

Koncipiranje prikolice za prijevoz spremnika iskorištenog nuklearnog goriva

Vlašić, Karla

Master's thesis / Diplomski rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:999071>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karla Vlašić

Zagreb, 2025.godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

*Koncipiranje prikolice za prijevoz
spremnika iskorištenog nuklearnog goriva*

Mentori:

Dr. sc. Goran Šagi, dipl. ing.

Student:

Karla Vlašić

Zagreb, 2025. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, doc. dr. sc. Goranu Šagiju, na stručnoj pomoći, uloženom vremenu i velikoj potpori tijekom izrade rada. Također se zahvaljujem prijateljima i kolegama koji su mi uljepšali i olakšali dane studiranja. Najviše se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom cijelog studija.

Karla Vlašić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 25 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Karla Vlašić** JMBAG: 0035219558

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Koncipiranje prikolice za prijevoz spremnika iskorištenog nuklearnog goriva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Designing trailer for transport cask with nuclear spent fuel**

Opis zadatka:

Uobičajeni način intermodalnog transporta (cestovni, željeznički i prijevoz plovitim putevima) te skladištenja iskorištenog nuklearnog goriva je pomoću spremnika CASTOR® (engl. *cask for storage and transport of radioactive material*). Uzimajući u obzir mase i dimenzije spremnika i vrstu tereta koji se prevozi u spremnicima, cestovna prikolica za tu namjenu spada pod izvanredni prijevoz i prijevoz opasnih tvari te uključuje različite sigurnosne izazove prijevoza javnim prometnicama. Cilj ovog rada je koncipirati i konstrukcijski razraditi cestovnu prikolicu za prijevoz spremnika CASTOR® tip V/19 i V/52.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- napraviti pregled tipova spremnika za prijevoz i skladištenje iskorištenog nuklearnog goriva (masa, dimenzija i načina pričvršćenja spremnika),
- napraviti pregled postojećih prikolica za prijevoz specijalnog tereta (tehničkih karakteristika i rješenja, funkcija koje nude) u segmentu prikolica za izvanredni prijevoz,
- na temelju karakteristika dostupnih prikolica i karakteristika spremnika iskorištenog nuklearnog goriva definirati osnovne dimenzije prikolice i nadogradnje, izvedbu šasije prikolice, potrebni broj osovine, rješenje ovjesa, izvedbu spojnice za povezivanje, nosivost prikolice i sl.
- predložiti moguća konceptijska rješenja pojedinih elemenata prikolice i nadogradnje za prihvata spremnika iskorištenog nuklearnog goriva,
- konstrukcijski razraditi odabrano rješenje prikolice i nadogradnje,
- koncipiranje i konstrukcijsku razradu detaljno obrazložiti, popratiti skicama, proračunima i odgovarajućim analizama,
- izraditi sklopne i potrebne radioničke crteže.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studeni 2024.

Datum predaje rada:

30. siječnja 2025.

Predviđeni datumi obrane:

6., 7. i 10. veljače 2025.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Goran Šagi

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	IV
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE.....	VIII
POPIS OZNAKA.....	IX
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY.....	XII
1. UVOD.....	1
1.1. Nuklearno gorivo.....	2
1.2. Problem nuklearnog goriva.....	3
2. SPREMNICI ISKORIŠTENOG NUKLEARNOG GORIVA.....	6
2.1. CASTOR (<i>Cask for Storage and Transport of Radioactive Material</i>).....	7
2.1.1. Dimenzije CASTOR spremnika.....	7
2.1.1.1. CASTOR V/19.....	7
2.1.1.2. CASTOR V/52.....	9
2.2. CONSTOR (<i>Concrete Storage Cask</i>).....	10
2.3. Ispitivanja CASTOR spremnika.....	10
2.4. Prijevoz spremnika.....	11
2.4.1. Transport cestom.....	12
2.4.2. Transport željeznicom.....	13
2.4.3. Transport brodom.....	13
3. PREGLED PRIKOLICA I PLATFORMI.....	15
3.1. NOOTEBOOM.....	15
3.1.1. EURO-PX low loader.....	15
3.1.2. MANOOVR Multi-PL semi lowloader.....	15
3.1.3. Teletrailer.....	16
3.2. FAYMONVILLE.....	17
3.2.1. VarioMAX Plus.....	17
3.2.2. ModulMAX.....	18
3.3. GOLDHOFER.....	19
3.3.1. THP/SL modeli.....	19
3.3.2. ADDrive i PST modeli.....	20
3.4. SCHEUERLE.....	21
3.4.1. EuroCompact do 128 t.....	21
3.4.2. Modularni modeli.....	22
3.4.3. SPMT modeli.....	22
3.5. WAGENBORG.....	23
3.5.1. Modularne prikolice.....	23
4. KONCIPIRANJE PRIKOLICE.....	25

4.1.	Polu niska prikolica	25
4.2.	Niskopodna prikolica	25
4.3.	Teleskopska prikolica	26
4.4.	Modularna prikolica.....	26
4.5.	Prednosti i nedostaci koncepata prikolice	27
5.	KONCIPIRANJE NADOGRAĐNJE	28
5.1.	Nadogradnja nepromjenjivih dimenzija	28
5.2.	Nadogradnja promjenjive duljine – varijacija 1	28
5.3.	Nadogradnja promjenjive duljine – varijacija 2	29
5.4.	Nadogradnja promjenjive duljine – varijacija 3	30
5.5.	Prednosti i nedostaci koncepata nadogradnji	30
6.	KONSTRUKCIJSKA RAZRADA	31
6.1.	Šasija	31
6.1.1.	Uzdužni nosač šasije	32
6.1.2.	Poprečni nosači šasije	32
6.1.3.	Podna ploča šasije	33
6.1.4.	Prednje/stražnje ploče i bočne ploče	34
6.1.5.	Ušice za povezivanje modula	35
6.1.6.	Nosači za hidrauličke cilindre za zakret kotača.....	36
6.2.	Sklop kotača	36
6.2.1.	Povezivanje sklopa i šasije modula.....	37
6.2.2.	Spoj hidrauličkog cilindra i šasije.....	39
6.2.3.	Spoj hidrauličkog cilindra i sklopa kotača	40
6.3.	Modul prikolice	40
6.3.1.	Spoj dva modula svornjakom	41
6.3.2.	Spoj dva modula vijcima.....	42
6.3.3.	Sklop 2 modula	43
6.4.	Nadogradnja	43
6.4.1.	Podkonstrukcija nadogradnje	44
6.4.2.	Ploča stupa nadogradnje.....	46
6.4.3.	Stup nadogradnje	46
6.4.4.	Nosač nadogradnje.....	47
6.4.5.	Poklopac nadogradnje	48
6.4.6.	Spoj stupa nadogradnje i podkonstrukcije.....	49
6.4.7.	Spoj stupa nadogradnje i nosača.....	49
6.4.8.	Vijčani spoj nadogradnje i šasije	50
6.4.9.	Elementi za kruto pričvršćenje nadogradnje i šasije.....	50
6.5.	Sklop s vučnim svornjakom	51
6.5.1.	Vučni svornjak 90 (3.5“).....	53
6.5.2.	Spoj sklopa s vučnim svornjakom i modula.....	53
6.5.3.	Prikolica.....	54
7.	OSTALE KOMPONENTE	57
7.1.	Hidraulički ovjes.....	57
7.2.	Zračni sustav kočenja.....	57
7.3.	Svjetlosna oprema.....	57
7.3.1.	Bočna rasvjeta.....	58
7.3.2.	Stražnja rasvjeta.....	58

7.4. Oznake izvanrednog prijevoza	60
7.5. Oznake po ADR-u	61
7.6. Zaštitna ograda	63
8. FUNKCIONALNOST PRIKOLICE	65
8.1. Zakret kotača	65
8.2. Podizanje/spuštanje modula	66
8.3. Podizanje/spuštanje sklopa s vučnim svornjakom.....	68
9. PRORAČUNI	70
9.1. Analitički proračun poprečnog presjeka uzdužnog nosača šasije	70
9.2. Kontrolna MKE analiza modula.....	74
9.3. Analitički proračun stupa nadogradnje na izvijanje	77
9.4. Kontrolna MKE analiza stupa nadogradnje i nosača.....	80
9.5. Proračun vijaka na odrez.....	82
9.5.1. Dosjedni vijak M24 – spoj nosač/stup	82
9.5.2. Vijak M36 – spoj stup/podkonstrukcija	83
9.5.3. Vijak M30 – spoj nadogradnja i šasija.....	83
9.5.4. Proračun zavara – stup nadogradnje i ploča stupa.....	84
10. ZAKLJUČAK.....	86
LITERATURA.....	87
PRILOZI	90

POPIS SLIKA

Slika 1.	Lančana reakcija nuklearne fisije [1]	1
Slika 2.	Kvadratni sklop gorivnih šipki nuklearnog goriva [2]	2
Slika 3.	Cilindrični sklop gorivnih šipki nuklearnog goriva [3].....	2
Slika 4.	Heksagonski sklop gorivnih šipki nuklearnog goriva [4].....	3
Slika 5.	Bazen za skladištenje iskorištenog nuklearnog otpada [5].....	3
Slika 6.	Presjek privremenog skladišta [6]	4
Slika 7.	Prikaz ideje Onkalo projekta [7]	5
Slika 8.	GNS mbH [8].....	6
Slika 9.	Spremnici za suho skladištenje od različitih proizvođača [9].....	6
Slika 10.	GNS CASTOR V/19 spremnik [10].....	7
Slika 11.	Spremnik CASTOR V/19 sa dimenzijama [12].....	8
Slika 12.	GNS CASTOR V/52 spremnik [13].....	9
Slika 13.	Detalj prihvata spremnika [14]	9
Slika 14.	GNS CONSTOR spremnik [15]	10
Slika 15.	Test pada sa 1 m [16]	11
Slika 16.	Postavljanje spremnika na prikolicu [17]	12
Slika 17.	Cestovni prijevoz spremnika [18]	13
Slika 18.	Željeznički prijevoz spremnika [1]	13
Slika 19.	Brodski prijevoz spremnika [20].....	14
Slika 20.	Nooteboom EURO-PX [21].....	15
Slika 21.	Nooteboom MANOOVR Multi-PL [22]	16
Slika 22.	Konfiguracije Multi-PL sa Multidolly [22]	16
Slika 23.	Nooteboom Teletrailer [23]	17
Slika 24.	Konfiguracije Teletrailer-a [23].....	17
Slika 25.	Konfiguracije VarioMAX Plus [24].....	18
Slika 26.	Faymonville VarioMAX Plus [24].....	18
Slika 27.	Faymonville ModulMAX [25].....	19
Slika 28.	Konfiguracije ModulMAX [25].....	19
Slika 29.	Goldhofer THP/SL moduli [26].....	20
Slika 30.	Tehničke specifikacije THP/SL, THP/SL-S i THP/SL-L [26]	20
Slika 31.	Goldhofer ADDrive i PST/SL moduli [27]	21
Slika 32.	Tehničke specifikacije ADDrive i PST/SL [27]	21
Slika 33.	Scheuerle EuroCompact modeli do 128 t [28].....	22
Slika 34.	Scheuerle InterCombi i K25 moduli [29]	22
Slika 35.	Scheuerle SPMT [30]	22
Slika 36.	Tehničke specifikacije SPMT modula [30]	23
Slika 37.	Wagenborg SPMT [31]	23
Slika 38.	Mase WAGENBORG modula [32].....	24
Slika 39.	Koncept polu niske prikolice	25
Slika 40.	Koncept niskopodne prikolice	25
Slika 41.	Koncept teleskopske prikolice	26
Slika 42.	Koncept modularne prikolice.....	26
Slika 43.	Koncept nadogradnje nepromjenjivih dimenzija	28
Slika 44.	Koncept nadogradnje promjenjive duljine – varijacija 1.....	29

Slika 45.	Koncept nadogradnje promjenjive duljine – varijacija 2.....	29
Slika 46.	Koncept nadogradnje promjenjive duljine – varijacija 3.....	30
Slika 47.	Šasija modula.....	31
Slika 48.	Uzdužni nosač šasije	32
Slika 49.	Poprečni nosač šasije.....	33
Slika 50.	Podna ploča šasije	34
Slika 51.	Prednja/stražnja ploča šasije	34
Slika 52.	Bočna ploča šasije	35
Slika 53.	Ušica za povezivanje modula.....	36
Slika 54.	Nosač hidrauličkog cilindra za zakret kotača	36
Slika 55.	Sklop kotača 245/70/R17.5 izveden prema [34].....	37
Slika 56.	Okretni prsten JOST KDL900-1 – postavljanje prstena [35].....	38
Slika 57.	Okretni prsten JOST KDL900-1	38
Slika 58.	Spoj okretni prsten - šasija.....	39
Slika 59.	Spoj okretni prsten – sklop kotača	39
Slika 60.	Spoj hidrauličkog cilindra sa šasijom.....	39
Slika 61.	Spoj hidrauličkog cilindra sa sklopom kotača	40
Slika 62.	Modul prikolice.....	41
Slika 63.	Spoj modula sa svornjakom.....	41
Slika 64.	Presjek spoja modula sa svornjakom.....	42
Slika 65.	Spoj dva modula sa vijkom – gornji tlocrt	42
Slika 66.	Spoj dva modula sa vijkom.....	43
Slika 67.	Sklop 2 modula	43
Slika 68.	Nadogradnja.....	44
Slika 69.	Nadogradnja sa spremnikom CASTOR V/19.....	44
Slika 70.	Podkonstrukcija nadogradnje.....	45
Slika 71.	Čahurica sa navojem u podkonstrukciji	45
Slika 72.	Čahurica s navojem	46
Slika 73.	Ploča stupa nadogradnje	46
Slika 74.	Stup nadogradnje – prikaz unutarnjih i vanjskih rebara.....	47
Slika 75.	Nosač nadogradnje	47
Slika 76.	Prikaz izbočenja za pozicioniranje.....	48
Slika 77.	Poklopac nosača nadogradnje	48
Slika 78.	Spoj stupa nadogradnje i podkonstrukcije.....	49
Slika 79.	Spoj poklopca nosača, nosača i stupa nadogradnje.....	49
Slika 80.	Vijčani spoj nadogradnje i šasije	50
Slika 81.	Element za kruto pričvršćenje nadogradnje i šasije	51
Slika 82.	Vijčani spoj elementa za kruto pričvršćenje na šasiji	51
Slika 83.	Sklop s vučnim svornjakom.....	52
Slika 84.	Hidraulički cilindri sklopa s vučnim svornjakom	52
Slika 85.	Vučni svornjak 90 (3.5“) [35].....	53
Slika 86.	Upute za ugradnju vučnog svornjaka [37].....	53
Slika 87.	Vijčani spoj sklopa s vučnim svornjakom i modula	54
Slika 88.	Sklop modularne prikolice s nadogradnjom	54
Slika 89.	Sklop prikolice sa spremnikom CASTOR V/19.....	55
Slika 90.	Scania R730 8x4 s prikolicom	55
Slika 91.	Prikolica sa samohodnim modulom	56
Slika 92.	Povezivanje samohodnog modula s prikolicom	56
Slika 93.	Bočni katadiopteri [39].....	58

Slika 94.	Bočna pozicijska svjetla [39]	58
Slika 95.	Bočna pozicijska svjetla HELLA proizvođača [40].....	58
Slika 96.	Stražnja pozicijska svjetla [39]	59
Slika 97.	Stražnji katadiopteri [39]	59
Slika 98.	COLUNA stražnje kombinacijsko svjetlo proizvođača HELLA [40]	59
Slika 99.	Svjetlo za osvijetljavanje registarske pločice HELLA proizvođača [40].....	60
Slika 100.	Natpis IZVANREDNI PRIJEVOZ [41]	60
Slika 101.	Crveno bijele reflektirajuće pločice [41]	61
Slika 102.	Oznaka duljine [41]	61
Slika 103.	Pločica opasnosti [42].....	62
Slika 104.	Listice opasnosti klase 7 [43].....	62
Slika 105.	Označavanje prikolice	63
Slika 106.	Zaštitna ograda.....	64
Slika 107.	Tegljač s prikolicom s potrebnim oznakama i zaštitnom ogradom.....	64
Slika 108.	Zakret osovinu modula u zavoju	65
Slika 109.	Zakret svih osovinu modula za 45° u istu stranu	66
Slika 110.	Zakret osovinu modula – postepeno povećavanje.....	66
Slika 111.	Podizanje/spuštanje modula.....	67
Slika 112.	Podizanje/spuštanje modula pri prelasku preko prepreke	67
Slika 113.	Podizanje/spuštanje modula pri različitoj visini lijevo-desno	68
Slika 114.	Podizanje/spuštanje modula pri uzdužnom nagibu	68
Slika 115.	Podizanje/spuštanje sklopa s vučnim svornjakom	69
Slika 116.	Opterećenje prikolice	70
Slika 117.	Prikaz opterećenja vertikalnih sila po duljini prikolice.....	71
Slika 118.	Prikaz momenata po duljini prikolice	72
Slika 119.	Moment tromosti poprečnog presjeka uzdužnog nosača šasije	73
Slika 120.	Vrijednosti momenata savijanja grede [46].....	74
Slika 121.	Opterećenje šasije modula	75
Slika 122.	Raspodjela naprezanja šasije modula prema von Mises-u	75
Slika 123.	Raspodjela deformacija na šasiji modula	76
Slika 124.	Naprezanje na rubu utora.....	76
Slika 125.	Maksimalno naprezanje u šasiji modula.....	77
Slika 126.	Model izvijanja štapa [47]	77
Slika 127.	Presjek stupa za računanje površine i aksijalnog momenta tromosti	79
Slika 128.	Raspodjela naprezanja stupa nadogradnje prema von Mises-u	80
Slika 129.	Raspodjela deformacija stupa nadogradnje	81
Slika 130.	Maksimalno naprezanje u stupu nadogradnje.....	81
Slika 131.	Maksimalna deformacija u stupu nadogradnje	82

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dimenzije spremnika CASTOR V/19 [11].....	8
Tablica 2. Dimenzije spremnika CASTOR V/52 [14].....	9
Tablica 3. Prikaz pretpostavljenih i stvarnih masa za proračun poprečnog presjeka uzdužnog nosača šasije.....	70
Tablica 4. Prikaz pretpostavljenih i stvarnih vrijednosti maksimalnog momenta i minimalnog momenta tromosti.....	73

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

KV-2025-00-000	Prikolica za prijevoz spremnika iskorištenog nuklearnog goriva
KV-2025-00-001	Modul prikolice
KV-2025-00-002	Nadogradnja
KV-2025-01-001	Šasija
KV-2025-01-002	Stup nadogradnje
KV-2025-01-003	Podna ploča šasije
KV-2025-01-004	Nosač nadogradnje

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	m/s^2	akceleracija/deakceleracija
A	mm^2	površina poprečnog presjeka
A_v	mm^2	površina poprečnog presjeka vijka
a_z	mm	širina zavara
b	mm	duljina stupa
c	mm	širina stupa
F_{dop}	N	dopuštena sila
F_k	N	kritična sila, dolazi do pojave izvijanja
$F_{koč}$	N	sila kočenja
F_v	N	vertikalna sila
g	m/s^2	gravitacijska akceleracija
G	N	težina spremnika i nadogradnje
$G_{1/4}$ spremnika	N	četvrtina težine spremnika
h	mm	visina poprečnog presjeka
i_{min}	-	polumjer tromosti
I_{min}	mm^4	najmanji aksijalni moment tromosti presjeka
I_y	mm^4	moment tromosti poprečnog presjeka
I_{ymin}	mm^4	minimalni moment tromosti
l	mm	udaljenost između oslonca A i oslonca B
l_D	mm	udaljenost između oslonca A i desne točke tereta
l_L	mm	udaljenost između oslonca A i lijeve točke tereta
l_o	mm	slobodna duljina izvijanja
l_s	mm	visina stupa
M_A	N	moment oko oslonca A
M_{max}	N	maksimalan moment savijanja
$m_{spremnika}$	kg	masa spremnika
m_{stup} i nosač	kg	masa stupa i nosača
$m_{1/4}$ spremnika	kg	četvrtina mase spremnika
n	-	potreban broj vijaka
r	mm	krak djelovanja sile kočenja
Re	N/mm^2	granica razvlačenja
S	-	faktor sigurnosti
Q_A	N	sila u osloncu A

Q_B	N	sila u osloncu B
W	mm^3	moment otpora
λ	-	vitkost
σ_{dop}	N/mm^2	dopušteno naprezanje
σ_{ekv}	N/mm^2	ekvivalentno naprezanje
σ_t	N/mm^2	tlačno naprezanje
τ_{dop}	N/mm^2	dopušteno posmično naprezanje
τ_f	N/mm^2	tangencijalno savojno naprezanje
τ_s	N/mm^2	tangencijalno smično naprezanje
τ_{uk}	N/mm^2	tangencijalno ukupno naprezanje

SAŽETAK

Nuklearna energija je energija koja se oslobađa iz nuklearnih reakcija fisije. To je efikasan način pretvorbe nuklearne energije u električnu s minimalnim emisijama CO₂, što je čini jednim od ključnih izvora energije u Europi. Međutim, zbrinjavanje i skladištenje iskorištenog nuklearnog goriva predstavlja izazov zbog njegove visoke razine radijacije. Trenutna rješenja uključuju recikliranje, privremeno skladištenje u bazenima, suho skladištenje u spremnicima te buduće mogućnosti poput geoloških odlagališta. U ovom radu analizirano je skladištenje u CASTOR® spremnicima, jednom od češće korištenih spremnika u članicama EU. Cilj rada bio je razviti koncept prikolice za siguran prijevoz spremnika unutar postrojenja ili na druge lokacije. Na temelju analize postojećih prikolica i nadogradnji, osmišljeni su različiti koncepti, od kojih je jedan konstrukcijski razrađen. Predloženi koncept prikolice razvijen je u skladu s međunarodnim standardima za siguran transport radioaktivnog materijala. Kako bi se osigurala čvrstoća i izdržljivost prikolice, napravljeni su proračuni i kontrolna MKE analiza.

Ključne riječi: iskorišteno nuklearno gorivo, transport, skladištenje, CASTOR® spremnik, modularna prikolica.

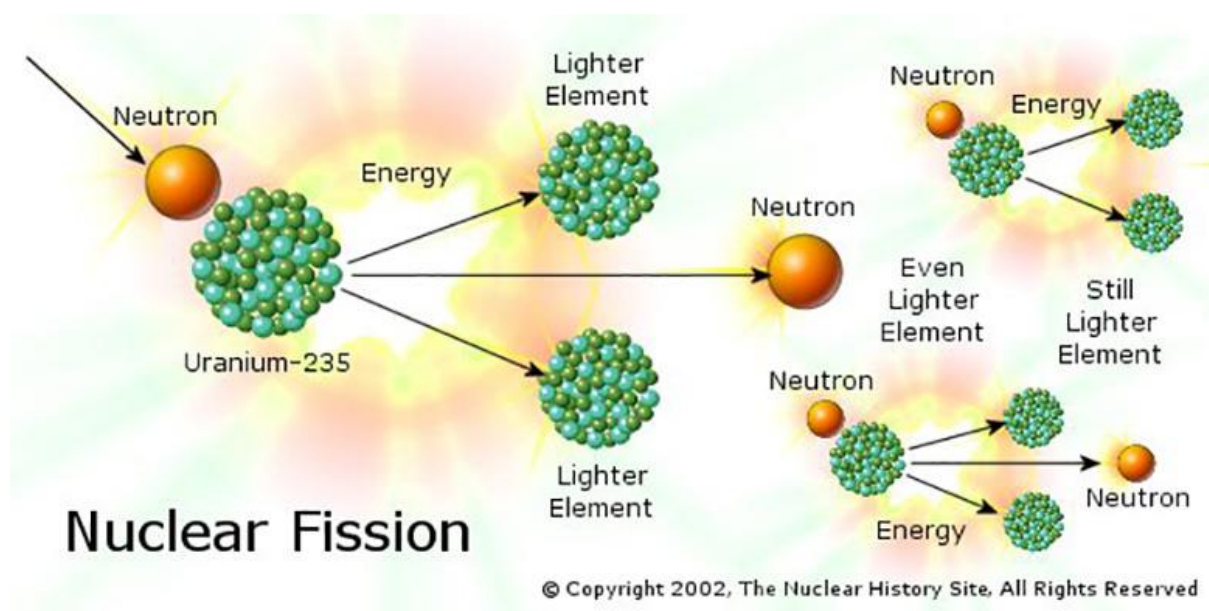
SUMMARY

Nuclear energy is the energy released from nuclear fission reactions. It is an efficient method of converting nuclear energy into electricity with minimal CO₂ emissions, making it one of the key energy sources in Europe. However, the disposal and storage of spent nuclear fuel pose a challenge due to its high levels of radiation. Current solutions include recycling, temporary storage in pools, dry storage in casks and future possibilities such as geological repositories. This paper analyzes the storage of spent nuclear fuel in CASTOR® casks, one of the most commonly used casks in EU states. The goal of this study was to develop a trailer concept for the safe transportation of casks within facilities or to other locations. Based on the analysis of existing trailers and upgrades, several concepts were devised, one of which was elaborated in detail. The proposed trailer concept was developed in compliance with international standards for the safe transport of radioactive materials. To ensure the structural integrity and durability of the trailer, calculations and verification FEM analysis were conducted.

Key words: spent nuclear fuel, transportation, storage, CASTOR® cask, modular trailer.

1. UVOD

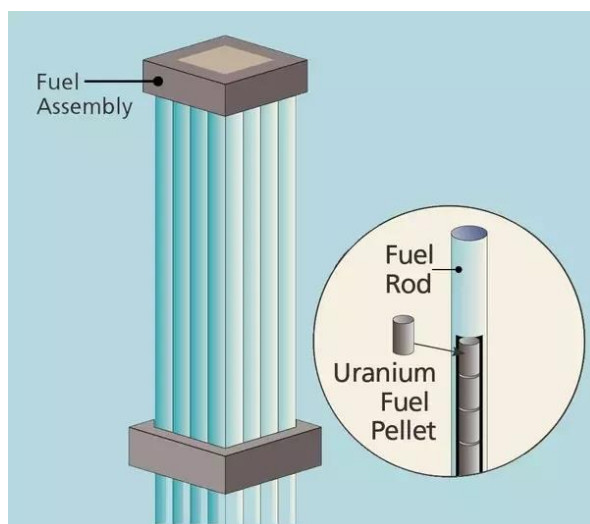
Do Drugog svjetskog rata primaran izvor električne energije bila su fosilna goriva kao što su ugljen i nafta, ali je u poslijeratnom razdoblju došlo do snažne industrijalizacije i urbanizacije što je dovelo do povećane potražnje za električnom energijom. Krajem 1930-ih njemački znanstvenici Otto Hahn i Fritz Strassmann su otkrili nuklearnu fisiju odnosno proces u kojem se jezgra atoma dijeli na dva dijela pri čemu oslobađa veliku količinu energije. Nakon Drugog svjetskog rata, znanstvenici i političari počeli su razmatrati mogućnost korištenja nuklearne energije ne samo za oružje već i za proizvodnju električne energije. Nuklearne elektrane koriste kontroliranu lančanu reakciju fisije kako bi proizvodile toplinu, koja se potom koristi za proizvodnju električne energije. Cilj je održavati stabilnu, kontroliranu reakciju koja osigurava kontinuiranu proizvodnju energije. Nuklearna energija nudila je potencijal za gotovo neograničen izvor energije, što je bilo privlačno s obzirom na rastuću potražnju i zabrinutost zbog iscrpljivanja fosilnih goriva. Prva nuklearna elektrana u svijetu je Obninsk u Sovjetskom Savezu koja je započela s radom 1954. godine, a imala je snagu od 5 MW. Na slici 1. je prikazana ilustracija lančane fisijske reakcije.



Slika 1. Lančana reakcija nuklearne fisije [1]

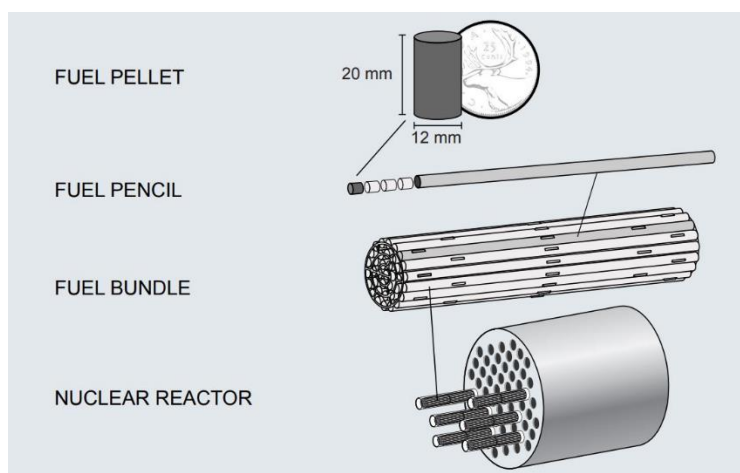
1.1. Nuklearno gorivo

Kao gorivni element u nuklearnim elektranama najčešće se koristi nisko obogaćeni uranij (*eng. Low Enriched Uranium LEU*) koji sadrži 3 – 5 % uranija-235 odnosno U-235. Gorivni elementi su obično u obliku gorivnih šipki odnosno cilindričnih štapova. Te se šipke slažu u snopove, najčešće pravokutnog i kvadratnog oblika rešetke kao što je prikazano na slici 2..

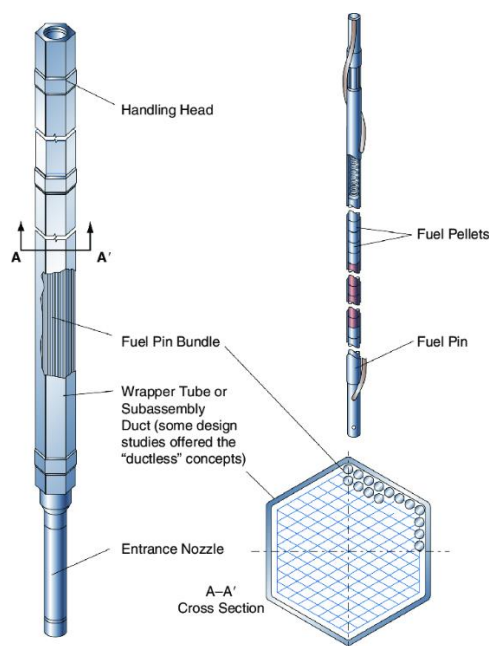


Slika 2. Kvadratni sklop gorivnih šipki nuklearnog goriva [2]

Također postoje cilindrični i heksagonski sklopovi koji se koriste isključivo u specifičnim reaktorima. Oni su prikazani na slikama 3. i 4.



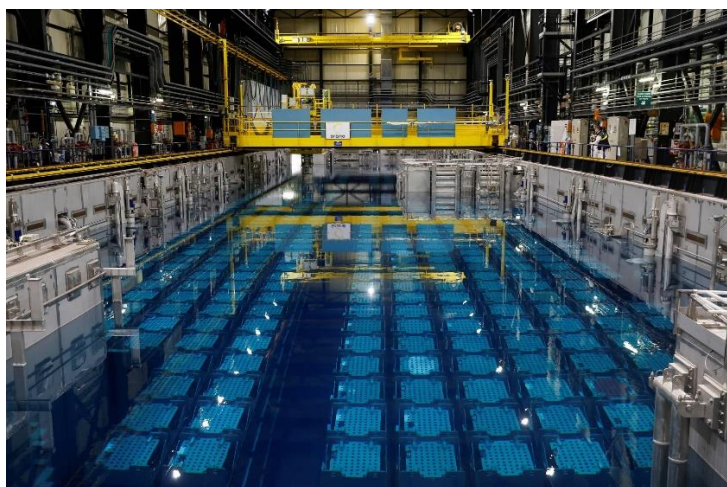
Slika 3. Cilindrični sklop gorivnih šipki nuklearnog goriva [3]



Slika 4. Heksagonski sklop gorivnih šipki nuklearnog goriva [4]

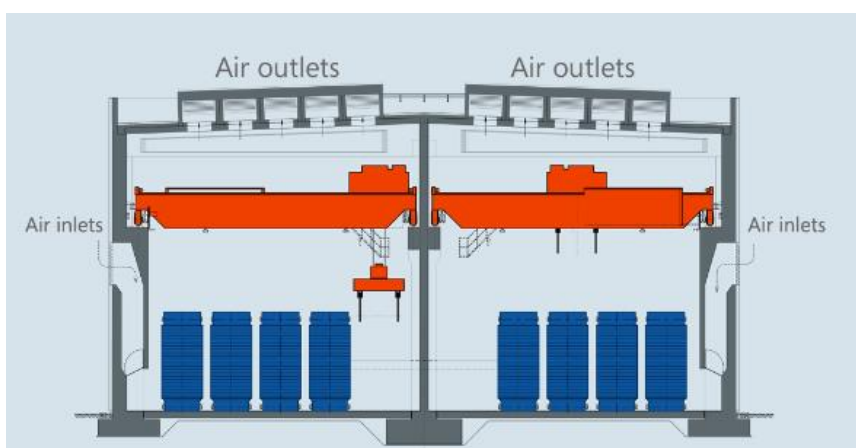
1.2. Problem nuklearnog goriva

Nakon što je radni ciklus nuklearnog goriva završen, sklopovi su radioaktivni te je potrebno pobrinuti se o načinu njihova skladištenja. Pri kraju radnog vijeka ono se uklanja iz reaktora i skladišti se u bazenu. To je međukorak pri daljnjem skladištenju radi njegova hlađenja i smanjenja radioaktivnosti te se tamo moraju zadržati 5 – 10 godina. Vodeni sloj oko gorivnih elemenata djeluje kao zaštitni sloj od zračenja čime se štite i radnici i okolina od izloženosti. Na slici 5. je prikazan bazen za skladištenje iskorištenog nuklearnog otpada u Francuskoj.



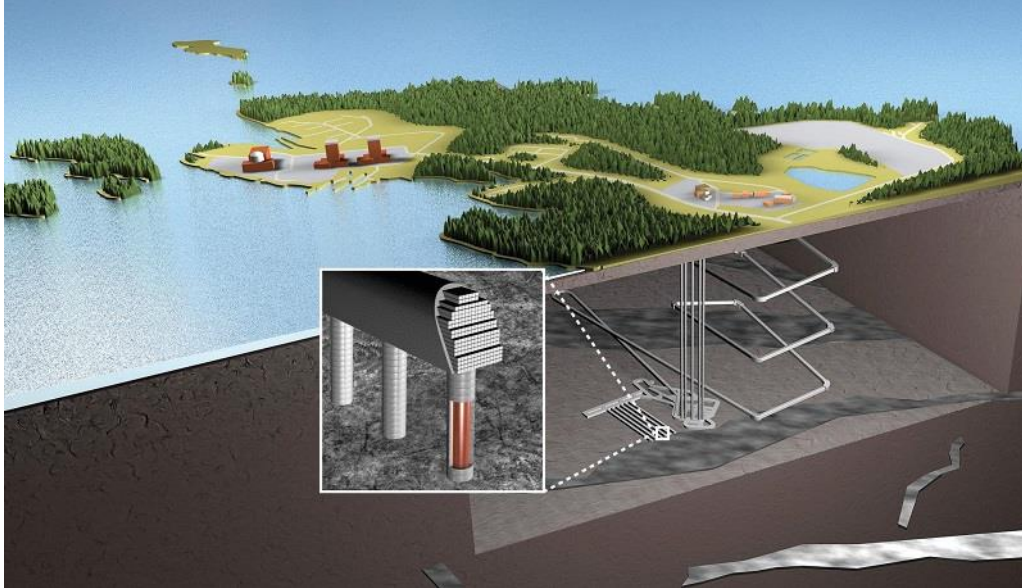
Slika 5. Bazen za skladištenje iskorištenog nuklearnog otpada [5]

Postoje 3 opcije za daljnje skladištenje iskorištenog goriva, a to su: recikliranje, privremeno skladištenje i trajno odlaganje. Trenutačne globalne mogućnosti za recikliranje tog goriva su ograničene, te postoji samo nekoliko lokacija koje imaju licencu i uvjete. Neke od glavnih su Francuska, Ujedinjeno Kraljevstvo, Rusija, Japan i Kina. Za privremeno skladištenje se koriste bazeni, što je prethodno spomenuto, i suho skladištenje u spremnicima. Ti spremnici ujedno služe i za transport što je glavna tema ovog rada. Nešto više o njima će biti u narednim poglavljima. Na slici 6. prikazana je skica presjeka privremenog skladišta.



Slika 6. Presjek privremenog skladišta [6]

Nakon privremenog skladištenja, iskorišteno nuklearno gorivo potrebno je trajno skladištiti te je glavna ideja duboko geološko odlagalište. To odlagalište bi se trebalo sastojati od više prirodnih i tehničkih barijera različitih vrsta koje bi spriječile izlaganje ljudi i okoline radijaciji. Radi toga bi trebali funkcionirati bez potrebe za nadzorom ili bilo kakvim održavanjem. Potrebno ga je skladištiti na siguran način nekoliko desetaka pa čak i stotina tisuća godina. Finska bi trebala biti prva koja će krenuti sa upotrebom takvog skladištenja u Onkalo odlagalištu.



Slika 7. Prikaz ideje Onkalo projekta [7]

2. SPREMNICI ISKORIŠTENOG NUKLEARNOG GORIVA

Na europskom tržištu postoji nekoliko proizvođača spremnika iskorištenog nuklearnog goriva, jedan od vodećih je *Gesellschaft für Nuklear-Service mbH* (GNS mbH). GNS mbH je najpoznatiji po svojim CASTOR i CONSTOR spremnicima. Na slici 8. je prikazana GNS mbH tvornica.



Slika 8. GNS mbH [8]

Na slici 9. su prikazani spremnici za suho skladištenje od različitih proizvođača.



Slika 9. Spremnici za suho skladištenje od različitih proizvođača [9]

2.1. CASTOR (*Cask for Storage and Transport of Radioactive Material*)

CASTOR je spremnik konstruiran za sigurno skladištenje i transport radioaktivnog otpada. Moraju imati odobrenje od Saveznog ureda za sigurnost gospodarenja nuklearnim otpadom (BASE). Izrađeni su od nodularnog lijevanog željeza koje je poznato po svojoj čvrstoći, otpornosti na udarce i sposobnosti da izdrži ekstremne uvjete, poput požara ili udara. Pruža izvrsnu mehaničku zaštitu i učinkovitu zaštitu od zračenja zbog čega se istrošeni gorivni elementi u njemu se mogu skladištiti do 40 godina. Postoji mogućnost produženja tog razdoblja. S obzirom da su to suhi spremnici, u njima se ne nalazi voda za hlađenje nego je to obično ili prirodna cirkulacija zraka ili inertni plin helij. Postoje različiti modeli, a u ovom radu će se najviše razmatrati modeli V-serije jer su ti modeli najrasprostranjeniji u upotrebi.



Slika 10. GNS CASTOR V/19 spremnik [10]

2.1.1. Dimenzije CASTOR spremnika

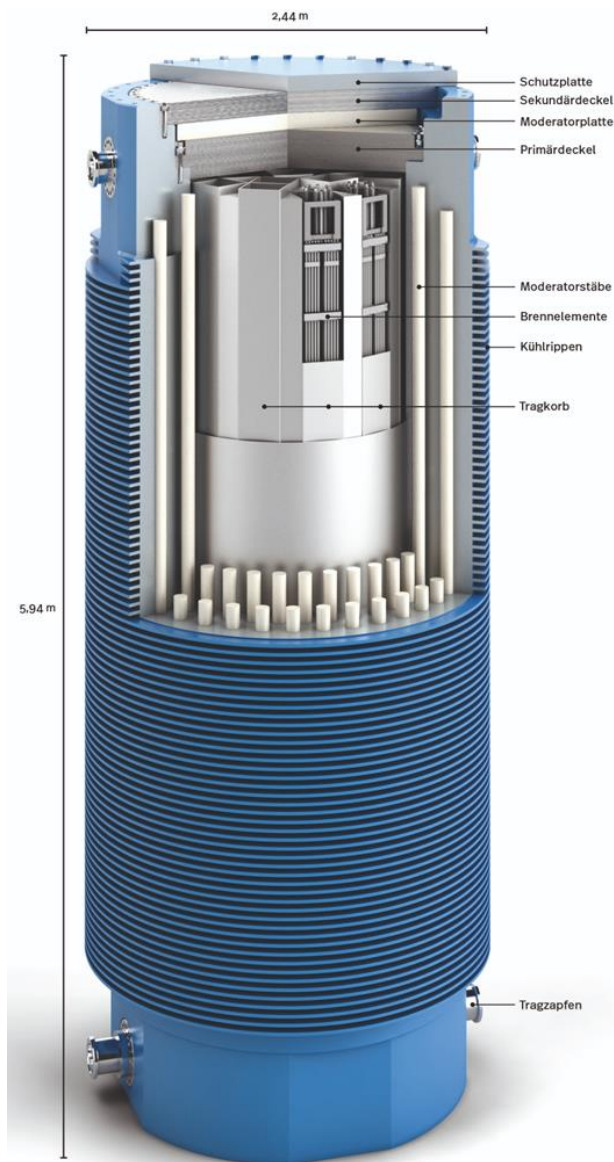
CASTOR spremnici su obično dugi 6 m, promjer im je oko 2 m te mogu težiti do 130 t kada su napunjeni.

2.1.1.1. CASTOR V/19

Spremnik CASTOR V/19 prikazan je na slikama 10. i 11., a koristi se za skladištenje gorivnih sklopova reaktora s vodom pod tlakom odnosno PWR reaktora. Broj 19 u imenu označava kapacitet odnosno koliko gorivnih sklopova može pohraniti. Njegova visina je 5940 mm, a vanjski promjer iznosi 2440 mm. Masa praznog spremnika je 108 t. Ostale dimenzije su prikazane u tablici 1.

Tablica 1. Dimenzije spremnika CASTOR V/19 [11]

TECHNICAL DATA	
Cask Contents	
Up to 19 spent fuel assemblies from PWR (total length max. 4,950 mm, edge length max. 233 mm)	
Total thermal power	39 kW
Total activity	1,900 PBq
Dimensions and Weight in the Storage Configuration	
Overall height	594 cm
Outer diameter	244 cm
Cavity height	503 cm
Cavity diameter	148 cm
Cask weight empty	≈ 108 t



Slika 11. Spremnik CASTOR V/19 sa dimenzijama [12]

2.1.1.2. CASTOR V/52

Na slici 12. je prikazan CASTOR V/52 spremnik koji može pohraniti 52 gorivna sklopa reaktora s kipućom vodom odnosno BWR reaktora. Njegova visina je 5530 mm, a vanjski promjer 2440 mm. Masa praznog spremnika je 105 t. U tablici 2. su prikazane ostale dimenzije.



Slika 12. GNS CASTOR V/52 spremnik [13]

Tablica 2. Dimenzije spremnika CASTOR V/52 [14]

TECHNICAL DATA	
Cask Contents	
Up to 52 spent fuel assemblies from BWR (total length max. 4,485 mm, edge length max. 141 mm)	
Total thermal power	40 kW
Total activity	1,730 PBq
Dimensions and Weight in the Storage Configuration	
Overall height	553 cm
Outer diameter	244 cm
Cavity height	455 cm
Cavity diameter	148 cm
Cask weight empty	≈ 105 t

Na slici 13. je prikazan detalj prihvata spremnika.



Slika 13. Detalj prihvata spremnika [14]

2.2. CONSTOR (*Concrete Storage Cask*)

CONSTOR spremnik je konstruiran za siguran transport i skladištenje iskorištenog nuklearnog goriva. Više je dizajniran za dugoročno skladištenje na licu mjesta te su posebno prikladni za situacije gdje je od velike važnosti ekonomičnost skladištenja i kada nije planiran čest transport tog otpada. Sastoji se od debelostijenog cilindričnog „sendvič“ tijela, koje uključuje unutarju i vanjsku oblogu izrađenu od čelika i međuprostor ispunjen armiranim betonom. Kod njega nije potrebna aktivna kontrola tijekom skladištenja odnosno sadrži pasivni sustav. Spremnik je dugačak gotovo 7,50 m s amortizerima i ima promjer od 3,50 m. Masa mu je 181 t.



Slika 14. GNS CONSTOR spremnik [15]

2.3. Ispitivanja CASTOR spremnika

CASTOR spremnici prolaze vrlo rigorozna ispitivanja kako bi se osigurala njihova sigurnost, pouzdanost i učinkovitost u skladištenju i transportu iskorištenog nuklearnog goriva. BAM (*Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung*) ili Savezni institut za istraživanje i ispitivanje materijala je odgovoran za provođenje neovisnih ispitivanja tih spremnika kako bi se osiguralo da zadovoljavaju nacionalne i međunarodne standarde sigurnosti. Mehaničko ispitivanje se sastoji od testova pada te ih se provodi nekoliko. U prvom testu pada spremnik

mora pasti s visine od 9 m na nepopustljiv temelj. U drugom testu pada spremnik treba pasti s visine od 1 m na čvrsti čelični šiljak promjera 26 cm i visine 20 cm. U svakom testu je cilj da dođe do najvećeg mogućeg oštećenja. Dodatno ispitivanje drobljenja provodi se za „lagane“ spremnike čija je masa do 500 kg i specifična masa manja od 1000 kg/m³. Na slici 15. prikazan je spremnik u testu pada s 1 m.



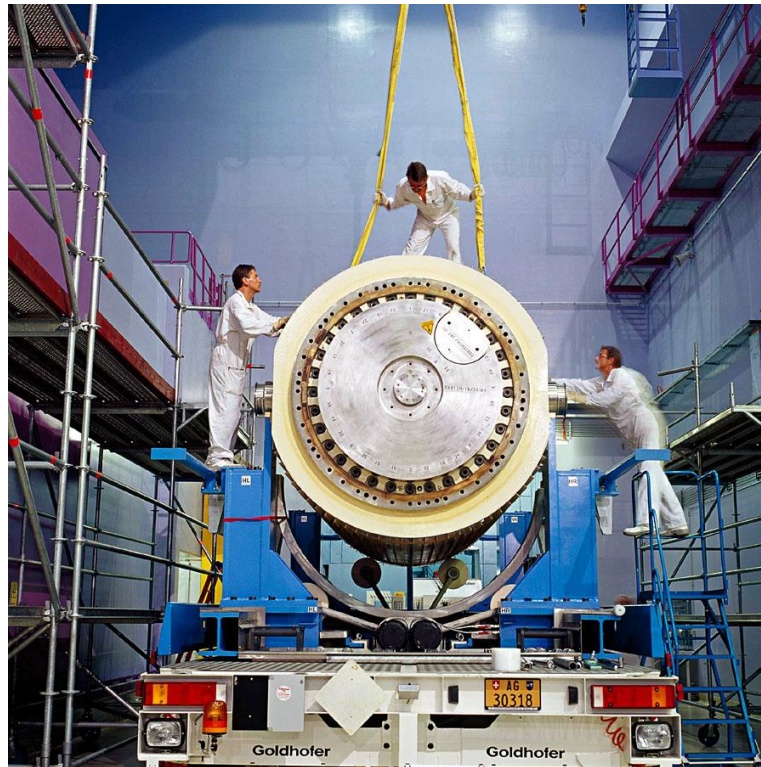
Slika 15. Test pada sa 1 m [16]

Zatim je potrebno provesti toplinsko ispitivanje, spremnici su izloženi 30 minuta vatri koja u potpunosti okružuje spremnik. Prosječna temperatura plamena mora iznositi 800 °C. Spremnici su također podvrgnuti testu uranjanja u vodu. Moraju izdržati pretlak od 2 MPa jedan sat što odgovara tlaku na dubini od 200 m. Provedene su također simulacije raznih situacija kao sudar sa zrakoplovom te su provedeni detaljni testovi pojedinačnih komponenti spremnika. Testiranja se provode i izvan BAM-a gdje su spremnici podvrgnuti testu sudara.

2.4. Prijevoz spremnika

Iako su njihove dimenzije unutar raspona dopuštenih vrijednosti, radi velike mase spadaju u posebnu kategoriju odnosno u specijalni prijevoz. Spremnici se mogu prevoziti cestom, željeznicom i brodom, a svaki način transporta uključuje posebne metode i mjere opreza.

Prijevozi zahtijevaju posebne dozvole nadležnih tijela. Na slici 16. prikazano je postavljanje tih spremnika na prikolicu za transport.



Slika 16. Postavljanje spremnika na prikolicu [17]

2.4.1. *Transport cestom*

CASTOR spremnici se prevoze na posebno dizajniranim kamionima s prikolicama koja bi mogla podnijeti težinu spremnika. Prikolice su opremljene posebnim sustavima za pričvršćivanje spremnika kako bi se osigurala stabilnost tijekom vožnje. Transport spremnika uvijek prati sigurnosna pratnja koja uključuje policiju i specijalizirane sigurnosne jedinice. Također je bitna organizacija rute unaprijed kako bi se osigurali optimalni uvjeti vožnje i izbjegla naseljena područja. Na slici 17. prikazan je primjer cestovnog prijevoza.



Slika 17. Cestovni prijevoz spremnika [18]

2.4.2. Transport željeznicom

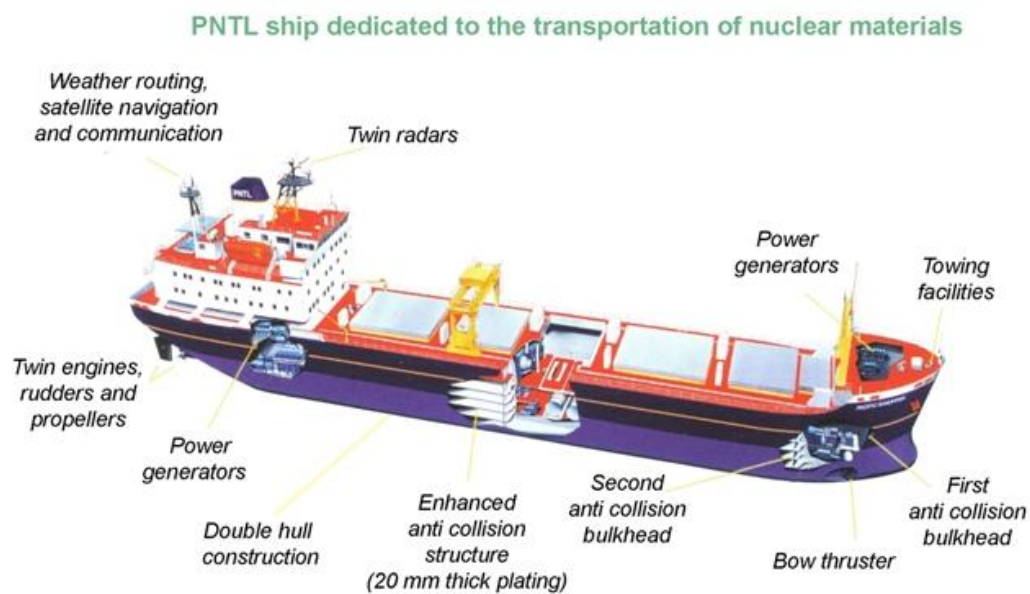
Prilikom prijevoza željeznicom, koriste se specijalizirani željeznički vagoni koji su opremljeni sustavima za amortizaciju udaraca kako bi se smanjile vibracije tijekom vožnje. Kao i kod cestovnog transporta, željeznički transport podliježe strogim sigurnosnim pravilima, uključujući pratnju sigurnosnih jedinica i nadzor rute.



Slika 18. Željeznički prijevoz spremnika [1]

2.4.3. Transport brodom

Ukoliko je potreban prijevoz između različitih zemalja, a nije moguć ili je predug cestovni prijevoz, koristi se pomorski transport. Spremnici se prevoze na specijaliziranim brodovima koji su opremljeni sustavima za stabilnost i sigurnost u morskim uvjetima. Pomorski transport mora zadovoljiti međunarodne sigurnosne propise i standarde. Na slici 19. prikazan je brodski prijevoz spremnika.



Slika 19. Brodski prijevoz spremnika [20]

3. PREGLED PRIKOLICA I PLATFORMI

S obzirom na veliku masu CASTOR spremnika, potrebno je posebnu pažnju obratiti na nosivosti dostupnih prikolica. U ovom poglavlju će se napraviti pregled proizvođača prikolica na europskom tržištu te njihovih modela koji bi mogli prevoziti spremnike s aspekta nosivosti.

3.1. NOOTEBOOM

Nooteboom Trailers BV je nizozemski proizvođač koji nudi rješenja u području izvanrednog transporta s nosivošću od 20 do 200 t.

3.1.1. *EURO-PX low loader*

Eurotrailer EURO-PX je niski utovarivač s hidraulički upravljanim pendel osovina ili osovinskim linijama te ih mogu imati 2 do 10 zbog čega može prevoziti terete i veće od 100 t. Osovinsko opterećenje može biti od 12 t/osovini ili 14 t/osovini pri 80 km/h, a za dodatnu nosivost i optimalnu raspodjelu težine se mogu kombinirati s Jeepdolly ili Interdolly postoljem. Na slici 20. je prikazana jedna takva prikolica sa 6 osovina od kojih su 4 stražnje.



Slika 20. Nooteboom EURO-PX [21]


3.1.2. *MANOOVR Multi-PL semi lowloader*


MANOOVR Multi-PL je polu niski utovarivač dostupan sa 3 do 10 osovina. Osovinsko opterećenje može biti od 12 t/osovini pri 80 km/h. Postoje razne konfiguracije te prikolice kako bi zadovoljile različite zahtjeve, a da bi se dobila nosivost veća od 100 t potrebno je dodati Multidolly odnosno prednju prikolicu s više osovina.




Slika 21. Nootboom MANOOVR Multi-PL [22]

Na slici 22. se mogu vidjeti različite konfiguracije sa Multidolly koje imaju nosivost veću od 100 t.

	Speed	Fifth wheel	Front axles	Rear axles	GVW*	Dead weight	Payload	
	MPL-133-27(V)	80 km/h	25.0	12.0	12.0	133.0	31.7	101.3
	MPL-133-27(VV)	80 km/h	25.0	12.0	12.0	133.0	35.0	98.0
	MPL-138-27(V)	80 km/h	30.0	12.0	12.0	138.0	32.2	105.8
	MPL-138-27(VV)	80 km/h	30.0	12.0	12.0	138.0	35.5	102.5

	Speed	Fifth wheel	Front axles	Rear axles	GVW*	Dead weight	Payload	
	MPL-133-36(V)	80 km/h	25.0	12.0	12.0	133.0	30.8	102.2
	MPL-133-36(VV)	80 km/h	25.0	12.0	12.0	133.0	33.2	99.8
	MPL-138-36(V)	80 km/h	30.0	12.0	12.0	138.0	31.3	106.7
	MPL-138-36(VV)	80 km/h	30.0	12.0	12.0	138.0	33.7	104.3

	Speed	Fifth wheel	Front axles	Rear axles	GVW*	Dead weight	Payload	
	MPL-145-37(V)	80 km/h	25.0	12.0	12.0	145.0	33.6	111.4
	MPL-145-37(VV)	80 km/h	25.0	12.0	12.0	145.0	36.9	108.1
	MPL-150-37(V)	80 km/h	30.0	12.0	12.0	150.0	34.1	115.9
	MPL-150-37(VV)	80 km/h	30.0	12.0	12.0	150.0	37.4	112.6

*GVW= Gross Vehicle Weight = total weight of the trailer. Weights depending on version.

Slika 22. Konfiguracije Multi-PL sa Multidolly [22]

3.1.3. Teletrailer




Teletrailer je poluprikolica s ravnom platformom koja ima mogućnost produživanja. Ima glavnu središnju gredu kutijastog presjeka koja je izrađena od visokokvalitetnog čelika. Konfiguracije mogu biti sa 2 do 6 osovina, a osovinsko opterećenje može biti 12 t/osovini.






Slika 23. Nootboom Teletrailer [23]

Na slici 24. mogu se vidjeti različite konfiguracije Teletrailer poluprikolica.

Teletrailer

	Speed	Fifth wheel	Rear axles	Total (GVW*)	Length min/max
	80 km/h	18.0	9.0	45.0	13.5/29.0 m
	80 km/h	18.0	10.0	48.0	13.5/36.0 m
	80 km/h	25.0	10.0	55.0	13.5/44.0 m

	Speed	Fifth wheel	Rear axles	Total (GVW*)	Length min/max
	80 km/h	25.0	10.0	65.0	13.5/44.0 m
	80 km/h	25.0	12.0	73.0	13.5/44.0 m

	Speed	Fifth wheel	Rear axles	Total (GVW*)	Length min/max
	80 km/h	30.0	12.0	90.0	13.5/36.0 m


Slika 24. Konfiguracije Teletrailer-a [23]

3.2. FAYMONVILLE

Faymonville je proizvođač iz Belgije nudi specijalizirane prikolice za teški transport, dugih, širokih i predimenzioniranih tereta.

3.2.1. VarioMAX Plus

VarioMAX Plus je niskopodna prikolica za prijevoz teških tereta. Zbog širokog spektra konfiguracija moguće je dobiti prikolice različitih nosivosti odnosno prikolice koje zadovoljavaju razne zahtjeve. Također su moguća i različita osovinska opterećenja i opterećenja sedla. Neke od opcija su prikazane na slici 25.

19.5" tyres						
Fifth wheel load	Combination	Payload at 12t axle load	Payload at 13t axle load	Payload at 14t axle load	Payload at 15t axle load	Payload at 16.5t axle load
28t	2+4 	67t	73t	79t	85t	94t
	2+5 	76t	83t	90t	97t	107.5t
	3+4 	76t	83t	90t	97t	107.5t
	3+5 	85t	93t	101t	109t	121t
	3+6 	92t	101t	110t	119t	132.5t
	4+5 	92t	101t	110t	119t	132.5t
	4+6 	101t	111t	121t	131t	146t
36t	2+4 	73t	79t	85t	91t	97t
	2+5 	82t	89t	96t	103t	110t
	3+4 	82t	89t	96t	103t	110t
	3+5 	91t	99t	107t	115t	124t
	3+6 	99t	108t	117t	126t	139.5t
	4+5 	99t	108t	x	x	x
	4+6 	108t	118t	x	x	x

x = Version not available

Slika 25. Konfiguracije VarioMAX Plus [24]



Slika 26. Faymonville VarioMAX Plus [24]

3.2.2. ModulMAX

ModulMAX je modularni sustav koji može biti konfiguriran za prijevoz izuzetno teških tereta za *on-road* i *off-road* operacije. Prosječna širina je 3000 mm, a postoje G-modul i S-modul. Koriste pendel osovine koje omogućavaju optimalnu stabilnost i prilagodbu terenu, što je ključno za siguran transport radioaktivnih materijala. Također postoje i tri načina rada, način rada s prikolicom, način tada s pomoćnim pogonom i rad s vlastitim pogonom. Način

prikolice je najčešće korišten način gdje tegljač vuče ili gura prikolicu pomoću sustava vučne rude ili sedla. Sustav pomoćnog pogona koristi se i na cesti i izvan nje gdje motori na kotačima daju veliku snagu po potrebi i tako mogu zamijeniti dodatne tegljače. U radu s vlastitim pogonom se pogonske osovine napajaju iz Power Pack jedinica i cjelokupno upravljanje vozilom se vrši jednim daljinskim upravljačem što je pogodno za vožnju u postrojenju ili van ceste.



Slika 27. Faymonville ModulMAX [25]

	G-MODUL				S-MODUL			
	TM	M	AP M + SP M	SP E	TM	M	AP M + SP M	SP E
STROKE	400mm	400mm	400mm	400mm	400mm	400mm	400mm	400mm
STRUTS/AXLE	180/140P	180/140P	180/140P	180/140P	180/140P	180/140P	180/140P	180/140P
AXLE LOAD (AXLE LINE)	45.0t	45.0t	45.0t	45.0t	45.0t	45.0t	45.0t	45.0t
PLATFORM WIDTH	3,000mm	3,000mm	3,000mm	3,000mm	3,000mm	3,000mm	3,000mm	3,000mm
RUNNING HEIGHT	1,170mm	1,170mm	1,170mm	1,220mm	1,190mm	1,190mm	1,190mm	1,220mm
AXLE LINES								
MODEL	Modul-G-SL-M-2-TM				Modul-S-ST-M-2-TM			
DEAD WEIGHT	1.9t				7.2t			
PAWLOAD (PTO)	82.5t				64.8t			
AXLE LINES								
MODEL	Modul-G-SL-M-3-TM				Modul-S-ST-M-3-TM			
DEAD WEIGHT	19.7t				19.2t			
PAWLOAD (PTO)	124.2t				77.8t			
AXLE LINES								
MODEL	Modul-G-SL-M-4-TM				Modul-S-ST-M-4-TM			
DEAD WEIGHT	14.0t				13.2t			
PAWLOAD (PTO)	143.2t				143.2t			
AXLE LINES								
MODEL	Modul-G-SL-M-4-AP				Modul-S-ST-M-4-AP			
DEAD WEIGHT	14.0t				16.8t			
PAWLOAD (PTO)	143.2t				143.2t			
AXLE LINES								
MODEL	Modul-G-SL-M-5-TM				Modul-S-ST-M-5-TM			
DEAD WEIGHT	17.9t				16.8t			
PAWLOAD (PTO)	207.5t				162.4t			
AXLE LINES								
MODEL	Modul-G-SL-M-6-TM				Modul-S-ST-M-6-TM			
DEAD WEIGHT	20.7t				19.7t			
PAWLOAD (PTO)	245.0t				196.0t			
AXLE LINES								
MODEL	Modul-G-SL-M-6-AP				Modul-S-ST-M-6-AP			
DEAD WEIGHT	20.7t				25.0t			
PAWLOAD (PTO)	245.0t				245.0t			

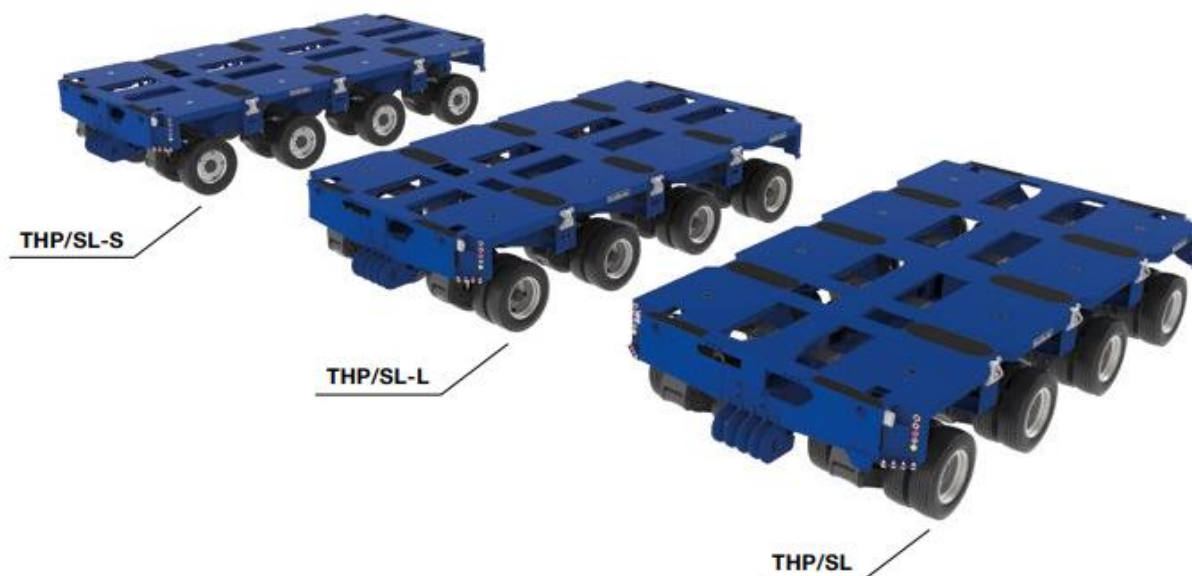
Slika 28. Konfiguracije ModulMAX [25]

3.3. GOLDHOFER

Goldhofer je njemačka tvrtka također specijalizirana za proizvodnju prikolica i poluprikolica s velikom nosivošću. Za CASTOR spremnike su najbolji modularni sustavi jer imaju veliku nosivost te su sigurniji i stabilniji od velikih prikolica.


3.3.1. THP/SL modeli

THP/SL je standardna modularna prikolica bez vlastitog pogona, a postoje i modeli THP/SL-S i THP/SL-L koji se razlikuju po specifičnim tehničkim karakteristikama. Koriste pendel osovine koje su ključne za osiguravanje stabilnosti i sigurnosti pri transportu teških i osjetljivih tereta.



Slika 29. Goldhofer THP/SL moduli [26]

Neke od tehničkih specifikacija su prikazane na slici 30..

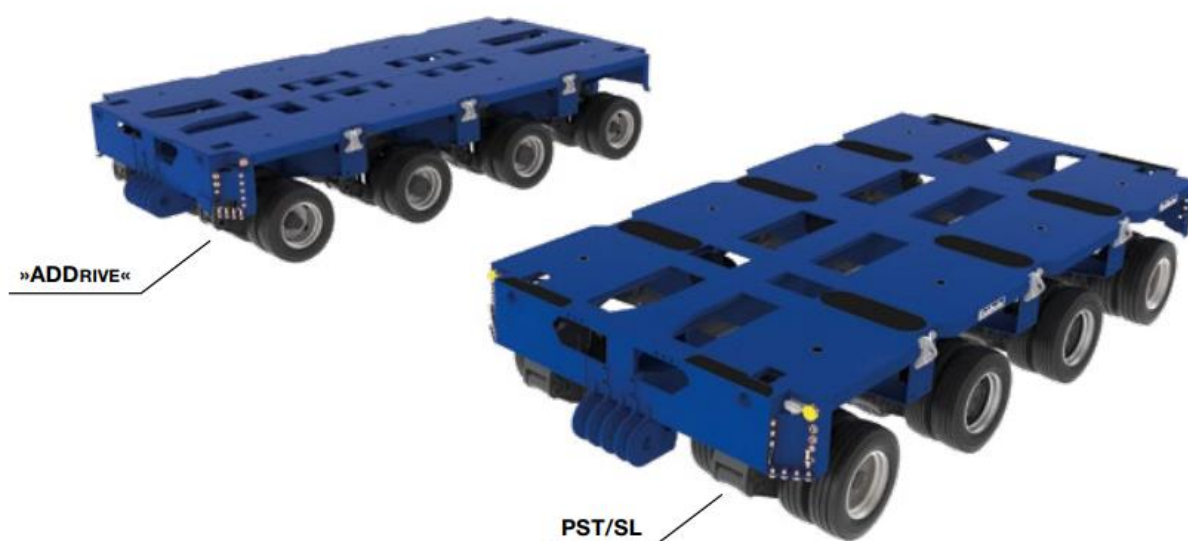
	THP/SL-S	THP/SL-L	THP/SL THP/SL (1800)
 TECHNICAL DATA			
Tires	Single tires 245/70 R 17,5 ^[1] 285/70 R 19,5 ^[2]	Twin tires 215/75 R 17,5	Twin tires 215/75 R 17,5
Axle load	15.6 t at 20 km/h ^[1] 23 t at 10 km/h ^[2]	26.1 t at 20 km/h	45 t at 1 km/h
Axle compensation	600 mm	600 mm	600 mm
Dead weight (4-axles)	9.6 t ^[1] 10.2 t ^[2]	11.1 t	13.85 t
Vehicle width	3,000 mm	3,000 mm	3,000 mm
Axle spacing	1,500 mm	1,500 mm	1,500 mm 1,800 mm
Maximum steering angle	± 55°	± 55°	± 55°
Number of axles	2-8	2-8	2-8

^[1] Tires 245/70 R 17,5 ^[2] Tires 285/70 R 17,5


Slika 30. Tehničke specifikacije THP/SL, THP/SL-S i THP/SL-L [26]

3.3.2. ADDrive i PST modeli

PST modeli su samohodni moduli za transport izuzetno teških tereta. Oni imaju vlastiti pogon i mogu se kretati bez potrebe za vučnim vozilom odnosno tegljačem što je dobro za prijevoz unutar postrojenja dok *ADDrive* ima hibridni pogon te se i dalje oslanjaju na tegljač za većinu kretanja.



Slika 31. Goldhofer ADDrive i PST/SL moduli [27]

 TECHNICAL DATA	»ADDRIVE«	PST/SL
	Tires	Twin tires 215/75 R 17,5
Axle load	36 t at 5 km/h	45 t at 1 km/h
Axle compensation	600 mm	600 mm
Dead weight (4-axles)	15.3 t	15.3 t
Traction force (per driven axle line)	125 kN	200 kN
Vehicle width	3,000 mm	3,000 mm
Axle spacing	1,500 mm	1,500 mm
Maximum steering angle	± 55°	± 55°
Number of axles	4, 6	4, 6, 8

Slika 32. Tehničke specifikacije ADDrive i PST/SL [27]

3.4. SCHEUERLE

Scheuerle je njemačka tvrtka koja je dio TII Grupe koja proizvodi modularne i niskopodne prikolice s nosivosti većom od 130 t.

3.4.1. EuroCompact do 128 t

EuroCompact je niskopodna prikolica sa nosivosti do 128 t te sa različitim konfiguracijama. Postoje 3 modela EuroCompact prikolice, a to su U7, U13 i U15. Oni se razlikuju po osovinskom opterećenju i razmaku.



Slika 33. Scheuerle EuroCompact modeli do 128 t [28]

3.4.2. Modularni modeli

Postoji nekoliko modularnih modela te su moguće različite konfiguracije broja osovina kako bi se postigla potrebna nosivost. Možda bi najpogodniji izbor bili modeli InterCombi i K25.

SCHEUERLE | InterCombi

SCHEUERLE | K25



Slika 34. Scheuerle InterCombi i K25 moduli [29]

3.4.3. SPMT modeli

SPMT modeli su samohodni modularni transporteri te služe za prijevoz izrazito teškog i velikog tereta. Postoji nekoliko modela te se također mogu postići različite nosivosti i zadovoljiti ostali zahtjevi s različitim konfiguracijama.



Slika 35. Scheuerle SPMT [30]

3-axle

Payload:	max. 166,5 t
Axle load:	max. 60 t
Axle compensation:	700 (± 350 mm)
Dimensions:	4200 mm x 2430 mm x 1500 mm (L x W x H)

**4-axle**

Payload:	max. 222,2 t
Axle load:	max. 60 t
Axle compensation:	700 (± 350 mm)
Dimensions:	5.600 mm x 2430 mm x 1150 mm (L x W x H)



Slika 36. Tehničke specifikacije SPMT modula [30]

3.5. WAGENBORG

Wagenborg je nizozemska kompanija specijalizirana za pomorski transport i logističke usluge. Osim u pomorskom sektoru, tvrtka pruža usluge i na kopnu u specijaliziranom prijevozu tereta.

3.5.1. Modularne prikolice

Modularne prikolice, kao što je već ranije rečeno, su specijalizirane za prijevoz tereta izrazito velikih masa kombiniranjem različitih konfiguracija modula. Kao i kod ostalih tvrtki, postoje konvencionalni moduli CMT koje prevozi tegljač i samohodni moduli SPMT. Njihova maksimalna brzina je 80 km/h, a maksimalno osovinsko opterećenje za CMT iznosi 36 t dok za SPMT ono iznosi 40 t.



Slika 37. Wagenborg SPMT [31]

Na slici 38. prikazane su mase pojedinih konfiguracija osovina usporedno za CMT i SPMT

OWN WEIGHTS	CMT	SPMT
2-axle lines	8 t	-
3-axle lines	11,1 t	-
4-axle lines	14 t	16 t
6-axle lines	20,6 t	24 t
powerpack Z180	-	4,5 t
powerpack Z350	-	7,2 t
3-axle lines spacer	4,5 t	-
6-axle lines spacer	-	5,2 t

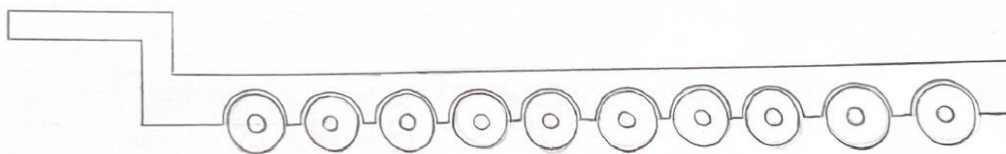
Slika 38. Mase WAGENBORG modula [32]

4. KONCIPIRANJE PRIKOLICE

Prilikom koncipiranja različitih izvedbi prikolica uzeto je osovinsko opterećenje od 12 t. Opterećenja sedla su razmatrana u granicama 25 – 35 t. Na temelju tih podataka i okvirnih masa prikolica procijenjenih na temelju sličnih izvedbi stvarnih proizvođača, dobije se masa tereta. Ukoliko pojedini koncepti ne zadovoljavaju po dopuštenoj nosivosti, moguće je povećati broj osovina ili povećati opterećenje sedla kako bi se povećala nosivost same prikolice.

4.1. Polu niska prikolica

Kao predložak prilikom koncipiranja polu niske prikolice korištena je Nooteboom-ova MANOOVR Multi-PL prikolica, ali je izvedena bez razdvajanja prednjih i stražnjih osovina radi uštede na duljini prikolice.

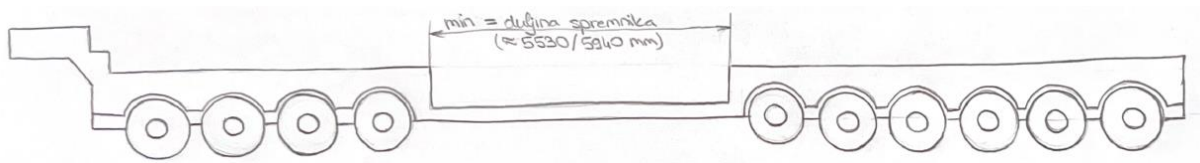


Slika 39. Koncept polu niske prikolice

Konfiguracija je izvedena sa 10 osovina. Opterećenje sedla je 35 t, a masa takve prikolice pretpostavljena je na 35 t. Na temelju toga, nosivost takve prikolice iznosi 120 t.

4.2. Niskopodna prikolica

Prilikom koncipiranja niskopodne prikolice kao primjer korišten je Faymonville-ov VarioMAX Plus. Ovakva izvedba je od velike koristi ukoliko visina prikolice s teretom prijelazi dopuštene gabaritne mjere. Ovaj koncept ima smisla jedino ako cijeli spremnik i nadogradnja stanu na spuštenu dio.

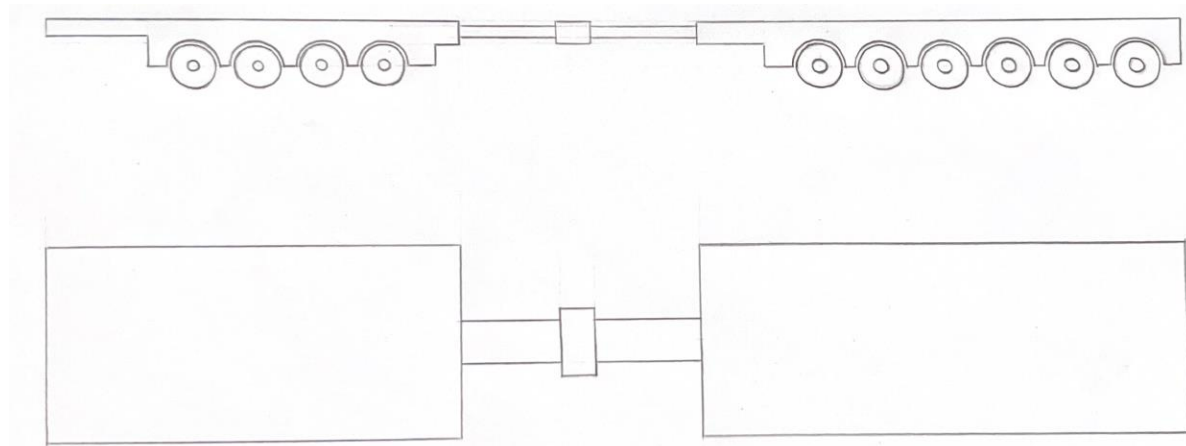


Slika 40. Koncept niskopodne prikolice

Niskopodna prikolica je izvedena u konfiguraciji 4 + 6 te je uzeto opterećenje sedla od 30 t. Okvirna masa prikolice uzeta je oko 35 t zbog čega je ukupna nosivost prikolice 115 t.

4.3. Teleskopska prikolica

Teletrailer od Nootboom-a je bila primjer prilikom koncipiranja teleskopske prikolice.

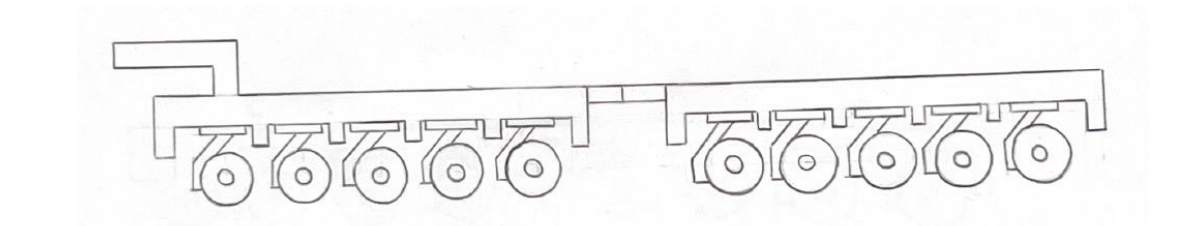


Slika 41. Koncept teleskopske prikolice

U konceptu je prikolica konfigurirana sa 10 osovina te osovinskim opterećenjem od 30 t. Masa prikolice je uzeta oko 30 t zbog čega dopuštena nosivost iznosi 120 t. Duljina spremnika iznosi oko 6 m, a prikolica sa 10 osovina je dosta dulja od spremnika zbog čega nema potrebe za velikim produživanjem prikolice te je uzeto maksimalno produživanje/skraćivanje od 1000 mm.

4.4. Modularna prikolica

Prilikom koncipiranja modularne prikolice kao predložak je korišten ModulMAX od Faymonville-a. Modularne prikolice imaju izrazito veliku nosivost te se mogu koristiti na cesti, ali i izvan nje. Moguće su različite konfiguracije s brojem osovina, ali i po pitanju pogona kao što je rečeno u ranijim poglavljima.



Slika 42. Koncept modularne prikolice

U ovom konceptu se prikolica sastoji od dva modula od kojih svaki ima 5 osovina. Masa pojedinog modula iznosi oko 14 t. Ukoliko se razmatra vožnja izvan ceste i pri malim brzinama, osovinsko opterećenje može iznositi 45 t/osovini te nosivost pojedinog modula može iznositi 225 t.

4.5. Prednosti i nedostaci koncepata prikolice

Nakon razmatranja koncepata prikolica vidljive su njihove prednosti i nedostaci. Kao što je već ranije rečeno, niskopodna prikolica omogućava prijevoz visokih tereta te omogućava zadovoljavanje maksimalne dopuštene visine. S obzirom da ispod spuštenog dijela nema osovina, taj dio mora biti izrađen od izrazito čvrstog materijala kako ne bi došlo do savijanja i pucanja. Također kako bi iskoristili glavnu prednost niskopodne prikolice potrebno je da spuštenu dio bude duži od duljine spremnika zbog čega se povećava njegovo opterećenje. Kod prijevoza spremnika iskorištenog nuklearnog goriva, u ovom slučaju CASTOR spremnika, nije toliko ključna stavka visina jer se spremnik postavlja u horizontali položaj.

Najveća prednost teleskopske prikolice je što ima mogućnost prilagođavanja svoje duljine te omogućava prijevoz tereta velikih duljina, ali u ovom slučaju to nije od velike važnosti. Ona je konstruirana za transport tereta kada je duljina glavni faktor, a ne masa zbog čega i nema veliku nosivost.

Modularne prikolice imaju izrazito veliku nosivost te se mogu prilagoditi prema duljini, širini i nosivosti. Mogu se kombinirati moduli s različitim brojem osovina te se mogu pogoniti na različite načine. S obzirom da je njihovo osovinsko opterećenje 45 t/osovini pri manjim brzinama dopušteno samo izvan ceste odnosno unutar nekog postrojenja, za prijevoz na cesti potrebno ga je prilagoditi.

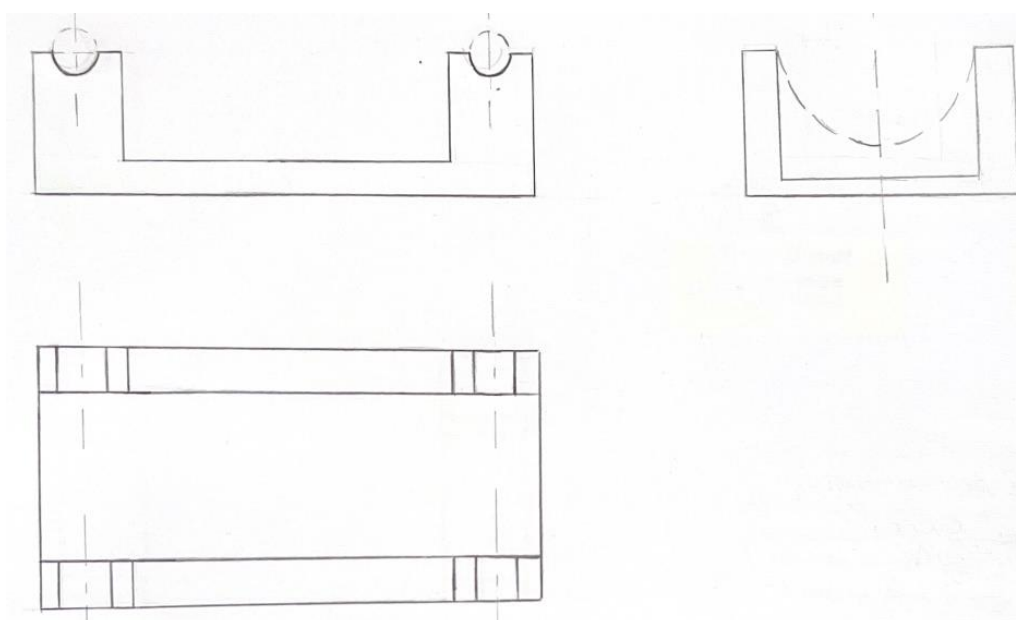
Polu niske prikolice imaju nešto manju nosivost od modularnih prikolica, ali mogu lakše sudjelovati u normalnom cestovnom prometu. Jeftinije su od modularnih prikolica te su jednostavnije za održavanje.

5. KONCIPIRANJE NADOGRADNJE

U ovom poglavlju su razmatrani koncepti nadogradnji koje se najviše razlikuju po svojoj funkcionalnosti, od nadogradnji nepromjenjivih dimenzija do nadogradnji koje mogu promijeniti duljinu.

5.1. Nadogradnja nepromjenjivih dimenzija

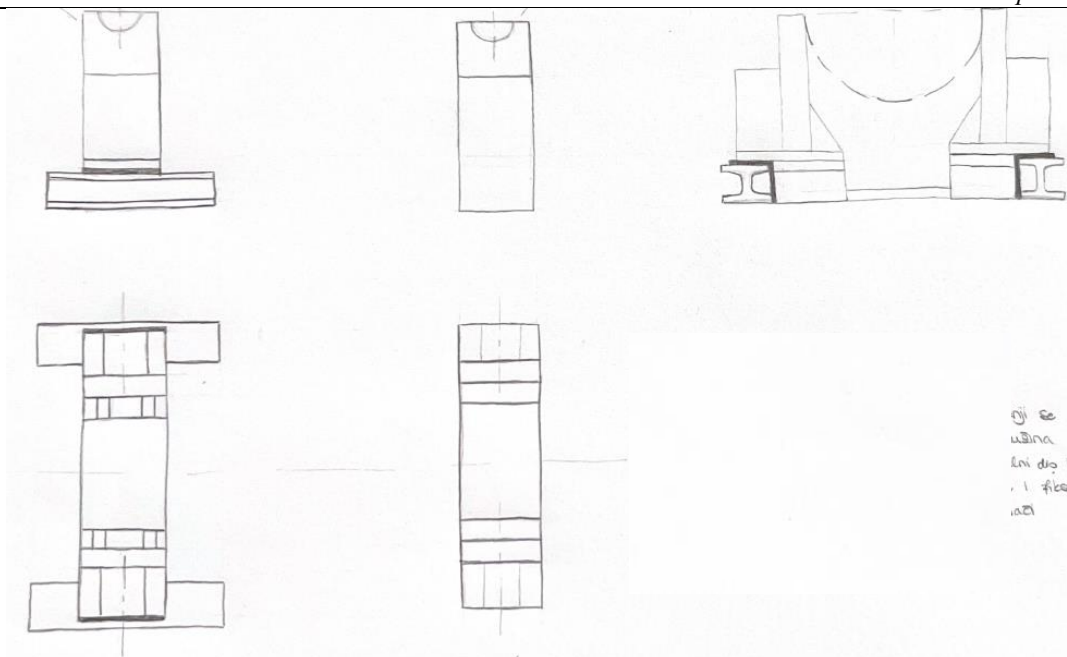
Na slici 43. je prikazan koncept u kojem je izvedena jednostavna nadogradnja nepromjenjivih dimenzija odnosno prilagođena je isključivo jednom spremniku te ju nije moguće koristiti za prijevoz spremnika drugačijih dimenzija.



Slika 43. Koncept nadogradnje nepromjenjivih dimenzija

5.2. Nadogradnja promjenjive duljine – varijacija 1

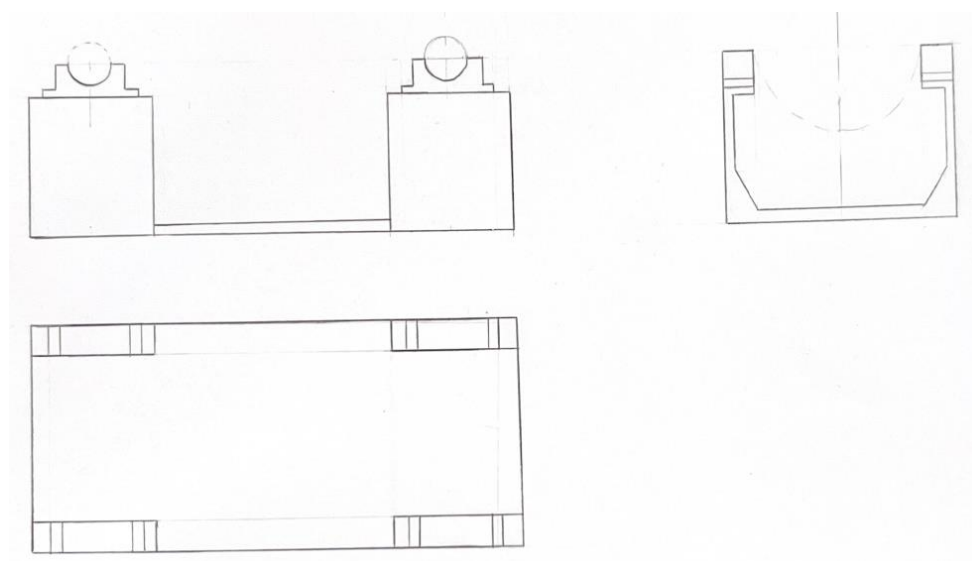
Na slici 44. prikazan je koncept nadogradnje gdje je omogućena promjena duljine spremnika. Prednji stup je fiksiran, a stražnji stup se pomiče po I-profilu. I-profil se fiksira na šasiju te su postavljeni graničnici kako stup ne bi ispao s I-profila. Između stupa i I-profila je potrebno postaviti klizni sloj kako se materijal ne bi trošio.



Slika 44. Koncept nadogradnje promjenjive duljine – varijacija 1

5.3. Nadogradnja promjenjive duljine – varijacija 2

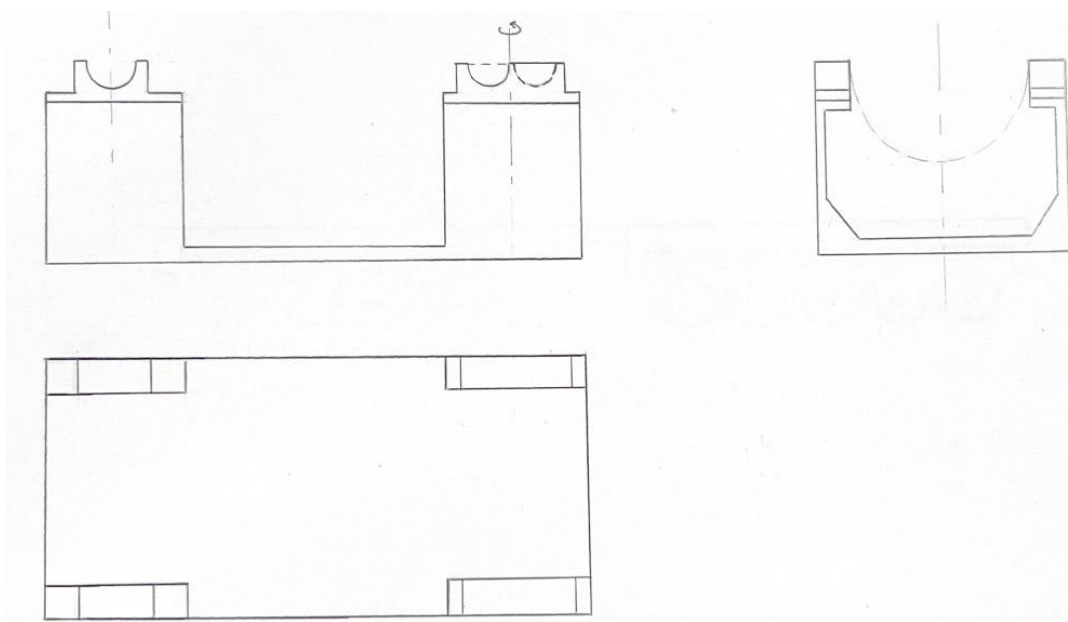
U ovom konceptu je jednostavnije razrađena promjena duljine nadogradnje kako bi se nadogradnja mogla prilagoditi različitim spremnicima. Stupovi nadogradnje su fiksni, ali je omogućeno pomicanje gornjeg dijela stupa koje vrlo jednostavno može pomicati jedna osoba. Nije potrebno pomicati oba gornja stupa, dovoljno je pomaknuti na primjer samo stražnji gornji stup. Gornji dio stupa je povezan vijčanom vezom sa glavnim stupom.



Slika 45. Koncept nadogradnje promjenjive duljine – varijacija 2

5.4. Nadogradnja promjenjive duljine – varijacija 3

Na slici 46. je također prikazan koncept s mogućom promjenom duljine. Prednji dio koji je bliže tegljaču, je osmišljen kao u prethodnom konceptu da bude fiksno odnosno da se ne treba pomicati te su gornji dijelovi stupa povezani vijčanom vezom na glavni stup. Na stražnjoj strani se nalazi gornji dio stupa koji nije simetričan tj. provrt se ne nalazi na simetrali. Kako bi se promijenila duljina potrebno je zakrenuti gornji dio stupa za 180° oko vertikalne osi.



Slika 46. Koncept nadogradnje promjenjive duljine – varijacija 3

5.5. Prednosti i nedostaci koncepata nadogradnji

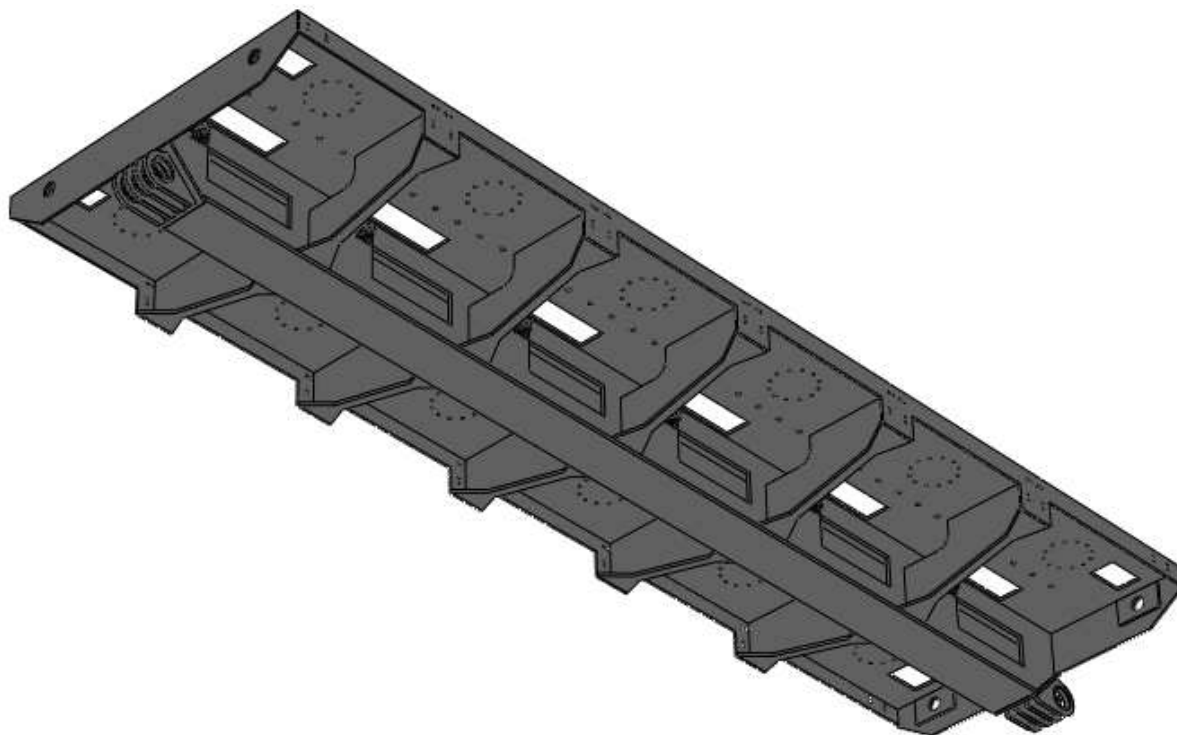
Nakon razmatranja koncepata nadogradnji vidljive su njihove prednosti i nedostaci. S obzirom da je u cilju ovog rada koncipiranje prikolice za prijevoz više vrsta spremnika odnosno spremnika različitih duljina, nije potrebno dalje razmatrati koncept nadogradnje nepromjenjivih dimenzija. Za daljnju razradu odabran je koncept nadogradnje promjenjive duljine varijacije 3 zbog lakoće i jednostavnosti prilagodbe za spremnik drugih dimenzija te za razliku od varijacije 2 ima manju mogućnost pogrešnog postavljanja.

6. KONSTRUKCIJSKA RAZRADA

Nakon razrade koncepta potrebno je konstrukcijski razraditi odabrana rješenja prikolice, nadogradnje i pojedinih komponenti koja su prikazana u nastavku.

6.1. Šasija

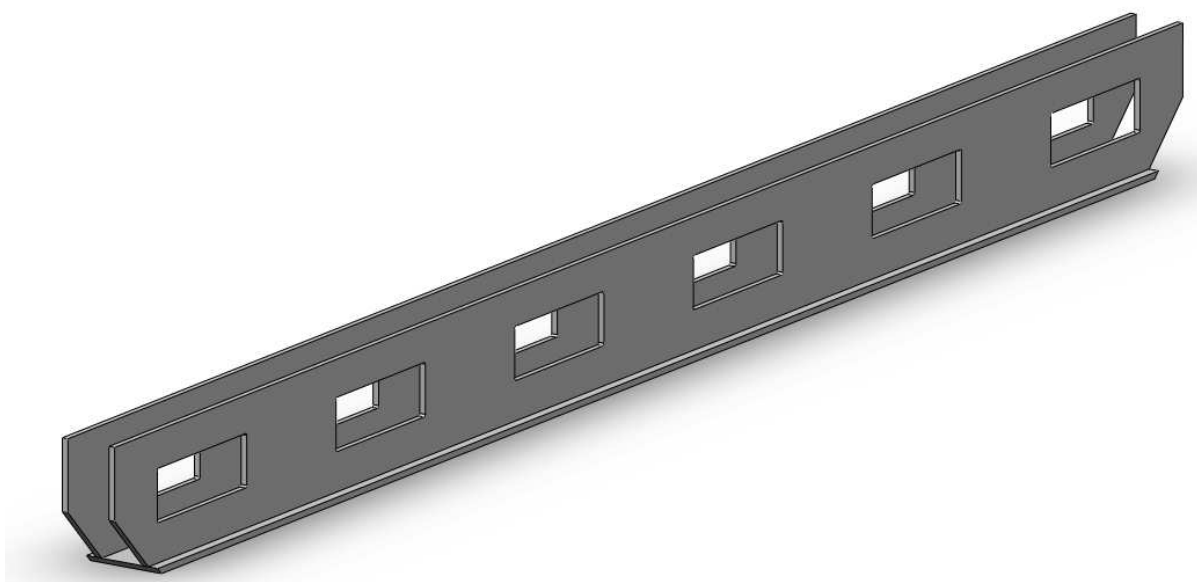
Prilikom konstrukcijske razrade šasije važan kriterij je masa tereta koja prelazi uobičajena dopuštena ograničenja odnosno ovdje se konstrukcijski razrađuje prikolica za izvanredni prijevoz. Potrebno je konstruirati šasiju koja može podnijeti takvo opterećenje, a da se duljinom i širinom nastoji ostati unutar dopuštenih dimenzija vozila. Konačno rješenje šasije modula je prikazano na slici 47. Šasija je izrađena zavarivanjem pojedinih komponenti koje su prikazane u nastavku. Sve komponente koje su bitne za čvrstoću šasije, kao uzdužni i poprečni nosači, podna ploča i stranice šasije, su izrađene od čelika visoke čvrstoće N-A-XTRA 700 zbog visoke čvrstoće i dobre zavarljivosti.



Slika 47. Šasija modula

6.1.1. Uzdužni nosač šasije

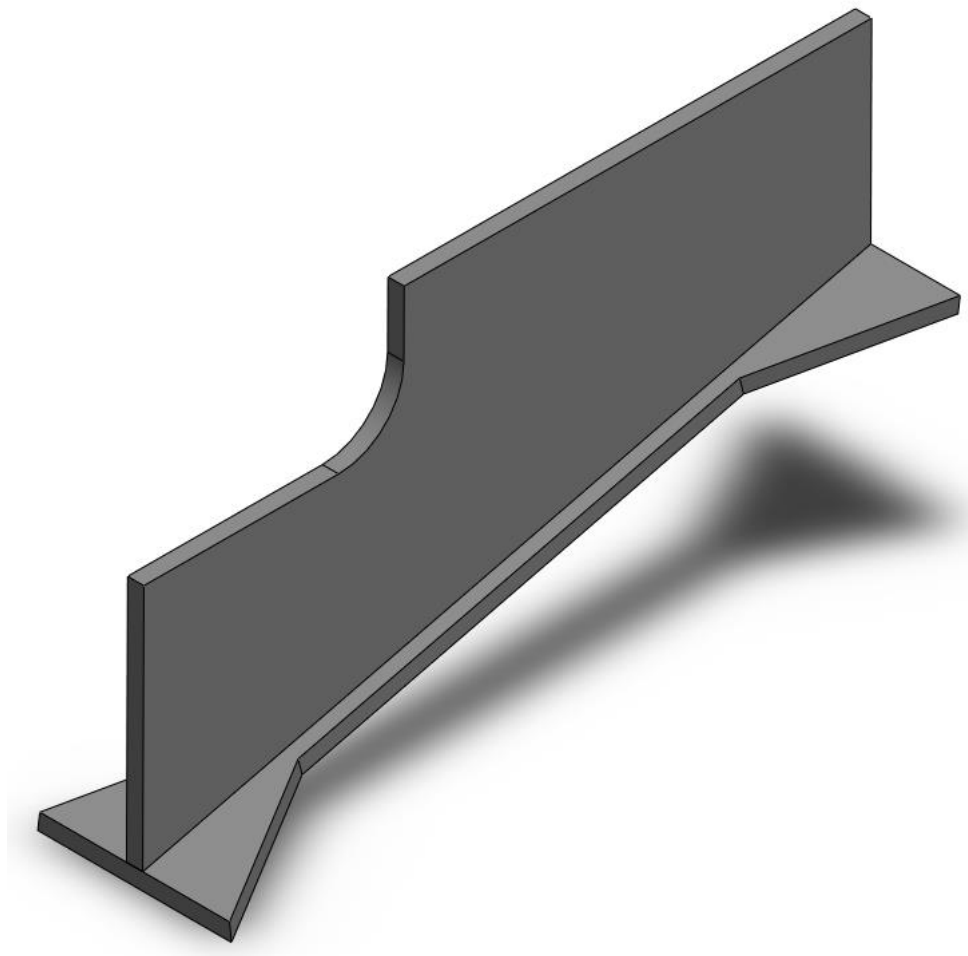
Uzdužni nosač je najvažnija komponenta za osiguravanje čvrstoće šasije i minimalnog savijanja. U-presjek odabran je radi jednostavnijeg montiranja, smanjene mase i osiguravanja prostora za hidrauliku te instalaciju kočnica i svjetlosno-signalne opreme. Proračun uzdužnog nosača je u poglavlju Proračuni. Presjek je sastavljen od dvije vertikalne i jedne horizontalne ploče debljina 30 mm koje su međusobno zavarene. Na vertikalnim pločama dodatno su izvedeni otvori s dvostrukom funkcijom, smanjenje mase i pristup instalacijama smještenim unutar uzdužnog nosača. Otvori imaju radijuse zaobljenja u kutovima da ne bi bili mjesta koncentracije naprezanja i potencijalna mjesta pukotina prilikom velikog opterećenja.



Slika 48. Uzdužni nosač šasije

6.1.2. Poprečni nosači šasije

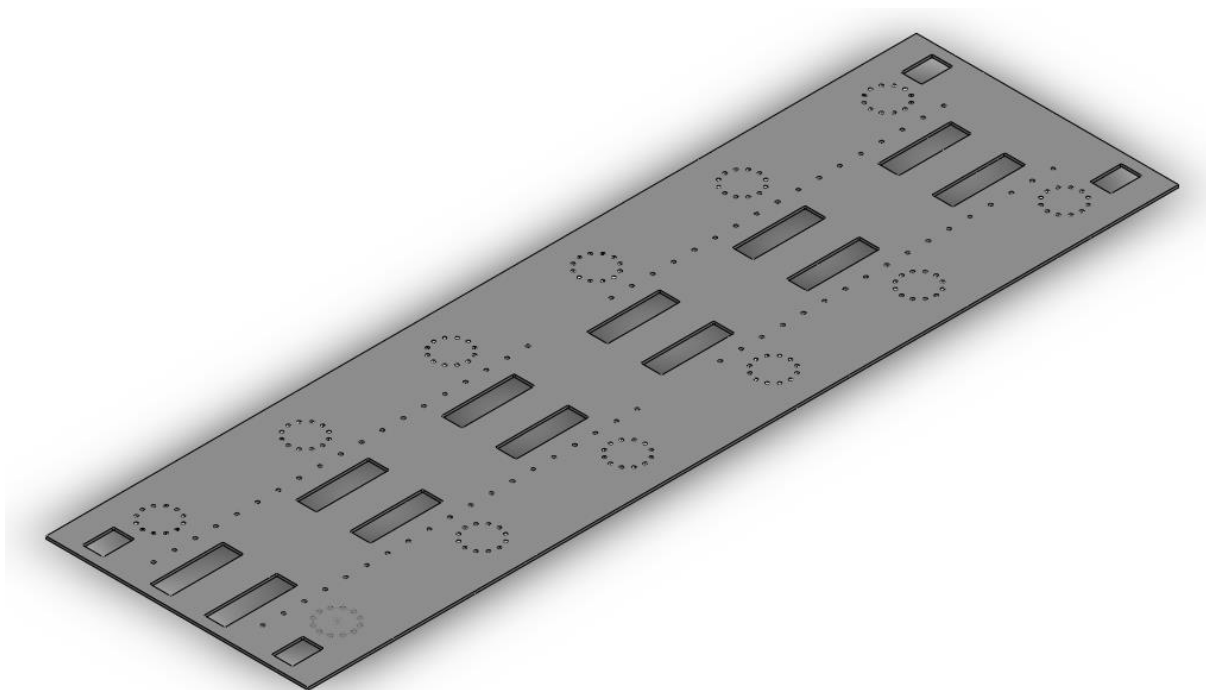
Poprečni nosači služe kao dodatno osiguranje čvrstoće šasije. Odabran je I-presjek radi odlične otpornosti na savijanje i izdržljivosti vertikalnih opterećenja te radi omogućavanja prostora kotačima za zakret i podizanje/spuštanje osovina. Debljine limova su 25 mm. Otvor u vertikalnom rebru ima sličnu funkciju kao i otvori u uzdužnom nosaču.



Slika 49. Poprečni nosač šasije

6.1.3. Podna ploča šasije

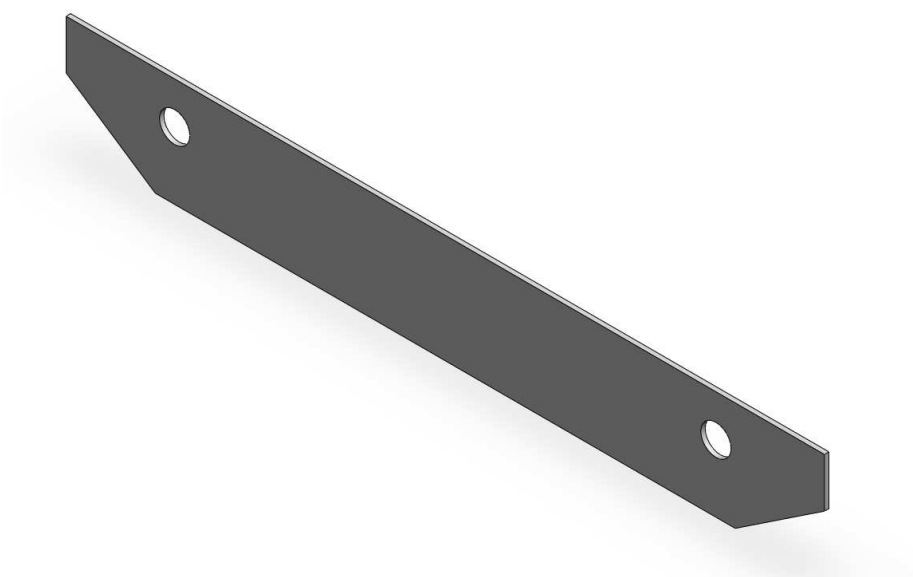
Podna ploča šasija je izrađena s otvorima radi omogućavanja lakšeg pristupa pojedinim komponentama kao što su na primjer hidraulički cilindri i vijci za povezivanje modula. Uz to im je i prednost smanjivanje mase. Otvori su izrađeni sa radijusima zaobljenja kutova kako ne bi bili mjesta koncentracije naprezanja. Debljina podne ploče šasije je 25 mm. Podna ploča zavaruje se u cjelinu odnosno osnovnu nosivu strukturu šasije s uzdužnim i poprečnim nosačima.



Slika 50. Podna ploča šasije

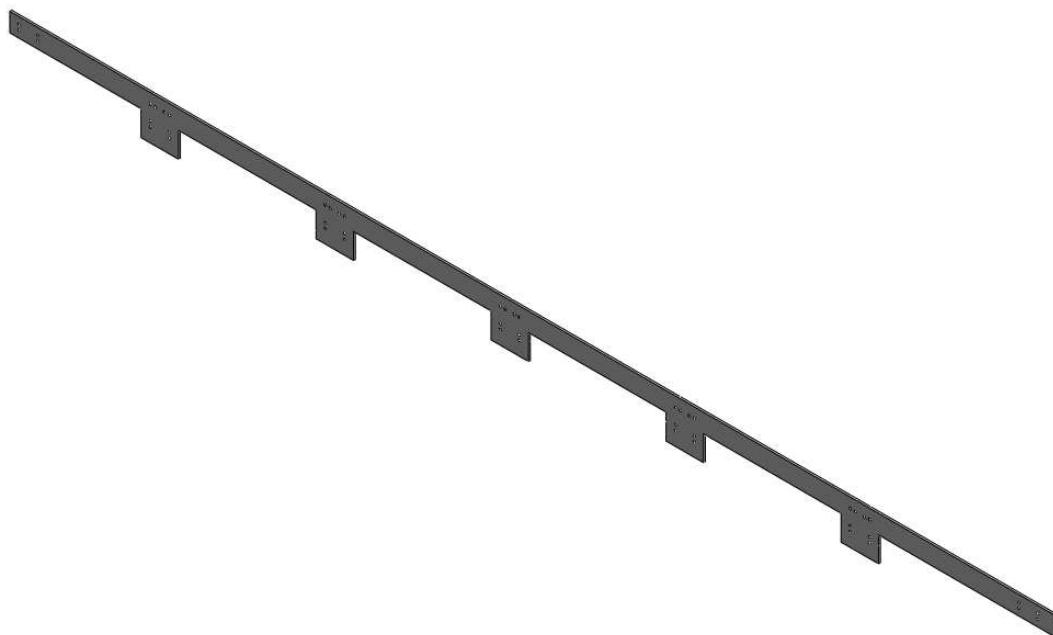
6.1.4. Prednje/stražnje ploče i bočne ploče

Prednje i stražnje ploče imaju provrte za dodatno povezivanje modula vijcima kao što je vidljivo na slici 51. Debljina ploče je 15 mm.



Slika 51. Prednja/stražnja ploča šasije

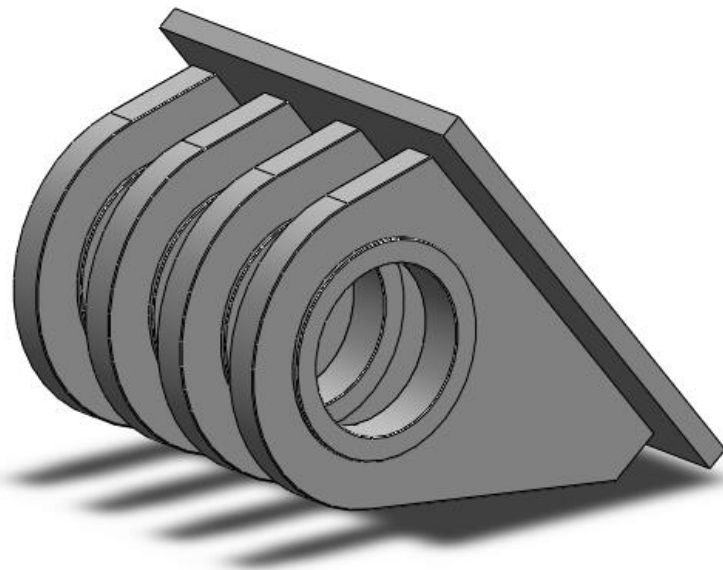
Bočne ploče imaju provrte za elemente za kruto povezivanje koji povezuju šasiju i nadogradnju te također imaju provrte za pričvršćenje ograde za zaštitu kotača. Debljina ploče je 15 mm.



Slika 52. Bočna ploča šasije

6.1.5. Ušice za povezivanje modula

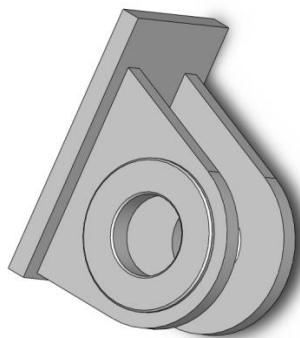
Ušice služe za povezivanje modula sa sklopom s vučnim svornjakom, samohodnim modulom ili drugim modulom. S obzirom da se ušice nalaze na prednjem i na stražnjem dijelu modula, moguće je povezivanje više od 2 modula.



Slika 53. Ušica za povezivanje modula

6.1.6. Nosači za hidrauličke cilindre za zakret kotača

Nosači za hidrauličke cilindre se nalaze na uzdužnoj gredi. Služe za čvrsto oslanjanje hidrauličkog cilindra kako bi se omogućio zakret kotača. Nosači se zavaruju za šasiju iako bi rješenje moglo biti i rastavljiva vijčana veza.

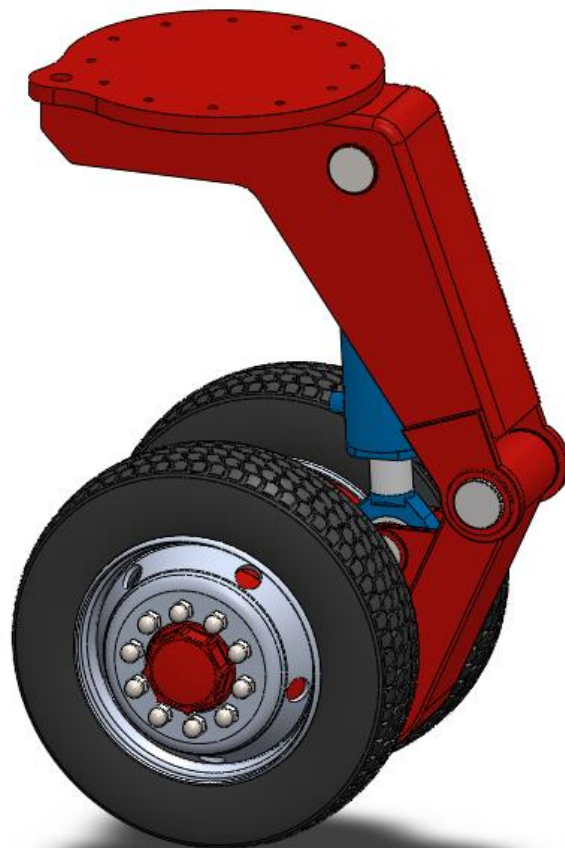


Slika 54. Nosač hidrauličkog cilindra za zakret kotača

6.2. Sklop kotača

Sklop kotača nije detaljno modeliran. Iz GrabCAD-a je preuzet model pneumatika 245/70/R17.5 [33]. Te dimenzije kotača su odabrane zbog dobre stabilnosti, povećane nosivosti i kao uobičajena dimenzija pneumatika na prikolicama slične namjene. Sklop kotača ima hidraulički cilindar za podizanje odnosno spuštanje modula te ima provrt za prihvat hidrauličkog cilindra za zakretanje kotača. Ovakav tip osovina omogućuje svaka osovina

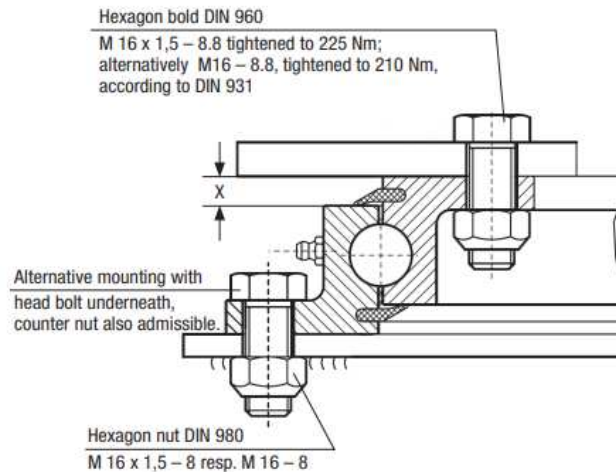
prikolice, unutar iste ravnine, ima različit kut zakreta, čime se omogućava bolja upravljivost i prilagodljivost u zavojima za vozila velikih duljina. Sklop kotača izveden je prema modelu iz GrabCAD-a [34].



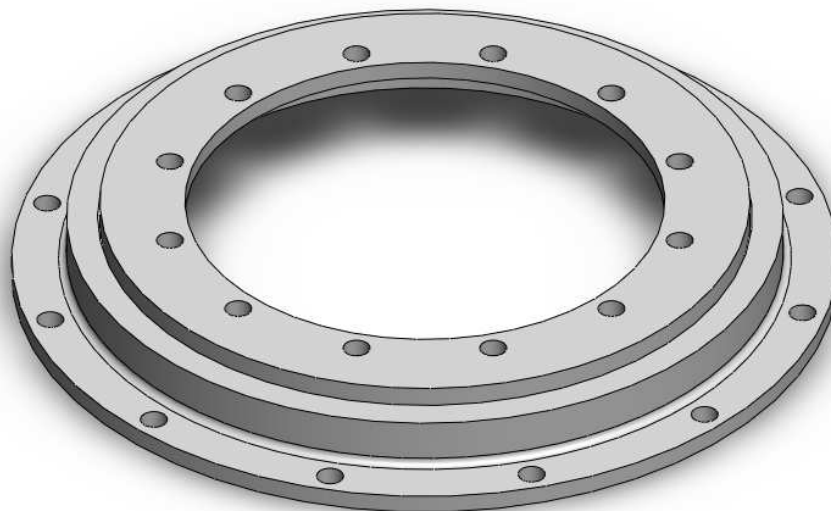
Slika 55. Sklop kotača 245/70/R17.5 izveden prema [34]

6.2.1. Povezivanje sklopa i šasije modula

Sklop kotača se sa šasijom povezuje pomoću okretnog prstena kako bi bio moguć zakret osovina odnosno kotača. Okretni prsten je odabran od proizvođača JOST model KDL 900-1 [34]. Pričvršćuje se na šasiju odnosno na sklop kotača po uputama proizvođača. Za povezivanje se koristi barem 12 vijaka M16x1,5 kvalitete 8.8 po prirubnici. Potrebno je osigurati podmazivanje kugličnih ležajeva pomoću 8 konusnih mazalica.

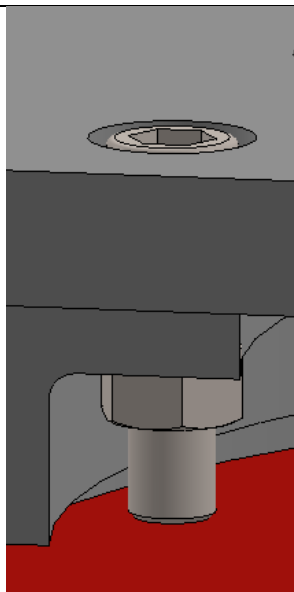


Slika 56. Okretni prsten JOST KDL900-1 – postavljanje prstena [35]

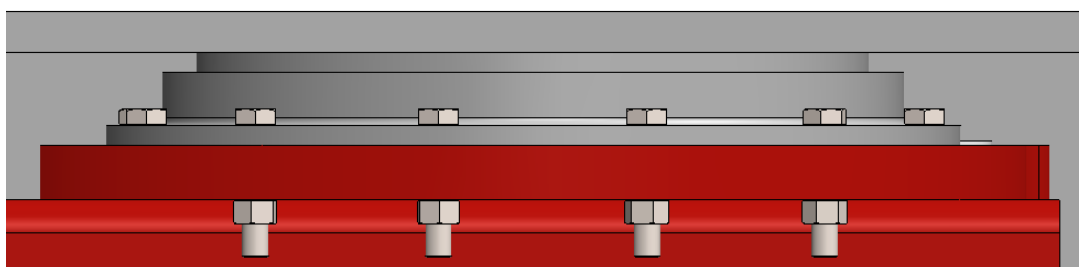


Slika 57. Okretni prsten JOST KDL900-1

Na slici 58. prikazan je spoj gornje prirubnice okretnog prstena sa šasijom, a na slici 59. je prikazan spoj donje prirubnice okretnog prstena sa sklopom kotača. Za spoj gornje prirubnice na podnoj ploči šasije izvedena su upuštenja za vijke kako bi gornja površina poda ostala ravna bez elemenata koji strše te eventualno smetaju smještaju nadogradnje.



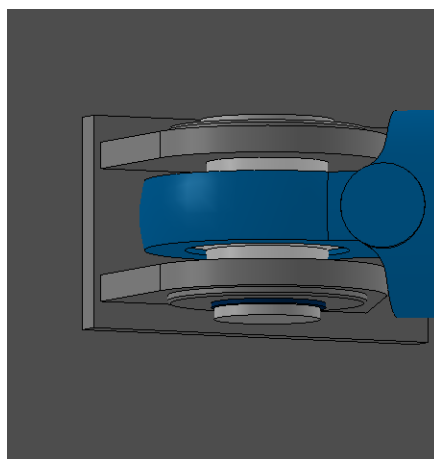
Slika 58. Spoj okretni prsten - šasija



Slika 59. Spoj okretni prsten – sklop kotača

6.2.2. Spoj hidrauličkog cilindra i šasije

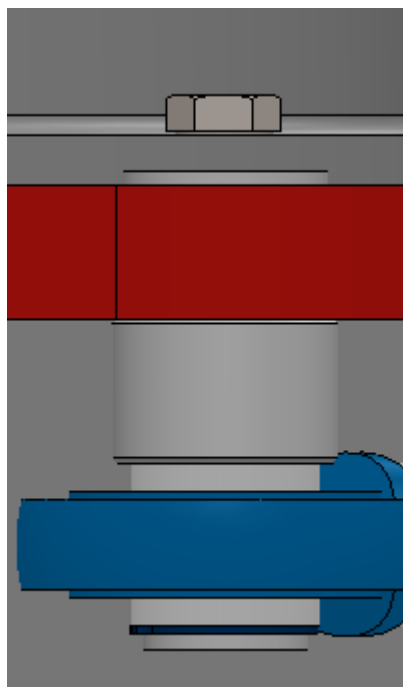
Spoj hidrauličkog je izveden pomoću nosača hidrauličkog cilindra i osovine, a osiguran je uskočnikom. Prikazan je na slici 60.



Slika 60. Spoj hidrauličkog cilindra sa šasijom

6.2.3. Spoj hidrauličkog cilindra i sklopa kotača

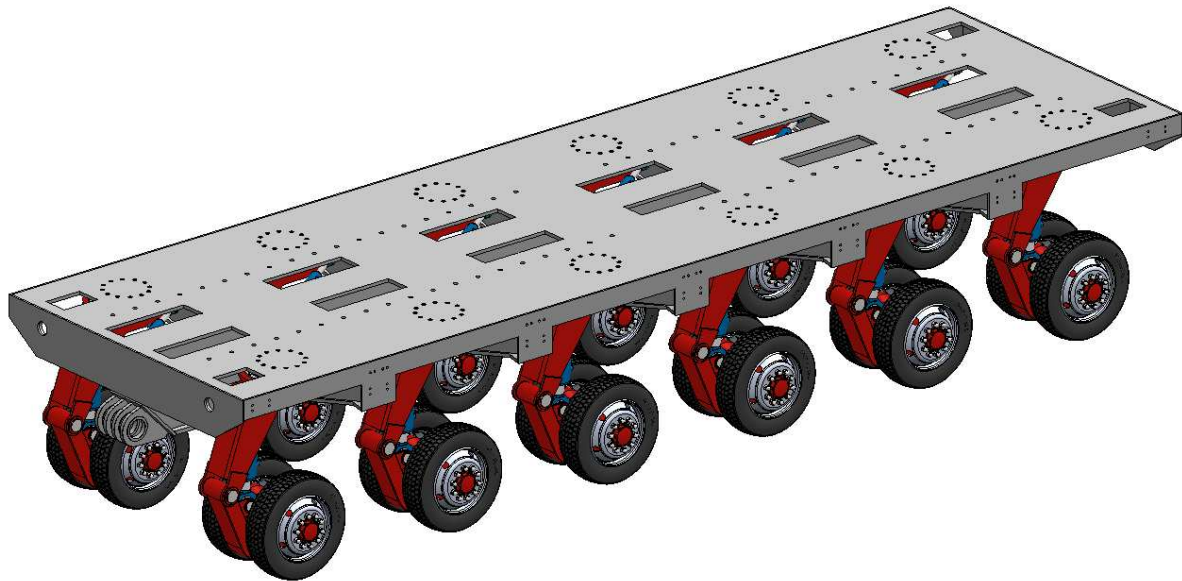
Na slici 61. prikazan je spoj hidrauličkog cilindra i sklopa kotača koji je izveden s osovinom i čahuricom, a osiguran uskočnikom. Čahurica služi za omogućavanje slobodnog prostora hidrauličkom cilindru za pomicanje prilikom zakretanja kotača.



Slika 61. Spoj hidrauličkog cilindra sa sklopom kotača

6.3. Modul prikolice

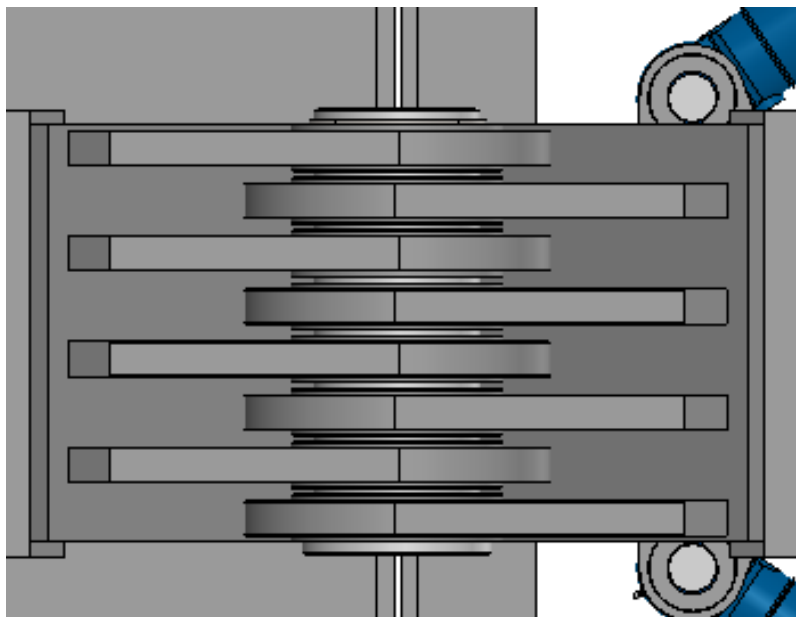
Na slici 62. je prikazan modul prikolice sa svim komponentama. Modul ima šest osovina odnosno 12 sklopova kotača. Duljina modula iznosi 8400 mm, a širina 2550 mm. Moguća je promjena visine prikolice. Visina prikolice je 1525 ± 175 mm. Većina modula kod drugih proizvođača ima osovinsko opterećenje od približno 45 t/osovini. Međutim, s obzirom na to da je ovaj modul namijenjen i za upotrebu na prometnicama, osovinsko opterećenje prilagođeno je na 15 t/osovini. Ukupna nosivost prikolice, određena uzimajući u obzir masu modula, nadogradnje i opterećenje koje preuzima tegljač, iznosi oko 160 t.



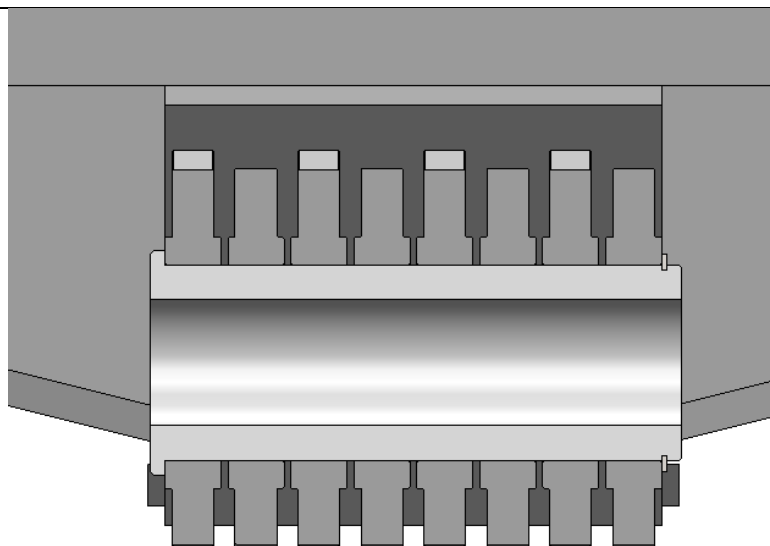
Slika 62. Modul prikolice

6.3.1. Spoj dva modula svornjakom

Dva modula se povezuju ušicama na oba modula, svornjakom i uskočnikom.



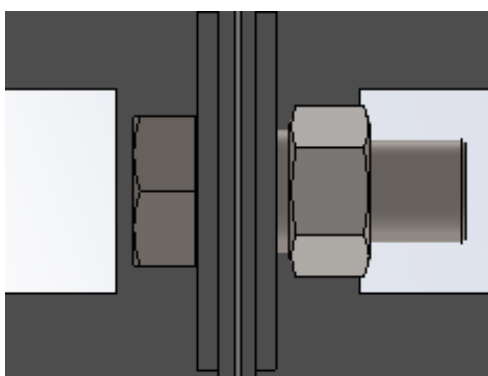
Slika 63. Spoj modula sa svornjakom



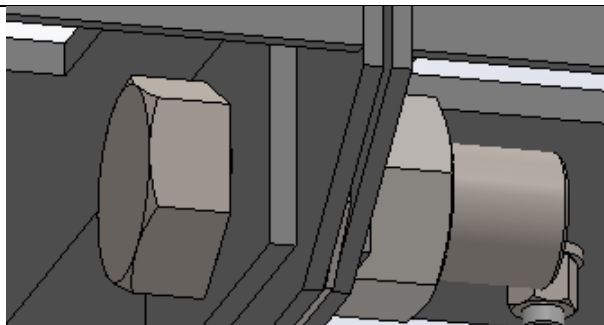
Slika 64. Presjek spoja modula sa svornjakom

6.3.2. Spoj dva modula vijcima

Moduli se dodatno povezuju i s dva vijka M100 kvalitete 8.8. Na šasiju je zavarena pločica kako bi se osigurala dovoljna debljina ploče za spoj. Glavno opterećenje spojenih modula preuzima ranije spomenuti svornjak koji povezuje ušice odnosno module. Ovaj vijčani spoj koji je opterećen samo na vlak eventualno bi se mogao izvesti i postavljanjem čahura na oba modula i spajanjem dosjednim vijkom sličnih dimenzija.



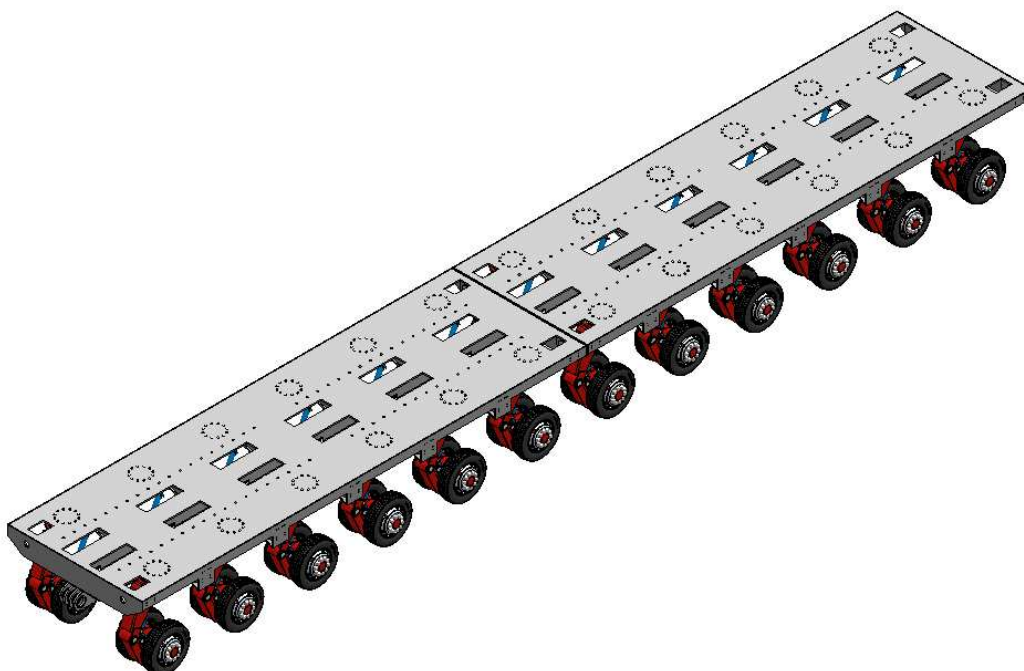
Slika 65. Spoj dva modula sa vijkom – gornji tlocrt



Slika 66. Spoj dva modula sa vijkom

6.3.3. Sklop 2 modula

Na slici 67. je prikazan sklop dva modula, a kao što je ranije rečeno moguće je povezati i više modula.

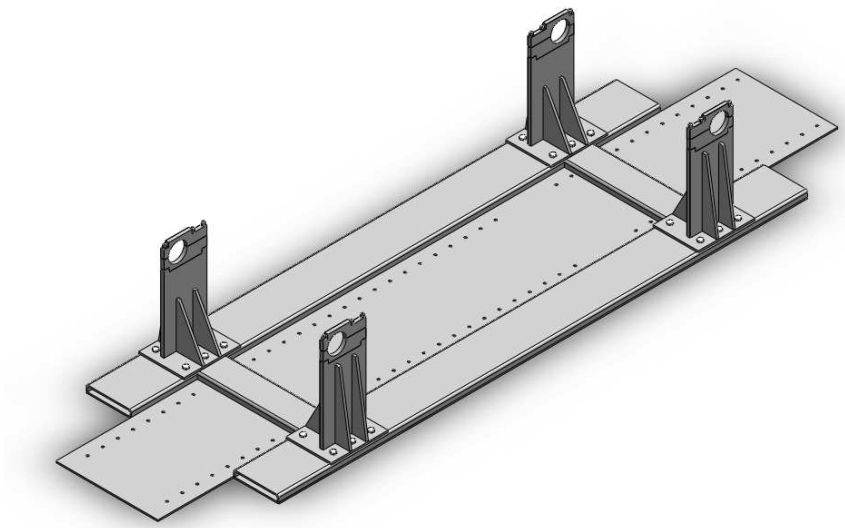


Slika 67. Sklop 2 modula

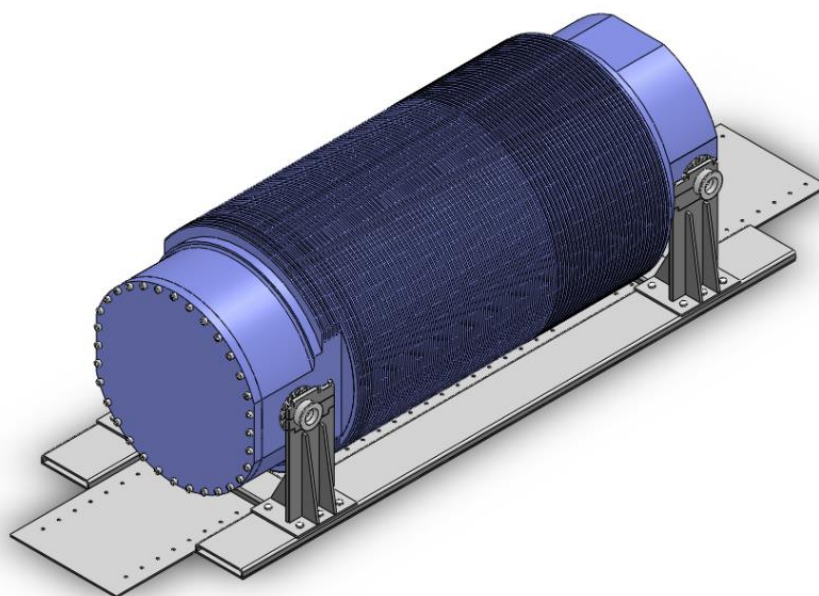
6.4. Nadogradnja

Nadogradnja je konstruirana tako da se može prilagoditi i za prijevoz spremnika CASTOR V/19 i CASTOR V/52. Nadogradnja se sastoji od podkonstrukcije, ploče stupa, stupa, nosača i poklopca nosača. Model spremnika preuzet je s platforme GrabCAD [36] te je skaliran kako

bi odgovarao stvarnim dimenzijama, budući da je izvorno izrađen u mjerilu 1:25. Međutim, ni nakon skaliranja sve dimenzije nisu bile u potpunosti točne, pa je model korišten samo kao približna osnova za daljnju razradu.



Slika 68. Nadogradnja

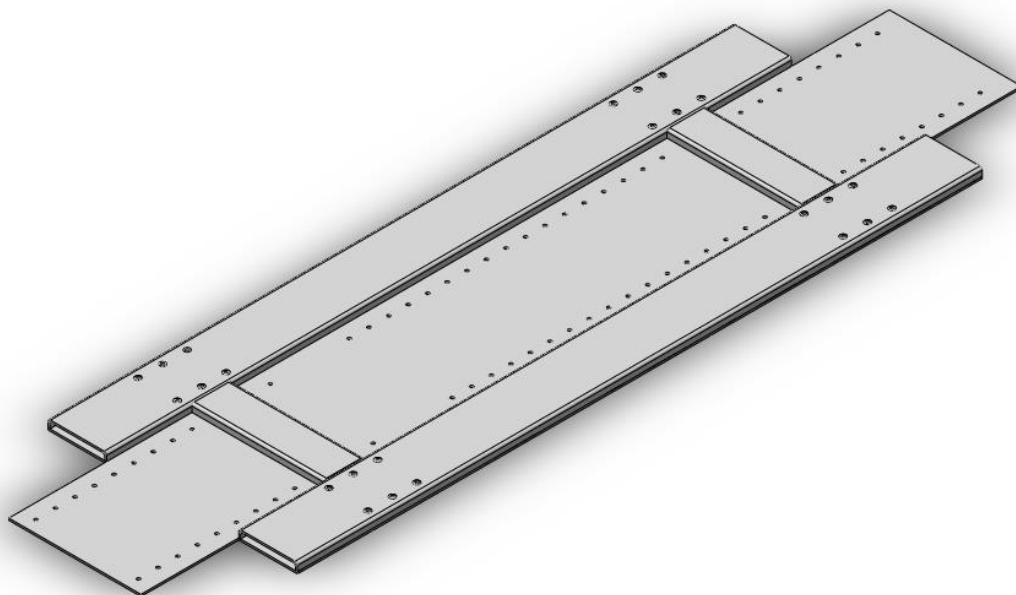


Slika 69. Nadogradnja sa spremnikom CASTOR V/19

6.4.1. Podkonstrukcija nadogradnje

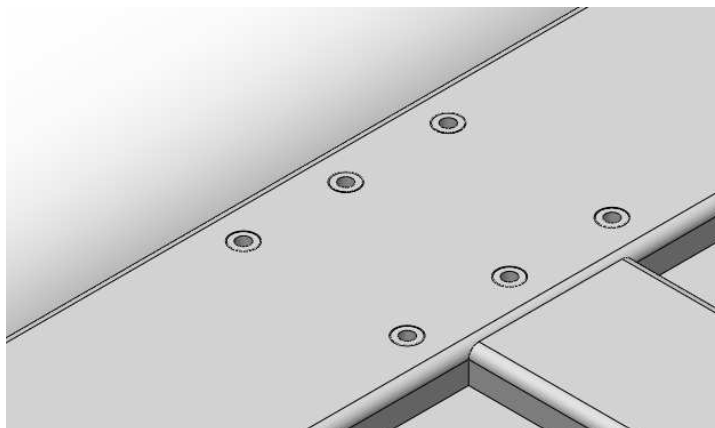
Na slici 70. prikazana je podkonstrukcija nadogradnje. Izrađena je rezanjem ploče te se neki dijelovi savijaju u C-profil. Zatim se C-profil zavaruju za ploču. Podkonstrukcija se koristi

kako bi osigurala veću krutost i ravnomjernije raspoređuje opterećenje nadogradnje na što veće područje prikolice. Također pridonosi prigušivanju vibracija. Provrti na središnjoj ploči služe za povezivanje nadogradnje odnosno podkonstrukcije sa šasijom. Dodatno se pričvršćuje na bočnu stranicu prikolice elementima za kruto povezivanje. Debljina lima iz kojeg je rezana i sastavljena podkonstrukcija je 20 mm.

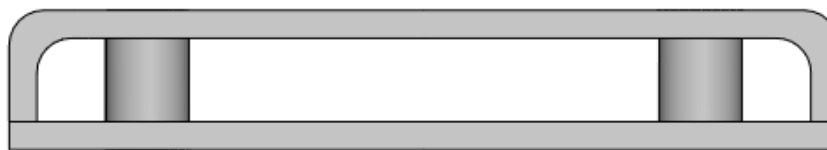


Slika 70. Podkonstrukcija nadogradnje

Na slikama 71. i 72. vidljive su čahurice sa navojem koje služe za povezivanje stupa nadogradnje sa podkonstrukcijom. Čahurice su zavarene s vanjske strane C-profila i sa vanjske strane ravne ploče.



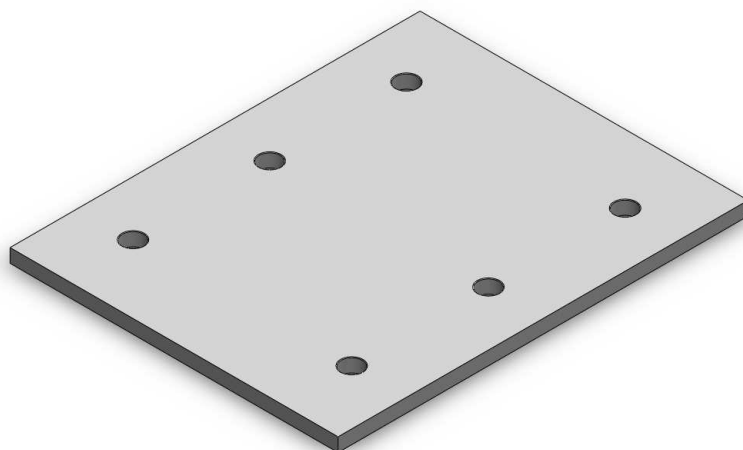
Slika 71. Čahurica sa navojem u podkonstrukciji



Slika 72. Čahurica s navojem

6.4.2. Ploča stupa nadogradnje

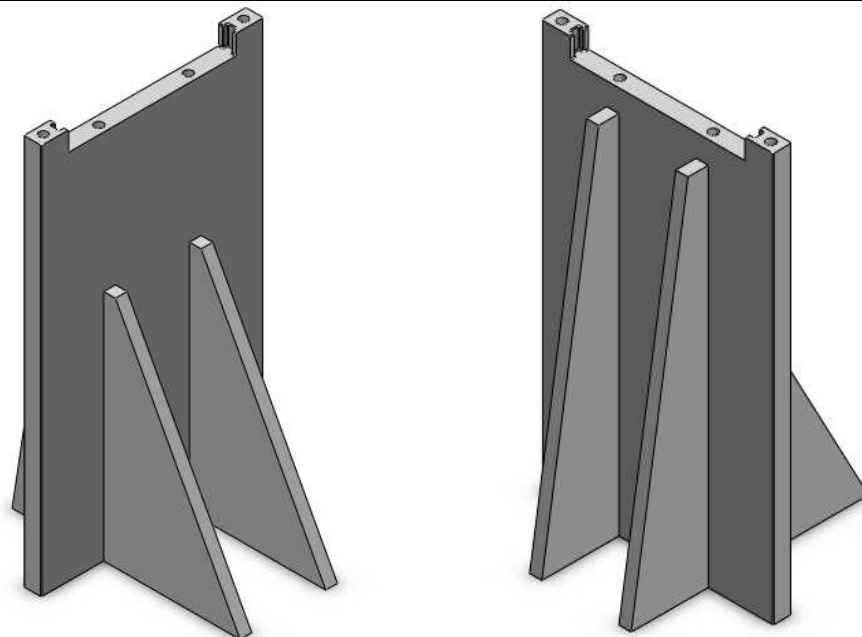
Ploča stupa vijcima se veže s podkonstrukcijom, a zavarena je sa stupom nadogradnje. Takva izvedba omogućava mobilnost stupa nadogradnje i olakšava njegovu ugradnju ili zamjenu ukoliko je potrebno. Moguće je napraviti dodatne provrte i čahurice u podkonstrukciji kako bi se mogli pomicati stupovi te bi se dobile dodatne mogućnosti prijevoza spremnika drugih duljina. Debljina lima je 25 mm.



Slika 73. Ploča stupa nadogradnje

6.4.3. Stup nadogradnje

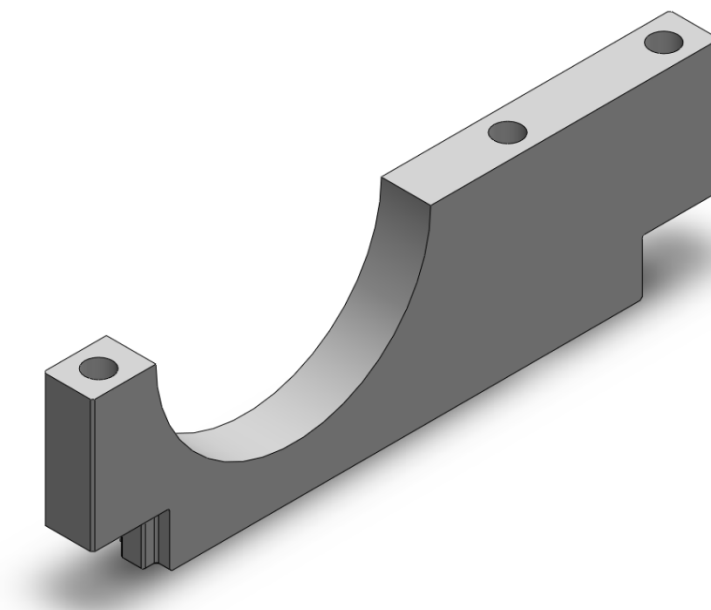
Stup nadogradnje osiguran je dodatno s rebrima koji su zavareni na sami stup. Na slici 74. lijevo prikazan je stup s unutarnjim rebrima koja su niža jer su ograničena spremnikom. Desno na slici su vanjska rebra stupa koja su viša. Na stupu se nalaze dva utora za bolje pozicioniranje nosača nadogradnje te djelomično pričvršćenje prije ugradnje vijka. Povišeni dijelovi na vrhu stupa služe kako bi se smanjila potrebna duljina vijka za spajanje poklopca nosača, nosača i stupa. Proračun stupa napravljen je u poglavlju Proračuni. Debljina lima iz kojeg je rezan stup je 45 mm.



Slika 74. Stup nadogradnje – prikaz unutarnjih i vanjskih rebra

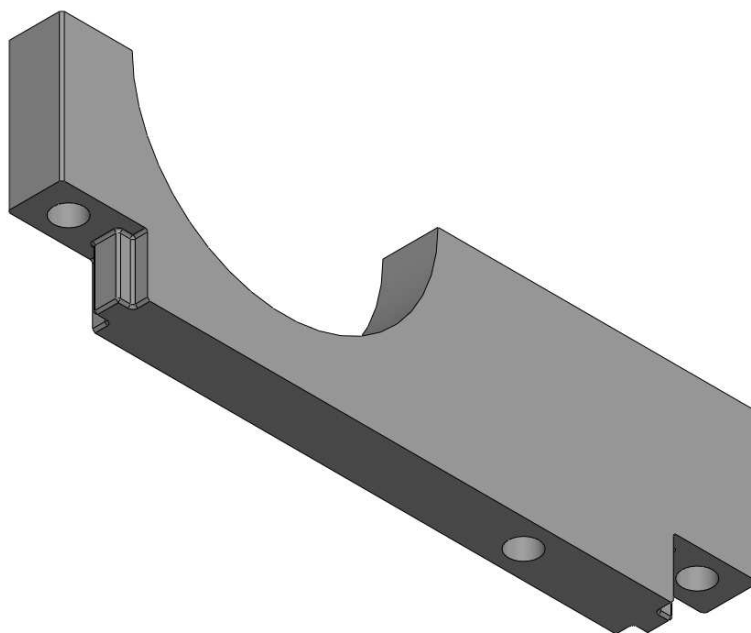
6.4.4. Nosač nadogradnje

Nosač nadogradnje nije simetričan te ima cilindrični utor za prihvat rukavca spremnika koji je zamaknut od osi zakreta kako bi se prilikom rotacije za 180° postigla nova udaljenost utora dva stupa. Ukoliko se zakrenu oba nosača, svaki za 180° dobiva se udaljenost rukavaca za postavljanje spremnika CASTOR V/52. Debljina lima iz kojeg je izrađen nosač nadogradnje je 45 mm.



Slika 75. Nosač nadogradnje

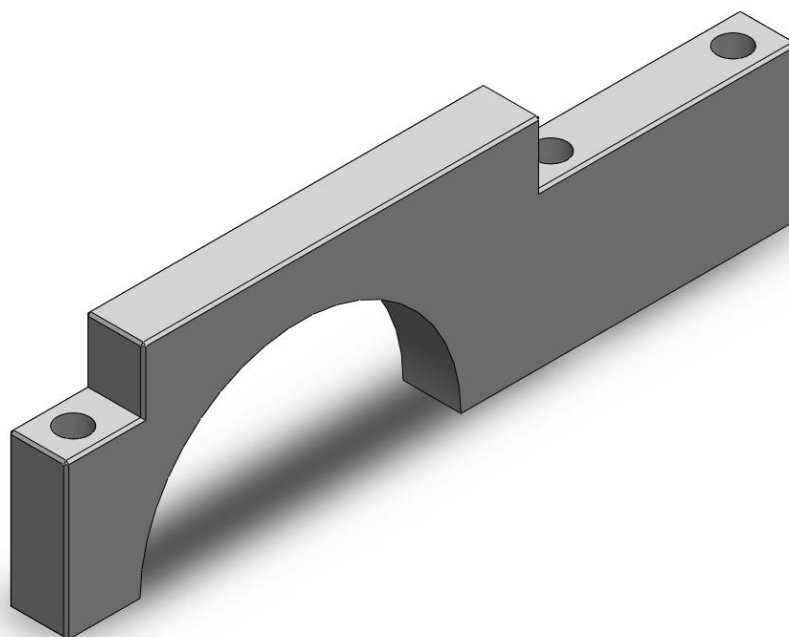
Na slici 76. se vide izbočenja za pozicioniranje koja odgovaraju utorima na stupu.



Slika 76. Prikaz izbočenja za pozicioniranje

6.4.5. Poklopac nadogradnje

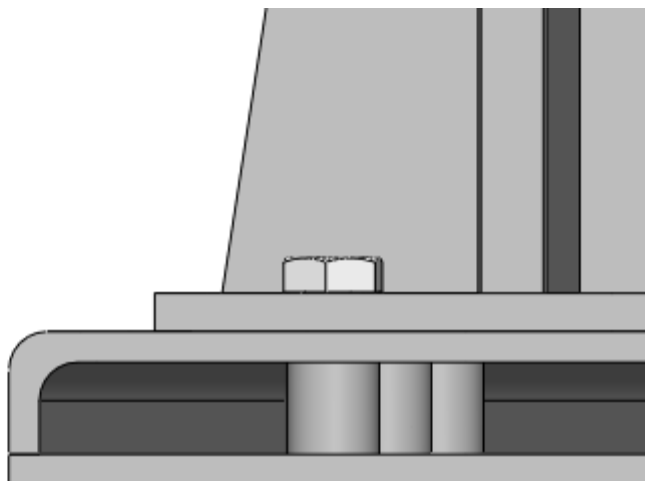
Na slici 77. prikazan je poklopac nosača koji, kao i nosač, nije simetričan te ima zamaknut cilindrični dio od osi zakreta. Potrebno ga je zakrenuti zajedno sa nosačem nadogradnje. Debljina lima iz kojeg je izrađen poklopac nadogradnje je 45 mm.



Slika 77. Poklopac nosača nadogradnje

6.4.6. Spoj stupa nadogradnje i podkonstrukcije

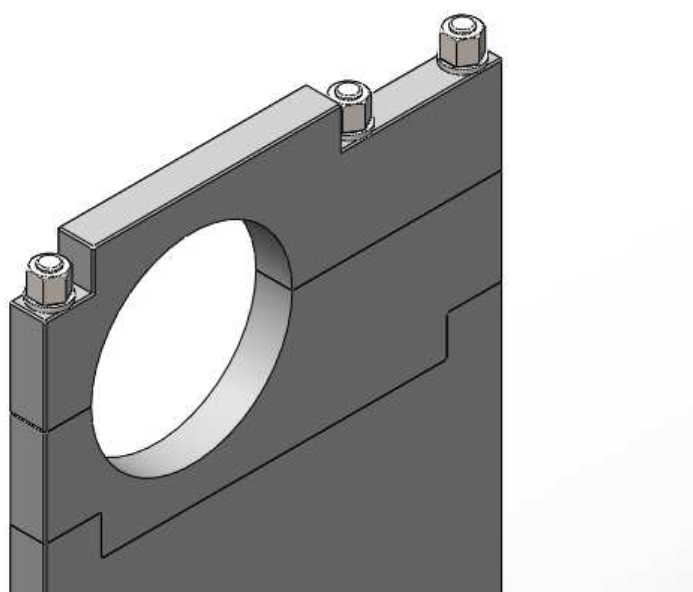
Kao što je ranije spomenuto, stup odnosno ploča stupa i podkonstrukcija se povezuju vijcima i navojnom čahuricom koja je zavarena u podkonstrukciju. Po stupu se postavlja 6 vijaka M36x90 kvalitete 8.8.



Slika 78. Spoj stupa nadogradnje i podkonstrukcije

6.4.7. Spoj stupa nadogradnje i nosača

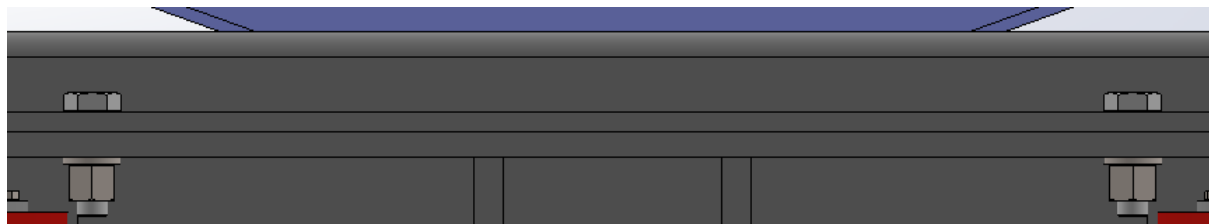
Za spoj stupa nadogradnje s nosačem i poklopcem nosača koristi se vijak odnosno navojna šipka M24.



Slika 79. Spoj poklopca nosača, nosača i stupa nadogradnje

6.4.8. Vijčani spoj nadogradnje i šasije

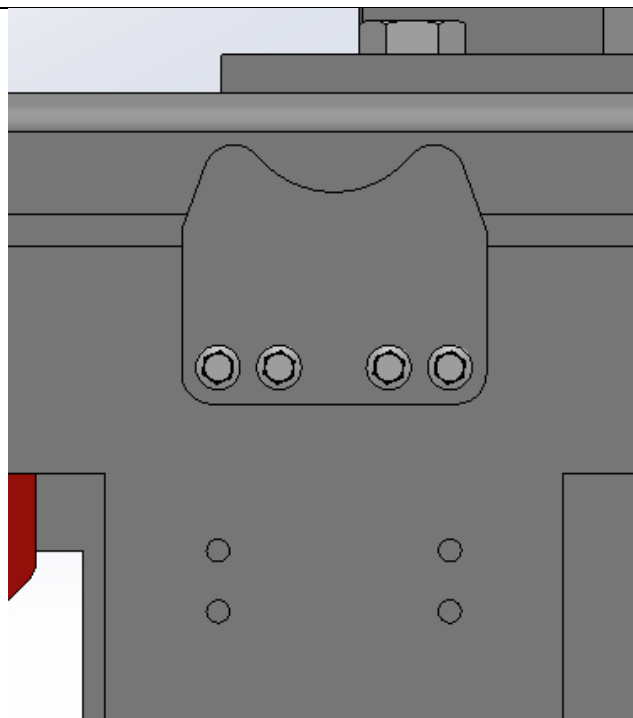
Nadogradnja i šasija se povezuju vijčanim spojem po duljini. Vijci su postavljeni u dva reda po 36 vijaka M30x105 kvalitete 8.8.



Slika 80. Vijčani spoj nadogradnje i šasije

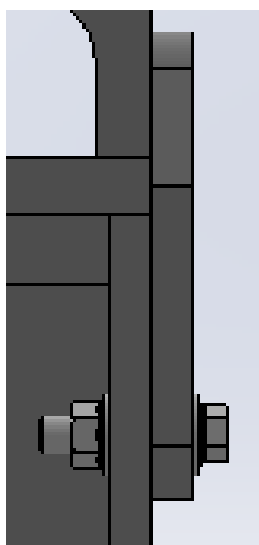
6.4.9. Elementi za kruto pričvršćenje nadogradnje i šasije

Nadogradnja odnosno podkonstrukcija nadogradnje i šasija se pričvršćuju elementima za kruto pričvršćenje. Uz postavljanje većeg broja elemenata za kruto pričvršćenje i u kombinaciji s vijcima po podu, konstrukcija bi se ponašala kao interakcijska odnosno povezani elementi se ponašaju kao cjelina. Osigurava se veća otpornost savijanju i izvijanju te se omogućava preuzimanje većih opterećenja. Ovdje je odabrana izvedba s ravnim nosačem koja je zavarena na podkonstrukciju. Ukoliko bi se željela izvesti rastavljiva izvedba, umjesto zavarivanja elementa na podkonstrukciju moguća je i izvedba u kojoj bi se u podkonstrukciji postavile čahure te se koristila vijčana veza kao i za spoj stupa nadogradnje s podkonstrukcijom.



Slika 81. Element za kruto pričvršćenje nadogradnje i šasije

Na slici 82. je prikazan vijčani spoj elementa za kruto pričvršćenje na šasiji.

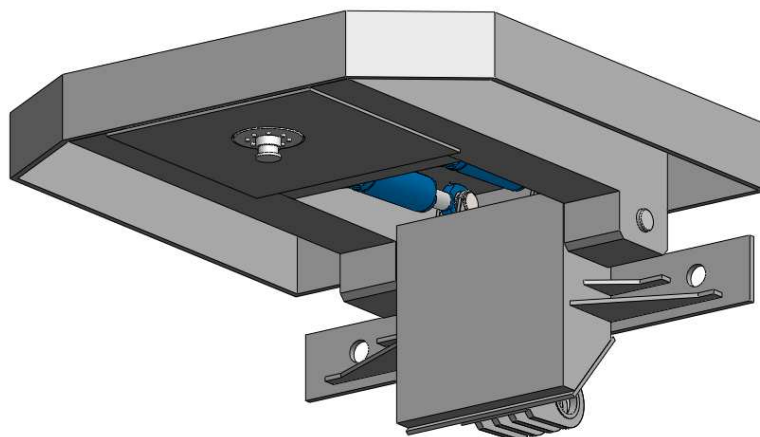


Slika 82. Vijčani spoj elementa za kruto pričvršćenje na šasiji

6.5. Sklop s vučnim svornjakom

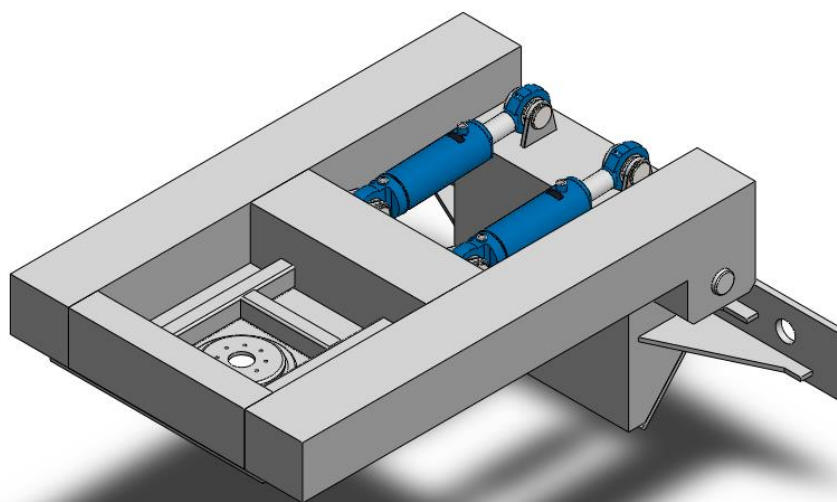
Sklop s vučnim svornjakom omogućuje povezivanje s tegljačem preko sedla. S obzirom da moduli imaju mogućnost podizanja odnosno spuštanja osovina dolazi do problema da se i

sklop s vučnim svornjakom pomiče skupa s njima, a s time i spoj na sedlo na samom tegljaču. Radi toga je potrebno konstruirati taj sklop da se može zakretati u odnosu na ostatak konstrukcije. Zakretni mehanizam je omogućen hidrauličkim cilindrima te se zakreće prednji dio sklopa na kojem se nalazi vučni svornjak oko središnje osovine.



Slika 83. Sklop s vučnim svornjakom

Na slici 84. prikazan je unutarnji dio sklopa s vučnim svornjakom. Prikazani su hidraulički cilindri koji omogućavaju podizanje odnosno spuštanje vučnog svornjaka.

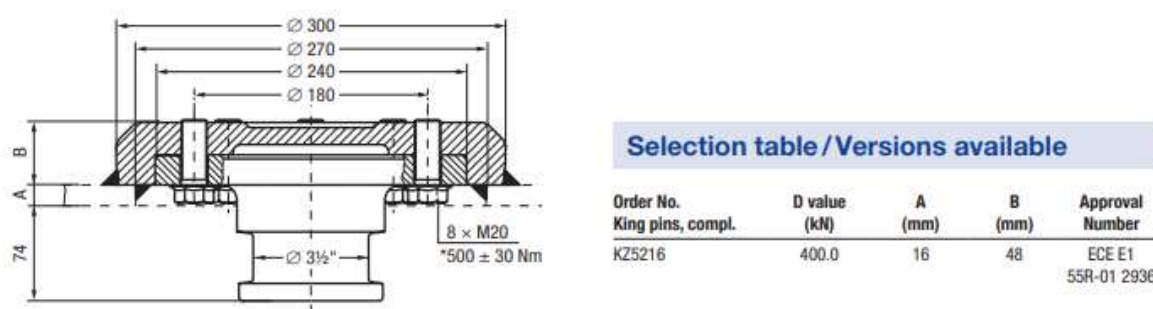


Slika 84. Hidraulički cilindri sklopa s vučnim svornjakom

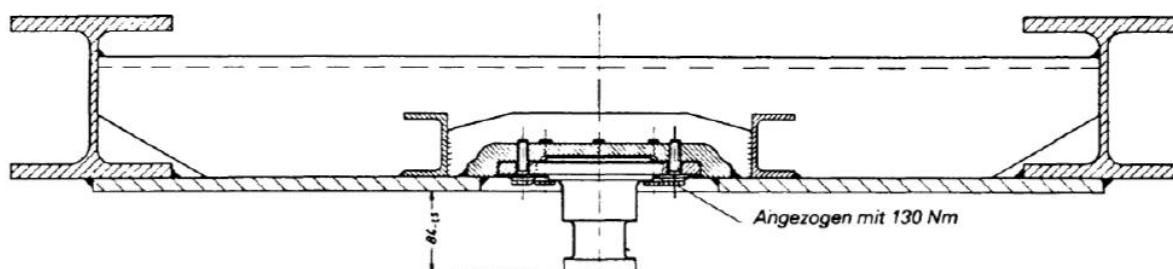
Također povezivanje na vučno vozilo moguće je izvesti i pomoću ruda, ali tada tegljač ne bi preuzeo dio opterećenja ili uporabom samohodnog modula gdje nema potrebe za vučnim vozilom.

6.5.1. Vučni svornjak 90 (3.5“)

Vučni svornjak je standardna kupovna komponenta te je iz tog razloga preuzeta s GrabCAD-a. Proizvođač vučnog svornjaka je JOST te ga je bitno postaviti prema uputama koje su prikazane na slici 86..



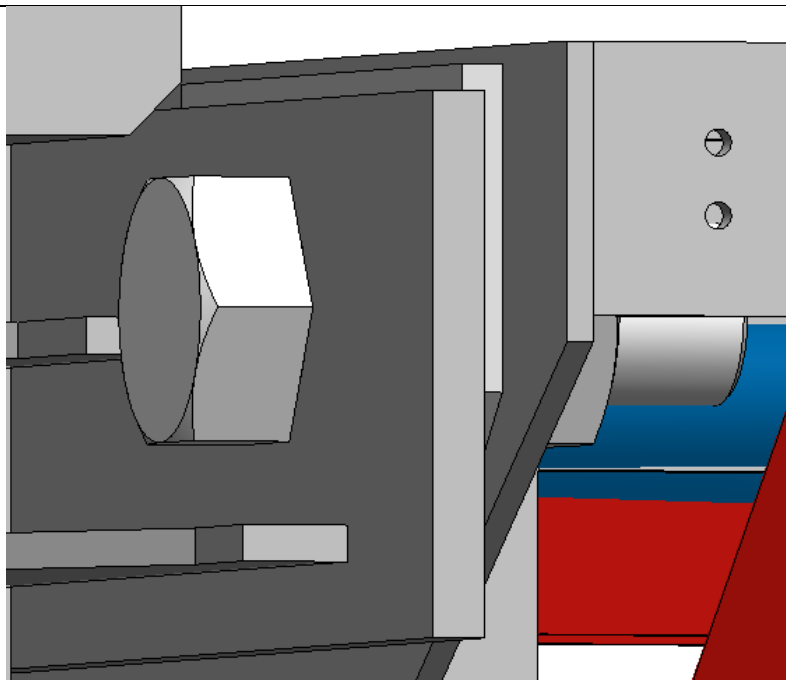
Slika 85. Vučni svornjak 90 (3.5“) [35]



Slika 86. Upute za ugradnju vučnog svornjaka [37]

6.5.2. Spoj sklopa s vučnim svornjakom i modula

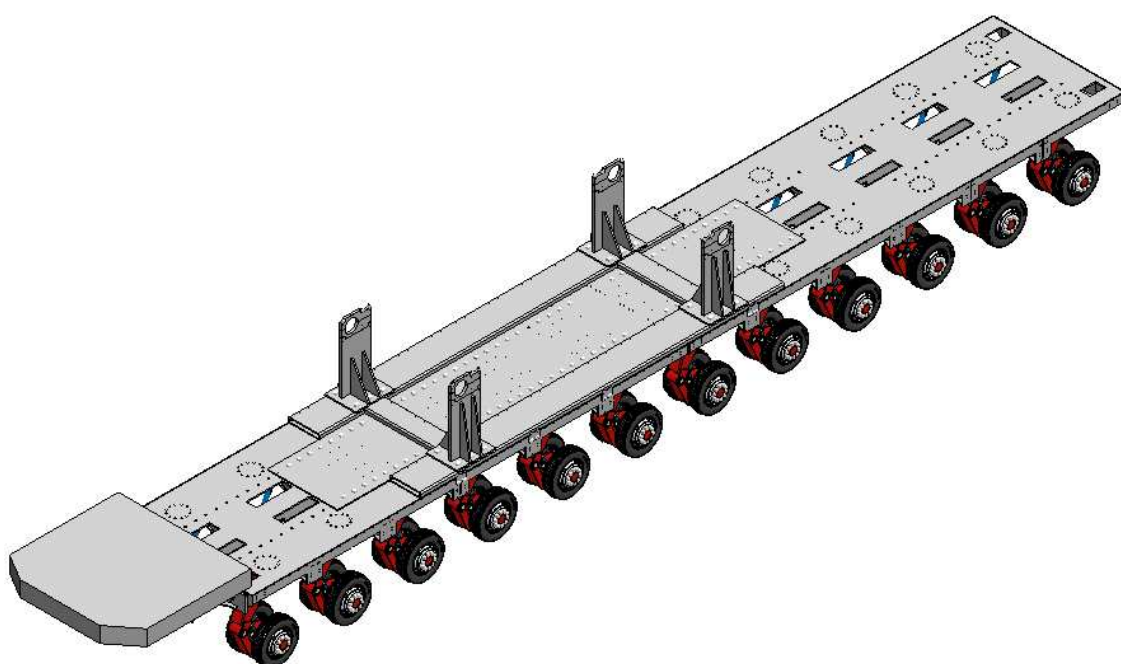
Sklop s vučnim svornjakom se spaja sa modulom identično kao i modul s modulom. Spajaju se svornjacima preko ušica i vijcima. Na slici 87. je prikazan vijčani spoj.



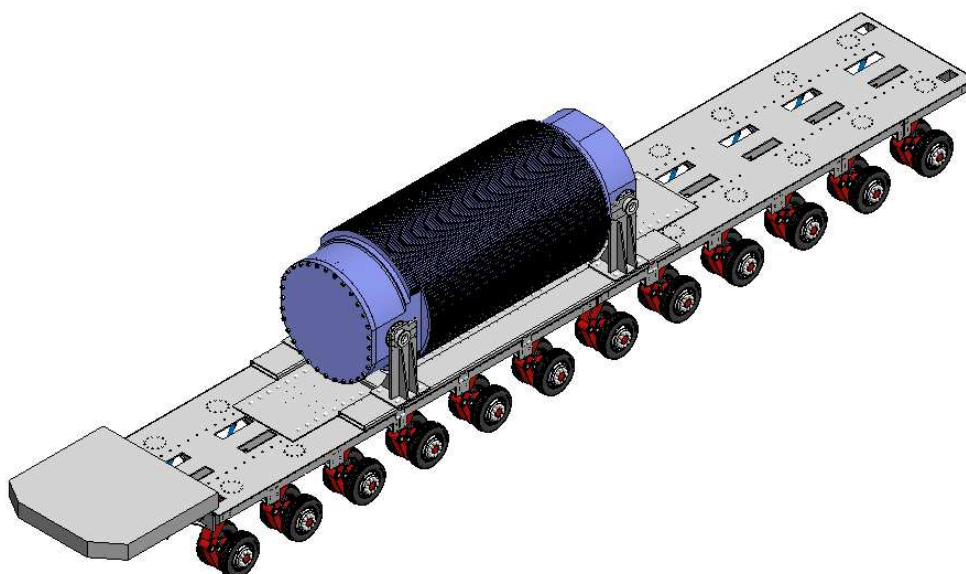
Slika 87. Vijčani spoj sklopa s vučnim svornjakom i modula

6.5.3. Prikolica

Na slikama 88. i 89. su prikazani sklopovi prikolice s nadogradnjom sa i bez spremnika. Spremnik odnosno nadogradnja je postavljena više prema naprijed kako bi se postiglo povoljno opterećenje na sedlu i osovina. Proračun je prikazan poglavlju Proračuni.

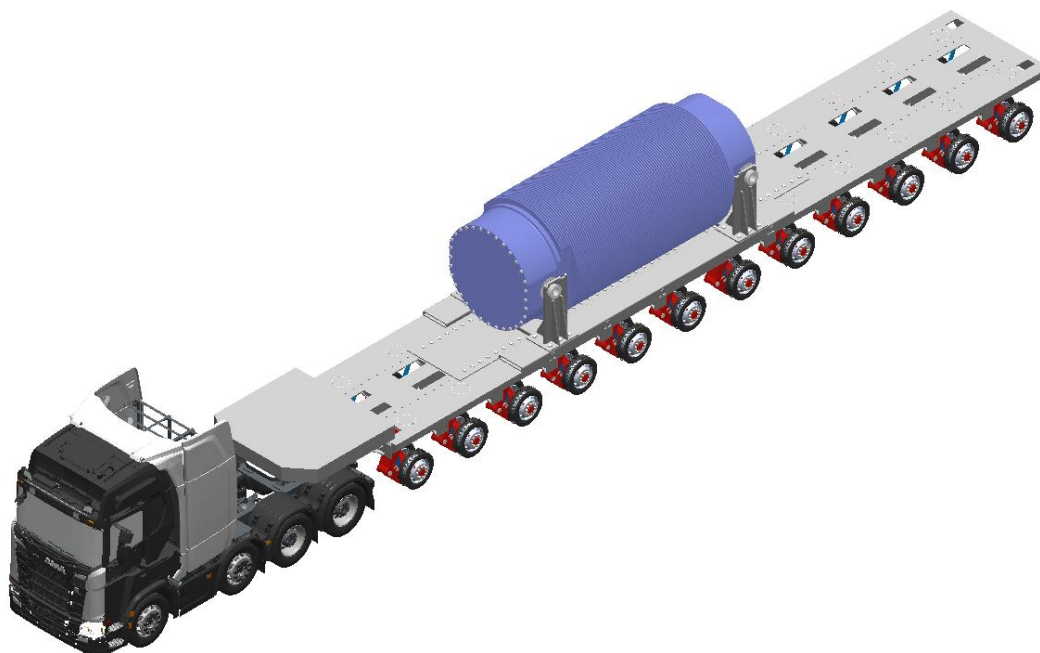


Slika 88. Sklop modularne prikolice s nadogradnjom



Slika 89. Sklop prikolice sa spremnikom CASTOR V/19

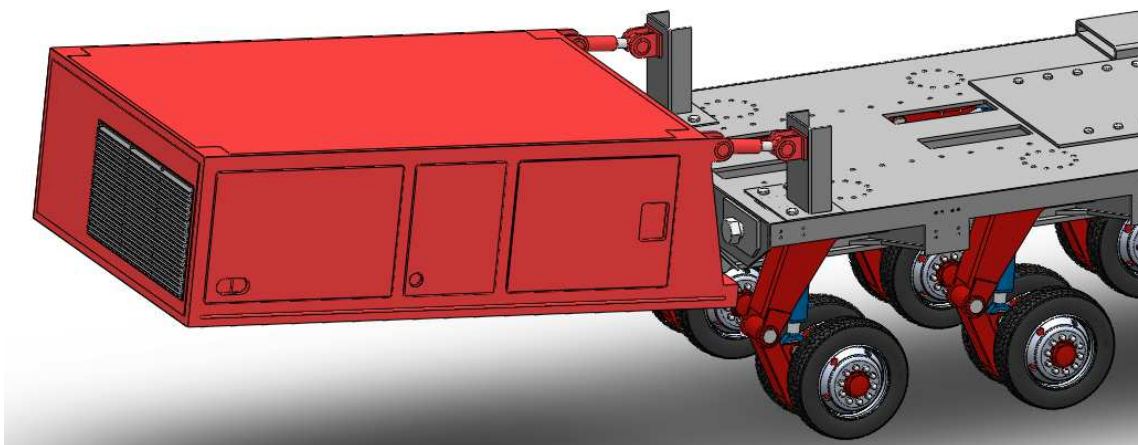
Na slici 90. prikazana je prikolica povezana na tegljač Scania R730 8x4. Tegljač je preuzet iz GrabCAD-a [38].



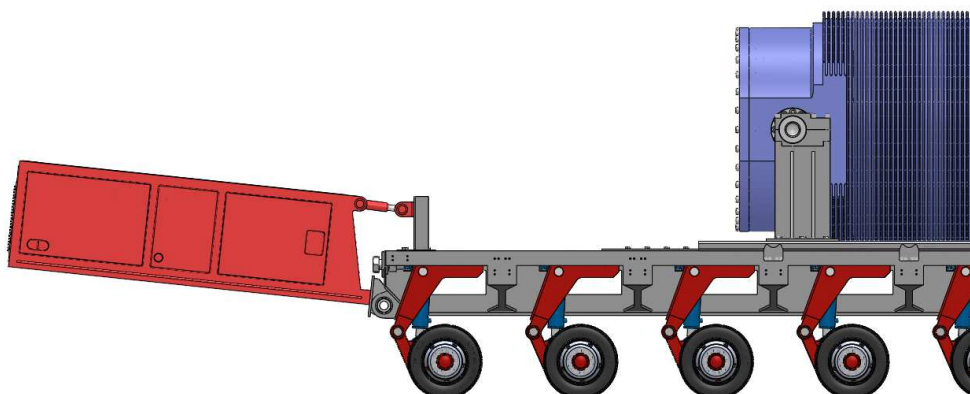
Slika 90. Scania R730 8x4 s prikolicom

Kao što je ranije spomenuto prikolica se može povezati sa samohodnim modulom, što predstavlja praktično i učinkovito rješenje za transport unutar postrojenja jer uklanja potrebu

za vučnim vozilom. Samohodni modul koristi hidraulički pogon koji omogućava upravljanje osovina te podizanje i spuštanje ovjesa. Hidrauličke pumpe, koje osiguravaju potreban tlak ulja za upravljanje, ovjes i pogon, pokreću se elektromotorom. Kako bi se omogućilo neovisno kretanje svake osovine, u sklopove kotača često se ugrađuju hidraulički motori (eng. *in-wheel motors*). Samohodni modul preuzet je s platforme GrabCAD [34] i prilagođen kako bi bio kompatibilan s ovom prikolicom. Povezivanje s modulom izvedeno je na isti način kao i kod sklopa s vučnim svornjakom – putem ušice i svornjaka, uz dodatno pričvršćivanje preko nosača vijčano povezanih sa šasijom modula. Hidraulički cilindri omogućuju podešavanje visine, što je ključno zbog velikog prednjeg prevjesa. Na slikama 91. i 92. prikazan je samohodni modul s detaljima načina povezivanja na modul.



Slika 91. Prikolica sa samohodnim modulom



Slika 92. Povezivanje samohodnog modula s prikolicom

7. OSTALE KOMPONENTE

S obzirom na to da se radi o konceptu prikolice, neki elementi konstrukcije nisu razrađeni, ali i dalje su bitan dio konstrukcije te su spomenuti u ovom dijelu.

7.1. Hidraulički ovjes

Kao što je već ranije rečeno, odabran je hidraulički ovjes koji omogućava stabilno i prilagodljivo upravljanje prikolicom. Omogućava preciznu kontrolu i prilagodbu raznim uvjetima na cesti. Svaka osovina odnosno sklop kotača ima hidrauličke cilindre koji koriste tlak hidrauličke tekućine kako bi kontrolirali podizanje odnosno spuštanje. Moguće je podešavati visinu cijele prikolice ili pojedinih osovina. Upravljanje je elektroničko odnosno automatsko, ali vozač ima opciju dodatne kontrole. ECU obrađuje podatke i šalje naredbu hidrauličkim cilindrima. Za hidraulički ovjes potrebno je imati: hidrauličke cilindri, pumpe, spremnike ulja odnosno hidrauličke tekućine, sklopove ventila za upravljanje, ECU, senzore i instalaciju. Instalaciju je moguće provesti kroz unutrašnjost uzdužnog nosača šasije ili s vanjske strane nosača. Na slici 55. vidljiv je sklop kotača s hidrauličkim cilindrom.

7.2. Zračni sustav kočenja

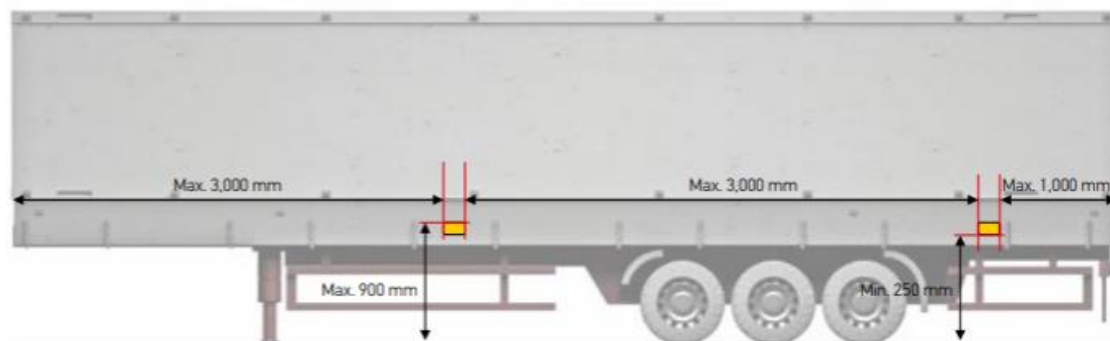
Modularne prikolice najčešće koriste zračni sustav kočenja s bubanj kočnicama. On omogućava brzo i ravnomjerno aktiviranje na svim osovinama, pruža veliku silu kočenja i jednostavna je konstrukcija. Funkcionira na principu komprimiranja zraka koji pokreće mehanizam kočenja. Potrebno je imati kompresor i spremnike za komprimirani zrak, instalaciju, kočne cilindre na svakom sklopu kotača, bubanj kočnice i ventile. Modularna prikolica obično ima vlastiti zračni sustav povezan sa sustavom tegljača odnosno vozila koji vuče prikolicu.

7.3. Svjetlosna oprema

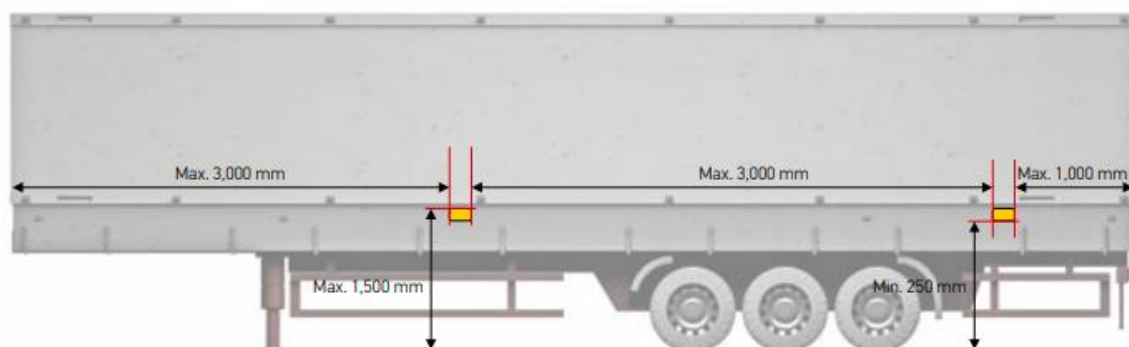
Pravila za uređaje za osvjetljavanje i svjetlosnu signalizaciju određena su Pravilnikom ECE R 48. Postoje različita pravila za vučno vozilo odnosno tegljač koja se ovdje neće razmatrati.

7.3.1. Bočna rasvjeta

Potrebno je imati bočne reflektore/katadioptere i bočna pozicijska svjetla. Prikazani su na slikama 93. i 94.



Slika 93. Bočni katadiopteri [39]



Slika 94. Bočna pozicijska svjetla [39]



Slika 95. Bočna pozicijska svjetla HELLA proizvođača [40]

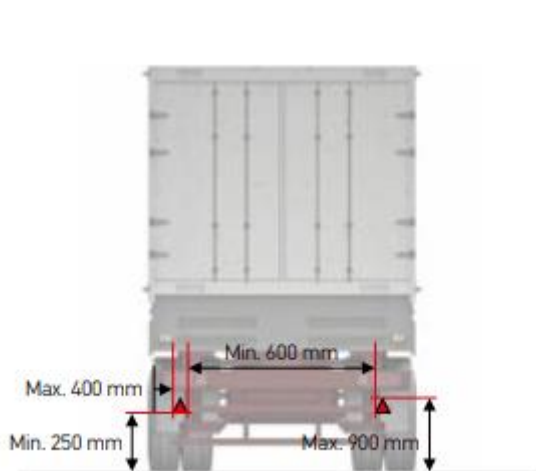
7.3.2 Stražnja rasvjeta

Na stražnjoj strani prikolica mora sadržavati:

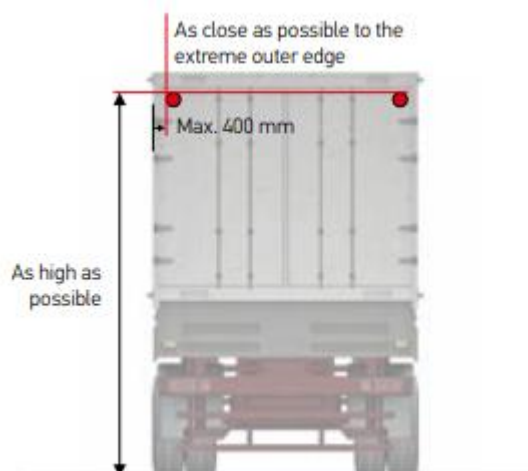
- reflektori/katadiopteri,
- pokazivače smjera,

- stražnja svjetla,
- stop svjetla,
- svjetlo za vožnju unatrag,
- svjetla za maglu,
- svjetlo za osvjetljavanje stražnje registarske pločice,
- gabaritna/pozicijska svjetla.

Prikazani su na slikama 96. i 97.



Slika 97. Stražnji katadiopteri [39]



Slika 96. Stražnja pozicijska svjetla [39]

Odabrano je stražnje multifunkcionalno svjetlo proizvođača HELLA prikazano na slici 98. Ono je kombinacija stražnjeg svjetla, stop svjetla, pokazivača smjera, stražnjeg svjetla za maglu i svjetla za vožnju unatrag. Na slici 99. prikazano je svjetlo za osvjetljavanje registarske pločice.



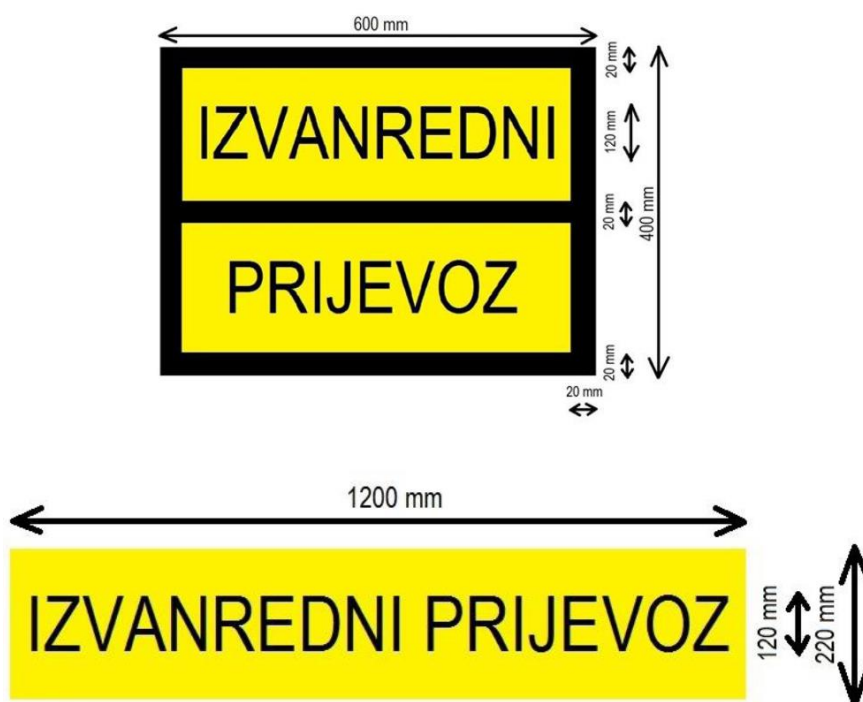
Slika 98. COLUNA stražnje kombinacijsko svjetlo proizvođača HELLA [40]



Slika 99. Svjetlo za osvjetljavanje registarske pločice HELLA proizvođača [40]

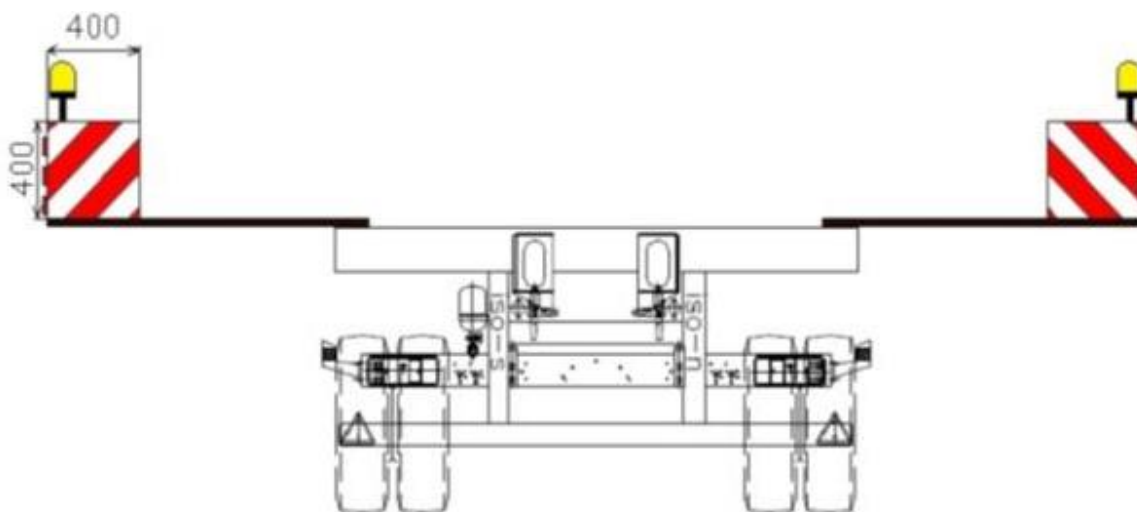
7.4. Oznake izvanrednog prijevoza

Za vozilo izvanrednog prijevoza odnosno vozilo koje ne odgovara propisanim uvjetima dimenzije vozila, otisnuti brojevi i slova na registarskim pločicama moraju biti crvene boje. Također mora imati natpis s prednje i stražnje strane da se radi o izvanrednom prijevozu koji je prikazan na slici 100.



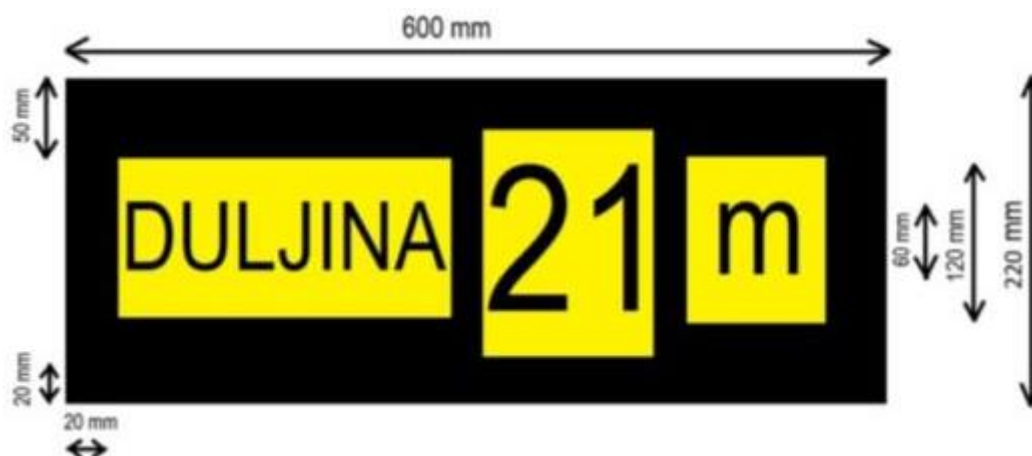
Slika 100. Natpis IZVANREDNI PRIJEVOZ [41]

Vozilo koje ima dimenzije veće od dopuštenih mora imati crveno bijele reflektirajuće ploče na prednjoj i stražnjoj strani, s lijeve i desne strane prikolice. Također vanjski gabariti moraju imati gabaritna žuta rotirajuća svjetla kao na slici 101.



Slika 101. Crveno bijele reflektirajuće pločice [41]

Dodatna oznaka koju vozilo treba imati, ako ima duljinu veću od dopuštene, je oznaka duljine prikazana na slici 102. Označena je stvarna duljina izvanrednog prijevoza u metrima.



Slika 102. Oznaka duljine [41]

Vozila izvanrednog prijevoza mora imati definiranu kategoriju i dozvolu. Dodatno, vozila izvanrednog prijevoza moraju imati pratnju te odgovarajuću dokumentaciju i plan puta.

7.5. Oznake po ADR-u

ADR je Europski sporazum o međunarodnom prijevozu opasnih tvari u cestovnom prometu. Njime je određeno kako se ponašati prilikom prijevoza opasnih tvari i kako označiti takav prijevoz za što veću sigurnost okoline. Opasne tvari se klasificiraju te postoji 9 klasa, a

radioaktivni materijal spada u 7. klasu. Vozilo mora imati na sebi vidljivo postavljenu pločicu opasnosti koja je prikazana na slici 103. Gornjem polju, prvi broj označava klasu, a drugi označava dodatnu opasnost. U donjem polju se nalazi UN broj pod kojim se nalazi tvar u registru opasnih tvari.



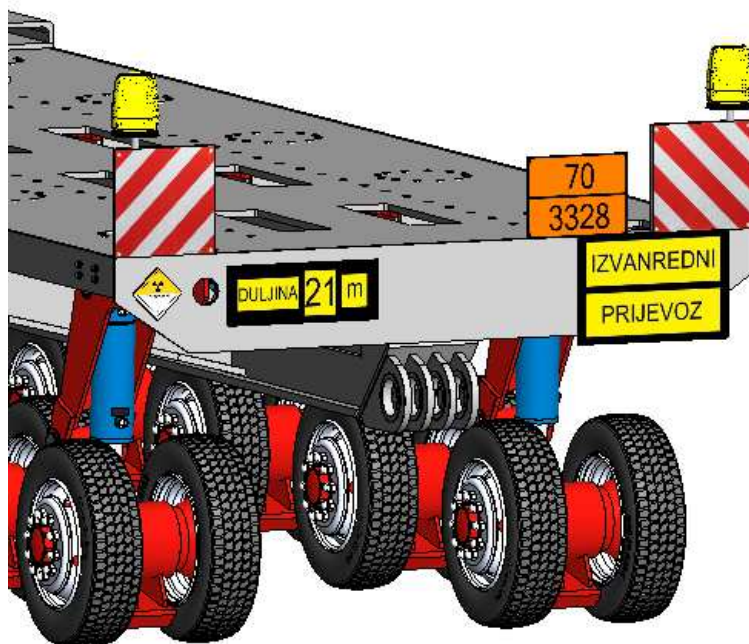
Slika 103. Pločica opasnosti [42]

Na slici 104. prikazana je listica opasnosti klase 7 koju mora imati svako vozilo koje prevozi radioaktivni materijal.



Slika 104. Listice opasnosti klase 7 [43]

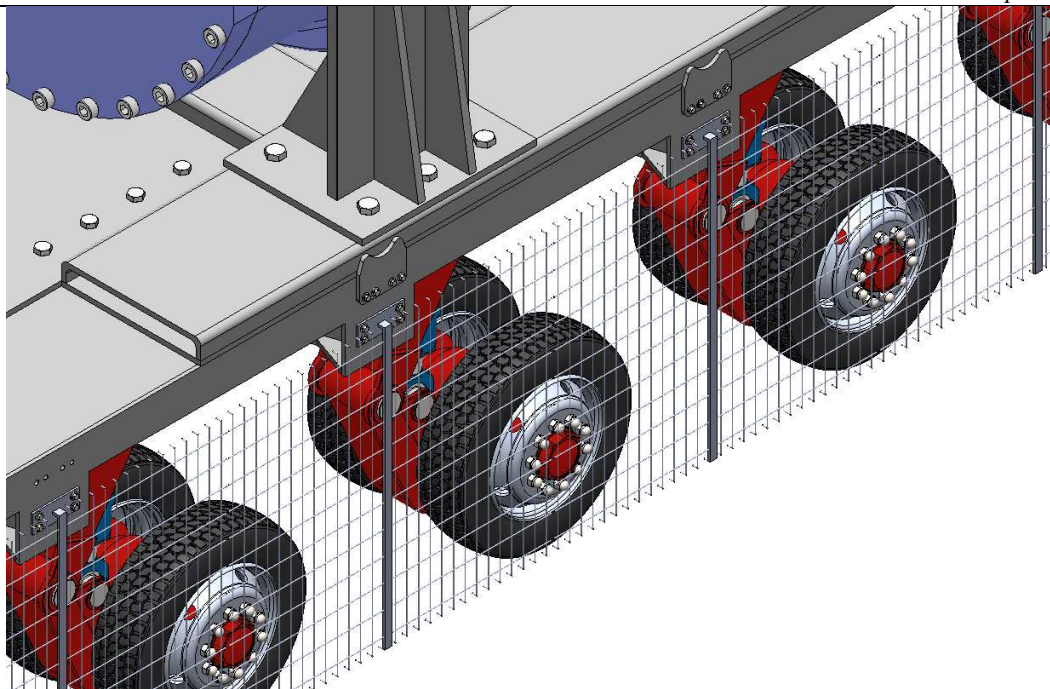
Na slici 105. prikazane su potrebne oznake na prikolici.



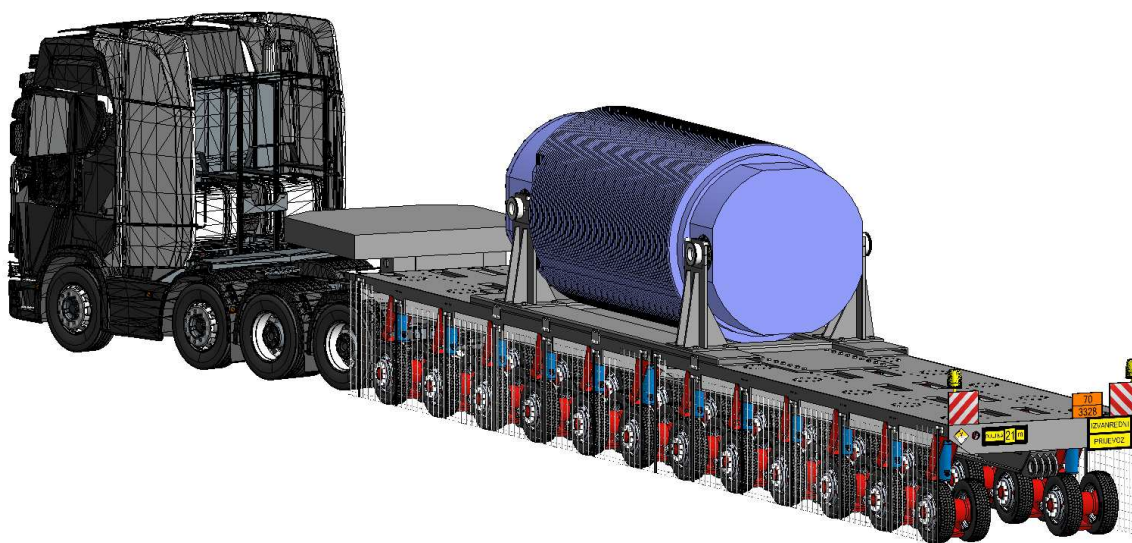
Slika 105. Označavanje prikolice

7.6. Zaštitna ograda

Zaštitna ograda dodatna je oprema koja služi za zaštitu sklopa kotača, ovjesa, kočnica i instalacija od oštećivanja ili onesposobljavanja od strane prosvjednika, koji često prate prijevoz ove vrste tereta javnim prometnicama, te je prikazana na slici 106. Sklop je rastavljiv. Na bokovima šasije imaju utori za pričvršćivanje nosača ograde vijčanom vezom. Zaštitnu ogradu treba koristiti u srednjem položaju visine modula jer bi u donjem položaju došlo do kontakta ograde o podlogu.



Slika 106. Zaštitna ograda



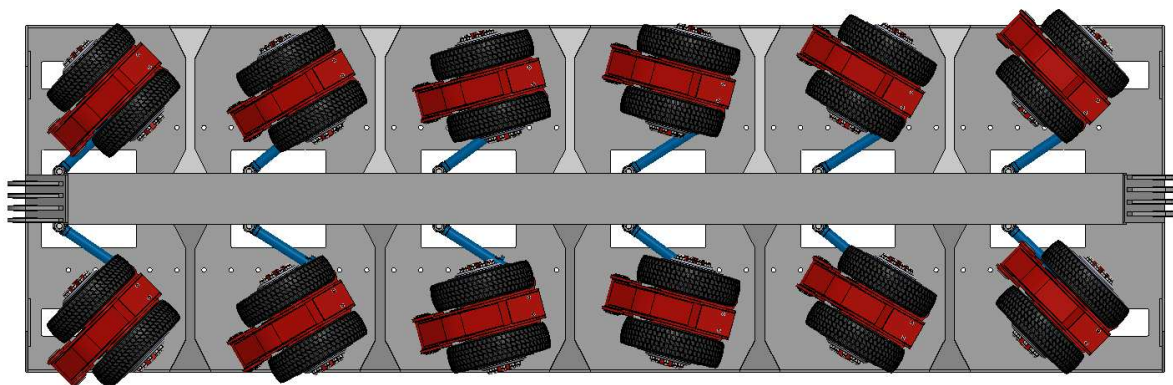
Slika 107. Tegljač s prikolicom s potrebnim oznakama i zaštitnom ogradom

8. FUNKCIONALNOST PRIKOLICE

S obzirom na to da je prikolica konstruirana za izvanredni prijevoz, potrebno je prilagoditi ju za uvjete na prometnicama. Kako bi se omogućila bolja upravljivost i stabilnost potrebno je osigurati zakret kotača. Također ukoliko se prevozi teret velike visine, potrebno je omogućiti spuštanje prikolice.

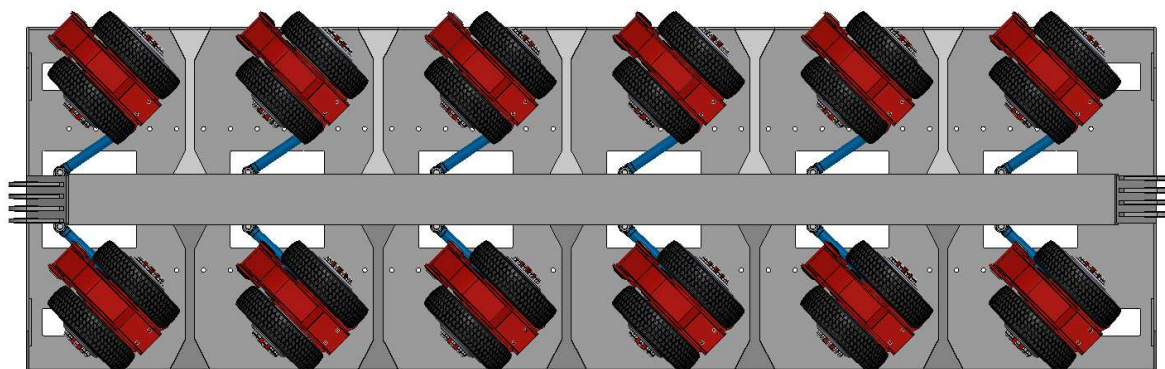
8.1. Zakret kotača

Svaka osovina na modularnoj prikolici može imati drugačiji kut zakreta kako bi se povećala njihova upravljivost prilikom prijevoza tereta velikih dimenzija. Zakret kotača postiže se ugradnjom hidrauličkih cilindara kojima upravlja ECU-u. Osovine na krajevima prikolice imaju najveći kut zakreta, dok središnje imaju nešto manji. Na slikama 108.-1010. prikazani su neki od mogućih kombinacija kutova zakreta osovina modula. Na slici 108. prikazan je zakret kotača modula u zavoju, gdje su vanjske osovine zakrenute za maksimalan kut od 45°, a osovine prema središtu imaju sve manji kut zakreta. Takvi kutovi osiguravaju zakret kotača modula oko zajedničke točke, uz smanjenje klizanja i trošenja guma.



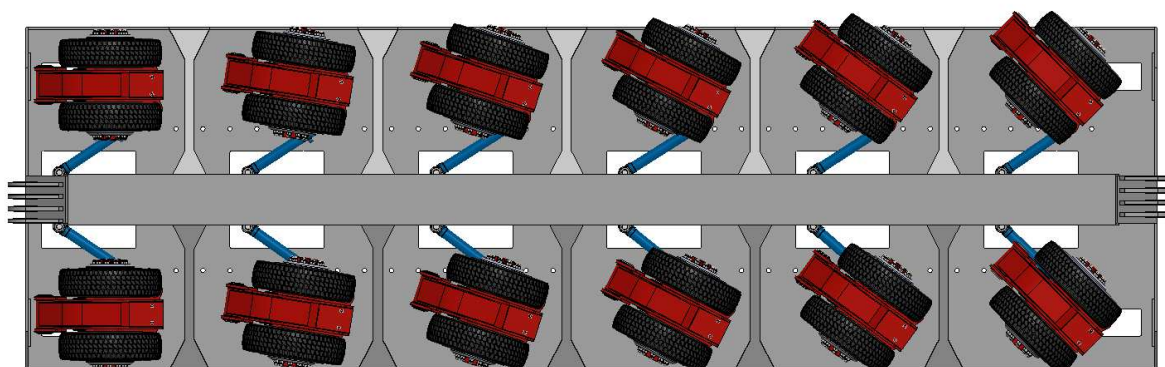
Slika 108. Zakret osovina modula u zavoju

Na slici 109. prikazani su kutovi zakreta modula gdje su sve osovine zakrenute za 45° u istu stranu te to omogućava dijagonalno kretanje prikolice.



Slika 109. Zakret svih osovinu modula za 45° u istu stranu

Na slici 110. prikazani su zakreti osovinu modula gdje se kutovi postepeno povećavaju, od 0° do maksimalnih 45°. Ovakvo zakretanje bi se moglo koristiti na dva spojena modula gdje bi se kod prednjeg modula prva osovina zakrenula do maksimalnih 45°, a onda se prema kraju prvog modula taj kut postepeno smanjiva do 0°. Takvi kutovi na dva modula, ukupno 12 osovinu, osiguravaju zakret kotača prikolice oko zajedničke točke, uz smanjenje klizanja i trošenja guma.

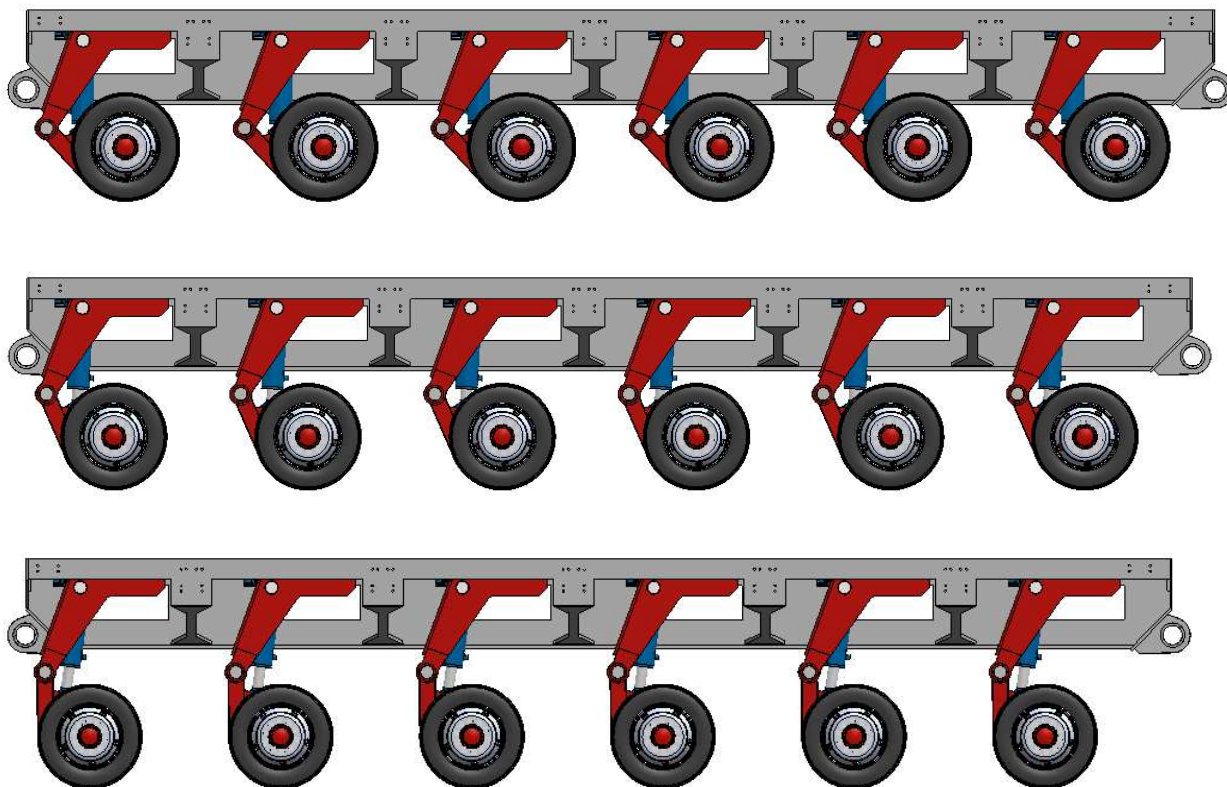


Slika 110. Zakret osovinu modula – postepeno povećavanje

8.2. Podizanje/spuštanje modula

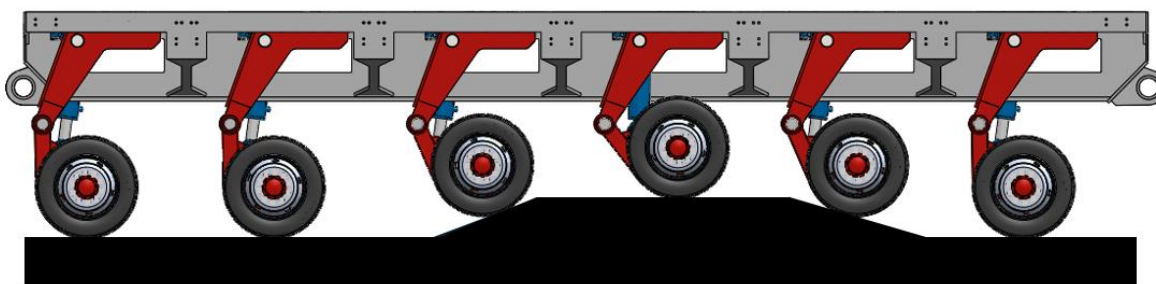
Kao što je ranije rečeno, prilikom prijevoza tereta velikih dimenzija potrebno je omogućiti podizanje/spuštanje osovinu modula odnosno modula kako bi se omogućio prolazak ispod tunela, mostova i nadvožnjaka. Spuštanjem prikolice se snižava težište čime se povećava stabilnost prijevoza. Dodatna prednost je mogućnost promjene visine svake osovinu zasebno čime se osigurava da teret u svim situacijama ostaje u ravnom položaju. Na slici 111.

prikazano je podizanje/spuštanje osovina koje je omogućeno hidrauličkim cilindrima u sklopovima kotača te su od gore prema dolje prikazani minimalna, srednja i maksimalna visina. Srednja visina modula je 1525 ± 175 mm.



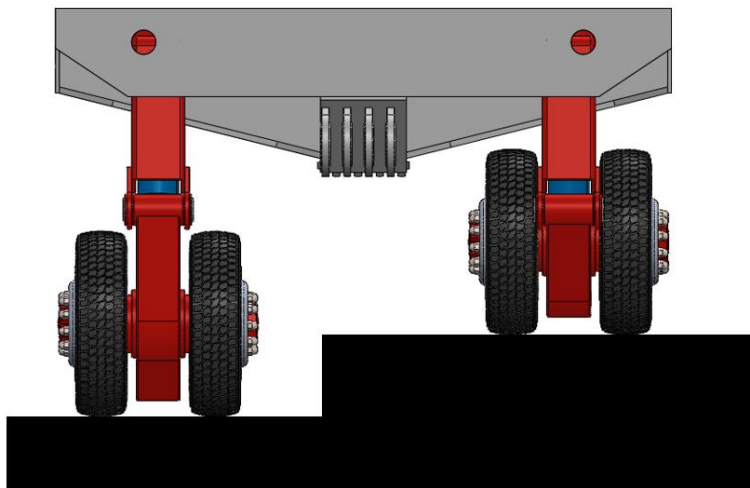
Slika 111. Podizanje/spuštanje modula

Na slici 112. prikazano je podizanje odnosno spuštanje pojedinih osovina modula prilikom prelaska preko prepreka poput usporivača brzine kako bi teret ostao u ravnom položaju.



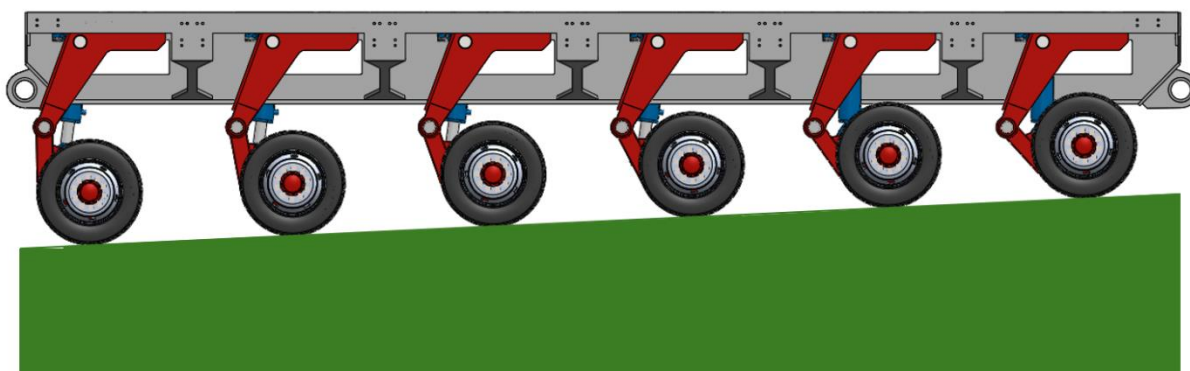
Slika 112. Podizanje/spuštanje modula pri prelasku preko prepreke

Na slici 113. prikazano mogućnost različitih visina osovina na lijevoj i desnoj strani kako bi teret ostao ravno pozicioniran.



Slika 113. Podizanje/spuštanje modula pri različitoj visini lijevo-desno

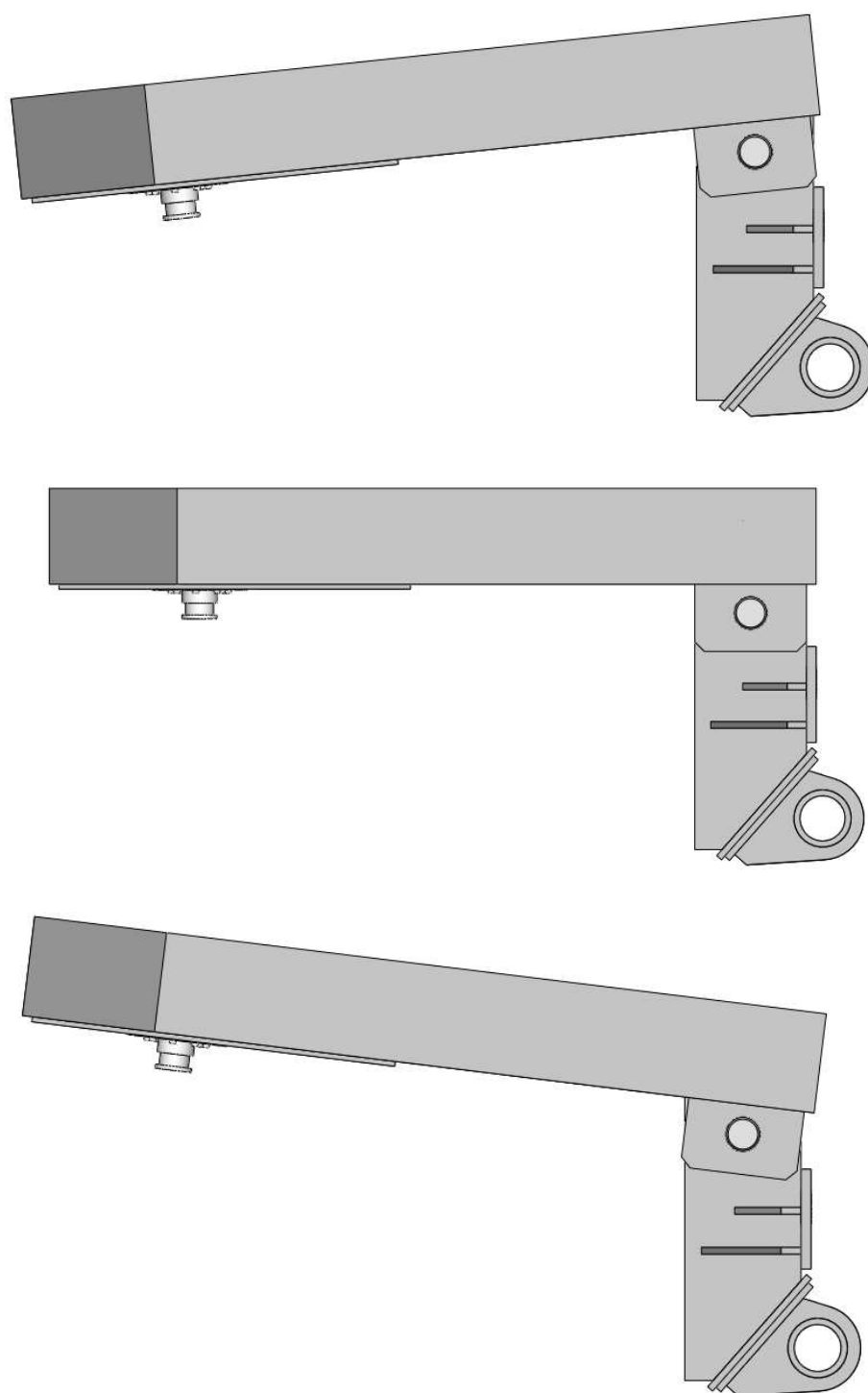
Na slici 114. prikazano je prilagodba visina osovina pri uzdužnom nagibu kako bi teret i dalje bio u ravnom položaju.



Slika 114. Podizanje/spuštanje modula pri uzdužnom nagibu

8.3. Podizanje/spuštanje sklopa s vučnim svornjakom

Ranije je već rečeno, da prilikom podizanja/spuštanja osovina potrebno omogućiti i spuštanje/podizanje sklopa s vučnim svornjakom. To omogućuju hidraulički cilindri u sklopu s vučnim svornjakom. Na slici 115. prikazani su, od gore prema dolje, položaji sklopa s vučnim svornjakom u spuštenom, srednjem i podignutom slučaju.



Slika 115. Podizanje/spuštanje sklopa s vučnim svornjakom

9. PRORAČUNI

Prilikom proračuna korišteni su Microsoft Office Excel i SOLIDWORKS.

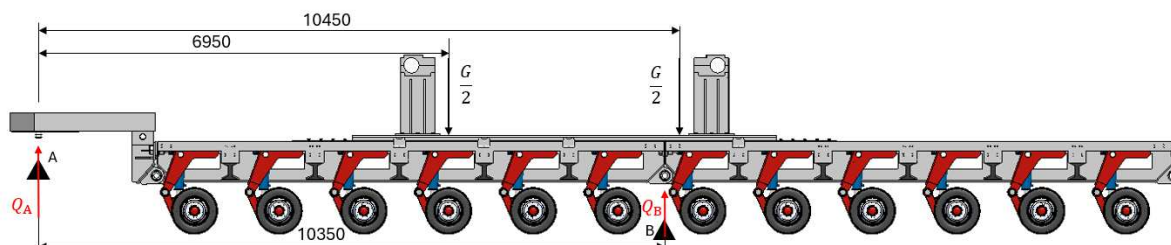
9.1. Analitički proračun poprečnog presjeka uzdužnog nosača šasije

Za određivanje poprečnog presjeka uzdužnog nosača potrebno je prvo odrediti opterećenje prikolice odnosno nosača. Potrebno je pretpostaviti mase pojedinih dijelova konstrukcije. Neke od pretpostavljenih masa, a zatim stvarne dobivene nakon modeliranja, su navedene u sljedećoj tablici.

Tablica 3. Prikaz pretpostavljenih i stvarnih masa za proračun poprečnog presjeka uzdužnog nosača šasije

PODACI	pretpostavljena masa [kg]	stvarna masa [kg]
masa napunjenog spremnika	126 000	126 000
masa nadogradnje	5 000	6 012
masa prikolice - 2 modula	40 000	37 892

Zatim je prema slici 116. potrebno izračunati sumu sila po vertikalnoj osi i sumu momenata oko oslonca A.



Slika 116. Opterećenje prikolice

Suma sila po vertikalnoj osi se određuje prema sljedećem izrazu:

$$\sum F_v = 0 \quad (9.1)$$

$$Q_A + Q_B = G \quad (9.2)$$

gdje su:

Q_A – sila u osloncu A; sila kojom je opterećeno sedlo [N]

Q_B – sila u osloncu B; sila kojom je opterećena podloga na sredini osovine [N]

$G = 1\,285\,110$ N – težina spremnika i nadogradnje [N].

Izraz za sumu momenata je sljedeći:

$$\sum M_A = 0 \quad (9.3)$$

$$Q_B \cdot l = \frac{G}{2} \cdot l_L + \frac{G}{2} \cdot l_D \quad (9.4)$$

gdje su:

$l = 10\,350$ mm – udaljenost između oslonca A i oslonca B

$l_L = 6950$ mm – udaljenost između oslonca A i lijeve točke tereta

$l_D = 10450$ mm – udaljenost između oslonca A i desne točke tereta.

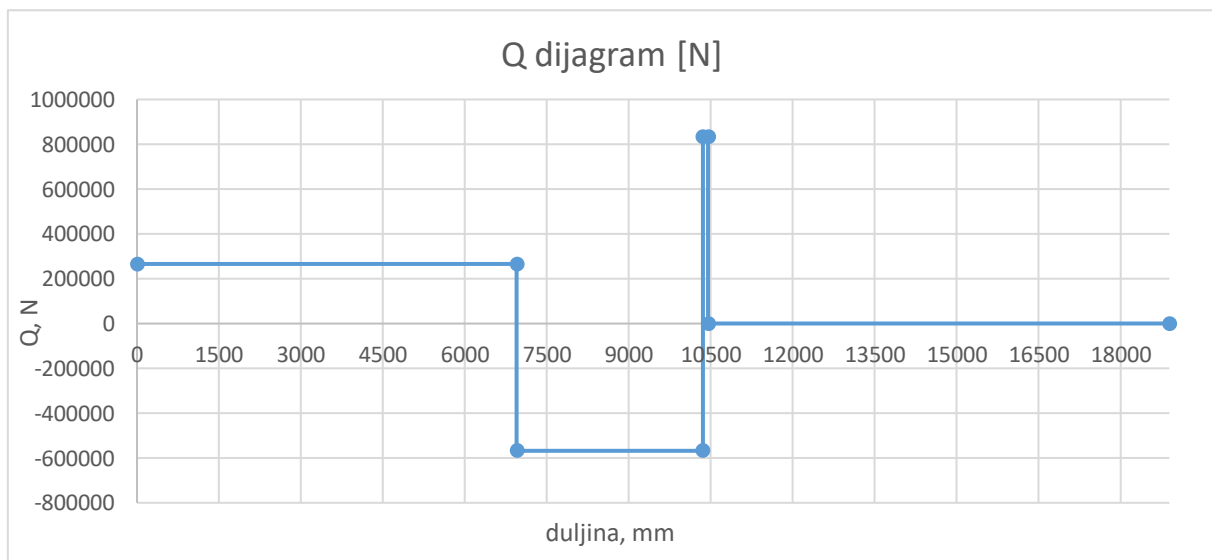
Uvrštavanjem tih vrijednosti u izraze 9.4 i 9.2 dobije se:

$$Q_B = 265\,865,2 \text{ N}$$

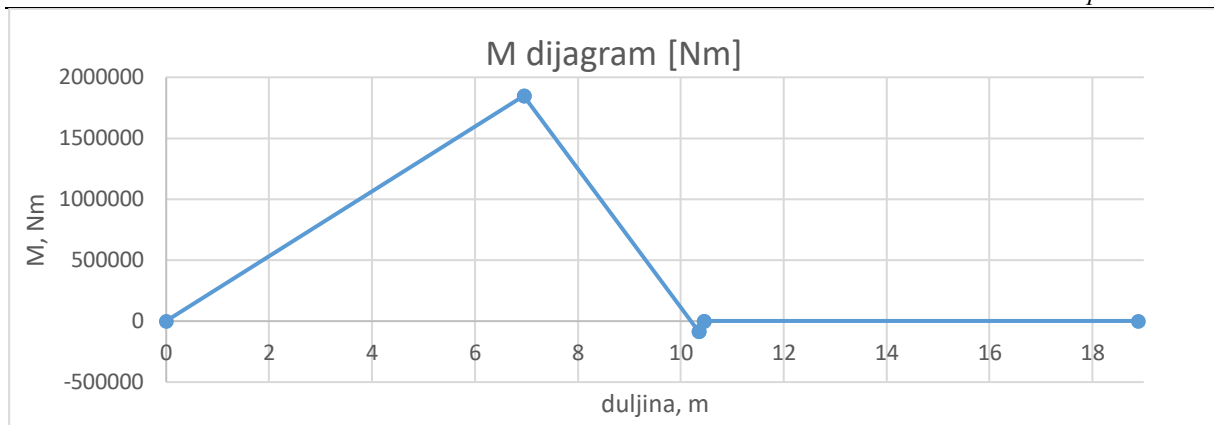
$$Q_A = 1\,401\,835 \text{ N}$$

Prilikom određivanja prethodno navedenih udaljenosti proces je bio iterativan kako bi opterećenje bilo barem 26 t. Dobiveno je opterećenje sedla od 27,1 t.

Zatim su unutar programa Microsoft EXCEL napravljeni dijagrami vertikalnih sila i momenata. Te je izračunato da maksimalni moment iznosi $M_{\max} = 1\,847\,763\,261$ Nmm.



Slika 117. Prikaz opterećenja vertikalnih sila po duljini prikolice



Slika 118. Prikaz momenata po duljini prikolice

Za određivanje momenta tromosti presjeka koristio se programski paket SOLIDWORKS.

Nakon što je određen maksimalni moment potrebno je izračunati minimalni moment tromosti I_{ymin} . Izraz za računanje je sljedeći:

$$\sigma_{dop} \geq \frac{M_{max}}{I_{ymin}} \cdot \frac{h}{2} \quad (9.5)$$

gdje su:

$M_{max} = 1\,847\,763\,261$ Nmm – maksimalni moment

h - visina poprečnog presjeka [mm].

Za uzdužni nosač, ali i samu šasiju, odabran je materijal N-A-XTRA 700 radi visoke čvrstoće i dobre zavarljivosti. Njegova granica razvlačenja iznosi $Re = 700$ N/mm². Za određivanje dopuštenog naprezanja uzet je faktor sigurnosti $S = 1,5$. Dobiva se vrijednost dopuštenog naprezanja:

$$\sigma_{dop} = \frac{Re}{S} = 466,667 \text{ mm}^2. \quad (9.6)$$

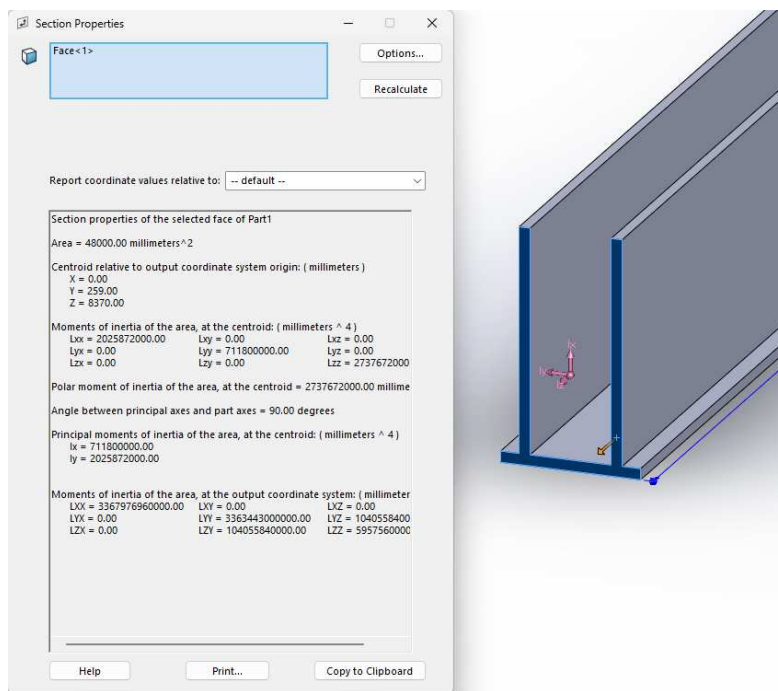
Iterativnim postupkom je odabrana visina poprečnog presjeka te iznosi $h = 640$ mm. Uvrštavanjem podataka u izraz 9.5 dobije se sljedeća vrijednost minimalnog momenta tromosti:

$$I_{ymin} = 1,980 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Unutar programskog paketa SOLIDWORKS iterativnim postupkom se došlo do dimenzija poprečnog presjeka čiji moment tromosti zadovoljava. Iz slike je vidljiva vrijednost

$$I_y = 2,03 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$I_y \geq I_{ymin} \rightarrow \text{Zadovoljava!}$$



Slika 119. Moment tromosti poprečnog presjeka uzdužnog nosača šasije


Nakon što su dobivene stvarne mase elemenata prilikom modeliranja, dobivene su nove vrijednosti sila i momenata, a time i minimalnog momenta tromosti. Na sljedećoj tablici je vidljivo i da stvarne vrijednosti zadovoljavaju.

Tablica 4. Prikaz pretpostavljenih i stvarnih vrijednosti maksimalnog momenta i minimalnog momenta tromosti

PODACI	pretpostavljene vrijednosti	stvarne vrijednosti
M_{max} [Nmm]	1 847 763 261	1 835 850 622
I_{ymin} [mm ⁴]	$1,98 \cdot 10^9$	$1,967 \cdot 10^9$
I_y [mm ⁴]	$2,03 \cdot 10^9$	$2,03 \cdot 10^9$
opterećenje sedla [t]	27,1	26,93

Bitno je naglasiti da je korišten pojednostavljeni model izračuna koji se inače primjenjuje kod poluprikolica s manjim brojem osovina. U stvarnosti se, kod prikolice koja se oslanja na veći broj osovina raspoređenih po duljini prikolice, radi o statički neodređenom slučaju opterećenja. Literatura s modelima izračuna za takvu izvedbu prikolice, a koji bi se mogao primijeniti na ovaj primjer je vrlo štura te se sami pristup izračunu značajno razlikuje od rada do rada. Dva rada su korištena za smjernice prilikom proračuna [44] [45]. Bez obzira na

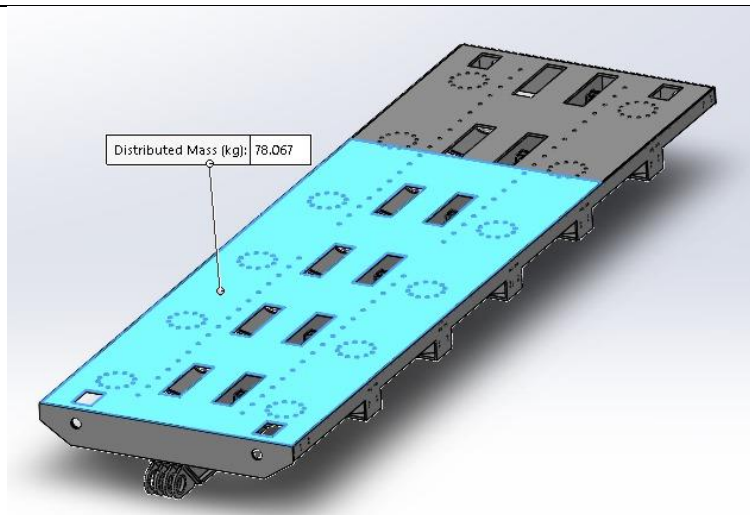
pojednostavljenje, ono što se može iz proračuna zaključiti, a usporedivo je s rezultatima literature i podacima sličnih postojećih prikolica, je to da je maksimalni moment (izražen u kNm) otprilike 15 puta veći od mase tereta koji se prevozi (izraženo u t) za statički slučaj i otprilike 20 puta veći za dinamički slučaj (uključujući kočenje, ubrzanje,...).

Spine Beam		
<p>Spine Beam Considerations</p> <ul style="list-style-type: none"> • Spine Beam offers resistance against torsion, bending and shear forces under load • With concentrated loads high stresses occur where axles extend beyond the load • Loss of axle stroke due to Spine Beam deflection can be avoided by pre-cambering • When combining multiple generations the lowest bending moment is limiting 		
<p>Calculation of Bending Moment</p> $M = W_{axleline} * D_{AS} * axle_1 + W_{axleline} * D_{AS} * axle_n$ <p>Where: $W_{axleline}$ = axle line load D_{AS} = axle spacing $axle_1$ = 1st axle beyond load $axle_n$ = nth axle beyond load</p> <p><small>Note: assuming axle1 protrudes full axle spacing</small></p>	<p>How many axles may extend</p> $\frac{M}{A_C * 2 * D_{AS}} = (axle_1 + axle_2 + \dots + axle_n)$ <p>where: A_C = axle capacity D_{AS} = axle spacing $axle_1$ = 1st axle beyond load $axle_n$ = nth axle beyond load</p>	<p>Bending Moment Values</p> <p>Pull Type (early models) 560 Ton*mtr (4,000,000 ft-LBS)</p> <p>Pull Type (recent models) 725 Ton*mtr (5,250,000 ft-LBS)</p> <p>SPMT (early models) 650 Ton*mtr (4,700,000 ft-LBS)</p> <p>SPMT (recent models) 775 Ton*mtr (5,600,000 ft-LBS)</p> <p><small>Note: averages for multiple brands</small></p>
<p>Spine Beam, an example</p> <p>Given: transformer $W_L = 280$ ton, 12 axle lines, Pull Type (early model) 4 axle lines extend beyond the load, $A_C = 12.5$ ton</p> <p>Question: (1) Spine Bending Moment, (2) axle lines that may extend</p> <p>Answer: $W_{axleline} = W_L / \# \text{ of axle lines} = 280 / 12 = 23.3$ ton</p> <p>(1) $M = W_{axleline} * D_{AS} * axle_1 + W_{axleline} * D_{AS} * axle_n$ $= 23.3 * 1.5 * 1 + 23.3 * 1.5 * 2 + 23.3 * 1.5 * 3 + 23.3 * 1.5 * 4 = 349.5 \text{ ton} * \text{mtr}$</p> <p>(2) $\frac{M}{A_C * 2 * D_{AS}} = (axle_1 + axle_2 + \dots + axle_n) = \frac{560}{12.5 * 2 * 1.5} = 14.9$ $(1+2+3+4)=10, (1+2+3+4+5)=15$, almost 5 axle lines may extend</p> <p>Rule of thumb: no more than 5 axle lines may extend at maximum load</p>		

Slika 120. Vrijednosti momenata savijanja grede [46]

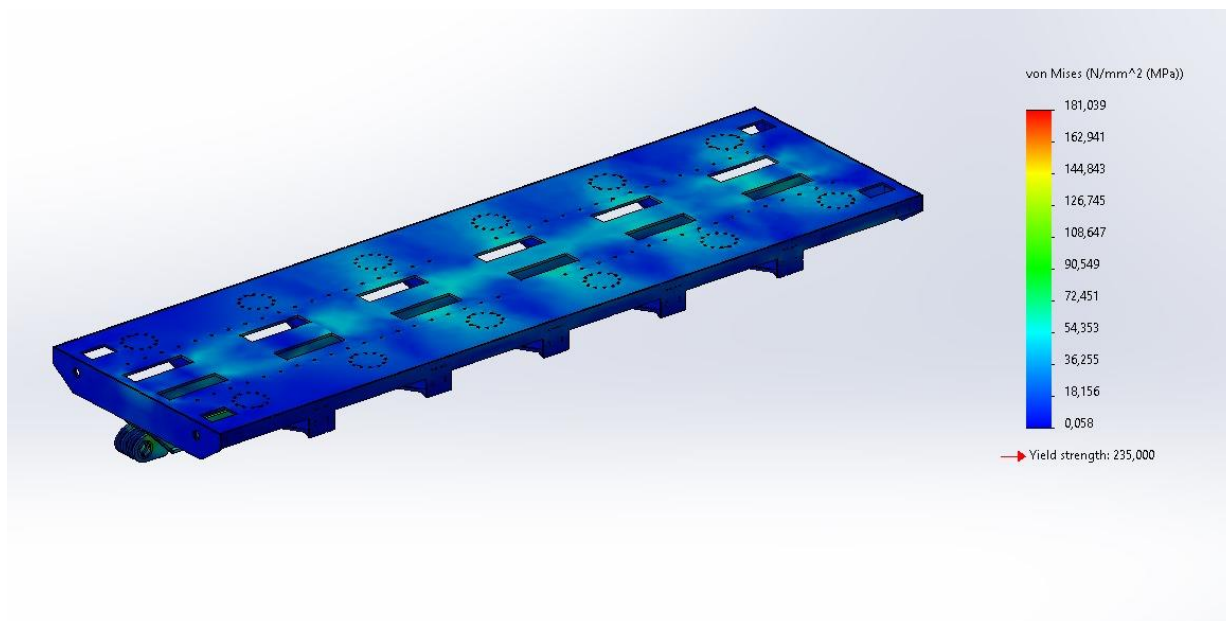
9.2. Kontrolna MKE analiza modula

MKE analiza modula napravljena je programskom paketu SOLIDWORKS te je izrađena radi kontrole. Napravljen je proračun modula odnosno šasije modula koji nosi veći dio opterećenja od nadogradnje i spremnika, a to je u ovom slučaju prvi modul. Masa koja opterećuje taj modul dobivena je iz omjera duljina nadogradnje na pojedinom modulu te iznosi 73,64 %. Uzeto je u obzir da sedlo preuzima 26 t te je dobivena masa koja opterećuje prvi modul 78,067 t. Na slici 121. prikazana je površina na koju djeluje masa nadogradnje i spremnika. Opterećenje je kontinuirano po označenoj površini, a pričvršćenja su na mjestima ušica za povezivanje modula. Korišteni su tetraedarski konačni elementi.



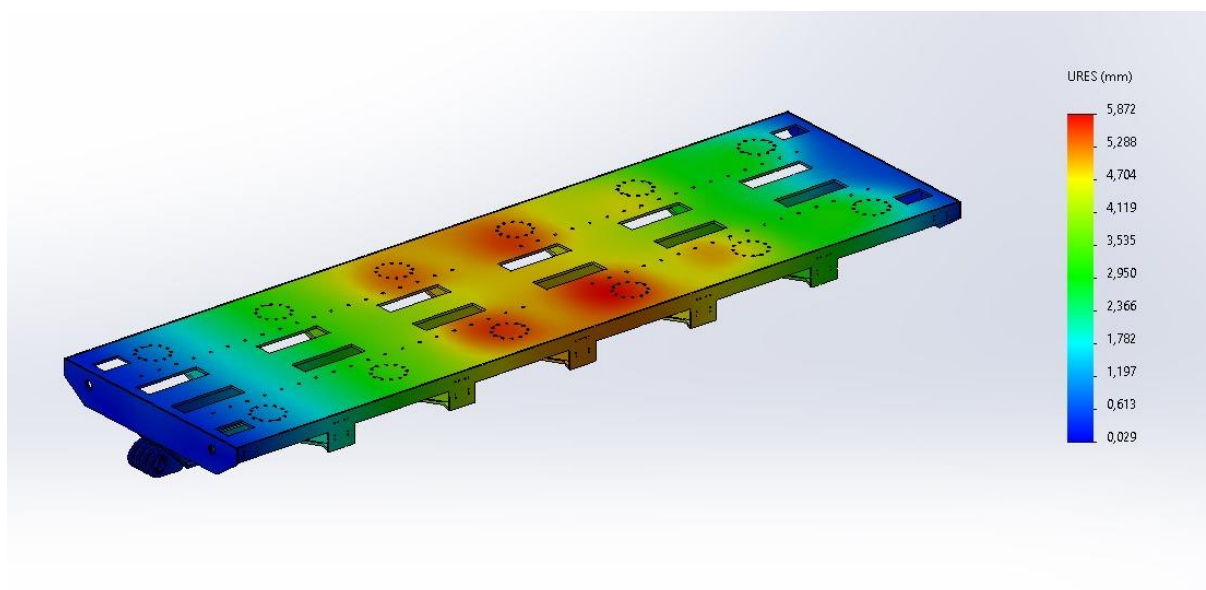
Slika 121. Opterećenje šasije modula

Na slici 122. prikazana je raspodjela naprezanja modula odnosno šasije modula prema von Mises-u.



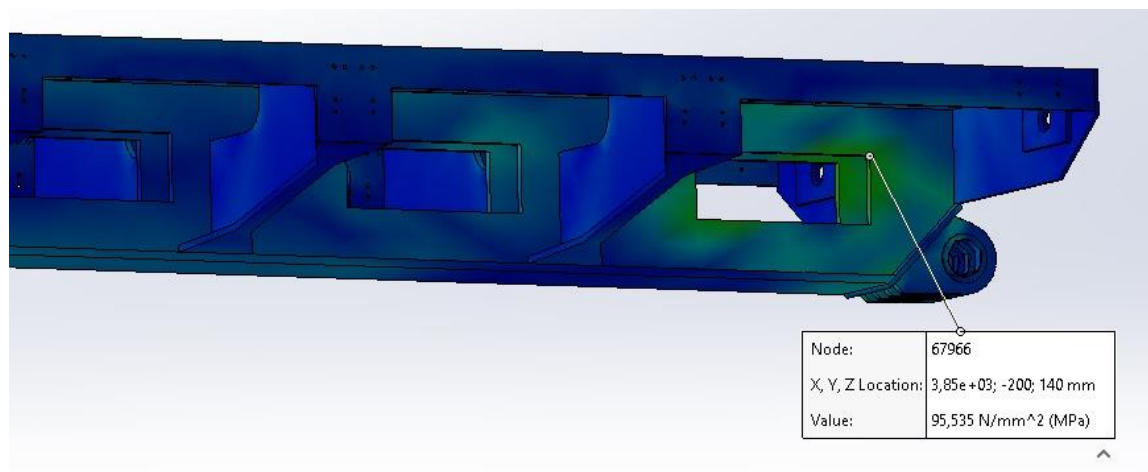
Slika 122. Raspodjela naprezanja šasije modula prema von Mises-u

Na slici 123. prikazana je raspodjela deformacija na šasiji modula.



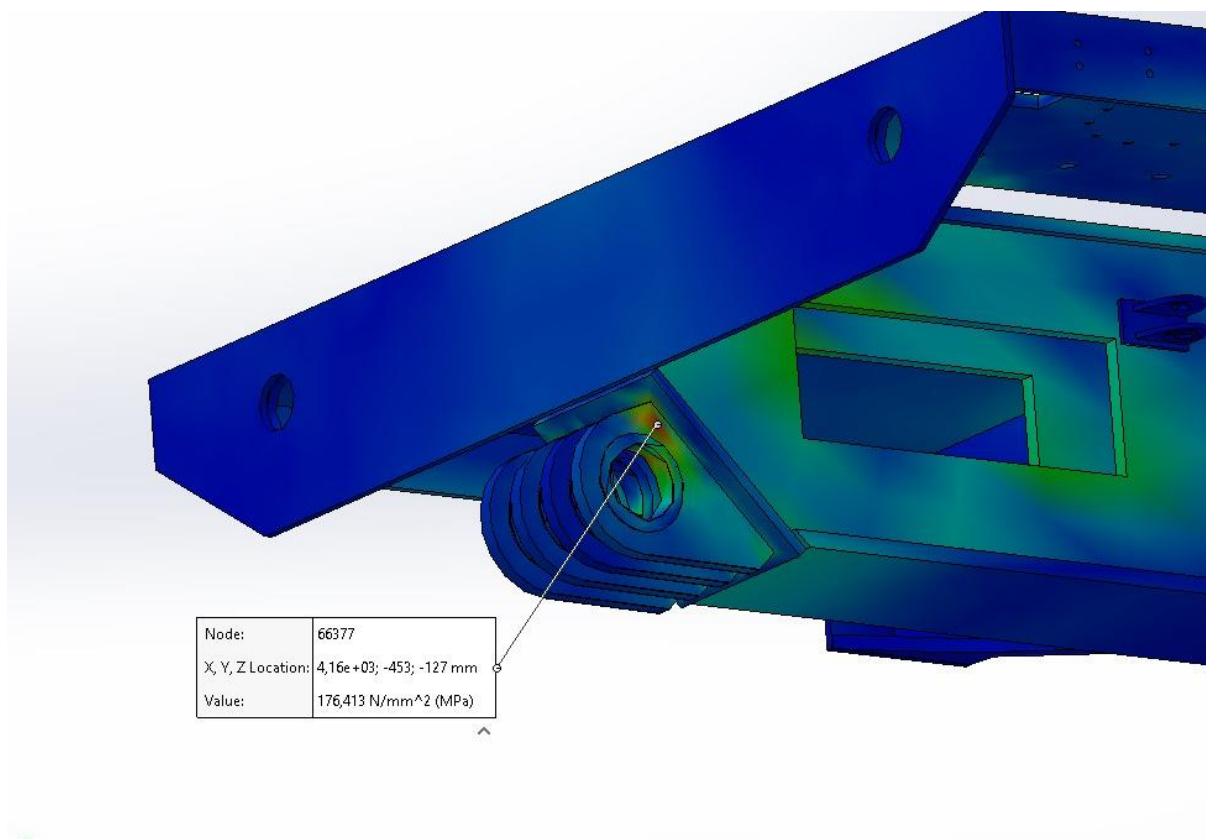
Slika 123. Raspodjela deformacija na šasiji modula

Na slici 124. prikazan je položaj i iznos jednog od mjesta koncentracije naprezanja na šasiji modula. Dodana su zaobljenja u kutovima utora kako bi se naprezanja smanjila.



Slika 124. Naprezanje na rubu utora

Na slici 125. prikazano je najveće naprezanje u šasiji modula i njegov položaj. To naprezanje je i dalje unutar dozvoljenog za odabrani materijal šasije modula.



Slika 125. Maksimalno naprezanje u šasiji modula

9.3. Analitički proračun stupa nadogradnje na izvijanje

Prije proračuna stupa nadogradnje potrebno je odrediti slobodnu duljinu izvijanja.



$$l_0 = 2l$$

Slika 126. Model izvijanja štapa [47]

Za tip izvijanja sa slike 126. slobodna duljina izvijanja se računa:

$$l_0 = 2 \cdot l_s$$

gdje je:

$l_s = 1125$ mm – visina stupa.

$$l_0 = 2250$$
 mm

Kako bi se dobilo opterećenje na jednom stupu, potrebno je računati s četvrtinom mase spremnika.

$$G_{1/4\text{spremnika}} = \frac{1}{4} \cdot m_{\text{spremnika}} \cdot g \quad (9.8)$$

$$G_{1/4\text{spremnika}} = 309\,015$$
 N

Nakon toga je potrebno odrediti da li se radi o elastičnom ili neelastičnom području. Za to je potrebno odrediti vitkost λ te ukoliko je vitkost čelika $\lambda > 105$ radi se o elastičnom području i koristi se Eulerova jednadžba za elastično izvijanje. Ako je $\lambda < 105$ koristi se Tetmajerova jednadžba za neelastično područje.

$$\lambda = \frac{l_0}{i_{\min}} \quad (9.9)$$

$$i_{\min} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}} \quad (9.10)$$

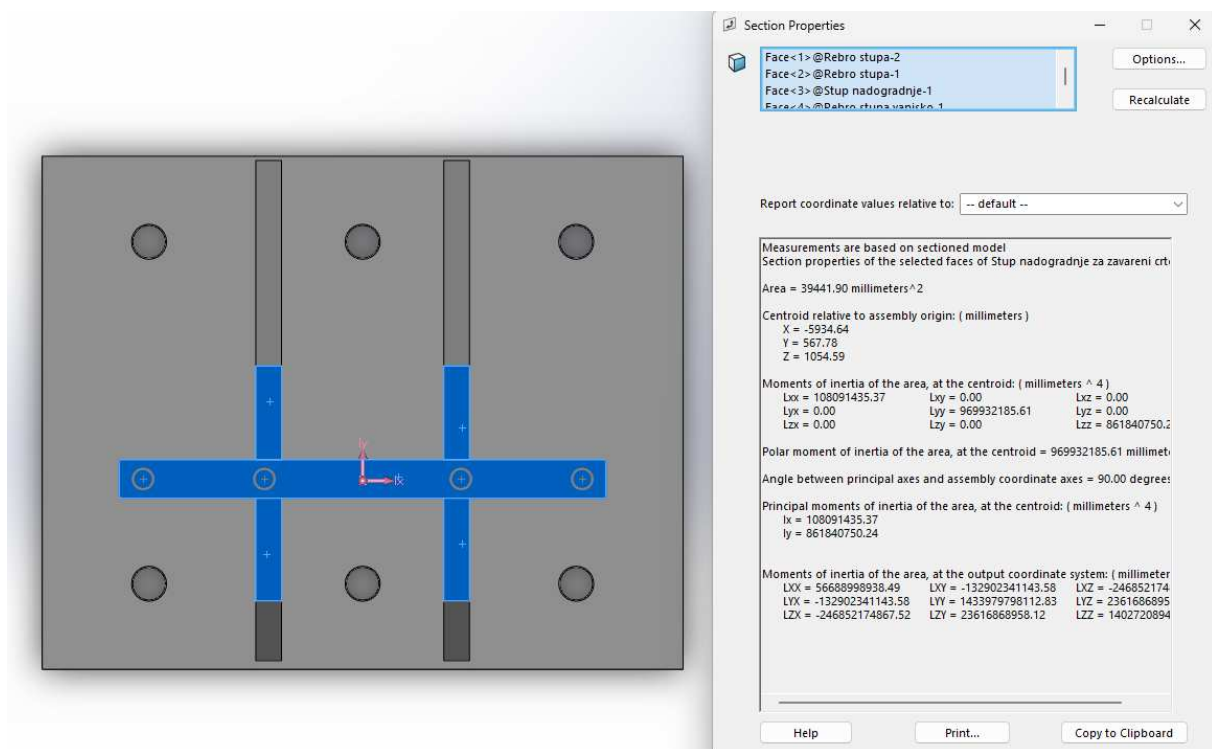
gdje su:

i_{\min} – polumjer tromosti

I_{\min} – najmanji aksijalni moment tromosti presjeka [mm⁴]

A – površina poprečnog presjeka [mm²]

Njihove vrijednosti su određene u programskom paketu SOLIDWORKS. S obzirom da se stup izvodi kao ploča sa zavarenim rebrima promjenjivog presjeka, površina je uračunata s prosječnom površinom rebara.



Slika 127. Presjek stupa za računanje površine i aksijalnog momenta tromosti

Uvrštavanjem vrijednosti iz slike 127. u izraze 9.9 i 9.10 dobije se sljedeće:

$$I_{\min} = 108\,091\,435,4 \text{ mm}^4$$

$$A = 39\,441,9 \text{ mm}^2$$

$$i_{\min} = 52,35$$

$$\lambda = 42,98 < 105 \rightarrow \textit{neelastično područje}$$

Po Tetmajeru za tvrdi čelik naprezanje izvijanja σ_k se računa sljedećim izrazom:

$$\sigma_k = 335 - 0,62\lambda \quad (9.11)$$

$$\sigma_k = 308,3524 \text{ N/mm}^2$$

Iz čega se može dobiti dopušteno opterećenje:

$$F_{\text{dop}} = \frac{F_k}{S} = \frac{\sigma_k \cdot A}{S} \quad (9.12)$$

gdje je:

F_{dop} – stvarna sila kojom se može opteretiti nosač [N]

F_k – najmanja sila pri kojoj se pojavljuje izvijanje [N]

$S = 8$ – faktor sigurnosti u neelastičnom području 3...8

$$F_{\text{dop}} = 1\,520\,250,57 \text{ N}$$

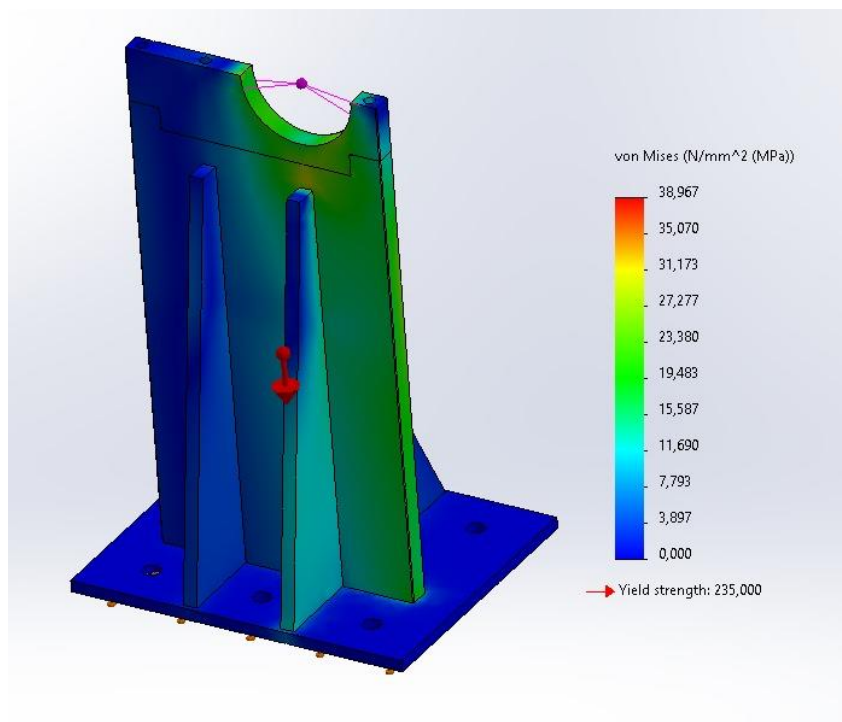
$$G_{1/4\text{spremnika}} < F_{\text{dop}} \rightarrow \text{Zadovoljava!}$$

9.4. Kontrolna MKE analiza stupa nadogradnje i nosača

Kao i za modul, MKE analiza stupa je provedena unutar programskog paketa SOLIDWORKS te služi isključivo kao kontrolna analiza. Prvo je potrebno definirati rubne uvjete. Na donjoj strani ploče stupa definira se uklještenje. Nakon toga se određuje opterećenje. S obzirom da se masa spremnika raspoređuje na 4 stupa, kao opterećenje se uzima $\frac{1}{4}$ mase spremnika:

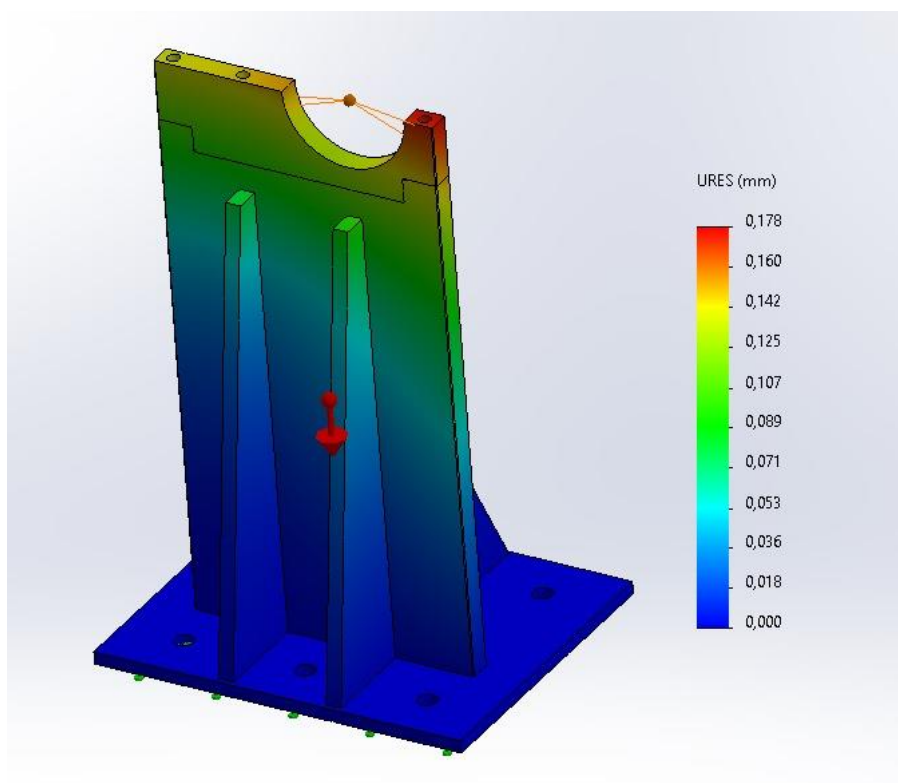
$$m_{1/4\text{spremnika}} = 31\,500 \text{ kg}$$

Postavlja se jedna koncentrirana sila u točku središta rukavca spremnika i povezuje se na površinu donje polutke nosača. Zatim je potrebno izraditi mrežu konačnih elemenata za koju su korišteni tetraedarski konačni elementi. Nakon toga se provodi simulacija. Na slici 128. prikazana je raspodjela naprezanja u stupu nadogradnje.



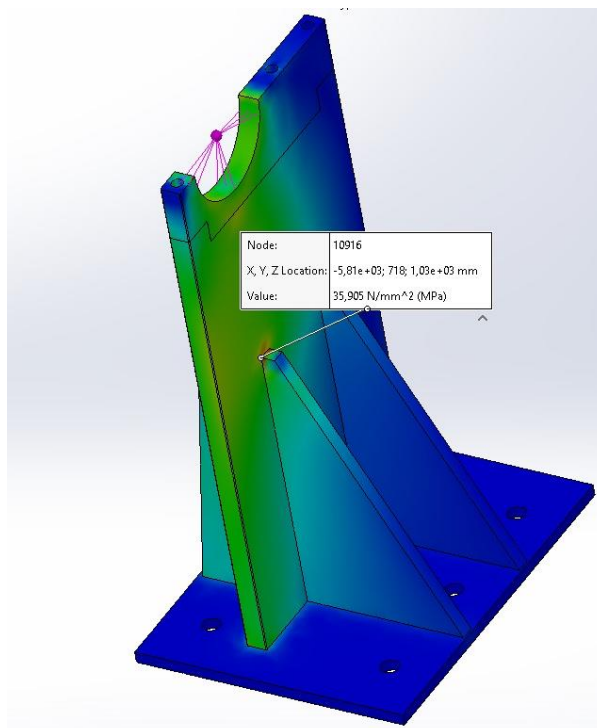
Slika 128. Raspodjela naprezanja stupa nadogradnje prema von Mises-u

Na slici 129. prikazana je raspodjela deformacija u stupu nadogradnje.



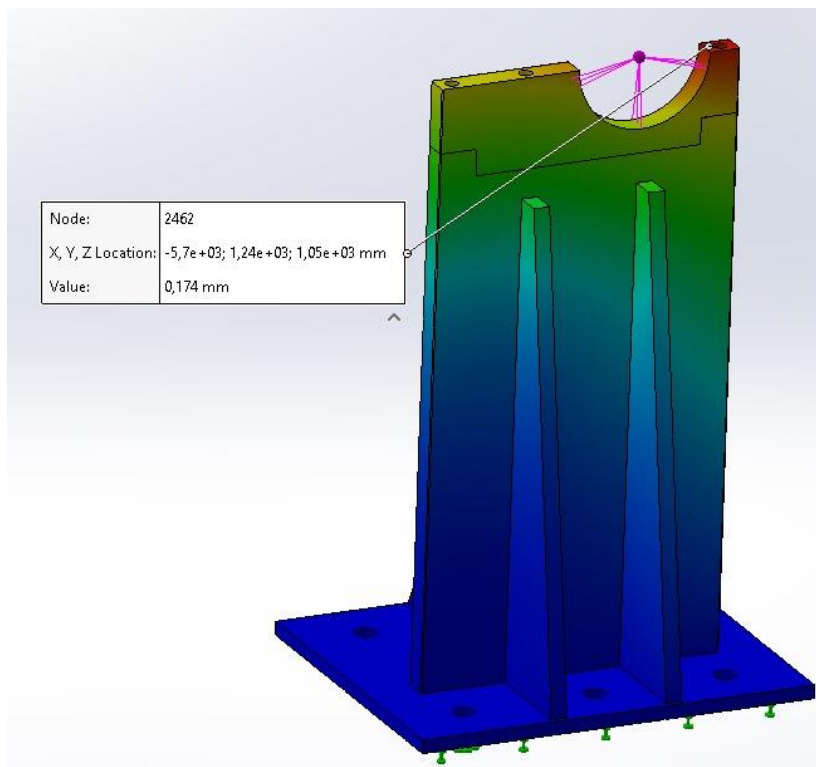
Slika 129. Raspodjela deformacija stupa nadogradnje

Na slici 130. prikazan je položaj i iznos maksimalnog napreznja.



Slika 130. Maksimalno napreznja u stupu nadogradnje

Na slici 131. prikazana je maksimalna deformacija, njen iznos i lokacija.



Slika 131. Maksimalna deformacija u stupu nadogradnje

9.5. Proračun vijaka na odrez

Prilikom proračuna vijaka na odrez potrebno je uzeti u obzir i deakceleraciju prilikom kočenja koja kod tegljača i prikolica velikih masa iznosi:

$$a = 0,8 \cdot g. \quad (9.13)$$

9.5.1. Dosjedni vijak M24 – spoj nosač/stup

Za spoj nosača i stupa odabran je dosjedni vijak M24 kvalitete 8.8. Spoj je prikazan na slici 79. Površina vijka je $A_v = 325 \text{ mm}^2$. Potrebno je izračunati dopušteno posmično naprezanje:

$$\tau_{dop} = 0,4 \cdot Re \quad (9.14)$$

gdje je:

$Re = 640 \text{ N/mm}^2$ – za vijak razreda čvrstoće 8.8.

$$\tau_{dop} = 256 \text{ N/mm}^2.$$

Izraz za dobivanje potrebnog broja vijaka je sljedeći:

$$n \geq \frac{F_{\text{koč}}}{A_v \cdot \tau_{\text{dop}}} \quad (9.15)$$

$$F_{\text{koč}} = a \cdot m_{1/4\text{spremnika}} \quad (9.16)$$

$$F_{\text{koč}} = 247\,212 \text{ N}$$

$$n \geq 2,971$$

Odabran broj vijaka po stupu je:

$$n = 3.$$

9.5.2. Vijak M36 – spoj stup/podkonstrukcija

Za spoj stupa s podkonstrukcijom odabran je vijak M36x90 kvalitete 8.8. Prikazan je na slici 78. Njegova površina iznosi $A_v = 759 \text{ mm}^2$. Treba izračunati potreban broj vijaka kao i u prethodnom proračunu. S obzirom da je vijak istog razreda čvrstoće, dopušteno posmično naprezanje ostaje isto.

$$F_{\text{koč}} = a \cdot (m_{1/4\text{spremnika}} + m_{\text{stup i nosač}}) \quad (9.17)$$

gdje je:

$m_{\text{stup i nosač}} = 423 \text{ kg}$ – masa sklopa stupa, nosača i poklopca nosača

$$F_{\text{koč}} = 250\,531,704 \text{ N}$$

Prema izrazu 9.15 dobije se sljedeće:

$$n \geq 1,29.$$

Odabran broj vijaka po stupu je:

$$n = 6.$$

9.5.3. Vijak M30 – spoj nadogradnja i šasija

Za spoj nadogradnje odnosno podkonstrukcije nadogradnje i šasije odabran je vijak M30x105 kvalitete 8.8. Prikazan je na slici 80. Njegova površina iznosi $A_v = 519 \text{ mm}^2$. Treba izračunati potreban broj vijaka kao i u prethodnom proračunu. S obzirom da je vijak istog razreda čvrstoće, dopušteno posmično naprezanje ostaje isto.

$$F_{\text{koč}} = a \cdot (m_{\text{spremnika}} + m_{\text{nadogradnja}}) \quad (9.18)$$

gdje je:

$m_{\text{nadogradnja}} = 6012 \text{ kg}$ – masa nadogradnje

$$F_{koč} = 1\,036\,030,18 \text{ N}$$

Prema izrazu 9.15 dobije se sljedeće:

$$n \geq 7,8.$$

Odabran broj vijaka po nadogradnji je:

$$n = 36.$$

9.5.4. Proračun zavara – stup nadogradnje i ploča stupa

Zavar na spoj stupa nadogradnje i ploče stupa opterećen je na tlak, odrez i savijanje. Utjecaj tlaka na zavar je minimalan, ali je uveden u proračun. Tlak radi masa spremnika, odrez i savijanje radi sila kočenja od mase spremnika.

Normalno naprezanje zbog tlačne sile računa se sljedećim izrazom:

$$\sigma_t = \frac{G}{A_z} \quad (9.19)$$

gdje su:

$$G_{\text{spremnika}} = 1\,236\,060 \text{ N} - \text{težina spremnika}$$

$$A_z - \text{površina zavara [mm}^2\text{]}$$

Zavar se nalazi na obodu donjeg dijela stupa te se njegova površina računa sljedećim izrazom:

$$A_z = (b + 2a_z) \cdot (c + 2a_z) - (b \cdot c) \quad (9.20)$$

gdje su:

$$a_z = 8 \text{ mm} - \text{debljina zavara}$$

$$b = 570 \text{ mm} - \text{duljina stupa}$$

$$c = 45 \text{ mm} - \text{širina stupa}$$

$$A_z = 10\,096 \text{ mm}^2$$

Uvrštavanjem u izraz 9.19 dobije se:

$$\sigma_t = 12,48 \text{ N/mm}^2.$$

Tangencijalno naprezanje zbog smične sile računa se izrazom:

$$\tau_s = \frac{F_{koč}}{A_z} \quad (9.21)$$

gdje je:

$$F_{koč} = m_{\text{spremnika}} \cdot 0,8 \cdot g = 100\,800 \text{ N} - \text{sila kočenja}$$

$$\tau_s = 9,98 \text{ N/mm}^2.$$

Tangencijalno naprezanje uzrokovano momentom savijanja dobiva se:

$$\tau_f = \frac{F_{\text{koč}} \cdot r}{W} \quad (9.22)$$

gdje su:

$r = 1125 \text{ mm}$ – krak djelovanja sile kočenja, udaljenost centra rukavca od zavara

W - moment otpora [mm^3]

$$W = \frac{(c + 2a_z) \cdot (b + 2a_z)^2}{6} - \frac{c \cdot b^2}{6} \quad (9.23)$$

$$W = 1\,054\,442,67 \text{ mm}^3$$

$$\tau_f = 107,55 \text{ N/mm}^2.$$

Rezultantno tangencijalno naprezanje se računa:

$$\tau_{\text{uk}} = \sqrt{\tau_s^2 + \tau_f^2} \quad (9.24)$$

$$\tau_{\text{uk}} = 108,01 \text{ N/mm}^2.$$

Ekvivalentno naprezanje se dobiva:

$$\sigma_{\text{ekv}} = \sqrt{\sigma_t^2 + \tau_{\text{uk}}^2} \quad (9.25)$$

$$\sigma_{\text{ekv}} = 108,73 \text{ N/mm}^2.$$

Potrebno je provjeriti da li ekvivalentno naprezanje zadovoljava uvjet:

$$\sigma_{\text{ekv}} \leq \sigma_{\text{dop}} \quad (9.26)$$

Gdje je:

$\sigma_{\text{dop}} = 150 \text{ N/mm}^2$ - dopušteno naprezanje [47]

$$108,73 \text{ N/mm}^2 \leq 150 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \rightarrow \text{Zadovoljava!}$$

10. ZAKLJUČAK

U radu je napravljen pregled tipova spremnika za transport i skladištenje iskorištenog nuklearnog goriva. Na temelju analize identificirani su ključni izazovi na koje treba pripaziti prilikom koncipiranja odnosno konstruiranja prikolice za prijevoz takvih spremnika. Također, napravljen je pregled postojećih prikolica za transport specijaliziranog tereta, pri čemu je modularna konstrukcija odabrana kao najpogodnije rješenje zahvaljujući svojoj prilagodljivosti, velikoj nosivosti i mogućnostima konfiguracije. Razrađeno je nekoliko koncepata nadogradnje, a odabran je koncept s promjenjivim dimenzijama duljine, koji omogućuje prilagodbu različitim vrstama spremnika. Konceptno rješenje prikolice sastoji se od dva modula, ukupno po 12 osovina, uz mogućnost vuče tegljačem ili samohodnim modulom te nudi široki raspon mogućnosti zakretanja kotača i prilagodbe visine prikolice. Uz to, definirana je potrebna svjetlosna oprema i označavanje kako bi se osigurao siguran transport u skladu s međunarodnim standardima za sigurnost radioaktivnog tereta. Provedeni proračuni i MKE analize potvrdili su čvrstoću i stabilnost predloženih konstrukcijskih rješenja. Iako predloženo rješenje predstavlja kvalitetnu osnovu, ono nije jedino moguće, a dodatni rad mogao bi se usmjeriti na daljnju optimizaciju konstrukcije s ciljem povećanja sigurnosti i smanjenje troškova.

LITERATURA

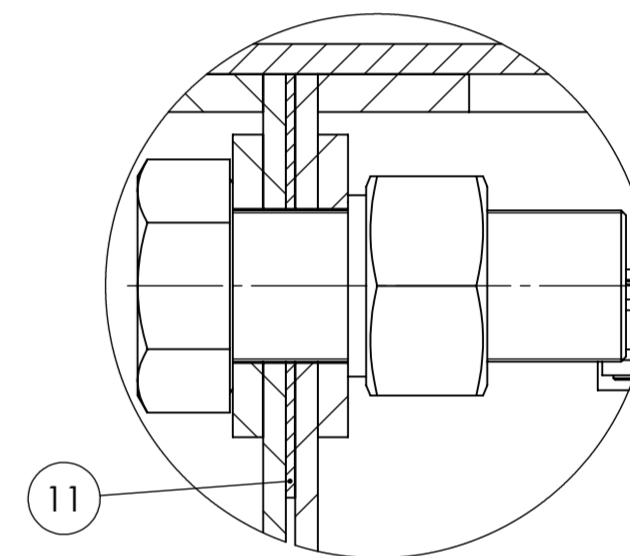
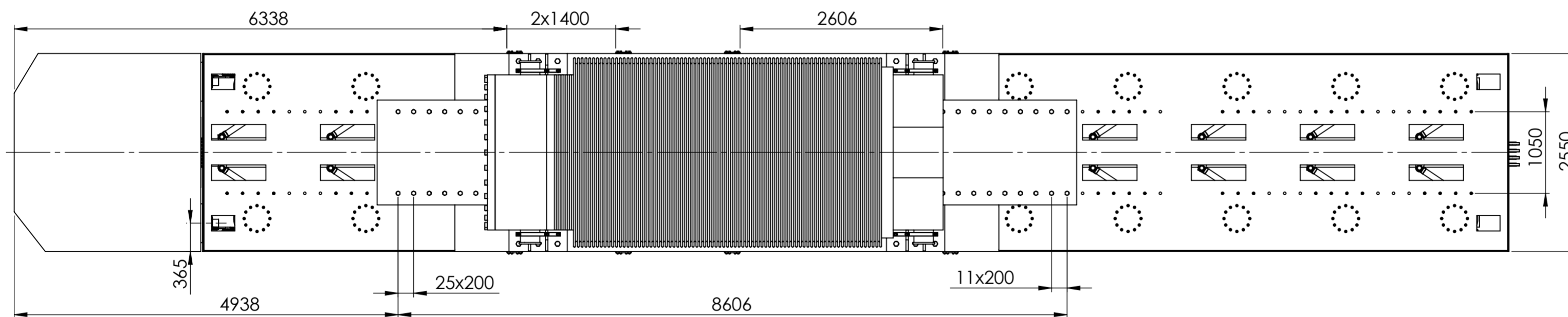
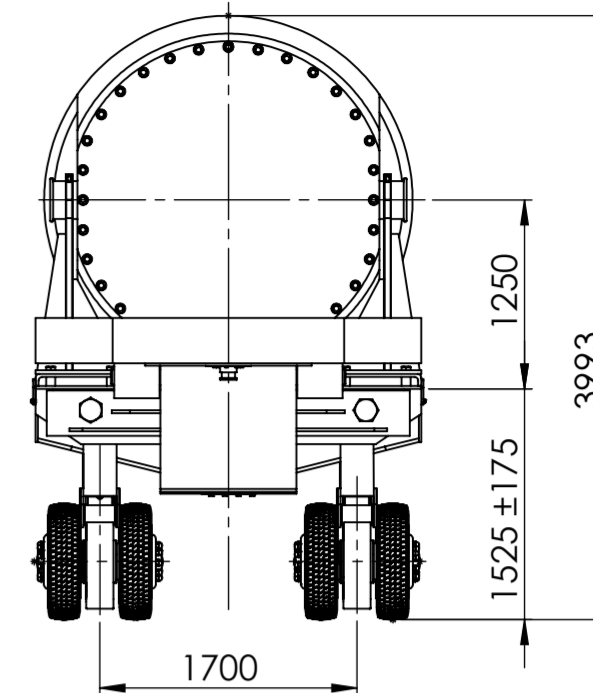
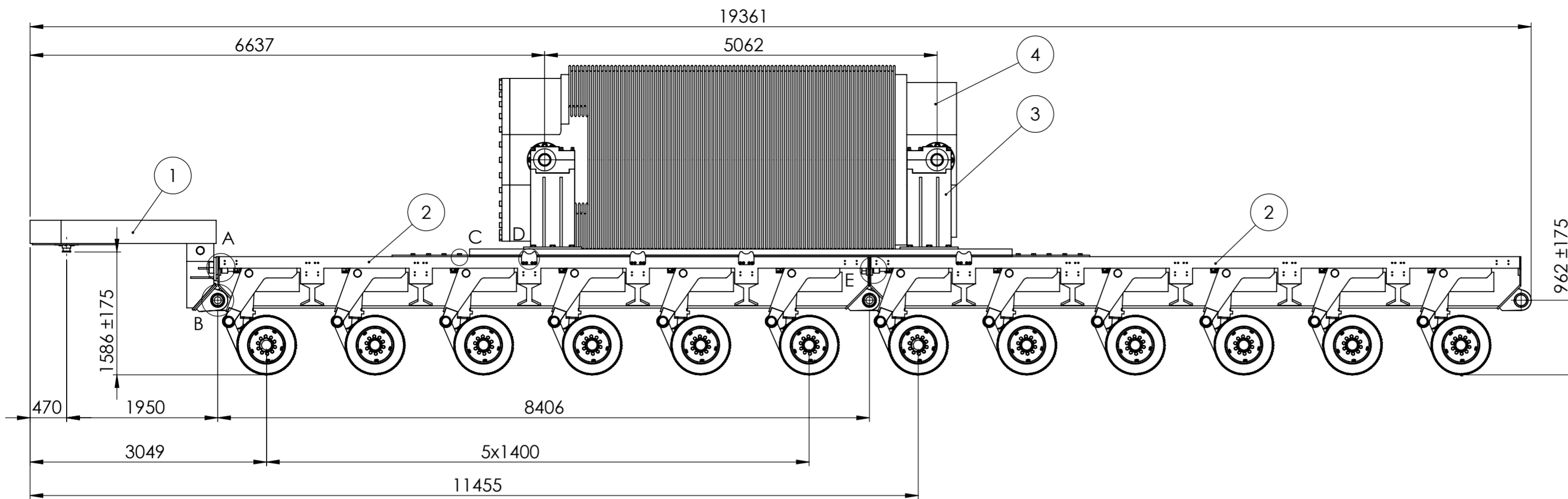
- [1] <https://nrl.mit.edu/reactor/fission-process> (07.06.2024.)
- [2] <https://www.quora.com/In-a-typical-PWR-nuclear-reactor-does-the-coolant-come-in-direct-contact-with-the-U-235-fuel-pellets-or-just-the-cladding> (07.06.2024.)
- [3] <https://nuclear.mcmaster.ca/resources/how-does-it-work-2/nuclear-fuel/> (07.06.2024.)
- [4] https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-fuel-rods-arranged-in-a-hexagonal-fuel-bundle-Figure-courtesy-of-T_fig4_255945970 (08.06.2024.)
- [5] <https://www.japantimes.co.jp/news/2023/02/06/business/france-strategy-nuclear-waste/> (08.06.2024.)
- [6] [Interim storage - BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH](#) (08.06.2024.)
- [7] <https://www.themandarin.com.au/185845-the-worlds-first-deep-geological-nuclear-vault-will-store-radioactive-waste-in-finland-for-100000-years/> (10.06.2024.)
- [8] <https://www.gns.de/media/ia5nh2zi/gns-muelheim-2.jpg> (10.06.2024.)
- [9] <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.semanticscholar.org%2Fpaper%2FEvaluation-of-nuclear-spent-fuel-dry-storage-casks-Hartnick%2Ffc43a625afb03816998f9aa871c8997e14737a8d3&psig=AOvVaw1zLLo9oL75QBb9GGTZM21g&ust=1724484974913000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCLiOt6TNiogDFQAAAAAdAAAAABAo> (10.06.2024.)
- [10] <https://www.gns.de/en/casks-containers-equipment/spent-fuel-hlw/lwr/castor-v/castor-v19/> (10.06.2024.)
- [11] https://www.gns.de/media/vp0fgeay/castor_v19_produkinfo_2023_10_en_v01.pdf (10.06.2024.)
- [12] [Cosmic particles allow X-ray vision | etson.eu](#) (10.06.2024.)
- [13] <https://www.gns.de/en/casks-containers-equipment/spent-fuel-hlw/lwr/castor-v/castor-v52/> (10.06.2024.)
- [14] https://www.gns.de/media/s0jbnpyr/castor_v52_produkinfo_2023_10_en_v01.pdf (10.06.2024.)
- [15] <https://tes.bam.de/TES/Navigation/DE/Gefahrgut/Behaelter-radioaktive-Stoffe/Pruefmethoden-und-Forschung/pruefmethoden-und-forschung.html> (10.06.2024.)

- [16] [BAM - TES - Beispiele für Behälterprüfungen - Beispiele für Behälterprüfungen](#) (11.06.2024.)
- [17] <https://www.ensi.ch/en/topic/transport/> (11.06.2024.)
- [18] [Transport of radioactive materials - VGA.expert GmbH](#) (11.06.2024.)
- [19] <https://nagra.ch/en/knowledge-centre/safe-transport-of-radioactive-waste/> (11.06.2024.)
- [20] [A nuclear waste to be broken up in Belgium | Robin des Bois](#) (11.06.2024.)
- [21] <https://www.nooteboom.com/trailers/euro-px-low-loader/> (20.08.2024.)
- [22] <https://www.nooteboom.com/wp-content/uploads/Nooteboom-Documentation-English-MANOOVR-Brochure-English.pdf> (20.08.2024.)
- [23] <https://www.nooteboom.com/wp-content/uploads/Nooteboom-Documentation-English-Teletrailer.pdf> (20.08.2024.)
- [24] <https://go.faymonville.com/brochure/faymonville-en-579491> (20.08.2024.)
- [25] <https://go.faymonville.com/brochure/faymonville-en-605621> (20.08.2024.)
- [26] https://www.goldhofer.com/fileadmin//downloads/BRO_TT/EN/THP_SL-S_SL-L_SL_EN-A4.pdf (20.08.2024.)
- [27] https://www.goldhofer.com/fileadmin//downloads/BRO_TT/EN/ADDRIVE_PST-SL_EN-A4.pdf (20.08.2024.)
- [28] <https://www.tii-group.com/tii-scheuerle/our-solutions/low-bed-semi-trailer/scheuerle-eurocompact-128t> (25.08.2024.)
- [29] <https://www.tii-group.com/tii-scheuerle/our-solutions/modular-trailer> (25.08.2024.)
- [30] <https://www.tii-group.com/tii-scheuerle/our-solutions/spmt/scheuerle-spmt> (25.08.2024.)
- [31] <https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/screenshots/pics/72f1ffc2e22c793e3de17dcf515e3b86/large.jpg> (10.11.2024.)
- [32] https://www.wagenborgnedlift.com/media/4858/materieelbrochure-modulaire-trailers-wagenborg-nedlift_uk.pdf (10.11.2024.)
- [33] [245/70/R17.5 | 3D CAD Model Library | GrabCAD](#) (10.11.2024.)
- [34] <https://grabcad.com/library/spmt-wagenborg-the-netherlands-1> (10.11.2024.)
- [35] https://www.jostaustralia.com.au/fileadmin/user_upload/JOST_Master_Catalogue-v2-web.pdf (20.12.2024.)
- [36] <https://grabcad.com/library/gns-castor-v-19-1> (20.08.2024.)
- [37] Šagi, G., Ilinčić, P., Tomić, R.: Konstrukcija nadogradnji vozila i priključnih vozila, nastavni materijali, Zagreb, 2023./2024.
- [38] [Scania R730 8x4 | 3D CAD Model Library | GrabCAD](#) (22.01.2025.)

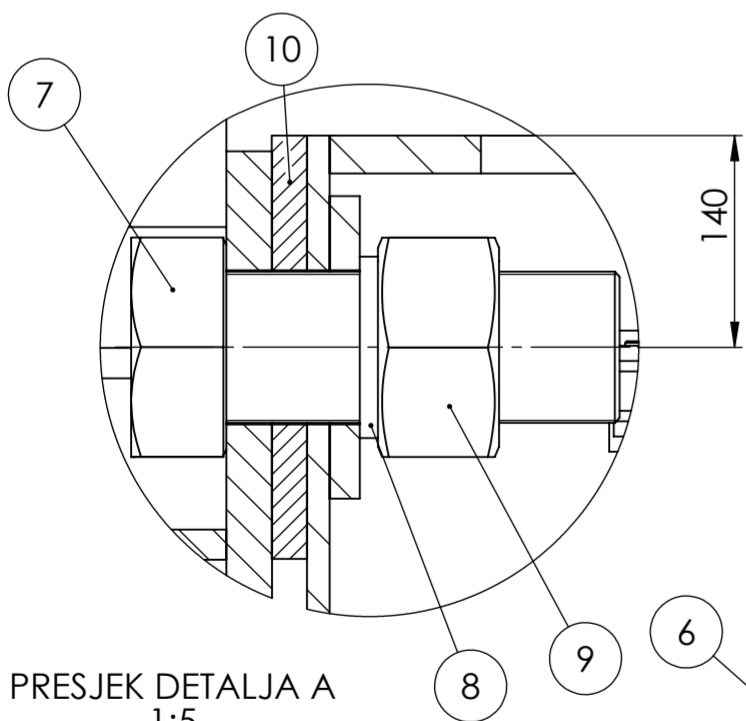
- [39] HELLA: Statutory regulations pursuant to ECE regulation 48
- [40] https://www.hella.com/soe/assets/documents_global/10051702a_AM0.pdf
(20.01.2025.)
- [41] <https://www.czs.hr/hr/izvanredni-prijevoz> (21.01.2025.)
- [42] <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fadrdangerousgoods.com%2Feng%2Fsubstances%2F0002647%2Fun3328-radioactive-material-type-b-u-package-fissile%2F&psig=AOvVaw12382KuT8tvrkErhGAPCqw&ust=1737823050983000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCIDzx8DljiosDFQAAAAdAAAAABAu> (21.01.2025.)
- [43] <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Faltrainadr.com%2Fproduct%2Fadr-class-7-course%2F&psig=AOvVaw0bfpCi42q6WzVdzB3-35md&ust=1737822929283000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQJjRxqFwoTCMjrvYrljosDFQAAAAAdAAAAABAq> (21.01.2025.)
- [44] Huang J., Gui Z.: Determination of Load Capacity and Deformation for Modular Trailer, China, 2013.
- [45] Tropin S. L., Svechnikov I. K., Misinev A. N.: Calculation method loading of the frame of specialized transport modules during the transportation of large-sized heavy loads, Machines and Plants: Design and Exploiting, 2023
- [46] [Hydraulic Modular Trailer – CALIFILARD CONSULTING](#) (10.11.2024.)
- [47] Kraut B.: Strojarski priručnik, Zagreb, 2009.

PRILOZI

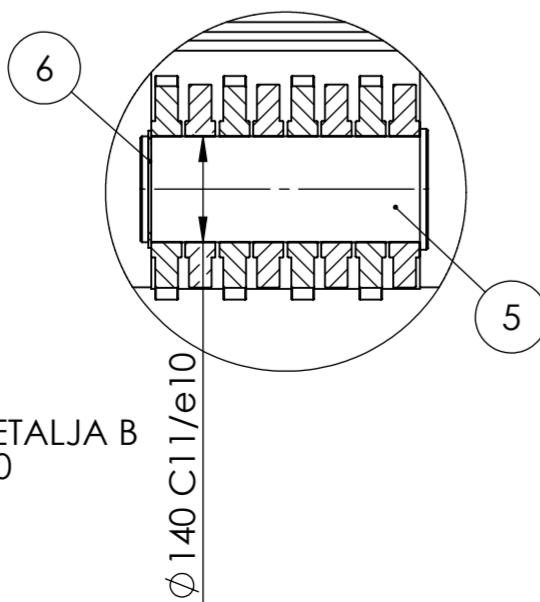
I. Tehnička dokumentacija



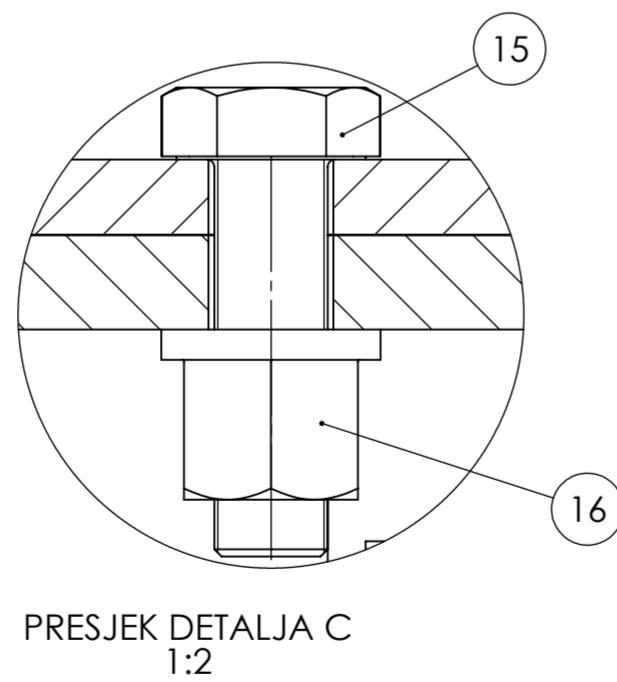
PRESJEK DETALJA E
1:5



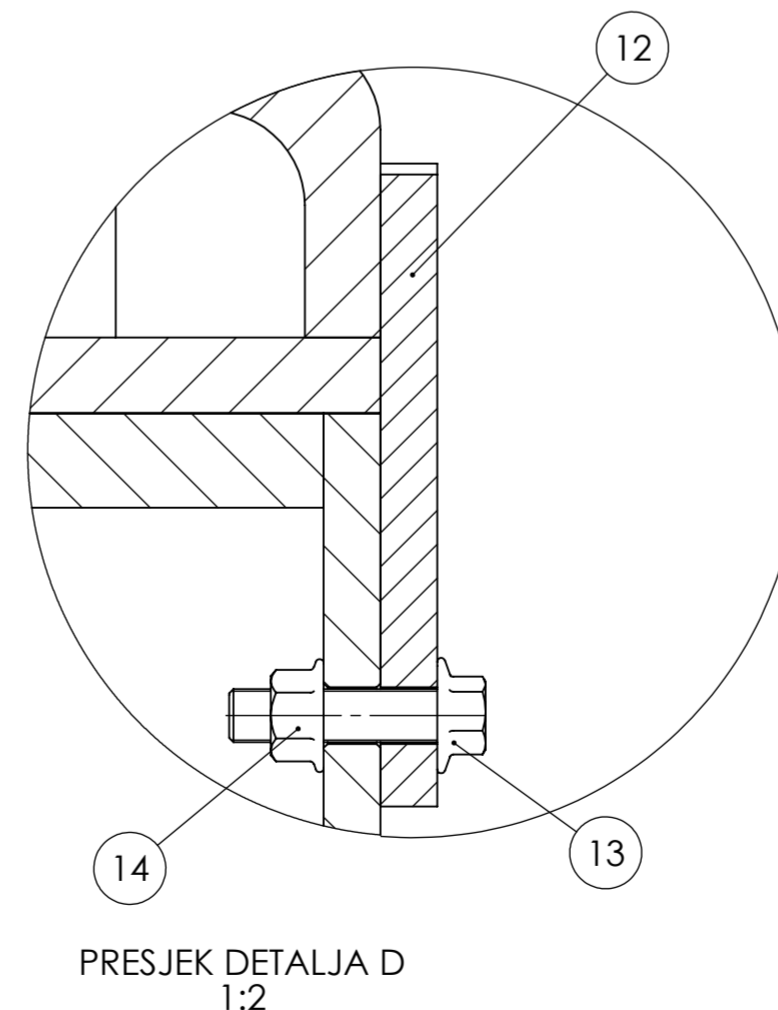
PRESJEK DETALJA A
1:5



PRESJEK DETALJA B
1:10



PRESJEK DETALJA C
1:2

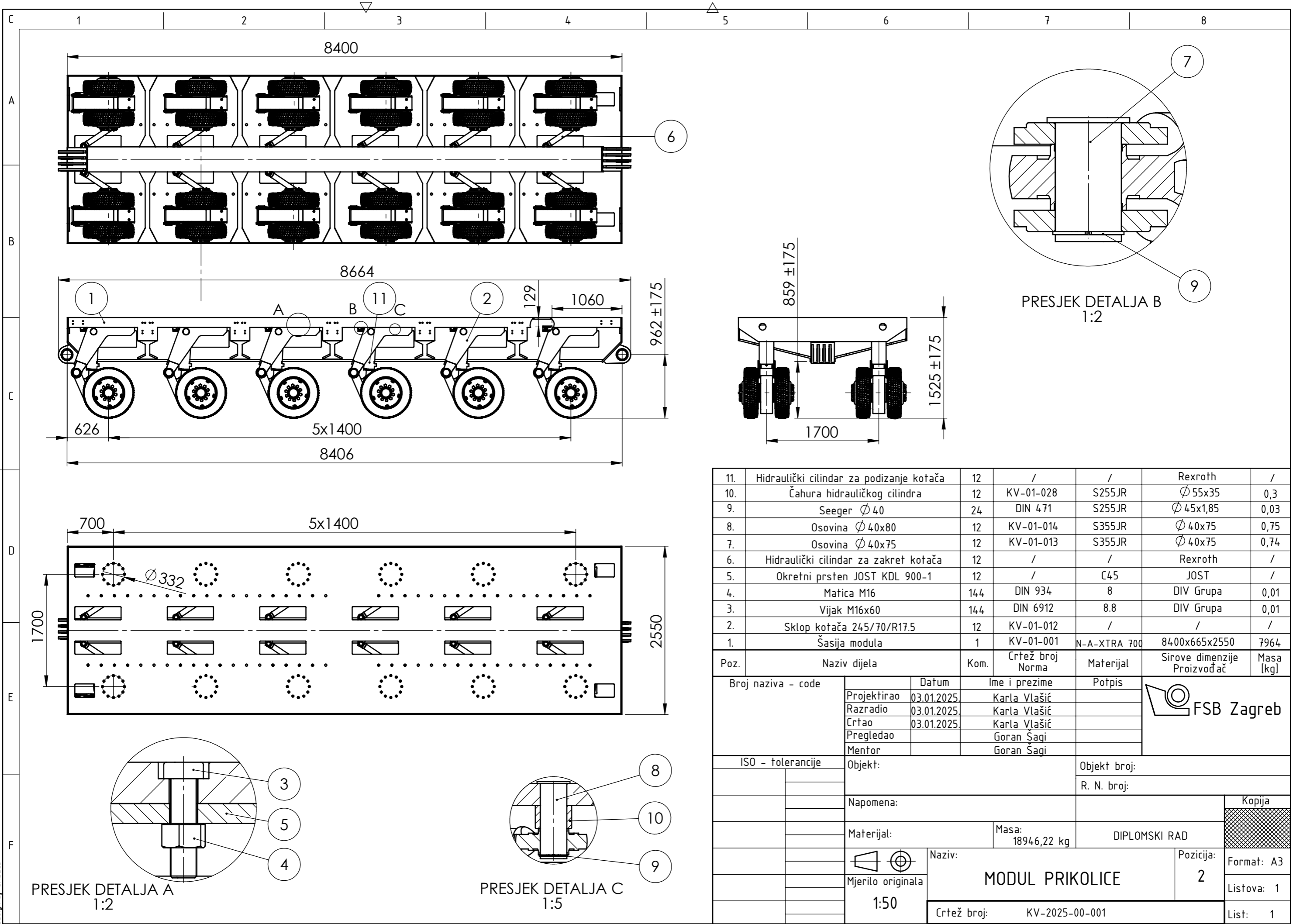


PRESJEK DETALJA D
1:2

Napomena: Prikazani spremnik je GNS CASTOR V/19.
Ovjes je prikazan u srednjem položaju, 1525 ± 175 mm.

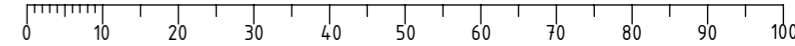
16.	Matica M30	72	DIN 6331	8	DIV Grupa	0,06
15.	Vijak M30x105	72	DIN 6914	8.8	DIV Grupa	0,11
14.	Matica M14	32	DIN 6923	8	DIV Grupa	0,01
13.	Vijak M14x55	32	DIN 6921	8.8	DIV Grupa	0,01
12.	Element za kruto povezivanje	8	KV-2025-01-005	S355JR	200x170x15	3,45
11.	Pločica modul-modul	2	KV-2025-01-007	S355JR	500x280x23	6,34
10.	Pločica sedlo-modul	2	KV-2025-01-006	S355JR	500x280x6	20,78
9.	Matica M100	4	DIN 934	8	DIV Grupa	6,88
8.	Podloška M100	4	DIN EN 28738	S355JR	DIV Grupa	0,04
7.	Vijak M100x260	4	DIN 931	8.8	DIV Grupa	24,79
6.	Seeger $\varnothing 100$	4	DIN 471	S255JR	$\varnothing 118 \times 3,15$	0,13
5.	Svornjak za povezivanje	2	KV-2025-01-008	S355JR	$\varnothing 140 \times 4,00$	27,42
4.	GNS Castor V/19	1	V/19-001	/	$\varnothing 244,0 \times 594,0$	126000
3.	Nadogradnja	1	KV-2025-00-002	/	9000x2468x2550	6012
2.	Modul prikolice	2	KV-2025-00-001	/	8400x1350x2550	18946
1.	Sklop s vučnim svornjakom	1	KV-2025-00-003	/	2400x1150x2550	5107
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa [kg]
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis		
Projektirao		03.01.2025	Karla Vlašić			
Razradio		03.01.2025	Karla Vlašić			
Crtao		03.01.2025	Karla Vlašić			
Pregledao			Goran Šagi			
Mentor			Goran Šagi			
ISO - tolerancije		Objekt:	Objekt broj:			
$\varnothing 140\ C11/e10$	+0,695 +0,285	R. N. broj:				
Napomena:		Materijal:		Masa: 175254 kg	DIPLOMSKI RAD	Kopija
Mjerilo originala		Naziv:		Pozicija:		Format: A2
1:50		PRIKOLIČA ZA PRIJEVOZ SPREMNIK ISKORIŠTENOG NUKLEARNOG GORIVA		Listova: 1		List: 1
		Crtež broj: KV-2025-00-000				

FSB Zagreb

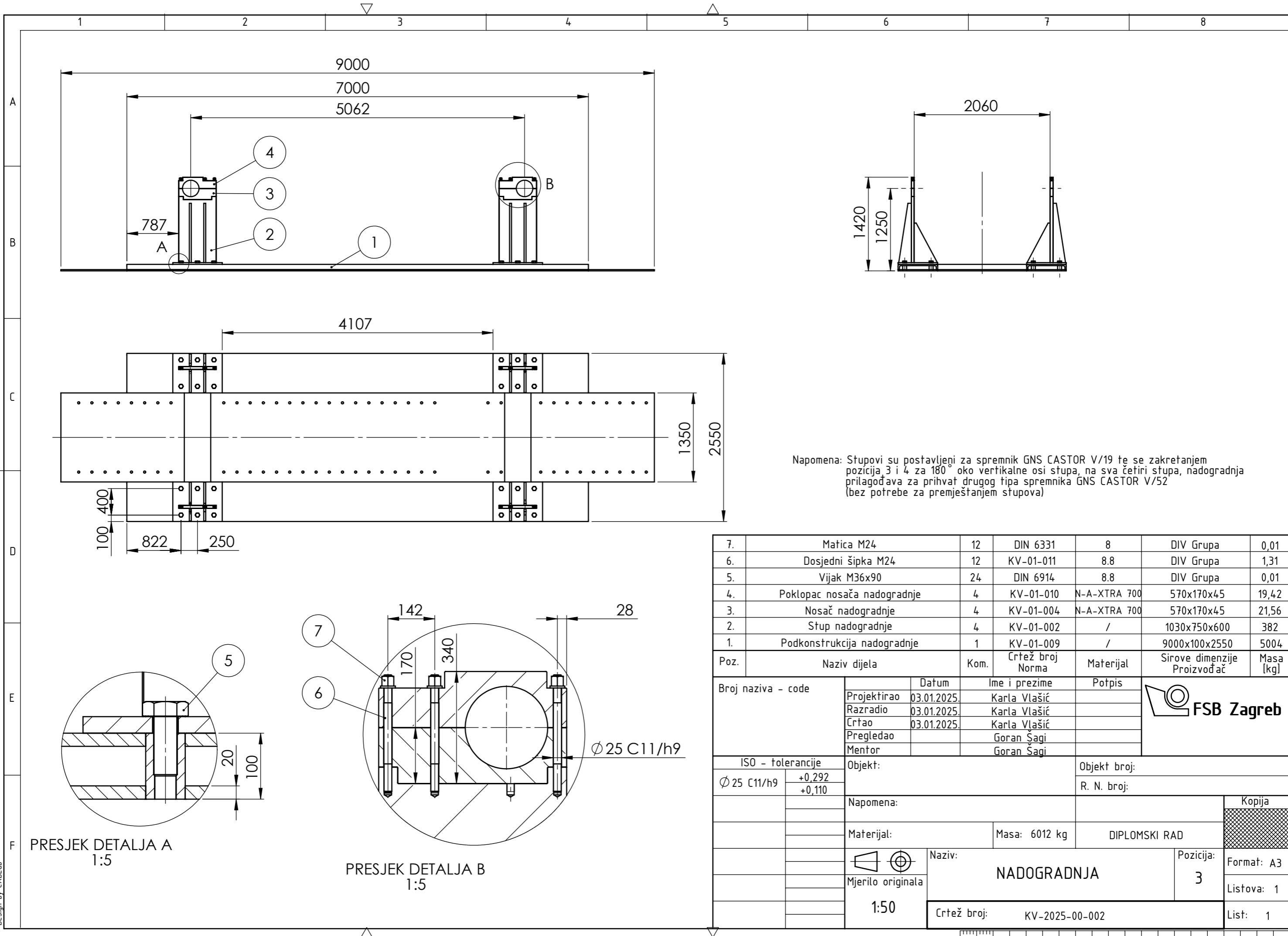


11.	Hidraulički cilindar za podizanje kotača	12	/	/	Rexroth	/
10.	Čahura hidrauličkog cilindra	12	KV-01-028	S255JR	Ø 55x35	0,3
9.	Seeger Ø 40	24	DIN 471	S255JR	Ø 45x1,85	0,03
8.	Osovina Ø 40x80	12	KV-01-014	S355JR	Ø 40x75	0,75
7.	Osovina Ø 40x75	12	KV-01-013	S355JR	Ø 40x75	0,74
6.	Hidraulički cilindar za zakret kotača	12	/	/	Rexroth	/
5.	Okretni prsten JOST KDL 900-1	12	/	C45	JOST	/
4.	Matica M16	144	DIN 934	8	DIV Grupa	0,01
3.	Vijak M16x60	144	DIN 6912	8.8	DIV Grupa	0,01
2.	Sklop kotača 245/70/R17.5	12	KV-01-012	/	/	/
1.	Šasija modula	1	KV-01-001	N-A-XTRA 700	8400x665x2550	7964
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa [kg]

Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	03.01.2025.	Karla Vlašić		
Razradio	03.01.2025.	Karla Vlašić		
Crtao	03.01.2025.	Karla Vlašić		
Pregledao		Goran Šagi		
Mentor		Goran Šagi		
ISO - tolerancije	Objekt:	Objekt broj:		Kopija
		R. N. broj:		
	Napomena:			DIPLOMSKI RAD Format: A3 Listova: 1 List: 1
	Materijal:	Masa: 18946,22 kg		
	Mjerilo originala: 1:50	Naziv: MODUL PRIKOLICE	2	
		Crtež broj: KV-2025-00-001		



Design by CADlab

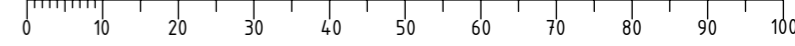


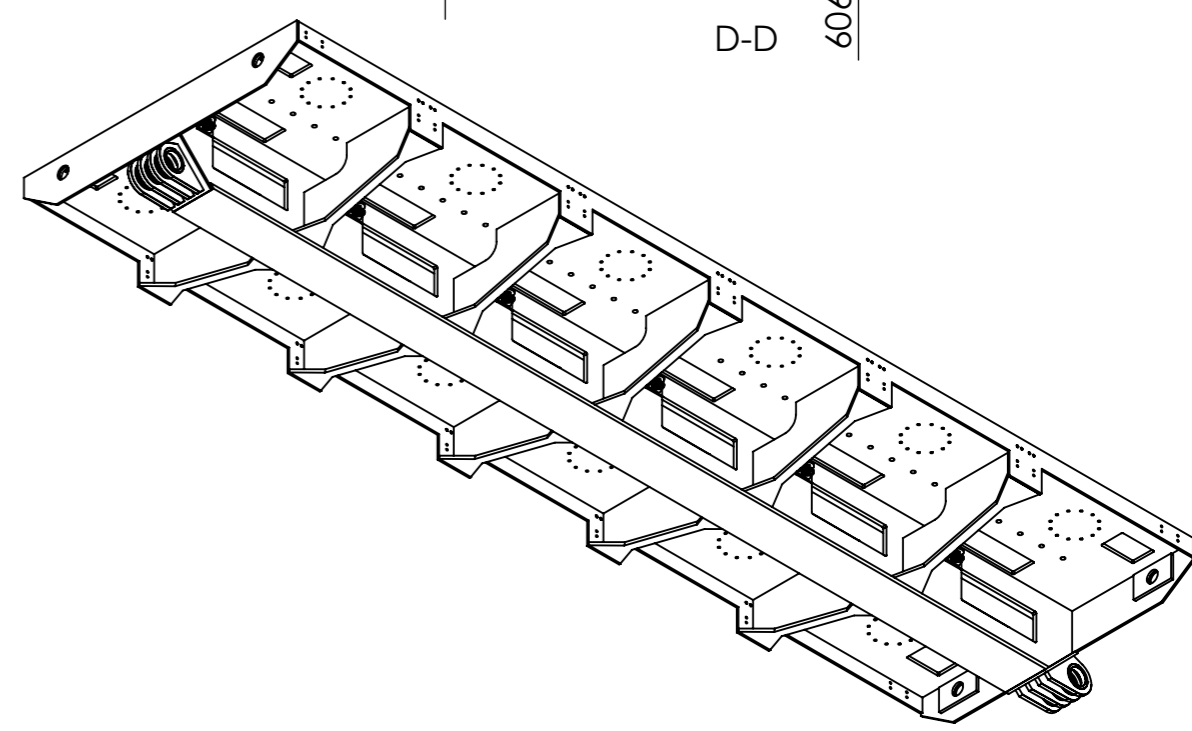
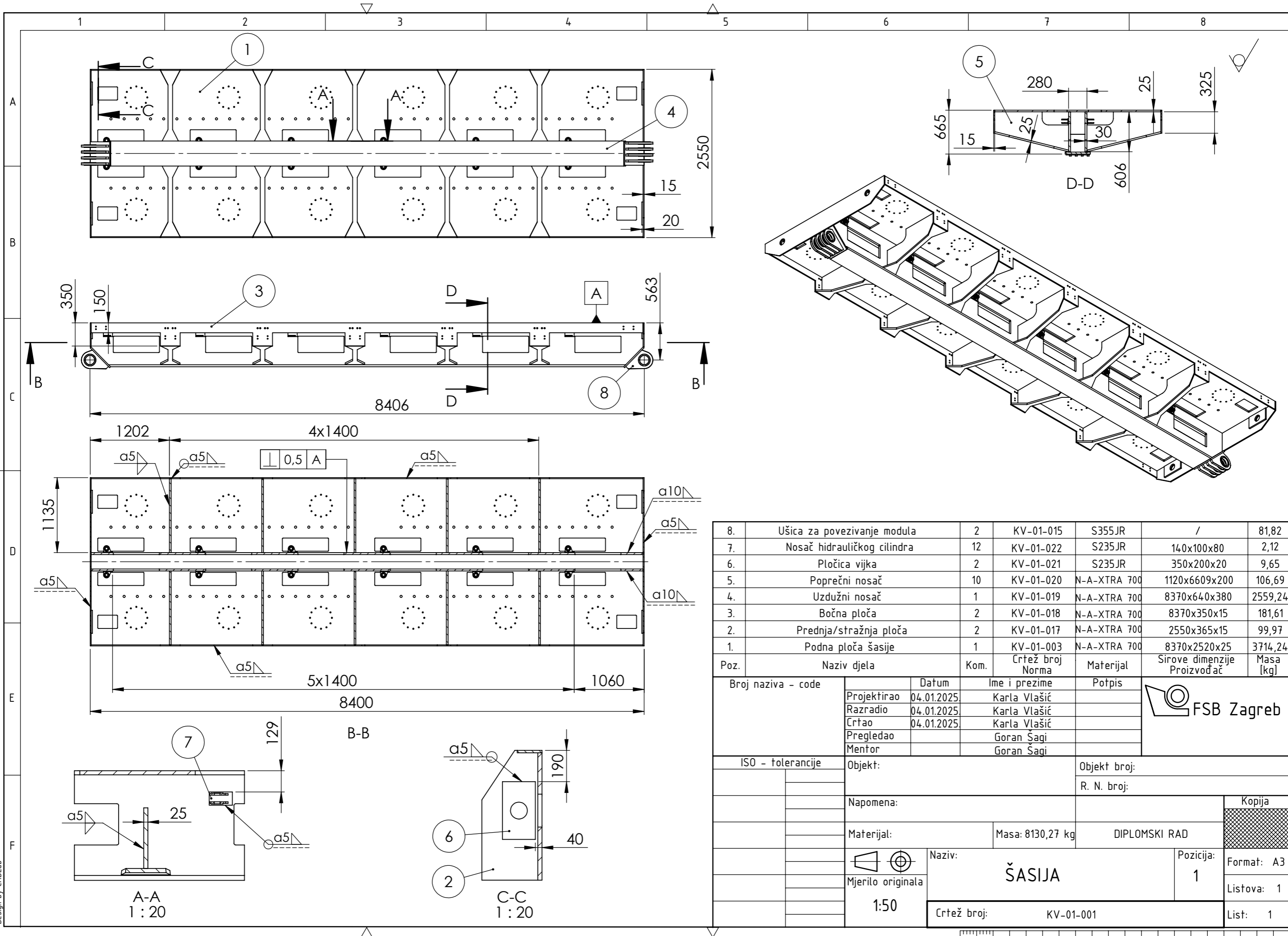
Napomena: Stupovi su postavljeni za spremnik GNS CASTOR V/19 te se zakretanjem pozicija 3 i 4 za 180° oko vertikalne osi stupa, na sva četiri stupa, nadogradnja prilagođava za prihvatanje drugog tipa spremnika GNS CASTOR V/52 (bez potrebe za premještanjem stupova)

Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa [kg]
7.	Matica M24	12	DIN 6331	8	DIV Grupa	0,01
6.	Dosjedni šipka M24	12	KV-01-011	8.8	DIV Grupa	1,31
5.	Vijak M36x90	24	DIN 6914	8.8	DIV Grupa	0,01
4.	Poklopac nosača nadogradnje	4	KV-01-010	N-A-XTRA 700	570x170x45	19,42
3.	Nosač nadogradnje	4	KV-01-004	N-A-XTRA 700	570x170x45	21,56
2.	Stup nadogradnje	4	KV-01-002	/	1030x750x600	382
1.	Podkonstrukcija nadogradnje	1	KV-01-009	/	9000x100x2550	5004

Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	03.01.2025.	Karla Vlašić	
Razradio	03.01.2025.	Karla Vlašić	
Crtao	03.01.2025.	Karla Vlašić	
Pregledao		Goran Šagi	
Mentor		Goran Šagi	

ISO - tolerancije	Objekt:	Objekt broj:
Ø 25 C11/h9		R. N. broj:
+0,292		
+0,110		
Napomena:		
Materijal:	Masa: 6012 kg	DIPLOMSKI RAD
Mjerilo originala	Naziv:	Pozicija:
1:50	NADOGRADNJA	3
	Crtež broj: KV-2025-00-002	List: 1



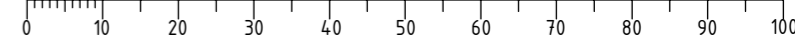


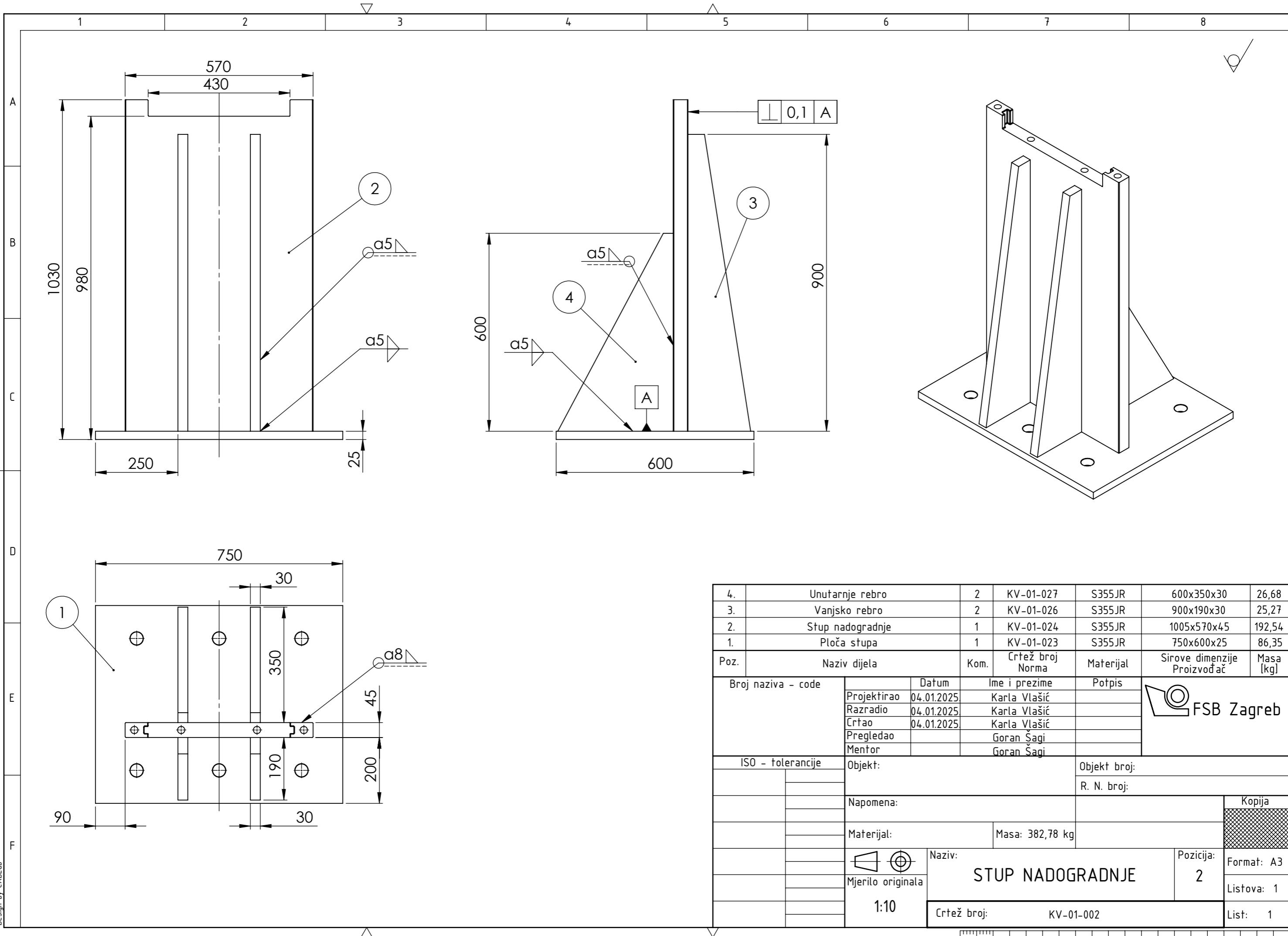
Poz.	Naziv djela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa [kg]
8.	Ušica za povezivanje modula	2	KV-01-015	S355JR	/	81,82
7.	Nosač hidrauličkog cilindra	12	KV-01-022	S235JR	140x100x80	2,12
6.	Pločica vijka	2	KV-01-021	S235JR	350x200x20	9,65
5.	Poprečni nosač	10	KV-01-020	N-A-XTRA 700	1120x6609x200	106,69
4.	Uzdužni nosač	1	KV-01-019	N-A-XTRA 700	8370x640x380	2559,24
3.	Bočna ploča	2	KV-01-018	N-A-XTRA 700	8370x350x15	181,61
2.	Prednja/stražnja ploča	2	KV-01-017	N-A-XTRA 700	2550x365x15	99,97
1.	Podna ploča šasijske	1	KV-01-003	N-A-XTRA 700	8370x2520x25	3714,24

Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao		04.01.2025.	Karla Vlašić	
Razradio		04.01.2025.	Karla Vlašić	
Crtao		04.01.2025.	Karla Vlašić	
Pregledao			Goran Šagi	
Mentor			Goran Šagi	

ISO - tolerancije		Objekt:	Objekt broj:
			R. N. broj:
		Napomena:	
		Materijal:	Masa: 8130,27 kg
		DIPLOMSKI RAD	
		Naziv:	ŠASIJA
		Mjerilo originala:	1:50
		Crtež broj:	KV-01-001

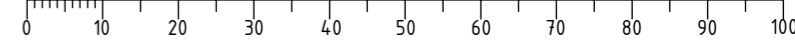
Kopija	
Format:	A3
Listova:	1
List:	1

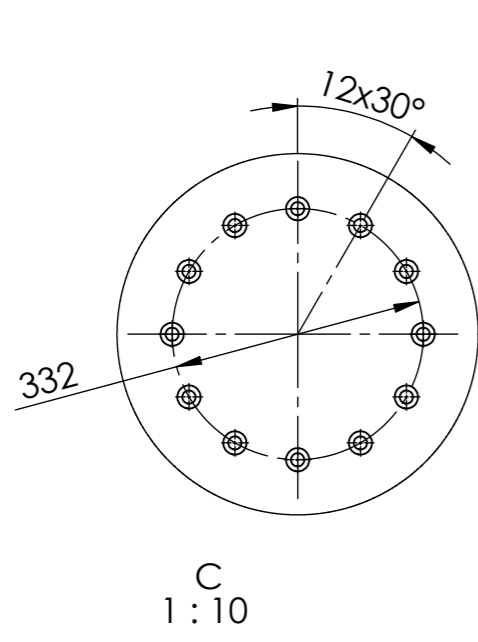
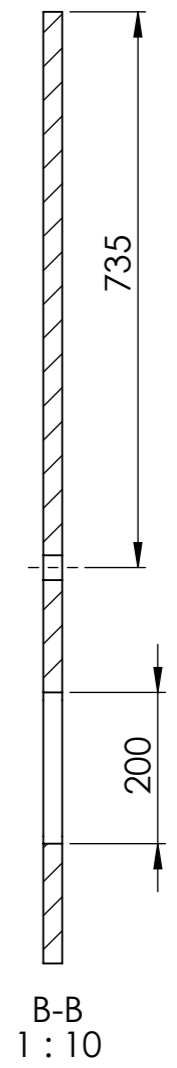
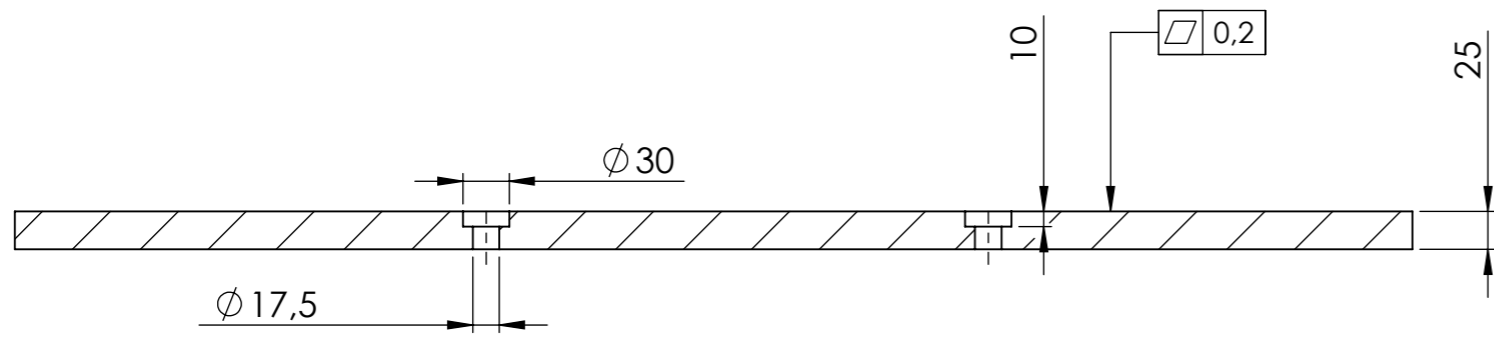
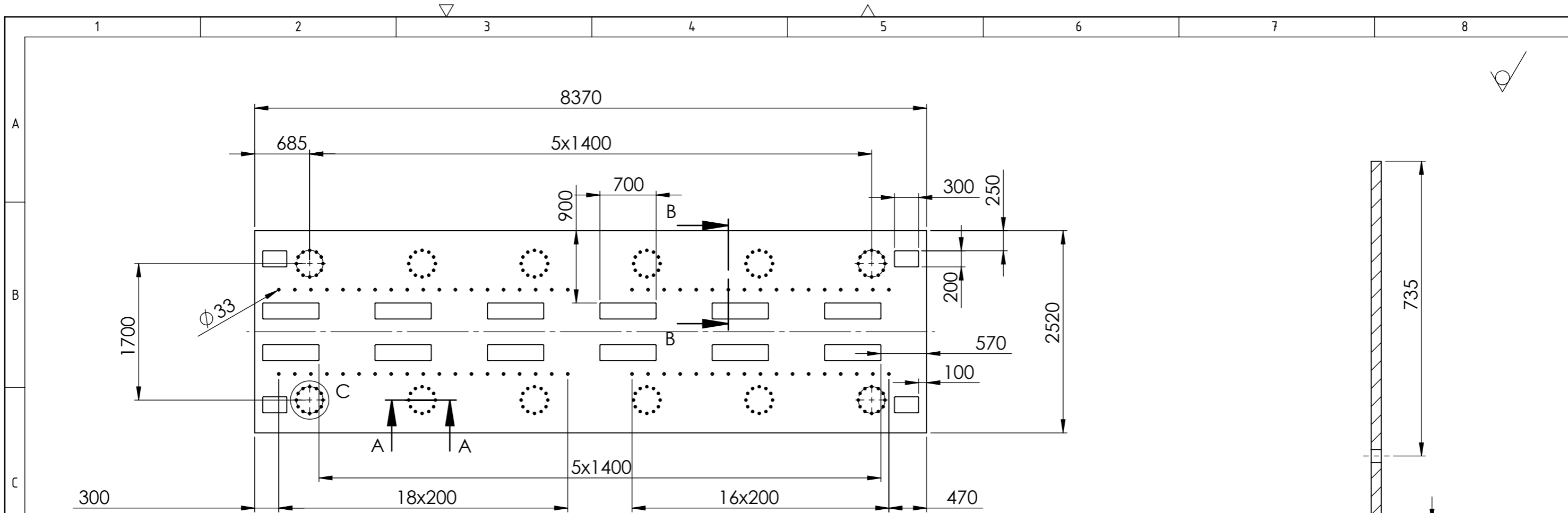




4.	Unutarnje rebro	2	KV-01-027	S355JR	600x350x30	26,68
3.	Vanjsko rebro	2	KV-01-026	S355JR	900x190x30	25,27
2.	Stup nadogradnje	1	KV-01-024	S355JR	1005x570x45	192,54
1.	Ploča stupa	1	KV-01-023	S355JR	750x600x25	86,35
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa [kg]

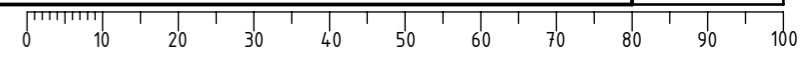
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao		04.01.2025	Karla Vlašić		
Razradio		04.01.2025	Karla Vlašić		
Crtao		04.01.2025	Karla Vlašić		
Pregledao			Goran Šagi		
Mentor			Goran Šagi		
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:	
				R. N. broj:	
		Napomena:			
		Materijal:		Masa: 382,78 kg	
		Naziv:		Pozicija:	
				2	
		1:10		Format: A3	
		Crtež broj: KV-01-002		Listova: 1	
				List: 1	



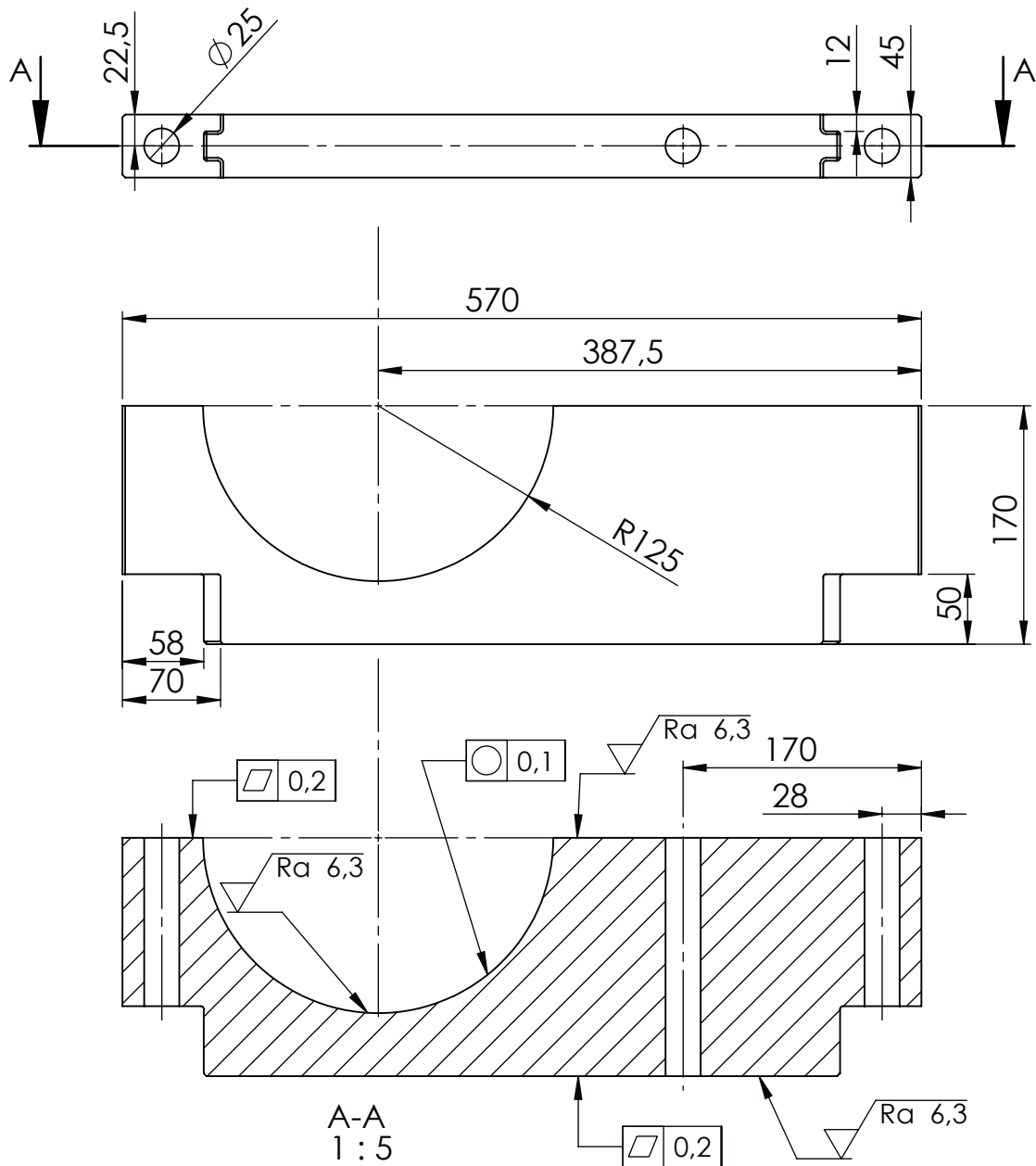


Napomena: Sva nekotirana zaobljenja iznose R10 mm.

Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio	04.01.2025	Karla Vlašić		
	Crtao	04.01.2025	Karla Vlašić		
	Pregledao		Goran Šagi		
	Mentor		Goran Šagi		
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:	
				R. N. broj:	
	Napomena:				Kopija
	Materijal:	N-A-XTRA 700	Masa: 3714,24 kg	DIPLOMSKI RAD	
	 Mjerilo originala 1:50	Naziv:		Pozicija:	Format: A3
		PODNA PLOČA ŠASIJE		1	Listova: 1
	Crtež broj: KV-01-003			List: 1	



✓ (√ Ra 6,3)



Napomena:
Sva nekožirana skošenja su $2 \times 45^\circ$.
Provrt $\varnothing 250$ izraditi u spoju s poklopcem nosača.

	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	04.01.2025	Karla Vlašić		
Razradio	04.01.2025	Karla Vlašić		
Crtao	04.01.2025	Karla Vlašić		
Pregledao		Goran Šagi		
Mentor		Goran Šagi		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal: N-A-XTRA 700		Masa: 24,56 kg	DIPLOMSKI RAD	
 Mjerilo originala 1:5	Naziv: NOSAČ NADOGRADNJE		Pozicija: 3	Format: A4
	Crtež broj: KV-01-004			Listova: 1
				List: 1