



HÖNNUN Á NIÐURGRÖFNUM HÁHITAPÍPUM

Kristjón Sigurbergsson

Lokaverkefni í vél- og orkutæknifræði BSc

2010

Höfundur: Kristjón Sigurbergsson

Kennitala: 080283-4319

Leiðbeinandi: Þorleikur Jóhannesson

Tækni- og verkfræðideild

School of Science and Engineering



Tækni- og verkfræðideild

Heiti verkefnis:

Hönnun á niðurgröfnum háhitapípum

Námsbraut:

Vél- og orkutæknifræði BSc

Tegund verkefnis:

Lokaverkefni í tæknifræði BSc

Önn:

Haust

Námskeið:

Lok 1012

Höfundur:

Kristjón Sigurbergsson

Umsjónarkennari:

Indriði Sævar Ríkharðsson

Leiðbeinandi:

Þorleikur Jóhannesson

Fyrirtæki/stofnun:

Verkís

Ágrip:

Markmið verkefnis var að hanna búnað inn í DN250 háhitarör með ytra þvermál plastkápu 450 mm. Það samanstendur af stálröri, steinull, einangrunarfrauði og plastkápu. Þessi búnaður á að koma í veg fyrir að stálrörið í miðju rörs skemmi ullina sem er fyrir utan rörið sökum þunga og hreyfingar.

Burðargrind var hönnuð og teiknuð í Inventor, svo voru gerðar spennugreiningar á henni og varmagreiningar á öllu rörinu niðurgröfnu. Það voru bæði gerðir handreikningar og ANSYS greiningar og niðurstöður bornar saman. Grindin stent það álag sem hún á að geta borið og varmaleiðnin í gegnum rörið er ekki of mikil fyrir þá íhluti sem eru viðkvæmir fyrir háum hita.

Dagsetning:

10.12.2010

Lykilorð íslensk:

Varmaleiðni
Spennugreining

Lykilorð ensk:

Thermal conductivity
Stress analysis

Dreifing:

opin

lokuð

til:



1. Formáli

Þetta verkefni er skrifað sem lokaverkefni til B.Sc prófs í Vél- og orkutækni­fræði við Háskóla Reykjavíkur. Þorleikur Jóhannesson hjá Verkís átti hugmyndina að verkefninu. Ég vil þakka leiðbeinanda mínum Þorleiki Jóhannessyni, umsjónakennara Indriða Sævari Ríkharðssyni og Valdimari Hjaltasyni tækni­fræðing hjá Röraverksmiðjunni SET fyrir aðstoð við vinnslu þessa verkefnis.

Reykjavík 8. desember 2010

Kristjón Sigurbergsson



2. Efnisyfirlit

3.	Inngangur	1
4.	Markmið	3
5.	Háhitapípur	3
6.	Efniseiginleikar	3
6.1	Smíðastál	3
6.2	Ryðfrítt stál	4
6.3	Steinull	4
6.4	Einangrunarfrauð	5
6.5	Plastkápa	5
6.6	Sandur og mól	5
6.7	Vatn	6
7.	Hönnun	6
7.1	Hönnunarforsendur	6
7.2	Burðargrind	7
7.2.1	Fjarlægð á milli burðagrinda	9
7.2.2	Spennugreining	14
7.2.3	Varmatapsgreining	21
7.2.4	Þrýstingur á einangrunarfrauð frá burðargrind	27
7.3	Niðurbeygja stálrörs	29
7.4	Hlífðarhólkur á milli burðagrinda	30
7.5	Þani	32
7.6	Samanburður handreikninga og ANSYS reikninga	33
7.6.1	Burðargrind	33
7.6.2	Þrýstingur á einangrunarfrauð frá burðargrind	33
7.6.3	Niðurbeygja stálrörs	34
7.6.4	Hlífðarhólkur	34
8.	Niðurstöður	35
9.	Umræða og túlkun	36

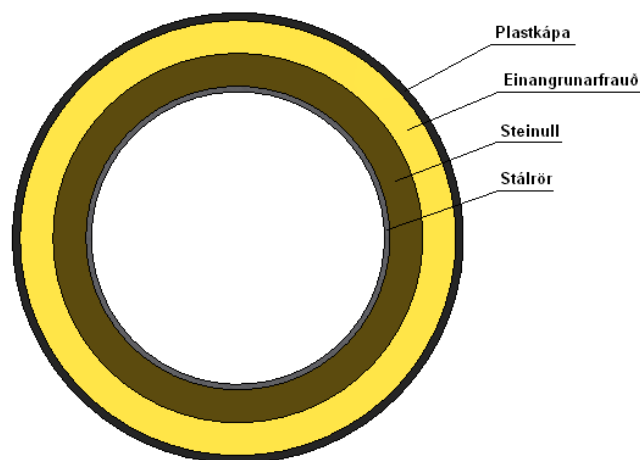


10. Heimildaskrá	37
11. Myndaskrá.....	38
12. Töfluskrá	39
13. Línurit.....	40
14. Viðaukar.....	41
14.1 Viðauki 1 - Öryggisstuðull.....	41
14.2 Viðauki 2 - Tækniblöð.....	42
14.3 Viðauki 3 – Reikningar.....	48
14.3.1 Álag á burðargrind.....	48
14.3.2 Fjarlægð á milli burðagrinda	49
14.3.3 Spennureikningar.....	51
14.3.4 Varmareikningar.....	55
14.3.5 Þrýstingur á einangrunarfrauð	59
14.3.6 Niðurbeygja stálrörs	59
14.3.7 Þrýstingur á hlífðarhólk.....	59
14.4 Viðauki 4 – Smíðateikningar	60

3. Inngangur

Í pípum sem lagðar eru frá borholum að jarðvarmavirkjunum er lagt mikið kapp á að varmatapið frá kvikefnum sem koma upp úr holunum, annaðhvort vatn, gufa eða blanda af þessu tvennu sé í lágmarki.

Sú tegund niðurgrafinna háhitalagna hér á landi sem menn hafa reynt að nota samanstanda af stálröri sem er innst, utan um það kemur steinull og utan við hana er einangrunarfrauð eða polyurethan og yst er plastkápa úr polyethelyne.



Mynd 3-1: Þverskurðarmynd af DN250 pípu fyrir endurhönnun.

Þessar pípur hafa verið að skapa vandamál sem er tvíþætt. Annars vegar pressast steinullin saman sökum þunga stálrörsins og innihaldi þess og við það missir hún töluvert af einangrunargildi sínu. Hins vegar gengur stálrörið örlítið fram og til baka sökum hitaþenslu og kippum sem koma frá borholu. Þessar færslur sarga ullina í sundur með tímanum því það er mikill þungi sem hvílir á henni. Að lokum liggur 170°C -230°C heit pípa á einangrunarfrauði sem þolir ekki svo háan hita og þar af leiðandi skemmir það. Þegar svo er komið verður ekki við neitt ráðið og pípan er í raun ónýtt.

Á meðan verkefninu stóð kynnti höfundur sér hvernig svona háhitapípur eru framleiddar hjá Röraverksmiðjunni SET á Selfossi. Það var gert til þess að fá betri tilfinningu fyrir verkefninu og hjálpaði vafalaust við hönnun á kerfinu.

Framleiðsla á svona háhitapípum fer þannig fram að byrjað er að setja 6 eða 12 metra langa plastkápu á búkka sem stálrör, steinull og einangrunarfrauð eiga að koma inn í. Því næst eru plastfjarlægðarstöfum og steinull komið fyrir á stálröri og því komið fyrir inn í plastkápu. Það eru plastfjarlægðarstafirnir sem sjá til þess að stálrörið sé miðjað í



plastkápunni. Því næst er endum kápunnar lokað með þar tilgerðum lokum og einangrunarfrauði sprautað inn. Þegar rörið er svo tekið í notkun bráðna þessir plastfjarlægðarstafir sem miðjuðu rörið við samsetningu en þá eiga ull og einangrunarfrauð að sjá til þess að halda stálröri fyrir miðju í kápu.

Við úrvinnslu á verkefninu voru aðallega notuð tvö forrit. Þau voru þrívíddarteikniforritið Autodesk Inventor sem allir íhlutir líkansins voru teiknaðir í og ANSYS sem gerði spennu- og varmagreiningar á kerfinu. Það forrit byggir á FEM (Finite element method) greiningu. Til einföldunar og tímasparnaðar var Excel skjal með öllum þeim stærðum sem íhlutir rörsins innihélt tengt við Inventor. Þegar margir íhlutir eru komnir saman í samsetta heild og einhverjar breytingar þarf að gera á líkaninu er mun einfaldara þegar allar stærðir íhluta eru á einum stað. Þegar tilbúið heildarkerfi er komið í samsetningu í Inventor er það fært yfir í ANSYS og gerð viðeigandi greining á því. Handreikningar voru einnig gerðir og þeir bornir saman við útkomur ANSYS greiningar. Mjög gott er að geta borið þetta saman því ef mikill munur var á þessum útkomum var yfirleitt eitthvað rangt, annaðhvort villa í handreikningum eða líkanið vitlaust skilgreint í ANSYS.

4. Markmið

Markmið þessa verkefnis er bæta og endurhanna niðurgrafnar háhitapípur af stærð DN250 með það að leiðarljósi að varmaleiðni í gegnum pípunu verði ekki það mikil að þeir hlutar sem eru viðkvæmir fyrir háum hita skemmist. Þá er markmiðið að koma í veg fyrir að þungi stálrörs og innihald þess þjappi saman steinull og að hreyfingar stálrörs inn í kápu af völdum hitaþenslu og kippum frá borholu sargi ullina í sundur.

5. Háhitapípur

Helstu ástæður fyrir því að grafa niður háhitapípur frá borholunum eru þær að varmatap í einangruðum pípum sem lagðar eru ofanjarðar eru 25-70% hærra en í sambærilegum niðurgrofnum stálpípum. (Oddur Björnsson, 1979). Einnig er það farið að skipta miklu máli nú til dags að sjónmengun í umhverfinu sé í lágmarki. Með því að grafa niður háhitalagnir frá borholum er stuðlað að því að skapa betri umræðu og bættari ímynd á jarðvarmavirkjunum.

6. Efniseiginleikar

Í þessum kafla verður fjallað um efniseiginleika allra þeirra efna sem koma til greina í þessu verkefni og hvaða íhlutir gætu hugsanlega verið úr hvaða efni. Val á efnum í þessu verkefni fer aðallega eftir styrk og varmaleiðni þeirra, þó er kostnaðarhliðin líka höfð til hliðsjónar.

6.1 Smíðastál

Vatnið sem kemur frá borholu fer í rör sem er úr smíðastáli samkvæmt staðli prEN253 (European Standard, 2008). Burðargrindin gæti hugsanlega verið úr smíðastáli, en þar ræður varmaleiðnin í gegnum hana hvort smíðastál eða ryðfrítt stál verður fyrir valinu. Ef notast á við hlífðarhólk þá yrði hann úr kaldvalsaðri plötu úr mjúku stáli.

Efniseiginleikar smíðastáls eru fengnir úr Introduction to heat transfer (Incropera, Dewitt, Bergman, & Lavine, 2007), Töflubók fyrir málm- og véltækni (Falk, Krause, & Tiedt, 2004) og Materials science and engineering an introduction (Callister, 2003). Efniseiginleikar eru gefnir upp við stofuhita, eða 20°C.

Tafla 6-1: Efniseiginleikar smíðastáls við 20°C.

1.0037 (St 37-2)		
Flotmörk	235	MPa
Fjaðurstuðull	207	Gpa
Eðlismassi	7850	kg/m ³
Varmaleiðni	60,5	W/m*°C
Poisson's Ratio	0,3	-

6.2 Ryðfrítt stál

Þeir hlutir í heildarlíkaninu sem gætu hugsanlega verið úr ryðfríu stáli eru allir íhlutir í burðargrindinni. Eins og áður sagði þá ræður varmaleiðni í grindarinnar hvaða stál verður valið.

Efniseiginleikar ryðfrís stáls eru fengnir úr Introduction to heat transfer (Incropera, Dewitt, Bergman, & Lavine, 2007), Töflubók fyrir málm- og véltækni (Falk, Krause, & Tiedt, 2004) og Materials science and engineering an introduction (Callister, 2003). Efniseiginleikar eru gefnir upp við stofuhita, eða 20°C.

Tafla 6-2: Efniseiginleikar ryðfrís stáls við 20°C.

1.4301 (X5CrNi18-10)		
Flotmörk	205	MPa
Fjaðurstuðull	193	Gpa
Eðlismassi	7900	kg/m ³
Varmaleiðni	14,9	W/m*°C
Poisson's Ratio	0,3	-

6.3 Steinull

Val á steinull fer aðallega eftir tveim þáttum. Þeir eru varmaleiðni í gegnum hana og þrýstipól hennar. Miðað er við að ull hafi þjappast saman um 10% af þykkt sinni við uppgefinn þrýsting.

Efniseiginleikar steinullar er fengin af heimasíðu steinullarverksmiðjunnar Steinull hf. (Steinull hf, 2010).

Tafla 6-3: Efniseiginleikar tveggja tegunda einangrunarulla.

Tegund	Eiginleikar við 200°C		
	Eðlismassi [kg/m ³]	Varmaleiðni [W/m*°C]	Þrýstipól [kPa]
Steinullarhólkar	100	0,036	20
Einangrunarstafir	150	0,053	55

6.4 Einangrunarfrauð

Í vali á einangrunarfrauði voru tvær tegundir teknar til skoðunar. Þær voru Elastopor H 2130/48/OT sem er jafnan skilgreint sem venjulegt einangrunarfrauð og Elastopor H 2130/46/OT sem er talað um sem háhitaeinangrunarfrauð. Þessar tvær tegundir hefur Röraverksmiðjan SET verið að nota. Megin munur þessara tegunda er eðlismassi og hitaþol. Einangrunarfrauðið þolir uppgefin hita í 30 ár.

Efniseiginleikar einangrunarfrauðs eru fengnir frá tæknifræðingi Röraverksmiðjunnar SET (Valdimar Hjaltason, 2010).

Tafla 6-4: Efniseiginleikar tveggja tegunda einangrunarfrauðs.

Tegund	Eðlismassi [kg/m ³]	Varmaleiðni [W/m ^{°C}]	Þrýstipól [MPa]	Hitapól [°C]	Freyðiþrýstingur [MPa]
Elastopor H 2130/48/OT	60	0,032	0,3	149	0,02
Elastopor H 2130/46/OT	78	0,032	0,3	175	0,02

6.5 Plastkápa

Einungis ein tegund plastkápu kom til greina. Það er sú sama og Röraverksmiðjan SET notar í öll sín rör sem er svört polyethelyne kápa. Ráðlagt mesta hitastig við plastkápu er um 80°C. Þar sem ekki er um að ræða fast kerfi skiptir binding einangrunarfrauðs við plastkápuna minna máli og því er í lagi að hitastig við kápu verði um 80°C

Efniseiginleikar plastkápu voru fengnir af heimasíðu Röraverksmiðjunnar SET (SET, 2010).

Tafla 6-5: Efniseiginleikar plastkápu.

Polyethelyne (PE)		
Eðlismassi	950	kg/m ³
Varmaleiðni	0,43	W/m ^{°C}
Bræðslumark	137	°C

6.6 Sandur og mül

Sá sandur sem notaður er í kringum plastkápuna er tiltölulega fínn eða ≤ 8 mm, hann er notaður til að verja plastkápuna. Ofan á sandinn er sett mül sem er talsvert grófar en sandurinn. Mölin sem er notuð er oft endurnýtt frá skurðgreftinum. Í tækniblaði fyrir sandinn í viðauka 2 sést að kornastærð hellulagningasands sé 0-11 mm, en 97% af honum ≤ 8 mm. Efniseiginleikar sands og malar eru fengnir í bókinni Varmaeinangrun húsa (Guðmundur Halldórsson og Jón Sigurjónsson, 1992) og af tækniblöðum frá Björgun (Börgun, 2010).

Tafla 6-6: Efniseiginleikar sands og malar.

Tegund	Varmaleiðni [W/m ² *°C]	Kornastærð [mm]
Hellulagningarsandur	0,3	0-11
Röragrús	0,7	0-32

6.7 Vatn

Í útreikningum er gert ráð fyrir að stálörrið sé fullt af vatni við 4°C því það skapar versta tilvikið. Vatn við 4°C er 1000 kg/m³.

7. Hönnun

Í neðangreindum hönnunarköflum verður fjallað um út frá hverju var gengið við hönnun á viðkomandi hlut. Jöfnur sem notaðar voru í handreikningum sýndar og lokasvör reikninga. Alla útreikninga er að sjá í viðauka 3.

7.1 Hönnunarforsendur

Þær hönnunarforsendur sem gengið var út frá var að hanna búnað fyrir rör af gerðinni DN250 sem hefur innra þvermál 263mm og ytra þvermál 273mm (European Standard, 2008). Það á að vera hægt að framleiða þessar háhitalagnir í 6m og 12m einingum. Hönnunarhitastig inni í stálpípu er 230°C og er það algjört hámark því meðalhiti yrði um 170°C. Miðað er við útihitastig sem 20°C til að skapa þokkalega slæmt tilvik. Gengið er út frá því að stálörrið sé fullt af vatni. Þar sem stálörrið hvílir á burðargrindum er álagið á þær fundið út frá eiginþunga stálrörs og innihaldi þess.

Gengið var út frá því að nota venjulegt smíðastál í burðargirndina til að byrja með vegna þess að það er ódýrara en ryðfrítt stál og þægilegra í vinnslu. En ef svo kæmi í ljós að varmaleiðnin yrði of mikil þá var haft í bakhöndinni að skipta út í ryðfrítt stál en það hefur minni varmaleiðni. Einnig er sá möguleiki fyrir hendi að skipta venjulega einangrunargauðinu (Elastopor H 2130/48/OT) út fyrir háhitaeinangrunarfrauð (Elastopor H 2130/46/OT).

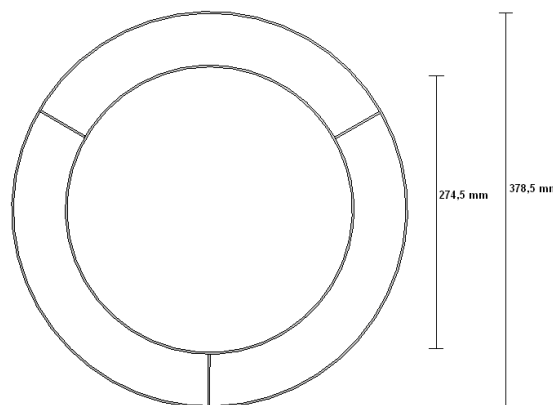
Í allri spennugreiningu var notaður öryggisstuðullinn 2,8. Hann var reiknaður með með „The classical rule of thumb. Factor of safety“ (Ullman, 2007) en í þessari reglu eru margfaldaðir saman fimm stuðlar. Hver og einn stuðull er metinn út frá fyrirfram ákveðnum skilgreiningum (sjá viðauka 1).

7.2 Burðargrind

Í þessum kafla verður farið í gegnum hvernig burðargrindin var hönnuð, hvaða vandamál hún á að leysa, virkni hennar og svo verða bornar saman útkomur á grind úr smíðastáli og ryðfríu stáli.

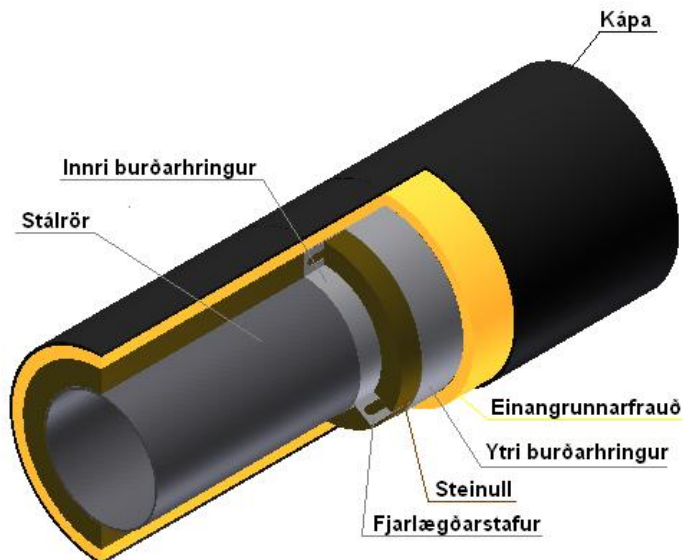
Hönnunin á burðargrindinni þurfti að leysa tvö megin vandamál fyrra kerfis. Þ.e.a.s. koma í veg fyrir að þungi stálrörs og innihald þess þjöppuðu ullinni saman og koma í veg fyrir að núningur rörs við ullina sargaði hana í sundur.

Grindin þurfti að vera nógu sterk til þess að halda uppi þunga rörs og innihaldi þess. Einnig mátti hún ekki leiða of mikinn varma í gegnum sig því takmörk eru á því hvað einangrunarfrauð þolir mikinn hita. Nokkrar hugmyndir komu upp af kerfum sem hugsanlega virkuðu en eftir fund með leiðbeinanda mínum var komist að þökkalega góðri niðurstöðu. Þessi burðargrind samanstendur af innri og ytri hring og þremur fjarlægðarstöfum með 120° á milli sín sem eru soðnir við hringina tvo með TIG suðu (mynd 7-1).



Mynd 7-1: Hönnun burðargrindar sem er 200 mm breið.

Grindin virkar þannig að stálrör liggur í innri hring og eru þrjú fjarlægðarstafir sem eru á milli innri og ytri hrings. Þeir bera þunga stálrörs og innihalds uppi og koma þar af leiðandi í veg fyrir að ullin sem er á milli rörs og einangrunarfrauðs þjappist saman. Ytri hringurinn hvílir á einangrunarfrauði og fyrir utan það er plastkápa (mynd 7-2).



Mynd 7-2: Lagmynd af heildarkerfinu með ytra þvermál plastkápu 450 mm.

Til þess að geta fundið kraftana sem verka á hverja burðargrind þarf að vita samanlagðan þunga stálrörsins og innihalds fyrir þessa 3 m sem gengið er út frá að séu á milli grinda til að byrja með. Fundinn er þungi stálrörs annarsvegar og vatns inn í röri hins vegar. Til að gera það er margfaldað saman þverskurðafatarmál, eðlismassi og lengd á milli burðagrinda fyrir rörið annars vegar og vatnið hins vegar. Þær þyngdir svo lagðar saman. Því næst er notað annað lögmál Newtons til þess að fá heildar kraftinn sem verkar á kerfið. Þ.e.a.s. tvær burðargrindur með þriggja metra rör á milli sín.

Þá er massi rörs og innihalds fyrir hverja 3 metra:

$$m_R = A_R * \rho_R * L [kg/3m] \quad (1)$$

$$m_I = A_I * \rho_I * L [kg/3m] \quad (2)$$

Þar sem:

- A_R og A_I = Þverskurðafatarmál stálrörs og vatns inn í rörinu [m^2]
- ρ_R og ρ_I = Eðlismassi stálrörs og vatns [kg/m^3]
- L = Lengd á milli burðagrinda [m]

$$m = m_R + m_I [kg/3m] \quad (3)$$

$$m = 261 \text{ kg/3m}$$

Því næst er annað lögmál Newtons notað til að finna heildar kraftinn sem verkar á hverja þrjá metra.

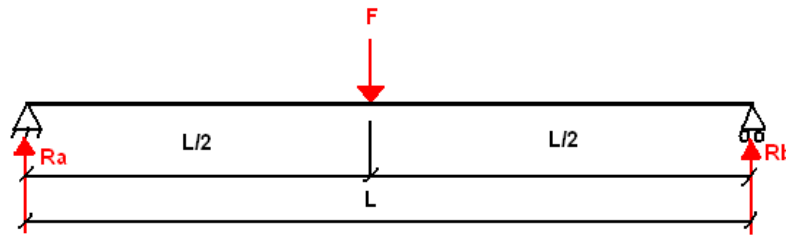
$$F = m * a [N] \quad (4)$$

Þar sem:

- m = Heildarmassi stálrörs og innihalds [kg]
- a = Hröðun, þyngdarhröðun jarðar í þessu tilfalli [m/s^2]

$$F = 2560 \text{ N}$$

Á einfaldan hátt má þá finna kraftinn sem verkar á hverja grind. Það er gert með því að finna undirstöðukraftana sem verka á einfalt undirstuddan bita með álagi á miðjan bitann (Krex, 2004).



Mynd 7-3: Einfalt undirstuddur bita með stöku álagi á miðjan bita.

$$R_a = R_b = \frac{1}{2} * F \text{ [N]} \quad (5)$$

Þar sem:

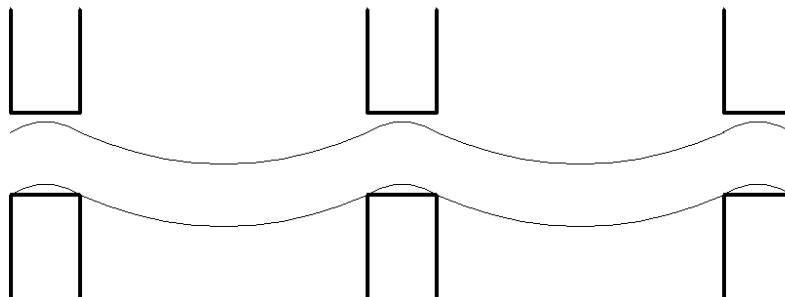
- F =heildarkrafturinn sem verkar á hverja 3 metra [N]

$$F=1280 \text{ N}$$

Heildarálagið á hverja burðargrind er komið og þá er hægt að gera nánari reikninga á því hvort þessir 3 metrar séu of mikið eða of lítið bil.

7.2.1 Fjarlægð á milli burðargrinda

Til þess að geta fullhannað og álagsgreint burðargrindina, þ.e.a.s. hversu breið hún á að vera, efnisþykktir í hringjum og fjarlægðarstöfum þarf að finna út fjarlægðina á milli þeirra. Ytra þvermál rörsins DN250 er 273mm (European Standard, 2008) og þenst það út við upphitun. Innri hringur í burðargrind þarf því að vera stærri en ytra þvermál stálrörs. Einnig má rörið ekki ná upp í innri hringinn þegar það teygir sig upp sökum niðurbeygju sem myndast á milli burðargrinda. (Sjá mynd 7-4).



Mynd 7-4: Gróf mynd af ýktri niðurbeygju á stálrörs á milli burðargrinda.

Þvermálsbreyting sökum hitamismunar í þunnveggja pípum er reiknuð með jöfnu 6.

$$d_{11} = d_1(\Delta T * a + 1) [m] \quad (6)$$

Þar sem:

- d_1 = Þvermál rörs fyrir hitaþenslu [m]
- ΔT = hitastigsbreytingin [$^{\circ}\text{C}$]
- a = Línulegur þanstuðull [$\frac{mm}{m * ^{\circ}\text{C}}$]

Þá verða þvermál rörsins eftir hitaþenslu:

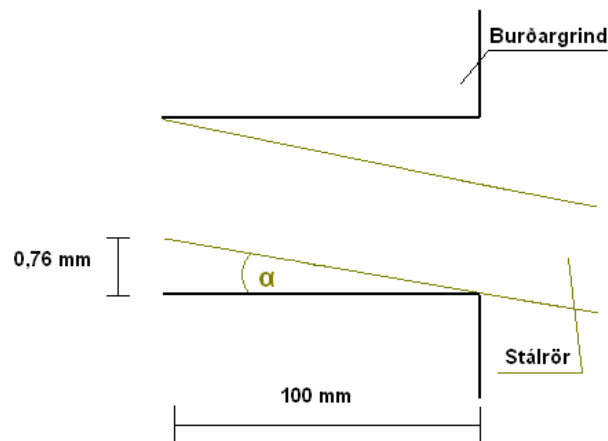
$$\underline{\text{Innra}=263,71\text{mm}} \quad \underline{\text{Innra}=273,74\text{mm}}$$

Bilið sem verður eftir þenslu rörs á milli grindar og rörs er:

$$\underline{L_2 = 273,74 - 273 = 0,76 \text{ mm}}$$

Gengið var út frá því að þvermál innri hrings burðargrindar sé 1,5 mm stærra en ytra þvermál rörs fyrir hitaþenslu. Þá verður bil á milli rörs og innri hrings 0,76 mm eftir hitaþenslu rörs. Út frá þessu bili má reikna mesta leyfilega hallahorn pípu áður en hún nær að teygja sig upp í burðargrind. Það horn myndast við niðurbeygju rörs á milli burðargrinda.

Ástæðan fyrir því að rörið má ekki teygja sig upp í efri brún innri hrings á burðargrind er sú að ef það gerist þá fær rörið ekki að leika frjálst inn í grind. Þá er komið þvingað kerfi sem gæti aflagaðs og skemmst.



Mynd 7-5: Mesta leyfilega hallahorn sem má myndast við niðurbeygju á stálröri.

Mesta leyfilega hallahorn sem getur myndast á milli burðargrindar og stálrörs:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{m}{a} \right) [^{\circ}] \quad (7)$$

Þar sem:

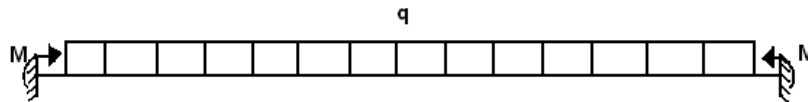
- m = Mótlæg skammhlið [m]
- a = Aðlæg skammhlið [m]

Þá er hallahorn rörs:

$$\alpha = 0,44^\circ$$

Þannig er hægt að stjórna fjarlægð á milli burðargrinda, með því að auka eða minnka bil á milli stálrörs og innri hrings burðargrindar ef niðurbeygjan verður ráðandi þáttur í hönnun grindar.

Þar sem kerfið er stöðufræðilega óákveðið voru notaðar þekktar formúlur til nálgunar á því. Hugsað var um kerfið sem einfalt undirstuddan bita með jafndreifðu álagi og vægi á báðum endum til að finna hallahornið sem myndast við burðargrindur (sjá mynd 7-7). Vægið á enda bita var fundið með bitatilfelli þar sem biti er fast innspenntur í báða enda með jafndreifðu álagi (sjá mynd 7-6).



Mynd 7-6: Fast innspenntur biti með jafndreift álag og vægi á endum.

Vægi á enda bita var fengið með jöfnu 8 (Krex, 2004):

$$M = \frac{1}{12} * q * L^2 \text{ [N * m]} \quad (8)$$

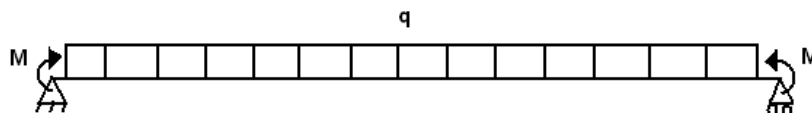
Þar sem:

- q = jafndreift álag yfir bitann [N/m]
- L = lengd bitans [m]

Þá er vægið sem virkar á enda bita:

$$M = 640,5 \text{ Nm}$$

Hallahorn bita við undirstöður var fengið með því að leggja saman hallahorn fengið frá vægi á endum bita og hallahorn fengið út frá jafndreifðu álagi.



Mynd 7-7: Einfalt undirstuddur biti með jafndreifðu álagi og vægi á endum.

Jafna fyrir hallahorn sökum vægis við undirstöður er (Krex, 2004):

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} * \frac{M * L}{E * I} \text{ [Rad]} \quad (9)$$

Þar sem:

- $M =$ Vægið á enda bitans [Nm]
- $L =$ Lengd bitans [m]
- $E =$ Fjaðurstuðull smíðastáls [N/mm²]
- $I =$ Tregðuvægi stálrörs [mm⁴]

Hallahorn fengið frá vægi á endum bita:

$$\alpha_1 = 0,007^\circ$$

Jafna fyrir hallahorn sökum jafndreifðs álags er (Krex, 2004):

$$\alpha_2 = \frac{1}{24} * \frac{q * L^3}{E * I} [Rad] \quad (10)$$

Þar sem:

- $q =$ Jafndreift álag yfir bitann [N/m]
- $L =$ Lengd bitans [mm]
- $E =$ Fjaðurstuðull smíðastáls [N/mm²]
- $I =$ Tregðuvægi stálrörs [mm⁴]

Hallahorn frá jafndreifðu álagi yfir bitann:

$$\alpha_2 = 0,007^\circ$$

Heildar hallahornið sem myndast er :

$$\alpha_H = \alpha_1 + \alpha_2 [Rad] \quad (11)$$

Þar sem:

- $\alpha_1 =$ Hallahorn fengið frá vægjum á enda bitans [°]
- $\alpha_2 =$ Hallahorn fengið frá jafndreifðu álagi yfir bitann [°]

Heildar hallahornið sem getur myndast við versta tilfelli þegar búið er að breyta Rad í °:

$$\alpha_H = 0,014^\circ$$

Út frá α_H og þvermálsbreytingu á röri sökum hitaþenslu og niðurbeygju sökum álags er hægt að finna bilið sem eftir er af þessum 1,5 mm sem var á milli rörs og innri hrings fyrir hitaþenslu rörs.

$$L_1 = \tan(\alpha_H) * A [m] \quad (12)$$

Þar sem:

- $\alpha_H =$ Heildar hallahornið sem getur myndast við versta tilfelli [°]
- $A =$ Helmingurinn af breidd burðargrindar [m]

Lengdin sem rörið teygir sig upp í burðargrind sökum niðurbeygju:

$$L_1 = 0,049 \text{ mm}$$

Þá er heildar bilið á milli rörs og innri hrings burðargrindar:

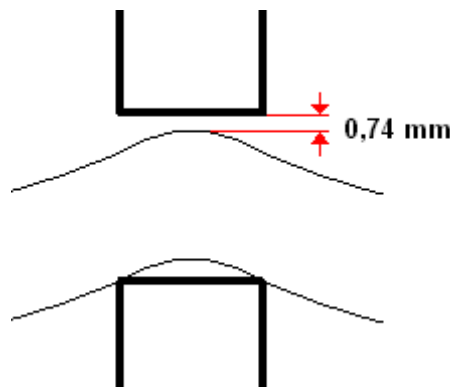
$$\Delta L = 1,5 - L_1 - L_2 \text{ [m]} \quad (13)$$

Þar sem:

- L_1 = Lengdin sem rörið teygir sig upp í burðargrindinni sökum niðurbeygjunnar [m]
- L_2 = Þvermálsbreytingin á stálrörinu sökum hitaþenslu [m]

Þá er heildarbilið:

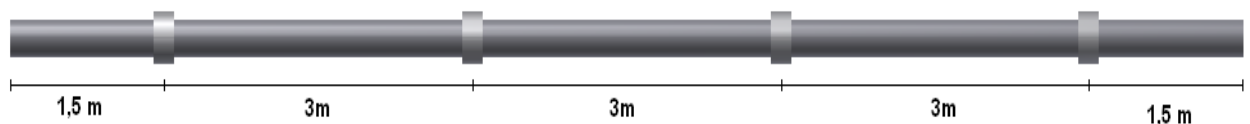
$$\Delta L = 0,74 \text{ mm}$$



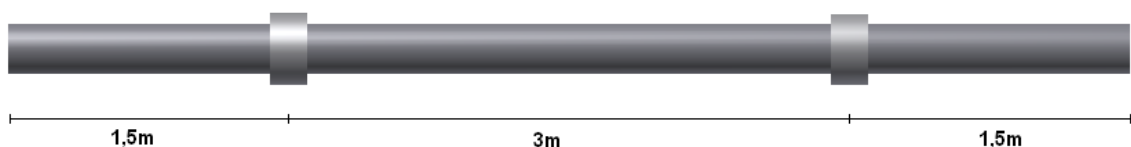
Mynd 7-8: Bilið á milli burðargrindar og stálrörs sem myndast í niðurbeygju og eftir hitaþenslu.

Þetta bil ætti að vera hæfilegt því rörið þarf að geta leikið laust í burðargrind. Einnig er gert ráð fyrir möguleika á smávægilegri smíðaskekkju.

Ákveðið var að nota 3m á milli burðargrinda því sú lengd á milli hentar mjög vel til að fá jafna dreifingu grinda og minnsta mögulega bil á milli grindar og rörs er ásættanlegt. Það passar að nota fjórar burðargrindur í 12 m einingarnar og tvær í 6 m einingarnar. Fyrsta grindin yrði 1,5 m frá brún svo næstu þrjár með 3 m millibili. Þannig þegar mörg rör eru soðin saman hvert á eftir öðru eru alltaf 3 m á milli burðargrinda.



Mynd 7-9: Deiling burðargrinda á 12m röri.

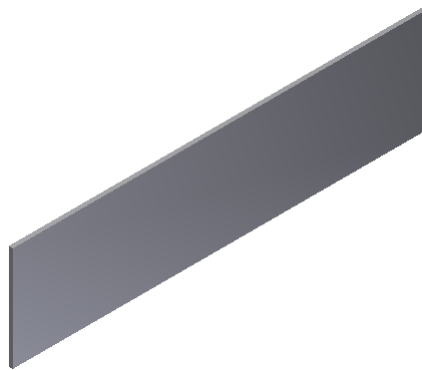


Mynd 7-10: Deiling burðargrinda á 6m röri.

7.2.2 Spennugreining

Fjarlægðarstafirnir eru krítískur þáttur í burðarþoli og varmaleiðni grindar. Byrjað var að álagsgreina grindina í ANSYS og finna heppilegar efnisþykktir fyrir innri hring, ytri hring og fjarlægðarstafi. Hönnunin á fjarlægðarstöfum hvað varðar spennugreiningu annars vegar og varmagreiningu hins vegar hélst mjög mikið í hendur. Ef fjarlægðarstafir eru hafðir frekar massífir og engin göt í þeim þá er varmaleiðnin í gegnum þá of mikil og þar af leiðandi hitastigið við einangrunarfraud mögulega yfir leyfilegum mörkum. En á hinn bóginn ef götin í fjarlægðarstöfum eru of stór þá kemur það niður á burðarþoli stafa. Þannig það þurfti að finna hinn gullna meðalveg í þessu sem endaði með miklu flakki á milli burðarþolshliðar og varmahliðar. Að lokum fannst heppileg lausn.

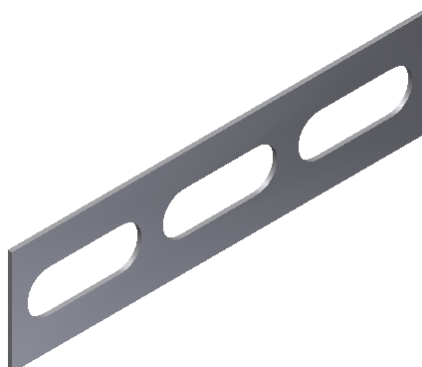
Í byrjun spennugreiningar var ákveðið að hugsa ekkert út í varmaleiðni í gegnum fjarlægðarstaf. Heldur að hanna staf sem héldi þessum þunga uppi. Fyrsta hugmyndin var einfaldur rétthyrningur með 2 mm efnisþykkt.



Mynd 7-11: Frumhönnun á fjarlægðarstaf.

Þessi hönnun var vel innan marka hvað spennur varðar en varmaleiðnin í gegnum hann var hins vegar of mikil. Svo farið var í það að hanna staf sem með bæði þessi sjónarmið að leiðarljósi, þ.e.a.s. burðarþol og varmaleiðni.

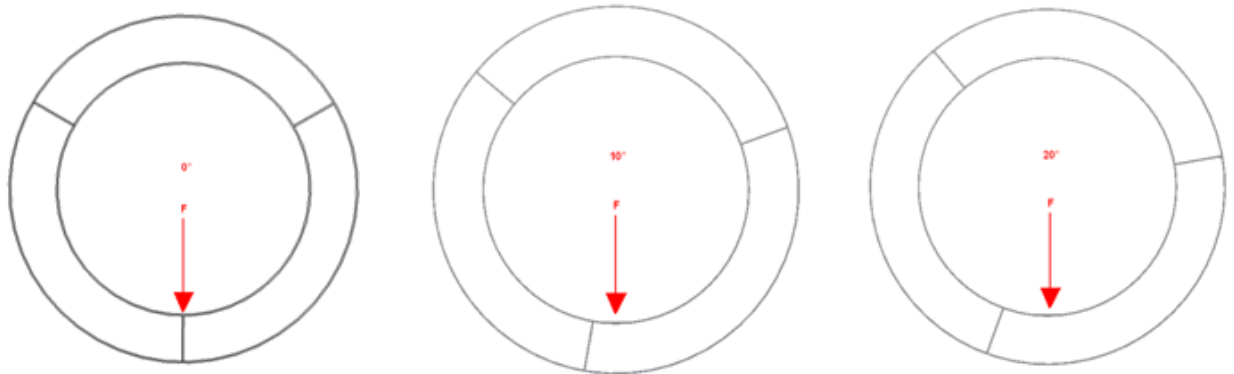
Eftir mjög margar hugmyndir og greiningar á hinum ýmsu útfærslum fannst ein mjög góð sem þolir álagið vel og skilar töluvert minni varma í gegnum sig en fyrri hönnun.



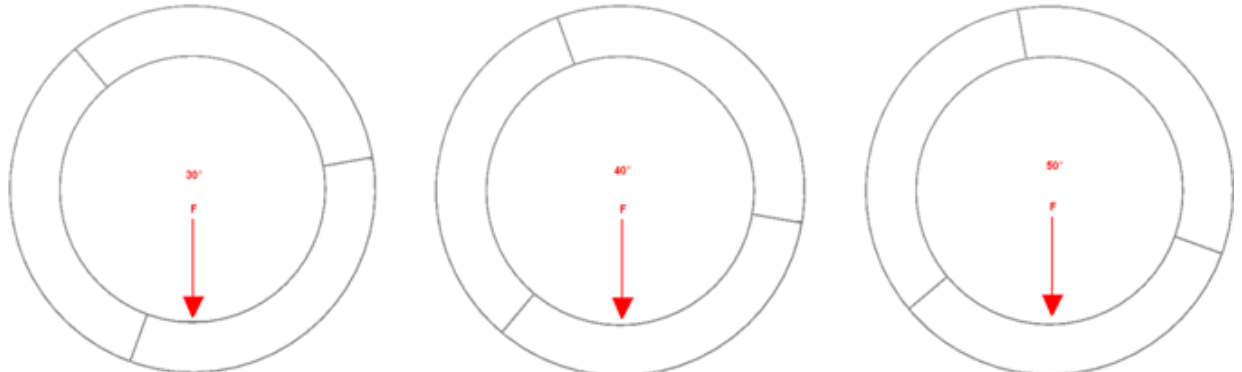
Mynd 7-12: Lokahönnun á fjarlægðarstaf.

Eftir heimsókn austur á Selfoss í röraverksmiðjuna SET þar sem höfundur kynnti sér framleiðslu á samskonar rörum var ákveðið að það væri of tímafrekt í framleiðslu og skapaði vandræði ef burðagrindur þyrftu að snúa á einhvern ákveðin hátt inn í rörum. Þannig að hönnunin gekk út frá því að grindurnar máttu snúa hvernig sem er inn í rörunum. Það gerði það að verkum að finna þurfti versta tilvik hvað varðar spennur í stöfum og aflögun grindar.

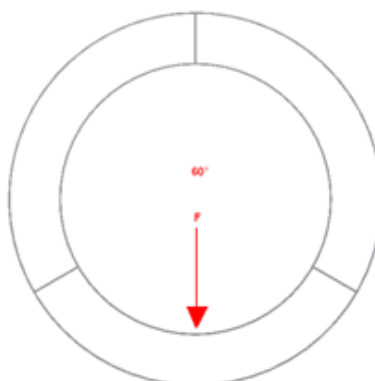
Byrjað var að skilgreina að 0° var þegar álagið var beint ofan á fjarlægðarstaf (sjá fyrsta tilfelli á mynd 7-13). Þar sem 120° eru á milli fjarlægðastafa þarf aðeins að greina frá $0-60^\circ$ því frá $60-120^\circ$ er nákvæmlega eins og frá $0-60^\circ$. Burðagrindin var sett í ANSYS og þessi tilvik eins og sést á myndum 7-13 til 7-15 greind.



Mynd 7-13: Álagstilvik á grind 0° , 10° og 20° .

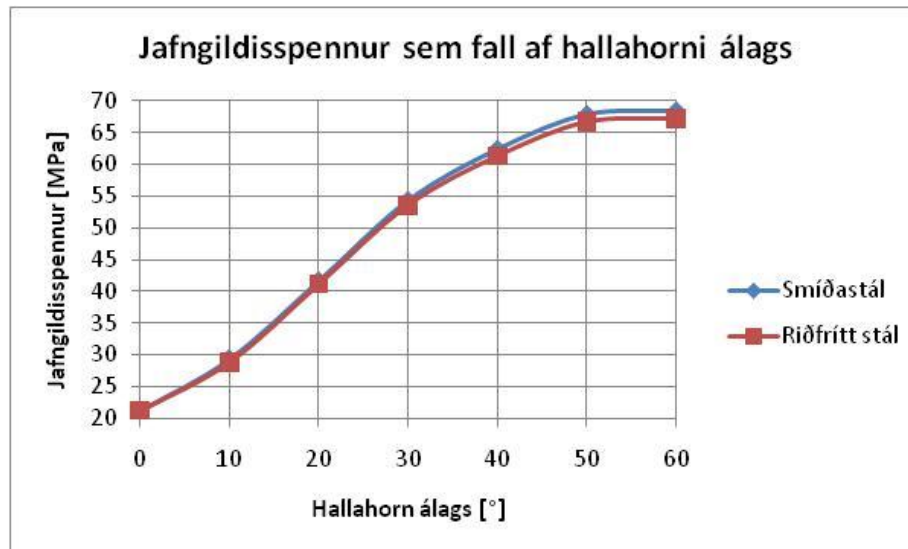


Mynd 7-14: Álagstilvik á grind 30° , 40° og 50° .



Mynd 7-15: Versta álagstílfelli á grind.

Versta álagstilvik á burðargrind er þegar álagið er mitt á milli fjarlægðarstafa eða við 60° . Mesta aflögun verður neðst í innri hring eins og sjá má á mynd 7-17. Í tveim neðri fjarlægðarstöfum myndast þrýstispennur. Hrein togspenna myndast í þeim efsta. Þær voru það vel innan marka að ekki þarf að skoða það frekar.

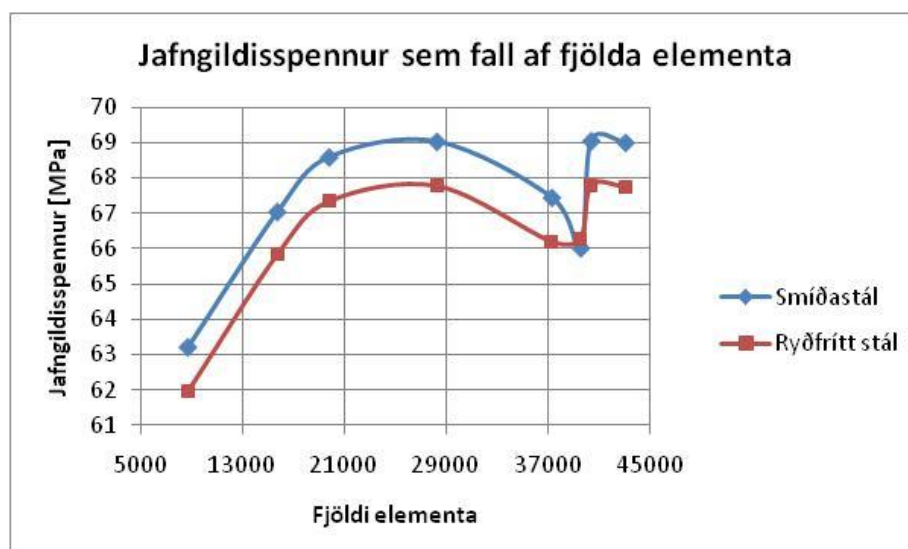


Línurit 7-1: Spennur sem fall af hallahorni álags á grind fyrir smíða- og ryðfrítt stál.

Eins og sést á línuriti 7-1 þá skiptir mjög litlu máli hvort stálið er valið hvað spennur varðar. Bæði stálin eru yfir mörkum öryggisstuðuls eins og sést í töflu 7-1.

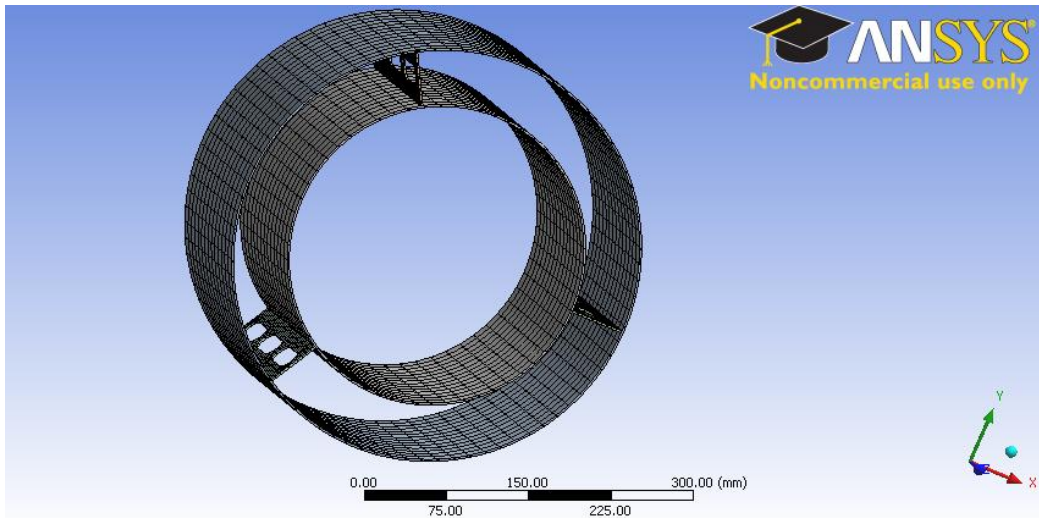
Versta tilvik eins og á mynd 7-15 var tekið og gerð nákvæmari greining á því. Það var gert með því að gera „mesh converge check“. Sú greining gengur út á að byrja með elementfjölda líkans tiltölulega lágan og greina. Hækka svo fjöldann jafnt og þétt þar til jafnvægi fæst í niðurstöðu.

Á mynd 7-16 sést möskvi af grindinni. Með því að auka elementfjölda þéttist möskvinn og á hinn bóginn dreifist úr honum ef elementfjöldi er lækkaður.



Línurit 7-2: Jafngildisspennur í fjarlægðarstaf sem fall af fjölda elementa fyrir smíða- og ryðfrítt stál.

Í byrjun kemur yfirsíkot svo undirsíkot en að lokum fæst jafnvægi og það er nákvæmasta niðurstaðan. Ástæða fyrir þessum mun er að ANSYS nær að ítra sig nær og nær raunverulegri niðurstöðu með hækkandi fjölda elementa. Eins og sést á línuriti 7-2 kemst ekki almennilegt jafnvægi á greiningu fyrr en um 40000 element.

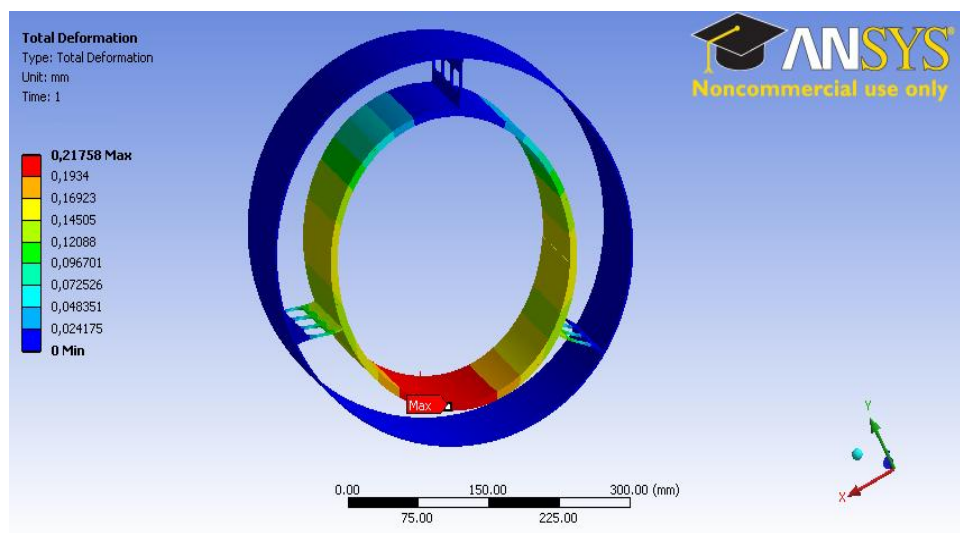


Mynd 7-16: Möskvi af burðargrind.

Í töflu 7-1 sjást hæstu spennur, mesta aflögun og öryggisstuðull grindar annarsvegar úr smíðastáli og hins vegar úr ryðfríu stáli.

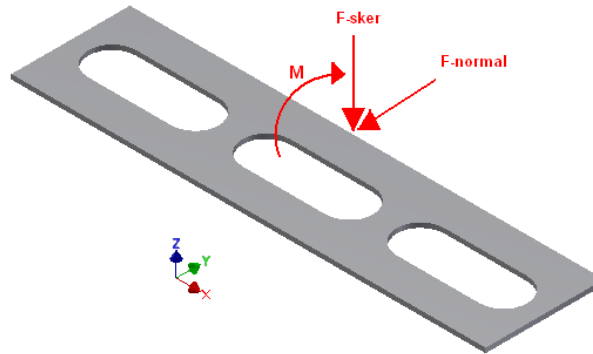
Tafla 7-1: Hæstu spennur, mesta aflögun og öryggisstuðull efna í burðargrind við versta tilvik.

Efni	Jafngildisspennur [MPa]	Mesta aflögun [mm]	Öryggisstuðull
Smíðastál	69,02	0,24	3,41
Ryðfrítt stál	67,8	0,24	3,03



Mynd 7-17: Sýnir á hvaða hátt grind aflagast við versta tilfalli. Myndin er 77 sinnum ýktari en raunniðurbeygja.

Fyrir handreikninga á jafngildisspennum í fjarlægðarstaf var notast við ANSYS á þann hátt að teknar voru upplýsingar um hæstu skerkræfta, mesta vægi og hæstu normalkraft sem verkar á fjarlægðarstaf í versta tilviki. Jafngildisspennan eða Von Mises jafngildið er reiknað út frá því. Það samanstendur af skerspennum, beygjuspennum og normalspennum.



Mynd 7-18: Þeir kraftar sem verkar á fjarlægðarstaf.

Beygjuvægið sem verkar á fjarlægðarstafi í versta tilfalli myndast því að álag á grind leggst á innri hring grindar. Þar sem fjarlægðarstafir eru soðnir við innri og ytri hring byrjar sá innri að pressa fjarlægðarstafi niður. Við það myndast vægi um minnsta þversnið í staf sem orsakar spennuhækkun. Jafnan fyrir beygjuspennur í svona þversniði er (Budynas & Nisbett, 2008):

$$\sigma_M = \frac{M * y}{I} [MPa] \quad (14)$$

Þar sem:

- M = Vægið sem verkar á fjarlægðarstafi frá þunga innri hring [N*mm]
- y = Sú fjarlægð sem er frá helmingi efnisþykktar að brún stafs [mm]
- I = Tregðuvægi fjarlægðarstafs [mm⁴]

Normalkraftur verkar þvert eftir fjarlægðarstaf út frá innri hring og þrýstir honum saman og myndar þar af leiðandi þrýstispennur (sjá mynd 7-20). Eins og í beygjuvægi myndast hæstu spennur af völdum normalkrafts í minnsta þversniði. Jafna fyrir spennum vegna normalkrafts er (Budynas & Nisbett, 2008):

$$\sigma_N = \frac{F_{normal}}{A} [MPa] \quad (15)$$

Þar sem:

- N = Normalkraftur sem verkar á fjarlægðarstaf [N]
- A = Minnsta þverskurðarflatarmál fjarlægðarstafs (mynd 7-19) [mm²]



Mynd 7-19: Þverskurðarmynd af fjarlægðarstaf, þar sem minnsta þverskurðarflatarmálið er blátt.

Skerkraftur verkar hornrétt á normalkraft eins og sést á mynd 7-18. Þessi skerkraftur myndar skerspennur í minnsta þversniði fjarlægðarstafs eins og í hinum tilfellunum. Jafna fyrir skerspennunum er (Budynas & Nisbett, 2008):

$$\tau = \frac{F_{sker}}{A} [MPa] \quad (16)$$

Þar sem:

- F_{sker} = Skerkraftur sem verkar á fjarlægðarstaf [N]
- A = Minnsta þverskurðarflatarmál fjarlægðarstafs (mynd 7-19) [mm²]

Normalspennur í þverniði eru samanlagðar spennur af völdum beygjuvægis og normalkrafts. Jafna fyrir normalspennum er (Budynas & Nisbett, 2008):

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_N [MPa] \quad (17)$$

Þar sem:

- σ_M = Spennur af völdum beygjuvægis [MPa]
- σ_N = Spennur af völdum normalkrafts [MPa]

Þegar normalspennur og skerspennur eru komnar er hægt að finna jafngildisspennur sem verka í minnsta þversniði fjarlægðarstafs út frá jöfnu (Budynas & Nisbett, 2008):

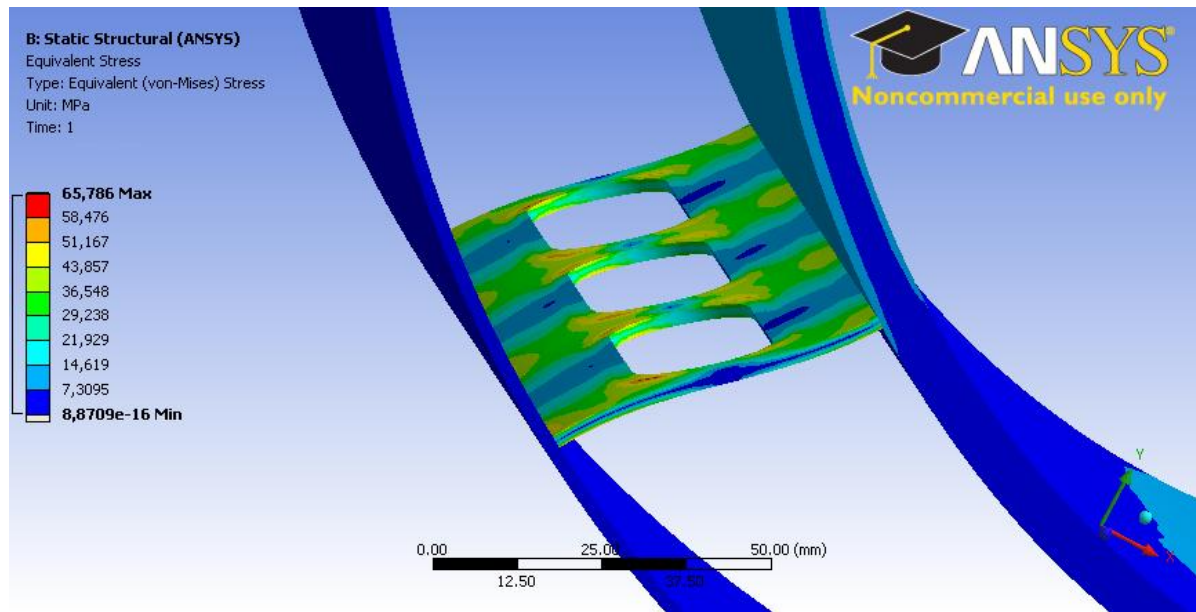
$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} [MPa] \quad (18)$$

Þar sem:

- σ = Normalspennur [MPa]
- τ = Skerspennur [MPa]

Þá eru handreiknuð gildi jafngildisspenna í minnsta þversniði:

$$\sigma' = 36,84 \text{ MPa}$$



Mynd 7-20: Sýnir hvernig fjarlægðarstafir afmyndast við versta tilfelli. Aflögun er 69 sinnum ýktari en raun aflögun.

Eins og áður hefur verið komið inn á eru fjarlægðarstafir soðnir við innri og ytri hring burðargrindar með tvöfaldri kverksuðu. Heppilegast er að nota volframsuðu sem er betur þekkt sem TIG suða. TIG suða er hágæða suða og hentar vel fyrir þunnar efnisþykktir á bilinu 0.3 – 3mm. Suðan er hlífðargassuða með volframskauti sem myndar ljósboga á milli sín og vinnslustykkis. Til að koma í veg fyrir að súrefni oxist við suðuna er hlífðargasi dælt meðfram skautinu. Þær gastegundir eru oftast Argon eða Helíum.

Við reikninga á suðum þarf að taka tillit til: Skerspenna sem myndast vegna vinduálags og skerálags, suðumunsturs, a-máls suðu og lengd hennar.

Flotmörk þeirrar TIG suðu sem miðað er við er 290 MPa (Shyu, Huang, Tseng, & Chou, 2008). Miðað við öryggisstuðul uppá 2,8 þá mega spennur í suðum ekki fara yfir 103,6 MPa. Ákveðið var að sjóða órofnu tvöfalda kverksuðu með a-mál 1mm.

Skerspennur sem myndast frá skerálagi sem verka á hálsmál suðu er (Budynas & Nisbett, 2008):

$$\tau' = \frac{F_{sker}}{A} [MPa] \quad (19)$$

Þar sem:

- F_{sker} = Skerkraftur sem verkar á suðu [N]
- A = Hálsmál suðu [mm^2]

Vinduálag sem verkar á suðu samanstendur af vægi vegna vindu og vægi sem myndast þegar skerkraftur verkar á þversnið.

Jafna fyrir þessum spennum er (Budynas & Nisbett, 2008):

$$\tau'' = \frac{M * r}{I} [MPa] \quad (20)$$

Þar sem:

- M = Vægi vegna skers og vindu [N*mm]
- r = Mesta fjarlægð frá þyngdarmiðju að suðu [mm]
- I = Flatartregðuvægi [mm⁴]

Heildarspennur sem verka á suðuna samanstanda af tveim ofangreindum spennum (Budynas & Nisbett, 2008):

$$\tau_{max} = \sqrt{\tau''^2 + \tau'^2} [MPa] \quad (21)$$

Þar sem:

- τ'' = Skerspennur í suðu vegna vinduálags [MPa]
- τ' = Skerspennur í suðu vegna skerálags [MPa]

Heildar spennur sem myndast í suðum eru:

$$\tau_{max} = 35,94 \text{ MPa}$$

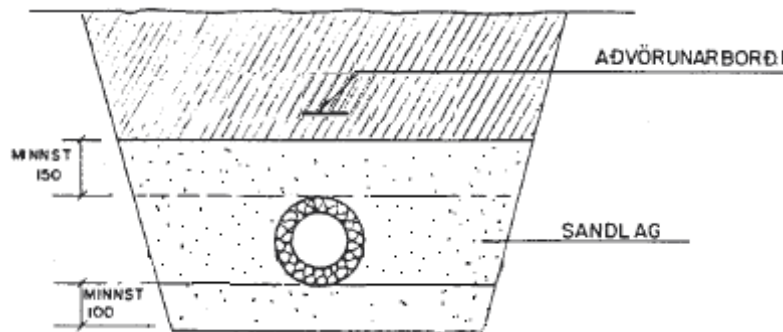
7.2.3 Varmatapsgreining

Í þessum kafla verður gerð varmagreining á heildar kerfinu. Bæði ANSYS greiningar og handreikningar og bornir saman þeir möguleikar að nota smíðastál, ryðfrítt stál, steinullarhólka og einangrunarstafi.

Eins og sagt var frá áður héldust þeir tveir þættir töluvert í hendur sem snéru að burðarþoli og varmaleiðni fjarlægðarstafs. Til þess að geta gert varmagreiningu á grindinni þarf að taka tillit til heildarkerfis. Ekki er nóg að horfa bara á grindina og greina hana heldur veður að horfa á rörið niðurgrafið með öllum þeim íhlutum sem í því eru og einnig vita varmaleiðnistuðul allra efna og hönnunarhitastig kerfisins. Með þessu fæst raunhæfasta niðurstaðan. Þar af leiðandi fást krítísku hitastigin sem réttust. Þau eru hitastigið við einangrunarfrauð og plastkápu.

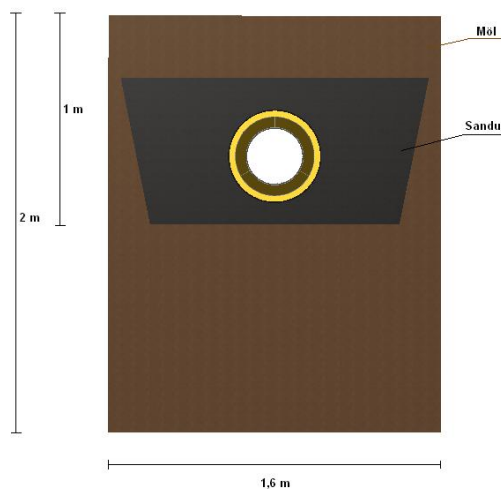
Gengið var út frá almennum reglum á niðurgröfnum hitaveitupípum skv. hitaveituhandbók samorku (Gísli Geir Jónsson og Oddur B. Björnsson, 1999). Í henni segir að rör að þvermáli 450 mm eigi að vera grafið niður á 1 metra dýpi og botnbreidd skurðar eigi að vera minnst 0,85 metra breiður en ef pípurnar eru soðnar saman ofan í skurðinum þá er æskilegt að minnst séu 300 mm frír frá plastkápu að skurðvegg sem gerir botnsbreidd skurðar 1050 mm í þessu tilviki. Lágmark á að vera 100 mm af sandi í skurðbotni. Í kringum kápuna er fyllt með eins eða samskonar sandi og skal það efni ná minnst 150 mm yfir hæsta punkt plastkápu. Ofan á sandinn er settur aðvörunarborði til varnar pípunni. Svo er fyllt uppí skurðinn með grófri mól, oft sömu mól og var í jarðveginum þar fyrir.

Sú krafa hefur verið almennt hér á landi að sandurinn sem fyllt er upp með í kringum kápuna sé ≤ 8 mm og er mölin sem fer ofan á sandinn grófari.



Mynd 7-21: Jarðvinnsluþversnið af niðurgröfnu hitaveituröri. Mynd fengin úr hitaveituhandbók Samorku.

Byrjað var á því að greina rörið niðurgrafið. Til þess að hafa líkanið sem nákvæmast var hitastig yfirborðs jarðar skilgreint sem 20°C . Hitastig hér á landi nær sjaldan að verða svo hátt. Farið var niður á 2 metra dýpi og hitastigið þar skilgreint sem 4°C í samráði við leiðbeinanda (Þorleikur Jóhannesson, 2010). Hönnunarhitastigið inn í stálrörinu er 230°C .



Mynd 7-22: Líkanið af rörinu niðurgröfnu.

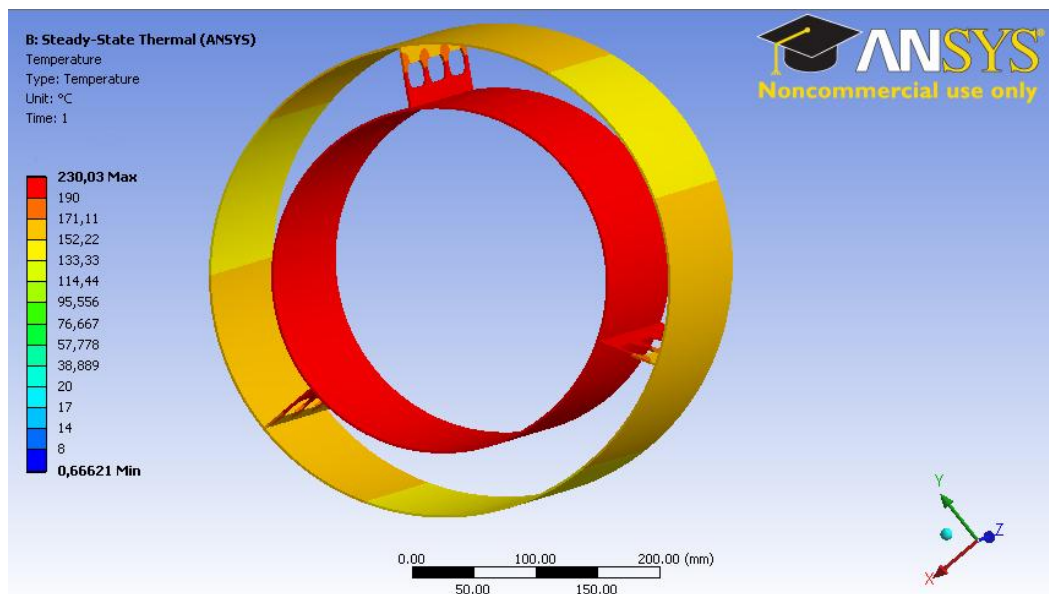
Til að byrja með var kerfið greint með burðargrind úr smíðastáli og tegund ullar var einangrunarstafir. Strax í fyrstu greiningu kom í ljós að varmaleiðnin í gegnum burðargrind var of mikil eins og sjá má í töflu 7-2 þar sem hitastig við einangrunarfrauð var töluvert yfir leyfilegum mörkum. Skipt var yfir í ryðfrítt stál og haldið áfram að greina en ennþá var hitastigið of hátt fyrir einangrunarfrauðið. Líkanið gengi hins vegar upp með grind úr ryðfrúu stáli ef venjulega einangrunarfrauðinu væri skipt út fyrir háhitaeinangrunarfrauð. Þykkt steinullar í öllum tilvikunum var 50 mm og einangrunarfrauðið var 26,75 mm.

Tafla 7-2: Krítísk hitastig fyrir þrjá mismunandi samsetningar með 50 mm ull og 26,37 mm einangrunarfrauð.

Efni grindar	Tegund ullar	Hitastig við einangrunarfrauð [°C]	Hitastig við plastkápu [°C]
Smíðastál	Einangrunarstafir	200,2	96,3
Riðfrítt stál	Einangrunarstafir	176,8	83,8
Riðfrítt stál	Steinullarhólkar	158,3	78,1

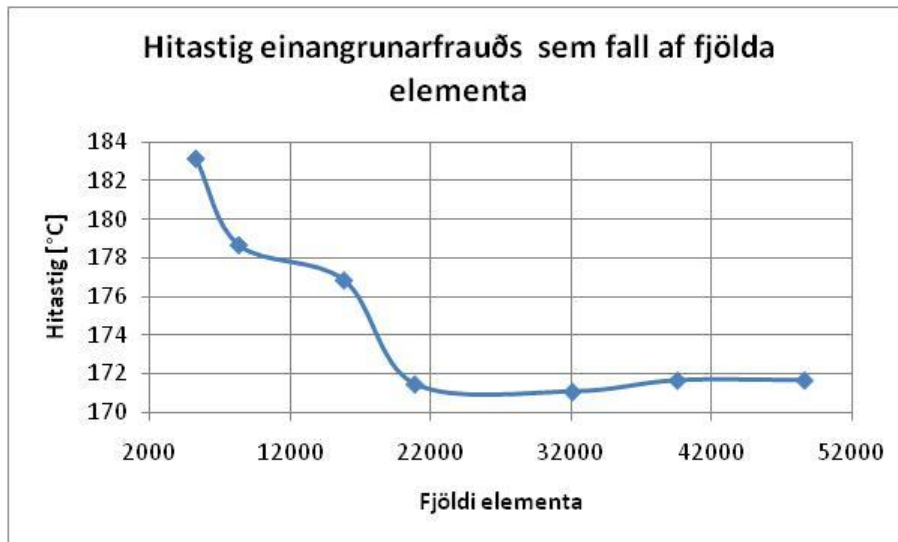
Eins og sést í töflu 7-2 þá er hitastigið í öllum tilvikum of hátt fyrir venjulegt einangrunarfrauð svo það verður að nota háhitaeinangrunarfrauð. Tvær af þessum útfærslum koma til greina og eftirfarandi útreikningar miðast við val á ryðfrú stáli í grind og einangrunarstöfum fyrir ull. Ástæðan fyrir valinu á einangrunarstöfum er að þeir hafa hærra þrýstipól en steinullarhólkar. Betur verður komið að því síðar.

Varmaleiðni frá stálröri og út eftir grind verður mest í gegnum fjarlægðarstafi. Hæsta hitastig sem myndast við einangrunarfrauð verður því beint út frá stöfum en minnkar svo því fjær sem dregur frá þeim. Lægsta hitastig á frauði er því mitt á milli fjarlægðarstafa. Sömu sögu er að segja um plastkápuna. Hæsta hitastig sem myndast við innri brún hennar er á þeim stað sem kemur beint út frá fjarlægðarstöfum (sjá mynd 7-23).



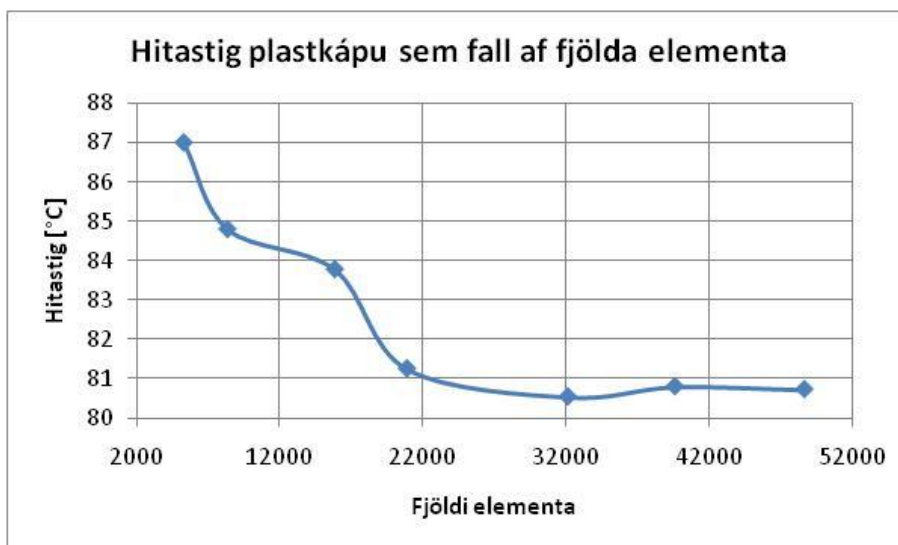
Mynd 7-23: Hitastigsdreifing í grind þar sem hönnunarhitastig er 230°C.

Í varmagreiningunni var einnig gert „mesh convergin check“ fyrir hæstu hitastig upp við einangrunarfrauð og plastkápu.



Línurit 7-3: Hæsta hitastig einangrunarfrauðs sem fall af fjölda elementa.

Á línuriti 7-3 sést hvernig jafnvægi byrjar að myndast í kringum 32000 element. Þá er ANSYS búið að ítra sig það nálægt endanlegri niðurstöðu að aukning á elementum eftir það hefur lítil áhrif á útkomuna.



Línurit 7-4: Hæsta hitastig plastkápu sem fall af fjölda elementa.

Á línuriti 7-4 sést hvernig jafnvægi byrjar að myndast á hitastigi við plastkápu í kringum 32000 element eins og í línuriti 7-3. Ekkert óeðlilegt er við það því þessir mælipunktur eru teknir úr sama líkaninu.

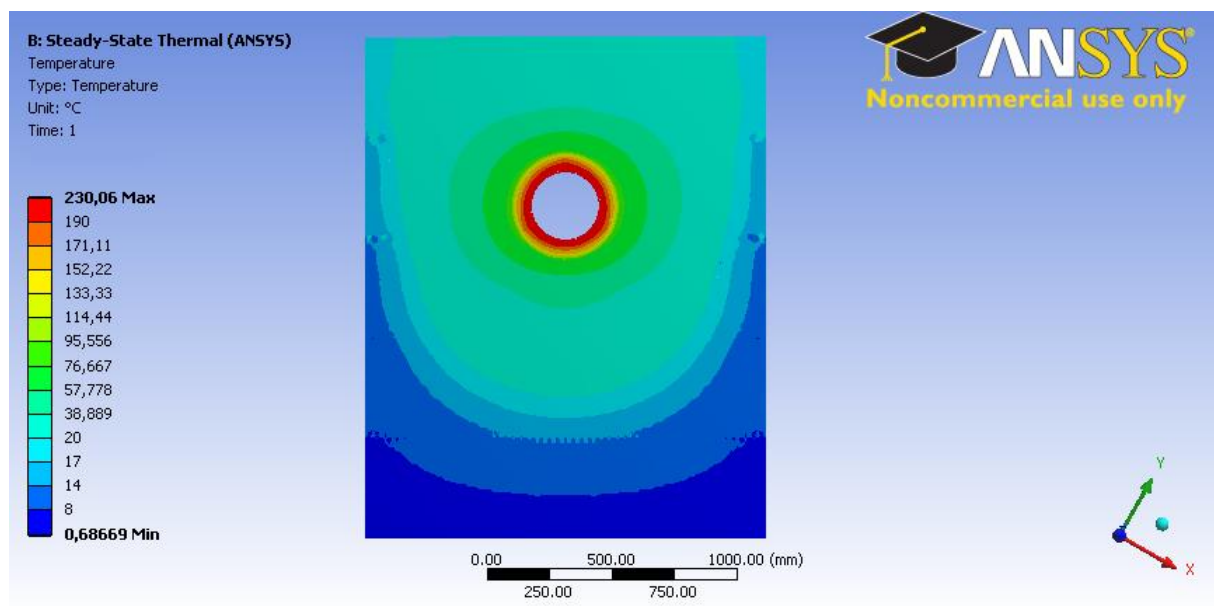
Þessi tvö krítísku hitastig eru innan marka miðað við það að burðargrindin sé úr ryðfrú stáli, 50 mm einangrunarstafir og 26,37 mm háhitaeinangrunarfrauð.

Lokagildin á hitastigum úr ANSYS líkani eru:

Tafla 7-3: Lokahitastig við einangrunarfrauð og plastkápu

Staðsetning	Hitastig [°C]
Við háhitaeinangrunarfrauð	171,7
Við plastkápu	80,7

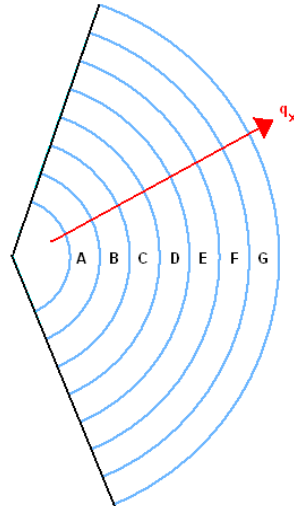
Mynd 7-24 sýnir ANSYS líkan af DN250 röri með 450 mm kápu niðurgröfnu og hitadreifingu í jarðvegi niður á tveggja metra dýpi. Þar er hitastig skilgreint sem 4°C og yfirborðshitastig jarðvegs er 20°C.



Mynd 7-24: Hitadreifing í jarðvegi frá DN250 röri með 450 mm plastkápu. Hönnunarhitastig stálpípu er 230°C, 20°C úthitastig og 4°C í jarðvegi á tveggja metra dýpi.

Einnig voru gerðir handreikningar á varmastreyminu. Til að geta það þarf að vita varmaleiðnistuðul allra efna í líkani. Þ.e.a.s. stálröri, burðargrind, steinull, einangrunarfrauði, plastkápu, sandi og mól. Einnig þarf að vita úthitastig og hönnunarhitastig stálrörs.

Byrjað var á því að reikna varmaviðnám hvers lags í röri og jarðvegi. Þau svo lögð saman til að fá heildarvarmaviðnám kerfis. Það er eitt lag í rörinu sem inniheldur tvö efni og það er lagið með steinullinni og fjarlægðarstöfunum. Þar var fundið vegið meðaltal af varmaleiðnistuðlum út frá meðal flatarmáli lagsins. Þá var hægt að reikna varmaviðnám þess lags. Þegar heildar varmaviðnám kerfis er komið er hægt að reikna varmastreymið því hitastigin tvö, innsta og ysta eru þekkt. Þetta varmastreymi er fasti og breytist ekki með fjarlægð frá stálröri. Þegar varmastreymið er komið eru hitastigin fundin á milli hvers lags fyrir sig.



Mynd 7-25: Varmastreymið fer frá stálpípu og út í gegnum öll lögin á pípunni og að lokum út í jarðveg.

Eins og sést á mynd 7-25 eru lögin 7, þau eru: Stálpípa, innri hringur, ull og fjarlægðarstafir, ytri hringur, einangrunarfrauð, plastkápa og jarðlag. Jafna 22 (Incropera, Dewitt, Bergman, & Lavine, 2007) er notuð til að reikna varmaviðnám hvers lags fyrir sig nema jarðlagsins. Jafna 23 (Oddur Björnsson, 1979) er notuð fyrir varmaviðnám jarðvegsins.

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * k} \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \right] \quad (22)$$

Þar sem:

- r_1 = Innri radíus [mm]
- r_2 = Ytri radíus [mm]
- L = Dýpt lags [mm]
- k = Varmaleiðnistuðull [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]

$$R_{\text{jarðv.}} = \frac{\ln\left(\frac{2 * (h_1 + r_p)}{r_p}\right)}{2 * \pi * k_1} + \frac{h_2}{k_2 * 4 * \pi * (h_1 + r_p)} \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \right] \quad (23)$$

Þar sem:

- h_1 = Þykkt sands ofan á röri [mm]
- r_p = Ytri radíus pípu [mm]
- k_1 = Varmaleiðnistuðull sands [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]
- h_2 = Þykkt malar ofan á sandi [mm]
- k_2 = varmaleiðnistuðull malar [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]

Þegar búið er að finna varmaviðnám fyrir öll lögin eru útkomurnar lagðar saman og út kemur heildar varmaviðnám kerfisins.

Með jöfnu 24 (Incropera, Dewitt, Bergman, & Lavine, 2007) er varmasteymið fundið. Það er fasti og breytist ekkert með fjarlægð frá heitasta stað kerfisins.

$$q = \frac{T_{s1} - T_{s8}}{R_{tot}} [W] \quad (24)$$

Þar sem:

- T_{s1} = Hönnunarhitastig stálrörs [°C]
- T_{s2} = Yfirborðshitastig jarðvegs [°C]
- R_{tot} = Heildar varmaviðnám kerfisins [°C/W]

Því næst eru hitastig við enda hvers lags fundin út frá: Hitastigi í byrjun þess, varmastreymi, þykkt lags og varmaleiðnistuðli með jöfnu 25 (Incropera, Dewitt, Bergman, & Lavine, 2007). Þar sem hönnunarhitastigið er byrjunarhitastig í lagi A (sjá mynd 7-25) er byrjað þar og unnið sig út eftir líkaninu. Þau hitastig sem eru krítískt í líkaninu eru á milli laga D og E. Það hitastig er upp við einangrunarfrauð og á milli laga E og F. Þar er hitastig innri brúnar plastkápu.

$$T_2 = T_1 - \frac{q * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * k * L * \pi} [°C] \quad (25)$$

Þar sem:

- T_1 = Hitastig við innri brún lags [°C]
- q = Varmastreymi [W]
- r_1 = Innri radíus lags [mm]
- r_2 = Ytri radíus lags [mm]
- k = Varmaleiðnistuðull lags [W/m*°C]
- L = Dýpt lags [mm]

Þá eru krítísku hitastigin tvö:

$$T_5 = 171,18 \text{ °C}$$

$$T_6 = 46,43 \text{ °C}$$

7.2.4 Þrýstingur á einangrunarfrauð frá burðargrind

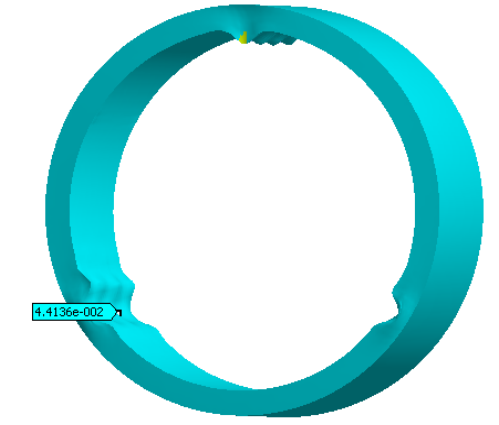
Eins og áður hefur komið fram er einangrunarfrauð (PUR) utan við ytri hring burðargrindar. Þar af leiðandi flyst álag sem leggst á grind yfir í einangrunarfrauð. Þrýstiálag á einangrunarfrauð má ekki fara yfir 0,3 MPa (SET, 2010). Til þess að finna flatarþrýsting frá ytri hring á frauð var byrjað á því að áætla hversu stór hluti af ytri hring væri í raun að pressa á frauð. Til að hafa flatarmálið vel innan marka var áætlað að 1/3 af neðri helming hings eða

1/6 af öllu flatarmálinu (sjá mynd 7-27) væri að pressa á frauðið. Dýpt grindar er þekkt stærð og þar af leiðandi er hægt að finna þann flöt sem álag frá grind leggst á.

Eins og sést á mynd 7-26 verða hæstu spennur í einangrunarfrauði á þeim stað sem fjarlægðarstafir eru. Í raun eru mestu þrýstispennur á milli tveggja neðri fjarlægðarstafa. Þær eru það litlar að það sést ekki með litarbreytingu á mynd 7-26.

Hæstu þrýstispennur í einangrunarfrauði frá burðargrind samkvæmt ANSYS líkani eru:

$$P = 0,044 \text{ MPa}$$



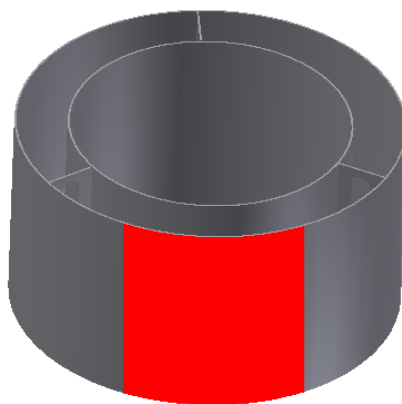
Mynd 7-26: Sýnir hæstu spennur eru í einangrunarfrauði.

Fyrir handreikninga á þrýstiálagi þarf að notast við áætlaðan þrýstingsflöt ytri hrings á einangrunarfrauð sem fundinn er út frá einfaldri flatamálsformúlu.

$$A = \frac{L * B}{6} [mm^2] \quad (26)$$

Þar sem:

- L = Ummál ytri hrings [mm]
- B = Dýpt burðargrindar [mm]



Mynd 7-27: Áætlaður þrýstingsflötur grindar á einangrunarfrauð er merktur rauður á mynd. Flatarþrýstingurinn var fundinn frá áætlaða flatarmáli frauðsins og krafti frá grind:

$$P = \frac{F}{A} [MPa] \quad (27)$$

Þar sem:

- F = Heildarkraftur sem verkar á hverja grind [N]
- A = Áætlað lámámarksflatarmál sem þrýstir á einangrunarfrauð [mm^2]

Handreiknað þrýstingsálag sem leggst á frauð frá burðargrind er:

$$P=0,032 \text{ MPa}$$

Það flatarmál sem notast var við er í algjöru lágmarki og er líklega nokkuð meira.

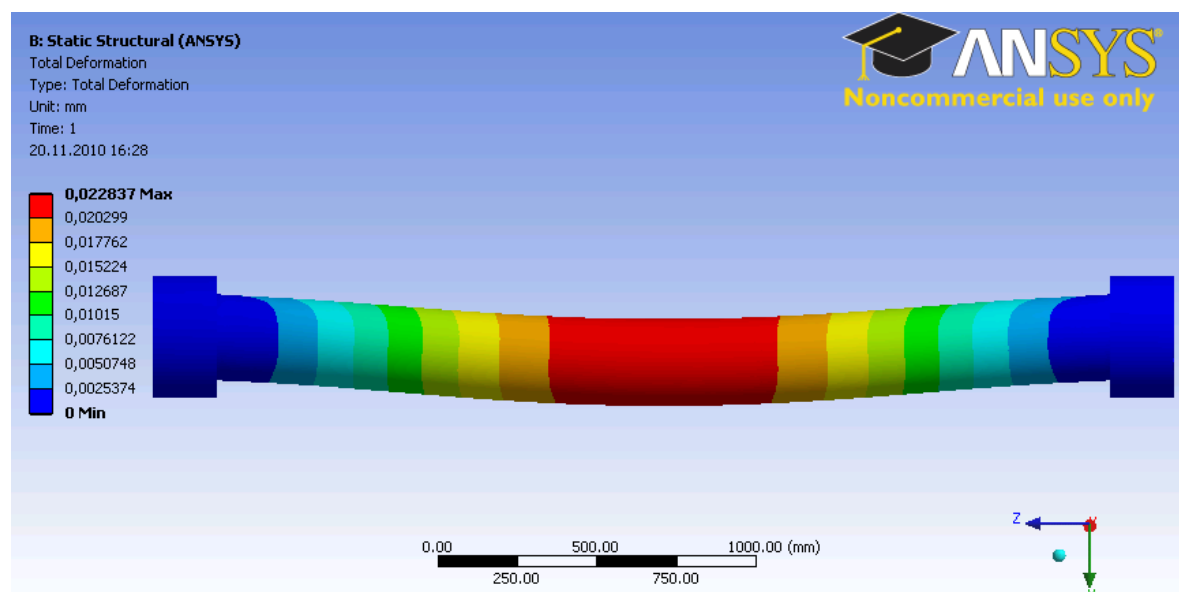
Þrýstiálagið verður ekki hærra en í þessu tilviki og er það vel innan marka með öryggisstuðul uppá 9,38.

7.3 Niðurbeygja stálrörs

Vegna þunga stálrörs og innihalds myndast ákveðin kraftur sem leitast við að beygja stálrörið niður á milli burðarhólka. Mesta niðurbeygja myndast mitt á milli burðarhólka (sjá mynd 7-28). Greining var gerð á þessu í ANSYS sem og handreikningar.

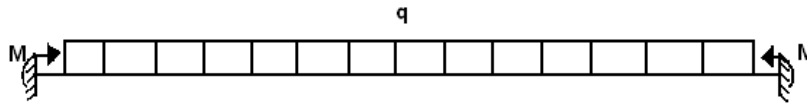
Greining ANSYS á niðurbeygjuni og var:

$$U_{\max}=0,0228 \text{ mm.}$$



Mynd 7-28: Niðurbeygja stálrörs milli burðargrinda. Niðurbeygjan er 3600 sinnum ýktari á mynd en raunniðurbeygjan er.

Við handreikninga á niðurbeygju stálrörs var notast við þekkta bitajöfnu sem nálgun á raunverulega kerfinu sem er stöðufræðilega óákveðið. Jafnan er fyrir fast innspenntan bita með jafndreifðu álagi og vægi á báðum endum (Krex, 2004).



Mynd 7-29: Fast innspenntur biti með jafndreifðu álagi og vægi á endum.

$$U_{max} = \frac{1}{384} * \frac{q * L^4}{E * I} [mm] \quad (28)$$

Þar sem:

- q = Jafndreift álag yfir bitann [N/mm]
- L = Lengd á milli burðagrinda [mm]
- E = Fjaðurstuðull smíðastáls [N/mm²]
- I = Tregðuvægi stálrörs [mm⁴]

Niðurbeygja rörsins samkvæmt handreikningum er:

$$U_{max} = 0,0228 \text{ mm}$$

7.4 Hlífðarhólkur á milli burðagrinda

Til að koma í veg fyrir að freyðiprýstingur frá einangrunarfrauði pressi ullina saman væri heppilegt að skilja ull og einangrunarfrauð alveg að. Það væri hægt að gera með því að setja sívalan hólk á milli burðagrinda sem kæmi á milli ullar og einangrunarfrauðs. Ástæðan fyrir þessu er sú að þegar steinull pressast saman lækkar einangrunargildi hennar. Þar af leiðandi verður varmaleiðni í gegnum rörið hærri. Það væri hugsanlega ekki nauðsynlegt í öllum tilvikum að aðskilja ull og einangrunarfrauð, það fer eftir stífni ullar. Freyðiprýstingur einangrunarfrauðs er 0,2 bar eða 0,02 MPa (Valdimar Hjaltason, 2010). Fyrir steinullarhólka er þessi prýstingur of hár. Ef notast er við stífari ull eins og einangrunarstafi væri hlífðarhólkur óþarfi.

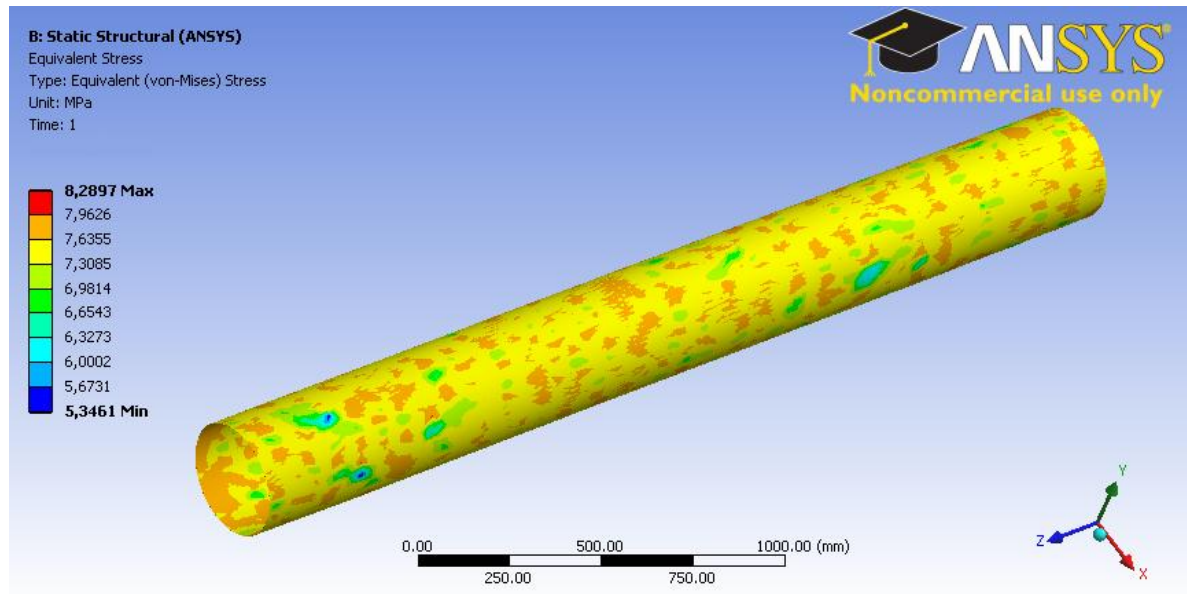
Einangrunarstafir sem eru 150 kg/m³ pressast saman um 10% við 55 kPa prýsting eða 0,055 MPa (Magnús Sigfússon, 2010). Þar sem freyðiprýstingur frá frauði er töluvert lægri en sá prýstingur sem veldur 10% samþjöppun fyrir einangrunarstafi er óþarfi er að nota hlífðarhólk með þeirri ull.

Steinullarhólkar sem eru 100 kg/m³ hafa hins vegar mun minna prýstipól eða 20 kPa sem er 0,02 MPa fyrir 10% samþjöppun (Magnús Sigfússon, 2010). Ef þeir einangrunarhólkar yrðu notaðir þyrfti að nota hlífðarhólka með til að koma í veg fyrir samþjöppun á ull.

Hönnun á þessum hólk er frekar einföld þar sem það eru fáir þættir sem þurfti að hugsa út í. Það voru aðallega tveir þættir sem réðu þeirri hönnun. Þeir voru efnisþykkt og hvernig sívalningur leggst upp að burðarhólk. Það var hugmynd að búa til upphleyptan kannnt á enda sívalnings svo að hann prýstist upp á burðarhólka. Ennþá einfaldara væri að hafa ytra

Þvermál það sama og í ytri hring grindar og láta hann leggjast upp að burðarhólkum því ull innan við hann skorðar hann af.

ANSYS greining var gerð af þessu líkani með ytri þrýsting á hlífðarhólk 0,02 MPa. Hólkurinn er 2,8 metra langur og prufað var sig áfram með efnisþykktir. Loka niðurstaðan var 0,5 mm.



Mynd 7-30: Spennudreifing í hlífðarröri frá þrýstingi einangrunarfrauðs.

Eins og sést á mynd 7-30 þá eru spennur sem myndast í hlífðarhólk nokkurn veginn jafndreifðar yfir allan hólkinn sem er eðlilegt þar sem þrýstingur frá einangrunarfrauði er jafn allan hringinn í kringum hólkinn.

Hæstu jafngildisspennur samkvæmt ANSYS eru:

$$P = 8,29 \text{ MPa}$$

Einnig voru gerðir handreikningar á spennum sem myndast í hlífðarhólk. Við þá reikninga er gengið út frá jöfnu um þunnveggja sívalninga (Budynas & Nisbett, 2008). Skilgreiningin á þeim er ef veggþykkt sívalnings er einn tuttugasti eða minna af meðalradíus þá er sívalningur skilgreindur sem þunnveggja. Það á vel við í þessu tilfalli.

$$\sigma_{max} = \frac{P * (d_i + t)}{2 * t} \text{ [MPa]} \quad (28)$$

Þar sem:

- P = Þrýstingur frá einangrunarfrauði [MPa]
- d_i = Innra þvermál sívalnings [mm]
- t = Veggþykkt sívalnings [mm]

Þá eru handreiknaðar spennur sem myndast í sívalning:

$$P = 7,64 \text{ MPa}$$



7.5 Þani

Þar sem stálpípur lengjast við hitaþenslu þarf að bregðast við því á einhvern hátt því restin af rörinu gerir það ekki því þetta er ekki fast kerfi. Í þeim háhitapípum sem hafa verið lagðar ofanjarðar hefur verið venjan að láta þenslulykkjur með ákveðnu millibili. Í niðurgröfnum pípum er það erfiðara því þá þarf að grafa skurðina eftir lykkjunum og hafa fríbil í kringum lagnirnar í þar til þess að taka við þessum hitaþenslum.

Notkun þana er hentug í þessu tilviki þar sem þetta kerfi er ekki fast kerfi. Stálrörið leikur laust inn í kápu og einangrunarfrauð og kápa lengjast og stytast ekki með röri. Í svona kerfi þar sem hitaþensla og samdráttur er tekin upp af þönum er fyllt yfir lagnirnar áður en heitu vatni er hleypt á kerfið. Ef engar ráðstafannir yrðu gerðar við hitaþenslu er líklegt að stálrör gengi út úr kápu í fyrstu beygju eftir borholu.

Þanar eru settir á milli festa en fjarlægð á milli festu og þana er ákvörðuð þannig að ekki verði of miklar spennur í stálrörinu þegar fullur hiti er kominn á kerfið.

7.6 Samanburður handreikninga og ANSYS reikninga.

Í þessum kafla verða borin saman handreiknuð gildi og þeim greiningum sem hafa verið gerðar í ANSYS. Hafa skal í huga að ANSYS forritið reiknar oft með spennuhækkunarstuðlum vegna geometríubreytinga í spennugreiningu sinni. Það gæti verið ástæða mismunar í útkomum ef einhverjar eru.

7.6.1 Burðargrind

7.6.1.1 Spennugreining

Eins og sést þá er nokkur munur á útkomu ANSYS og handreikningum á jafngildisspennum í fjarlægðarstaf, en ásættanlegur er hann þó.

Tafla 7-4: Samanburður á hand- og ANSYS reikningum fyrir spennugreiningu burðargrindar.

Reikningar	Hæstu spennur [MPa]
ANSYS	67,8
Handr.	36,84

7.6.1.2 Varmagreining

Hitastig við einangrunarfrauð er nánast það sama fyrir hand- og ANSYS reikninga. Það er nokkur munur á útkomu við plastkápu. Hitastig við yfirborð jarðvegs fyrir handreikninga er nánast sama og hitastigið sem gengið var út frá í skilgreiningunni á varmalíkaninu. Það sýnir að handreikningarnir eru nokkuð réttir.

Tafla 7-5: Samanburður á hand- og ANSYS reikningum fyrir varmagreiningu kerfisins.

Reikningar	Við einangrunarfrauð [°C]	Við plastkápu [°C]	Við yfirborð jarðvegs [°C]
ANSYS	171,7	80,7	20
Handr.	171,2	46,4	19,8

7.6.2 Þrýstingur á einangrunarfrauð frá burðargrind

Hér er munurinn ekki það mikill en ástæðan fyrir þessari skekkju gæti verið skilgreiningin á flatarmálinu sem gengið var út frá í handreikningum. Það myndast hærri spennur beint undir fjarlægðarstöfunum eins og sést á mynd 7-26. Í handreikningunum eru þrýstispenurnar þær sömu yfir allt skilgreinda flatarmálið.

Tafla 7-6: Samanburður á hand- og ANSYS reikningum á hæstu spennum í einangrunarfrauði.

Reikningar	Hæstu spennur [MPa]
ANSYS	0,044
Handr.	0,032

7.6.3 Niðurbeygja stálrörs

Hér er handreiknaða gildið og ANSYS lausnin nákvæmlega það sama. Það sýnir að skilgreiningin á bitalíkaninu í handreikningunum er rétt.

Tafla 7-7: Samanburður á hand- og ANSYS reikningum á mestu niðurbeygju stálrörs.

Reikningar	Mesta niðurbeygja [mm]
ANSYS	0,028
Handr.	0,028

7.6.4 Hlífðarhólkur

Mismunurinn á þessum tveim niðurstöðum er ásættanlegur, sem sýnir að reikningarnir á þunnveggja sívalningnum ættu að vera réttir.

Tafla 7-8: Samanburður á hand- og ANSYS reikningum á þrýsting á hlífðarhólk frá einangrunarfraudi.

Reikningar	Hæstu spennur [MPa]
ANSYS	8,28
Handr.	7,64

8. Niðurstöður

Í byrjun verkefnis var hönnuð burðargrind og ákveðið út frá hverju væri gengið varðandi hönnun á henni og rörinu í heild sinni. Ákveðið var í samráði við leiðbeinanda að hönnunarhitastig í stálröri yrði 230°C. Til að fá rétta mynd á varnaleiðni í gegnum rör þurfti að taka tillit til þess að það væri niðurgrafið. Ákveðið var að hafa 20°C sem hönnunarhitastig við yfirborðs jarðvegs og 4°C á tveggja metra dýpi.

Þegar hugmynd af hönnun á grind var lokið vöknudu ýmsar spurningar varðandi tæknilega útfærslu kerfisins sem þyrfti að leysa. Hluti af þeim voru: Hversu langt ætti bilið á milli grinda að vera? getur grindin borið þunga stálrörs og vatns? verður varmaleiðnin í grindinni of mikil? Og ýmsar aðrar. Eftir útreikninga var ákveðið að hafa 3 metra á milli burðagrinda sem hentar mjög vel hvað varðar deilingu þeirra í rörum. Eftir spennureikninga á grind kom í ljós að það skipti ekki máli hvort hún væri úr ryðfríu stáli eða smíðastáli hvað snéri að burðarþoli hennar. Hins vegar skipti það máli hvað varmaleiðni varðar. Varmaleiðnin í grind var of mikil ef smíðastál var notað því hitastigið við einangrunarfrauð var of hátt fyrir báðar tegundir þess. Svo ryðfrítt stál varð fyrir valinu á burðargrind.

Tvær tegundir steinulla voru teknar til skoðunar. Það sem réði vali á ull var eingöngu þrýstipól hennar. Þó að steinullarhólkarnir hefðu lægri varmaleiðnistuðul þá var þrýstipól þeirra full lág og hefði verið nauðsynlegt að nota hlífðarhólk með þeim. Talið var heppilegra að nota einangrunarstafina því þeir þola þrýsting einangrunarfrauðs. Ullin sem var fyrir valinu var því einangrunarstafir.

Þrátt fyrir að ryðfrítt stál hafi verið valið í burðargrind til að lækka varmaleiðni í genum hana var hitastigið of hátt fyrir venjulega einangrunarfrauðið. Því var nauðsynlegt var að nota háhitaeinangrunarfrauð.

Hvað varðar jarðveginn sem var notaður í líkanið þá var farið eftir almennum reglum um niðurgrafnar hitaveitupípur (Gísli Geir Jónsson og Oddur B. Björnsson, 1999). Þar segir að nota skal sand með kornastærð ≤ 8 mm í kringum platkápu rörs og grófar mól ofan á sand til að fylla upp í skurð.

Þannig að loka samsetningin á pípunni samanstendur af stálröri, burðargrind úr ryðfríu stáli, einangrunarstöfum, háhitaeinangrunarfrauði og plastkápu. Grindin þolir álagið sem er sett á hana með öryggisstuðul uppá 2,8 og hitinn sem myndast við alla íhlutir rörsins eru innan marka.



9. Umræða og túlkun

Í upphafi verkefnis var lagt upp með að hanna einhverskonar grind inní háhitarör með steinull og einangrunarfrauð sem væri klætt með plastkápu. Upphaflega var hugmyndin að nota smíðastál í burðagrindina því það er þægilegra að vinna með það og er ódýrara en ryðfrítt stál og venjulegt einangrunarfrauð því það er ódýrara. Þegar handreikningar og ANSYS greiningar voru gerðar kom í ljós að það gengi ekki upp og því var farið yfir í ryðfrítt stál og háhitaeinangrunarfrauð.

Þrýstingur á einangrunarfrauð frá burðargrind er frekar lítill miðað við hvað einangrunarfrauð þolir og því væri hægt að skoða það að greнна grindina þannig að flatarmálið á ytri hring sem þrýstir á einangrunarfrauð yrði minna.

Það kæmi væntanlega eitthvað niður á burðarþoli og varmaleiðni hennar en er samt þess vert að skoða. Því með minnkandi efnisnotkun í grind veður hún ódýrari. Sérstaklega þar sem hún er úr ryðfríu stáli.

Annars stent þessi hönnun þær hönnunarforsendur sem lagt var upp með í byrjun. Bæði stent hún spennugreiningu með öryggisstuðul uppá 2,8 og er með ásættanlega varmaleiðni í gegnum sig.

10. Heimildaskrá

- Börgun. (2. 11 2010). *Björgun*. Sótt frá <http://bjorgun.is/>
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Mechanical engineering design* (8 útg.). New York: McGraw-Hill.
- Callister, W. D. (2003). *Materials science and engineering* (6 útg.). Utah: John Wiley & Sons.
- European Standard. (2008). *Final Draft prEN253*. Brussel: European Committee For Standardization.
- Falk, D., Krause, P., & Tiedt, G. (2004). *Töflubók fyrir málm- og véltækni* (7 útg.). Braunschweig: Iðnú.
- Gísli Geir Jónsson og Oddur B. Björnsson. (1999). *Hitaveituhandbók Samorku*. Reykjavík.
- Guðmundur Halldórsson og Jón Sigurjónsson. (1992). *Varmaeinangrun húsa*. Reykjavík: Offsetmyndir s.f.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Introduction to Heat Transfer* (5 útg.). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Krex, H. E. (2004). *Maskin Stabi* (9 útg.). Kaupmannahöfn: Nyt Teknisk Forlag.
- Magnús Sigfússon. (16. 11 2010). (Kristjón Sigurbergsson, Sþyrill)
- Oddur Björnsson. (1979). *Kólnun vatns í hitaveitulögnum*. Reykjavík.
- SET. (2010). *SET Röraverksmiðja*. Sótt 19. 10 2010 frá <http://set.is/documents/Ahitaveitukafli.pdf>
- Shyu, S. W., Huang, H. Y., Tseng, K., & Chou, C. (2008). *Study of performance of stainless steel a TIG welds*. ASM International.
- Steinull hf. (2010). *STEINULL*. Sótt frá http://steinull.is/Default.asp?Sid_Id=30385&tId=1&Tre_Rod=&qsr
- Porleikur Jóhannesson. (15. 11 2010). *Vélaverkfræðingur*. (Kristjón Sigurbergsson, Sþyrill)
- Ullman, D. G. (2007). *The Mechanical Design Process* (Second ed.). Oregon: The McGraw-Hill Companies, inc.
- Valdimar Hjaltason. (19. 10 2010). *Vél- og orkutækni-fræðingur B.Sc.* (Kristjón Sigurbergsson, Sþyrill)



11. Myndaskrá

Mynd 3-1: Þverskurðarmynd af DN250 pípu fyrir endurhönnun.....	1
Mynd 7-1: Hönnun burðargrindar sem er 200 mm breið.....	7
Mynd 7-2: Lagmynd af heildarkerfinu með ytra þvermál plastkápu 450 mm.....	8
Mynd 7-3: Einfalt undirstuddur biti með stöku álagi á miðjan bita.....	9
Mynd 7-4: Gróf mynd af ýktri niðurbeygju á stálrörs á milli burðargrinda.	9
Mynd 7-5: Mesta leyfilega hallahorn sem má myndast við niðurbeygju á stálröri.	10
Mynd 7-6: Fast innspenntur biti með jafndreifit álag og vægi á endum.....	11
Mynd 7-7: Einfalt undirstuddur biti með jafndreifðu álagi og vægi á endum.	11
Mynd 7-8: Bilið á milli burðargrindar og stálrörs sem myndast í niðurbeygju og eftir hitaþenslu.....	13
Mynd 7-9: Deiling burðargrinda á 12m röri.	13
Mynd 7-10: Deiling burðargrinda á 6m röri.	13
Mynd 7-11: Frumhönnun á fjarlægðarstaf.....	14
Mynd 7-12: Lokahönnun á fjarlægðarstaf.	14
Mynd 7-13: Álagstilvik á grind 0°,10°og 20°.....	15
Mynd 7-14: Álagstilvik á grind 30°,40°og 50°.....	15
Mynd 7-15: Versta álagstílfelli á grind.....	15
Mynd 7-16: Möskvi af burðargrind.	17
Mynd 7-17: Sýnir á hvaða hátt grind aflagast við versta tilfelli. Myndin er 77 sinnum ýktari en raunniðurbeygja.....	17
Mynd 7-18: Þeir kraftar sem verka á fjarlægðarstaf.....	18
Mynd 7-19: Þverskurðarmynd af fjarlægðarstaf, þar sem minnsta þverskurðaflatarmálið er blátt.	19
Mynd 7-20: Sýnir hvernig fjarlægðarstafur afmyndast við versta tilfelli. Aflögun er 69 sinnum ýktari en raun aflögun.	20
Mynd 7-21: Jarðvinnsluþversnið af niðurgröfðu hitaveituröri. Mynd fengin úr hitaveituhandbók Samorku.....	22
Mynd 7-22: Líkanið af rörinu niðurgröfðu.	22
Mynd 7-23: Hitastigsdreifing í grind þar sem hönnunarhitastig er 230°C.	23
Mynd 7-24: Hitadreifing í jarðvegi frá DN250 röri með 450 mm plastkápu. Hönnunarhitastig stálpípu er 230°C, 20°C útihitastig og 4°C í jarðvegi á tveggja metra dýpi.	25
Mynd 7-25: Varmastreymið fer frá stálpípu og út í gegnum öll lög á pípunni og að lokum út í jarðveg.....	26



Mynd 7-26: Sýnir hæstu spennur eru í einangrunarfrauði.	28
Mynd 7-27: Áætlaður þrýstingsflötur grindar á einangrunarfrauð er merktur rauður á mynd.	28
Mynd 7-28: Niðurbeygja stálrörs milli burðargrinda. Niðurbeygjan er 3600 sinnum ýktari á mynd en raunniðurbeygjan er.	29
Mynd 7-29: Fast innspenntur biti með jafndreifðu álagi og vægi á endum.	30
Mynd 7-30: Spennudreifing í hlífðarröri frá þrýstingi einangrunarfrauðs.	31
Mynd 14-1: Sýnir út frá hverju öryggisstuðull var reiknaður.	41
Mynd 14-2: Upplýsingar um einangrunarstafi.	42
Mynd 14-3: Upplýsingar um steinullir.	43
Mynd 14-4: Upplýsingar um hellulagningasand.	44
Mynd 14-5: Upplýsingar um röragrús.	45
Mynd 14-6: Upplýsingar um plastkápu.	46
Mynd 14-7: Upplýsingar um einangrunarfrauð.	47
Mynd 14-8: Rauða línan sýnir mestu fjarlægð í suðu frá þungamiðju.	54

12. Töfluskrá

Tafla 6-1: Efniseiginleikar smíðastáls við 20°C.	4
Tafla 6-2: Efniseiginleikar ryðfrís stáls við 20°C.	4
Tafla 6-3: Efniseiginleikar tveggja tegunda einangrunarulla.	4
Tafla 6-4: Efniseiginleikar tveggja tegunda einangrunarfrauðs.	5
Tafla 6-5: Efniseiginleikar plastkápu.	5
Tafla 6-6: Efniseiginleikar sands og malar.	6
Tafla 7-1: Hæstu spennur, mesta aflögun og öryggisstuðull efna í burðargrind við versta tilvik.	17
Tafla 7-2: Krítísk hitastig fyrir þrjá mismunandi samsetningar með 50 mm ull og 26,37 mm einangrunarfrauð.	23
Tafla 7-3: Lokahitastig við einangrunarfrauð og plastkápu.	25
Tafla 7-4: Samanburður á hand- og ANSYS reikningum fyrir spennugreiningu burðargrindar.	33
Tafla 7-5: Samanburður á hand- og ANSYS reikningum fyrir varmagreiningu kerfisins.	33



Tafla 7-6: Samanburður á hand- og ANSYS reikningum á hæstu spennum í einangrunarfrauði.....	33
Tafla 7-7: Samanburður á hand- og ANSYS reikningum á mestu niðurbeygju stálrörs.	34
Tafla 7-8: Samanburður á hand- og ANSYS reikningum á þrýsting á hlífðarhólk frá einangrunarfrauði.	34
Tafla 14-1: Aflögun, spennur, kiknunarstuðull og öryggisstuðull fyrir öll álagstilvik grindar úr smíðastáli.....	48
Tafla 14-2: Aflögun, spennur, kiknunarstuðull og öryggisstuðull fyrir öll álagstilvik grindar úr ryðfríu stáli.	48
Tafla 14-3: kraftar sem verka á fjarlægðarstaf. Tafla rekin úr ANSYS.....	51
Tafla 14-4: Sýnir suðumunstur fjarlægðastafa.....	53
Tafla 14-5: Handreiknuð hitastig eftir staðsetningum í röri.	55
Tafla 14-6: Hitastig við frauð og plastkápu út frá fjölda elementa.....	55

13. Línurit

Línurit 7-1: Spennur sem fall af hallahorni álags á grind fyrir smíða- og ryðfrítt stál.	16
Línurit 7-2: Jafngildisspennur í fjarlægðarstaf sem fall af fjölda elementa fyrir smíða- og ryðfrítt stál.	16
Línurit 7-3: Hæsta hitastig einangrunarfrauðs sem fall af fjölda elementa.	24
Línurit 7-4: Hæsta hitastig plastkápu sem fall af fjölda elementa.	24

14. Viðaukar

14.1 Viðauki 1 - Öryggisstuðull

The simplest way to present this technique is to associate a value greater than 1 with each of the measures and define the factor of safety as the product of these five values:

$$FS = FS_{\text{material}} \cdot FS_{\text{stress}} \cdot FS_{\text{geometry}} \cdot FS_{\text{failure analysis}} \cdot FS_{\text{reliability}}$$

Details on how to estimate these five values are given below. These values have been developed by breaking down the rules given in textbooks and handbooks into the five measures and cross checking the values with those from the statistical method described in the next section.

ESTIMATING THE CONTRIBUTION FOR THE MATERIAL

$FS_{\text{material}} = 1.0$	If the properties for the material are well known, if they have been experimentally obtained from tests on a specimen known to be identical to the component being designed and from tests representing the loading to be applied.
$FS_{\text{material}} = 1.1$	If the material properties are known from a handbook or are manufacturer's values.
$FS_{\text{material}} = 1.2-1.4$	If the material properties are not well known.

ESTIMATING THE CONTRIBUTION FOR THE LOAD STRESS

$FS_{\text{stress}} = 1.0-1.1$	If the load is well defined as static or fluctuating, if there are no anticipated overloads or shock loads, and if an accurate method of analyzing the stress has been used.
$FS_{\text{stress}} = 1.2-1.3$	If the nature of the load is defined in an average manner, with overloads of 20-50 percent, and the stress analysis method may result in errors less than 50 percent.
$FS_{\text{stress}} = 1.4-1.7$	If the load is not well known or the stress analysis method is of doubtful accuracy.

ESTIMATING THE CONTRIBUTION FOR GEOMETRY (UNIT-TO-UNIT)

$FS_{\text{geometry}} = 1.0$	If the manufacturing tolerances are tight and held well.
$FS_{\text{geometry}} = 1.0$	If the manufacturing tolerances are average.
$FS_{\text{geometry}} = 1.1-1.2$	If the dimensions are not closely held.

ESTIMATING THE CONTRIBUTION FOR FAILURE ANALYSIS

$FS_{\text{failure theory}} = 1.0-1.1$	If the failure analysis to be used is derived for the state of stress, as for uniaxial or multiaxial static stresses, or fully reversed uniaxial fatigue stresses.
$FS_{\text{failure theory}} = 1.2$	If the failure analysis to be used is a simple extension of the above theories, such as for multiaxial, fully reversed fatigue stresses or uniaxial nonzero mean fatigue stresses.
$FS_{\text{failure theory}} = 1.3-1.5$	If the failure analysis is not well developed, as with cumulative damage or multiaxial nonzero mean fatigue stresses.

ESTIMATING THE CONTRIBUTION FOR RELIABILITY

$FS_{\text{reliability}} = 1.1$	If the reliability for the part need not be high, for instance, less than 90 percent.
$FS_{\text{reliability}} = 1.2-1.3$	If the reliability is an average of 92-98 percent.
$FS_{\text{reliability}} = 1.4-1.6$	If the reliability must be high, say, greater than 99 percent.

The above values are, at best, estimates based on a verbalization of the factors affecting the design combined and on experience with how these factors affect the design. The stress on a part is fairly insensitive to tolerance variances unless they are abnormally large. This insensitivity will be more evident in the development of the statistical factor of safety.

Mynd 14-1: Sýnir út frá hverju öryggisstuðull var reiknaður

$$FS_{\text{material}} = 1,1$$

$$FS_{\text{stress}} = 1,3$$

$$FS_{\text{geometry}} = 1,0$$

$$FS_{\text{failure theory}} = 1,2$$

$$FS_{\text{reliability}} = 1,6$$

$$FS = 2,75$$

14.2 Viðauki 2 - Tækniblöð

Upplýsingar um einangrunarstafi. Fengið frá heimasíðu SET (SET, 2010).



ICEROCK PIPE LAGS

PRODUCT SHEET

DESCRIPTION

The Icerock mineral wool Pipe Lags are made from non-combustible, bio-soluble, basalt fiber. The fiber is mainly made from pure Icelandic basalt, consist of silicon oxide with a number of other metallic oxides. The basalt is melted by hydro electric power, spun into fibers and binder added. The use of high performance melting and spinning technology ensures excellent consistency and high quality level. The Icerock mineral wool is water repellent, chemically inert, vermin and root proof. The Icerock Pipe Lags are trapezoidal strips cut from Icerock rigidid slabs. The Pipe Lags are suitable for thermal insulation of process pipework with outside diameter ranging from 168mm, and can also be cut to fit small diameter vessels and tanks.

OPERATING TEMPERATURE

The limiting temperature of the fiber is more than 1000°C but the Pipe Lags should not be used where temperatures are continuously above 220°C.

STANDARDS

The Icerock slabs are produced according to EN 13162:2001 and are non-combustible when tested in accordance with EN ISO 1182. The Icerock products are bio-soluble and fulfill the criteria of guideline 97/69/EU, appendix Q.

QUALITY CONTROL

The Icerock products are CE certified according to Directive 89/106/EEC and quality control is carried out independently by the Icelandic Building Research Institute.

DIMENSIONS AND DENSITIES

The ICEROCK Pipe Lags are made from 150 kg/m³ slabs. Thickness and number of Lags per circumference is chosen according to requirements and diameter.

THERMAL CONDUCTIVITY

The Lambda values of the Pipe Lags are:

Temp	Thermal conductivity
10 °C	0,033 W/m ² °C
50 °C	0,036 W/m ² °C
100 °C	0,040 W/m ² °C
150 °C	0,046 W/m ² °C
200 °C	0,053 W/m ² °C

PACKAGING

Pipe Lags are packed in PE foil, and delivered on pallets.

REFERENCES

Icerock Pipe Lags have been successfully used since 1987 in connection with huge geothermal projects in Iceland such as the powerplants at Nesjavellir and Svartsengi and the 23 km long, 800 mm pipeline from Nesjavellir to Reykjavik was insulated with 110 mm thick ICEROCK Pipe Lags already in 1989.

CUSTOMER SERVICE

For further advice and information please contact Icerock Ltd. Iceland
Tel.: +354 455 3000, Fax.: +354 455 3019, Email: steinnll@steinull.is



Mynd 14-2: Upplýsingar um einangrunarstafi

Upplýsingar um einangrunarstafi og steinullarhólka. Þær upplýsingar sem ekki koma fram hér voru fengnar hjá Magnúsi Sigfússyni starfsmanni steinullarverksmiðjunnar Steinull hf. (Magnús Sigfússon, 2010)

EINANGRUNARSTAFIR

Sérskorin steinullareinangrun á rör og tanka.
Einangrunarþykktir frá 30 - 100 mm.
Algengasta rúmpyngd 150 kg/m³.
Rakavarín, stíf einangrun.



Einangrunarstafir eru sérsniðnir samkvæmt óskum viðskiptavina.

EKKI LAGERVARA

STEINULLARHÓLKAR

Pípuinangrun á helstu rörastærðir með eða án álfilmu eða dúks, álfilma með eða án límfilpa.
Hannaðir fyrir hátt hitastig. Rörþvermál frá 12 - 356 mm. Einangrunarþykkt frá 20 - 120 mm.
Rúmpyngd hólka frá 100 - 140 kg/m³.
Einnig hægt að fá ál eða plástkápu yfir hólka svo og beygjur, endastykki og állimbönd.

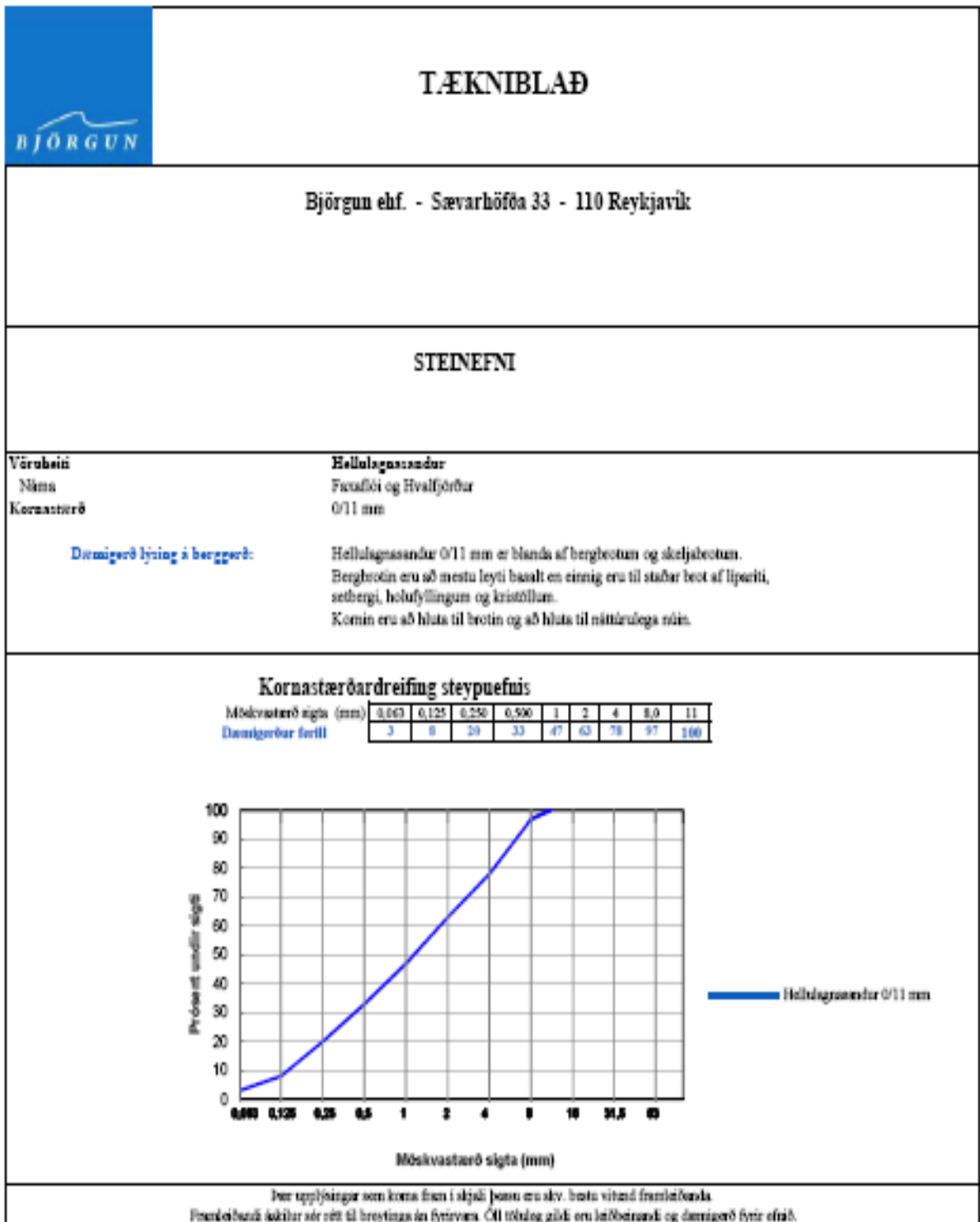


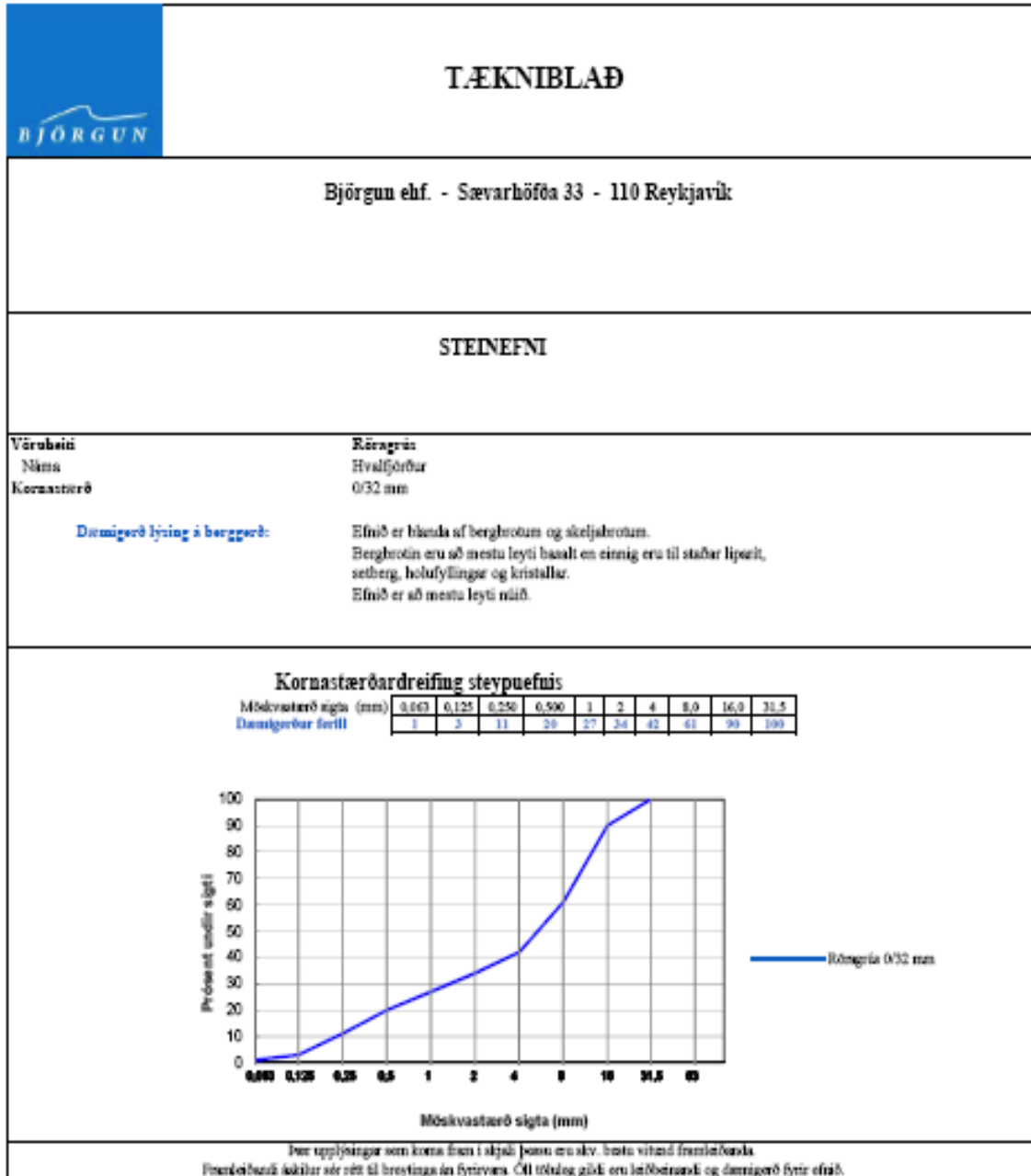
Hólkur á helstu rörastærðir.
Hannaðir fyrir hátt hitastig.
Með eða án állkæðningar.

EKKI LAGERVARA

Mynd 14-3: Upplýsingar um steinullir

Upplýsingar um sand og mól voru fengnar af heimasíðu Björgunar (Börgun, 2010).





Mynd 14-5: Upplýsingar um rörgrús.

Upplýsingar um efniseiginleika venjulegs einangrunarfrauðs og plasts í plastkápu eru fengin frá vörulista SET sem er á heimasíðu þeirra (SET, 2010). Upplýsingar um efniseiginleika háhitaeinangrunarfrauðs sem eru ekki í viðauka eru fengnir frá Valdimari Hjaltasyni tæknifræðingi hjá SET (Valdimar Hjaltason, 2010).



1.1.100-3

Hitaveiturör Tæknilegar upplýsingar

1.1.3 Plasthlífðarrör

Hlífðarrörin utan um einangrunina eru gerð úr svörtu Polyethelyne plastefni. Aðeins er notað víðurkennt hráefni við gerð röranna og fylgt ströngustu kröfum framleiðslustaðla. PE efnið hentar afar vel sem ytri vörn fyrir einangrunina. Það er hefur góðan styrk, högg- og ljóspól í samanburði við önnur plastefni.

Helstu eiginleikar fullbúinna PE hlífðarröra eru:

Plastefni:	Polyethelyne - PE
Eðlisþyngd:	> 945 - 954 Kg/m ³
Litur:	Svart (kolasall) > 2,5 % af massa
Eiginleikar og mál:	DIN 8074 - ISO 4065
Efniseiginleikar:	DIN 8075
Lágmarksveggþykkt:	EN/253 Kafli 4.2.2. Tafla 2.
Varmaleiðni:	0,43 W/m°C
Flæðiseygja bráðar:	0,3-0,8 g/10 min.

SET framleiðir einnig aðrar veggþykkir af PE pípum, t.d. rör fyrir neysluvatn og fráveitur og einnig hitapölin plaströr fyrir heitt vatn úr PP og PB efni. Einangrun plaströra fyrir hitaveitur er því möguleg.

Mynd 14-6: Upplýsingar um plastkápu.



1.1.100-2

Hitaveiturör

Tæknilegar upplýsingar

1.1.2 Einangrunarfrauð, PUR

Einangrunarfrauðilö er harri plastfauðefni, sem verður til við samblöndun tveggja þátta Polyurethans. Þegar efnið freyðir verða til lítil loftholur í því, svokallaðar sellur, sem gera efnið einstaklega gott til einangrunar. Einangrunin uppfyllir kröfur EN253 Evrópustandáls um foreinangrað lagnaefni. Sýnishorn eru tekin úr framleiðslunni daglega og þau prófuð.

Helstu eiginleikar polyurethane harðföðuefnis í fullbúnum hitaveiturörum eru:

Eiginleikar:	Skv. EN / 253
Meðalstærð sella:	< 0,5 mm
Lokaðar sellur:	> 92%
Eðlisþyngd:	Helldareðlisþyngd > 90 kg/m ³ Kjarnaeðlisþyngd > 60 kg/m ³
Stífni / þrýstitalag:	> 0,3 MPa Skv. ISO 844:1978
Vatnsdrægni:	< 10% af rúmmáli þegar prófað er skv. EN / 253 / Kafi 5.3.5.
Varmaleiðni:	< 0,028 W/m°C (C-Pentan blásið) róraefni < 0,032 W/m°C (Co ² blásið) samskeytaefni
Hitapoi:	149°C / 30 ár

Efni eru freyðd án CFC blástursmiðils, en notkun Freons (R-11) hefur verið bönnuð.

Mynd 14-7: Upplýsingar um einangrunarfrauð.

14.3 Viðauki 3 – Reikningar

Í eftirfarandi reikningum eru sýndir allir handreikningar og vísað í viðeigandi jöfnur sem eru í kafla 7.

14.3.1 Álag á burðargrind

Tafla 14-1: Aflögun, spennur, kikknunarstuðull og öryggisstuðull fyrir öll álagstilvik grindar úr smíðastáli.

Hallahorn kraftar [°]	Mesta aflögun [mm]	Hæstu jafngildisspennur [MPa]	Kikkunnastuðull [-]	Öryggisstuðull [-]
0	0,063894	21,237	146,89	11,07
10	0,082024	29,339	161,85	8,01
20	0,12888	41,674	171,53	5,64
30	0,17442	54,354	192,33	4,32
40	0,20561	62,417	279,94	3,76
50	0,22925	67,903	281,4	3,46
60	0,23626	68,459	311	3,43

Tafla 14-2: Aflögun, spennur, kikknunarstuðull og öryggisstuðull fyrir öll álagstilvik grindar úr ryðfríu stáli.

Hallahorn kraftar [°]	Mesta aflögun [mm]	Hæstu jafngildisspennur [MPa]	Kikkunnastuðull [-]	Öryggisstuðull [-]
0	0,06511	21,264	132,93	9,73
10	0,083736	28,893	150,6	7,16
20	0,13134	41,178	161,49	5,03
30	0,17735	53,587	180,17	3,86
40	0,2091	61,305	260,45	3,38
50	0,2333	66,658	275,11	3,11
60	0,24029	67,183	295,77	3,08

Massi Stálrörs jafna 1:

$$m_R = A * \rho * L$$

Þar sem:

- A = Þverskurðafatamál stálrörs
- ρ = Eðlismassi stálrörs
- L = Lengd, 1 metri í þessu tilviki

$$m_R = \left(\frac{273^2 * \pi}{4} - \frac{263^2 * \pi}{4} \right) * 7850 * 10^{-9} * 1000$$

$$m_R = 33 \text{ kg/m}$$

Massi vatns í stálröri jafna 2:

$$m_l = A * \rho * L$$

Þar sem:

- A = Þverskurðafatamál innihalds [mm^2]
- ρ = Eðlismassi vatns [kg/mm^3]
- L = Lengd, 1 metri í þessu tilviki [mm]

$$m_l = \left(\frac{263^2 * \pi}{4} \right) * 1000 * 10^{-9} * 1000$$

$$m_l = 54 \text{ kg/m}$$

Þá er massi stálrörs og innihalds fyrir 3 metra jafna 3:

$$m = 3 * (54 + 33) = 261 \text{ kg/3 m}$$

Sem gerir álagið á eina grind jafna 5:

$$F = (261 * 9,81) / 2 = 1280 \text{ N}$$

14.3.2 Fjarlægð á milli burðagrinda

Breyting á þvermáli í þunnveggja pípum jafna 6:

$$d_1 = d_o * (\Delta T * a + 1)$$

$$d_1 = 273 * (208 * 13 * 10^{-6} + 1)$$

$$\underline{d_1 = 273,74 \text{ mm}}$$

$$\underline{d_{11} = 263,71 \text{ mm}}$$

Hallahorn sem myndast á milli burðargrindar og stálrörs jafna 7:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{0,76}{100} \right)$$

$$\underline{\alpha = 0,44^\circ}$$

Jafndreift álag yfir bita:

$$\underline{q = (261 * 9,81) / 3 = 853,3 \text{ N/m} = 0,853 \text{ N/mm}}$$

Vægi á enda rörs jafna 8:

$$M = \frac{1}{12} * 0,853 * 3000^2$$

$$\underline{M = 640 \text{ N*m} = 640000 \text{ N*mm}}$$



Tregðuvægi stálrörs:

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

$$I = \frac{\pi}{64} * (273,74^4 - 263,71^4)$$

$$\underline{I = 38,22 * 10^6 \text{ mm}^4}$$

Hallahorn bita jafna 9:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} * \frac{640000 * 3000}{207000 * 38,22 * 10^6}$$

$$\underline{\alpha_1 = 1,22 * 10^{-4} \text{ Rad} = 0,007^\circ}$$

Hallahorn bita jafna 10:

$$\alpha_2 = \frac{1}{24} * \frac{0,853 * 3000^3}{207000 * 38,22 * 10^6}$$

$$\underline{\alpha_2 = 1,22 * 10^{-4} \text{ Rad} = 0,007^\circ}$$

Þá er heildarhallahorn sem getur myndast út fá álagi jafna 11:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$$

$$\underline{\alpha = 0,014^\circ}$$

Út frá jöfnu 12 fæst að:

$$L_1 = \text{Tan}(0,014) * 100$$

$$\underline{L_1 = 0,024 \text{ mm}}$$

Út frá jöfnu 13 fæst að:

$$\Delta L = 1,5 - 0,74 - 0,024$$

$$\underline{\Delta L = 0,74 \text{ mm}}$$

14.3.3 Spennureikningar

Tafla 14-3 er tekin úr ANSYS skýrslu og sýnir sker- og normalkrafta og vægi sem verka á fjarlægðarstaf við versta tilfalli.

Tafla 14-3: kraftar sem verka á fjarlægðarstaf. Tafla rekin úr ANSYS.

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Probes

Object Name	Force Reaction	Moment Reaction
State	Solved	
Definition		
Type	Force Reaction	Moment Reaction
Location Method	Contact Region	
Contact Region	Bonded - innri hringur:1 To fjarlægðarstafur:4	
Orientation	Coordinate System	
Contact Side	Source	
Summation		Centroid
Options		
Result Selection	All	
Display Time	End Time	
Results		
X Axis	-3,2549e-006 N	1,1006 N-mm
Y Axis	640,5 N	1,9424 N-mm
Z Axis	1109,4 N	-1,1582 N-mm
Total	1281, N	2,5151 N-mm

Tregðuvægi fjarlægðarstafs:

$$I = \frac{b * h^3}{12} - 3 * \frac{b_{gat} * h^3}{12}$$

Þar sem:

- b = Breidd fjarlægðarstafs
- h = Þykkt fjarlægðarstafs
- b_{gat} = Breidd gats í fjarlægðarstaf

$$I = \frac{200 * 2^3}{12} - 3 * \frac{55 * 2^2}{12}$$

$$I = 23,33 \text{ mm}^4$$

Út frá jöfnu 14 fást spennurnar frá beygjuvægi:

$$\sigma_m = \frac{1,1 * 1}{23,33}$$

$$\sigma_m = 0,047 \text{ MPa}$$



Út frá jöfnu 15 fást spennur af völdum normalkrafts:

$$\sigma_N = \frac{640,5}{55}$$

$\sigma_N = 11,65 \text{ MPa}$

Út frá jöfnu 16 fást spennur af völdum skerkskrafts:

$$\tau = \frac{1109,4}{55}$$

$\tau = 20,17 \text{ MPa}$

Út frá jöfnu 18 fást normalspennur:

$$\sigma = 0,047 + 11,65$$

$\sigma = 11,7 \text{ MPa}$

Út frá jöfnu 18 fást þá heildar jafngildisspennur:

$$\sigma' = \sqrt{11,7^2 + 3 * 20,17^2}$$

$\sigma' = 36,84 \text{ MPa}$

Tafla 14-4 er tekin úr Mechanical engineering design (Budynas & Nisbett, 2008) og sýnir það suðumunstur sem á við í suðu fjarlægðastafa.

Tafla 14-4: Sýnir suðumunstur fjarlægðastafa.

Weld	Throat Area	Location of G	Unit Second Moment of Area
	$A = 0.707hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$I_y = \frac{d^3}{12}$
	$A = 1.414hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_y = \frac{d^3}{6}$
	$A = 1.414hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_y = \frac{bd^2}{2}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b + d}$ $\bar{y} = d/2$	$I_y = \frac{d^2}{12}(6b + d)$
	$A = 0.707h(b + 2d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d}$	$I_y = \frac{2d^3}{3} - 2d^2\bar{y} + (b + 2d)\bar{y}^2$
	$A = 1.414h(b + d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_y = \frac{d^2}{6}(3b + d)$
	$A = 0.707h(b + 2d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d}$	$I_y = \frac{2d^3}{3} - 2d^2\bar{y} + (b + 2d)\bar{y}^2$

$$A = 1,41 * h * d$$

Þar sem:

$h =$ a-mál suðu = 1 mm

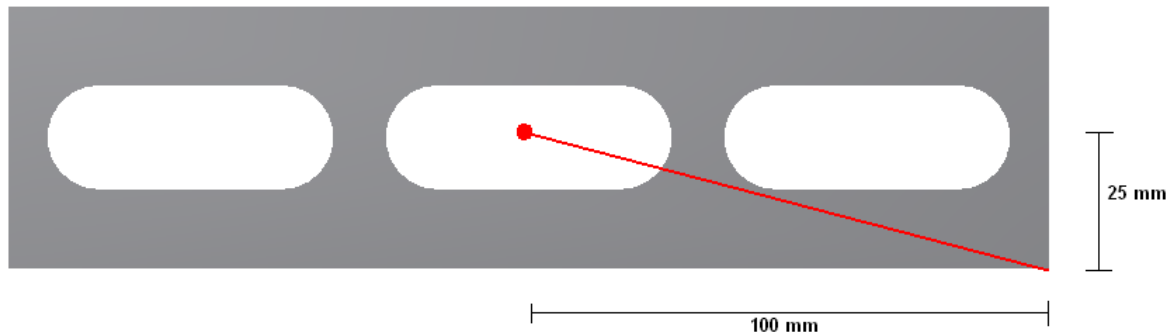
$d =$ lengd á milli suðustrengja = 50 mm

$$A = 70,5 \text{ mm}^2$$

Í jöfnu 19 fást skerspennur frá skerálagi í suðu:

$$\tau' = \frac{1109,4}{70,5}$$

$$\tau' = 15,76 \text{ MPa}$$



Mynd 14-8: Rauða línan sýnir mestu fjarlægð í suðu frá þungamiðju.

Mesta fjarlægð í suðu frá þungamiðju fjarlægðarstafs er:

$$r = \sqrt{100^2 + 25^2}$$

$$\underline{r = 103 \text{ mm}}$$

$$I_U = \frac{200 * 50^2}{2}$$

$$\underline{I_U = 250000 \text{ mm}^3}$$

$$I = 0,707 * h * I_U$$

$$\underline{I = 176750 \text{ mm}^4}$$

Vægi vegna vindu og skers:

$$M = 1,1 + (1109,4 * 50)$$

$$\underline{M = 55471,1 \text{ N*mm}}$$

Jafna 20 er fyrir spennur í suðu vegna vinduvægis og vægis vegna skerkræfts.

$$\tau'' = \frac{55471,1 * 103}{176750}$$

$$\underline{\tau'' = 32,33 \text{ MPa}}$$

Þá er heildar spennan sem verkar á suðuna jafna 21:

$$\tau_{max} = \sqrt{15,76^2 + 32,33^2}$$

$$\underline{\tau_{max} = 35,97 \text{ MPa}}$$

14.3.4 Varmareikningar

Tafla 14-5: Handreiknuð hitastig eftir staðsetningum í röri.

Hitastig [°C]	Staðsetning
230,00	Stálrör
229,98	Innri hringur
229,96	Ull + einangrunars.
171,20	Ytri hringur
171,18	Einangrunarfrauð
46,43	Innri brún kápu
44,47	Ytri brún kápu
19,83	yfirborð jarðvegs

Tafla 14-6: Hitastig við frauð og plastkápu ú frá fjölda elementa.

Fjöldi elementa	Fjöldi nodes	Hitastig við einangrunarfrauð [°C]	Hitastig við plastkápu [°C]
5289	32360	183,12	87,01
8342	48960	178,65	84,80
15835	91973	176,83	83,78
20876	111418	171,45	81,25
32103	163026	171,06	80,53
39576	199420	171,64	80,79
48620	243059	171,65	80,72

Ú frá jöfnu 22 er fundið varmaviðnám hvers lags fyrir sig í röri

Varmaviðnám stálrörsins er þá:

$$R_A = \frac{\ln\left(\frac{137,25}{132,25}\right)}{2 * \pi * 0,2 * 60,5}$$

$$R_A = 4,88 * 10^{-4} \text{ °C/W}$$

Varmaviðnám innri hrings er:

$$R_B = \frac{\ln\left(\frac{139,25}{137,25}\right)}{2 * \pi * 0,2 * 14,9}$$

$$R_B = 7,72 * 10^{-4} \text{ °C/W}$$



Varmaviðnám ullar og stafa er fundið út frá meðalgildis varmaleiðnistuðli efnanna út frá meðalflatarmáli þess lags í röri.

Meðalradíus þriðja lags er:

$$r_3 = 164,25 \text{ mm}$$

Meðalummál þriðja lags er:

$$U_3 = 2 * \pi * 164,25 = 1032 \text{ mm}$$

Meðalflatarmál þriðja lags er:

$$A_3 = 1032 * 200 = 206400 \text{ mm}^2$$

Flatarmál fjarlægðarstafana þriggja er:

$$A_S = 3 * (2 * 200) = 1200 \text{ mm}^2$$

Þá er flatarmál ullar:

$$A_U = 206400 - 1200 = 205200 \text{ mm}^2$$

Vegið meðaltal af varmaleiðnistuðli þessa lags:

$$k_C = \frac{14,9 * 1200 + 0,053 * 205200}{206400}$$

$$k_C = 0,139 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Varmaviðnám ullar og fjarlægðastafa:

$$R_C = \frac{\ln\left(\frac{189,25}{139,25}\right)}{2 * \pi * 0,2 * 0,139}$$

$$\underline{R_C = 1,75 \text{ }^\circ\text{C/W}}$$

Varmaviðnám ytri hrings er:

$$R_D = \frac{\ln\left(\frac{191,25}{189,25}\right)}{2 * \pi * 0,2 * 14,9}$$

$$\underline{R_D = 5,61 * 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/W}}$$

Varmaviðnám einangrunarfrauðs er:

$$R_E = \frac{\ln\left(\frac{218}{191,25}\right)}{2 * \pi * 0,2 * 0,032}$$

$$\underline{R_E = 3,72 \text{ }^\circ\text{C/W}}$$



Varmaviðnám plastkápu er:

$$R_F = \frac{\ln\left(\frac{225}{218}\right)}{2 * \pi * 0,2 * 0,43}$$

$$\underline{R_F = 0,058 \text{ } ^\circ\text{C/W}}$$

Varmaviðnáms jarðvegs sem er lagskiptur með tveim efnum með mismunandi varmaleiðnistuðla:

$$R_{jarðv.} = R_G = \frac{\ln\left(\frac{2 * (150 + 225)}{225}\right)}{2 * \pi * 0,3} + \frac{300}{0,7 * 4 * \pi * (150 + 225)}$$

$$\underline{R_G = 0,73 \text{ } ^\circ\text{C/W}}$$

Pá er heildarvarmaviðnám alls kerfisins:

$$R_{\text{tot}} = R_A + R_B + R_C + R_D + R_E + R_F + R_G$$

$$\underline{R_{\text{tot}} = 6,26 \text{ } ^\circ\text{C/W}}$$

Varmastreymið er fundið með jöfnu 24:

$$q = \frac{230 - 20}{6,26}$$

$$\underline{q = 33,55 \text{ W}}$$

Hitastig við hvert lag í rörinu er fundið með jöfnu 25:

Hitastig við innri hring:

$$T_2 = 230 - \frac{33,55 * \ln\left(\frac{137,25}{132,25}\right)}{2 * 60,5 * 0,2 * \pi}$$

$$\underline{T_2 = 229,98 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Hitastig við einangrunarstafi og ull:

$$T_3 = 229,98 - \frac{33,55 * \ln\left(\frac{139,25}{137,25}\right)}{2 * 14,9 * 0,2 * \pi}$$

$$\underline{T_3 = 229,96 \text{ } ^\circ\text{C}}$$



Hitastig við ytri hring er:

$$T_4 = 229,96 - \frac{33,55 * \ln\left(\frac{189,25}{139,25}\right)}{2 * 0,139 * 0,2 * \pi}$$

$$\underline{T_4 = 171,2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Hitastig við einangrunarfrauð er:

$$T_5 = 171,2 - \frac{33,55 * \ln\left(\frac{191,25}{189,25}\right)}{2 * 14,9 * 0,2 * \pi}$$

$$\underline{T_5 = 171,18 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Hitastig við innri brún plastkápu:

$$T_6 = 171,18 - \frac{33,55 * \ln\left(\frac{218}{191,25}\right)}{2 * 0,032 * 0,2 * \pi}$$

$$\underline{T_6 = 46,43 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Hitastig við ytri brún plastkápu:

$$T_7 = 46,43 - \frac{33,55 * \ln\left(\frac{225}{218}\right)}{2 * 0,43 * 0,2 * \pi}$$

$$\underline{T_7 = 44,47 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Til að finna hitastigið við yfirborð jarðvegs þarf fyrst að finna varmaleiðnistuðul jarðvegsins, hann fæst með því að snúa k út úr jöfnu 22.

$$k_{\text{jarðv.}} = \frac{\ln\left(\frac{675}{225}\right)}{2 * \pi * 0,2 * 0,73}$$

$$k_{\text{jarðv.}} = 1,19 \text{ W/m} * ^\circ\text{C}$$

Þá er hitastigið við yfirborð jarðvegs:

$$T_8 = 44,47 - \frac{33,55 * \ln\left(\frac{675}{225}\right)}{2 * 1,19 * 0,2 * \pi}$$

$$\underline{T_8 = 19,83 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

14.3.5 Þrýstingur á einangrunarfrauð

Flatarmál ytri hrings sem þrýstir á einangrunarfrauð jafna 26:

$$A = \frac{L * B}{6}$$

Þar sem:

- $L =$ ummál ytri hrings $= 382,5 * \pi = 1201,66$ mm
- $B =$ Dýpt grindar $= 200$ mm

$$A = 40056 \text{ mm}^2$$

Þá er þrýstingurinn á einangrunarfrauð frá jöfnu 27:

$$P = \frac{1280}{40056}$$

$$P = 0,032 \text{ MPa}$$

14.3.6 Niðurbeygja stálrörs

Út frá jöfnu 28 fæst niðurbeygja stálrörs:

$$U_{max} = \frac{1}{384} * \frac{0,853 * 3000^4}{207 * 10^3 * 38,22 * 10^6}$$

$$U_{max} = 0,0228 \text{ mm}$$

14.3.7 Þrýstingur á hlífðarhólk

Út frá jöfnu 28 er hægt að reikna þrýstinginn á hlífðarhólkinn frá einangrunarfrauði:

$$\sigma_{max} = \frac{0,02 * (381,5 + 0,5)}{2 * 0,5}$$

$$\sigma_{max} = 7,64 \text{ MPa}$$



14.4 Viðauki 4 – Smíðateikningar
