

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

MATEJ JEREB

**VPLIV POVIŠANIH TEMPERATUR NA
OBNAŠANJE JEKLENIH REZERVOARJEV**

Diplomska naloga št.: **3201/K**

**EFFECT OF ELEVATED TEMPERATURES ON
STEEL TANKS**

Graduation thesis No.: **3201/K**

Mentor:
prof. dr. Darko Beg

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 2012

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Matej Jereb izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Vpliv povišanih temperatur na obnašanje jeklenih rezervoarjev«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 9. 2. 2012

Matej Jereb

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

| | |
|-------------------------|---|
| UDK: | 624.014:612.014.43(043.2) |
| Avtor: | Matej Jereb |
| Mentor: | prof. dr. Darko Beg |
| Naslov: | Vpliv povišanih temperatur na obnašanje jeklenih rezervoarjev |
| Tip dokumenta: | Diplomska naloga – univerzitetni študij |
| Obseg in oprema: | 87 str., 13 tab., 54 sl., 64 graf., 67 en. |
| Ključne besede: | jekleni rezervoarji, bitumen, temperaturni vpliv, napetosti, izolacija rezervoarja, temelji, nizkociklično utrujanje, upogibna teorija cilindričnih lupin, Abaqus, koeficient trenja |

Izvleček

Diplomsko delo obravnava jeklene rezervoarje, ki so namenjeni skladiščenju bitumna ali podobnih tekočin pri povišanih temperaturah. Osnovni namen naloge je raziskava problema povečanja napetosti oziroma nizkocikličnega utrujanja v rezervoarju zaradi velikih temperaturnih sprememb. Podrobno so opisani rezervoarji za skladiščenje bitumna. Prikazana je uporaba upogibne teorije cilindričnih lupin za izračun napetosti v plašču rezervoarja in predstavljena izpeljava enačbe, ki je vključena v ameriškem standardu API 650. Podrobneje je analizirana velikost vpliva različnih temperatur na rezervoarje različnih dimenzij. Pri vplivu povišanih temperatur je analitično in numerično raziskana vloga trenja med temeljno podlago in jeklenim dnom rezervoarja. Na treh različno velikih rezervoarjih so prikazani principi dimenzioniranja rezervoarja po evropskem standardu EN 1993 in uporaba dela ameriškega standarda API 650, ki obravnava rezervoarje pri povišanih temperaturah. S programom Abaqus so izdelane numerične simulacije treh rezervoarjev za različne obtežne kombinacije. Pokazano je, pri katerih dimenzijah rezervoarja je vpliv temperaturnih razlik pomemben in ga je pri dimenzioniranju treba upoštevati.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK: 624.014:612.014.43(043.2)
Author: Matej Jereb
Supervisor: prof. dr. Darko Beg
Title: Effect of Elevated Temperatures on Steel Tanks
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 87 p., 13 tab., 54 fig., 64 graph., 67 eq.
Keywords: steel tanks, bitumen, effects of temperature, stresses, tank insulation, foundations, low-cycle fatigue, cylindrical shell bending theory, Abaqus, friction coefficient

Abstract

This graduation thesis is concerned with steel tanks for storage of bitumen and other similar fluids at elevated temperatures. The primary aim of the thesis is to study the problem of increased stresses and low-cycle fatigue in tanks due to significant temperature changes. It specifies the characteristics of bitumen storage tanks and shows the application of cylindrical shell bending theory for the calculation of stresses in tank walls. In addition, the paper presents the development of equation taken from the API 650 standard. It analyses the effects of different temperatures on tanks of different dimensions. Concerning the effects of elevated temperatures, the thesis presents an analytical and numerical research of the friction between foundation and tank bottom. On the basis of three tanks of different sizes, it presents design principles according to the European EN 1993 standard, and the application of the American API 650 standard that among other things also deals with tanks at elevated temperatures. Using the Abaqus programme, numerical simulations of three tanks are carried out, considering different load combinations. The thesis provides an overview of tank dimensions at which the effects of elevated temperatures are relevant and should be considered when designing.

ZAHVALA

Za njegov čas in podeljene nasvete pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorju prof. Darku Begu. Zahvala gre tudi vsem ostalim zaposlenim na katedri za metalne konstrukcije, saj so mi ves čas nudili tehnično pomoč in primerno okolje za delo.

Hvala staršem, bratu in ostalim sorodnikom, ki so me med študijem podpirali tako moralno kot tudi materialno. Hvala Manci, ki mi je ves čas stala ob strani, pri diplomski nalogi pa tudi dejavno pomagala z lektoriranjem.

KAZALO VSEBINE

| | |
|---|------------|
| IZJAVA O AVTORSTVU..... | III |
| BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM..... | IV |
| BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT..... | V |
| ZAHVALA..... | VI |
| | |
| 1.0 UVOD..... | 1 |
| 1.1 Opis problema | 1 |
| 1.2 Temperaturni vplivi..... | 1 |
| 1.3 Standardi | 2 |
| 1.4 Rezervoarji za skladiščenje bitumna | 3 |
| 2.0 SPLOŠNO O REZERVOARJIH..... | 4 |
| 2.1 Temeljenje..... | 4 |
| 2.2 Jekleno dno rezervoarja..... | 5 |
| 2.3 Plašč rezervoarja | 5 |
| 2.4 Streha rezervoarja..... | 6 |
| 2.5 Obročne ojačitve | 6 |
| 2.6 Ojačitve in sidra v spoju plašč-dno | 6 |
| 2.7 Bitumen | 6 |
| 2.8 Rezervoarji za skladiščenje bitumna | 7 |
| 2.8.1 Toplotna izolacija..... | 7 |
| 2.8.2 Grelci..... | 7 |
| 2.8.3 Sistem za mešanje | 8 |
| 2.8.4 Režim polnjenja..... | 8 |
| 2.8.5 Posebne zahteve (dostop vode, odzračevanje, temeljenje)..... | 9 |
| 3.0 UPOGIBNA TEORIJA CILINDRIČNIH LUPIN – izpeljava enačb..... | 10 |
| 3.1 Hidrostatski pritisk | 11 |
| 3.2 Temperaturna obtežba | 12 |
| 3.3 Primer | 13 |
| 3.4 Komentar..... | 15 |
| 4.0 OZADJE API 650..... | 16 |
| 4.1 Izpeljava osnovne enačbe..... | 16 |
| 4.2 Poenostavitev enačbe v standardu..... | 18 |
| 4.3 Parametrična študija končne enačbe..... | 20 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 5.0 | VPLIV DIFERENČNIH RAZTEZKOV NA NAPETOSTI V REZERVOARJU..... | 23 |
| 5.1 | Računski model v Abaqusu..... | 23 |
| 5.2 | Rezultati | 24 |
| 5.3 | Komentar..... | 26 |
| 6.0 | VPLIV TRENJA NA OVIRANO RAZTEZANJE..... | 27 |
| 6.1 | Model v Abaqusu | 27 |
| 6.2 | Temperaturna sprememba | 28 |
| 6.3 | Analitičen izračun | 28 |
| 6.4 | Izbrane dimenzije | 28 |
| 6.5 | Rezultati programa Abaqus..... | 28 |
| 6.6 | Izpeljava enačbe za krožno ploščo z obtežbo po zunanjem robu..... | 30 |
| 6.7 | Rezultati | 32 |
| 6.8 | Ugotovitve..... | 33 |
| 6.9 | Analiza enačbe | 33 |
| 7.0 | PRINCIPI ZA DIMENZIONIRANJE REZERVOARJEV V SKLOPU STANDARDOV SIST EN 1993..... | 35 |
| 7.1 | Razredi posledic (ang. <i>Consequence Classes</i>) | 35 |
| 7.2 | Varnostni faktorji | 35 |
| 7.3 | Materialne lastnosti jekla | 36 |
| 7.4 | Mejna stanja nosilnosti..... | 36 |
| 7.4.1 | LS1: meja plastičnosti | 37 |
| 7.4.2 | LS2: ciklična plastičnost | 37 |
| 8.0 | DIMENZIONIRANJE TREH REZERVOARJEV PO SIST EN 1993 | 39 |
| 8.1 | Rezervoar 1 | 39 |
| 8.1.1 | Zasnova | 39 |
| 8.1.2 | Obtežba..... | 39 |
| 8.1.3 | Izračun notranjih statičnih količin z upogibno teorijo..... | 40 |
| 8.1.4 | Kontrola MSN..... | 41 |
| 8.1.5 | Določitev debeline dna..... | 44 |
| 8.2 | Rezervoar 2 | 45 |
| 8.2.1 | Zasnova | 45 |
| 8.2.2 | Obtežba..... | 45 |
| 8.2.3 | Izračun notranjih statičnih količin z upogibno teorijo..... | 46 |
| 8.2.4 | Kontrola MSN | 47 |
| 8.2.5 | Določitev debeline dna..... | 50 |
| 8.3 | Rezervoar 3 | 51 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 8.3.1 | Zasnova | 51 |
| 8.3.2 | Obtežba..... | 51 |
| 8.3.3 | Izračun notranjih statičnih količin z upogibno teorijo..... | 52 |
| 8.3.4 | Kontrola MSN | 53 |
| 8.3.5 | Določitev debeline dna..... | 56 |
| 9.0 | DIMENZIONIRANJE TREH REZERVOARJEV PO API 650 | 57 |
| 9.1 | Rezervoar 1 | 59 |
| 9.2 | Rezervoar 2 | 59 |
| 9.3 | Rezervoar 3 | 60 |
| 9.4 | Komentar..... | 60 |
| 10.0 | MODELI TREH REZERVOARJEV V ABAQUSU..... | 61 |
| 10.1 | Rezervoar 1 | 62 |
| 10.1.1 | Dimenzije in model | 62 |
| 10.1.2 | Obtežne kombinacije..... | 62 |
| 10.1.3 | Razporeditev temperature..... | 62 |
| 10.1.4 | Rezultati | 63 |
| 10.2 | Rezervoar 2 | 67 |
| 10.2.1 | Dimenzije in model | 67 |
| 10.2.2 | Obtežne kombinacije..... | 67 |
| 10.2.3 | Razporeditev temperature..... | 67 |
| 10.2.4 | Rezultati | 68 |
| 10.3 | Rezervoar 3 | 72 |
| 10.3.1 | Dimenzije in model | 72 |
| 10.3.2 | Obtežne kombinacije..... | 72 |
| 10.3.3 | Razporeditev temperature..... | 72 |
| 10.3.4 | Rezultati | 73 |
| 10.4 | Komentar..... | 77 |
| 11.0 | DODATNI OBTEŽNI PRIMERI V ABAQUSU..... | 78 |
| 11.1 | Scenarij 1..... | 78 |
| 11.2 | Scenarij 2..... | 78 |
| 11.3 | Scenarij 3..... | 80 |
| 11.4 | Scenarij 4..... | 81 |
| 11.5 | Komentar..... | 83 |
| 12.0 | ZAKLJUČEK..... | 85 |
| VIRI | | 86 |

KAZALO TABEL

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Redukcijski faktor C..... | 17 |
| Tabela 2: Raztezek dna glede na nanešene temperature | 24 |
| Tabela 3: Rezultati izračunov s programom Abaqus | 28 |
| Tabela 4: Delni varnostni faktorji za obtežbo s tekočino | 35 |
| Tabela 5: Delni varnostni faktorji odpornosti | 35 |
| Tabela 6: Redukcijski faktorji pri povišanih temperaturah | 36 |
| Tabela 7: Redukcijski faktorji pri povišanih temperaturah v API 650..... | 58 |
| Tabela 8: Modul elastičnosti pri povišanih temperaturah v API 650..... | 58 |
| Tabela 9: Povzetek rezultatov v poglavju 9.0 | 60 |
| Tabela 10: Obtežne kombinacije za rezervoar 1 | 62 |
| Tabela 11: Obtežne kombinacije za rezervoar 2 | 67 |
| Tabela 12: Obtežne kombinacije za rezervoar 3 | 72 |
| Tabela 13: Povzetek rezultatov v poglavju 10.0 | 77 |

KAZALO GRAFOV

| | |
|---|----|
| Graf 1: Napetosti zaradi hidrostatske obtežbe..... | 14 |
| Graf 2: Napetosti zaradi hidrostatske obtežbe..... | 14 |
| Graf 3: Napetosti zaradi temperature | 14 |
| Graf 4: Napetosti zaradi temperature | 14 |
| Graf 5: Krivulja utrujanja po enačbi (4.15)..... | 19 |
| Graf 6: Parameter t_b | 21 |
| Graf 7: Parameter t | 21 |
| Graf 8: Parameter C | 21 |
| Graf 9: Parameter K | 22 |
| Graf 10: Pomiki plašča..... | 24 |
| Graf 11: Von Mises-ove napetosti v plašču | 24 |
| Graf 12: Von Mises-ove napetosti v dnu | 24 |
| Graf 13: Radialni pomik dna [mm] | 25 |
| Graf 14: Von Mises-ove napetosti | 25 |
| Graf 15: Potreben k za doseg 10 % manj raztezka, odvisen od višine H | 29 |
| Graf 16: Povečani del grafa (Graf 15)..... | 29 |
| Graf 17: Potreben k za doseg 10 % manj raztezka, odvisen od polmera R | 29 |
| Graf 18: Vpliv na raztezek pri rezervoarju $H = 20$ m in $R = 20$ m | 30 |
| Graf 19: Potreben k za doseg 10 % manj raztezka, odvisen od višine H | 32 |
| Graf 20: Potreben k za doseg 10 % manj raztezka, odvisen od polmera R | 33 |
| Graf 21: Povečani del grafa (Graf 19)..... | 33 |
| Graf 22: Potek temperature po višini rezervoarja 1 | 62 |
| Graf 23: Povečan graf (Graf 22) | 62 |
| Graf 24: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 1 | 63 |
| Graf 25: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 1 | 63 |
| Graf 26: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 1 | 64 |
| Graf 27: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 1 | 64 |
| Graf 28: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 1 | 65 |
| Graf 29: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 1 | 65 |
| Graf 30: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 1 | 66 |
| Graf 31: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 1 | 66 |
| Graf 32: Potek temperature po višini rezervoarja 2 | 67 |
| Graf 33: Povečan graf (Graf 32) | 67 |
| Graf 34: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 2..... | 68 |
| Graf 35: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 2..... | 68 |
| Graf 36: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 2..... | 69 |
| Graf 37: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 2..... | 69 |
| Graf 38: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 2..... | 70 |
| Graf 39: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 2..... | 70 |
| Graf 40: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 2..... | 71 |
| Graf 41: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 2..... | 71 |
| Graf 42: Potek temperature po višini rezervoarja 3 | 72 |
| Graf 43: Povečan graf (Graf 42) | 72 |
| Graf 44: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 3..... | 73 |
| Graf 45: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 3..... | 73 |
| Graf 46: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 3..... | 74 |

| | |
|--|----|
| Graf 47: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 3 | 74 |
| Graf 48: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 3 | 75 |
| Graf 49: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 3 | 75 |
| Graf 50: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 3 | 76 |
| Graf 51: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 3 | 76 |
| Graf 52: Potek temperature po višini rezervoarja za drugi scenarij | 79 |
| Graf 53: Hidrostatski pritisk na plašč rezervoarja za drugi scenarij | 79 |
| Graf 54: Von Mises-ove napetosti v plašču za drugi scenarij | 79 |
| Graf 55: Von Mises-ove napetosti v dnu za drugi scenarij | 80 |
| Graf 56: Potek temperature po višini rezervoarja za tretji scenarij | 80 |
| Graf 57: Hidrostatski pritisk na plašč rezervoarja za tretji scenarij | 80 |
| Graf 58: Von Mises-ove napetosti v plašču za tretji scenarij | 81 |
| Graf 59: Von Mises-ove napetosti v dnu za tretji scenarij | 81 |
| Graf 60: Potek temperature po višini rezervoarja za četrti scenarij | 82 |
| Graf 61: Hidrostatski pritisk na plašč rezervoarja za četrti scenarij | 82 |
| Graf 62: Von Mises-ove napetosti v plašču za četrti scenarij (v sredini) | 82 |
| Graf 63: Von Mises-ove napetosti v plašču za četrti scenarij (spodaj) | 83 |
| Graf 64: Von Mises-ove napetosti v dnu za četrti scenarij | 83 |

KAZALO SLIK

| | |
|--|----|
| Slika 1: Most brez dilatacij..... | 1 |
| Slika 2: Togo vpeti rezervoar – trenje med jeklenim dnom in podlago | 1 |
| Slika 3: Okvirna konstrukcija..... | 2 |
| Slika 4: Rezervoar | 2 |
| Slika 5: Shema temperature po prerezu..... | 2 |
| Slika 6: Utrjeno nasutje (Zdravkov, 2012)..... | 4 |
| Slika 7: Betonski obroč (Zdravkov, 2012) | 4 |
| Slika 8: Betonska temeljna plošča (Zdravkov, 2012)..... | 5 |
| Slika 9: Razporeditev pločevin v dnu rezervoarja – manjši premer (glej ESDEP)..... | 5 |
| Slika 10: Razporeditev pločevin v dnu rezervoarja – večji premer (glej ESDEP)..... | 5 |
| Slika 11: Razporeditev pločevin v plašču (glej ESDEP) | 5 |
| Slika 12: Detajl sidranja rezervoarja v temelje – stranski ris (glej ESDEP) | 6 |
| Slika 13: Detajl sidranja rezervoarja v temelje – tloris (glej ESDEP) | 6 |
| Slika 14: Izolacija plašča rezervoarja..... | 7 |
| Slika 15: Grelci z direktnim vpihovanjem | 7 |
| Slika 16: Oljni grelci | 7 |
| Slika 17: Mešalni sistem – vetrnice..... | 8 |
| Slika 18: Mešalni sistem – s prečrpavanjem | 8 |
| Slika 19: Skica rezervoarja..... | 10 |
| Slika 20: Notranje sile v plašču, ki jih upoštevam | 10 |
| Slika 21: Temp. obtežba – realno stanje..... | 12 |
| Slika 22: Temp. obtežba – računski model | 12 |
| Slika 23: Smeri izračunanih napetosti v plašču..... | 13 |
| Slika 24: Nosilec na elastični podlagi | 18 |
| Slika 25: Model v Abaqusu..... | 23 |
| Slika 26: Shema obtežbe v modelu | 23 |
| Slika 27: Model dna rezervoarja na hrapavi podlagi..... | 27 |
| Slika 28: Skica računskega modela (Bletzinger, 2000)..... | 31 |
| Slika 29: Določitev robne obtežbe p | 32 |
| Slika 30: Vpliv trenja na raztezek dna..... | 34 |
| Slika 31: Skica rezervoarja 1..... | 39 |
| Slika 32: Detajl spoja plašč-dno za rezervoar 1 | 44 |
| Slika 33: Skica rezervoarja 2..... | 45 |
| Slika 34: Detajl spoja plašč-dno za rezervoar 2 | 50 |
| Slika 35: Skica rezervoarja 3..... | 51 |
| Slika 36: Detajl spoja plašč-dno za rezervoar 3 | 56 |
| Slika 37: Model v okolju "Axisymmetric" in njegova preslikava v 3D prostor (Abaqus 6.10 Online Documentation, 2010)..... | 61 |
| Slika 38: Model rezervoarja 1 in mreža končnih elementov v Abaqusu..... | 62 |
| Slika 39: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 1 | 63 |
| Slika 40: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 1 | 64 |
| Slika 41: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 1 | 65 |
| Slika 42: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 1 | 66 |
| Slika 43: Model rezervoarja 2 in mreža končnih elementov v Abaqusu..... | 67 |
| Slika 44: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 2 | 68 |
| Slika 45: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 2 | 69 |

| | |
|--|----|
| Slika 46: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 2 | 70 |
| Slika 47: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 2 | 71 |
| Slika 48: Model rezervoarja 3 in mreža končnih elementov v Abaqusu..... | 72 |
| Slika 49: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 3 | 73 |
| Slika 50: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 3 | 74 |
| Slika 51: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 3 | 75 |
| Slika 52: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 3 | 76 |
| Slika 53: Prikaz von Mises-ovih napetosti za drugi scenarij..... | 79 |
| Slika 54: Prikaz von Mises-ovih napetosti za tretji scenarij | 81 |
| Slika 55: Prikaz von Mises-ovih napetosti za četrti scenarij (v sredini) | 82 |
| Slika 56: Prikaz von Mises-ovih napetosti za četrti scenarij (spodaj)..... | 83 |

1.0 UVOD

1.1 Opis problema

V diplomski nalogi bom obravnaval jeklene rezervoarje za shranjevanje bitumna. Bitumen je pri sobni temperaturi v trdnem stanju. V rezervoarju mora biti ves čas v tekočem stanju, kar dosežemo z grelci znotraj rezervoarja, ki bitumen vzdržujejo na povišani temperaturi in ga ohranjajo v tekočem stanju. Potrebna temperatura skladiščenja je odvisna od vrste bitumna, vendar priporočene vrednosti ne presegajo 200 °C (TOP-Projekt, 2008).

V primeru polnega rezervoarja je tudi temperatura rezervoarja enaka temperaturi bitumna. Ko je rezervoar prazen, se pločevina ohladi na temperaturo okolice. V tem primeru je konstrukcija izpostavljena zelo veliki temperaturni spremembi, kar v rezervoarju povzroča velike pomike. Pričakujem, da se v rezervoarju zaradi tega pojavljajo napetosti. Predvidevam, da je kritično mesto v okolici spoja plašč-dno.

Poleg opisane primera bo predmet obravnave tudi sprememba temperature samo določenega dela konstrukcije, kar bom obravnaval v zadnjem poglavju.

1.2 Temperaturni vplivi

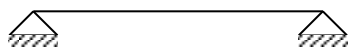
Glede na to, kako v gradbeništvu upoštevamo vpliv temperature na nosilno konstrukcijo, lahko naštejemo tri različne vplive:

- vpliv temperature na pomike,
- vpliv temperature na napetosti v materialu,
- vpliv temperature na spremembo mehanskih lastnosti materiala.

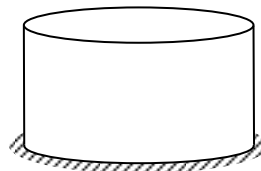
Da se v materialu pojavijo napetosti zaradi temperaturnega vpliva, mora biti izpolnjen vsaj eden od spodnjih pogojev:

- raztezanje konstrukcije je omejeno z elementi iz okolice (robni pogoji)

Šolski primer konstrukcije je nosilec, ki je nepomično podprt na obeh koncih. Ob segrevanju bi se nosilec raztegnil, vendar mu podpore to preprečujejo s horizontalno reakcijo. To v nosilcu povzroči (tlačne) napetosti. Podoben primer se pojavi v primeru rezervoarja, ki je togo vpet.



Slika 1: Most brez dilatacij

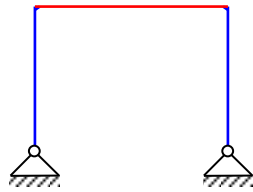


Slika 2: Togo vpeti rezervoar – trenje med jeklenim dnom in podlago

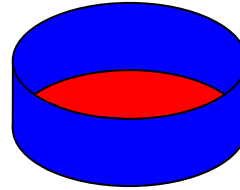
- različno segreti deli statično nedoločene konstrukcije

Če imamo tako okvirno konstrukcijo, kot jo prikazuje Slika 3, lahko z malo inženirskega občutka opazimo, da se bodo pri segrevanju samo zgornje prečke v podporah pojavile

reakcije, v konstrukciji pa posledično napetosti. Spet lahko najdemo vzporednice z rezervoarjem, ki je v resnici prav tako statično nedoločena konstrukcija.



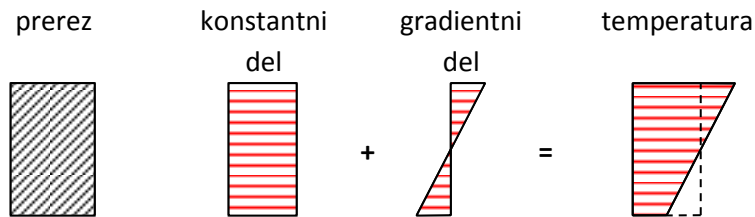
Slika 3: Okvirna konstrukcija



Slika 4: Rezervoar

Razporeditev temperature po prerezu elementa razdelimo na dva dela:

- konstantni del spremembe temperature,
- gradientni del spremembe temperature.



Slika 5: Shema temperature po prerezu

Ker so rezervoarji zgrajeni iz pločevine z debelino do največ nekaj centimetrov, je smiselna predpostavka, da temperaturno spremembo po prerezu upoštevamo kot konstanto in vpliv gradientne razporeditve zanemarimo. Pri temperaturi 200 °C namreč ne pričakujem velike razlike v temperaturi na notranji strani in na zunanji strani rezervoarja.

V nalogi se bom osredotočil na vpliv temperature na povečanje napetosti v materialu. Ker so prisotne visoke temperature, bom upošteval tudi spremembo mehanskih lastnosti jekla.

1.3 Standardi

Projektiranje rezervoarjev je v evropskih predpisih obravnavano v standardih:

SIST EN 1993-1-6 (Trdnost in stabilnost lupinastih konstrukcij) in

SIST EN 1993-4-2 (Rezervoarji).

Oba standarda obravnavata samo rezervoarje, ki so izpostavljeni temperaturi od -50 °C do 300 °C, kar pomeni, da ju lahko uporabimo.

Ker so temperature višje od 150 °C (kot predvideva SIST EN 1993-1-6), upoštevamo tudi spremembe mehanskih lastnosti jekla. Zato uporabimo standard:

SIST EN 1993-1-2 (Splošna pravila – Požarnoodporno projektiranje).

Projektiranje rezervoarjev je v ameriških standardih zajeto v standardu:

API 650 (Welded Tanks for Oil Storage)

Dodatek (Appendix M) v omenjenem standardu opisuje nizkociklično utrujanje za rezervoarje, ki so izpostavljeni temperaturi od 93 °C do 260 °C. Dodatek temelji na strokovnem članku (Karcher, 1981), ki ga bom obravnaval v posebnem poglavju.

1.4 Rezervoarji za skladiščenje bitumna

Na trgu so dostopni rezervoarji, namenjeni posebej shranjevanju bitumna (May in sod., 1999). Možno je dobiti tipske rezervoarje, ki že vključujejo grelne enote, sistem za mešanje vsebine in toplotno izolacijo. Kapaciteta takih rezervoarjev je od 40 m² do 130 m², kar jih uvršča med manjše rezervoarje. Za take rezervoarje je značilno, da so visoki in imajo majhen premer.

Ker se kaže potreba po večjih kapacitetah skladiščenja bitumna, se gradijo tudi novi individualni rezervoarji večjega obsega, ki so zaradi svoje velikosti, redkosti in prilagajanja investitorju nesmiselni za tipsko proizvodnjo. Njihova kapaciteta lahko doseže tudi 10.000 m².

Pojavi se tudi vprašanje, ali lahko rezervoar, ki je prvotno namenjen in projektiran za skladiščenje tekočin s sobno temperaturo, po potrebi rekonstruiramo in dovolimo uporabo za skladiščenje vročih snovi. V tem primeru smo omejeni glede konstrukcijskih ukrepov (kot so izolacija dna, primerno sidranje in priprava podlage), s katerimi bi sicer posredno lahko zmanjšali vpliv temperature. Zato sta podrobnejša analiza in razmislek o vplivu temperature na rezervoar najbolj pomembna ravno za ta sklop rezervoarjev.

2.0 SPLOŠNO O REZERVOARJIH

Za gradnjo nadzemnih rezervoarjev se zaradi značilne natezne obremenitve in potrebe po vodotesnosti uporabljajo jeklene pločevine. Tako kot pri drugih jeklenih konstrukcijah se tudi pri rezervoarjih, namesto jekla S235, vedno bolj uporablja jeklo S355. To omogoča velik prihranek pri materialu, seveda pa zaradi vitkejše konstrukcije zahteva več pozornosti pri kontroli stabilnosti.

V diplomski nalogi bom uporabljal jekla S235.

Osnovni elementi rezervoarja so:

- utrjena podlaga, betonski venec ali betonska plošča,
- jekleno dno rezervoarja (v redkih primerih je dno iz prednapetega betona),
- plašč rezervoarja,
- jeklena streha rezervoarja,
- plavajoč pokrov (v rezervoarjih za bitumen tega elementa ni),
- obročne ojačitve,
- sidra in ojačitve plašča spodaj,
- ostali nekonstrukcijski elementi (priključki, stopnice, merilna mesta, ...).

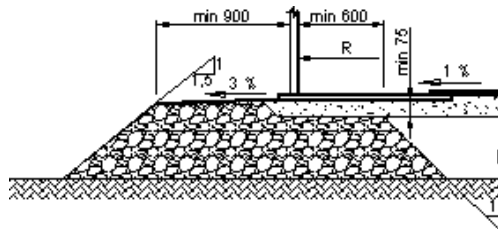
Če v računskem modelu nočemo zanemariti ali posplošiti nekaterih elementov, moramo poznati njihove podrobnosti in vedeti, kako se izvajajo na terenu. Zato bom nekatere elemente dodatno opisal.

2.1 Temeljenje

Poznamo tri osnovne vrste temeljenja rezervoarjev (PIP STE03020, 2005):

- Utrjeno nasutje

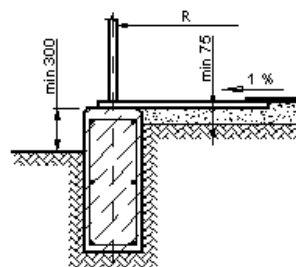
Uporablja se pri velikih rezervoarjih. To je najcenejši način temeljenja. Slabost takega temeljenja je, da ni mogoče sidranje rezervoarja v tla in obstaja nevarnost izpiranja nasutega materiala. Tak način temeljenja v Sloveniji ni običajen.



Slika 6: Utrjeno nasutje (Zdravkov, 2012)

- Betonski obroč

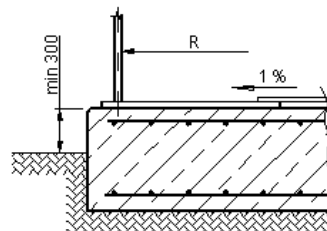
Betonski obroč, ki je lahko tudi prednapet, ščiti notranje nasutje in prevzema horizontalne napetosti v nasutju. Omogoča sidranje rezervoarja. Priprava ravne podlage za dno rezervoarja je zaradi betonskega obroča lažja.



Slika 7: Betonski obroč (Zdravkov, 2012)

- Betonska temeljna plošča

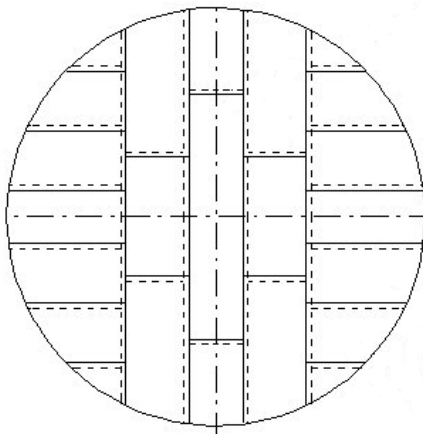
Uporablja se za manjše premere rezervoarjev.
Pogosto se uporablja v primeru slabih temeljnih tal.
Omogoča sidranje rezervoarja v podlago.



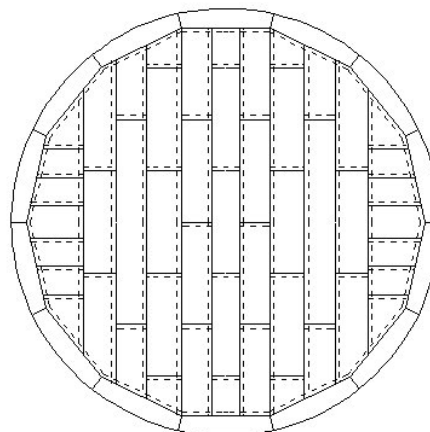
Slika 8: Betonska temeljna plošča (Zdravkov, 2012)

2.2 Jekleno dno rezervoarja

Pri manjših rezervoarjih uporabljamo pravokotne pločevine, spojene s preklopnimi spoji in prirezane, da tvorijo krožno obliko (Slika 9). Za rezervoarje s premerom, večjim od 12,5 m, sestavimo dno iz pravokotnih pločevin v sredini, okoli pa tvorimo obroč pločevin, zvarjenih s čelnimi spoji, imenovan obroč dna (ang. *annular plate*) (Slika 10).



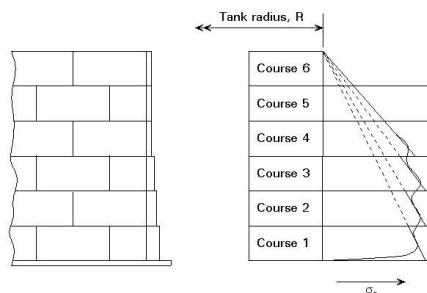
Slika 9: Razporeditev pločevin v dnu rezervoarja – manjši premer (glej ESDEP)



Slika 10: Razporeditev pločevin v dnu rezervoarja – večji premer (glej ESDEP)

2.3 Plašč rezervoarja

Plašč rezervoarja je sestavljen iz več ukrivljenih pločevin, ki so med seboj čelno zvarjene. Debelina pločevine se z višino spreminja. Ker je običajna višina ene pločevine 2 m, je smiselno, da to upoštevamo že v fazi projektiranja in debelino spreminjamo v osnovnem koraku 2 m.



Slika 11: Razporeditev pločevin v plašču (glej ESDEP)

2.4 Streha rezervoarja

Strešna konstrukcija rezervoarja tvori kupolasto obliko. Poznamo različne zasnove strešne konstrukcije:

- membranska konstrukcija (varjene pločevine zagotavljajo zadostno nosilnost)
- podprta konstrukcija (varjene pločevine so nameščene na prostorsko palično konstrukcijo)

Tovrstne strehe so relativno lahke. V stiku streha-plašč namestimo ojačitveni obroč, ki prevzema horizontalno komponento sile. Plašč je zato obremenjen samo z vertikalno silo.

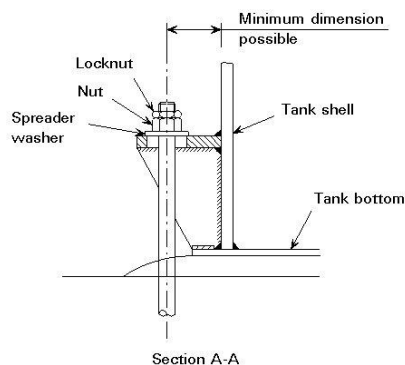
2.5 Obročne ojačitve

Obročne ojačitve na plašču zagotavljajo zadostno stabilnost rezervoarja, na razporeditev napetosti v rezervoarju pa nimajo bistvenega vpliva.

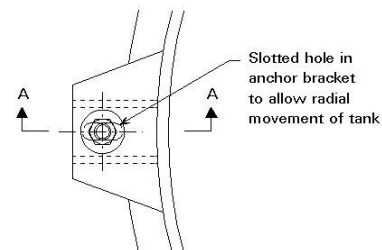
Ker predmet moje naloge ni stabilnostni problem, se v nadaljevanju takim ojačitvam ne bom posvečal.

2.6 Ojačitve in sidra v spoju plašč-dno

Sidranje rezervoarja je potrebno zaradi nateznih sil v plašču, ki jih povzročata veter in potres. Tipični detajl sidranja rezervoarja v temelje prikazujeta Slika 12 in Slika 13.



Slika 12: Detajl sidranja rezervoarja v temelje – stranski ris (glej ESDEP)



Slika 13: Detajl sidranja rezervoarja v temelje – tloris (glej ESDEP)

2.7 Bitumen

Bitumen je trdna snov, ki se zmežča šele pri povišani temperaturi. Uporablja se za izdelavo asfalta, sanacijo razpok v asfaltu ali za zagotavljanje vodotesnosti.

Lastnosti bitumna:

- Temperatura, pri kateri se bitumen vname: 250 °C
- Temperatura skladiščenja: 170–200 °C
- Minimalna temperatura za črpanje: 100 °C
- Temperatura, pri kateri se bitumen zmežča: 40 °C
- Specifična teža bitumna je približno enaka specifični teži vode

Ker obstaja več vrst bitumnov, se njihove lastnosti med seboj nekoliko razlikujejo.

2.8 Rezervoarji za skladiščenje bitumna

Rezervoarji za shranjevanje bitumna imajo posebne omejitve in dodatne elemente, ki jih pri navadnih rezervoarjih ne srečamo. Za razumevanje problema je potreben kratek opis posebnosti, ki vplivajo na razporeditev temperature po rezervoarju. (May in sod., 1999)

2.8.1 Toplotna izolacija

Zaradi zmanjšanja energijskih izgub so rezervoarji toplotno izolirani s stekleno volno. Izolacija je nameščena na plašču, strehi in v nekaterih izvedbah tudi na dnu rezervoarja. Debelina izolacije je običajno 10 cm ali 15 cm.



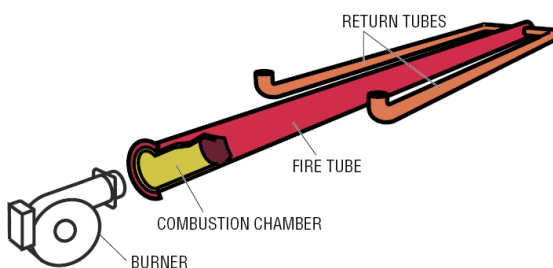
Slika 14: Izolacija plašča rezervoarja

2.8.2 Grelci

V rezervoar so vgrajeni grelci, s katerimi bitumen vzdržujemo na predpisani temperaturi. Po načinu delovanja lahko grelce ločimo na tri vrste (TOP-Projekt, 2008):

– grelci z direktnim vpihovanjem

Gorilec je priključen na grelno cev v rezervoarju in jo segreva direktno s plamenom. Uporablja se v cisternah za transport in manjših rezervoarjih.



Slika 15: Grelci z direktnim vpihovanjem

– oljni grelci

Ob rezervoarju je postavljena samostojna grelna enota, ki segreje olje na visoko temperaturo (300 °C). To je po ceveh speljano do rezervoarja v grelne cevi in nazaj.



Slika 16: Oljni grelci

– električni grelci

Taki grelci so redko uporabljeni. Pri večjih rezervoarjih njihova uporaba ni smiselna.

V rezervoarju so grelci običajno nameščeni v dnu, obstajajo pa tudi vertikalni grelci. Razen v posebnem primeru (gretje po sistemu vodnjaka), kjer segrevajo le sredico, ostali bitumen pa služi kot toplotna izolacija, je vgrajen sistem za mešanje, ki zagotavlja enakomerno temperaturo bitumna v rezervoarju.

2.8.3 Sistem za mešanje

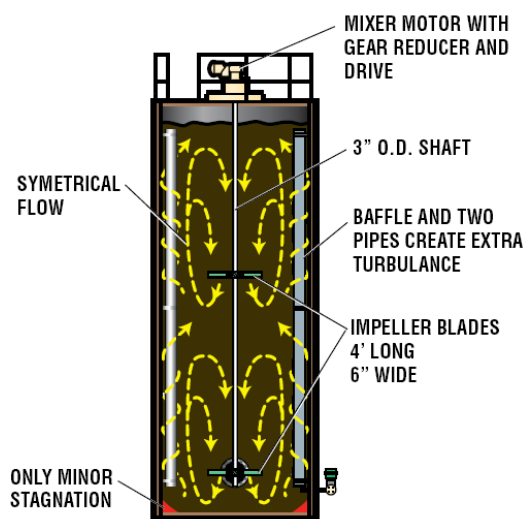
Mešanje bitumna poteka ves čas skladiščenja. V manjših rezervoarjih, ki so običajno serijsko proizvedeni, je mešanje zagotovljeno z vetrnicami v notranjosti rezervoarja. Lahko so vgrajene tudi dodatne ovire, ki pomagajo pri mešanju.

V večjih rezervoarjih se uporablja mešanje s prečrpavanjem. Bitumen iz dna s pomočjo črpalk po ceveh prečrpamo v višje sloje.

Pri obeh načinih mešanja je s stalnim spremljanjem več kontrolnih mest v rezervoarju zahtevano, da je temperatura enakomerna in na nobenem mestu ne pride do pregrevanja (nevarnost vžiga).



Slika 17: Mešalni sistem – vetrnice



Slika 18: Mešalni sistem – s prečrpavanjem

2.8.4 Režim polnjenja

Za polnjenje novega rezervoarja (»prvo polnjenje«) ali polnjenje po dolgem času obstajajo posebna navodila (API Recommended Practice 2023, 2001).

Postopek polnjenja:

- rezervoar mora biti popolnoma suh;
- dozirne cevi morajo biti segrete na dovolj visoko temperaturo;
- grelci so izključeni; doziramo toliko bitumna, da so grelci za nekaj centimetrov potopljeni;
- vključimo grelce in bitumen segrevamo na potrebno temperaturo, kar traja vsaj 15 minut;
- nadaljujemo s polnjenjem.

Ker je prisotnost vode v rezervoarju zelo nevaren primer, je zgornji postopek namenjen ravno preprečevanju prisotnosti najmanjše količine vode. S segrevanjem se voda upari in se odstrani iz rezervoarja.

V nalogi bom opisani postopek uporabil kot obtežno situacijo.

2.8.5 Posebne zahteve (dostop vode, odzračevanje, temeljenje)

Ker je temperatura bitumna precej višja, kot je vrelišče vode, se voda ob stiku z bitumnom v trenutku upari. To lahko v rezervoarju povzroči znatno povečanje tlaka in posledično poškodbe rezervoarja. Zato je treba poskrbeti, da voda ne more priti v notranjost rezervoarja.

Ker so možni veliki raztezki rezervoarja, je treba pustiti dovolj prostora za raztezanje (brez sidranja, primerno izvedena inštalacija). Da se izognemo potrebi po sidranju rezervoarja, je smiselno izbrati rezervoarje z nizkim razmerjem višina/radij.

3.0 UPOGIBNA TEORIJA CILINDRIČNIH LUPIN – izpeljava enačb

Za izračun notranjih sil v plašču rezervoarja lahko uporabimo upogibno teorijo. Z upogibno teorijo lahko izračunamo normirane notranje sile m_x , m_φ , n_x , n_φ , q_x , q_φ v rotacijskih lupinah. Obravnaval bom samo plašč rezervoarja. Enačbe za določitev notranjih sil so odvisne od obtežbe. Zato moramo za vsako obliko obtežbe (konstantni pritisk, vodni pritisk, temperaturna obtežba) izpeljati posebne končne enačbe, ki veljajo samo za izbrano vrsto obtežbe. Najprej bom zapisal osnovne enačbe, ki so izpeljane v literaturi (Reflak, 1999), v nadaljevanju pa bom te enačbe razvil v končne enačbe za različne vrste obtežb (hidrostatski pritisk in vpliv temperature).

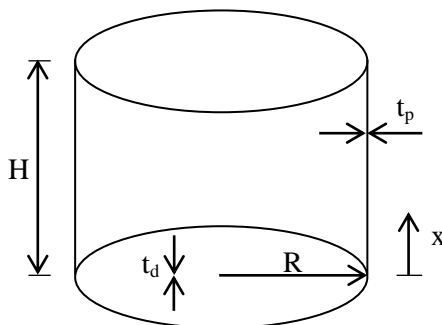
Diferencialna enačba rezervoarja s konstantno debelino stene in hidrostatskim pritiskom je:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{12(1-\nu^2)}{R^2 t_p^2} w = \frac{12(1-\nu^2)}{E t_p^2} \gamma (H - x) \quad (3.1)$$

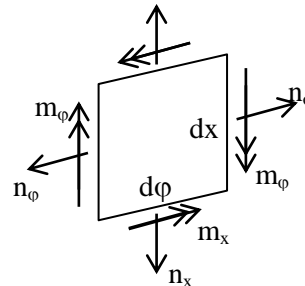
Kjer so:

t_p ... debelina plašča
 t_d ... debelina dna
 R ... polmer rezervoarja
 w ... radialni pomik plašča

x ... razdalja od dna
 H ... višina rezervoarja
 γ ... specifična teža tekočine
 ν ... Poissonov količnik



Slika 19: Skica rezervoarja



Slika 20: Notranje sile v plašču, ki jih upoštevam

Splošna rešitev nehomogene diferencialne enačbe je znana iz literature:

$$w = \frac{R^2}{E t_p} \gamma (H - x) + e^{\lambda x} (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x) \quad (3.2)$$

Kjer so:

E ... elastični modul jekla
 C_1, C_2, C_3, C_4 ... konstante, ki jih določimo z robnimi pogoji

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{R t_p}} \sqrt[4]{3(1-\nu^2)} \quad (3.3)$$

$$K = \frac{E t_p^2}{12(1-\nu^2)} \quad (3.4)$$

Notranje sile so določene kot:

$$\begin{aligned}n_{\varphi} &= Et_p \frac{w}{a} \\m_x &= K \frac{d^2 w}{dx^2} \\q_x &= K \frac{d^3 w}{dx^3}\end{aligned}\tag{3.5}$$

Kjer so:

n_{φ} , n_x ... membranske sile
 m_{φ} , m_x ... momenti
 q_x ... prečne sile

Končne enačbe so odvisne od robnih pogojev in načina obtežbe.

3.1 Hidrostatski pritisk

Robni pogoji:

Zgornji rob rezervoarja je nepodprt, zato sta prvi dve konstanti $C_1 = 0$ in $C_2 = 0$.

Ker je spodnji rob rezervoarja predviden kot togo podprt, pomeni, da so zasuki in pomiki v točki $x = 0$ enaki 0. To zapišemo, kot sledi:

$$\begin{aligned}\frac{dw}{dx} \Big|_{(x=0)} &= 0 \\w &= 0\end{aligned}\tag{3.6}$$

Ko v enačbi (3.2) upoštevamo robne pogoje, dobimo konstanti:

$$C_3 = -\frac{H\gamma}{4K\lambda^4}\tag{3.7}$$

$$C_4 = -\frac{-\gamma + H\gamma\lambda}{4K\lambda^5}\tag{3.8}$$

Končne enačbe so torej:

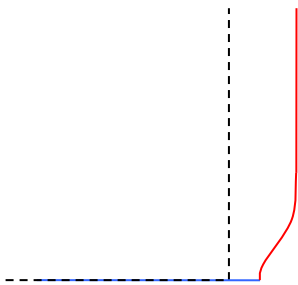
$$m_x(x) = \frac{e^{-x\lambda} \gamma \left((-1 + H\lambda) \cos(x\lambda) - H\lambda \sin(x\lambda) \right)}{2\lambda^3}\tag{3.9}$$

$$m_{\varphi}(x) = \nu m_x(x)\tag{3.10}$$

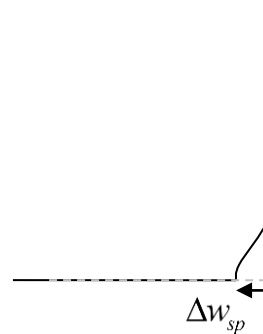
$$n_{\varphi}(x) = -\frac{e^{-x\lambda} Et_p \gamma \left(e^{x\lambda} (-H + x)\lambda + H\lambda \cos[x\lambda] + (-1 + H\lambda) \sin[x\lambda] \right)}{4RK\lambda^5}\tag{3.11}$$

3.2 Temperaturna obtežba

Predpostavimo, da se dno rezervoarja zaradi različnih temperatur in trenja s podlago razteza drugače kot plašč (Slika 21). To lahko upoštevamo kot vsiljen pomik spodnje točke, ki predstavlja razliko med pomiki plašča in pomiki dna (Slika 22). Robne pogoje je lažje zapisati za situacijo, kot jo prikazuje Slika 22. Zato bom v računu upošteval te robne pogoje, vendar pa bom predpostavljal, da s tem opisujem vpliv temperature.



Slika 21: Temp. obtežba – realno stanje



Slika 22: Temp. obtežba – računski model

Robni pogoji:

Zgornji rob rezervoarja je prost, zato sta prvi dve konstanti $C_1 = 0$ in $C_2 = 0$.

Spodnji rob rezervoarja je torej še vedno toga vpet in je zasuk enak 0. Horizontalni pomik pa je enak predpisanemu pomiku, ki predstavlja razliko temperatur:

$$\begin{aligned} \frac{dw^{(x=0)}}{dx} &= 0 \\ w^{(x=0)} &= \Delta w_{sp} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Da bom lahko računal s temperaturo, zapišem še razliko pomika, izraženo s temperaturo dna in temperaturo plašča.

$$\Delta w_{sp} = (T_p - T_d) * \alpha_t * R \quad (3.13)$$

Kjer je:

T_p ... temperatura plašča
 T_d ... temperatura dna

α_t ... temperaturni koeficient dolžinskega raztezka
 Δw_{sp} ... vsiljeni pomik

Ko v enačbi (3.2) upoštevamo robne pogoje, dobimo konstanti:

$$\begin{aligned} C_3 &= \Delta w_{sp} - \frac{H\gamma}{4K\lambda^4} \\ C_4 &= -\frac{-\gamma + H\gamma\lambda + \Delta w_{sp} 4K\lambda^5}{4K\lambda^5} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Za $\gamma = 0$ dobimo končne enačbe:

$$w(x) = e^{-x\lambda} \Delta w_{sp} (\cos[x\lambda] + \sin[x\lambda]) \quad (3.15)$$

$$m_x(x) = -2e^{-x\lambda} K \Delta w_{sp} \lambda^2 (\cos[x\lambda] - \sin[x\lambda]) \quad (3.16)$$

$$m_\varphi(x) = \nu m_x(x) \quad (3.17)$$

$$n_\varphi(x) = \frac{e^{-x\lambda} E t_p \Delta w_{sp} (\cos[x\lambda] + \sin[x\lambda])}{R} \quad (3.18)$$

3.3 Primer

Da preverim pravilnost izpeljanih enačb, bom naredil kratek primer, ki ga bom izračunal z dobljenimi enačbami in z računalniškim programom Abaqus. Rezultate bom primerjal na grafih.

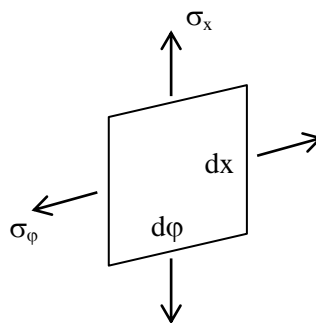
S programom Abaqus sem naredil model rezervoarja z enakimi robnimi pogoji, kot sem jih uporabil v izpeljavi enačb. Upošteval sem tudi enake materialne in geometrijske lastnosti rezervoarja z naslednjimi podatki:

| | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ | $t_p = 10 \text{ mm}$ |
| $\nu = 0,3$ | $T_p = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| $H = 20 \text{ m}$ | $T_d = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| $R = 20 \text{ m}$ | rezervoar je togo vpet |

Ker z izpeljanimi enačbami, za razliko od programa Abaqus, še ne dobim napetosti, moram zapisati še enačbe, ki predstavljajo napetosti na zunanem robu pločevine v odvisnosti od normiranih notranjih sil, ki so rezultat izpeljanih enačb. Nato bom primerjal napetosti.

$$\sigma_x = m_x \frac{6}{1 * t^2} + \frac{n_x}{t} \quad (3.19)$$

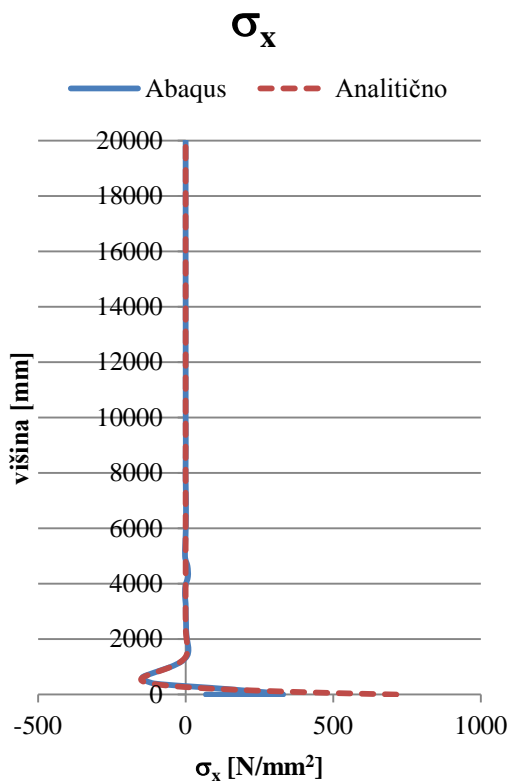
$$\sigma_\varphi = m_\varphi \frac{6}{1 * t^2} + \frac{n_\varphi}{t} \quad (3.20)$$



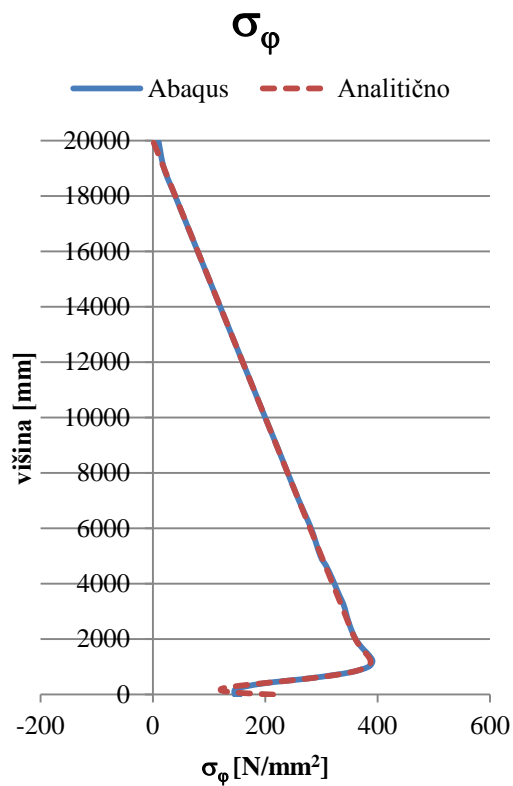
Slika 23: Smeri izračunanih napetosti v plašču

Napetosti v plašču rezervoarja za zgornji primer:

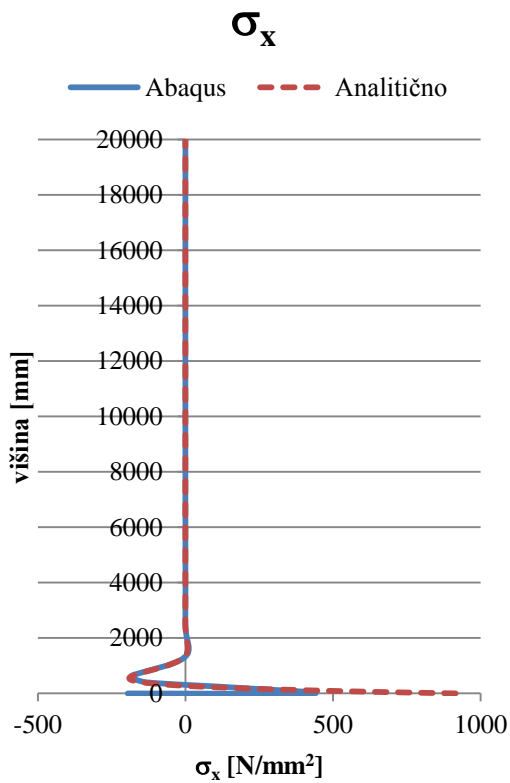
Graf 1: Napetosti zaradi hidrostatske obtežbe



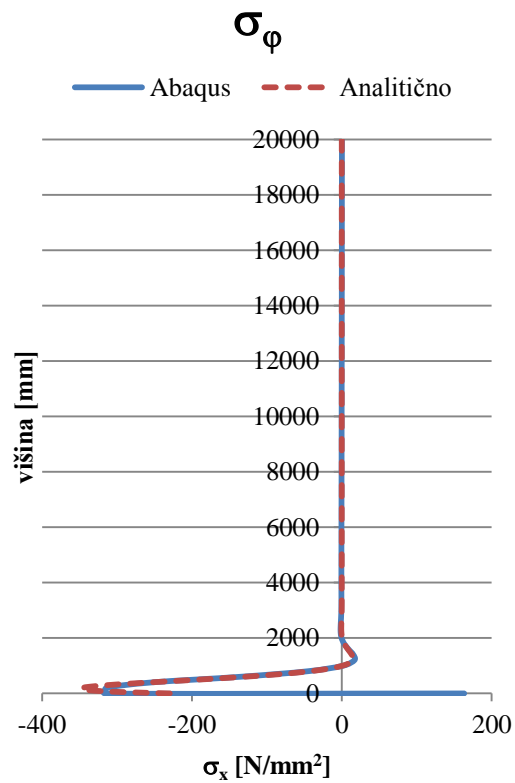
Graf 2: Napetosti zaradi hidrostatske obtežbe



Graf 3: Napetosti zaradi temperature



Graf 4: Napetosti zaradi temperature



3.4 Komentar

Z zgornjim primerom sem potrdil pravilnost izpeljanih enačb. Hkrati pa sem tudi ugotovil, kako gosto mrežo končnih elementov potrebujem v programu Abaqus, da so rezultati zadovoljivo natančni. Robna motnja v plašču se namreč pojavi v ozkem območju spodaj, in če mreža ne bi bila dovolj gosta, izračun ne bi pokazal pravih maksimalnih vrednosti.

Za izračun notranjih sil v rezervoarju s predpostavko togega vpetja v dno in obtežbo v obliki vodnega pritiska ali temperature bom v nadaljevanju lahko uporabil izpeljane enačbe, ki omogočajo hitrejši izračun. Izdelava modela v Abaqusu namreč zahteva nekaj časa. Zato je za enostavne probleme, ki so rešljivi analitično, račun hitrejši z uporabo izpeljanih enačb.

4.0 OZADJE API 650

V ameriških standardih za projektiranje rezervoarjev, API 650, je posebno poglavje, ki predpisuje kontrolo rezervoarja zaradi povišanih temperatur. Temu je namenjen dodatek »Appendix M«. Enačbe v dodatku temeljijo na strokovnem članku »Thermal stresses in tanks operating at elevated temperatures« (Karcher, 1978), ki ga bom povzel v tem poglavju.

4.1 Izpeljava osnovne enačbe

Avtor se problema temperature loti podobno, kot sem opisal v prejšnjem poglavju. Enačbe so izpeljane iz upogibne teorije, vendar je temperatura upoštevana drugače, kot sem jo upošteval v prejšnjem poglavju (poglavju 3.0). Poleg temperature so upoštevani še drugi vplivi, kar enačbe še dodatno zaplete.

Splošna rešitev nehomogene diferencialne enačbe je postavljena nekoliko drugače:

$$w = e^{-\lambda x} (C_1 \cos(\lambda x) + C_2 \sin(\lambda x)) + f(x) \quad (4.1)$$

$$f(x) = -\frac{\gamma(H-x)R^2}{Et_p} - \alpha_i R \Delta T$$

Kjer je:

ΔT ... sprememba temperature

Tako je vpliv temperature vključen že v osnovni enačbi, končne enačbe, ki sem jih izpeljal sam, in avtorjeve pa sicer ostanejo enake.

Vendar pa avtor v članku predpostavi drugačne robne pogoje, in sicer tako, da v spoju plašč-dno vedno pride do polne plastifikacije. Spoj se deformira in zato zasuk v točki $x = 0$ ni enak 0. Zato zapiše robne pogoje, kot sledi:

$$M_d^{(x=0)} = \frac{f_y t_d^2}{4} \quad (4.2)$$

$$w^{(x=0)} = 0$$

Kjer je:

M_d ... polno plastični moment v dnu rezervoarja

f_y ... meja plastičnosti

t_d ... debelina dna

Tako pride do enačb, ki se zaradi drugačnih robnih pogojev razlikujejo od enačb iz prejšnjega poglavja (3.2):

Pomiki:

$$w = -\frac{\gamma R^2}{Et_p} \left\{ H - x + \frac{\alpha_i \Delta T E t_p}{\gamma R} - e^{-\beta x} \left[\left(H + \frac{\alpha_i \Delta T E t_p}{\gamma R} \right) \cos(\lambda x) + \frac{2\lambda^2 M_d}{\gamma} \sin(\lambda x) \right] \right\} \quad (4.3)$$

Momenti:

$$M_x = -\frac{\gamma}{2\lambda^2} e^{-\lambda x} \left[\left(H + \frac{\alpha_t \Delta T E t_p}{\gamma R} \right) \sin(\lambda x) - \frac{2\lambda^2 M_d}{\gamma} \cos(\lambda x) \right] \quad (4.4)$$

Osne sile:

$$N_g = \gamma R \left\{ H - x - e^{-\lambda x} \left[\left(H + \frac{\alpha \Delta T E t}{\gamma R} \right) \cos(\lambda x) + \frac{2\lambda^2 M_b}{\gamma} \sin(\lambda x) \right] \right\} \quad (4.5)$$

Prečne sile:

$$Q_x = -\left(\frac{\gamma}{2\lambda} \right) (e^{-\lambda x}) \left[\left(H + \frac{\alpha_t \Delta T E t_p}{\gamma R} \right) (\cos(\lambda x) - \sin(\lambda x)) + \frac{2\lambda^2 M_d}{\gamma} (\sin(\lambda x) + \cos(\lambda x)) \right] \quad (4.6)$$

V izpeljavi je predvideno, da dno rezervoarja ostane na mestu, čeprav se v resnici po avtorjevih izkušnjah raztegne za približno polovico računске vrednosti ($\alpha R \Delta T$). V nadaljevanju članka je zato uveden faktor C, ki predstavlja delež vpliva raztezka dna glede na računsko vrednost.

Tabela 1: Redukcijski faktor C

| Pričakovani raztezek dna v % $\alpha R \Delta T$ | Redukcijski faktor (C) |
|---|---------------------------|
| 0 | 1,0 |
| 25 | 0,75 |
| 50 | 0,50 |
| 75 | 0,25 |
| 100 | 0,0 |

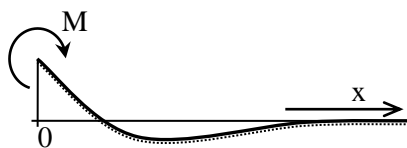
Enačbe v tej točki predstavljajo upogibno teorijo in veljajo za vse točke po višini plašča. V nadaljevanju se avtor osredotoči na zasuk plašča v dnu rezervoarja in ga izrazi s pomočjo pravkar dobljenih enačb. Zasuk plašča v točki $x = 0$ je torej naslednji:

$$\frac{dw}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{\gamma R^2}{E t_p} \left[1 - \lambda H - \frac{C \alpha_t \lambda \Delta T E t_p}{\gamma R} + \frac{\lambda^2 f_y t_d^2}{2\gamma} \right] = \theta \quad (4.7)$$

Podatek o zasuku poveže z enačbo (4.8), ki opisuje nosilec na elastični podlagi (Hetenyi, 1979). Tako obravnava dno rezervoarja (obroč dna) glede na vpliv plašča.

$$M = \frac{K \theta}{4\lambda^3} \quad (4.8)$$

kjer je $\lambda = \sqrt[4]{\frac{3K}{E t_b^3}}$ (4.9)



Slika 24: Nosilec na elastični podlagi

Da dobimo napetosti, predpostavimo linearen potek napetosti po prerezu in zato uporabimo enačbo:

$$S_b = \pm \frac{6M}{t_b^2} \quad (4.10)$$

Kot končni rezultat avtor zapiše enačbo:

$$S_b = \pm \frac{0,658\gamma R^2}{t_p} \sqrt{\frac{Kt_d}{E}} \left(1 - \lambda H - \frac{\lambda C \alpha_t \Delta T E t_p}{\gamma R} + \frac{\lambda^3 f_y t_d^2}{2\gamma} \right) \quad (4.11)$$

Kjer je:

S_b ... napetost v dnu (obroč dna) tik ob spoju plašč-dno

S pomočjo enačb, ki opisujejo obnašanje plašča, in z uporabo enačbe za nosilec na elastični podlagi dobimo kritične napetosti v obroču dna.

4.2 Poenostavitev enačbe v standardu

Ker enačba vsebuje veliko parametrov, je smiselno tiste parametre, ki so konstantni, vstaviti in izdelati enostavno enačbo, ki je primerna za uporabo pri projektiranju. To avtor tudi naredi v svojem naslednjem članku (Karcher, 1981).

Z vstavljanjem številčnih vrednosti v enačbo poleg vrednosti v enačbo pridejo tudi enote. Te zahtevajo, da so tudi drugi podatki, ki jih vnaša uporabnik, vneseni v točno določenih enotah. To pomeni, da dobimo vsaj dve različni enačbi, eno za metrični sistem in eno za ameriški sistem enot.

SI – enote:

$$S_a = \frac{0,028D^2 t_d^{0,25}}{t_p} \left(\frac{58HG}{(Dt_p)^{0,5}} + \frac{26,2CT_p^{0,5}}{D^{1,5}} - \frac{4,8Bf_y t_d^2}{(Dt_p)^{1,5}} - G \right) \quad (4.12)$$

US – enote:

$$S_a = \frac{0,033D^2 t_d^{0,25}}{t_p} \left(\frac{6,3HG}{(Dt_p)^{0,5}} + \frac{436CT_p^{0,5}}{D^{1,5}} - \frac{Bf_y t_d^2}{(Dt_p)^{1,5}} - G \right) \quad (4.13)$$

Kjer je:

S_a ... napetosti v dnu tik ob spoju plašč-dno

D ... premer rezervoarja

G ... specifična teža tekočine ($G_{\text{vode}} = 1$)

B ... faktor temeljenja

= 2 ... za utrjeno nasutje

= 4 ... za betonski obroč ali temeljno ploščo

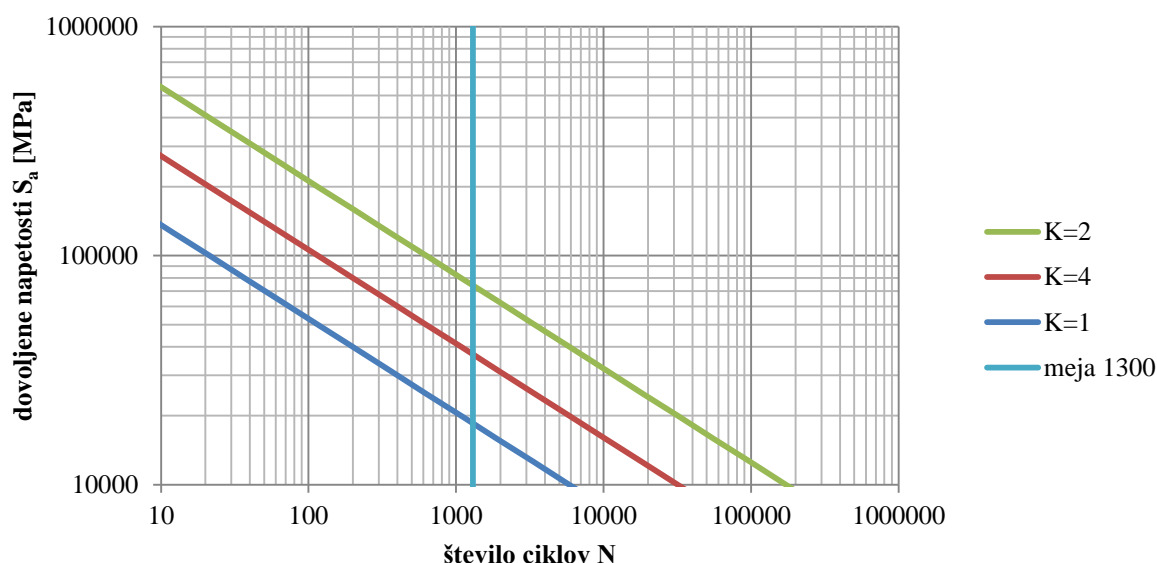
Ker je pri izpeljavi enačbe uporabljena predpostavka, da se v spoju plašč-dno razvije polno-plastični moment v dnu, ta pogoj zapišemo z dodatno enačbo (4.14). Veljavnost te enačbe torej pogojuje uporabo zgornje enačbe.

$$\left(\frac{6,3HG}{(Dt)^{0,5}} + \frac{436Ct^{0,5}}{D^{1,5}} - G \right) > \frac{BS\gamma t_b^2}{(Dt)^{1,5}} \quad (4.14)$$

Napetosti, dobljene z enačbo (4.12) oziroma (4.13), avtor uporabi za kontrolo utrujanja. Za kontrolo predlaga krivuljo utrujanja, ki jo opisuje enačba:

$$N = \left(\frac{1,4 \times 10^6}{KS_a} \right)^{2,44} \quad (4.15)$$

Graf 5: Krivulja utrujanja po enačbi (4.15)



Kjer je:

K ... faktor, ki predstavlja vpliv geometrije in kvalitete zvara v stiku plašč-dno

= 4.0 ... za rezervoarje, ki so varjeni čelno ali preklopno po standardu API 650

= 2.0 ... za rezervoarje, ki imajo vse zware v obroču dna čelno varjene in rentgensko pregledane

Število N , ki ga izračunamo z enačbo (4.15), predstavlja življenjsko dobo rezervoarja. To pomeni, da rezervoar lahko doživi N ciklov in ne bo problema nizkocikličnega utrujanja. Če bi rezervoar izpraznili in nazaj napolnili vsak teden in bi to počeli 25 let (kot je predvidena življenjska doba rezervoarja) bi dobili 1300 ciklov. To je tudi predvideno najvišje možno število, ki se lahko pojavi. Če

se torej izkaže, da je življenjska doba rezervoarja več kot 1300 ciklov, smo lahko prepričani, da jih pri uporabi ne bomo preseгли. Lahko pa vnaprej predvidimo, kakšna bo frekvenca polnjenja in izračunamo število ciklov, ki se bodo pojavili v 25 letih. To število nato primerjamo z življenjsko dobo rezervoarja (število N po enačbi (4.15)). Število N mora biti večje.

4.3 Parametrična študija končne enačbe

Ker je enačba dokaj zapletena, bom za razumevanje, kako na rezultat vplivajo posamezni parametri, naredil parametrično študijo enačbe.

Opazovana enačba:

$$N = \left(\frac{9,7 \times 10^3}{KS_a} \right)^{2,44} \quad (4.16)$$

Kjer je:

$$S = \frac{0,028D^2t_d^{0,25}}{t_p} \times \left[\frac{58HG}{(Dt_p)^{0,5}} + \frac{26,2CTt_p^{0,5}}{D^{1,5}} - \frac{4,8Bf_y t_d^2}{(Dt_p)^{1,5}} - G \right] \quad (4.17)$$

Dodatni pogoj veljavnosti enačbe:

$$\left[\frac{58HG}{(Dt_p)^{0,5}} + \frac{26,2CTt_p^{0,5}}{D^{1,5}} - G \right] > \frac{4,8Bf_y t_d^2}{(Dt_p)^{1,5}} \quad (4.18)$$

Opazujemo odvisnost enačbe od naslednjih parametrov:

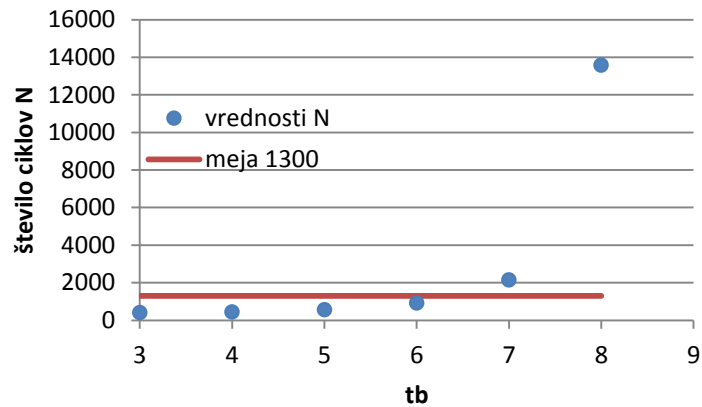
| | |
|---------------------------------------|--|
| t_d ... debelina dna rezervoarja | C ... faktor odpora pri temperaturnem raztežku |
| t_p ... debelina plašča rezervoarja | K ... faktor geometrije in kvalitete zvarov |

Primerjava je narejena na naslednjih osnovnih podatkih:

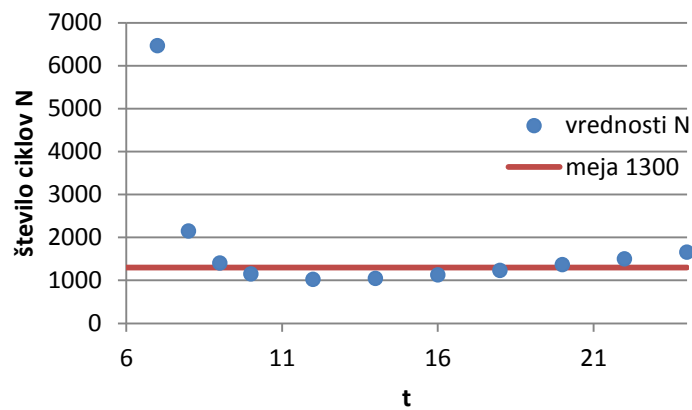
| | | |
|--------------|--------------|-----------------|
| $H = 10$ m | $T = 200$ °C | $f_y = 176$ Mpa |
| $D = 20$ m | $C = 0,5$ | $K = 4$ |
| $t_p = 8$ mm | $B = 4$ | |
| $t_d = 7$ mm | $G = 1$ | |

To pomeni, da bom spreminjal izbrani parameter, ostali, ki se ne bodo spreminjali, pa bodo taki, kot so navedeni zgoraj.

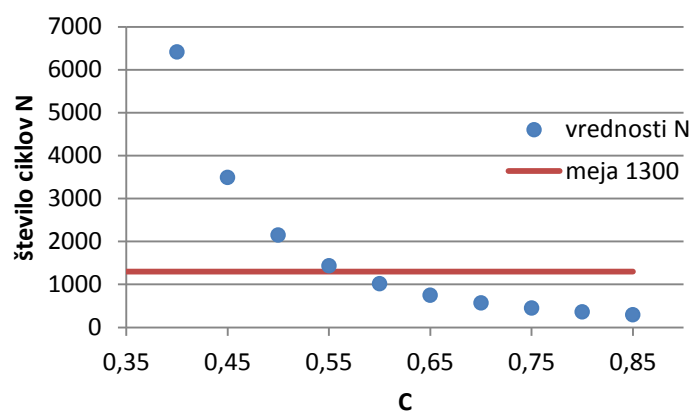
Graf 6: Parameter tb



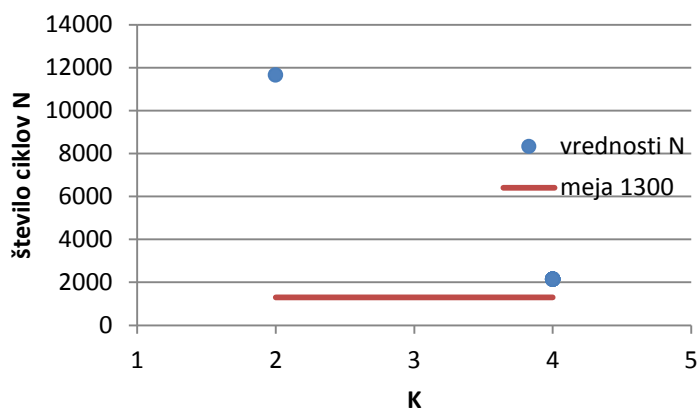
Graf 7: Parameter t



Graf 8: Parameter C



Graf 9: Parameter K



Kot rezultat parametrične študije lahko navedem nekaj ugotovitev:

S spreminjanjem debeline plašča (t_p) in debeline dna (t_d) se pokaže, da mora biti t_d manjša od t_p , kar je logično, ker enačba zahteva plastifikacijo v dnu, kar je mogoče samo, če je pločevina tanjša od plašča.

Najvišje vrednosti dobimo, če sta vrednosti t_d in t_p skoraj enaki. Sicer pa vrednost pade in se z večanjem razlike med t_p in t_d ne spreminja več veliko.

Koeficient K, ki predstavlja kvaliteto zvarov in je lahko samo $K = 2$ ali $K = 4$, ima relativno velik vpliv na rezultat enačbe.

V standardu API 650 je dovoljena izbira koeficienta C od 0,25 do 1,0. Če ni podatkov o raztezanju, je konzervativno predvidena vrednost 0,85. Dovoljeni razpon je velik, izbira koeficienta pa na rezultat bistveno vpliva. Z manjšanjem parametra C od 0,5 navzdol se rezultat enačbe strmo povečuje. Zato bi bilo smiselno koeficient določiti bolj natančno. Ker ima sprememba koeficienta C tako velik vpliv na končni rezultat, v standardu pa je definiran zelo ohlapno oziroma konzervativno, se izkaže, da bi bila potrebna natančnejša definicija koeficienta.

Samo z izbiro koeficienta znotraj trenutno dovoljenih mej lahko praktično vsak rezervoar pokažemo hkrati kot pravilno oziroma napačno dimenzioniranega.

Poleg tega pa koeficienta C sploh ne znamo oceniti, saj ne vemo, kakšne raztezke lahko pričakujemo.

5.0 VPLIV DIFERENČNIH RAZTEZKOV NA NAPETOSTI V REZERVOARJU

Če bi se rezervoar lahko v vse smeri raztegnil brez ovir, potem se v njem ne bi pojavljale nobene dodatne napetosti. Vendar pa se rezervoar, kot je upoštevano že v prejšnjem poglavju (s koeficientom C), ne razteza enakomerno. Ker podatka o tem, kakšne so razlike v raztezkih v različnih delih rezervoarja, nisem nikjer našel, bom v tem poglavju raziskal, kako različno veliki diferencialni raztezki prispevajo k povečanju napetosti po rezervoarju.

Najlažje in tudi najpriljubljenejši podatke bi dobil z eksperimentom. Vendar pa bi za eksperiment potreboval veliko časa in še posebno veliko finančno podporo, ki presega doseg diplomskega dela, zato bom namesto eksperimenta uporabil simulacijo programa Abaqus.

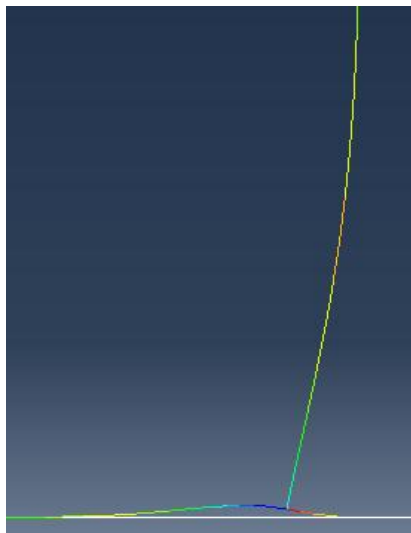
Običajna situacija je taka, da se dno rezervoarja raztegne nekoliko manj kot plašč. V modelu bom zato predvidel različno velike razlike med raztezkom dna in raztezkom plašča.

5.1 Računski model v Abaqusu

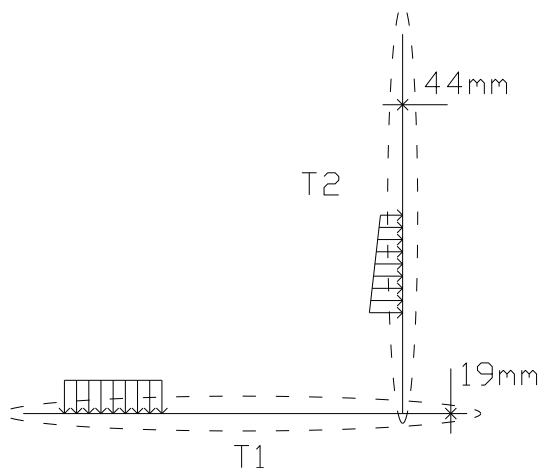
Za analizo sem si izbral rezervoar s podatki:

$$\begin{array}{ll} R = 30m & tb = 19mm(dno) \\ H = 20m & E = 210000N / mm^2 \\ t = 44mm(plašč) & Ph = 0,2N / mm^2 \end{array}$$

Jeklo nima podane meje plastičnosti.



Slika 25: Model v Abaqusu



Slika 26: Shema obtežbe v modelu

Podlaga je definirana brez trenja. Uporabljeni so končni elementi »wire« v osnosimetričnem okolju.

V modelu je upoštevan hidrostatski pritisk, ki na dnu znaša $0,2 \text{ N/mm}^2$.

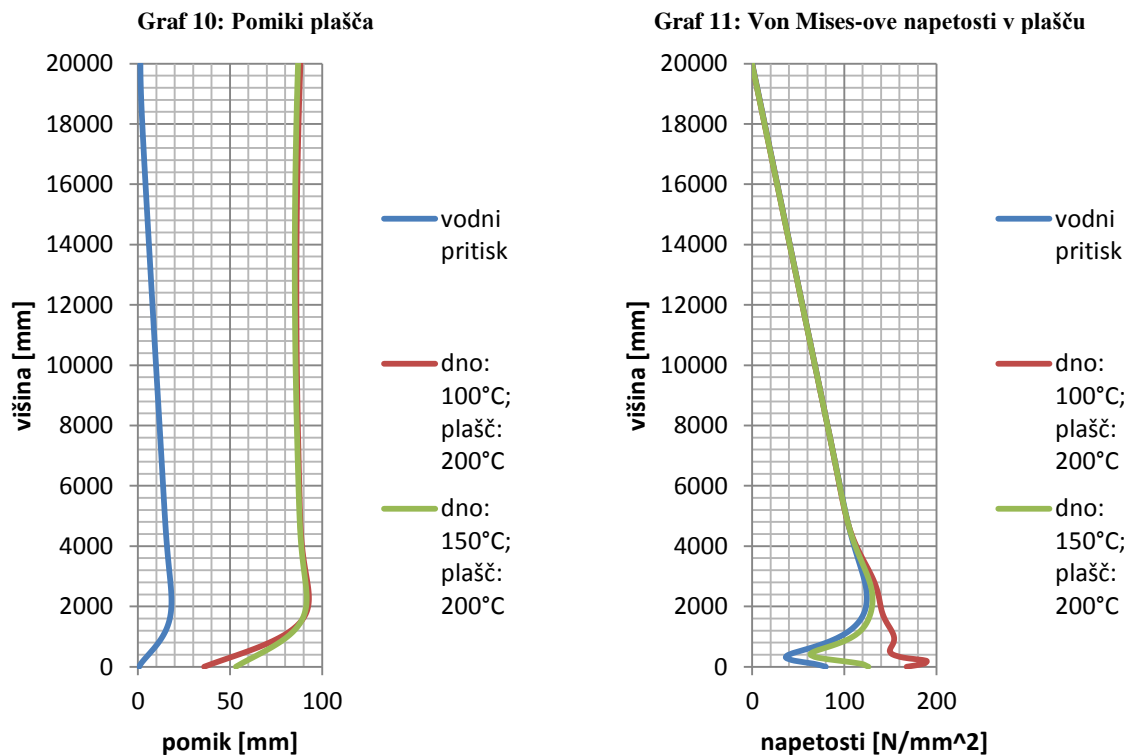
Raztezke bom simuliral tako, da bom definiral temperaturni koeficient materiala ($\alpha_T = 12 \cdot 10^{-6}$), nato pa na konstrukcijo nanesel temperaturo, ki povzroči zeleni raztezek.

Tabela 2: Raztezek dna glede na nanešene temperature

| Raztezek dna [%] | Temperatura dna [°C] | Temperatura plašča [°C] |
|------------------|----------------------|-------------------------|
| »samo voda« | 0 | 0 |
| 75 | 150 | 200 |
| 50 | 100 | 200 |

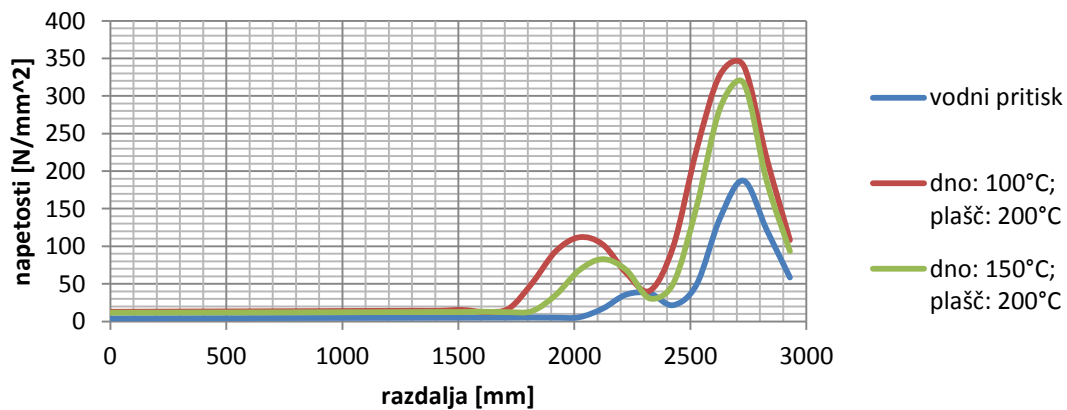
5.2 Rezultati

Graf 10 prikazuje absolutne pomike plašča, Graf 11 pa predstavlja potek von Mises-ovih napetosti po višini rezervoarja. Spremembe v napetostih se pričakovano razlikujejo samo v spodnjem delu.



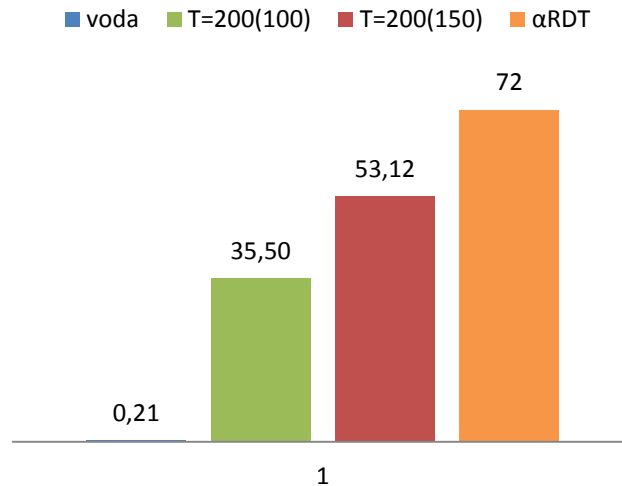
Pojavijo se tudi večje napetosti v dnu rezervoarja:

Graf 12: Von Mises-ove napetosti v dnu



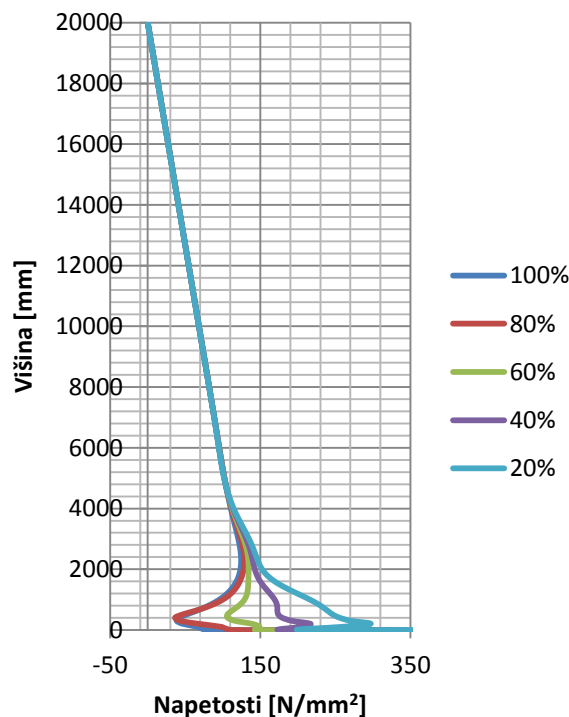
Naslednji graf prikazuje pomik dna pri obtežbi s hidrostatskim pritiskom ter povišanju temperature dna na 100 °C, 150 °C in 200 °C. Pri tem privzamemo, da se plašč, razen v primeru, ko je obtežba samo hidrostatski pritisk, vedno raztegne za pomik pri 200 °C. Dno rezervoarja se raztegne manj (za pomik pri 150 °C oziroma 100 °C), razlika pomikov pa je vidna na grafu.

Graf 13: Radialni pomik dna [mm]



Naredil sem še več primerov. Plašč je še vedno segret na 200 °C, dno pa sem opazoval pri raztezkih od 0 % (torej 0 °C) do 100 % (to je 200 °C) v koraku po 20 % (ali 40 °C). Graf prikazuje napetosti v plašču.

Graf 14: Von Mises-ove napetosti



5.3 Komentar

Iz rezultatov vidimo, da se dodatne napetosti zaradi temperature večajo tako v plašču kot v dnu. V dnu so napetosti celo večje kot v plašču, kar je tudi ideja pri projektiranju (predvidena tanjša pločevina dna in debelejša pločevina plašča).

V plašču napetosti s povečevanjem razlike pomikov plašča in pomikov dna naraščajo. Iz zadnjega grafa je razvidno, da so pri razliki 50 %, torej ko se dno raztegne za polovico manj kot plašč, največje napetosti na višini 2 m in so skoraj enake kot v primeru obtežbe samo s hidrostatskim pritiskom. Ko se razlike v raztezkih plašča in dna večajo (dno se raztegne samo za 40 % raztezka plašča ali manj), se največje napetosti pojavijo nižje in so večje, kot so največje napetosti v primeru obtežbe samo s hidrostatskim pritiskom.

Ta ugotovitev nam pove, da v primeru manjših diferencialnih raztezkov v plašču ne bo težav. Če pa bi prešli čez mejo 50 % razlike, bi ob neupoštevanju vpliva temperature pri projektiranju upoštevali premajhne maksimalne napetosti, torej bi bili na nevarni strani.

6.0 VPLIV TRENJA NA OVIRANO RAZTEZANJE

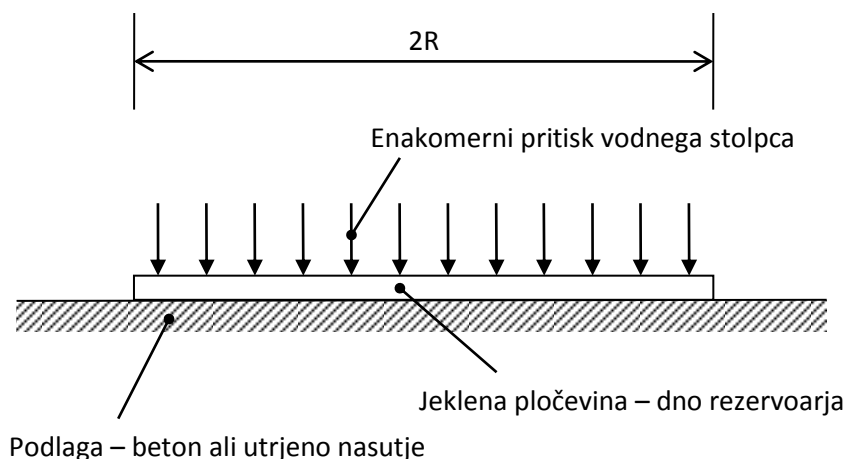
Da se dno raztegne drugače kot ostali del rezervoarja, lahko pripišemo vsaj dvema dejavnikoma:

- različna temperatura dna in plašča (ker v tleh nimamo izolacije)
- trenje s podlago zavira prosto raztezanje dna

Ker ne vemo v kolikšnem deležu nastopa posamezni dejavnik, s simulacijo preverimo, v kolikšni meri na raztezanje plošče vpliva trenje.

Ker ne poznam točnega trenja med podlago in dnom rezervoarja, bom na različnih rezervoarjih opazoval vpliv trenja na raztezek plošče pri temperaturni spremembi.

6.1 Model v Abaqusu



Slika 27: Model dna rezervoarja na hrapavi podlagi

V Abaqusu sem uporabil končne elemente shell. Pločevina je predstavljena z deformabilnimi elementi, dno podlage je iz togih shell elementov.

Materialne karakteristike pločevine so:

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

$$\nu = 0,3$$

$$\alpha_t = 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$t_d = 10 \text{ mm}$$

Stik pločevine s podlago je v normalni smeri definiran kot »Hard Contact«, v tangentsni smeri pa kot »Penalty« s koeficientom trenja.

Po celotni površini pločevine je vpliv hidrostatskega pritiska na dno prikazan z enakomernim pritiskom. Pritisk je podan v enotah $[\text{N/mm}^2]$, kar pomeni, da je 1 m vodnega stolpca enak $0,01 \text{ N/mm}^2$.

Temperatura je enakomerna po celi pločevini. Spremeni se od začetnega stanja s temperaturo $0 \text{ }^\circ\text{C}$ do končnega stanja, kjer ima temperaturo T .

6.2 Temperaturna sprememba

Bitumen v rezervoarjih je segret do 200 °C. Upošteval bom, da se tudi celotni rezervoar segreje na enako temperaturo $\Delta T = 200$ °C. Naredil bom dodaten primer, ko se celotni rezervoar segreje na 100 °C.

6.3 Analitičen izračun

Za enostaven primer brez trenja lahko raztezek plošče izračunamo analitično:

$$R = 5000 \text{ mm}$$

$$\alpha_t = 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$w = R \cdot \alpha_t \cdot \Delta T = 12 \text{ mm}$$

Enak rezultat dobim s programom Abaqus.

6.4 Izbrane dimenzije

Ker ne vem, ali tudi dimenzija rezervoarja vpliva na trenje, si bom izbral različne dimenzije rezervoarjev glede na polmer in višino rezervoarja. Začel bom z zelo majhnim $R = 5$ m in $H = 5$ m, nato pa bom obe komponenti večal z enakim korakom (5 m) do velikosti $R = 25$ m in $H = 25$ m.

Tako dobim naslednje dimenzije:

Višine: 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m

Polmeri: 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m

6.5 Rezultati programa Abaqus

V tabeli so zapisani koeficienti trenja k , ki v izbranem rezervoarju omogočijo dovolj trenja, da je raztezek za 10, 20 oziroma 50 % manjši od raztezka plašča.

Tabela 3: Rezultati izračunov s programom Abaqus

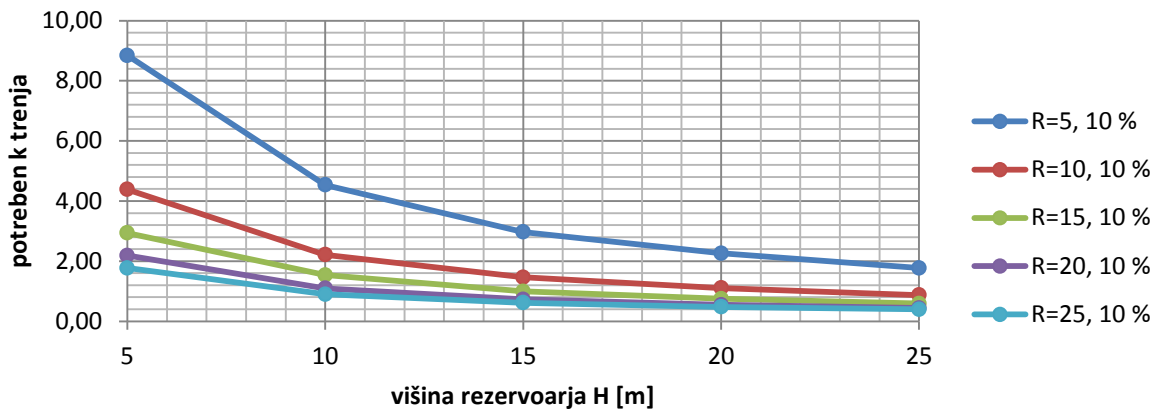
| | | R [m] | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|
| | | 5 | | | 10 | | | 15 | | | 20 | | | 25 | | | |
| H [m] | | 10% | 20% | 50% | 10% | 20% | 50% | 10% | 20% | 50% | 10% | 20% | 50% | 10% | 20% | 50% | |
| | | 5 | 8,84 | 17,59 | 43,85 | 4,38 | 8,71 | 21,70 | 2,94 | 5,85 | 14,60 | 2,19 | 4,36 | 10,86 | 1,77 | 3,52 | 8,78 |
| | | 10 | 4,54 | 9,10 | 22,79 | 2,21 | 4,43 | 11,06 | 1,54 | 3,18 | 8,10 | 1,09 | 2,18 | 5,44 | 0,90 | 1,78 | 4,42 |
| | | 15 | 2,97 | 5,93 | 14,80 | 1,46 | 2,92 | 7,27 | 0,99 | 2,01 | 5,07 | 0,73 | 1,46 | 3,63 | 0,62 | 1,21 | 3,01 |
| | | 20 | 2,26 | 4,55 | 11,41 | 1,10 | 2,21 | 5,54 | 0,75 | 1,59 | 4,09 | 0,55 | 1,09 | 2,72 | 0,48 | 0,93 | 2,29 |
| | | 25 | 1,77 | 3,54 | 8,83 | 0,87 | 1,74 | 4,34 | 0,59 | 1,17 | 2,93 | 0,44 | 0,88 | 2,20 | 0,40 | 0,77 | 1,87 |

Rezultati so dobljeni z interpolacijo, saj sem s programom Abaqus izvedel izračune z različnimi vnaprej izbranimi koeficienti k . Kot rezultat sem dobil podatek o raztezkju dna, ki nikoli ni bil natančno 10, 20 oziroma 50 %. S pomočjo interpolacije sem izračunal ustrezne koeficiente.

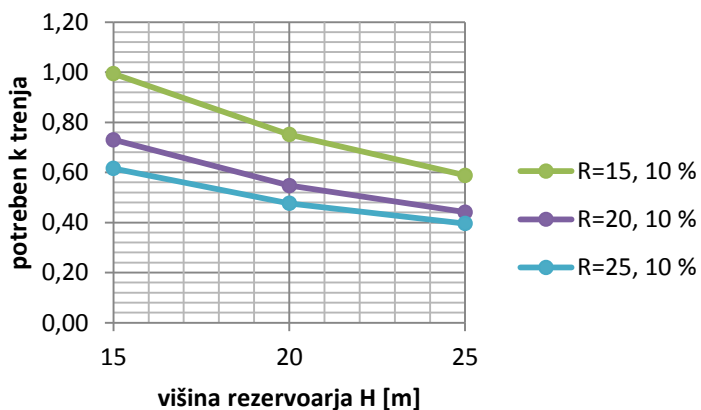
Za lažjo interpretacijo rezultatov v tabeli bom narisal grafe. Že s pogledom na tabelo lahko opazimo, da je za doseg 50 % raztezka dna potreben nenormalno velik koeficient trenja. Kot realno možen

koeficient trenja si namreč predstavljam vrednosti največ do $k = 1,0$. Zato bom na grafu prikazoval samo vrednosti, ki predstavljajo 10 % manj raztezka.

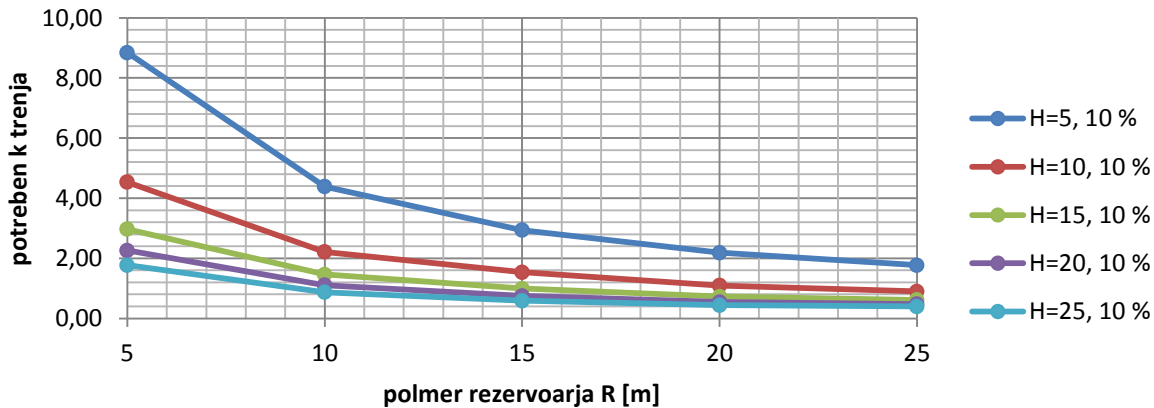
Graf 15: Potreben k za dosego 10 % manj raztezka, odvisen od višine H



Graf 16: Povečani del grafa (Graf 15)

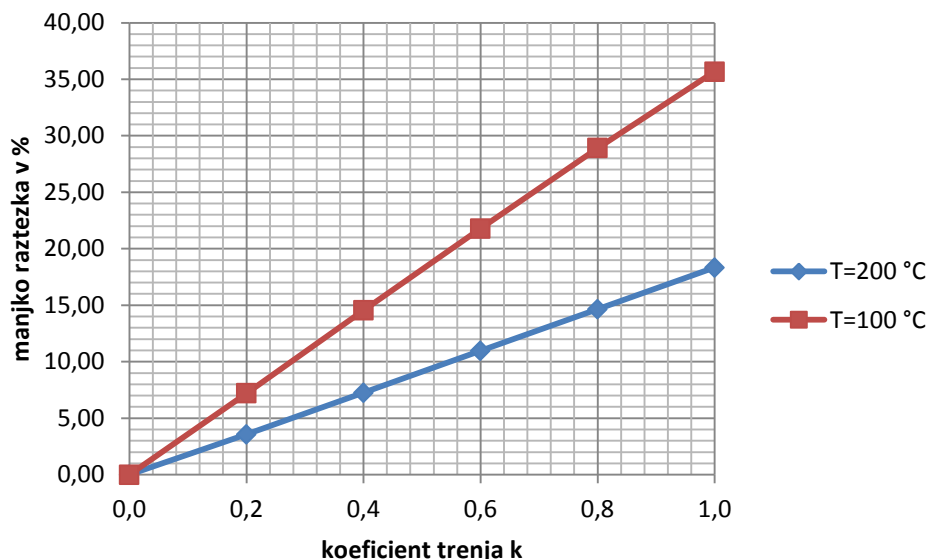


Graf 17: Potreben k za dosego 10 % manj raztezka, odvisen od polmera R



V Abaqusu sem izvedel še en izračun. V tem primeru sem za izbrani rezervoar ($R = 20$ m in $H = 20$ m) izračunal potrebne koeficiente k , najprej za primer, ko se rezervoar segreje na 200 °C, nato pa še za primer, ko se rezervoar segreje samo na 100 °C. Rezultati so prikazani na grafu Graf 18.

Graf 18: Vpliv na raztezek pri rezervoarju $H = 20$ m in $R = 20$ m



Rezultati kažejo, da se vpliv trenja povečuje z večanjem dimenzij rezervoarja. Poleg tega pa je iz zadnjega grafa očitno, da je relativni vpliv trenja odvisen od velikosti ΔT .

6.6 Izpeljava enačbe za krožno ploščo z obtežbo po zunanem robu

Izkaže se, da je vpliv trenja odvisen poleg hrapavosti podlage, oziroma koeficienta trenja, še od drugih parametrov (dimenzije rezervoarja). Vpliv posameznega parametra bi najbolje razumeli, če bi poznali enačbo, ki opisuje dani problem. V nadaljevanju bom zato izpeljal enačbo, ki približno opisuje obravnavani problem.

Za analizo krožne plošče uporabim Airyjevo funkcijo, ki služi kot nastavek za napetostno funkcijo:

$$F(r) = A_0 + B_0 \log(r) + C_0 r^2 + D_0 r^2 \log(r) \quad (6.1)$$

Kjer je:

A_0, B_0, C_0, D_0 ... konstante, ki jih določimo z robnimi pogoji
 r ... oddaljenost od središča plošče (uporabljene so polarne koordinate)

Napetosti so definirane kot:

$$n_r = \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \varphi^2}$$

$$n_\varphi = \frac{\partial^2 F}{\partial r^2}$$

$$n_{r\varphi} = -\frac{\partial^2 F}{\partial r \partial \varphi} = 0$$

(6.2)

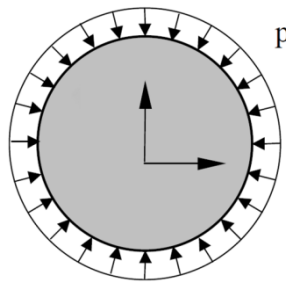
Zapišemo še deformacijske enačbe:

$$\varepsilon_r = \frac{1+\nu}{E}((1-\nu)n_r - \nu n_\varphi) \quad (6.3)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1+\nu}{E}(-\nu n_r + (1-\nu)n_\varphi) \quad (6.4)$$

Radialni pomik plošče je naslednji:

$$u = \int_0^r \varepsilon_r dr \quad (6.5)$$



Slika 28: Skica računskega modela (Bletzinger, 2000)

Rešitev napetostne funkcije pri robnih pogojih $n_r \neq \infty$ in $n_\varphi \neq \infty$:

$$\begin{aligned} B_0 &= 0 \\ D_0 &= 0 \end{aligned} \quad (6.6)$$

Ko upoštevamo še robni pogoj $s_r(R) = p$, kar predstavlja obtežbo po zunanjem robu, dobimo:

$$C_0 = -\frac{p}{2} \quad (6.7)$$

Sedaj lahko zapišemo:

$$\begin{aligned} F &= -\frac{1}{2} pr^2 \\ n_r &= -p \\ n_\varphi &= -p \end{aligned} \quad (6.8)$$

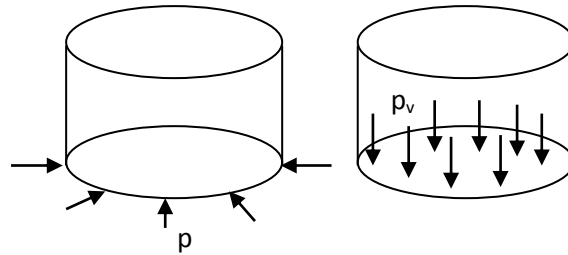
Dobimo torej enačbo, ki opisuje pomik roba plošče zaradi pritiska p po robu, ki deluje v ravnini plošče in je usmerjen v središče plošče (Bletzinger, 2000):

$$w = -(1-\nu-2\nu^2) \frac{pR}{E} \quad (6.9)$$

Ker v resnici nimamo obtežbe samo na robu, ampak gre za trenje, ki deluje po celotni površini plošče, so to le približne enačbe.

Zato, da lahko uporabljamo zgornjo enačbo, trenje, ki deluje po celi površini, pretvorimo na robno obtežbo. Pretvorba je naslednja:

$$\begin{aligned}
 p_v &= 0,01 * H [m] * N / mm^2 \\
 p_h &= p_v * k \\
 p &= \frac{R * p_h}{2 * t_d} = \frac{R * 0,01 * H [m] * k}{2 * t_d}
 \end{aligned}
 \tag{6.10}$$



Slika 29: Določitev robne obtežbe p

Enačbi (6.9) in (6.10) lahko združimo in dobimo naslednji izraz:

$$w = \frac{R^2 * 0,01 * H [m] * k * -(1 - \nu - 2\nu^2)}{E * 2 * t_d}
 \tag{6.11}$$

Kjer je:

w ... radialni pomik plošče roba pločevine

v ... Poissonov količnik

R ... polmer plošče

E ... elastični modul jekla

H[m] ... višina vodnega stolpca, izražena v metrih

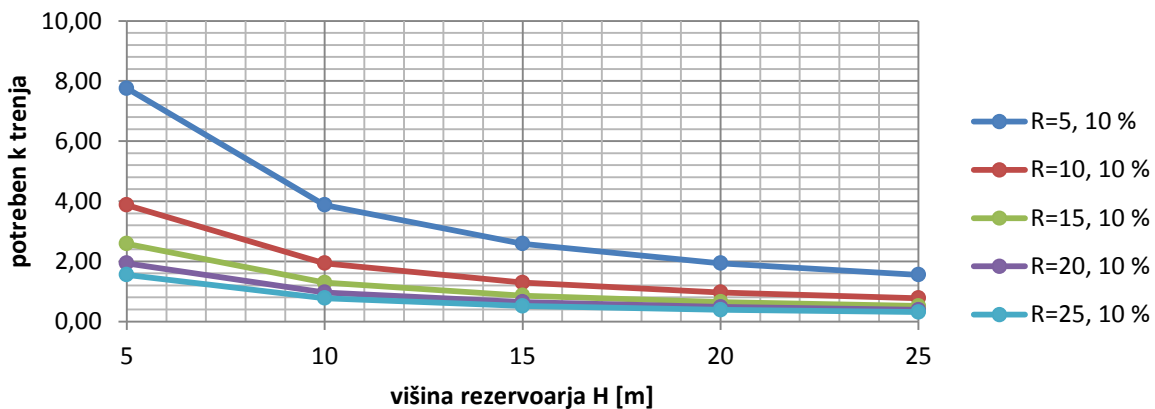
t_d ... debelina plošče

k ... koeficient trenja

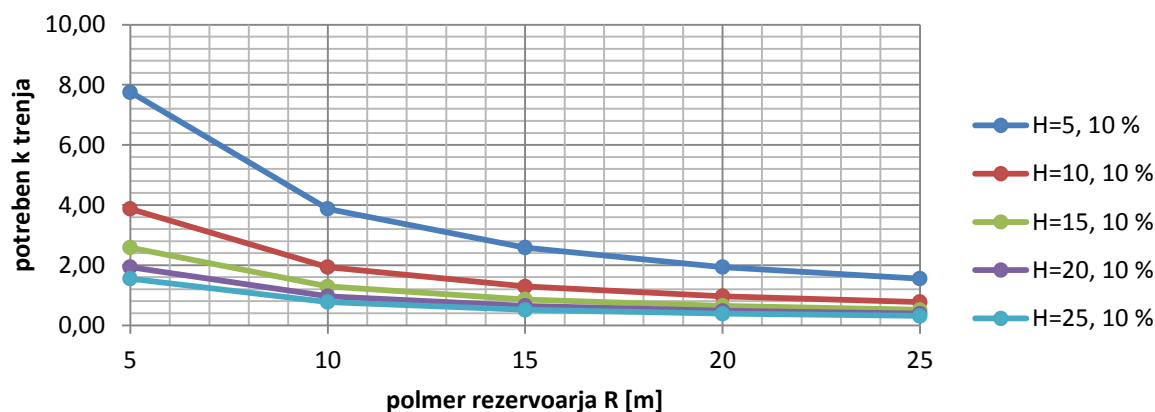
6.7 Rezultati

Z izpeljano enačbo bom izrisal grafe na enak način, kot sem prikazal rezultate iz Abaqusa. Rezultate bom lahko primerjal in ugotovil, ali enačba pravilno opisuje problem.

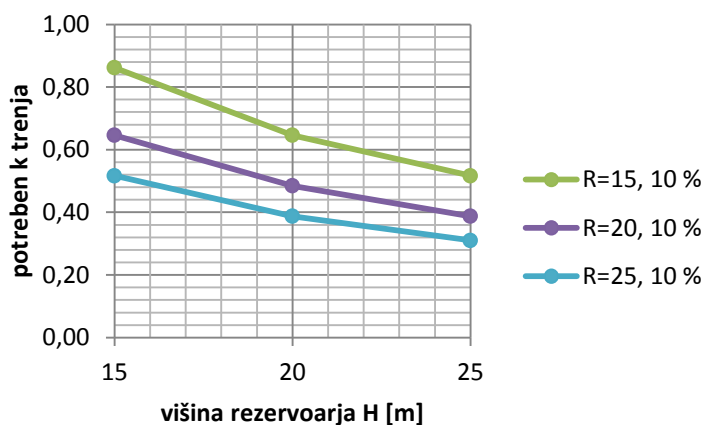
Graf 19: Potreben k za dosego 10 % manj raztezka, odvisen od višine H



Graf 20: Potreben k za doseg 10 % manj raztezka, odvisen od polmera R



Graf 21: Povečani del grafa (Graf 19)



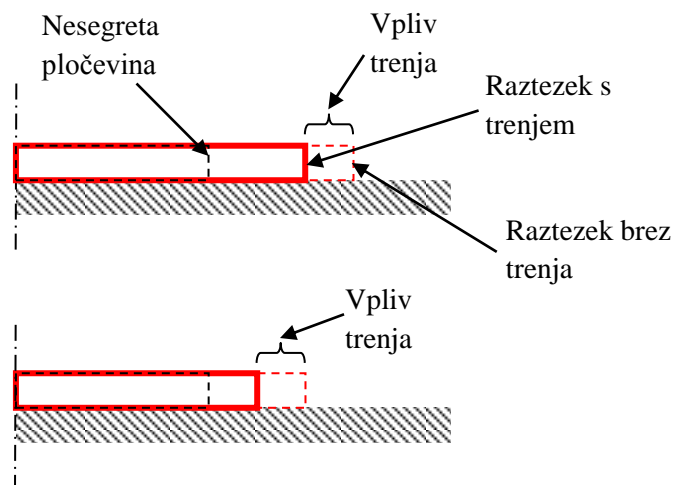
6.8 Ugotovitve

Enačba dokaj dobro opisuje numerične rezultate iz Abaqusa. Oblika krivulj je enaka, le da so vrednosti na varni strani. Zato lahko rečemo, da enačba dobro opisuje problem in je primerna za analizo parametrov.

6.9 Analiza enačbe

Pri raztezanju plošče trenje povzroči, da se plošča raztegne nekoliko manj. Za koliko manj se raztegne, približno opisuje enačba (6.11). V enačbi vidimo, da temperatura sploh ne nastopa. To pomeni, da je vpliv trenja na manjše raztezanje vedno enak in neodvisen od temperature.

Da je trenje neodvisno od temperature, potrjuje tudi Graf 18, saj je razlika, ki je vidna na grafu, samo posledica zapisovanja v odstotkih. Absolutne vrednosti vpliva trenja pa so v obeh primerih enake (tako pri 200 °C kot pri 100 °C). Situacijo prikazuje tudi naslednja slika (Slika 30):



Slika 30: Vpliv trenja na raztezek dna

Iz enačbe lahko razberemo tudi, da je vpliv trenja odvisen od debeline pločevine dna t_d . Z manjšanjem debeline se vpliv trenja povečuje.

Polmer rezervoarja nastopa s kvadratom, torej bo prispevek trenja k zaviranju dna rezervoarja veliko večji pri velikih rezervoarjih. Pri manjših polmerih je trenje praktično zanemarljivo in je torej povsem odvisno od temperaturnih razlik v konstrukciji. Lahko torej pričakujemo, da do večjih razlik (50 % in več) v raztekih dna v primerjavi s plaščem pride šele pri velikih rezervoarjih.

V enačbi nastopa elastični modul jekla. Pri povišanih temperaturah se ta nekoliko zmanjša in s pomočjo enačbe lahko vidimo, da to poveča vpliv trenja. To je za naš primer neugodna posledica.

7.0 PRINCIPI ZA DIMENZIONIRANJE REZERVOARJEV V SKLOPU STANDARDOV SIST EN 1993

Dimenzioniranje jeklenega rezervoarja je posebej obravnavano v standardih:

- SIST EN 1993-4-2:2007 (Rezervoarji)
- SIST EN 1993-1-6:2007 (Trdnost in stabilnost lupinastih konstrukcij)

7.1 Razredi posledic (ang. *Consequence Classes*)

Standard SIST EN 1993-4-2:2007 v poglavju 2.2 rezervoarje razdeli v razrede posledic:

Razred posledic 1

Rezervoarji v kmetijstvu in vodni rezervoarji.

Razred posledic 2

Srednje veliki rezervoarji v urbanih naseljih, ki skladiščijo vnetljive ali okolju nevarne tekočine.

Razred posledic 3

Rezervoarji za shranjevanje tekočin ali utekočinjenih plinov, ki so toksični ali eksplozivni. Veliki rezervoarji v urbanih naseljih, ki skladiščijo vnetljive ali okolju nevarne tekočine.

Rezervoarji za skladiščenje bitumna spadajo v razred posledic 3.

Za rezervoarje, ki spadajo v razred posledic 3, standard zahteva izračun notranjih sil in momentov z uporabo analiz, ki so navedene v standardu SIST EN 1993-1-6, poglavju 2.2. Predlaga analizo z lupinastimi končnimi elementi (SIST EN 1993-4-2).

7.2 Varnostni faktorji

Delni varnostni faktorji obtežbe s tekočino za rezervoarje so v standardu SIST EN 1993-4-2 v tabeli 2.1:

Tabela 4: Delni varnostni faktorji za obtežbo s tekočino

| Projektno stanje | Vrsta tekočine | Priporočene vrednosti za γ_F v primeru spremenljive obtežbe s tekočino | Priporočene vrednosti za γ_F v primeru stalne obtežbe s tekočino |
|-------------------------------------|---|---|---|
| Obtežba s tekočino med obratovanjem | Toksične, eksplozivne in nevarne tekočine | 1,40 | 1,35 |
| | Vnetljive tekočine | 1,30 | 1,35 |
| | Druge tekočine | 1,20 | 1,35 |
| Obtežba s tekočino med testom | Vse tekočine | 1,00 | 1,35 |
| Nezgodno stanje | Vse tekočine | 1,00 | 1,35 |

Delni varnostni faktorji odpornosti pri rezervoarjih so podani v standardu SIST EN 1993-4-2 v tabeli 2.2:

Tabela 5: Delni varnostni faktorji odpornosti

| | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\gamma_{M0} = 1,00$ | $\gamma_{M1} = 1,10$ | $\gamma_{M2} = 1,25$ |
| $\gamma_{M4} = 1,00$ | $\gamma_{M5} = 1,25$ | $\gamma_{M6} = 1,10$ |

7.3 Materialne lastnosti jekla

Zaradi temperatur, ki so višje od 100 °C, upoštevamo spremenjene materialne lastnosti jekla. Uporabil bom tabelo (Tabela 3.1) za materialne karakteristike pri povišanih temperaturah iz standarda SIST EN 1993-1-2.

Tabela 6: Redukcijski faktorji pri povišanih temperaturah

| Temperatura jekla | Redukcijski faktorji | | |
|-------------------|------------------------------------|--|--|
| | Redukcijski faktor za mejo tečenja | Redukcijski faktor za mejo proporcionalnosti | Redukcijski faktor za elastični modul v mejah elastičnosti |
| 20 °C | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 100 °C | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 200 °C | 1,000 | 0,807 | 0,900 |
| 300 °C | 1,000 | 0,613 | 0,800 |
| 400 °C | 1,000 | 0,420 | 0,700 |
| 500 °C | 0,780 | 0,360 | 0,600 |
| 600 °C | 0,470 | 0,18 | 0,310 |
| 700 °C | 0,230 | 0,075 | 0,130 |
| 800 °C | 0,110 | 0,050 | 0,090 |
| 900 °C | 0,060 | 0,0375 | 0,0675 |
| 1000 °C | 0,040 | 0,0250 | 0,0450 |
| 1100 °C | 0,020 | 0,0125 | 0,0225 |
| 1200 °C | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 |

7.4 Mejna stanja nosilnosti

V mejnem stanju nosilnosti standard zahteva kontrolo rezervoarja za več pojavov:

globalna stabilnost

LS1: meja plastičnosti

LS2: ciklična plastičnost

LS3: uklon

LS4: utrujanje

Napetosti v materialu so razdeljene v tri kategorije:

- primarne napetosti (nastale zaradi: hidrostatskega pritiska, lastne teže, vetra, snega, ...)
- sekundarne napetosti (nastale zaradi: temperature, prednapenjanja, krčenja, posedanja tal)
- lokalne napetosti (kombinacija primarnih in sekundarnih napetosti v kritičnih točkah – območje zvarov, odprtin, ...)

Samo primarne napetosti upoštevamo v kontroli LS1 in LS3. V LS2 upoštevamo primarne in sekundarne napetosti. Lokalne napetosti uporabimo za kontrolo LS4.

Da se ne bi preveč oddaljil od osnovne naloge, bom v nadaljevanju obravnaval samo LS1 in LS2. V LS3 temperatura sploh ne nastopa, v LS4 pa bi jo sicer moral upoštevati, vendar število polnjenj ni tako veliko, da bi preseglo dovoljeno število ciklov (10.000) v življenjski dobi (SIST EN 1993-1-6).

7.4.1 LS1: meja plastičnosti

Račun napetosti:

Upoštevamo samo primarne napetosti, tako da obtežbo faktoriramo s primernimi varnostnimi in kombinacijskimi faktorji, kot navaja standard SIST EN 1990 v točki 6.4.3.2:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (7.1)$$

Za izračun notranjih statičnih količin lahko uporabljamo upogibno teorijo. Pri izračunu napetosti upoštevamo polno plastifikacijo prereza, zato uporabimo naslednje enačbe:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{n_{x,Ed}}{t_p} \pm \frac{m_{x,Ed}}{(t_p^2 / 4)} \quad (7.2)$$

$$\sigma_{\theta,Ed} = \frac{n_{\theta,Ed}}{t_p} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{(t_p^2 / 4)} \quad (7.3)$$

Strižne napetosti zanemarimo.

Izračunamo Von Mises-ove napetosti:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{\theta,Ed} + 3(\tau_{x,\theta,Ed}^2 + \tau_{xn,Ed}^2 + \tau_{\theta n,Ed}^2)} \quad (7.4)$$

Odpornost materiala:

$$f_{eq,Rd} = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (7.5)$$

Omejitev napetosti:

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd} \quad (7.6)$$

7.4.2 LS2: ciklična plastičnost

Izračun napetosti:

Upoštevamo primarne in sekundarne napetosti, ki so posledica obtežb, za katere pričakujemo, da se bodo pojavile vsaj trikrat v življenjski dobi rezervoarja. Pri izračunu napetosti obtežbe ne faktoriramo in računamo s karakterističnimi vrednostmi:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (7.7)$$

Za izračun notranjih statičnih količin uporabimo upogibno teorijo. Napetosti izračunamo z enačbami:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{n_{x,Ed}}{t_p} \pm \frac{m_{x,Ed}}{(t_p^2 / 6)} \quad (7.8)$$

$$\sigma_{\theta,Ed} = \frac{n_{\theta,Ed}}{t_p} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{(t_p^2 / 6)} \quad (7.9)$$

Določiti moramo največjo spremembo napetosti ($\Delta\sigma_{x,Ed,i}, \Delta\sigma_{\theta,Ed,i}$) v posamezni točki. Strižne napetosti zanemarimo.

Izračunamo Von Mises-ove spremembe napetosti:

$$\Delta\sigma_{eq,Ed,i} = \sqrt{\Delta\sigma_{x,Ed,i}^2 + \Delta\sigma_{\theta,Ed,i}^2 - \Delta\sigma_{x,Ed,i} \cdot \Delta\sigma_{x,Ed,i} + 3\Delta\tau_{x\theta,Ed,i}^2} \quad (7.10)$$

Odpornost materiala:

$$\Delta f_{eq,Rd} = 2f_{yd} \quad (7.11)$$

Omejitev napetosti:

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} \leq \Delta f_{eq,Rd} \quad (7.12)$$

8.0 DIMENZIONIRANJE TREH REZERVOARJEV PO SIST EN 1993

V skladu s SIST EN 1993 bom dimenzioniral tri različno velike rezervoarje, in sicer velikosti:

višina: 10 m, polmer: 10 m (Rezervoar 1)

višina: 20 m, polmer: 10 m (Rezervoar 2)

višina: 20 m, polmer: 30 m (Rezervoar 3)

8.1 Rezervoar 1

8.1.1 Zasnova

$$E = 21000 \text{ kN} / \text{cm}^2 * 0,9 = 18900 \text{ kN} / \text{cm}^2 (200^\circ\text{C})$$

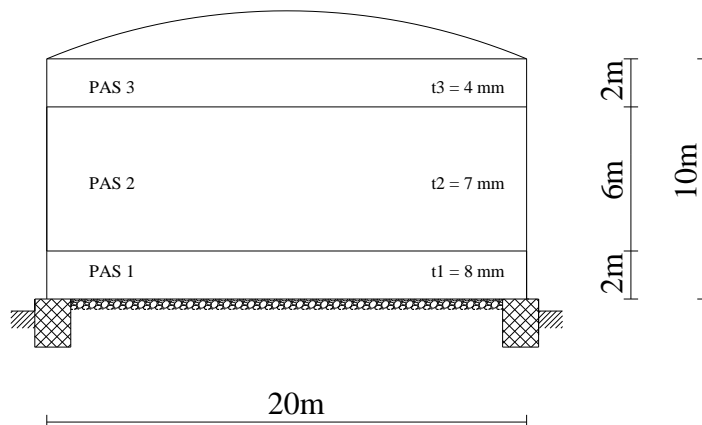
$$\nu = 0,3$$

$$\alpha_T = 12 * 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

Jeklo: S235

$$f_y = 0,807 * 235 \text{ N} / \text{mm}^2 = 189,6 \text{ N} / \text{mm}^2 (200^\circ\text{C})$$

Sidranje mora biti izvedeno tako, da so horizontalni pomiki omogočeni (SIST EN 1993-4-2).



Slika 31: Skica rezervoarja 1

8.1.2 Obtežba

Lastna teža strehe

$$q = 0,15 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$P = q * \pi * R^2$$

$$q_{str.} = \frac{P}{2\pi R} = \frac{0,15 \text{ kN} / \text{m}^2 * 10 \text{ m}}{2} = 0,75 \text{ kN} / \text{m}$$

Lastna teža plašča

$$\gamma_{jek.} = 78kN / m^3$$

$$q_{plašč} = 78kN / m^3 (2m * 0,004m + 6m * 0,007m + 2m * 0,008m) = 5,15kN / m$$

Sneg

$$S = \mu_i * c_e * c_t * s_k$$

$$s_k = (0,498 * z - 0,209) \left(1 + \left(\frac{A}{452} \right)^2 \right) = (0,498 * 1 - 0,209) \left(1 + \left(\frac{500}{452} \right)^2 \right) = 0,65kN / m^2$$

$$S = 0,8 * 1,0 * 1,0 * 0,65kN / m^2 = 0,52kN / m^2$$

$$q_{sneg} = \frac{SR}{2} = 2,6kN / m$$

Hidrostatski pritisk

$$\gamma_{bitumen} = 10kN / m^3$$

$$q_{bitumen} = \gamma_{bitumen} (l - x)$$

Temperaturni vpliv

$$\Delta T = 100^\circ C$$

$$T_{plašč} = 200^\circ C$$

$$T_{dna} = 100^\circ C$$

8.1.3 Izračun notranjih statičnih količin z upogibno teorijo

Hidrostatski pritisk na stene

Uporabim končne enačbe iz poglavja 3.1 na strani 11.

Temperaturni vpliv

Uporabim končne enačbe iz poglavja 3.2 na strani 12.

Lastna teža strehe

$$n_{xx} = P_x = 0,75kN / m$$

Lastna teža plašča

$$n_{xx} = P_x$$

Pas 1:

$$P_{x1} = ((2-x)*0,008 + 6*0,007 + 2*0,004)*78$$

Pas 2:

$$P_{x2} = ((6-(x-2))*0,007 + 2*0,004)*78$$

Pas 3:

$$P_{x3} = ((2-(x-2-6))*0,004)*78$$

8.1.4 Kontrola MSN

LS1 – meja plastičnosti

$$f_{eq,Rd} = \frac{18,9kN / cm^2}{1,0}$$

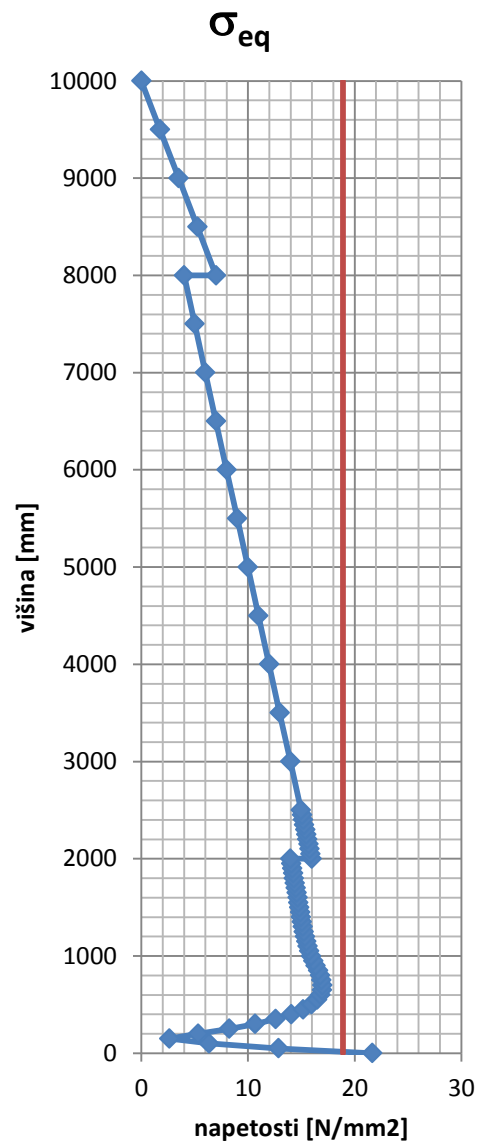
$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd}$$

Pri kontroli LS1 – »meja plastičnosti« dobim napetosti v plašču za različne obtežne situacije. Vse točke morajo biti pod mejo plastičnosti. V primeru, da bi se graf dotaknil meje plastičnosti, bi pomenilo, da je pločevina na tej višini plastificirana po vsej svoji debelini – polno plastificira.

Ker se temperatura pojavi samo takrat, kadar je v rezervoarju tekočina, sta temperaturna in hidrostatska obtežba povezani. Ker se obtežbi torej vedno pojavljata skupaj, pri kombinaciji nisem upošteval kombinacijskega faktorja ($\psi_{0,temp} = 0,6$). Hidrostatsko obtežbo zato množim samo z varnostnim faktorjem 1,40 in temperaturno obtežbo z 1,50.

Kombinacija:

l. t. strehe: 1,35
l. t. plašča 1,35
bitumen: 1,4
temperatura: 1,50
sneg: 0,00



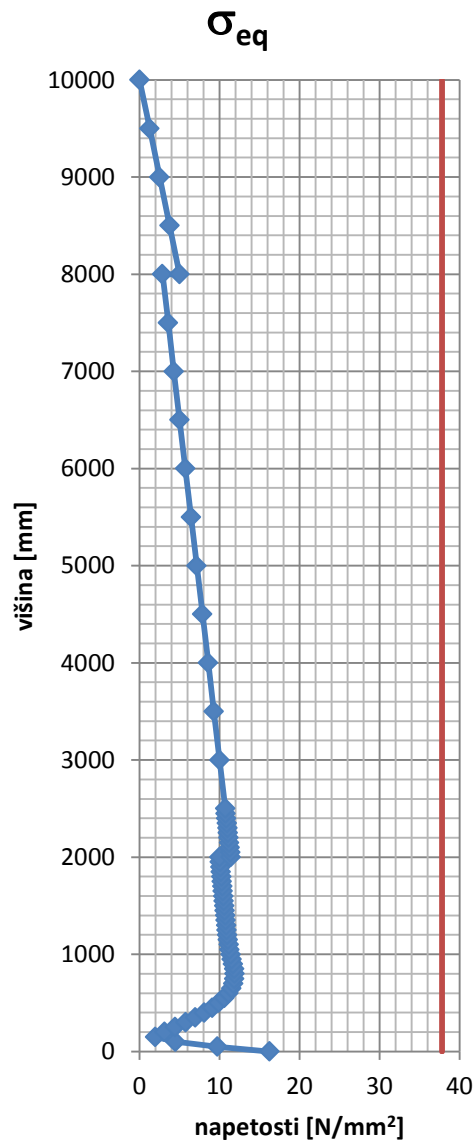
LS2 – ciklična plastičnost

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} \leq \Delta f_{eq,Rd} = 2f_{yd} = 37,8kN / cm^2$$

Največja razlika napetosti, ki se pojavijo v rezervoarju v obratovalni dobi vsaj trikrat, mora biti manjša od dvakratne vrednosti meje plastičnosti. Upošteval sem naslednjo kombinacijo:

Kombinacija:

- 1. t. strehe: 1,0
- 1. t. plašča 1,0
- bitumen: 1,0
- temperatura: 1,0
- sneg: 0,0



8.1.5 Določitev debeline dna

Določitev debeline dna določa standard SIST EN 1993-4-2 v poglavju 11.4.

$$t'_a = \frac{t_s}{3} + 3 = \frac{8}{3} + 3 = 5,67 \text{ mm}$$

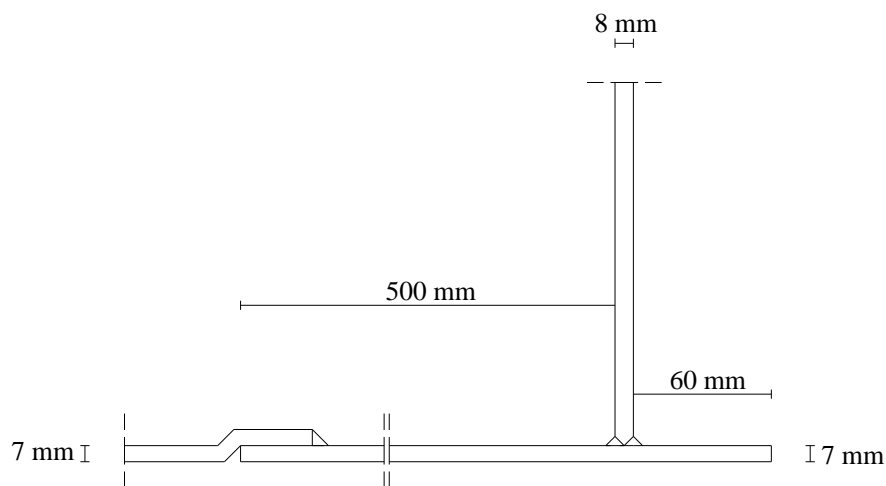
$$t_a = 7 \text{ mm}$$

$$t_d = 7 \text{ mm}$$

$$w_a = 1,5 \left(\frac{f_y * t_a^2}{\rho g H} \right)^{1/2} = 1,5 \left(\frac{189 \text{ N/mm}^2 (7 \text{ mm})^2}{10^{-5} \text{ N/mm}^3 10 * 10^3 \text{ mm}} \right)^{1/2}$$

$$w_a = 456 \text{ mm} > 500 \text{ mm}$$

$$\rightarrow w_a = 500 \text{ mm}$$



Slika 32: Detajl spoja plašč-dno za rezervoar 1

8.2 Rezervoar 2

8.2.1 Zasnova

$$E = 21000 \text{ kN} / \text{cm}^2 * 0,9 = 18900 \text{ kN} / \text{cm}^2 (200^\circ\text{C})$$

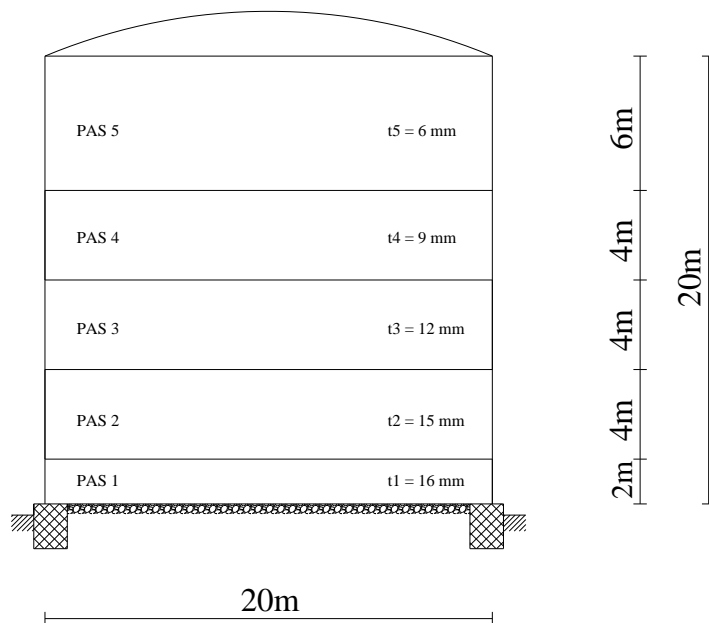
$$\nu = 0,3$$

$$\alpha_T = 12 * 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

Jeklo: S235

$$f_y = 0,807 * 235 \text{ N} / \text{mm}^2 = 189,6 \text{ N} / \text{mm}^2 (200^\circ\text{C})$$

Sidranje mora biti izvedeno tako, da so horizontalni pomiki omogočeni (SIST EN 1993-4-2).



Slika 33: Skica rezervoarja 2

8.2.2 Obtežba

Lastna teža strehe

$$q = 0,15 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$P = q * \pi * R^2$$

$$q_{str.} = \frac{P}{2\pi R} = \frac{0,15 \text{ kN} / \text{m}^2 * 10\text{m}}{2} = 0,75 \text{ kN} / \text{m}$$

Lastna teža plašča

$$\gamma_{jek.} = 78 \text{ kN} / \text{m}^3$$

$$q'_{pllašć} = 78kN / m^3 (6m * 0,004m + 4m * 0,005m + 4m * 0,007m + 4m * 0,008m + 2m * 0,01m) = 9,67kN / m$$

Sneg

$$S = 0,52kN / m^2$$

$$q_{sneg} = \frac{SR}{2} = 2,6kN / m$$

Hidrostatski pritisk

$$\gamma_{bitumen} = 10kN / m^3$$

$$q_{bitumen} = \gamma_{bitumen} (l - x)$$

Temperaturni vpliv

$$\Delta T = 100^{\circ}C$$

$$T_{pllašć} = 200^{\circ}C$$

$$T_{dna} = 100^{\circ}C$$

8.2.3 Izračun notranjih statičnih količin z upogibno teorijo

Hidrostatski pritisk na stene

Uporabim končne enačbe iz poglavja 3.1 na strani 11.

Temperaturni vpliv

Uporabim končne enačbe iz poglavja 3.2 na strani 12.

Lastna teža strehe

$$n_{xx} = P_x = 0,75kN / m$$

Lastna teža plašća

$$n_{xx} = P_x$$

Pas 1:

$$P_{x1} = ((2 - x) * 0,01 + 4 * 0,008 + 4 * 0,007 + 4 * 0,005 + 6 * 0,004) * 78$$

Pas 2:

$$P_{x2} = \left((4 - (x - 2)) * 0,008 + 4 * 0,007 + 4 * 0,005 + 6 * 0,004 \right) * 78$$

Pas 3:

$$P_{x3} = \left((4 - (x - 2 - 4)) * 0,007 + 4 * 0,005 + 6 * 0,004 \right) * 78$$

Pas 4:

$$P_{x4} = \left((4 - (x - 2 - 4 - 4)) * 0,005 + 6 * 0,004 \right) * 78$$

Pas 5:

$$P_{x5} = \left((6 - (x - 2 - 4 - 4 - 4)) * 0,004 \right) * 78$$

8.2.4 Kontrola MSN

LS1 – meja plastičnosti

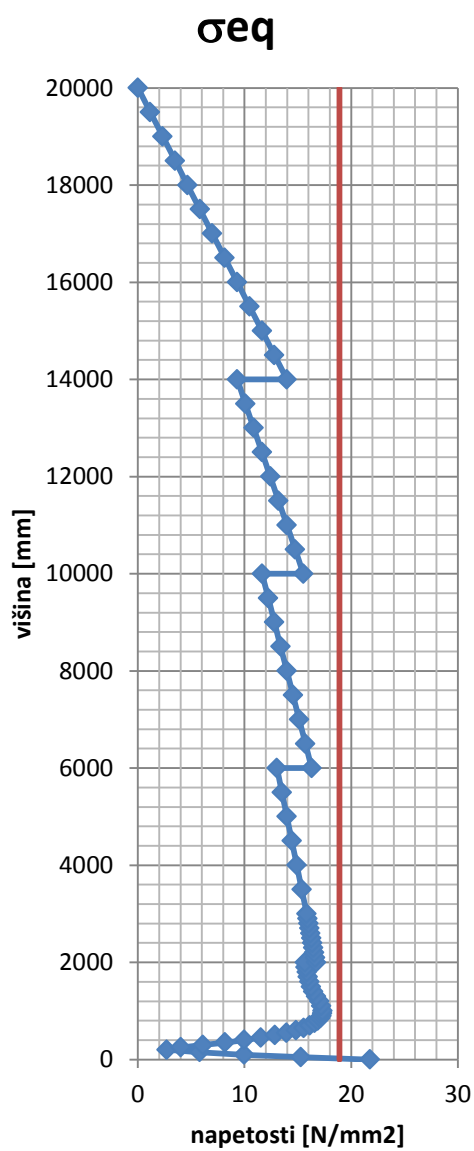
$$f_{eq,Rd} = \frac{18,9kN / cm^2}{1,0}$$

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd}$$

Tako kot že v prejšnjem primeru kontroliram napetosti σ_{eq} , da ne presežejo meje plastičnosti. To ne pomeni, da nikjer v materialu ne bo prišlo do plastifikacije, ampak, da se nikjer v plašču ne bo plastificiral celoten prerez pločvine.

Kombinacija:

l. t. strehe: 1,35
l. t. plašča 1,35
bitumen: 1,40
temperatura: 1,50
sneg: 0,00



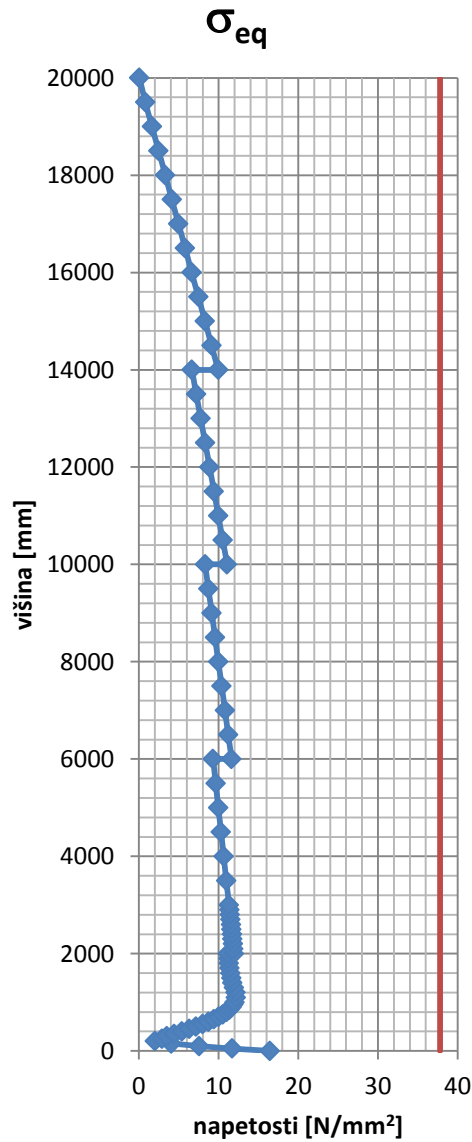
LS2 – ciklična plastičnost

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} \leq \Delta f_{eq,Rd} = 2f_{yd} = 37,8kN / cm^2$$

Največja razlika napetosti, ki se pojavijo v rezervoarju v obratovalni dobi vsaj trikrat, mora biti manjša od dvakratne vrednosti meje plastičnosti. Upošteval sem naslednjo kombinacijo:

Kombinacija:

1. t. strehe: 1,0
1. t. plašča 1,0
bitumen: 1,0
temperatura: 1,0
sneg: 0,0



8.2.5 Določitev debeline dna

Določitev debeline dna določa standard SIST EN 1993-4-2 v poglavju 11.4.

$$t'_a = \frac{t_s}{3} + 3 = \frac{16}{3} + 3 = 8,33 \text{ mm}$$

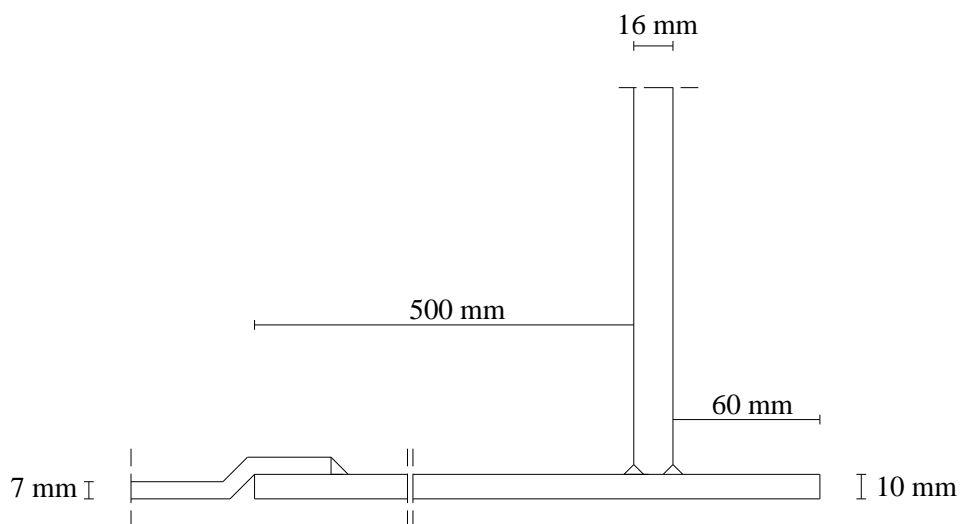
$$t_a = 10 \text{ mm}$$

$$t_d = 7 \text{ mm}$$

$$w_a = 1,5 \left(\frac{f_y * t_a^2}{\rho g H} \right)^{1/2} = 1,5 \left(\frac{189 \text{ N/mm}^2 (10 \text{ mm})^2}{10^{-5} \text{ N/mm}^3 20 * 10^3 \text{ mm}} \right)^{1/2}$$

$$w_a = 461 \text{ mm} > 500 \text{ mm}$$

$$\rightarrow w_a = 500 \text{ mm}$$



Slika 34: Detajl spoja plašč-dno za rezervoar 2

8.3 Rezervoar 3

8.3.1 Zasnova

$$E = 21000 \text{ kN} / \text{cm}^2 * 0,9 = 18900 \text{ kN} / \text{cm}^2 (200^\circ\text{C})$$

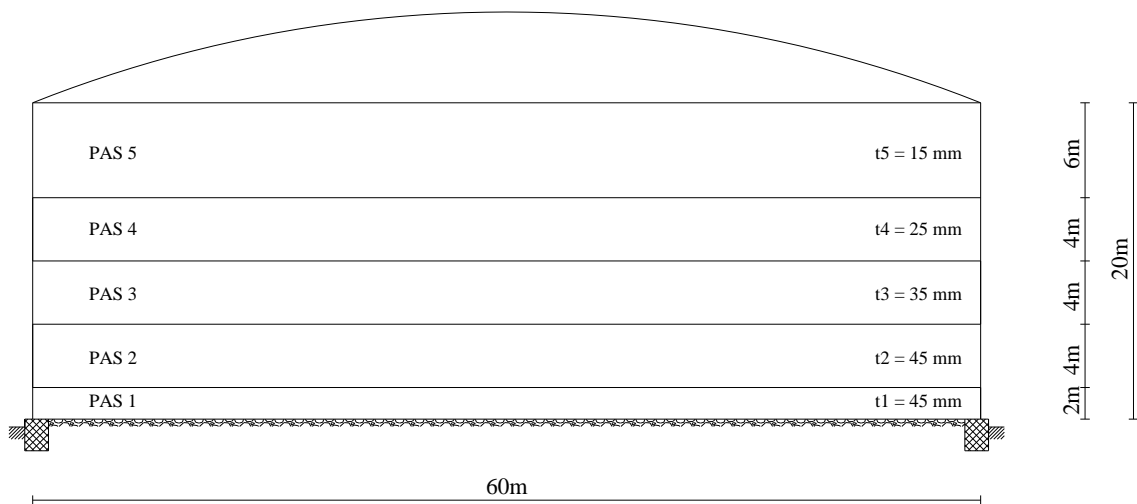
$$\nu = 0,3$$

$$\alpha_T = 12 * 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

Jeklo: S235

$$f_y = 0,807 * 235 \text{ N} / \text{mm}^2 = 189,6 \text{ N} / \text{mm}^2 (200^\circ\text{C})$$

Sidranje mora biti izvedeno tako, da so horizontalni pomiki omogočeni (SIST EN 1993-4-2).



Slika 35: Skica rezervoarja 3

8.3.2 Obtežba

Lastna teža strehe

$$q = 0,15 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$P = q * \pi * R^2$$

$$q_{str.} = \frac{P}{2\pi R} = \frac{0,15 \text{ kN} / \text{m}^2 * 10 \text{ m}}{2} = 0,75 \text{ kN} / \text{m}$$

Lastna teža plašča

$$\gamma_{jek.} = 78 \text{ kN} / \text{m}^3$$

$$q'_{plašč} = 78 \text{ kN} / \text{m}^3 (6 \text{ m} * 0,004 \text{ m} + 4 \text{ m} * 0,005 \text{ m} + 4 \text{ m} * 0,007 \text{ m} + 4 \text{ m} * 0,008 \text{ m} + 2 \text{ m} * 0,01 \text{ m}) = 9,67 \text{ kN} / \text{m}$$

Sneg

$$S = 0,52 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$q_{\text{sneg}} = \frac{SR}{2} = 7,8 \text{ kN} / \text{m}$$

Hidrostatski pritisk

$$\gamma_{\text{bitumen}} = 10 \text{ kN} / \text{m}^3$$

$$q_{\text{bitumen}} = \gamma_{\text{bitumen}} (l - x)$$

Temperaturni vpliv

$$\Delta T = 100^\circ \text{C}$$

$$T_{\text{pllašć}} = 200^\circ \text{C}$$

$$T_{\text{dna}} = 100^\circ \text{C}$$

8.3.3 Izračun notranjih statičnih količin z upogibno teorijo

Hidrostatski pritisk na stene

Uporabim končne enačbe iz poglavja 3.1 na strani 11.

Temperaturni vpliv

Uporabim končne enačbe iz poglavja 3.2 na strani 12.

Lastna teža strehe

$$n_{xx} = P_x = 0,75 \text{ kN} / \text{m}$$

Lastna teža plašća

$$n_{xx} = P_x$$

Pas 1:

$$P_{x1} = ((2 - x) * 0,045 + 4 * 0,045 + 4 * 0,035 + 4 * 0,025 + 6 * 0,015) * 78$$

Pas 2:

$$P_{x2} = ((4 - (x - 2)) * 0,045 + 4 * 0,035 + 4 * 0,025 + 6 * 0,015) * 78$$

Pas 3:

$$P_{x3} = \left((4 - (x - 2 - 4)) * 0,035 + 4 * 0,025 + 6 * 0,015 \right) * 78$$

Pas 4:

$$P_{x4} = \left((4 - (x - 2 - 4 - 4)) * 0,025 + 6 * 0,015 \right) * 78$$

Pas 5:

$$P_{x5} = \left((6 - (x - 2 - 4 - 4 - 4)) * 0,015 \right) * 78$$

8.3.4 Kontrola MSN

LS1 – meja plastičnosti

$$f_{eq,Rd} = \frac{18,9kN / cm^2}{1,0}$$

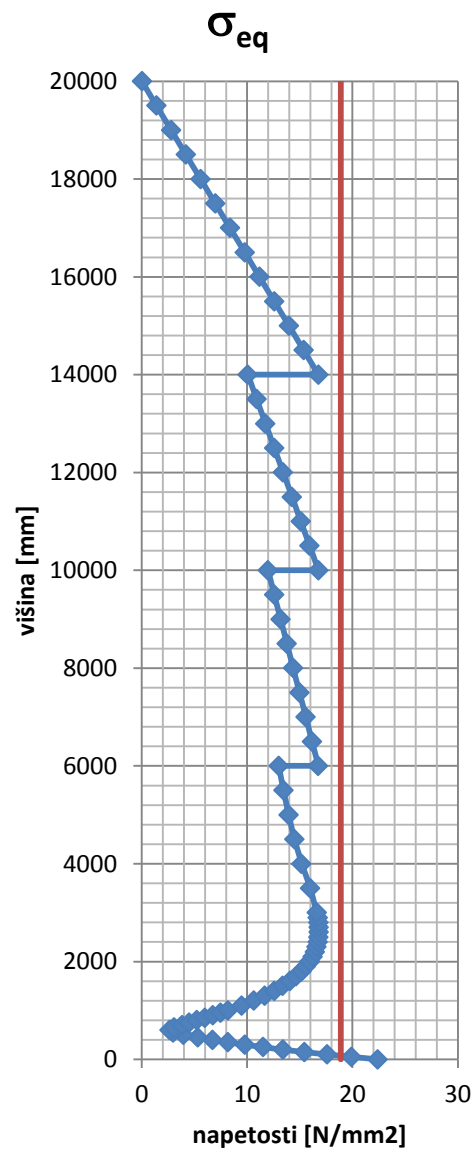
$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd}$$

Debelina pločevine se v plašču rezervoarja po višini spreminja. Zaradi obročnih sil, ki so posledica hidrostatske obtežbe, se v tanjših pločevinah pojavljajo večje obročne napetosti. To se dobro vidi na grafih, kjer so vidni skoki napetosti, to je na spoju debelejše in tanjše pločevine.

S pomočjo grafa, ki se sproti posodablja glede na podatke (na primer v programu Excel), lahko enostavno izberemo take debeline pločevine, da je njihova izkoriščenost kar najboljša.

Kombinacija:

l. t. strehe: 1,35
l. t. plašča 1,35
bitumen: 1,40
temperatura: 1,50
sneg: 0,00



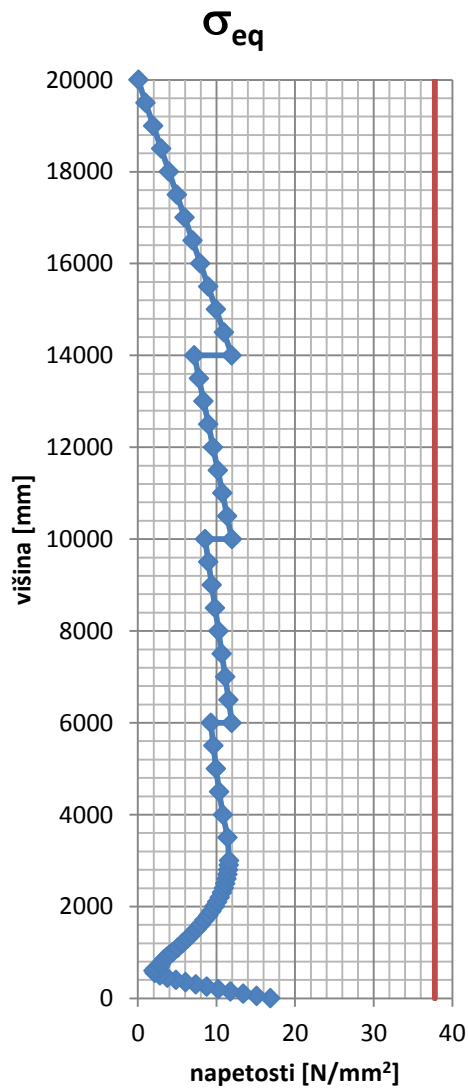
LS2 – ciklična plastičnost

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} \leq \Delta f_{eq,Rd} = 2f_{yd} = 37,8kN / cm^2$$

Največja razlika napetosti, ki se pojavijo v rezervoarju v obratovalni dobi vsaj trikrat, mora biti manjša od dvakratne vrednosti meje plastičnosti. Upošteval sem naslednjo kombinacijo:

Kombinacija:

1. t. strehe: 1,0
1. t. plašča 1,0
bitumen: 1,0
temperatura: 1,0
sneg: 0,0



8.3.5 Določitev debeline dna

Določitev debeline dna določa standard SIST EN 1993-4-2 v poglavju 11.4.

$$t'_a = \frac{t_s}{3} + 3 = \frac{45}{3} + 3 = 18 \text{ mm}$$

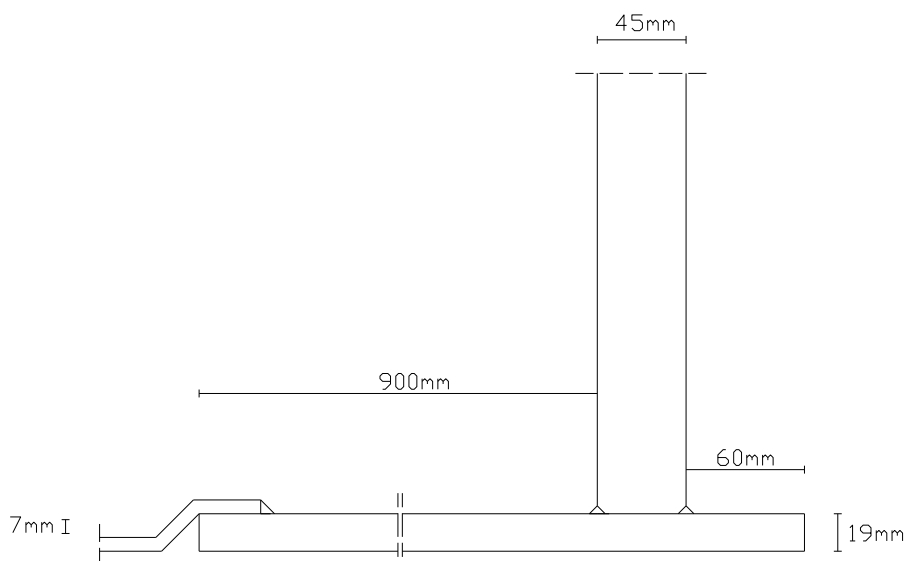
$$t_a = 19 \text{ mm}$$

$$t_d = 7 \text{ mm}$$

$$w_a = 1,5 \left(\frac{f_y * t_a^2}{\rho g H} \right)^{1/2} = 1,5 \left(\frac{189 \text{ N / mm}^2 (19 \text{ mm})^2}{10^{-5} \text{ N / mm}^3 20 * 10^3 \text{ mm}} \right)^{1/2}$$

$$w_a = 876 \text{ mm} > 500 \text{ mm}$$

$$\rightarrow w_a = 900 \text{ mm}$$



Slika 36: Detajl spoja plašč-dno za rezervoar 3

9.0 DIMENZIONIRANJE TREH REZERVOARJEV PO API 650

Rezervoarje, ki sem jih dimenzioniral po standardu SIST EN 1993, bom preveril še s kontrolo, ki je zahtevana v standardu API 650 in se nanaša na vpliv temperature. Ozadje in izpeljavo kontrole sem podrobno opisal že v poglavju 4.0 na strani 16. Celotnemu dimenzioniranju rezervoarja po API 650 se bom izognil z namenom, da se ne oddaljim od prvotne naloge – opazovanja temperaturnega vpliva.

Predpostavim, da je pričakovano število ciklov v življenjski dobi rezervoarja, to je 25 let, 300. To pomeni en cikel oziroma eno praznjenje in polnjenje na mesec.

Pri izvajanju kontrole moramo torej preveriti, da je življenjska doba rezervoarja (število N) večja od 300 ciklov.

V standardu so navedene enačbe v SI in US enotah. Prikazal bom samo izračun v SI enotah.

Enačbe, ki so navedene v standardu:

Pogoj za uporabo enačb:

$$SI : \left[\frac{58HG}{(Dt)^{0,5}} + \frac{26,2CTt^{0,5}}{D^{1,5}} - G \right] > \frac{4,8BS_y t_b^2}{(Dt)^{1,5}} \quad (9.1)$$

$$US : \left[\frac{6,3HG}{(Dt)^{0,5}} + \frac{436CTt^{0,5}}{D^{1,5}} - G \right] > \frac{BS_y t_b^2}{(Dt)^{1,5}} \quad (9.2)$$

Izračun S:

$$SI : S = \frac{0,028D^2 t_b^{0,25}}{t} \times \left[\frac{58HG}{(Dt)^{0,5}} + \frac{26,2CTt^{0,5}}{D^{1,5}} - \frac{4,8BS_y t_b^2}{(Dt)^{1,5}} - G \right] \quad (9.3)$$

$$US : S = \frac{0,033D^2 t_b^{0,25}}{t} \times \left[\frac{6,3HG}{(Dt)^{0,5}} + \frac{436CTt^{0,5}}{D^{1,5}} - \frac{BS_y t_b^2}{(Dt)^{1,5}} - G \right] \quad (9.4)$$

Izračun števila N:

$$SI : N = \left(\frac{9,7 \times 10^3}{KS} \right)^{2,44} \quad (9.5)$$

$$US : N = \left(\frac{1,4 \times 10^6}{KS} \right)^{2,44} \quad (9.6)$$

Kjer je:

T ... sprememba temperature

D ... premer rezervoarja

S_y ... meja tečenja pri visokih temperaturah

t_p ... debelina plašča v spodnjem delu

H ... višina polnjenja

t_d ... debelina dna

C ... faktor odpora pri temperaturnem raztežku

G ... specifična teža tekočine

(od 0,25 do 1,00);

če ni podatka, vzamemo: $C = 0,85$

B ... tip temeljenja

= 2,0 ... utrjeno nasutje

= 4,0 ... betonski obroč ali betonska plošča

Za zmanjšanje vrednosti mehanskih lastnosti materiala so znotraj dodatka »Appendix M« vključene tabele. S faktorji, ki jih prikazuje Tabela 7, glede na pričakovano temperaturo, zmanjšamo mejo tečenja. Tabela 8 pa prikazuje vrednost elastičnega modula jekla pri različnih temperaturah.

Tabela 7: Redukcijski faktorji pri povišanih temperaturah v API 650

| Temperatura [°C] | Redukcijski faktor meje tečenja | | |
|------------------|---------------------------------|-----------------|-----------|
| | < 310 Mpa | > 310 < 380 MPa | > 380 MPa |
| 94 | 0,91 | 0,88 | 0,92 |
| 150 | 0,88 | 0,81 | 0,87 |
| 200 | 0,85 | 0,75 | 0,83 |
| 260 | 0,80 | 0,70 | 0,79 |

Tabela 8: Modul elastičnosti pri povišanih temperaturah v API 650

| Temperatura [°C] | Modul elastičnosti [Mpa] |
|------------------|--------------------------|
| 93 | 199,0 |
| 150 | 195,0 |
| 200 | 191,0 |
| 260 | 188,0 |

V mojem primeru je to:

$$S_{235} \rightarrow 0,85 * 235 = 200 \text{ N} / \text{mm}^2 (= f_y)$$

V računalniški program Excel sem vnesel enačbe, tako da so se rezultati izvednotili samodejno glede na vnesene podatke. Kot izračun kontrol posameznih rezervoarjev bom prikazal izpis iz programa Excel.

Rezultat 1.1 v izpisu pokaže izračun leve in desne strani enačbe (9.1) oziroma (9.2) in samodejno ugotovi, ali je pogoj izpolnjen (izpis besede »OK«).

Rezultat 1.2 izpiše vrednost S , ki je izračunana z enačbo (9.3) oziroma (9.4).

V točki 1.3 je z enačbo (9.5) izračunano število ciklov N , ki predstavlja življenjsko dobo rezervoarja. Zraven je dodana kontrola, ali je število ciklov večje od 300. Če je manjše, se izpiše opozorilo, kar pomeni, da v času obratovanja pričakujemo večje število ciklov, kot jih rezervoar lahko prenese. V tem primeru moramo spremeniti dimenzije rezervoarja in ponoviti kontrolo.

9.1 Rezervoar 1

Izpis iz programa Excel:

| podatki: | | | enote: SI |
|-----------------------------|----------|-----------|-----------|
| H | 10 | m | |
| D | 20 | m | |
| t | 8 | mm | |
| tb | 7 | mm | |
| T | 200 | °C | |
| C | 0,85 | / | |
| B | 4 | / | |
| G | 1 | / | |
| Sy | 200 | Mpa | |
| K | 4 | / | |
| 1.1) Pogoj za uporabo enačb | | | |
| | 185,70 | > | 92,97 |
| | | OK | |
| 1.2) Izračun S | | | |
| | S= | 211,17 | |
| 1.3) Kontrola števila N | | | |
| | N= | 386 | > 300 |
| | | OK | |

9.2 Rezervoar 2

Izpis iz programa Excel:

| podatki: | | | enote: SI |
|-----------------------------|-------------|-----------|---------------------------|
| H | 20 | m | |
| D | 20 | m | |
| t | 16 | mm | |
| tb | 12 | mm | - iz 10mm povečal na 12mm |
| T | 200 | °C | |
| C | 0,85 | / | |
| B | 4 | / | |
| G | 1 | / | |
| Sy | 200 | Mpa | |
| K | 4 | / | |
| 1.1) Pogoj za uporabo enačb | | | |
| | 263,03 | > | 96,60 |
| | | OK | |
| 1.2) Izračun S | | | |
| | S= | 216,84 | |
| 1.3) Kontrola števila N | | | |
| | N= | 362 | > 300 |
| | | OK | |

9.3 Rezervoar 3

Izpis iz programa Excel:

| podatki: | | | enote: SI | |
|-----------------------------|-----------|-----------|---------------------------------|-----|
| H | 20 | m | | |
| D | 60 | m | | |
| t | 45 | mm | | |
| tb | 19 | mm | | |
| T | 200 | °C | | |
| C | 0,85 | / | | |
| B | 4 | / | | |
| G | 1 | / | | |
| Sy | 200 | Mpa | | |
| K | 2 | / | - Obvezna kontrola vseh zvarov! | |
| 1.1) Pogoj za uporabo enačb | | | | |
| | 85,61 | > | 9,88 | |
| | | OK | | |
| 1.2) Izračun S | | | | |
| | S= | 354,17 | | |
| 1.3) Kontrola števila N | | | | |
| | N= | 593 | > | 300 |
| | | OK | | |

9.4 Komentar

V tabeli bom povzel rezultate zgornjih izračunov:

Tabela 9: Povzetek rezultatov v poglavju 9.0

| Sprememba, ukrep: | |
|--------------------|--|
| Rezervoar 1 | Dodatni ukrepi niso bili potrebni. Kontrola je bila takoj izpolnjena. |
| Rezervoar 2 | S povečanjem debeline dna iz 10 mm na 12 mm se kontrola izide. |
| Rezervoar 3 | Samo s spreminjanjem debeline pločevine kontrola ne more biti izpolnjena. Spremenil sem koeficient K, ki predstavlja kvaliteto zvarov. Posledica tega je, da je potrebna kontrola vseh zvarov v spoju plašč-dno. |

S pogledom na zgornjo tabelo lahko ponovno opazimo, da so večji problemi pri velikih rezervoarjih. To je omenjeno že v poglavju 6.9. Očitno pa je, da je dodatek iz ameriškega standarda API 650 na rezervoarjih, ki so dimenzionirani po evropskih standardih, zahteval dodatne ukrepe. Ali so upravičeni, bom ugotovil s simulacijo v Abaqusu.

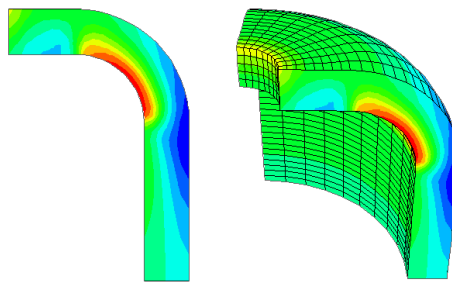
Seveda bi v vseh primerih lahko spremenil koeficient C in ostali ukrepi ne bi bili več potrebni. Upošteval sem priporočeno vrednost 0,85.

10.0 MODELI TREH REZERVOARJEV V ABAQUSU

V programu Abaqus bom izračunal notranje napetosti pri enakih obtežnih kombinacijah kot v poglavju 8.0, torej tako, kot predpisujejo slovenski predpisi.

Za izračun bom uporabil okolje »Axisymmetric«. Tako bo model enostavnejši za izračun, kot če bi modeliral cel tridimenzionalni rezervoar. Ker je vsa obtežba osnosimetrična in gre za problem, ki se pojavlja osnosimetrično, je taka poenostavitev mogoča in s tem ničesar ne zanemarim bolj kot že sicer.

Rezervoarje bom modeliral z elementi »shell«, kar skupaj z okoljem »Axisymmetric« pomeni, da gre za model, ki vsebuje tudi debelino pločevine. Rezultat izračunov so torej napetosti v materialu in ne samo koncentrirane notranje sile. Tak model še vedno omogoča hiter izračun, omogoča pa tudi boljši vpogled v razporeditev napetosti, na primer v spoju plašč-dno.



Slika 37: Model v okolju "Axisymmetric" in njegova preslikava v 3D prostor
(Abaqus 6.10 Online Documentation, 2010)

V rezultatih bom prikazal von Mises-ove napetosti, izračunane iz rezultatov v Abaqusu. Iz Abaqusa sem izvozil podatke o napetostih za notranjo in zunanjo stran pločevine rezervoarja. V programu sem izračunal von Mises-ove napetosti posebej za notranjo in zunanjo površino pločevine. Na grafih so prikazane tiste vrednosti, ki so večje.

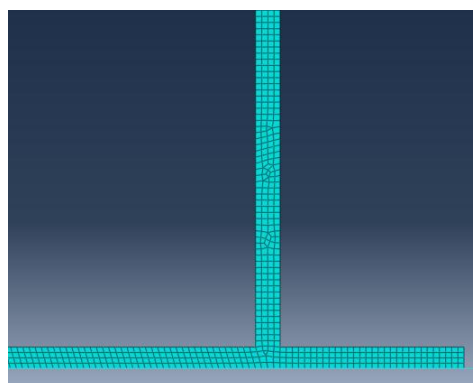
Na grafe bom dodal še analitične rezultate iz poglavja 8.0.

Za referenčno točko, kjer bom spremljal pomike, sem si izbral spodnji vogal zunanjega dela dna.

10.1 Rezervoar 1

10.1.1 Dimenzije in model

Višina: 10 m
 Polmer: 10 m
 Debeline plašča: 8/7/4 mm
 Debelina obroča dna: 7 mm
 Debelina dna: 7 mm
 $E = 189000 \text{ N/mm}^2$
 $\nu = 0,3$
 $\alpha_t = 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
 $f_y = 189 \text{ N/mm}^2$
 $k_{trenja} = 0,5$



Slika 38: Model rezervoarja 1 in mreža končnih elementov v Abaqusu

10.1.2 Obtežne kombinacije

Tabela 10: Obtežne kombinacije za rezervoar 1

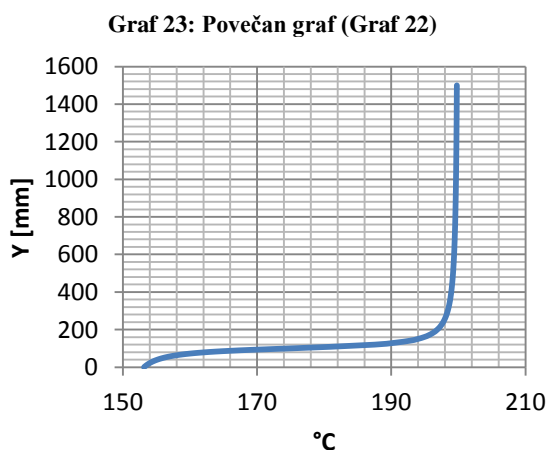
| | Kombinacija 1 | Kombinacija 2 | Kombinacija 3 |
|--------------|--|--|---|
| l. t. strehe | *1,35 = 0,2531 N/mm ² | *1,35 = 0,2531 N/mm ² | *1,00 = 0,1875 N/mm ² |
| l. t. plašča | *1,35 = 78 N/mm ² *1,35 | *1,35 = 78 N/mm ² *1,35 | *1,00 = 78 N/mm ² *1,00 |
| bitumen | *1,5 = 0,15 N/mm ² (na dnu) | *0,9 = 0,09 N/mm ² (na dnu) | *1,00 = 0,10 N/mm ² (na dnu) |
| sneg | *0,9 = 1,755 N/mm ² | *1,5 = 2,925 N/mm ² | *1,00 = 1,95 N/mm ² |
| temperatura | / | / | *1,00 = 200°C (maks.) |

10.1.3 Razporeditev temperature

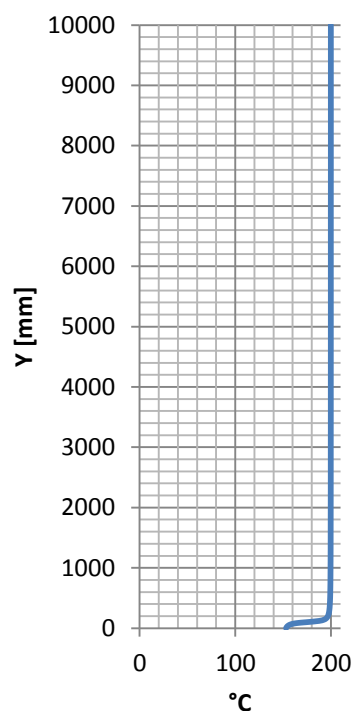
Predpostavim, da je rezervoar izoliran po plašču, dno je neizolirano v stiku z gramoznim nasutjem. V taki situaciji predvidevam, da bi v dnu lahko prišlo do nižjih temperatur, kot so sicer v rezervoarju. Razporeditev temperature v Abaqusu definiram analitično z enačbo:

$$\frac{\arctan(y \cdot 0,05 - 5)}{\pi / 2} \cdot 25 + 175$$

Enačba predstavlja naslednjo krivuljo:



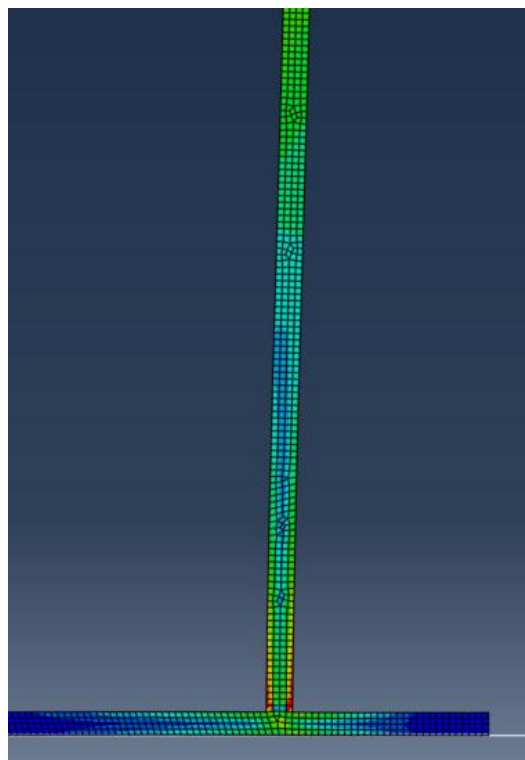
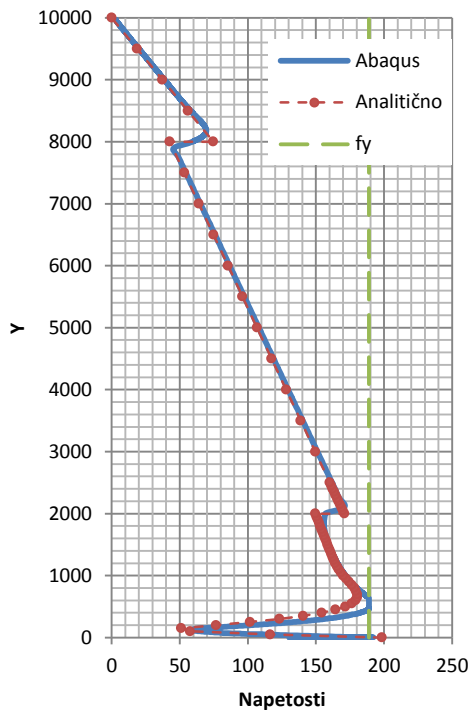
Graf 22: Potek temperature po višini rezervoarja 1



10.1.4 Rezultati

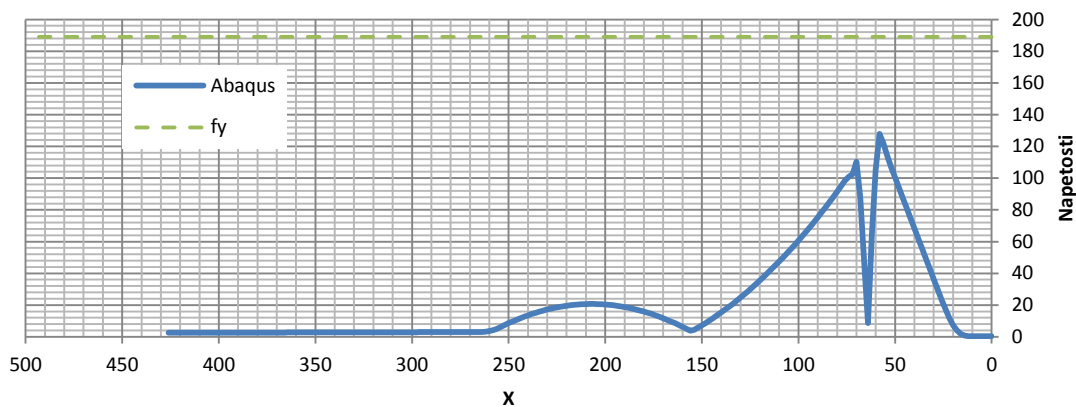
Kombinacija 1:

Graf 24: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 1



Slika 39: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 1

Graf 25: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 1



Računski raztezek plašča:

$$R * \alpha_T * \Delta T = /$$

Pomik referenčne točke:

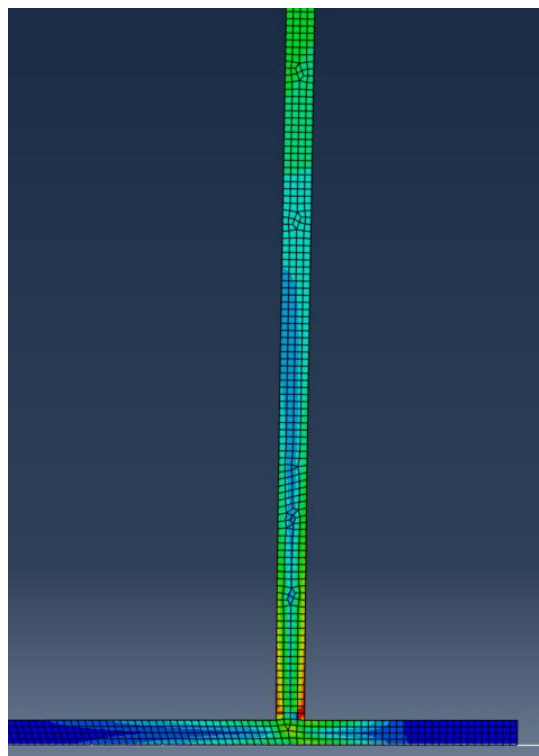
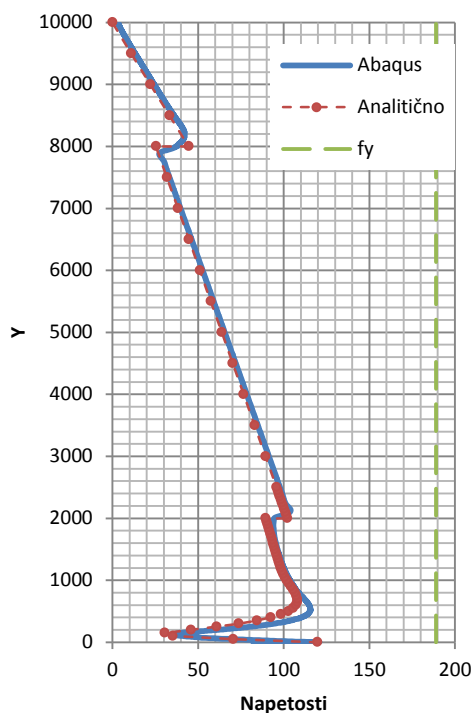
$$u = 0,018 \text{ mm}$$

Raztezek dna v primerjavi z računskim raztezkom plašča:

$$\frac{u}{R * \alpha_T * \Delta T} = /$$

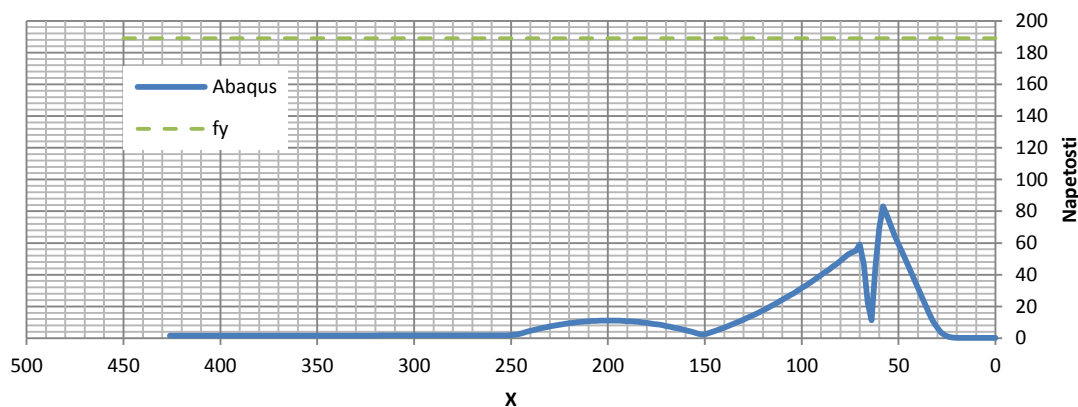
Kombinacija 2:

Graf 26: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 1



Slika 40: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 1

Graf 27: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 1



Računski raztezek plašča:

$$R * \alpha_T * \Delta T = /$$

Pomik referenčne točke:

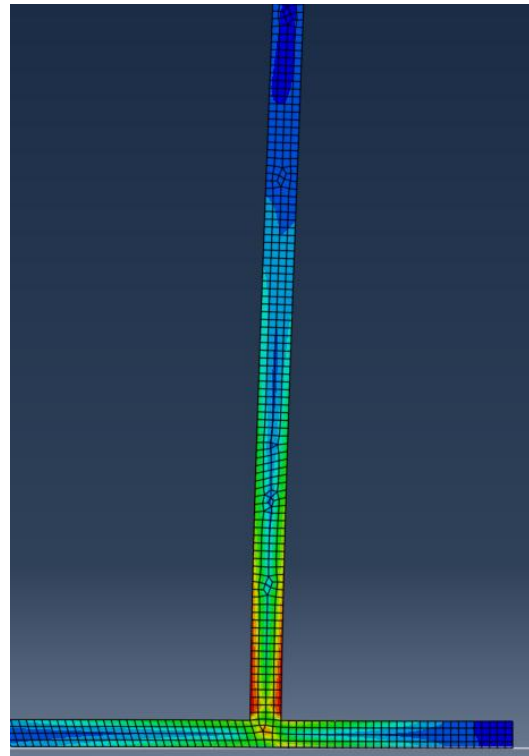
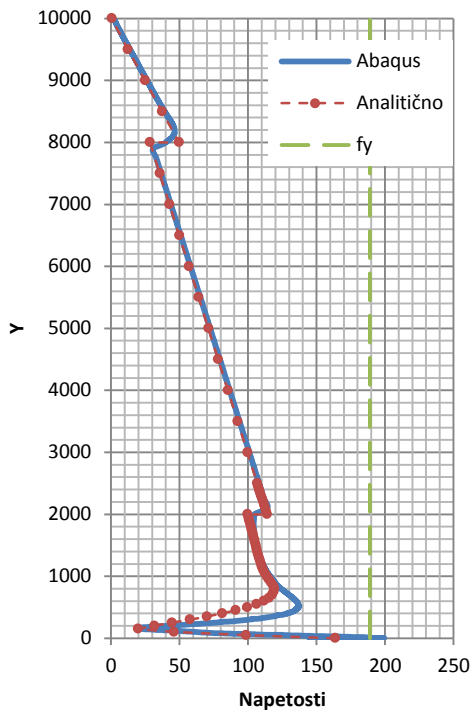
$$u = 0,014 \text{ mm}$$

Raztezek dna v primerjavi z računskim raztezkom plašča:

$$\frac{u}{R * \alpha_T * \Delta T} = /$$

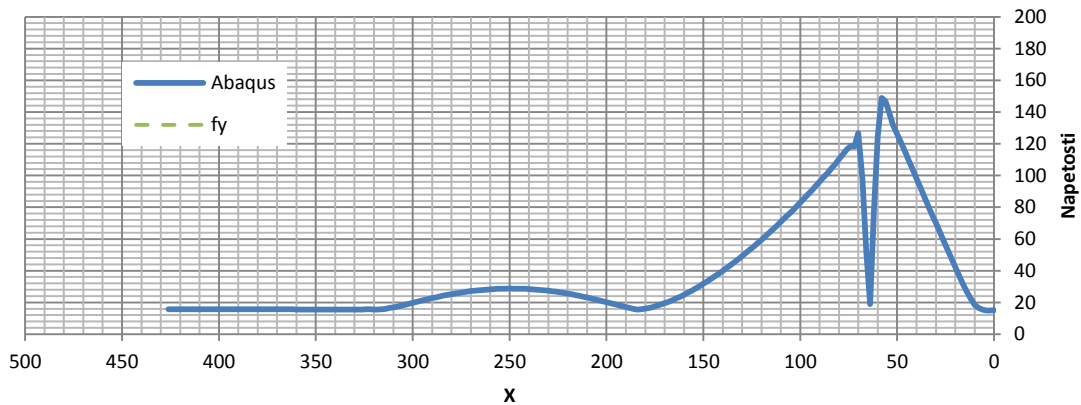
Kombinacija 3 (s temperaturo)

Graf 28: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 1



Slika 41: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 1

Graf 29: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 1



Računski raztezek plašča:

$$R * \alpha_T * \Delta T = 24,00 \text{ mm}$$

Pomik referenčne točke:

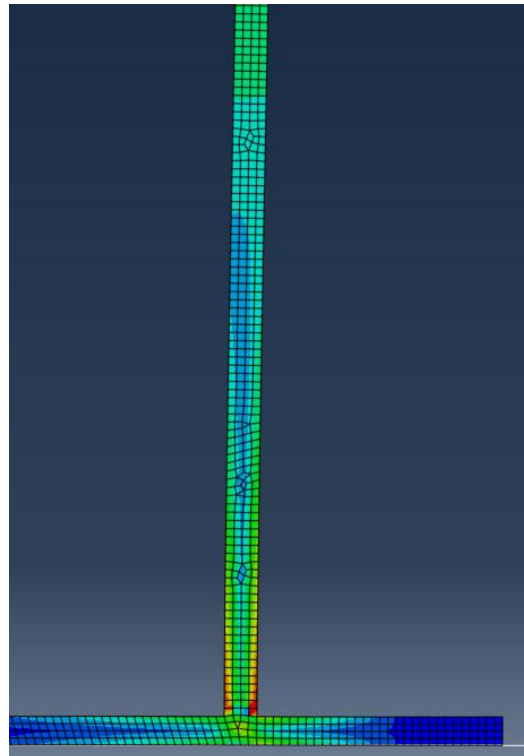
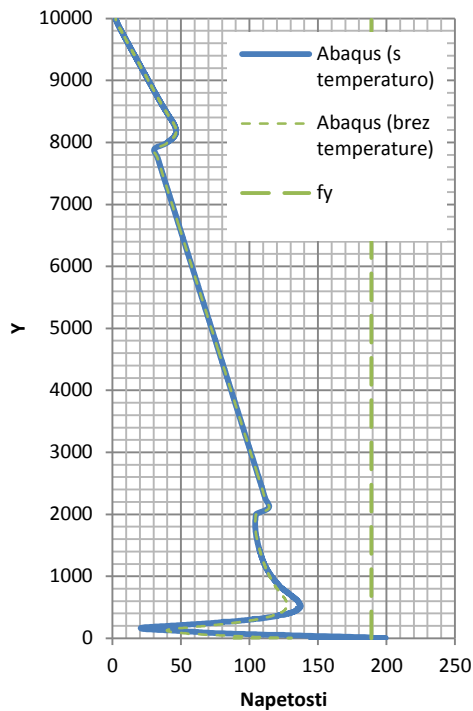
$$u = 17,76 \text{ mm}$$

Raztezek dna v primerjavi z računskim raztezkom plašča:

$$\frac{u}{R * \alpha_T * \Delta T} = 74 \%$$

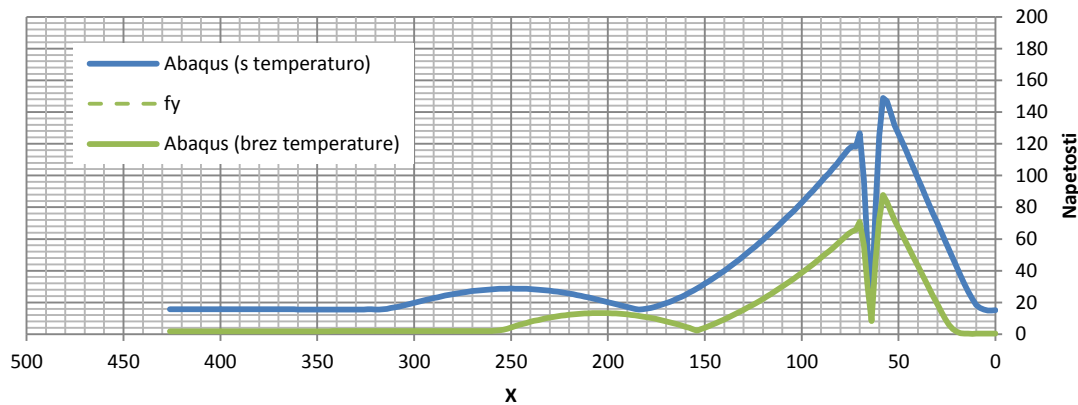
Kombinacija 3 (brez temperature)

Graf 30: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 1



Slika 42: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 1

Graf 31: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 1



Računski raztezek plašča:

$$R * \alpha_T * \Delta T = /$$

Pomik referenčne točke:

$$u = 0,015 \text{ mm}$$

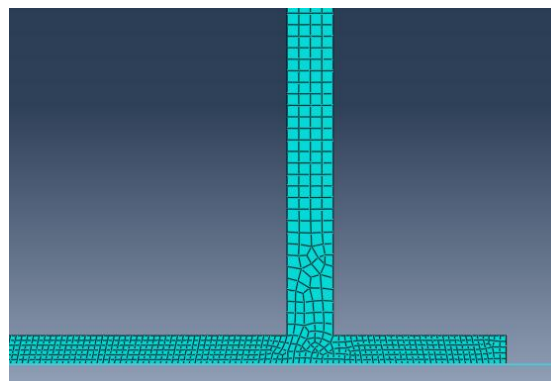
Raztezek dna v primerjavi z računskim raztezkom plašča:

$$\frac{u}{R * \alpha_T * \Delta T} = /$$

10.2 Rezervoar 2

10.2.1 Dimenzije in model

Višina: 20 m
 Polmer: 10 m
 Debeline plašča: 16/15/12/9/6 mm
 Debelina obroča dna: 10 mm
 Debelina dna: 7 mm
 $E = 189000 \text{ N/mm}^2$
 $\nu = 0,3$
 $\alpha_T = 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
 $f_y = 189 \text{ N/mm}^2$
 $k_{trenja} = 0,5$



Slika 43: Model rezervoarja 2 in mreža končnih elementov v Abaqusu

10.2.2 Obtežne kombinacije

Tabela 11: Obtežne kombinacije za rezervoar 2

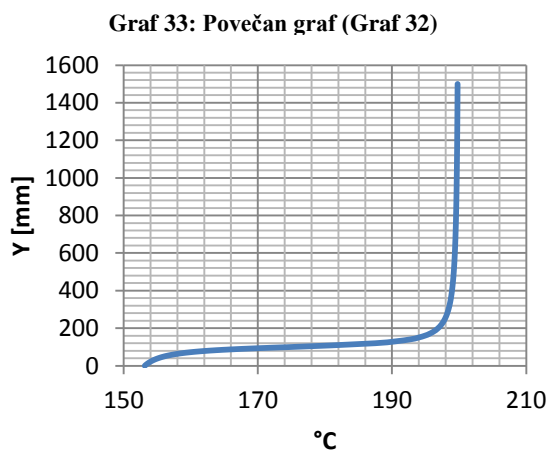
| | Kombinacija 1 | Kombinacija 2 | Kombinacija 3 |
|--------------|---------------------------------------|--|---|
| l. t. strehe | *1,35 = 0,1687 N/mm ² | *1,35 = 0,1687 N/mm ² | *1,00 = 0,125 N/mm ² |
| l. t. plašča | *1,35 = 78 N/mm ² *1,35 | *1,35 = 78 N/mm ² *1,35 | *1,00 = 78 N/mm ² *1,00 |
| bitumen | *1,5 = 0,3 N/mm ² (na dnu) | *0,9 = 0,18 N/mm ² (na dnu) | *1,00 = 0,20 N/mm ² (na dnu) |
| sneg | *0,9 = 0,39 N/mm ² | *1,5 = 0,65 N/mm ² | *1,00 = 0,43 N/mm ² |
| temperatura | / | / | *1,00 = 200°C (maks.) |

10.2.3 Razporeditev temperature

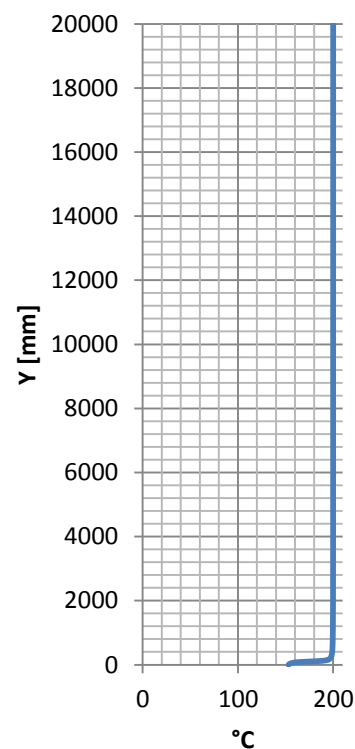
Predpostavim, da je rezervoar izoliran po plašču, dno je neizolirano v stiku z gramoznim nasutjem. V taki situaciji predvidevam, da bi v dnu lahko prišlo do nižjih temperatur, kot so sicer v rezervoarju. Razporeditev temperature v Abaqusu definiram analitično z enačbo:

$$\frac{\arctan(y \cdot 0,05 - 5)}{\pi / 2} \cdot 25 + 175$$

Enačba predstavlja naslednjo krivuljo:



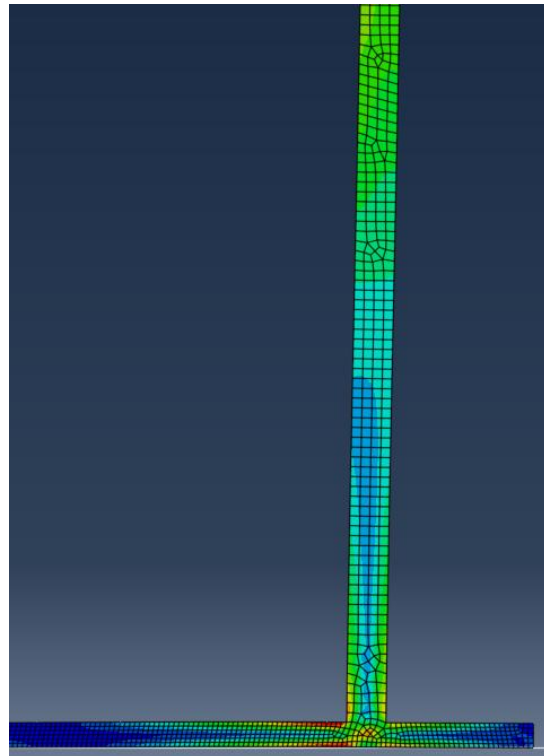
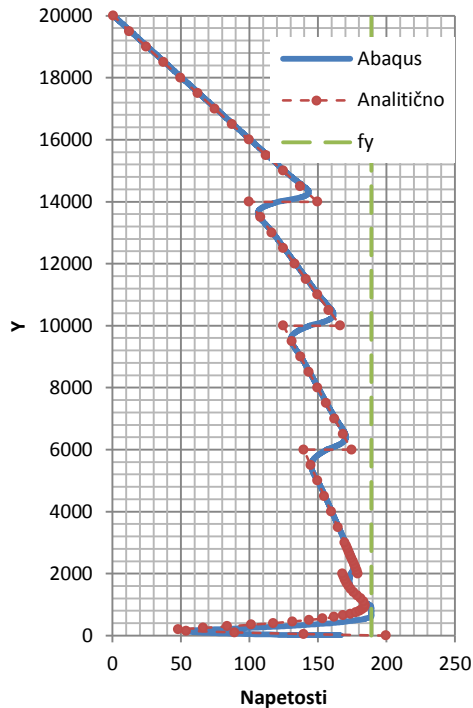
Graf 32: Potek temperature po višini rezervoarja 2



10.2.4 Rezultati

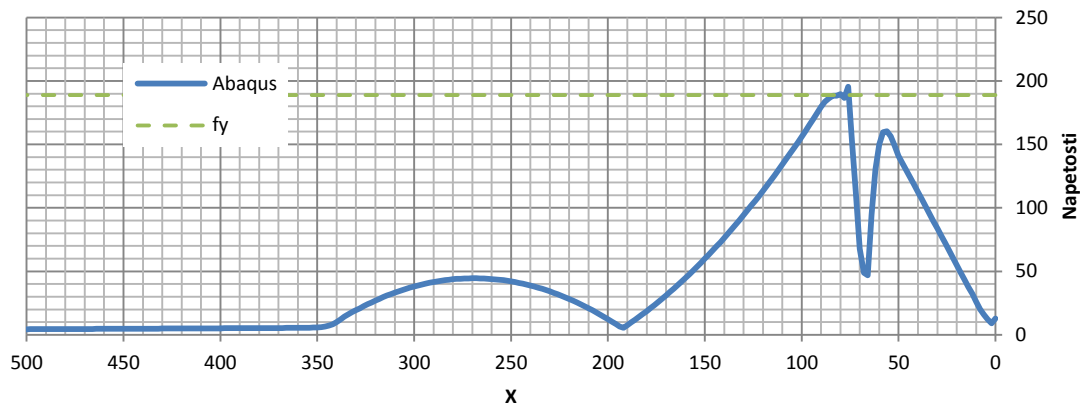
Kombinacija 1:

Graf 34: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 2



Slika 44: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 2

Graf 35: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 2



Računski raztezek plašča:

$$R * \alpha_T * \Delta T = /$$

Pomik referenčne točke:

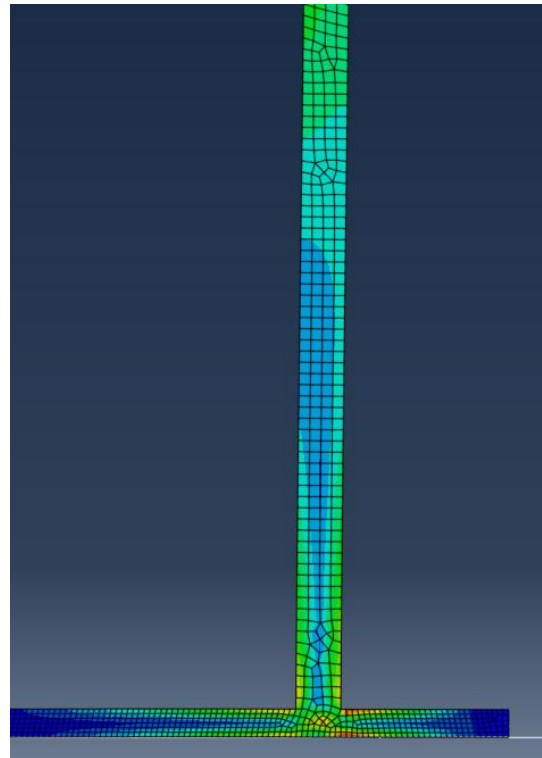
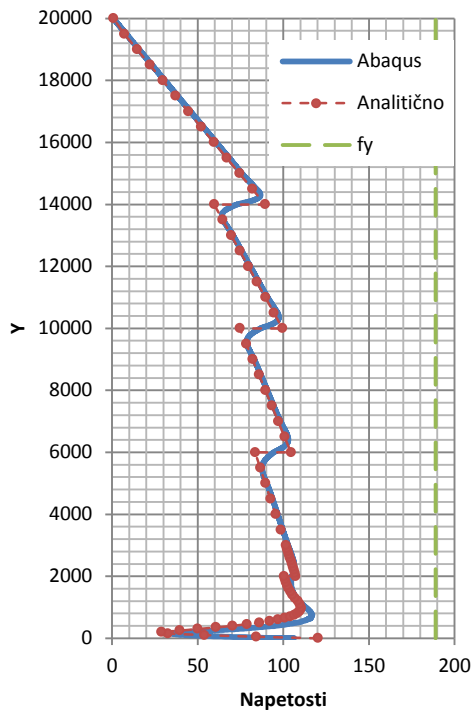
$$u = 0,015 \text{ mm}$$

Raztezek dna v primerjavi z računskim raztezkom plašča:

$$\frac{u}{R * \alpha_T * \Delta T} = /$$

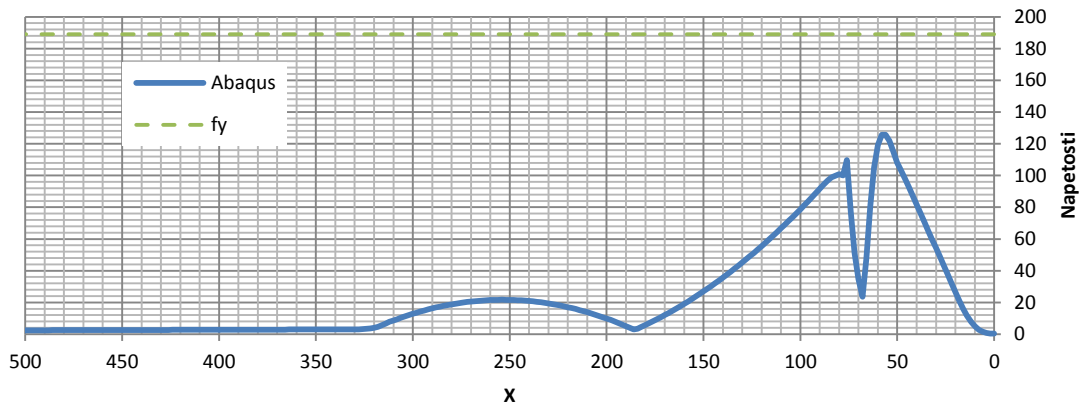
Kombinacija 2:

Graf 36: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 2



Slika 45: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 2

Graf 37: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 2



Računski raztezek plašča:

$$R * \alpha_T * \Delta T = /$$

Pomik referenčne točke:

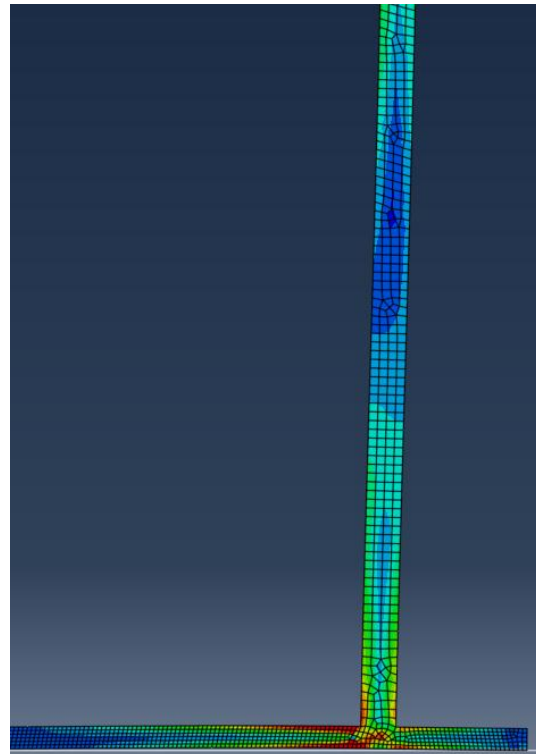
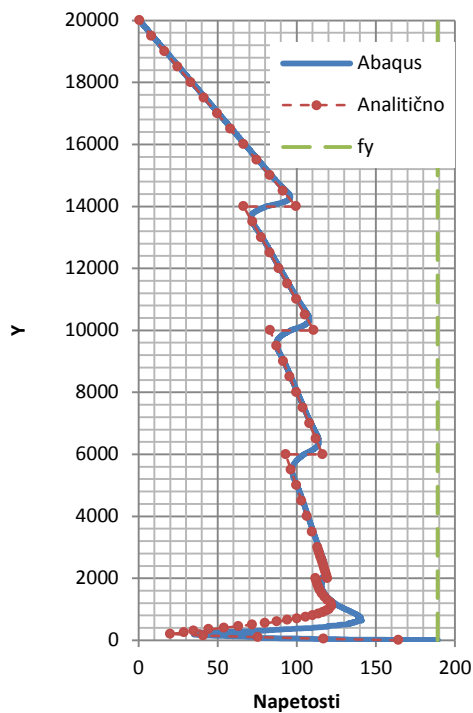
$$u = 0,021 \text{ mm}$$

Raztezek dna v primerjavi z računskim raztezkom plašča:

$$\frac{u}{R * \alpha_T * \Delta T} = /$$

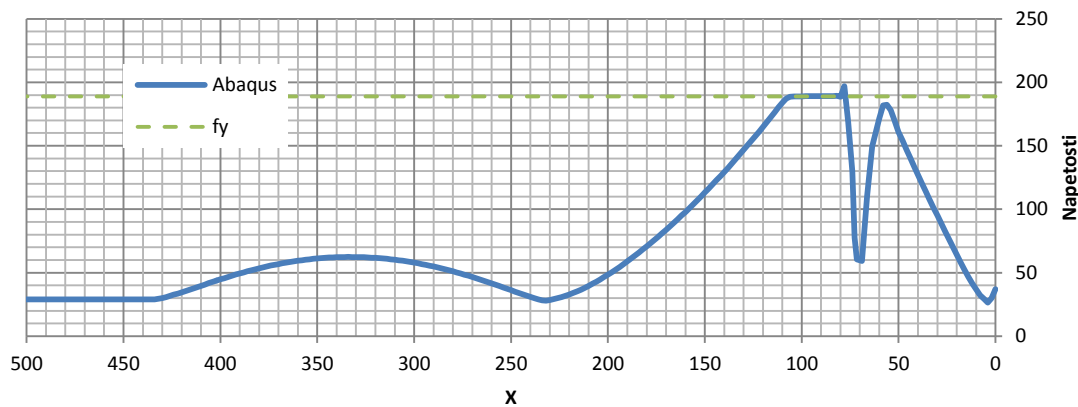
Kombinacija 3 (s temperaturo)

Graf 38: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 2



Slika 46: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 2

Graf 39: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 2



Računski raztezek plašča:

$$R * \alpha_T * \Delta T = 24,00 \text{ mm}$$

Pomik referenčne točke:

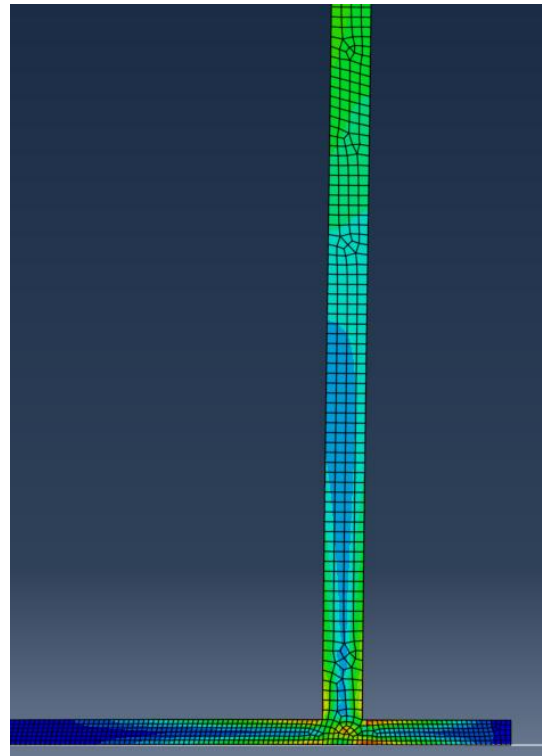
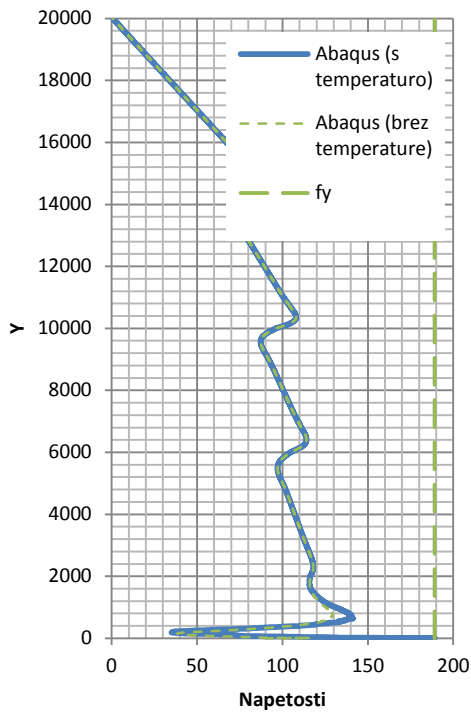
$$u = 17,11 \text{ mm}$$

Raztezek dna v primerjavi z računskim raztezkom plašča:

$$\frac{u}{R * \alpha_T * \Delta T} = 71 \%$$

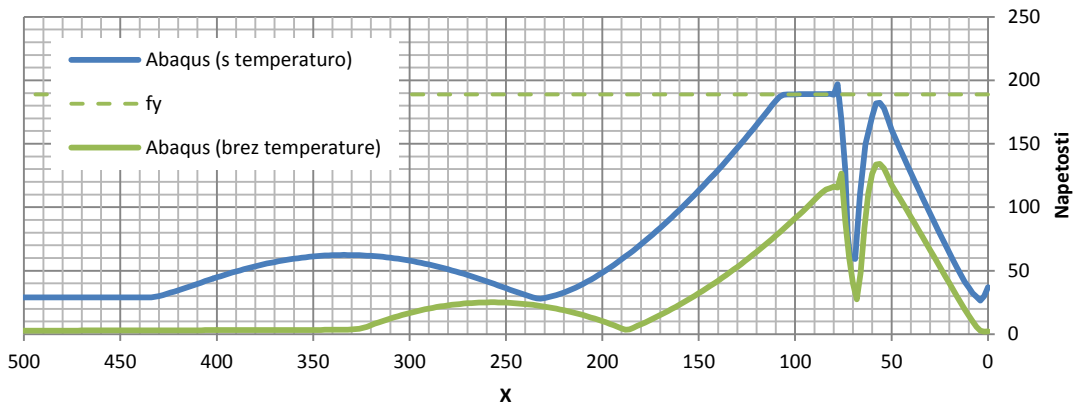
Kombinacija 3 (brez temperature)

Graf 40: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 2



Slika 47: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 2

Graf 41: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 2



Računski raztezek plašča:

$$R * \alpha_T * \Delta T = /$$

Pomik referenčne točke:

$$u = 0,022 \text{ mm}$$

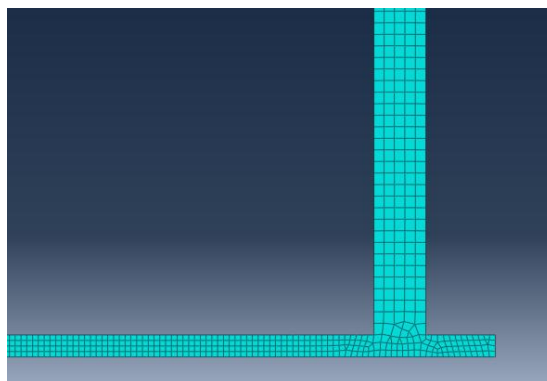
Raztezek dna v primerjavi z računskim raztezkom plašča:

$$\frac{u}{R * \alpha_T * \Delta T} = /$$

10.3 Rezervoar 3

10.3.1 Dimenzije in model

Višina: 20 m
 Polmer: 30 m
 Debeline plašča: 45/35/25/15 mm
 Debelina obroča dna: 19 mm
 Debelina dna: 7 mm
 $E = 189000 \text{ N/mm}^2$
 $\nu = 0,3$
 $\alpha_T = 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
 $f_y = 189 \text{ N/mm}^2$
 $k_{trenja} = 0,5$



Slika 48: Model rezervoarja 3 in mreža končnih elementov v Abaqusu

10.3.2 Obtežne kombinacije

Tabela 12: Obtežne kombinacije za rezervoar 3

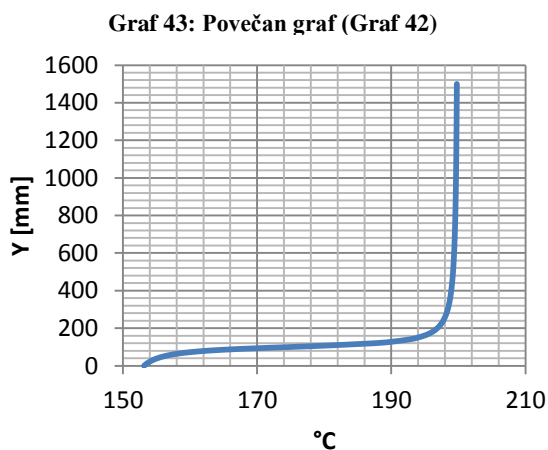
| | Kombinacija 1 | Kombinacija 2 | Kombinacija 3 |
|--------------|---------------------------------------|--|---|
| l. t. strehe | *1,35 = 0,0675 N/mm ² | *1,35 = 0,0675 N/mm ² | *1,00 = 0,05 N/mm ² |
| l. t. plašča | *1,35 = 78 N/mm ² *1,35 | *1,35 = 78 N/mm ² *1,35 | *1,00 = 78 N/mm ² *1,00 |
| bitumen | *1,5 = 0,3 N/mm ² (na dnu) | *0,9 = 0,18 N/mm ² (na dnu) | *1,00 = 0,20 N/mm ² (na dnu) |
| sneg | *0,9 = 0,468 N/mm ² | *1,5 = 0,78 N/mm ² | *1,00 = 0,52 N/mm ² |
| temperatura | / | / | *1,00 = 200°C (maks.) |

10.3.3 Razporeditev temperature

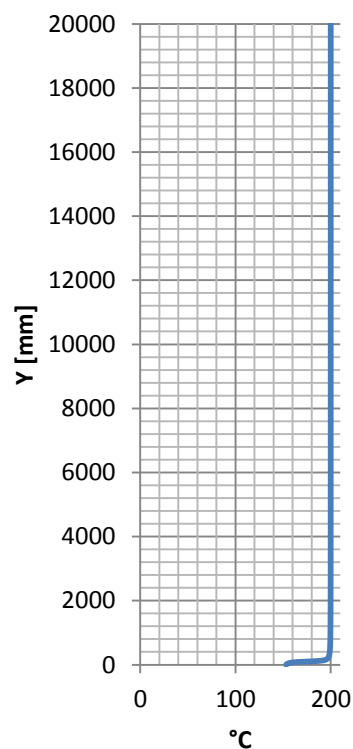
Predpostavim, da je rezervoar izoliran po plašču, dno je neizolirano v stiku z gramoznim nasutjem. V taki situaciji predvidevam, da bi v dnu lahko prišlo do nižjih temperatur, kot so sicer v rezervoarju. Razporeditev temperature v Abaqusu definiram analitično z enačbo:

$$\frac{\arctan(y \cdot 0,05 - 5)}{\pi / 2} \cdot 25 + 175$$

Enačba predstavlja naslednjo krivuljo:



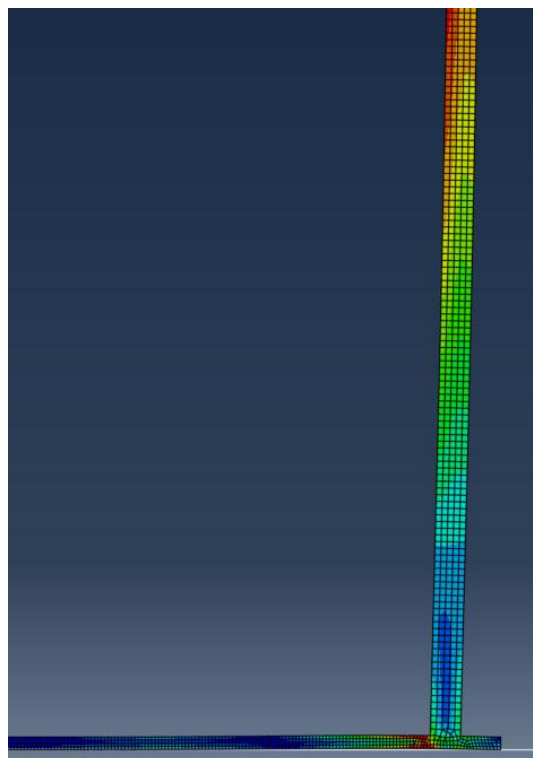
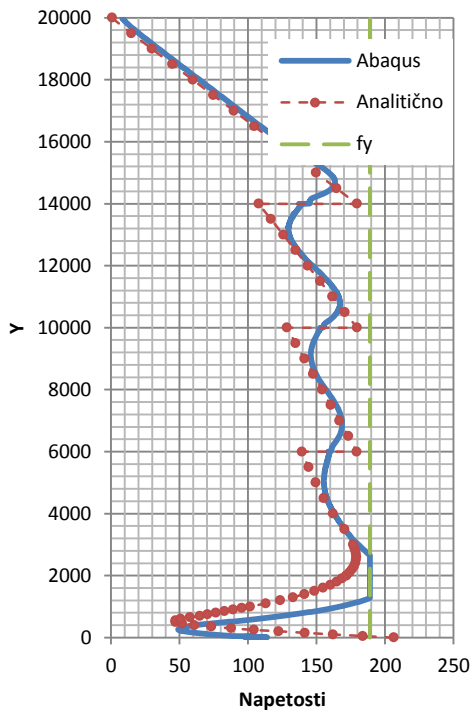
Graf 42: Potek temperature po višini rezervoarja 3



10.3.4 Rezultati

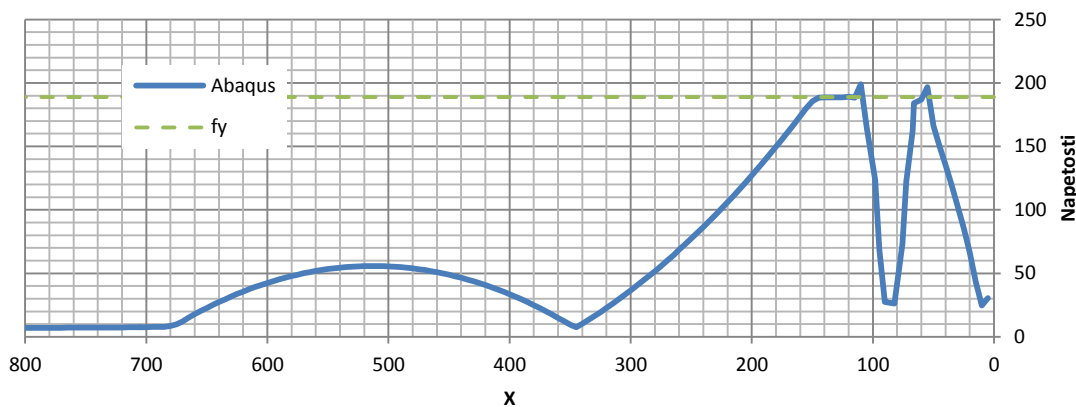
Kombinacija 1:

Graf 44: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 3



Slika 49: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 3

Graf 45: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 3



Računski raztezek plašča:

$$R * \alpha_T * \Delta T = /$$

Pomik referenčne točke:

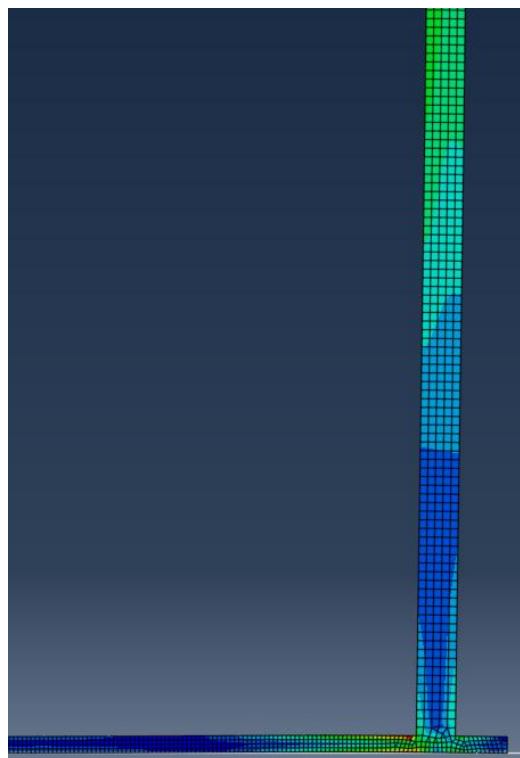
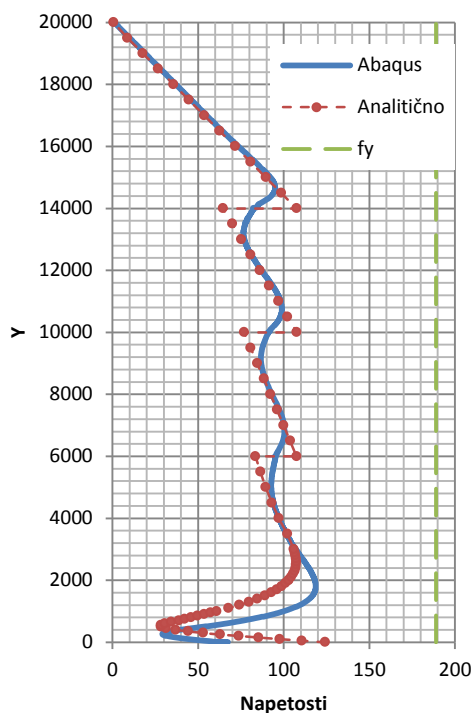
$$u = 0,02 \text{ mm}$$

Raztezek dna v primerjavi z računskim raztezkom plašča:

$$\frac{u}{R * \alpha_T * \Delta T} = /$$

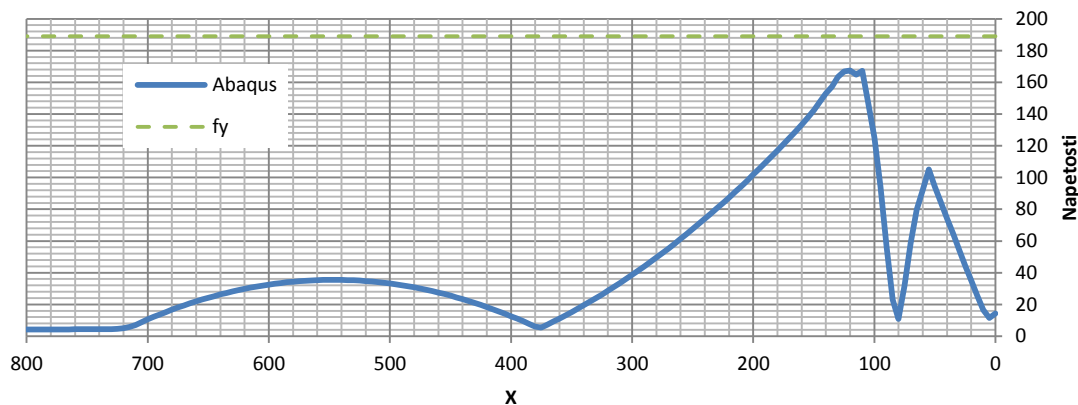
Kombinacija 2:

Graf 46: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 3



Slika 50: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 3

Graf 47: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 3



Računski raztezek plašča:

$$R * \alpha_T * \Delta T = /$$

Pomik referenčne točke:

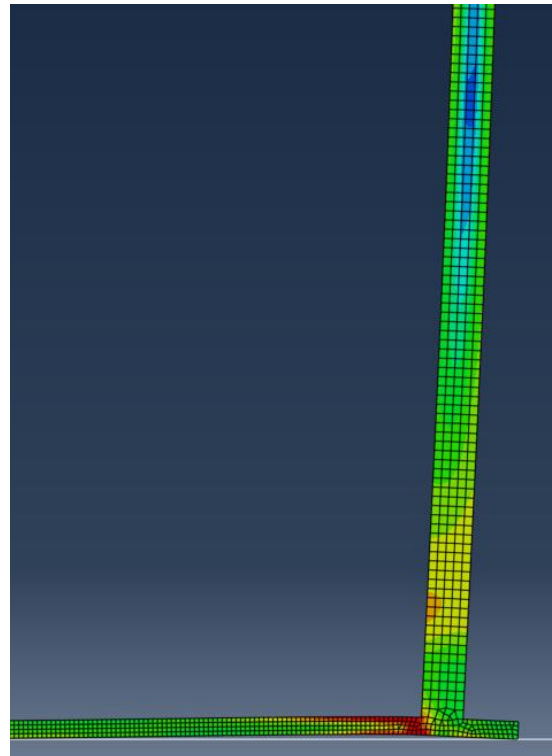
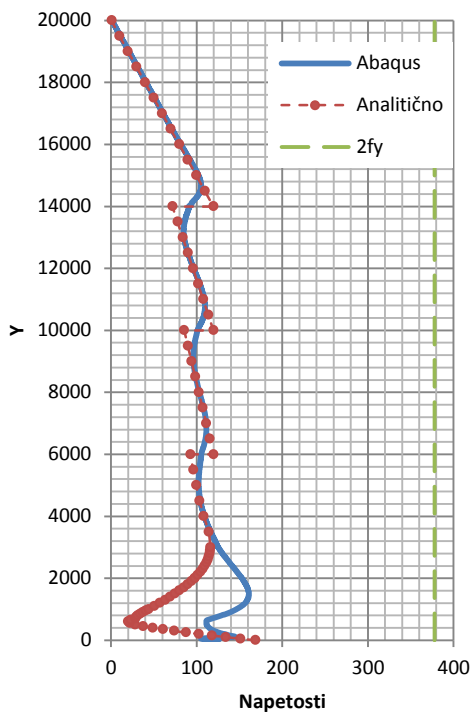
$$u = 0,03 \text{ mm}$$

Raztezek dna v primerjavi z računskim raztezkom plašča:

$$\frac{u}{R * \alpha_T * \Delta T} = /$$

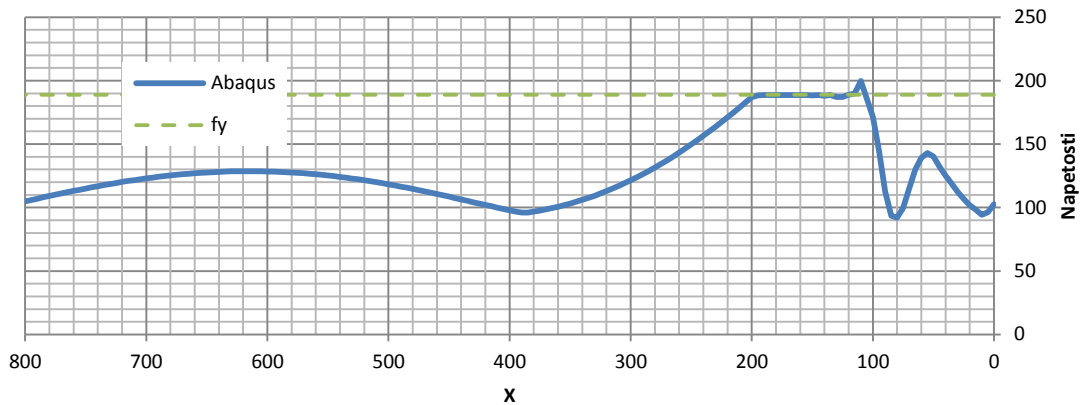
Kombinacija 3 (s temperaturo)

Graf 48: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 3



Slika 51: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 3

Graf 49: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 3



Računski raztezek plašča:

$$R * \alpha_T * \Delta T = 72,00 \text{ mm}$$

Pomik referenčne točke:

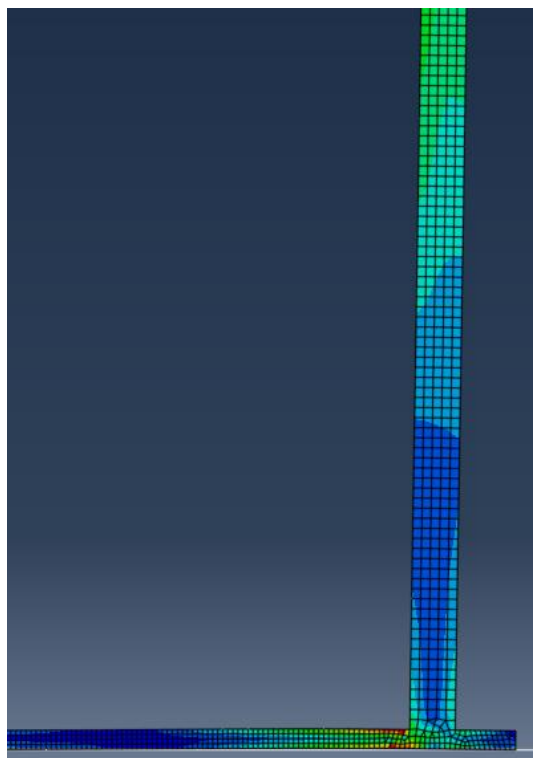
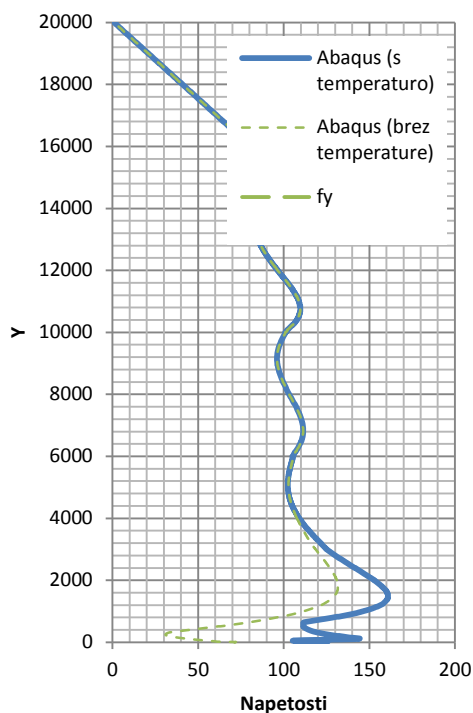
$$u = 40,37 \text{ mm}$$

Raztezek dna v primerjavi z računskim raztezkom plašča:

$$\frac{u}{R * \alpha_T * \Delta T} = 56 \%$$

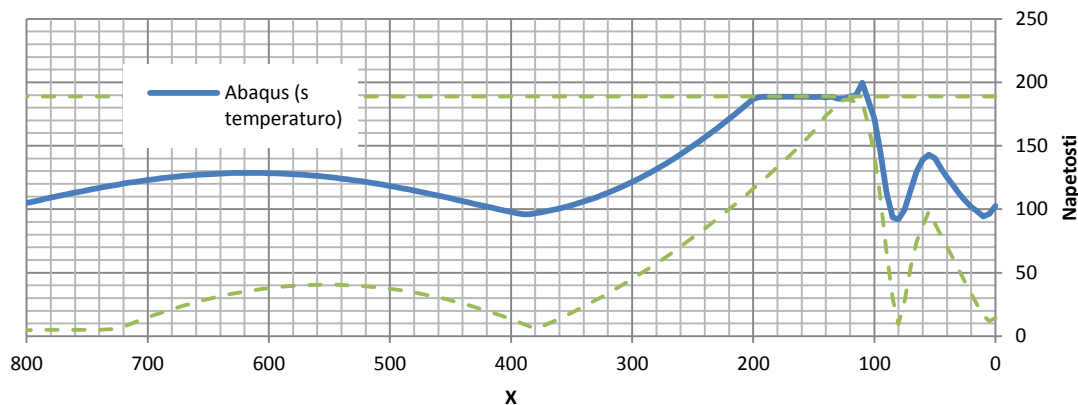
Kombinacija 3 (brez temperature)

Graf 50: Von Mises-ove napetosti v plašču za rezervoar 3



Slika 52: Prikaz von Mises-ovih napetosti za rezervoar 3

Graf 51: Von Mises-ove napetosti v dnu za rezervoar 3



Računski raztezek plašča:

$$R * \alpha_T * \Delta T = /$$

Pomik referenčne točke:

$$u = 0,02 \text{ mm}$$

Raztezek dna v primerjavi z računskim raztezkom plašča:

$$\frac{u}{R * \alpha_T * \Delta T} = /$$

10.4 Komentar

V tabeli bom na kratko povzel rezultate za vse tri rezervoarje pri obtežbi s temperaturo:

Tabela 13: Povzetek rezultatov v poglavju 10.0

| | Raztezek dna glede na plašč | Opis, kaj se dogaja z napetostmi |
|------------------------|--|---|
| Rezervoar 1 | 74 % | Nikjer v rezervoarju ni presežena meja proporcionalnosti. |
| Rezervoar 2 | 71 % | V plašču meja elastičnosti ni nikjer presežena. Dno se v bližini spoja plastificira. |
| Rezervoar 3 | 56 % | V plašču se napetosti povečajo in približajo meji elastičnosti. Dno se plastificira. |

Ob pregledu rezultatov lahko ugotovimo, da je predpostavka v poglavju 6.9 na strani 33 pravilna. V vseh treh rezervoarjih sem namreč upošteval enako veliko razliko v temperaturi dna in temperaturi plašča. Prav tako sem v vseh primerih ohranil enak koeficient trenja 0,5. Kljub temu pa je prišlo do različnih relativnih raztezkov, ki povzročajo napetosti v rezervoarju. V največjem rezervoarju pride do večjih relativnih razlik med raztezkom dna in plašča.

Torej trenje s podlago doda pomemben delež pri zaviranju raztezka samo pri velikih rezervoarjih, kar je bila ugotovitev že v poglavju 6.9.

Poleg tega lahko vidimo tudi povezavo med relativnim raztezkom dna glede na plašč in napetostmi v rezervoarju. Napetosti v plašču se zaradi temperature bistveno povečajo samo v rezervoarju 3. To je tam, kjer je raztezek dna za skoraj polovico manjši od raztezka plašča. Pri drugih dveh rezervoarjih, kjer je razlika manjša (približno 25 % manjši raztezek dna kot plašča), se napetosti povečajo minimalno. To potrjuje ugotovitve iz poglavja 5.3 na strani 26, da je kritična meja pri približno 50 % razlike v raztekih dna in plašča, kjer se vpliv na napetosti začne pomembno večati.

11.0 DODATNI OBTEŽNI PRIMERI V ABAQUSU

Do sedaj sem rezervoarje vedno obravnaval za situacijo, ko so polno napolnjeni z bitumnom. V življenjski dobi rezervoarja pa se pojavi več različnih obtežnih primerov, ki na rezervoar vplivajo na različne načine. Situacijo s polnim rezervoarjem sem uporabljal zato, ker sem predpostavil, da je najbolj kritična. Vseeno pa obstaja možnost, da se v določeni situaciji prav tako pojavijo zelo veliki vplivi, ki bi jim bilo treba nameniti pozornost. Zato bom program Abaqus uporabil še za simulacijo dodatnih obtežnih scenarijev, ki se v rezervoarju lahko pojavijo.

Obtežni scenariji:

- Scenarij 1
Rezervoar je poln in normalno obratuje. Ker v dnu ni izolacije, predpostavimo, da so tam temperature nekoliko nižje. Tak primer je obravnavan že v prejšnjem poglavju.
- Scenarij 2
Pri polnjenju rezervoarja so najprej zaliti samo grelci z bitumnom, ki ima nižjo temperaturo. Bitumen segrejejo na končno temperaturo, nato nadaljujejo s polnjenjem (režim polnjenja, opisan v poglavju 2.8.4). Rezervoar je napolnjen z bitumnom do višine 50 cm.
- Scenarij 3
Podobno kot v scenariju 2. Rezervoar je napolnjen z bitumnom do višine 20 cm.
- Scenarij 4
Rezervoar je napolnjen do polovice. Del pločevine, ki je v stiku z bitumnom, je segret na višjo temperaturo. Zanimajo nas napetosti v plašču na višini gladine bitumna.

Različne scenarije bom obravnaval na modelu rezervoarja 3 (R30-20).

11.1 Scenarij 1

Rezultati so navedeni v prejšnjem poglavju.

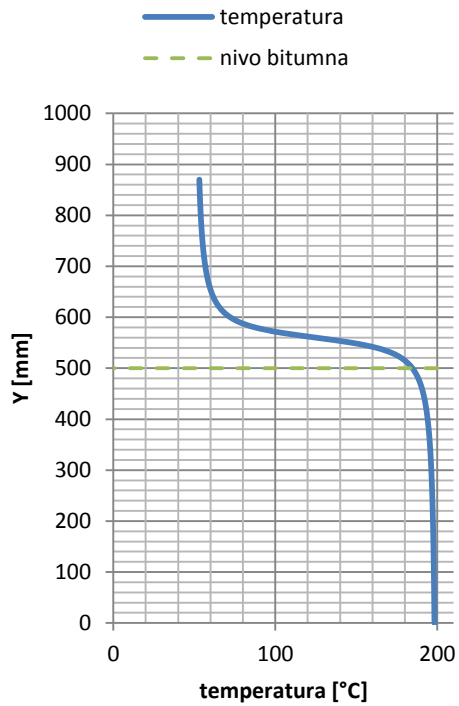
11.2 Scenarij 2

Obtežbi sta torej hidrostatski pritisk do 50 cm nad dnom rezervoarja in temperatura, ki se malo nad višino 50 cm postopno zniža na neko drugo vrednost. Na katero vrednost in na kateri oddaljenosti se temperatura spusti, je odprto vprašanje. V program sem vnesel enačbo, ki opisuje potek temperature, kot prikazuje Graf 52.

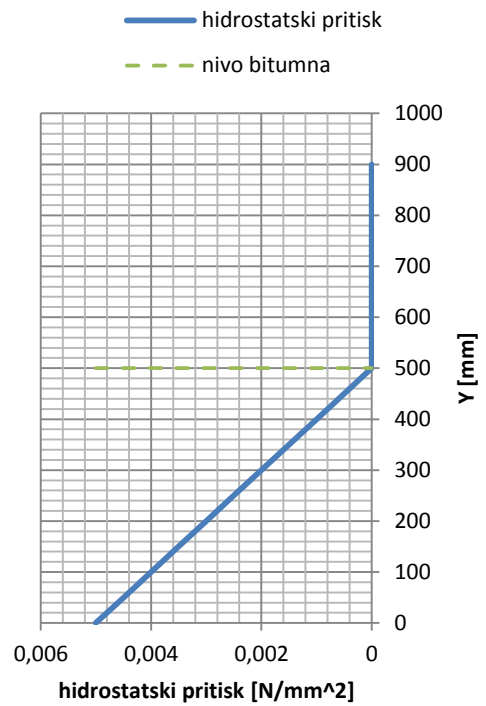
$$\text{Enačba za temperaturo:} \\ \frac{\arctan(y \cdot 0,05 - 28)}{\pi / 2} \cdot (-75) + 125$$

$$\text{Enačba za hidrostatski pritisk:} \\ \left(1 - \frac{y}{519}\right) * \frac{(y - 519) - |y - 519|}{2 * (y - 519)}$$

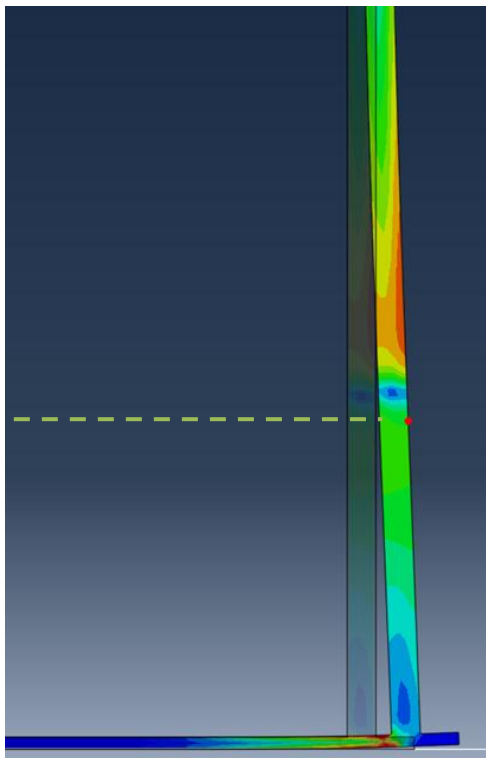
Graf 52: Potek temperature po višini rezervoarja za drugi scenarij



Graf 53: Hidrostatski pritisk na plašč rezervoarja za drugi scenarij

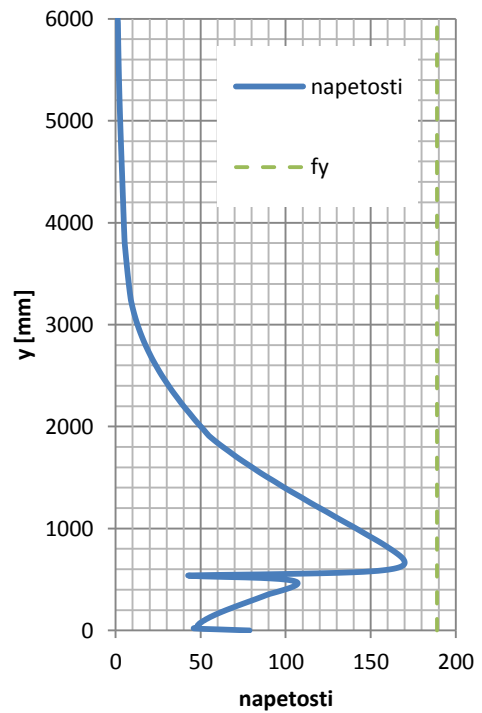


Rezultati za drugi scenarij:

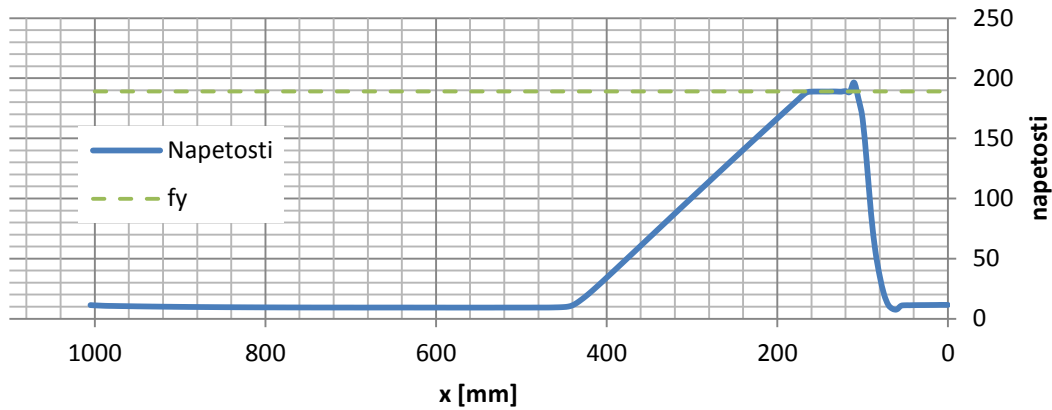


Slika 53: Prikaz von Mises-ovih napetosti za drugi scenarij

Graf 54: Von Mises-ove napetosti v plašču za drugi scenarij



Graf 55: Von Mises-ove napetosti v dnu za drugi scenarij



11.3 Scenarij 3

Obtežbi na rezervoar sta hidrostatski pritisk in temperaturna obtežba, ki sta v program vneseni s spodnjima enačbama. Obliko obtežb prikazujeta Graf 56 in Graf 57.

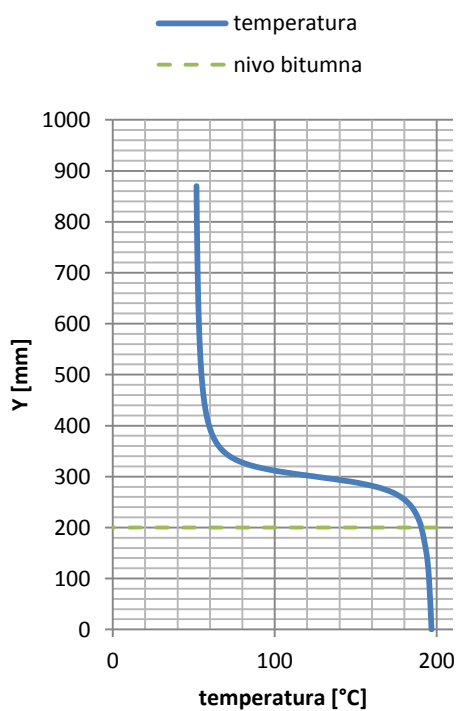
Enačba za temperaturo:

$$\frac{\arctan(y \cdot 0,05 - 15)}{\pi / 2} \cdot (-75) + 125$$

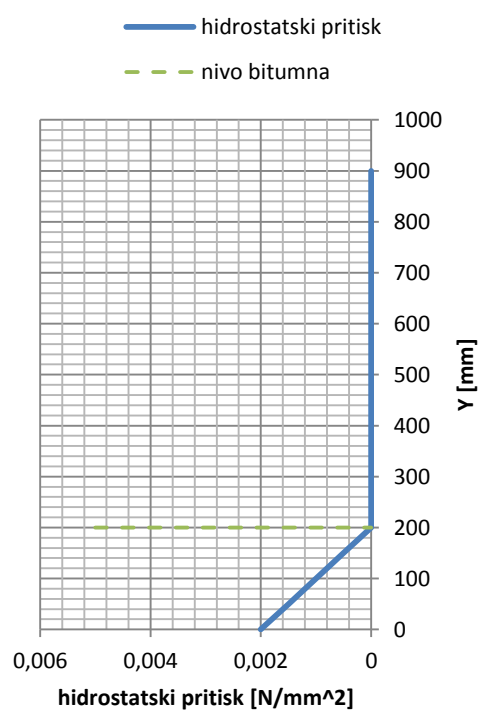
Enačba za hidrostatski pritisk:

$$\left(1 - \frac{y}{219}\right) * \frac{(y - 219) - |y - 219|}{2 * (y - 219)}$$

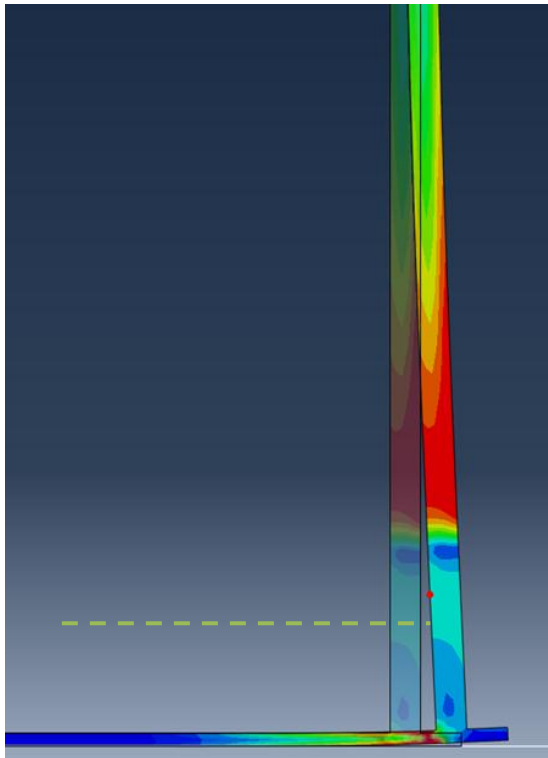
Graf 56: Potek temperature po višini rezervoarja za tretji scenarij



Graf 57: Hidrostatski pritisk na plašč rezervoarja za tretji scenarij

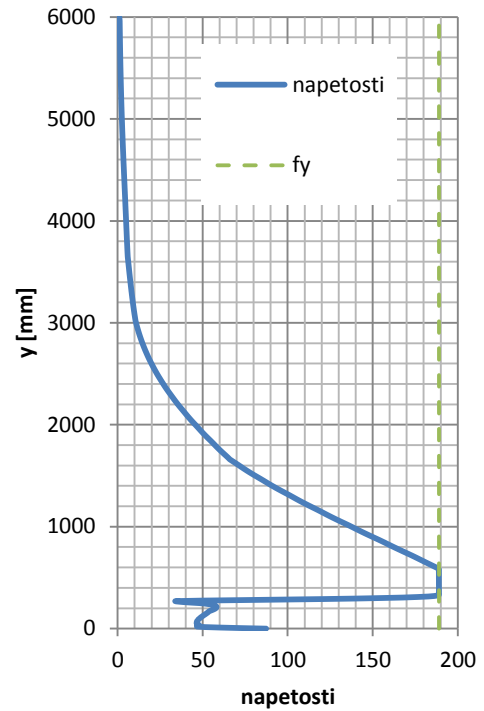


Rezultati za tretji scenarij:

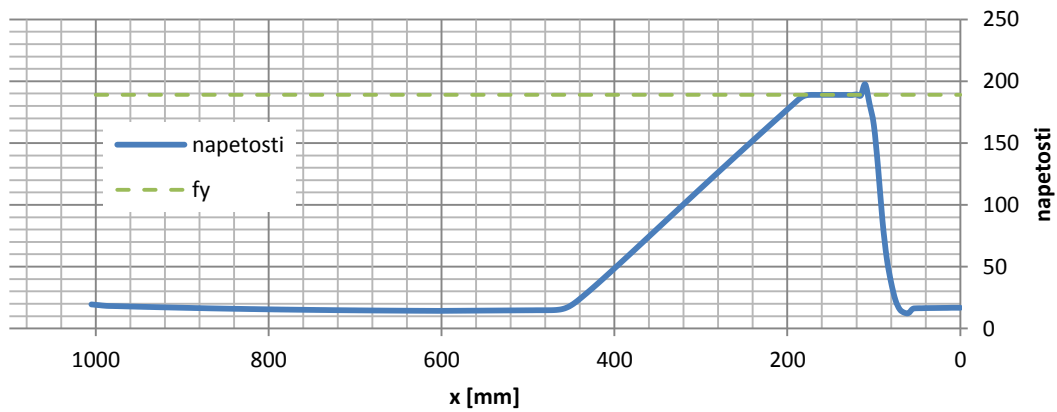


Slika 54: Prikaz von Mises-ovih napetosti za tretji scenarij

Graf 58: Von Mises-ove napetosti v plašču za tretji scenarij



Graf 59: Von Mises-ove napetosti v dnu za tretji scenarij



11.4 Scenarij 4

Obtežbi sta hidrostatski pritisk do polovice višine rezervoarja in temperaturna sprememba, ki se pojavi malo nad gladino bitumna. Potek prikazujeta Graf 60 in Graf 61.

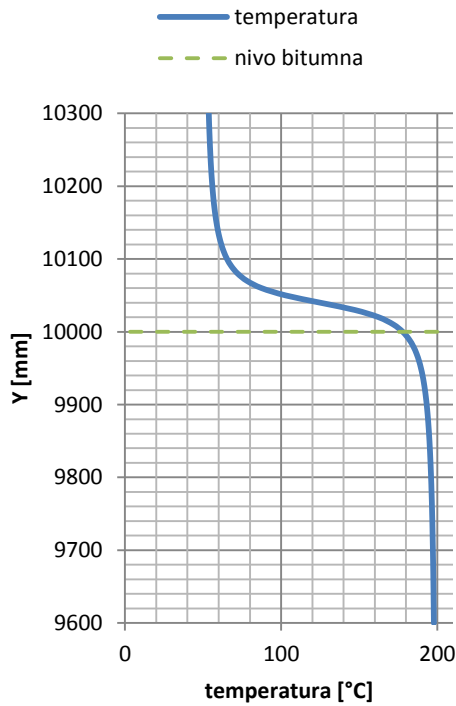
Enačba za temperaturo:

$$\frac{\arctan(y \cdot 0,05 - 502)}{\pi/2} \cdot (-75) + 125$$

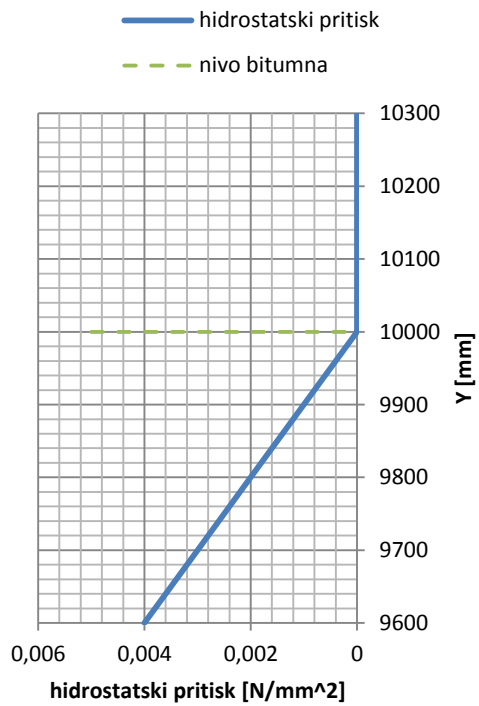
Enačba za hidrostatski pritisk:

$$\left(1 - \frac{y}{10019}\right) * \frac{(y - 10019) - |y - 10019|}{2 * (y - 10019)}$$

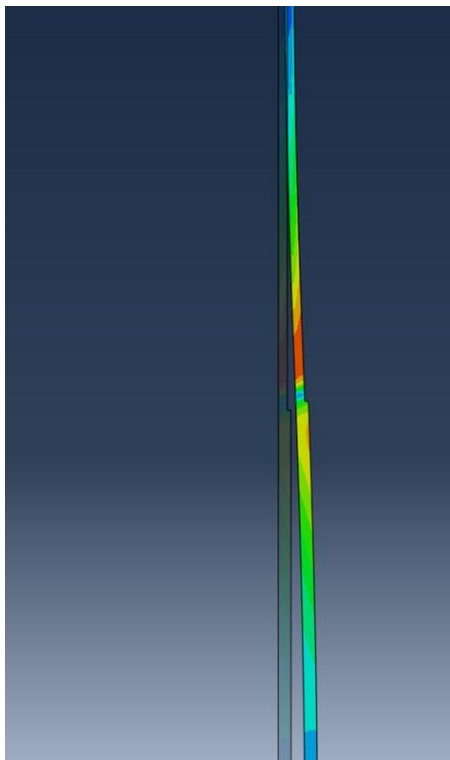
Graf 60: Potek temperature po višini rezervoarja za četrti scenarij



Graf 61: Hidrostatski pritisk na plašč rezervoarja za četrti scenarij

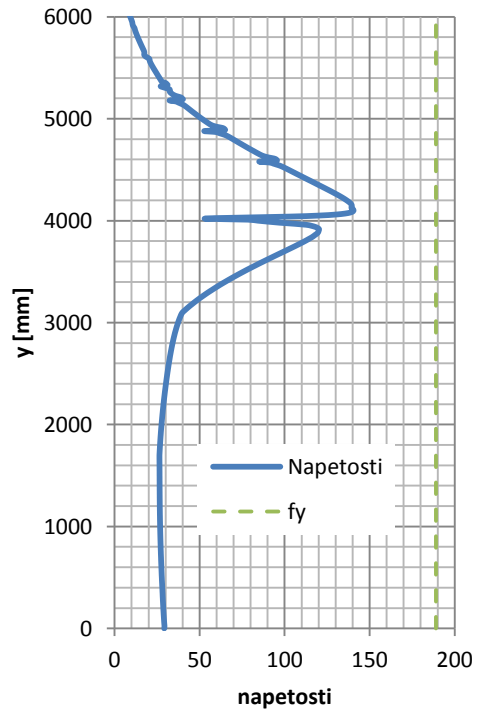


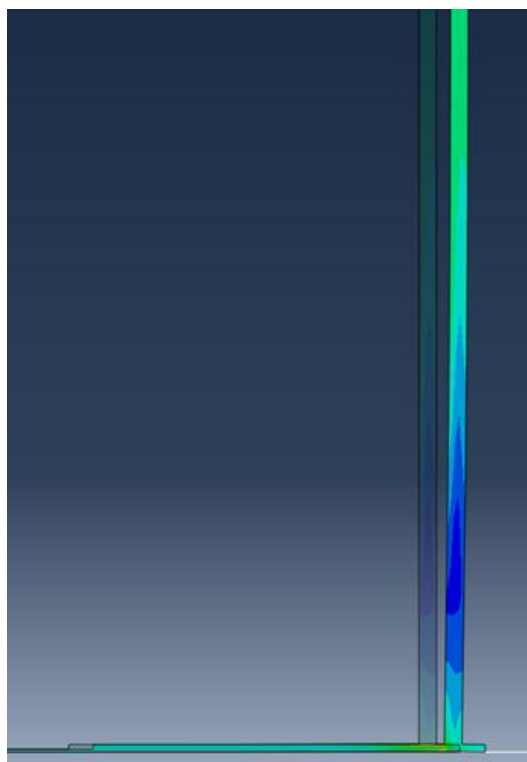
Rezultati za četrti scenarij:



Slika 55: Prikaz von Mises-ovih napetosti za četrti scenarij (v sredini)

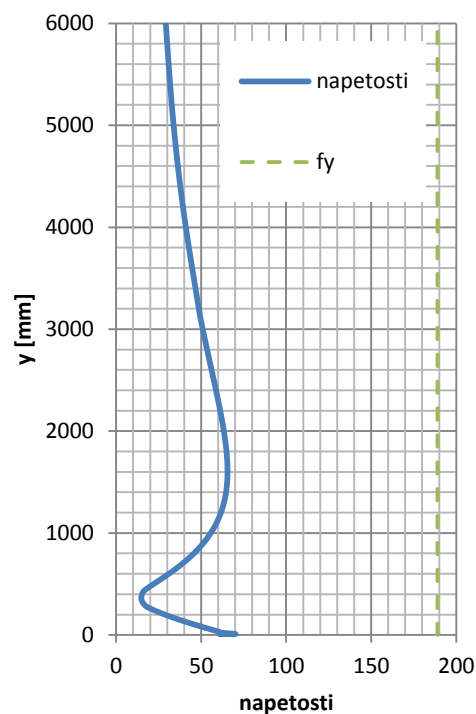
Graf 62: Von Mises-ove napetosti v plašču za četrti scenarij (v sredini)



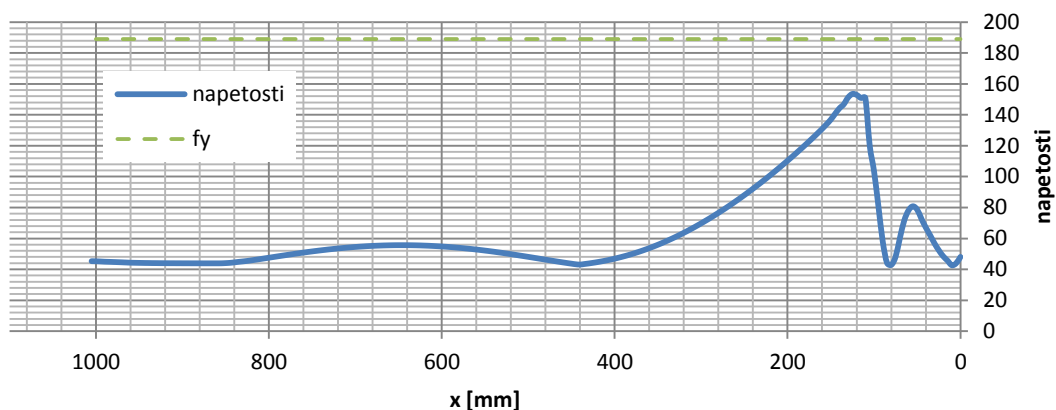


Slika 56: Prikaz von Mises-ovih napetosti za četrti scenarij (spodaj)

Graf 63: Von Mises-ove napetosti v plašču za četrti scenarij (spodaj)



Graf 64: Von Mises-ove napetosti v dnu za četrti scenarij



11.5 Komentar

V tabeli bom na kratko povzel rezultate scenarijev:

| | Temp. dna / temp. plašča | Vpliv temperature na napetosti v plašču | Vpliv temperature na napetosti v dnu |
|------------|--------------------------|---|--------------------------------------|
| Scenarij 1 | 150 °C / 200 °C | Povišane napetosti | Dosežena meja plastičnosti |
| Scenarij 2 | 200 °C / 50 °C | Napetosti blizu plastifikacije | Dosežena meja plastičnosti |
| Scenarij 3 | 200 °C / 50 °C | Dosežena meja plastičnosti | Dosežena meja plastičnosti |
| Scenarij 4 | 200 °C / 50 °C | V mejah elastičnosti | V mejah elastičnosti |

Rezultati kažejo, da je naloga dna, za katerega je predvideno, da se plastificira prvo in tako zmanjša napetosti v plašču, izpolnjena. Dno se res vedno plastificira prvo in v največji meri. Kljub temu pa se v plašču pojavi plastifikacija pri scenariju 3.

Situacija, kot je opisana v scenariju 3, se pojavi vedno ob polnjenju rezervoarja. Torej je plašč ob vsakem polnjenju obremenjen z velikimi napetostmi. Pri tem je smiselno omeniti, da v izračunu scenarijev nisem upošteval nobenih varnostnih faktorjev.

Z rezultati scenarija 4 se je pokazalo, da vpliv temperature više po plašču ni tako velik in tam ni težav. Torej sem se v nalogi osredotočil na pravi detajl v rezervoarju, saj je ravno okolica spoja plašč-dno najbolj kritično mesto.

12.0 ZAKLJUČEK

Pri starih rezervoarjih, ki jih želimo rekonstruirati za skladiščenje bitumna, sta izolacija dna in zmanjšanje trenja s podlago težko izvedljiva. Verjetno je, da ukrep, kot je naknadna izolacija dna, sploh ne bi bil finančno upravičen in ga na rezervoarju ne bi nihče izvajal. To bi pomenilo nevarnost, da se v rezervoarju zaradi temperature pojavi povečanje napetosti.

V nalogi sem ugotovil, da vpliv temperature ni pomemben pri manjših rezervoarjih. Z večanjem polmera rezervoarja pa vpliv postane pomemben in ga moramo upoštevati. Izkaže se, da se ob polnjenju velikega rezervoarja tako dno kot tudi plašč na kritičnih mestih plastificira. To pokaže izračun, ki upošteva nefaktorirano obtežbo, torej gre za povsem vsakdanjo obtežbo, ki se pogosto pojavlja.

Kaj pogosta plastifikacija pomeni za ohranitev rezervoarja, je težko predvideti. Lahko bi se pojavil problem nizkociklične plastičnosti, vendar pa bi to lahko raziskali šele s preizkusi v laboratoriju in nadaljnjo študijo problema.

Če projektiramo v skladu s standardi, moramo biti najprej zmožni oceniti velikost obtežbe, nato pa iz ocenjene obtežbe izračunati obremenitve materiala in seveda na koncu dimenzionirati konstrukcijo. Problem temperaturne obtežbe na rezervoarju se pojavi že v prvem koraku projektiranja. Razporeditev temperature po rezervoarju ni vključena v nobenem standardu, tako kot je to narejeno za obtežbo vetra ali snega. Poleg tega nisem uspel najti nobene raziskave, ki bi ponujala podatke o temperaturah po rezervoarju. Torej je projektant prisiljen, da privzame zelo konzervativne vrednosti. Podobno je s koeficientom trenja, ki postane pomemben, kot sem ugotovil z analizo v diplomski nalogi, ravno pri večjih rezervoarjih.

Ameriški standard API 650 sicer ponuja enačbo, ki opisuje problem rezervoarjev pri povišanih temperaturah. Vendar ravno v koeficientu, ki predstavlja obnašanje dna (posredno gre za razporeditev temperature in koeficienta trenja), priporoča zelo konzervativne vrednosti. Tudi avtor članka Karcher, ki stoji za enačbo v ameriškem standardu, opozarja, da bi bile potrebne dodatne analize.

Ker evropski standard rezervoarjev z vročo vsebino ne obravnava in ne ponuja dodatnih navodil za projektiranje, je nujno, da v primeru projektiranja takega rezervoarja vzporedno upoštevamo tudi ameriški standard.

Z ozirom na to, da je v Evropi precej manj tovrstnih rezervoarjev kot v Ameriki, dobimo odgovor, zakaj evropski standard tega problema ne obravnava. Poleg tega pa očitno pri tovrstnih obstoječih rezervoarjih ne prihaja do okvar, ki bi spodbudile večje raziskave o vplivu temperature. Tudi upoštevanje konzervativnih predpostavk in koeficientov očitno ne podraži rezervoarja do te mere, da bi se pokazalo zanimanje za optimalnejše projektiranje.

VIRI

Abaqus 6.10 Online Documentation. 2010. Dassault Systemes.

<https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus610/Documentation/docs/v6.10/books/usi/graphics/usv-sweepmodel.png> (Pridobljeno 9. 1. 2012.)

Bletzinger, K. 2000. Theory of Plates. München, Technische Universität München: 47 str.

<http://fte.edu.iq/efrathya/42.pdf> (Pridobljeno 26. 10. 2011.)

ESDEP (European Structural Design Education Package). Lecture 15C.1: Design of Tanks for the Storage of Oil and Water.

http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/ESDEP/master/wg15c/10100.htm#SEC_1 (Pridobljeno 30. 11. 2011.)

Hetenyi, M. 1979. Beams on Elastic Foundation. Theory with Applications in the Fields of Civil and Mechanical Engineering. The University of Michigan: 255 str.

<http://www.scribd.com/doc/19988915/Beams-on-Elastic-Foundation-by-Hetenyi> (Pridobljeno 30. 3. 2011.)

Karcher, G. G. 1978. Thermal stresses in tanks operating at elevated temperatures. V: Proceedings: Refining Department, Vol. 57: 515–521.

Karcher, G. G. 1981. Stresses at the Shell-to-Bottom Junction of Elevated Temperature Tanks. V: Proceedings: Refining Department, Vol. 60: 154–159.

May, J., Wilkey, T., Swanson, M. idr. 1999. Heating and Storing Asphalt at HMA Plants.

Chattanooga, Heatec: 48 str.

<http://www.heatec.com/literature/images/T-140.pdf> (Pridobljeno 30. 11. 2011.)

Reflak, J. 1999. Ploskovne konstrukcije II – Osnove lupin. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 84 str.

TOP-Projekt. 2008. Tehnički dio. Broj projekta: 1330-F-C01. Projektna dokumentacija. Zagreb.

Jugopetrol AD Kotor: 55 f.

Zdravkov, L. A. 2012. Aboveground steel tanks.

http://www.astanks.com/EN/Foundation_EN.html (Pridobljeno 20. 12. 2011.)

Smernice in standardi:

API Recommended Practice 2023, Third Edition:2001. Guide for Safe Storage and Handling of Heated Petroleum-Derived Asphalt Products and Crude-Oil Residua.

<http://documents.api.org/rrserver/browser?title=/2023> (Pridobljeno 8. 3. 2011.)

API 650:2007. Welded Steel Tanks for Oil Storage. Eleventh Edition.

PIP STE03020:2005. Guidelines for Tank Foundation Designs.

<http://www.scribd.com/doc/39346547/Tank-Foundations> (Pridobljeno 20. 12. 2011.)

SIST EN 1990. Evrokod 0: Osnove projektiranja konstrukcij.

SIST EN 1993-1-2:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-2.del: Splošna pravila – Požarnoodporno projektiranje.

SIST EN 1993-1-6:2007. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-6.del: Trdnost in stabilnost lupinastih konstrukcij.

SIST EN 1993-4-2:2007. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 4-2.del: Rezervoarji.