\right)\right)} = 0.0108 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Ólofttæmt:

$$T1 := 44.7 \text{ }^\circ\text{C} \quad T4 := 25.44 \text{ }^\circ\text{C} \quad Q := 25.32 \text{ W}$$

$$\lambda := \frac{Q \cdot \lambda_s \cdot \ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_s \cdot (T1 - T4) - Q \cdot \left(\ln\left(\frac{r2}{r1}\right) + \ln\left(\frac{r4}{r3}\right)\right)} = 0.032 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$



Reikningar á varmaleiðnistuðli Uppstilling 3

Hér reikna ég með Q í wöttum í stað wöttum á fermeter en skilgreini $L=1,45281\text{m}$ sem samsvarar einum fermeter á lögninni.

Lofttæmt:

$$L := 1.45281 \text{ m} \quad \lambda_s := 60.5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$r1 := 80.15 \text{ mm} \quad r2 := 84.15 \text{ mm} \quad r3 := 105.05 \text{ mm} \quad r4 := 109.55 \text{ mm}$$

$$T1 := 46.3 \text{ }^\circ\text{C} \quad T4 := 23.94 \text{ }^\circ\text{C} \quad Q := 7.31 \text{ W}$$

$$\lambda := \frac{Q \cdot \lambda_s \cdot \ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_s \cdot (T1 - T4) - Q \cdot \left(\ln\left(\frac{r2}{r1}\right) + \ln\left(\frac{r4}{r3}\right)\right)} = 0.0079 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Ólofttæmt:

$$T1 := 46.8 \text{ }^\circ\text{C} \quad T4 := 25.68 \text{ }^\circ\text{C} \quad Q := 23.64 \text{ W}$$

$$\lambda := \frac{Q \cdot \lambda_s \cdot \ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_s \cdot (T1 - T4) - Q \cdot \left(\ln\left(\frac{r2}{r1}\right) + \ln\left(\frac{r4}{r3}\right)\right)} = 0.0272 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$



Viðauki C

Óvissureikningar á varmaleiðnistuðli

Til að meta skekkju í mælingum á niðurstöðum þarf að diffra jöfnuna sem notuð er til að reikna varmaleiðnistuðulinn með tilliti til innra hitastigs, ytra hitastigs og varmaflæði. Ekki er reiknað með skekkjum í þvermálum pípunnar né skekkjum á k-stál.

$$L := 1.45281 \text{ m} \quad \lambda_s := 60.5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$r1 := 80.15 \text{ mm} \quad r2 := 84.15 \text{ mm} \quad r3 := 105.05 \text{ mm} \quad r4 := 109.55 \text{ mm}$$

$$T1 := 46.3 \text{ }^\circ\text{C} \quad T4 := 23.94 \text{ }^\circ\text{C} \quad Q := 7.31 \text{ W}$$

Lambda diffrað með tilliti til varmaflæðis:

$$\lambda'q := \frac{2 \cdot L \cdot \lambda_s^2 \cdot \ln\left(\frac{r3}{r2}\right) \cdot (T1 - T4) \cdot \pi}{\left(Q \cdot \left(\ln\left(\frac{r2}{r1}\right) + \ln\left(\frac{r4}{r3}\right)\right) - 2 \cdot L \cdot \lambda_s \cdot (T1 - T4) \cdot \pi\right)^2} = 0.001 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Og diffrað með tilliti til T1:

$$\lambda'T1 := \frac{-2 \cdot L \cdot Q \cdot \lambda_s^2 \cdot \ln\left(\frac{r3}{r2}\right) \cdot \pi}{\left(2 \cdot T1 \cdot L \cdot \lambda_s \cdot \pi - 2 \cdot L \cdot \lambda_s \cdot T4 \cdot \pi - Q \cdot \left(\ln\left(\frac{r2}{r1}\right) + \ln\left(\frac{r4}{r3}\right)\right)\right)^2} = -3.554 \cdot 10^{-4} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}^2}$$

Og með tilliti til T4:

$$\lambda'T4 := \frac{2 \cdot L \cdot Q \cdot \lambda_s^2 \cdot \ln\left(\frac{r3}{r2}\right) \cdot \pi}{\left(2 \cdot T4 \cdot L \cdot \lambda_s \cdot \pi - 2 \cdot L \cdot \lambda_s \cdot T1 \cdot \pi + Q \cdot \left(\ln\left(\frac{r2}{r1}\right) + \ln\left(\frac{r4}{r3}\right)\right)\right)^2} = (3.554 \cdot 10^{-4}) \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}^2}$$



Skekkjur í mælibúnaði eru sem hér segir:

$$\Delta Q := 1.2 \text{ W}$$

$$\Delta T_1 := 2 \text{ K}$$

$$\Delta T_4 := 1 \text{ K}$$

Þá reiknast mesta fræðilega skekkja:

$$\Delta \lambda := \sqrt{(\lambda'q \cdot \Delta Q)^2 + (\lambda'T_1 \cdot \Delta T_1)^2 + (\lambda'T_4 \cdot \Delta T_4)^2} = 0.002 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Viðauki D

Samanburðarreikningar á pípu frá Set og lofttæmdiseinangraðri pípu

Pípa DN150 úr einangrunarflokki 3 frá Set ehf. Með 68mm einangrun, hlífðarkápa er 315mm og 4,9mm þykk

$$r1 := 80.15 \text{ mm} \quad r2 := 84.15 \text{ mm} \quad r3 := 152.15 \text{ mm} \quad r4 := 157.5 \text{ mm}$$

$$h4 := 50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad \lambda_{stal} := 60.5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \lambda_{ein} := 0.028 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \lambda_{plast} := 0.43 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$T_{\infty,4} := 22 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T1 := 80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q := \frac{T1 - T_{\infty,4}}{\frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{stal}} + \frac{\ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ein}} + \frac{\ln\left(\frac{r4}{r3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{plast}} + \frac{1}{h4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r4}} = 17.061 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Nú þarf að skilgreina upp á nýtt varmaleiðnistuðul fyrir einangrun og nýan rADIUS á ytra byrði einangrunar og ytra rörs.

$$\lambda_{ein2} := 0.008 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad r3 := 100 \text{ mm} \quad r4 := 105 \text{ mm}$$

$$q := \frac{T1 - T_{\infty,4}}{\frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{stal}} + \frac{\ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ein2}} + \frac{\ln\left(\frac{r4}{r3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{stal}} + \frac{1}{h4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r4}} = 16.745 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Pípa DN150 úr einangrunarflokki 2 frá Set ehf. með 52mm einangrun, hlífðarkaápa 280mm og þykkt hennar er 4,6mm.

$$r1 := 80.15 \text{ mm} \quad r2 := 84.15 \text{ mm} \quad r3 := 135.4 \text{ mm} \quad r4 := 140 \text{ mm}$$

$$h4 := 50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \quad \lambda_{stal} := 60.5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \lambda_{ein} := 0.028 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \lambda_{plast} := 0.43 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$T_{\infty,4} := 22 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T1 := 80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q := \frac{T1 - T_{\infty,4}}{\frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{stal}} + \frac{\ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ein}} + \frac{\ln\left(\frac{r4}{r3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{plast}} + \frac{1}{h4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r4}} = 21.177 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Nú þarf að skilgreina upp á nýtt varmaleiðnistuðul fyrir einangrun og nýan radíus á ytra byrði einangrunar og ytra rörs.

$$\lambda_{ein2} := 0.008 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad r3 := 96.5 \text{ mm} \quad r4 := 101 \text{ mm}$$

$$q := \frac{T1 - T_{\infty,4}}{\frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{stal}} + \frac{\ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ein2}} + \frac{\ln\left(\frac{r4}{r3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{stal}} + \frac{1}{h4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r4}} = 21.044 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$



Pípa DN150 úr einangrunarflokki 1 frá Set ehf. með 37mm einangrun, hlífðarkaápa 250mm og þykkt hennar er 3,9mm.

$$r1 := 80.15 \text{ mm}$$

$$r2 := 84.15 \text{ mm}$$

$$r3 := 121.1 \text{ mm}$$

$$r4 := 125 \text{ mm}$$

$$h4 := 50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

$$\lambda_{stal} := 60.5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{ein} := 0.028 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{plast} := 0.43 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$T_{\infty,4} := 22 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T1 := 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$q := \frac{T1 - T_{\infty,4}}{\frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{stal}} + \frac{\ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ein}} + \frac{\ln\left(\frac{r4}{r3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{plast}} + \frac{1}{h4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r4}} = 27.535 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Nú þarf að skilgreina upp á nýtt varmaleiðnistuðul fyrir einangrun og nýan radius á ytra byrði einangrunar og ytra rörs.

$$\lambda_{ein2} := 0.008 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$r3 := 93.5 \text{ mm}$$

$$r4 := 98 \text{ mm}$$

$$q := \frac{T1 - T_{\infty,4}}{\frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{stal}} + \frac{\ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ein2}} + \frac{\ln\left(\frac{r4}{r3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{stal}} + \frac{1}{h4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r4}} = 27.245 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$



Viðauki E

Burðarþolsreikningar á pípu með sléttum endalokum

Svart stál:

$$\alpha_{svart} := 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \quad T_1 := 293 \text{ K} \quad T_2 := 353 \text{ K} \quad L := 5.8 \text{ m} \quad E := 207 \text{ GPa}$$

$$d := 168.3 \text{ mm} \quad d_2 := 164.3 \text{ mm} \quad A := \frac{\pi \cdot (d^2 - d_2^2)}{4}$$

Lenging vegna breytinga á hita:

$$\Delta L_{svart} := L \cdot \alpha_{svart} \cdot (T_2 - T_1) = 4.176 \text{ mm}$$

Krafturinn F sem myndast vegna þenslu:

$$F_{svart} := \Delta L_{svart} \cdot E \cdot \frac{A}{L} = 155.731 \text{ kN}$$

Spenna sem myndast vegna þenslu:

$$\sigma_{normal} := \frac{F_{svart}}{A} = 149.04 \text{ MPa}$$

Þyngd rörsins fullt af vatni:

$$\rho_{svart} := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{vatn} := 972 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad D := 219.1 \text{ mm} \quad D_2 := 210.1 \text{ mm}$$

$$m := L \cdot \left(\frac{\pi \cdot (d^2 - d_2^2)}{4} \cdot \rho_{svart} + \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot \rho_{vatn} \right) = 167.099 \text{ kg}$$

$$W := m \cdot \frac{g}{L} = 282.532 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad M := \frac{W \cdot L^2}{12} = 792.03 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Spenna vegna vægis:

$$y := \frac{d}{2} = 84.15 \text{ mm} \quad I := \frac{\pi \cdot (d^4 - d_2^4)}{64} = (3.613 \cdot 10^{-6}) \text{ m}^4$$

$$\sigma_{vægi} := \frac{M \cdot y}{I} = 18.449 \text{ MPa}$$

Samanlögð normalspenna er því:

$$\sigma := \sigma_{vægi} + \sigma_{normal} = 167.489 \text{ MPa}$$

Undirstöður pípunnar virka eins og skerkráftur á rörið sem mynda skerspennur.

Undirstöðukraftar eru:

$$R := W \cdot \frac{L}{2} = 819.341 \text{ N}$$

Þykkt hrings:

$$t := 2 \text{ mm}$$

Flatarmál hrings sem kráftur verkar á:

$$A_{hring} := \frac{\pi \cdot d \cdot t}{2} = (5.287 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

Skerspenna er því:

$$\tau := \frac{R}{A_{hring}} = 1.55 \text{ MPa}$$

Jafngildispenna reiknast þá:

$$\sigma_{jafn} := \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = 167.51 \text{ MPa}$$

Ryðfrítt stál:

$$\alpha_{rydf}. := 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \quad T_1 := 293 \text{ K} \quad T_2 := 353 \text{ K} \quad L := 6 \text{ m} \quad E := 190 \text{ GPa}$$

$$d := 168.3 \text{ mm} \quad d_2 := 164.3 \text{ mm} \quad A := \frac{\pi \cdot (d^2 - d_2^2)}{4}$$

Lenging vegna breytinga á hita:

$$\Delta L_{rydf}. := L \cdot \alpha_{rydf}. \cdot (T_2 - T_1) = 6.12 \text{ mm}$$

Krafturinn F sem myndast vegna þenslu:

$$F_{rydf}. := \Delta L_{rydf}. \cdot E \cdot \frac{A}{L} = 202.5 \text{ kN}$$

Spenna sem myndast vegna þenslu:

$$\sigma_{norm} := \frac{F_{rydf}.}{A} = 193.8 \text{ MPa}$$

Þyngd rörsins fullt af vatni:

$$\rho_{rydf}. := 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{vatn} := 972 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad D := 219.1 \text{ mm} \quad D_2 := 210.1 \text{ mm}$$

$$m := L \cdot \left(\frac{\pi \cdot (d^2 - d_2^2)}{4} \cdot \rho_{rydf}. + \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot \rho_{vatn} \right) = 173.175 \text{ kg}$$

$$W := m \cdot \frac{g}{L} = 283.044 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$M := \frac{W \cdot L^2}{12} = 849.132 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Spenna vegna vægis:

$$y := \frac{d}{2} = 84.15 \text{ mm} \quad I := \frac{\pi \cdot (d^4 - d_2^4)}{64} = (3.613 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{vægi} := \frac{M \cdot y}{I} = 19.779 \text{ MPa}$$

Samanlögð normalspenna er því:

$$\sigma := \sigma_{vægi} + \sigma_{norm} = 213.579 \text{ MPa}$$

Undirstöður pípunnar virka eins og skerkráftur á rörið sem mynda skerspennur.

Undirstöðukraftar eru:

$$R := W \cdot \frac{L}{2} = 849.132 \text{ N}$$

Þykkt hrings:

$$t := 2 \text{ mm}$$

Flatarmál hrings sem kráftur verkar á:

$$A_{hring} := \frac{\pi \cdot d \cdot t}{2} = (5.287 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

Skerspenna er því:

$$\tau := \frac{R}{A_{hring}} = 1.606 \text{ MPa}$$

Jafngildispenna reiknast þá:

$$\sigma_{jafn} := \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = 213.597 \text{ MPa}$$

Viðauki F

Mælingar á uppsetningu 3

Yfirborðshitastig Lofttæmt	Varmaflæði	Yfirborðshitastig Ólofttæmt	Varmaflæði
23,36	4,979	25,565	19,915
23,43	4,979	25,67	17,426
23,43	1,66	25,565	19,915
23,43	-0,83	25,6	26,553
23,57	3,319	25,565	30,702
23,605	0,83	25,565	28,213
23,5	1,66	25,46	21,574
23,535	2,489	25,53	21,574
23,43	10,787	25,6	19,915
23,465	2,489	25,6	20,745
23,64	3,319	25,635	25,723
23,5	6,638	25,565	25,723
23,535	5,809	25,53	29,043
23,57	4,149	25,705	25,723
23,535	7,468	25,6	23,234
23,535	7,468	25,565	26,553
23,64	-0,83	25,53	23,234
23,57	6,638	25,635	23,234
23,64	1,66	25,6	25,723
23,675	2,489	25,53	19,085
23,605	5,809	25,635	19,915
23,57	3,319	25,635	18,255
23,64	7,468	25,705	19,085
23,675	1,66	25,6	19,085
23,64	1,66	25,67	18,255
23,605	4,979	25,6	17,426
23,605	3,319	25,6	19,085
23,675	3,319	25,67	29,872
23,71	10,787	25,635	28,213
23,605	5,809	25,67	22,404
23,815	5,809	25,635	24,894
23,675	4,979	25,705	20,745
23,745	5,809	25,635	26,553
23,64	6,638	25,74	23,234
23,675	4,979	25,67	21,574
23,64	8,298	25,705	19,085
23,71	10,787	25,6	27,383
23,815	10,787	25,495	30,702
23,815	6,638	25,775	27,383
23,675	9,128	25,775	20,745
23,78	7,468	25,635	19,915
23,78	5,809	25,635	22,404
23,71	9,957	25,635	27,383
23,605	13,277	25,565	19,915
23,675	4,979	25,635	21,574



23,605	5,809	25,67	22,404
23,675	9,128	25,6	28,213
23,815	24,064	25,67	20,745
23,71	2,489	25,565	17,426
23,815	6,638	25,565	20,745
23,78	6,638	25,74	29,872
23,815	5,809	25,67	19,085
23,885	3,319	25,705	23,234
23,885	6,638	25,67	22,404
23,885	5,809	25,705	20,745
23,85	0	25,705	20,745
23,85	5,809	25,705	18,255
23,99	10,787	25,67	16,596
23,85	4,149	25,67	22,404
23,99	4,979	25,705	23,234
23,85	5,809	25,635	29,872
23,815	11,617	25,6	37,34
23,85	5,809	25,6	23,234
23,92	12,447	25,67	24,894
23,99	9,957	25,705	21,574
23,955	5,809	25,6	19,915
23,885	10,787	25,74	19,915
24,025	4,979	25,705	25,723
23,99	10,787	25,705	18,255
23,92	13,277	25,74	21,574
24,025	9,957	25,775	23,234
23,99	14,936	25,74	24,894
24,025	5,809	25,775	19,085
23,99	11,617	25,74	22,404
24,06	8,298	25,67	21,574
24,06	6,638	25,635	23,234
23,955	3,319	25,67	20,745
24,025	8,298	25,775	20,745
24,06	15,766	25,6	19,915
24,025	9,128	25,67	32,362
24,025	6,638	25,74	16,596
23,955	17,426	25,67	24,064
24,025	7,468	25,74	19,915
23,99	8,298	25,81	25,723
24,06	14,106	25,74	19,915
24,2	9,128	25,775	22,404
24,2	0	25,705	20,745
24,235	-0,83	25,705	29,043
24,13	2,489	25,81	24,064
24,235	0	25,74	22,404
24,2	0	25,67	25,723
24,13	5,809	25,74	19,915
24,165	6,638	25,67	30,702
24,165	12,447	25,67	29,872
24,13	3,319	25,67	25,723

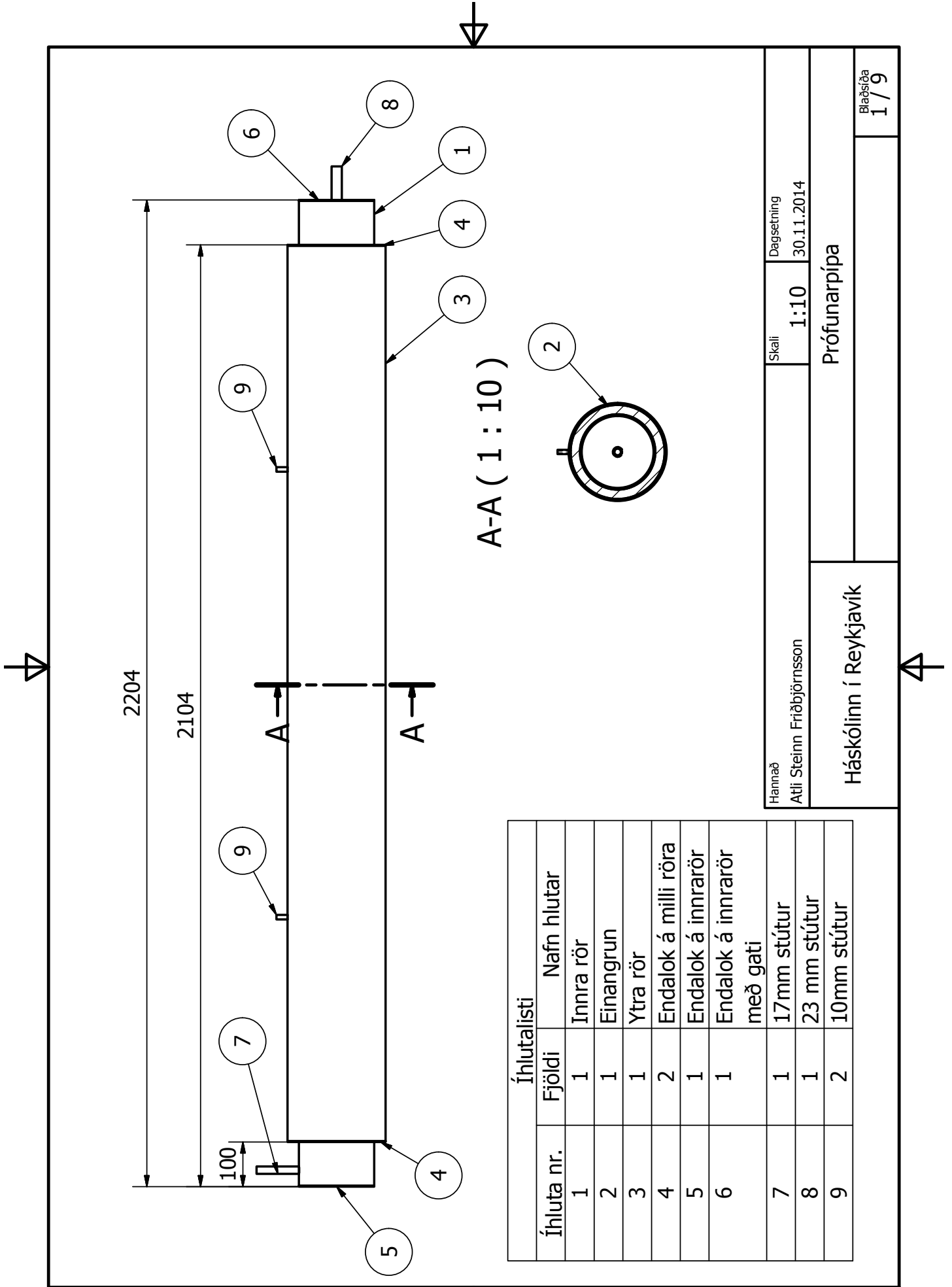


24,305	-0,83	25,705	24,894
24,27	0	25,74	23,234
24,235	8,298	25,81	20,745
24,34	2,489	25,775	24,894
24,34	-3,319	25,775	27,383
24,34	0	25,74	25,723
24,27	3,319	25,6	33,191
24,235	10,787	25,705	27,383
24,165	3,319	25,74	20,745
24,2	6,638	25,635	25,723
24,27	11,617	25,705	22,404
24,235	29,043	25,705	26,553
24,305	5,809	25,74	21,574
24,095	9,957	25,88	20,745
24,13	6,638	25,67	24,894
24,34	15,766	25,88	16,596
24,165	4,979	25,81	26,553
24,235	19,085	25,67	22,404
24,095	17,426	25,775	19,915
24,165	8,298	25,775	34,851
24,27	7,468	25,74	24,894
24,305	10,787	25,635	28,213
24,27	12,447	25,81	21,574
24,235	14,106	25,775	21,574
24,27	9,128	25,74	19,085
24,2	10,787	25,775	21,574
24,34	18,255	25,705	22,404
24,235	6,638	25,775	21,574
24,2	10,787	25,705	56,426
24,235	14,936	25,635	29,043
24,27	17,426	25,775	23,234
24,235	5,809	25,74	21,574
24,375	6,638	25,705	21,574
24,305	14,106	25,845	19,085
24,41	9,128		
24,34	4,979		
24,27	9,957		
24,375	9,957		
24,305	4,149		
24,34	9,957		



Viðauki G

Hér á næstu síðum má sjá teikningar af prófunarpípu og trektinni.



Íhlutalisti		Nafn hlutar
Íhluta nr.	Fjöldi	
1	1	Innra rör
2	1	Einangrun
3	1	Ytra rör
4	2	Endalok á milli röra
5	1	Endalok á innrör
6	1	Endalok á innrör með gati
7	1	17mm stútur
8	1	23 mm stútur
9	2	10mm stútur

Hannað Atli Steinn Friðbjörnsson

Skali

1:10

Dagsetning

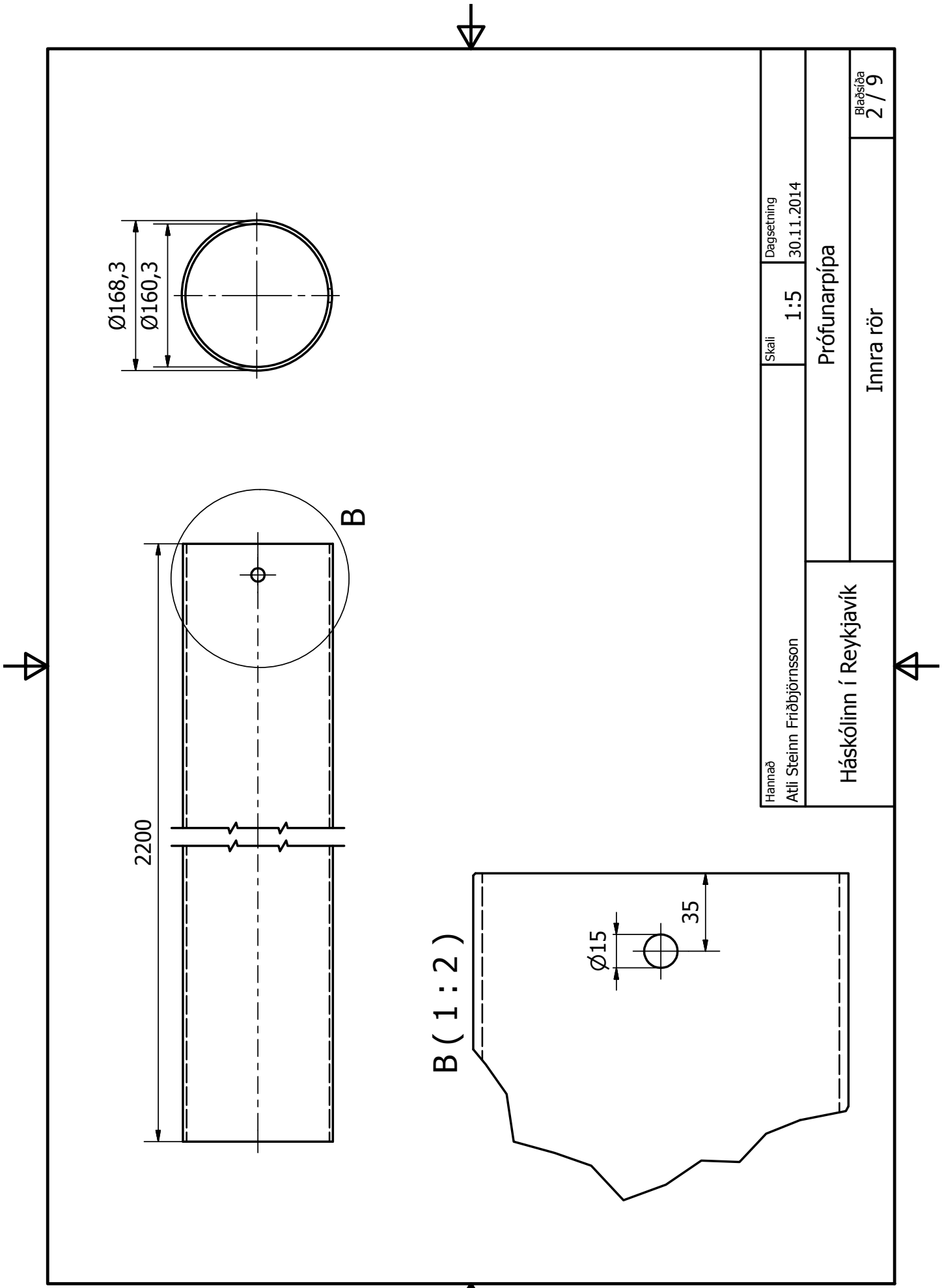
30.11.2014

Háskólinn í Reykjavík

Prófunarpípa

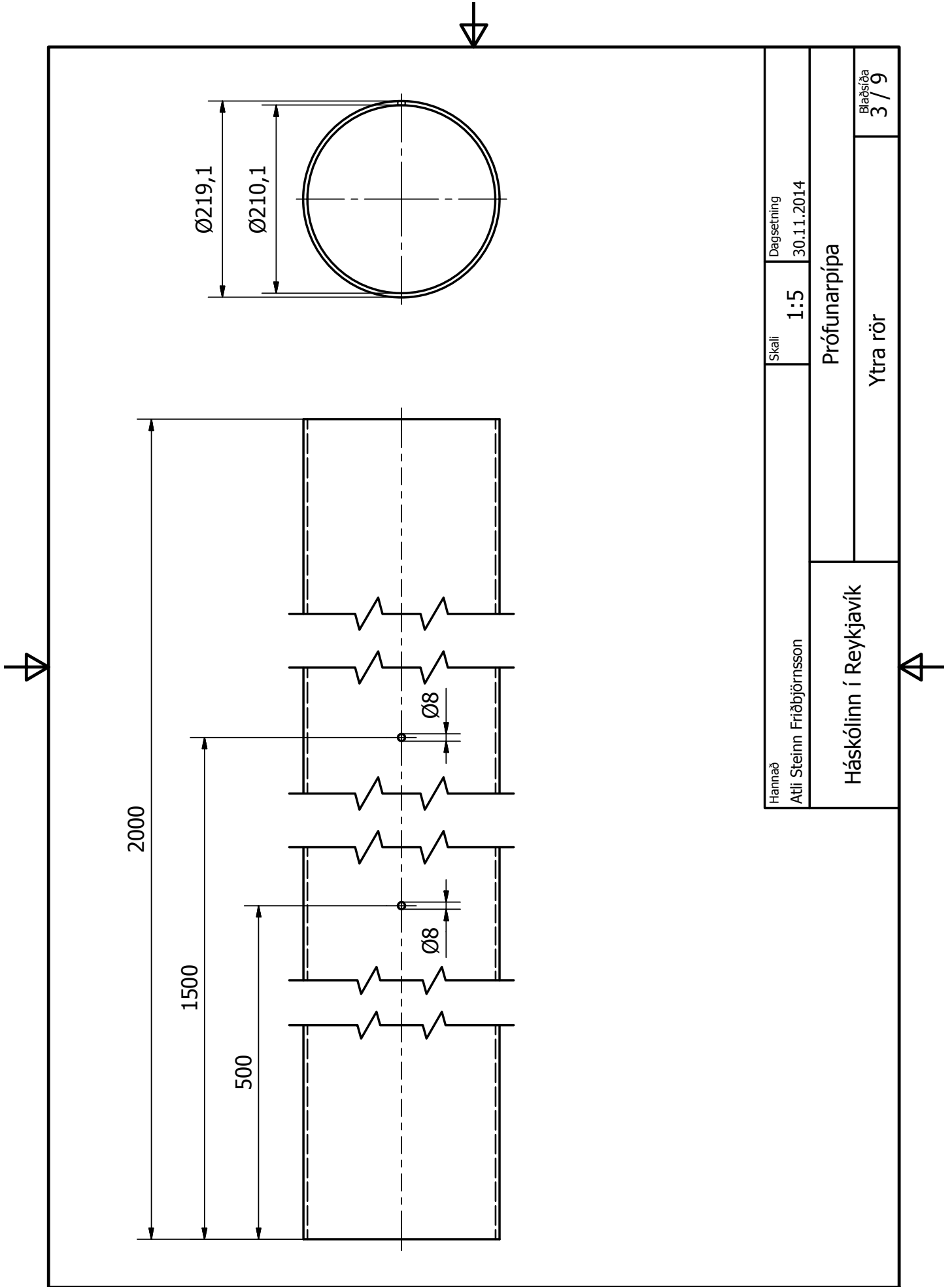
Blaðsíða
1 / 9





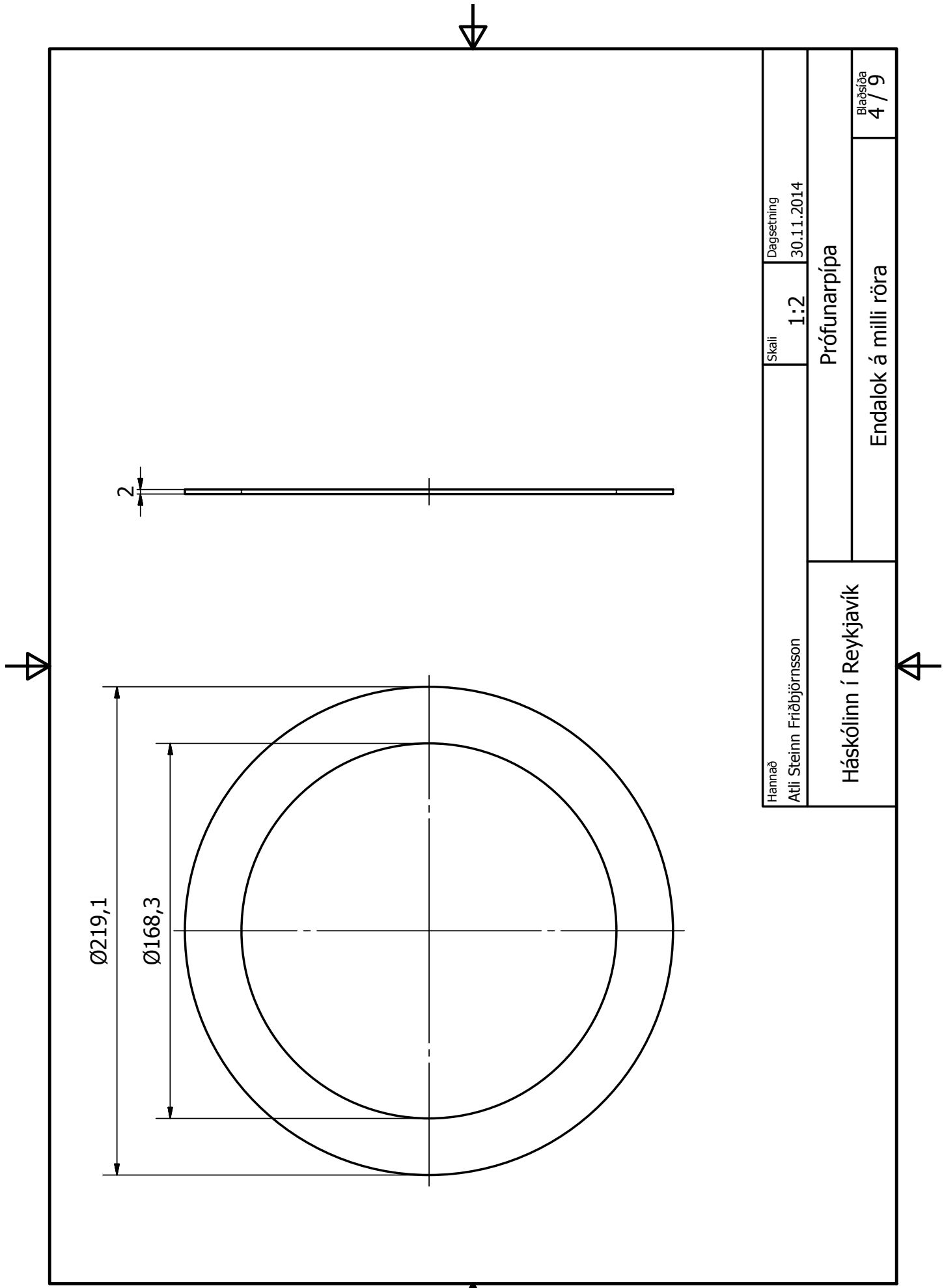
Hannað Atli Steinn Friðbjörnsson	Skali 1:5	Dagsetning 30.11.2014
Háskólinn í Reykjavík	Prófunarpípa	
	Innra rör	
		Blaðsíða 2 / 9





Hannað	Skali	Dagsetning
Atli Steinn Friðbjörnsson	1:5	30.11.2014
Háskólinn í Reykjavík		Prófunarpípa
		Ytra rör
		Blaðsíða
		3 / 9





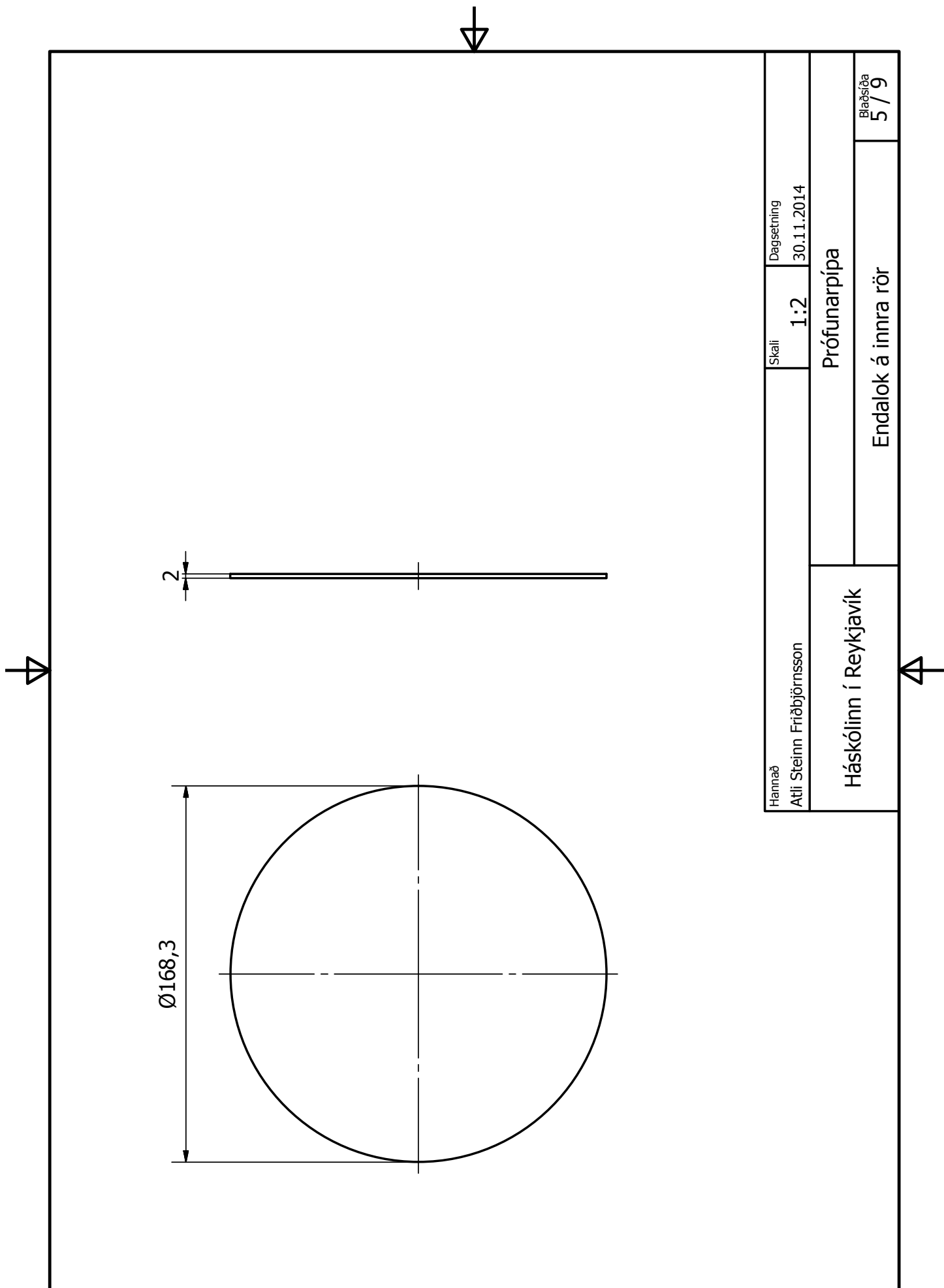
Ø219,1

Ø168,3

2

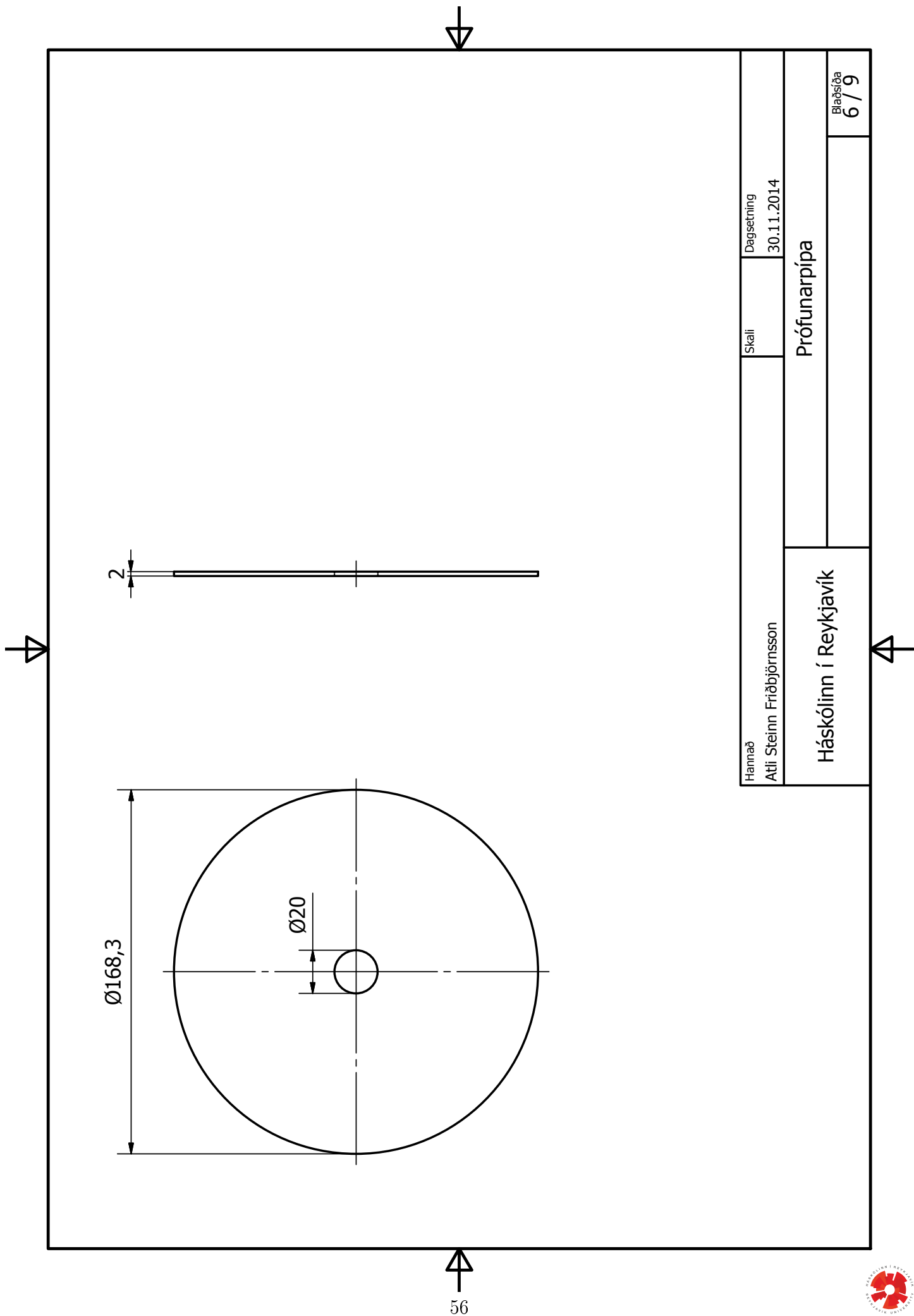
Hannað	Skali	Dagsetning
Atli Steinn Friðbjörnsson	1:2	30.11.2014
Háskólinn í Reykjavík		Prófunarpípa
Endalok á milli röra		Blaðsíða 4 / 9





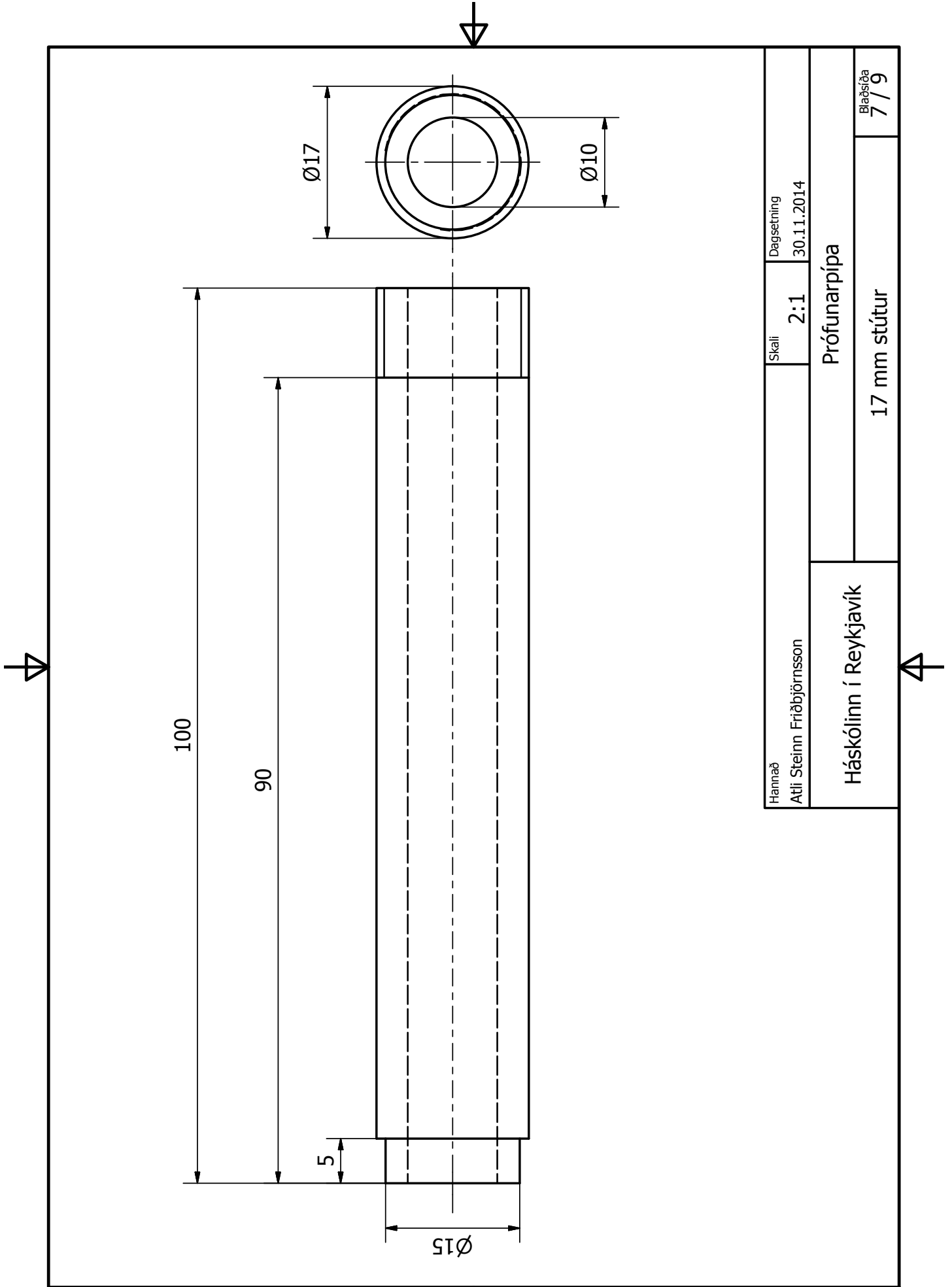
Hannað	Skali	Dagsetning
Atli Steinn Friðbjörnsson	1:2	30.11.2014
Prófunarpípa		
Háskólinn í Reykjavík		Blaðsíða
Endalok á innra rör		5 / 9





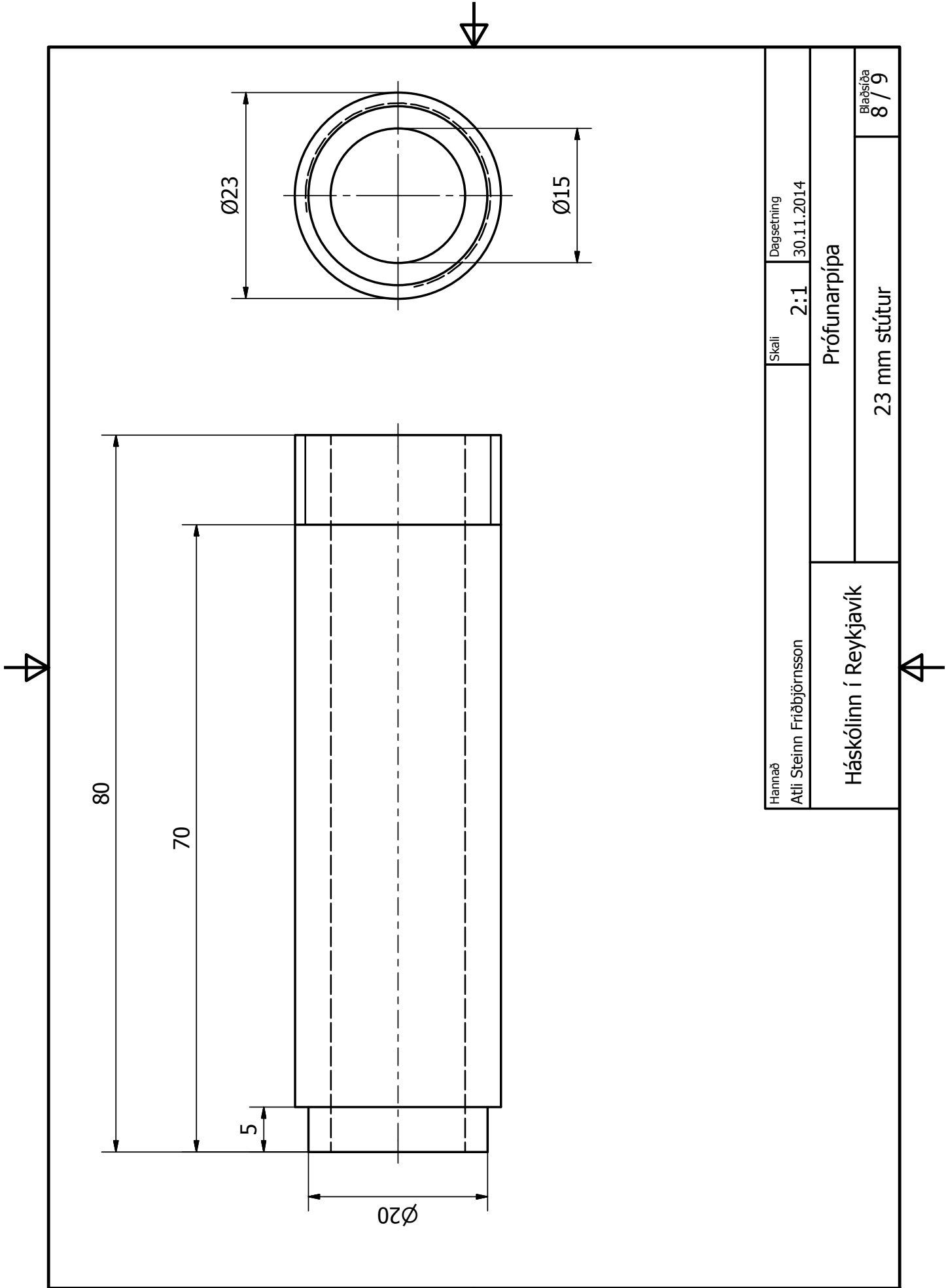
Hannað	Skali	Dagsetning
Atli Steinn Friðbjörnsson		30.11.2014
Háskólinn í Reykjavík		Prófunarpípa
		Blaðsíða
		6 / 9





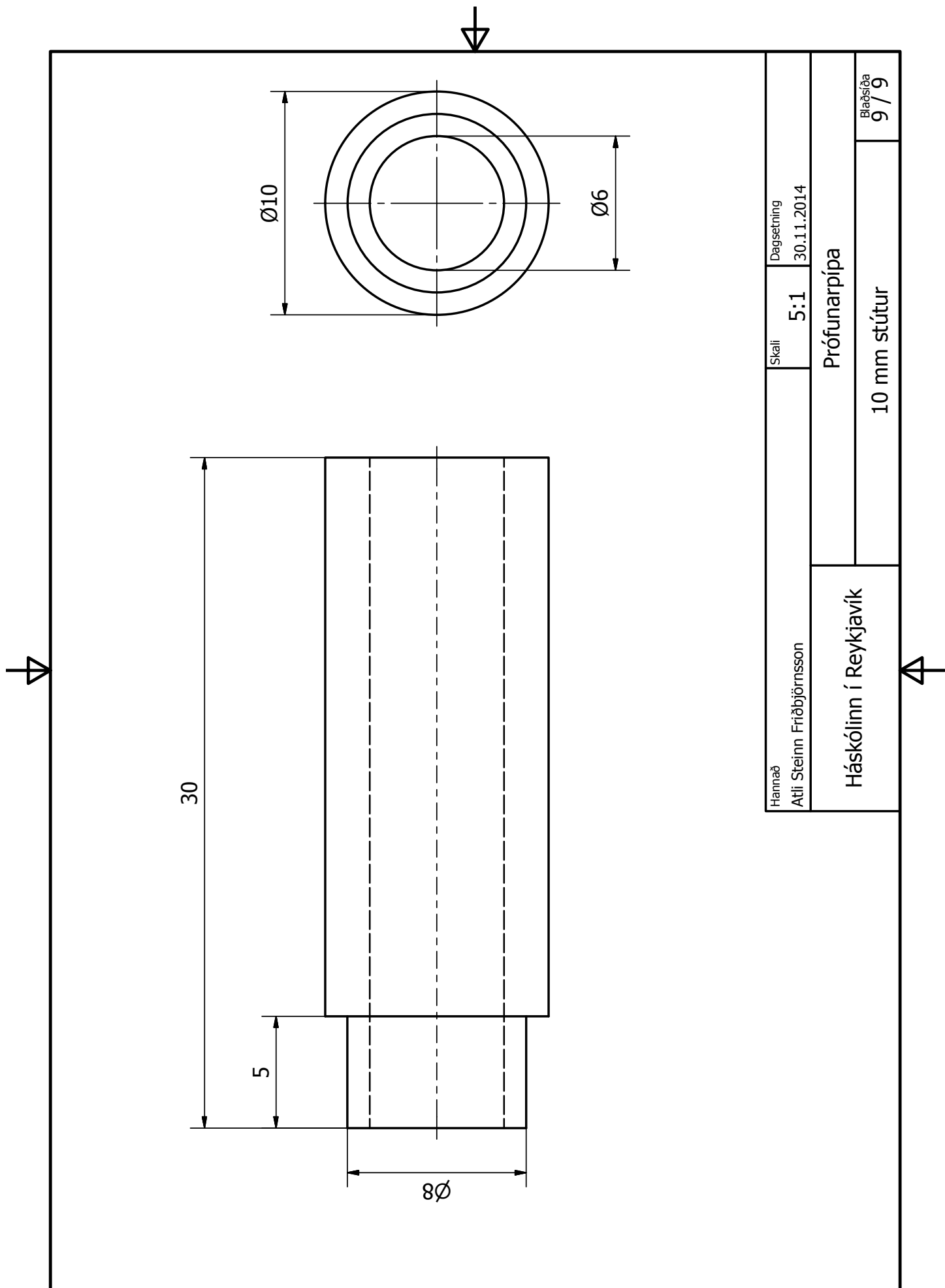
Hannað	Skali	Dagsetning
Atli Steinn Friðbjörnsson	2:1	30.11.2014
Háskólinn í Reykjavík		Prófunarpípa
17 mm stútur		Blaðsíða
		7 / 9





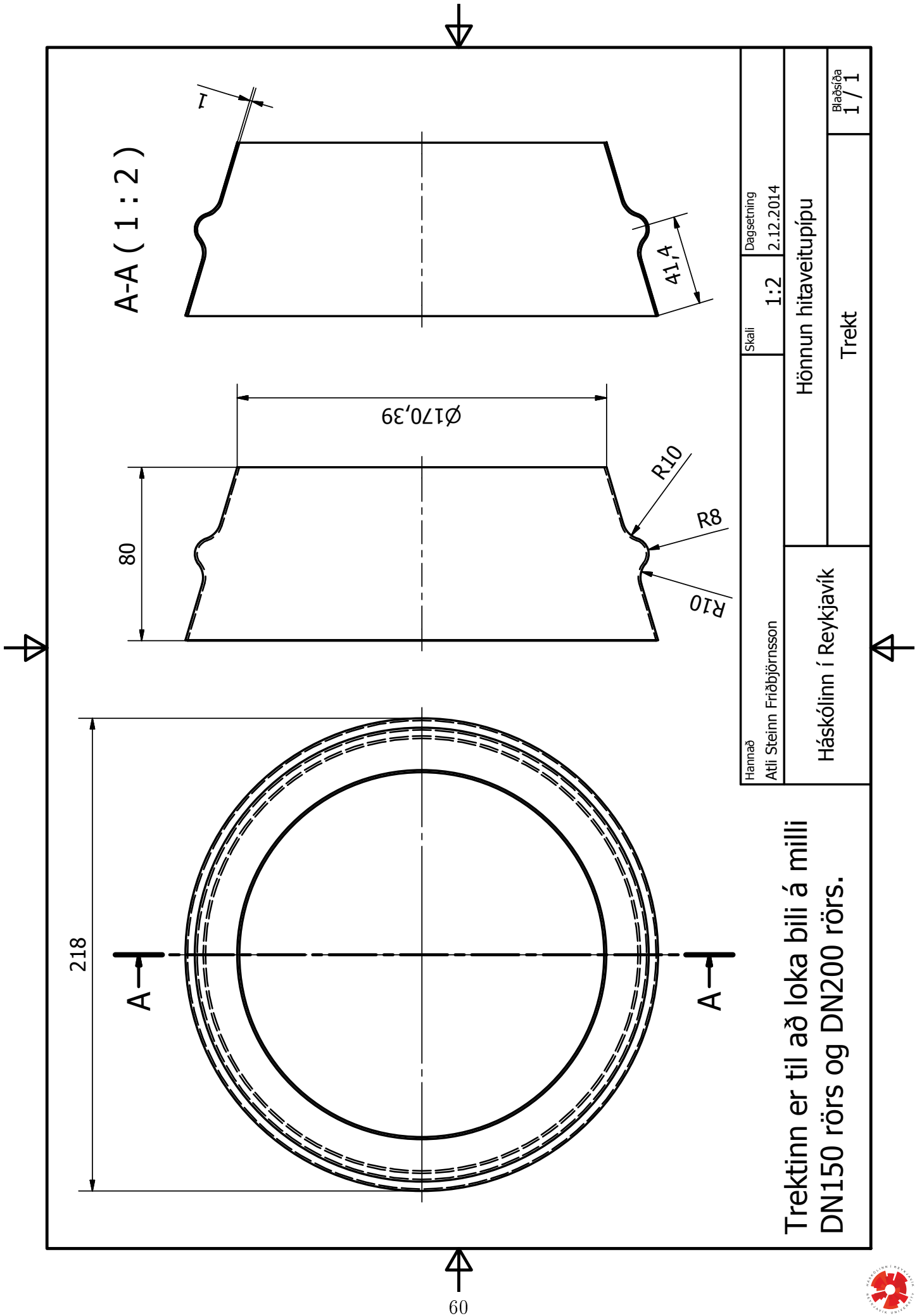
Hannað Atli Steinn Friðbjörnsson	Skali 2:1	Dagsetning 30.11.2014
Háskólinn í Reykjavík		Prófunarpípa
23 mm stútur		Blaðið 8 / 9





Hannað	Skali	Dagsetning
Atli Steinn Friðbjörnsson	5:1	30.11.2014
Háskólinn í Reykjavík		Prófunarpípa
10 mm stútur		Blaðsíða
		9 / 9





Trektinn er til að loka bili á milli DN150 rörs og DN200 rörs.

