

Mate Grbac, mag. ing. mech.  
Končar D&ST  
[mate.grbac@koncar-dst.hr](mailto:mate.grbac@koncar-dst.hr)

Damir Balder, mag. ing. mech.  
Končar D&ST  
[damir.balder@koncar-dst.hr](mailto:damir.balder@koncar-dst.hr)

Stipe Mustać, mag. ing. mech.  
Končar D&ST  
[stipe.mustac@koncar-dst.hr](mailto:stipe.mustac@koncar-dst.hr)

## IZRAČUNI OPTEREĆENJA USLIJED SPECIFICIRANIH PARAMETARA PREKOMORSKOG TRANSPORTA I POSLJEDIČNA NAPREZANJA U ELEMENTIMA UČVRŠĆENJA UZEMLJIVAČKO-POMOĆNIH I POMOĆNIH TRANSFORMATORA

### SAŽETAK

Odobalne vjetroelektrane služe za proizvodnju električne energije iz energije vjetra i nalaze se na vodenim površinama, najčešće na moru. Uz navedene elektrane se nalaze i transformatorske stanice. Među opremom platforme se mogu nalaziti i uzemljivačko-pomoćni te pomoćni transformatori. Sastavljena platforma s transformatorskom stanicom se transportira do lokacije na kojoj se nalazi vjetroelektrana. Za navedeni transport transformatora potrebno je analizirati, proračunati i definirati rješenje učvršćenja transformatora za platformu. Objašnjene su pretpostavke s kojima se izračunavaju opterećenja na elemente učvršćenja tokom transporta. Prikazane su analiza i korištene norme u izračunu napreznja navedenih elemenata.

Na kraju su prikazane povezane poduzete mjere u optimiranju dizajna kotla transformatora za odobalnu platformu.

**Ključne riječi:** odobalno, transformator, izračun, opterećenje, vijak

## LOAD CALCULATION DUE TO THE SPECIFIED PARAMETERS OF MARINE TRANSPORT AND CONSEQUENTIAL STRESSES IN THE FIXING ELEMENTS OF THE EARTHING-AUXILIARY AND AUXILIARY TRANSFORMERS

### SUMMARY

Offshore wind farms are used to produce electricity from wind energy and are located on water surfaces, usually at sea. In addition to the mentioned power plants, there are also transformer stations nearby. Among the equipment of the platform, there can also be earthing-auxiliary and auxiliary transformers. The assembled platform with the transformer station is transported to the location where the wind farm is located. For the aforementioned transport of the transformer, it is necessary to analyze, calculate and define the solution of securing the transformer to the platform. The assumptions used to calculate the loads on the fastening elements during transport are explained. The analysis and norms used in the stress calculation of the mentioned elements are presented.

At the end, related actions taken in optimizing the design of the transformer tank for the offshore platform are presented.

**Key words:** offshore, transformer, calculation, load, bolt

## 1. UVOD

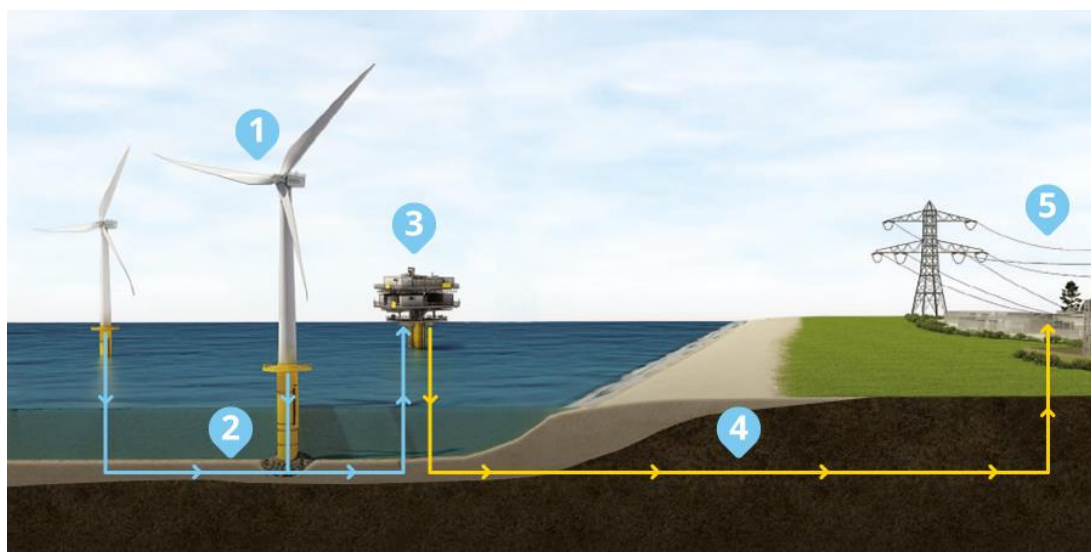
Odobalne platforme koriste se diljem svijeta za razne namjene te u različitim dubinama voda i okruženjima. Neke od najznačajnijih i opće poznatih namjena su istraživanje i proizvodnja nafte i plina, utovar i istovar brodova te podupiranje mostova i nasipa. Platforme su konstrukcije izrađene od čelika, armiranog betona ili kombinacija obje izvedbe dizajnirane za postavljanje na otvorenom moru, jezerima, zaljevima itd., tj. mnogo kilometara od obale.

Kroz zadnjih nekoliko desetljeća svjedoci smo sve veće težnje za upotrebom takozvane zelene energije. Zelena energija dolazi iz tehnologija obnovljivih izvora energije kao što su solarna energija, energija vjetra, geotermalna energija, biomasa te hidroelektrane.

Vežano uz ovaj rad posebno zanimljiva je energija vjetra. Vjetar nastaje kao prirodni fenomen, a manifestira se kao gibanje zraka u zemljinoj atmosferi. Općenito govoreći, topografija površine zemlje pruža otpor brzini vjetra, stoga vjetrovi koji se razvijaju preko oceana i mora pušu većim brzinama zbog nedostatka prirodnih prepreka koje izazivaju trenje, tj. smanjenje brzine vjetra.

Iz svega navedenog jasno proizlazi kako je upravo morska pučina najprikladnija lokacija za instalaciju vjetroelektrana. Vjetroelektrana kao i svaka druga elektrana je izvor proizvodnje električne energije. Da bi se proizvedena električna energija dopremila krajnjim korisnicima, potrebna je infrastruktura namijenjena za prijenos električne energije, a čiji elementi su prikazani na sljedećoj slici:

- 1) vjetroturbina
- 2) električni vodovi od vjetroturbine prema transformatorskoj stanici na odobalnoj platformi
- 3) transformatorska stanica na odobalnoj platformi
- 4) električni vodovi prema obali
- 5) transformatorska stanica na kopnu



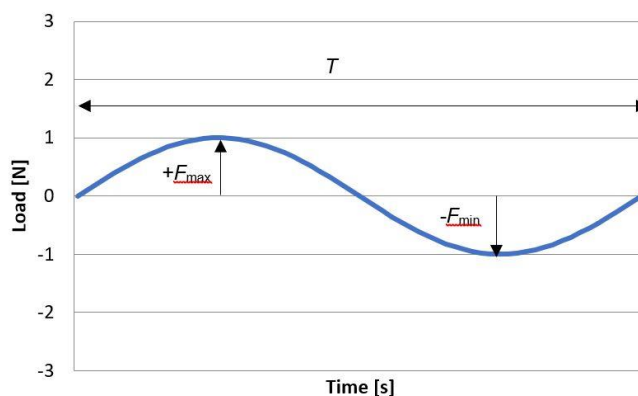
Slika 1. Infrastruktura za proizvodnju električne energije dobivene iz vjetra [1]

Radi efikasnijeg prijenosa električne energije, na odobalnim platformama nalaze se i transformatorske stanice.

Montaža transformatora na platformu se najčešće izvodi u brodogradilištu na kopnu, te se platforma s transformatorom transportira na lokaciju rada. Utjecaj prekomorskog transporta i specifičnost lokacije instaliranih transformatora zahtjeva i dodatne izračune i oprez prilikom dizajniranja i konstruiranja transformatora.

## 2. GIBANJE MORA

Budući da se radi o prekomorskom transportu koji je pod velikim utjecajem gibanja mora, tj. valova, radi se o dinamičkom opterećenju koje se prenosi na nosivu konstrukciju platforme, a samim time i na konstrukciju transformatora. Dinamičko opterećenje se može zamijeniti statičkim opterećenjem kada je frekvencija djelovanja opterećenja mala u odnosu na prirodnu frekvenciju sustava. U ovom slučaju period  $T$  jednog ciklusa opterećenja iznosi 10 sekundi prikazano na Slici 2, a što je dovoljno veliki iznos da se može pretpostaviti kvazistatičko opterećenje. U slučaju kvazistatičkog opterećenja za proračun je mjerodavno najveće opterećenje tijekom vremena, te se primjenjuju zakoni statike.



Slika 2. Periodička priroda opterećenja

Zbog periodičke prirode opterećenja, ispitana su dva najgora scenarija opterećenja, prvi za pozitivnu, a drugi za negativnu maksimalnu amplitudu opterećenja.

## 3. ANALIZA

Iznimno je važno da transformator bude pravilno pričvršćen za platformu, tako da tijekom pomorskog transporta nema strukturalnih oštećenja koja bi poremetila rad transformatora tijekom njegovog puštanja u pogon te njegove eksploatacije.

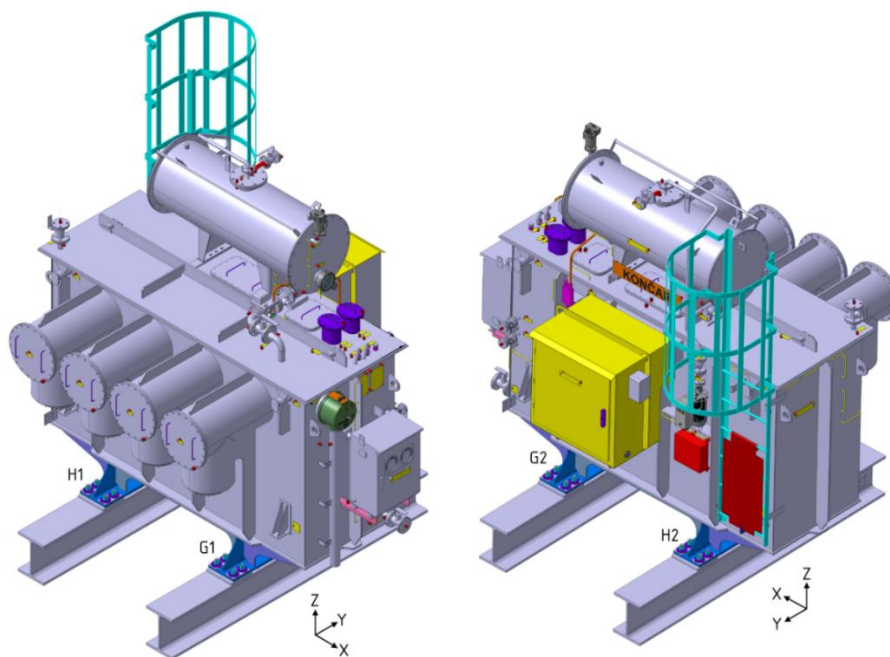
Tijekom pomorskog transporta od obale do instalacije na pučini, transformator će biti pričvršćen na platformu vijcima, kvalitete materijala 10.9 koji su vruće pocinčani oznake HDG (engl. *Hot Dipped Galvanized*). Isto tako, na platformi tijekom svog rada, za pričvršćenje transformatora koristit će se isti vijci, kvalitete 10.9 HDG.

Cilj ove analize je potvrditi ispravnost odabira sustava učvršćenja transformatora.

### 3.1. Podaci o opterećenju i transformatoru

Vanjska opterećenja koja djeluju na transformator tijekom prekomorskog transporta su naznačena kao ubrzanja u horizontalnom ( $a_x$  i  $a_y$ ) i vertikalnom smjeru ( $a_z$ ), a čije vrijednosti su dobivene od strane naručitelja. Tijekom transporta, platforma se naginje uslijed utjecaja valova, a vrijednosti kuta nagiba platforme oko osi  $x$  (kut  $\beta$ ) i  $y$  (kut  $\alpha$ ) određeni su iskustveno s obzirom na prijašnje projekte.

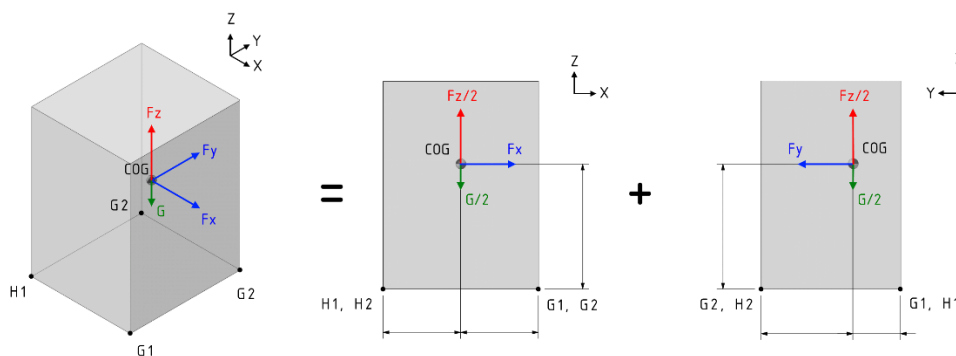
Također, pretpostavljeno je da opterećenja djeluju u težištu mase transformatora (engl. *Center of Gravity*, COG). Masa transformatora ( $m$ ) kao i težište mase je izračunato korištenjem 3D CAD programa. Postoje četiri spojne točke transformatora s platformom koje su označene su s G1, G2, H1 i H2 te su prikazane na sljedećoj slici.



Slika 3. Spojne točke transformatora

### 3.2. Trodimenzionalno stanje opterećenja

Vertikalna opterećenja,  $F_z$  i  $G$ , djeluju u dvije okomite ravnine uzrokujući istu vrstu naprezanja (vlačno / tlačno). Stoga se za svaku 2D ravninu uzima u obzir samo polovica vertikalnih opterećenja, čiji zbroj u konačnici daje stanje 3D opterećenja. Na Slici 4 su prikazani smjerovi pozitivnih aktivnih opterećenja u slučaju kada platforma na kojoj je pričvršćen transformator nije nagnuta,  $\alpha = \beta = 0^\circ$ . Smjerovi negativnih aktivnih opterećenja djeluju u suprotnom smjeru od  $x$ ,  $y$  i  $z$  osi. Smjer djelovanja sile mase transformatora  $G$  uvijek je usmjeren prema tlu (negativan vertikalni smjer,  $-z$  smjer).



Slika 4. Trodimenzionalno stanje opterećenja

Potrebno je izračunati najnepovoljniji slučaj opterećenja s obzirom na spojne točke transformatora. Budući da se u svakoj spojnoj točki nalazi više vijaka, a da bi se olakšao izračun opterećenja vijčanog spoja, pritom ne unoseći veliku grešku u izračun, pretpostavit će se da svaki od vijaka jednako preuzima udio u ukupnom opterećenju svoje spojne točke.

Vijci su opterećeni kombinirano, vlačno i smično. Međutim, da bi se osigurala otpornost vijčanog spoja na klizanje koriste se visokovrijedni vijci HV, kvalitete 10.9. To znači da se unošenjem sile putem pritezanja vijka ostvaruje otpornost na smicanje između dva elementa i time pruža otpor klizanju između elemenata u spoju. Ipak, u postupku provjere vijčanog spoja provjerit će i zadovoljava li vijak slučaj posmičnog djelovanja.

### 3.3. Otpornost vijaka na posmično djelovanje

Otpornost vijaka na posmično djelovanje kada ravnina smicanja prolazi punim dijelom vijaka (bez navoja) prema [2] iznosi

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} \quad (1)$$

gdje su:

- $\alpha_v$  - faktor u ovisnosti o klasi vijaka i ravnini smicanja,
- $f_{ub}$  - vlačna čvrstoća materijala odabranog vijaka,
- $A$  - površina presjeka jezgre odabranog vijaka,
- $\gamma_{M2}$  - parcijalni faktor sigurnosti za vijke.

Da bi se zadovoljio uvjet otpornosti vijka na posmično djelovanje mora biti

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq 1 \quad (2)$$

gdje je:

- $F_{v,Ed}$  - smična sila koja djeluje na odabrani vijak.

### 3.4. Otpornost vijaka na vlak

Otpornost vijaka na vlak prema [2] iznosi

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_S}{\gamma_{M2}} \quad (3)$$

gdje su:

- $k_2$  - faktor oblika vijaka,
- $f_{ub}$  - vlačna čvrstoća materijala odabranog vijaka,
- $A_S$  - površina presjeka odabranog vijaka u korijenu navoja (nosivi dio vijaka),
- $\gamma_{M2}$  - parcijalni faktor sigurnosti za vijke.

Da bi se zadovoljio uvjet otpornosti vijka na vlak mora biti

$$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (4)$$

gdje je:

- $F_{t,Ed}$  - vlačna sila koja djeluje na odabrani vijak.

### 3.5. Otpornost vijaka na kombinirano djelovanje, vlak i smicanje

Da bi se zadovoljio uvjet otpornosti vijka na kombinirano djelovanje, vlak i smicanje prema [2] mora biti

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (5)$$

### 3.6. Otpornost spojeva na proklizanje

Proračunska otpornost vijaka na proklizanje računa se isključivo kod pritegnutih vijaka koji pritezanjem ostvaruju otpornost između tarnih površina. Za pritezanje elemenata u spoju primjenjuju se isključivo vijci HV 8.8 i 10.9. Proračunska otpornost spoja na proklizanje za kombinaciju opterećenja vlak i smicanje određuje se prema [2] iznosi

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot (0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_S - 0,8 \cdot F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}} \quad (6)$$

gdje su:

- $k_s$  - koeficijent pomoću kojeg se uzima u obzir veličina rupe za vijke,
- $n$  - broj tarnih ravnina,
- $\mu$  - koeficijent trenja definiran kvalitetom kontaktne površine u spoju
- $f_{ub}$  - vlačna čvrstoća materijala odabranog vijka,
- $A_S$  - površina presjeka odabranog vijka u korijenu navoja (nosivi dio vijka),
- $\gamma_{M3}$  - parcijalni faktor sigurnosti za vijke.

Da bi se zadovoljio uvjet otpornosti vijka na proklizanje mora biti

$$\frac{F_{t,Ed}}{F_{s,Rd}} \leq 1 \quad (7)$$

gdje je:

$F_{t,Ed}$  - smična sila koja djeluje na odabrani vijak.

Odabrani vijci moraju zadovoljiti sve gornje provjere da bi se smatralo kako mogu podnijeti zadano opterećenje tijekom transporta i eksploatacije.

### 3.8. Moment pritezanja vijaka

Da bi se osiguralo dovoljno prednaprezanje vijčanog spoja za pritezanje vijaka koristi se kombinirana metoda (moment + kut) prema [3], odjeljak 8.5.4. U prvom koraku svaki vijak se pritegne odgovarajućim momentom (u ovisnosti o veličini odabranih vijaka) u svakoj spojnoj točki transformatora s platformom prije početka drugog koraka.

Drugi korak je okretanje matice u odnosu na navoj vijka za određeni kut, a koji je ovisan o debljini elemenata u spoju kao i o veličini odabranih vijaka.

## 4. SPECIFIČNOSTI DIZAJNA KOTLA ZA OFFSHORE PLATFORMU

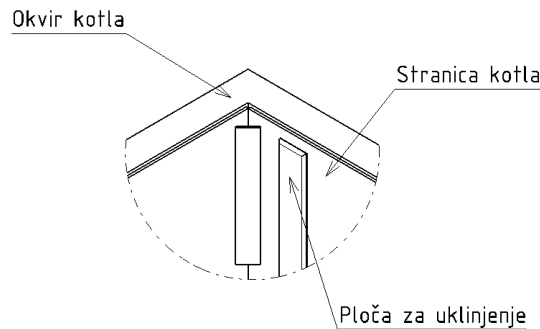
Prilikom konstruiranja transformatora za odobalnu platformu, zbog okoline i zahtjevnih uvjeta eksploatacije potrebno je dizajnirati transformator kako bi mogao izdržati izračunata naprezanja te omogućiti neprekidan rad kroz cijeli životni vijek.

Kako bi transformator izdržao naprezanja koja se javljaju tijekom transporta i rada, te radi osiguranja veće krutosti i stabilnije konstrukcije kotla preporuča se izvedba kotla s ravnim stranicama i radijatorima te zavarivanje spoja kotao – poklopac.

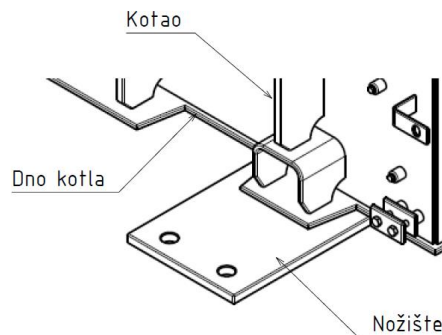
Aktivni dio transformatora je sačinjen od jezgre, namota, izolacije i priključaka. Pomak aktivnog dijela unutar kotla sprječava se na način da se na stijenke kotla instaliraju ploče preko kojih se vrši uklinjenje aktivnog dijela u kotlu. Navedenim je omogućena stabilnost te onemogućeno približavanje elementa pod naponom prema uzemljenom kotlu (slika 5).

Dno kotla izvedeno je od ravne ploče, a ispod dna nalaze se dodatne ravne ploče s provrtima za učvršćenje (nožišta) kako ne bi došlo do kontakta dna kotla i platforme (slika 6). Nožišta su izrađena od legiranih čeličnih materijala otpornih na atmosferske uvjete koji se nalaze u radnom okruženju

transformatora. Između nožišta i platforme nalaze se anti vibracijske podloge kako bi se smanjile potencijalne neželjene vibracije.



Slika 5. Ploča za uklinjenje aktivnog dijela



Slika 6. Nožište transformatora

Posebna pažnja posvećena je mjerama koje se provode kako bi se broj potencijalno opasnih mjesta za stvaranje korozije sveo na minimum. Transformator je dizajniran na način da se izbjegavaju mjesta moguće akumulacije vode kao i velike vodoravne površine (u tom slučaju takve površine izvode se pod kutom zbog otjecanja vode).

Vanjski dijelovi transformatora izvode se na način da se izbjegava primjena U i L profila ako stvaraju uske prostore. Sve atmosferi izložene pozicije izvode se na način da nemaju oštre bridove radi što bolje korozijske otpornosti.

Legirani čelici, korozijski otporni na zahtjevne atmosferske uvjete kojima je transformator izložen za vrijeme eksploatacije, koriste se za sve dijelove podložne oštećenju (držači, kuke, nosači instrumenata...), sve dijelove koji imaju navoj a ne nalaze se u ulju te sve dijelove debljine 3 mm i manje, a ne nalaze se u ulju.

Zaštita od korozije jedna je od važnih karika u izdržljivosti kotla i transformatora u cijelosti, no zbog specifičnosti i kompleksnosti sustava ista nije obrađivana u ovom radu.

## 5. ZAKLJUČAK

Transformator je važna karika u lancu prijenosa električne energije. U visokorizičnom postrojenju kao što je odobalna platforma nužno je dodatno osigurati adekvatan transport transformatora na lokaciju eksploatacije.

U navedenu svrhu izrađuje se detaljna analiza sustava učvršćenja. U ovom radu je prikazan primjer analize koja se može primijeniti na uzemljivačko-pomoćne i pomoćne transformatore.

Zbog specifičnosti uvjeta eksploatacije transformatora (morska atmosfera, dinamička opterećenja, ispravnost opreme u svakom trenutku) zahtijeva se primjena raznih konstrukcijskih rješenja pri izradi transformatora za odobalnu platformu, a sve u svrhu njegovog sigurnog i ispravnog rada tijekom životnog vijeka.

## 6. LITERATURA

- [1] London Array, 2023. [Internet] <raspoloživo na: <https://londonarray.com/>> , [16.01.2023.]
- [2] European Committee for Standardization (CEN): EN 1993-1-8, Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints, 2005.
- [3] EN 1090-2: EN 1090-2: Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for steel structures, 2011.