

Učinci klimatskih promjena i ugljični otisak konstrukcija

Goleš, Nika

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:625566>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-31**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Nika Goleš

**UČINCI KLIMATSKIH PROMJENA I UGLJIČNI
OTISAK KONSTRUKCIJA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Nika Goleš

UČINCI KLIMATSKIH PROMJENA I UGLJIČNI OTISAK KONSTRUKCIJA

DIPLOMSKI RAD

prof. dr. sc. Ana Mandić Ivanković, dipl. ing. građ.

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Nika Goleš

**EFFECT OF CLIMATE CHANGES AND CARBON
FOOTPRINT OF STRUCTURES**

MASTER THESIS

Prof. PhD Ana Mandić Ivanković M. Sc. C. E.

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

Nika Goleš

0082064773

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

Učinci klimatskih promjena i ugljični otisak konstrukcija

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

Effect of climate changes and carbon footprint of structures

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

-

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

-

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

18.9.2024.

Mentor:

Ana Mandić Ivanković

Potpis mentora:

Ana Mandić Ivanković

Komentor:

Građevinski fakultet
Fra Andrije Kačića-Miošića 26, HR-10000 Zagreb, OIB: 62924153420
TEL: +385 (0)1 4639 115, FAKS: +385 (0)1 4828 051
www.grad.unizg.hr



Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Nika Goleš, 0082064773

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

Učinci klimatskih promjena i ugljični otisak konstrukcija

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mogega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum: 18.9.2024.

Potpis:

Goles



Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja:

Nika Goleš, 43106170506

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

Učinci klimatskih promjena i ugljični otisak konstrukcija

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

prof. dr. sc. Ana Mandić Ivanković, dipl. ing. građ.

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

26.09.2024

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

18.9.2024.

Potpis:

Botes

ZAHVALE

Izražavam iskrenu zahvalnost mentorici prof. dr. sc. Ana Mandić Ivanković, dipl. ing. građ. na pruženoj pomoći, ukazanom povjerenju i vodstvu pri izradi ovoga rada. Željela bih se zahvaliti i svim profesorima i asistentima Građevinskog fakulteta na prenesenom znanju i pomoći tijekom studiranja. Također, upućujem zahvalu i svim profesorima koji su bili dio mojeg obrazovanja prije upisa fakulteta i svojim mentoriranjem mi omogućili da upišem isti.

Hvala svim prijateljima, kolegama i poznanicima koji su bili uz mene kroz cijeli ovaj proces i pružili pomoć kada je ona bila najpotrebnija. Bez vašeg ohrabrenja i podrške ovo ne bi bilo moguće. Hvala vam i na nezaboravnim trenucima koji će zauvijek ostati u sjećanju.

Na kraju, veliko hvala svim članovima moje obitelji na neizmjerne podršci, razumijevanju i strpljenju, ne samo tijekom ovih pet godina već i kroz cijeli život. Hvala Vam što ste mi omogućili i priuštiti apsolutno sve što mi je bilo potrebno. Posebno hvala bratu Patriku bez kojeg ovaj akademski put ne bi bio moguć.

Ovu diplomu posvećujem svima vama!

SAŽETAK

Svakodnevni smo svjedoci klimatskih promjena koje će utjecati na sve aspekte našega života, a utjecaj će biti vidljiv i na građevinske strukture i infrastrukture. U budućnosti će doći do porasta učestalosti i intenziteta ekstremnih događaja. Ovaj rad se fokusira na odabrane učinke klimatskih promjena i njihov utjecaj na proračunska djelovanja, karakteristike materijala i uporabljivost građevina. Prikazani su neki stvarni primjeri tih učinaka, a predstavljene su i moguće strategije kako smanjiti njihove neizbježne negativne učinke na strukture i povećati trajnost i vijek trajanja građevina. Klimatske promjene uzrokovane su povećanjem temperature Zemlje do koje dolazi zbog viška stakleničkih plinova u atmosferi. Ugljični otisak mjera je ukupne emisije stakleničkih plinova koju izravno ili neizravno uzrokuje neka osoba, proizvod, tvrtka ili događaj. Ugljikov dioksid najvažniji je staklenički plin čije su prekomjerne emisije povezane s ljudskom aktivnošću. Građevinska industrija je odgovorna za velik udio emisije ugljika. U ovome radu objasnit ćemo što je ugljični otisak građevina, što čini razliku između mostova i zgrada u ovom pogledu, što inženjeri mogu poduzeti kako bi došlo do smanjenja emisije ugljika, koje su smjernice proračuna ugljičnog otiska te naposljetku napraviti pojednostavljeni proračun.

Ključne riječi: klimatske promjene, proračunska djelovanja, karakteristike materijala, uporabljivost građevina, ugljični otisak građevina, emisija ugljika, proračun

SUMMARY

We are daily witnesses of climate changes that will affect all aspects of our lives, and the impact will also be visible on building structures and infrastructures. In the future, the frequency and intensity of extreme events will increase. This paper focuses on the selected effects of climate change and their influence on structural actions, material properties and structural performance. Some real examples of these effects are presented, and possible strategies are presented to reduce their inevitable negative effects on structures and increase the durability and service life of buildings. Climate change is caused by an increase in the Earth's temperature, which occurs due to an excess of greenhouse gases in the atmosphere. A carbon footprint is a measure of the total greenhouse gas emissions caused directly or indirectly by a person, product, company or event. Carbon dioxide is the most important greenhouse gas whose excessive emissions are associated with human activity. The construction industry is responsible for a large share of carbon emissions. In this paper, we will explain what the carbon footprint of buildings is, what makes the difference between bridges and buildings in this respect, what engineers can do to reduce carbon emissions, what are the guidelines for carbon footprint calculations, and finally make a simplified calculation.

Key words: climate change, structural actions, material properties, structural performance, carbon footprint of buildings, carbon emission, calculation

SADRŽAJ

ZAHVALE	i
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1. UVOD	1
2. KLIMATSKE PROMJENE I NJIHOV UTJECAJ.....	3
2.1. Klima i klimatske promjene	3
2.2. Utjecaj klimatskih promjena na proračunska djelovanja	4
2.2.1. Utjecaj na opterećenje snijegom na tlo.....	4
2.2.2. Utjecaj na plavljenje rijeka.....	6
2.2.3. Utjecaj na brzinu protoka u rijekama i rizik od erozije	7
2.2.4. Učinci viših očekivanih temperatura	8
2.2.5. Učinci porasta razine mora na obalnu infrastrukturu	10
2.2.6. Površinski vjetar tropske ciklone	11
2.2.7. Utjecaj na olujne valove	14
2.2.8. Posljedice za obalnu infrastrukturu	15
2.3. Utjecaj klimatskih promjena na karakteristike materijala i uporabivost konstrukcija	16
2.3.1. Učinci na procese propadanja	16
2.3.2. Karbonatizacija.....	17
2.3.3. Prodor klorida	18
2.3.4. Korozija	20
2.3.5. Truljenje drva	23
2.4. Prilagodba i projekcija klimatskih promjena u Hrvatskoj [1].....	25
3. UGLJIČNI OTISAK GRAĐEVINA	30
3.1. Razlika između zgrada i mostova	31
3.2. Zgrade	34
3.3. Mostovi	36
4. NAPREDAK PREMA NULTOJ EMISIJI	40
4.1. Energetska učinkovitost.....	40
4.2. Primjeri pristupa u nekim državama.....	41
4.2.1. Smanjenje ekološkog otiska betona u Danskoj	41
4.2.2. Monetiziranje emisija ugljika u Kini	42
4.2.3. Smanjenje bilance ugljika konceptom s 11 poluga u Njemačkoj.....	42

4.2.4.	Prilagodba mostova klimatskim promjenama u Ujedinjenom Kraljevstvu	43
4.2.4.1.	Smjernice udruženja koje se bavi smanjivanjem ugljičnog otiska mostova.....	44
4.2.4.2.	Razmatranje smanjenja ugljičnog otiska kroz cijeli životni vijek (PAS 2080)	44
4.2.4.3.	Hijerarhija smanjenja ugljika	46
4.2.4.4.	Utjecaj inženjera	47
5.	SMJERNICE ZA PRORAČUN UGLJIČNOG OTISKA MOSTOVA PREMA NET ZERO BRIDGES GROUP	50
5.1.	Faze životnog ciklusa	50
5.2.	Prva faza životnog ciklusa	52
5.2.1.	Preliminarne studije (A0).....	52
5.2.2.	Opskrba sirovinama (A1)	52
5.2.3.	Transport (A2).....	54
5.2.4.	Proizvodnja (A3).....	56
5.2.5.	Izgradnja (A5).....	59
5.3.	Druga i treća faza životnog ciklusa	61
5.4.	Normalizacija rezultata	61
6.	PRORAČUN	62
6.1.	Proračun ugljičnog otiska spregnutog mosta	63
6.1.1.	Proračun ugljičnog otiska elemenata gornjeg ustroja	63
6.1.1.1.	Nosači.....	63
6.1.1.2.	Ploča.....	65
6.1.2.	Proračun ugljičnog otiska elemenata donjeg ustroja	65
6.1.2.1.	Upornjaci.....	65
6.1.2.2.	Stupište	68
6.1.3.	Proračun ugljičnog otiska opreme mosta	70
6.1.3.1.	Kolnik	71
6.1.3.2.	Hodnik.....	71
6.1.3.3.	Ograde	72
6.1.3.4.	Ležajevi.....	73
6.1.3.5.	Prijelazna naprava.....	73
6.1.4.	Rekapitulacija rezultata	73
6.2.	Proračun ugljičnog otiska prednapetog mosta.....	75
6.2.1.	Proračun ugljičnog otiska elemenata gornjeg ustroja	76
6.2.1.1.	Nosači.....	76
6.2.1.2.	Ploča.....	79
6.2.2.	Proračun ugljičnog otiska elemenata donjeg ustroja	79
6.2.2.1.	Upornjaci.....	79
6.2.2.2.	Stupište	82

6.2.3.	Proračun ugljičnog otiska opreme mosta	84
6.2.3.1.	Kolnik	85
6.2.3.2.	Hodnik.....	85
6.2.3.3.	Ograde	86
6.2.3.4.	Ležajevi.....	86
6.2.3.5.	Prijelazna naprava.....	87
6.2.4.	Rekapitulacija rezultata	87
6.3.	Usporedba rezultata spregnutog i prednapetog mosta	89
6.3.1.	Normalizacija rezultata	91
7.	ZAKLJUČAK	93
	POPIS LITERATURA.....	95
	POPIS SLIKA	99
	POPIS TABLICA.....	102
	PRILOG A	103
	PRILOG B	104

1. UVOD

Klimatske promjene su postale velika prijetnja svijetu u kojem danas živimo, prijetnja koju više ne možemo ignorirati. Prema [1], rekordna temperatura u Europi iznosila je 48.8°C izmjerena 2021. godine u Italiji, godinu nakon Europa je imala najtoplije ljeto ikada. U Japanu, 2018. godine, zabilježeno je 150 smrtnih slučajeva uzrokovanih visokim ljetnim temperaturama. Afrički kontinent 2019. pogodio je jedan od najgorih tropskih ciklona koji je ikada pogodio Afriku i južnu hemisferu, ciklon Idai [2]. U Velikoj Britaniji zabilježene su deformacije željezničkih tračnica zbog ekstremnih temperatura. Velike poplave su pogodile Kinu, Indiju i Pakistan, a s velikim požarima su se borile Hrvatska, Turska, Španjolska, SAD, Kanada i Rusija 2022. godine [1]. Na Antarktici je 2020. zabilježen drugi najniži opseg morskog leda ikada [2]. Arktik je postao znatno topliji posljednjih 60 godina i do 2040. godine bi mogao biti ljeti bez leda [3].

Ovo su tek neki od primjera s kojima se svakodnevno susrećemo u tabloidima o rekordnim zabilježenim temperaturama, toplinskim valovima, sušama, požarima, poplavama i drugim učincima klimatskih promjena. Učinci su postali vidljivi na svim kontinentima i predviđa se da će u budućnosti postati sve češći i intenzivniji. Klimatske promjene će trajno utjecati na način života ljudi na Zemlji. Također, utjecaj će biti vidljiv i na građevinske strukture i infrastrukture. Taj utjecaj uvelike ovisi o trenutnoj i budućoj klimatskoj varijabilnosti, lokaciji, vijeku trajanja građevine, funkciji i stanju [4]. Očekivane promjene klimatskih uvjeta mogu dovesti do promjena u procesima degradacije građevinskih materijala, što utječe na trajnost i vijek trajanja struktura [5].

Uloga građevinskih inženjera je projektirati i prilagoditi naše građevine kako bi mogle izdržati ekstremnije vremenske uvjete poput viših temperatura, promjena u padalinama, poplava, jakih vjetrova te toplinskih i hladnih valova [6]. Kako bi inženjeri mogli ostvariti svoju ulogu, potrebna su istraživanja utjecaja klimatskih promjena na građevine. Utjecaj je vidljiv kroz promjene svojstava postojećih konstrukcija, smanjujući nosivost i pouzdanost te kroz promjenu vanjskih djelovanja na konstrukcije [1]. Građevine koje su potencijalno najviše ugrožene su mostovi zbog svoje velike izloženosti klimi i utjecajima iz okoliša. Ovaj rad razmatra odabrane učinke klimatskih promjena i njihov utjecaj na vanjska djelovanja, karakteristike materijala i uporabljivost konstrukcija. Također, prikazat će se primjeri utjecaja klimatskih promjena u Hrvatskoj.

Glavni uzročnici promjena koje danas vidimo smo mi sami. Klimatske promjene uzrokovane su povećanjem temperature Zemlje do koje dolazi zbog više stakleničkih plinova u atmosferi od onih koji se prirodno pojavljuju [3]. Ovi dodatni staklenički plinovi uglavnom dolaze od izgaranja fosilnih goriva za proizvodnju energije, kao i od drugih ljudskih aktivnosti poput rudarstva, metalurgije, proizvodnje cementa, proizvodnje kemikalija, transporta ljudi i dobara, ali i od promjena u okolišu zbog sječe prašuma, poljoprivrede i

uzgoja stoke. Sve veći negativni utjecaj na emisiju ugljika ima pročišćavanje otpadnih voda. Intenzivan rast emisije stakleničkih plinova započeo je industrijskom revolucijom i porastom broja stanovnika, a urbanizacija je dodatno pogoršala situaciju. Rastom životnog standarda ljudi dolazi do povećanih potreba transporta, prekomjerne potrošnje hrane, odjeće, opreme i uređaja, a sve to rezultira nastankom otpada kojeg treba zbrinuti.

Ugljični otisak mjera je ukupne emisije stakleničkih plinova koju izravno ili neizravno uzrokuje neka osoba, proizvod, tvrtka ili događaj, a mjeri se u tonama ugljikov dioksid ekvivalenta (tCO₂e). Plinovi uključeni u ugljični otisak su: ugljikov dioksid, metan, dušikov oksid te fluorirani plinovi¹. Građevinska industrija je također odgovorna za velik udio emisije ugljika [7]. U ovome radu objasniti ćemo što je ugljični otisak građevina, što čini razliku između mostova i zgrada u ovom pogledu, što inženjeri mogu poduzeti kako bi došlo do smanjenja emisije ugljika, koje su smjernice proračuna ugljičnog otiska te naposljetku napraviti pojednostavljeni proračun.

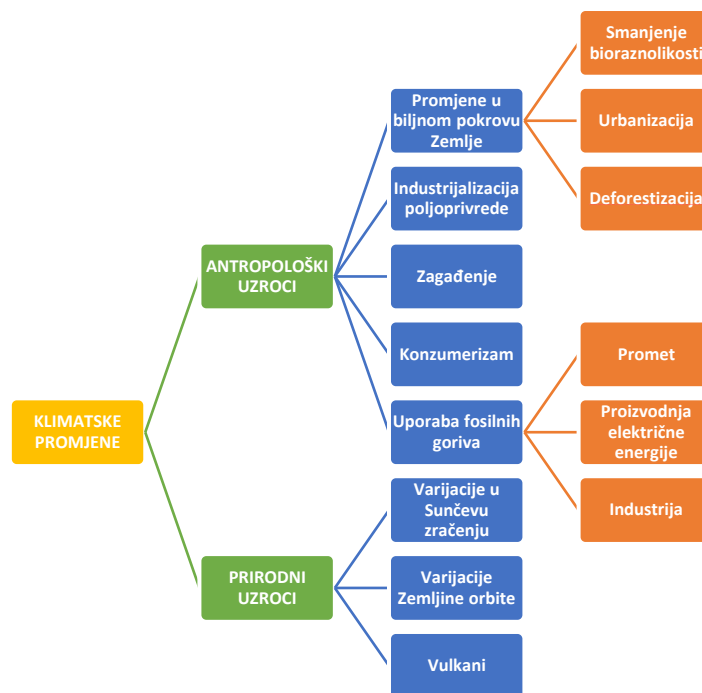
¹ Fluorirani plinovi su plinovi koje je proizveo čovjek u svrhu rashlađivanja (hidrofluorouglijci, perfluorouglijci i sumporov heksafluorid).

2. KLIMATSKE PROMJENE I NJIHOV UTJECAJ

2.1. Klima i klimatske promjene

Moramo prihvatiti da su klimatske promjene dio naše svakodnevice te predstavljaju značajnu prijetnju našoj budućnosti. Posljednjih nekoliko desetljeća smatra se najtoplijima od 1850. godine. Karakteriziraju ih povećanje temperature oceana, slanoće područja većeg saliniteta, a smanjenje u područjima manjeg saliniteta, povećanje razine mora, toplinski valovi, obilne padaline, topljenje ledenjaka i dr. [1]. Klimatske promjene uzrokovane su globalnim zagrijavanjem Zemlje do kojeg dolazi zbog veće količine stakleničkih plinova u atmosferi od onih koji se prirodno pojavljuju. Ti dodatni staklenički plinovi uglavnom su produkt ljudskih aktivnosti. Najčešći takav plin je ugljikov dioksid [8].

Klima na Zemlji mijenjala se kroz povijest, postupno postajući sve toplija ili hladnija tijekom dugih vremenskih razdoblja. Te su promjene bile rezultat prirodnih uzroka koji nemaju velik utjecaj na klimu tijekom dužih vremenskih razdoblja. Prirodni uzroci su varijacije u Sunčevu zračenju, Zemljinoj orbiti i vulkanske erupcije. Druga vrsta uzročnika klimatskih promjena su antropološki, tj. oni nastali ljudskom aktivnošću. Antropološki uzroci dominiraju u stvaranju globalnog zatopljenja i navedeni su na slici 1. Posljedice ljudske aktivnosti su ubrzanje stope erozije i sedimentacije, kemijski poremećaji ciklusa ugljika i dušika, klimatske promjene te velike promjene u biosferi [1].



Slika 1.: Uzroci klimatskih promjena (Izvor: [1])

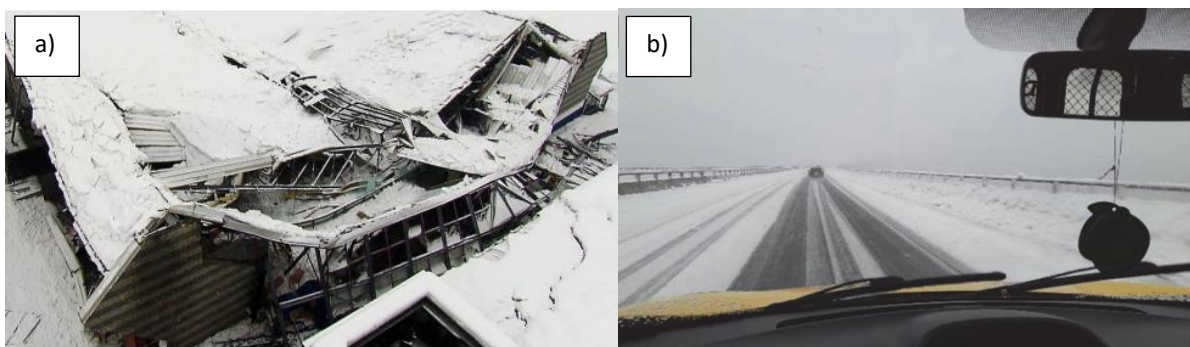
2.2. Utjecaj klimatskih promjena na proračunska djelovanja

Na temelju provedenog istraživanja [4,5] promatramo odabrane učinke klimatskih promjena i njihove posljedice na proračunska djelovanja. Fokus istraživanja bio je na utjecajima klimatskih promjena na opterećenje snijegom na tlo, poplave rijeka, porast temperatura, podizanje razine mora i utjecaj porasta na obalne konstrukcije, rizik od uragana, obilnih kiša i valova u promjenjivim klimatskim uvjetima, procjenu rizika od otkazivanja mostova i otpornost nasipa pod utjecajem tsunamija [9].

2.2.1. Utjecaj na opterećenje snijegom na tlo

Opterećenje snijegom na tlo uvelike ovisi o nadmorskoj visini lokacije koja se ispituje. Nizine zapadne i srednje Europe te mediteranske krajeve karakterizira povremeni snježni pokrivač nakon kojeg slijedi potpuno otapanje snijega. Suprotno tome, planinske krajeve i hladne sjeverne regije, imaju trajan i akumulirajući snježni pokrivač [9].

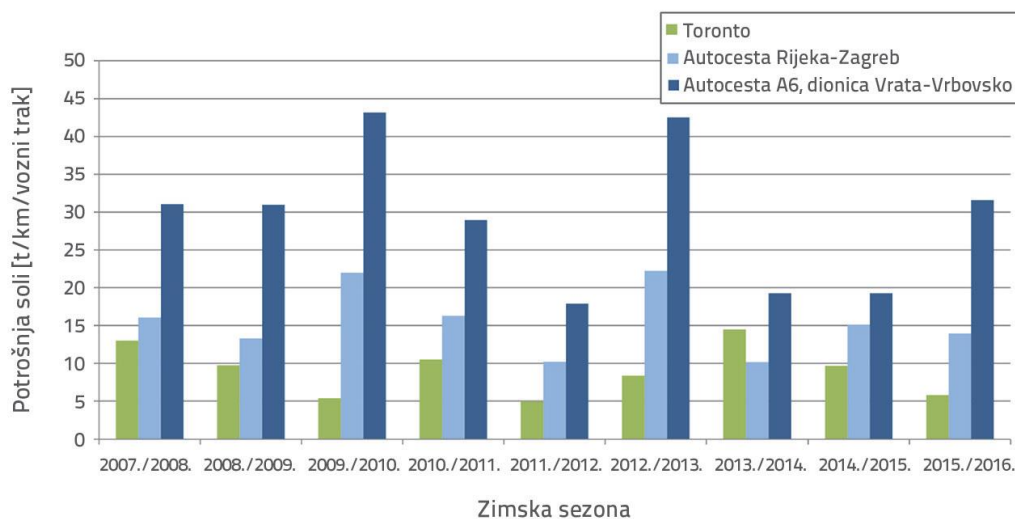
Istraživanjem u Norveškoj utvrđeno je da će očekivani globalni porast temperature u većem dijelu zemlje dovesti do smanjenja opterećenja snijegom na tlo od 2070. do 2100. godine. Međutim, u nekim unutrašnjim područjima predviđa se povećanje opterećenja snijegom na tlo što će utjecati na pouzdanost konstrukcija. Slična sudbina čeka područje cijele Europe. Tendencija smanjenja maksimalnih opterećenja snijegom zabilježena je u švicarskim Alpama te na području Karpata. Za neka područja predviđeno je povećanje ekstremnih opterećenja snijegom, uključujući Mediteran, Pirenejski poluotok, Ujedinjeno Kraljevstvo, Norvešku i Švedsku [4].



Slika 2.: a) Rušenje krova zbog prevelikog opterećenja snijegom (Izvor: [9]); b) Vijadukt Zečeve Drage tijekom snježne mećave krajem veljače 2023. (Izvor: [1])

U kombinaciji s prevelikom količinom snijega koja opterećuje konstrukciju, vjetar stvara dodatno opterećenje. On mijenja distribuciju opterećenja, stvaraju se nanosi, klizanje snijega s krova, kiša i slično. Slika 2.a prikazuje rušenje krova zbog prevelikog opterećenja snijegom [9]. Ekstremni snježni uvjeti mogu imati značajan utjecaj na prohodnost i dostupnost

prometnica i mostova, kao i trajnost konstrukcija. Prema [1], snježna mećava 2023. godine u potpunosti je prekinula cestovni promet u Hrvatskoj (slika 2.b). U Gospiću je u 24 sata palo 47 cm snijega, a korišteno je 3300 tona soli za odleđivanje dionice autoceste. Slika 3. prikazuje rezultate istraživanja potrošnje soli za odleđivanje na prometnicama u Hrvatskoj i Kanadi. Uočavamo da je na autocesti Rijeka – Zagreb, osobito na dionici Vrata – Vrbovsko, potrošnja soli veća nego na gradskoj autocesti u Torontu. Nažalost, nema dostupnih podataka za dulja razdoblja, a podaci za desetogodišnje razdoblje nisu dovoljni za donošenje zaključka o trendovima potrošnje soli. U Hrvatskoj se na cestama i autocestama primjenjuje konzervativni pristup s visokim razinama potrošnje soli kako bi se osigurala sigurnost putnika tijekom zimskih mjeseci, što objašnjava zašto je potrošnja soli u planinskim krajevima Hrvatske veća nego u Torontu. Potrošnja soli ostaje visoka zbog češćih izmjena ciklusa smrzavanja i odmrzavanja koji su posljedica klimatskih promjena. Ciklusi smrzavanja i odmrzavanja utječu na degenerativne procese u betonskim konstrukcijama, često uzrokujući pukotine, dok obilno posipavanje soli povećava rizik od korozije armature u betonu [1].



Slika 3.: Sezonska potrošnja soli za odleđivanje po kilometru voznoga traka na hrvatskim i kanadskim prometnicama (Izvor: [1])

Učinke klimatskih promjena treba uzeti u obzir zajedno s inherentnom nesigurnošću klimatskih modela. S obzirom na trenutna saznanja, nije moguće dati jednoznačne preporuke za probabilističko modeliranje ekstremnog opterećenja snijegom pod utjecajem klimatskih promjena. Preporuke vezane uz klimatska opterećenja kontinuirano se razvijaju i revidiraju najmanje svakih 15 godina. Također je važno naznačiti očekivane trendove ključnih parametara koji ovise o vremenu [4].

2.2.2. Utjecaj na plavljenje rijeka

Poplave su jedan od glavnih prirodnih hazarda. Očekuje se da će klimatske promjene u Europi povećati rizik od poplava, osobito u sjeverozapadnoj i sjevernoj Europi. Tako će događaji s trenutnim stogodišnjim povratnim periodom do 2080. godine imati tridesetogodišnji povratni period. Osim problema s povećanjem učestalosti događaja, primijećeno je da su događaji povećanog intenziteta. Važno je napomenuti da na poplave utječe širok raspon čimbenika, osim promjena u ekstremnim oborinama to su urbanizacija i povećanje (gustoće) naseljenosti. Porast ovih čimbenika se smatra ključnim razlogom za povećanje gubitaka uzrokovanih poplavama u Europi [4].

Rizik od pojave poplava porastao je u mnogim područjima Europe zbog niza klimatskih i neklimatskih učinaka. Ne klimatski učinci uključuju smanjenje zelenih površina zbog izgradnje naselja i infrastrukture, loše održavanje odvodnje i slične aktivnosti. Deforestacija u planinskim i brdskim područjima može uzrokovati bujice i skratiti vrijeme otjecanja vode prema nizinama. Povećana urbanizacija dovodi do većeg udjela nepropusnih površina u gradovima (popločavanje), čime se smanjuje količina vode koja se upija u podzemlje [9]. Metode smanjenja rizika od poplava su: obnavljanje prirodnih poplavnih i močvarnih područja unutar kvalitetnih nasipa, postojanje i održavanje poplavnih pašnjaka, nasipi moraju biti što dalje od rijeke da mogu prirodno teći, povećanje zelenih površina u gradovima [9].

Klimatske će promjene utjecati na vremenske obrasce i hidrološki ciklus zbog globalnog zagrijavanja, povećavajući učestalost i intenzitet oborina, a time i učestalost poplavnih događaja. Poplava rijeke Dunav 2013. godine smatra se primjerom mjera poduzetih nakon katastrofe. Ovaj poplavni događaj donio je najveći ikad zabilježeni protok u Bratislavi i najvišu ikad zabilježenu razinu vode u Budimpešti. Istraživači su odmah pozvali na analizu utjecaja klimatskih promjena na poplave i na ponovno razmatranje projektnih parametara obrane od poplava. Otkriveno je da se u Njemačkoj, slično kao i na drugim mjestima, može očekivati značajan porast gubitaka povezanih s poplavama zbog klimatskih promjena [4].



Slika 4.: Poplave u Njemačkoj (Izvor: [10])

2.2.3. Utjecaj na brzinu protoka u rijekama i rizik od erozije

Povećani rizik od erozije oko stupova i upornjaka mostova jedan je od kritičnih efekata klimatskih promjena. Prema [4], erozija se može povećati između 5% i 50% do 2080. godine u Velikoj Britaniji, ovisno o uvjetima i lokaciji mosta. Dubina erozije je povezana sa brzinom protoka vode. Kada nema prijenosa sedimenta erozija raste sporo, dok se kod protoka sedimenta rupa od erozije formira vrlo brzo. Ovi fenomeni i njihove posljedice trenutno se ne mogu predvidjeti, a inženjeri se bave provođenjem radnji i hitnih mjera nakon fenomena kako bi se opisalo i objasnilo šta se dogodilo.

Potencijalni budući porasti poplava zbog klimatskih promjena moraju se uzeti u obzir prilikom projektiranja novih konstrukcija ili procjene postojećih. Izazov u uključivanju klimatskih promjena u procjene erozije je što je osjetljivost riječnih tokova na klimatske promjene vjerojatno različita za različite vrste i lokacije rijeka. U propisima za projektiranje i procjenu erozije, utjecaji klimatskih promjena obično se uzimaju u obzir povećanjem magnitude poplave, odnosno riječnog protoka za određeni povratni period (npr. povratni period 200 ili 500 godina povećanje 20–25%). Velika Britanija je ažurirala svoje propise za projektiranje mostova na autocestama dok većina zemalja klimatske promjene ne obuhvaća detaljno u procjeni rizika od erozije [4].

U Hrvatskoj, također, ne postoje regulirane smjernice za procjenu erozivnog djelovanja toka na korito te često svjedočimo oštećenju mostova pod djelovanjem rijeka, protoka ili bujica. Godine 2015. kao posljedica dnevne oborine, protok rijeke Krapinice je erodirao desnu obalu uz južni upornjak mosta Đurmanec (slika 5.). Nagomilani, plutajući nanos u središnjem, najvećem rasponu mosta imao je dodatni utjecaj na eroziju obale. Zbog količine plutajućih naplavina protok je bio u potpunosti usmjeren kroz desni otvor. Tako je došlo do erodiranja desne obale i temelja upornjaka što je završilo njegovim naginjanjem. Zbog velikog zavoja rijeke uzvodno od mosta, rijeka Krapinica ima veliki erozivni kapacitet. Sanacija mosta izvedena je vrlo brzo zbog važnosti lokacije mosta, naime most se nalazi na državnoj cesti. Uz sanaciju izvedeno je i oblaganje dna i pokosa rijeke kao mjera zaštite korita vodotoka [11].



Slika 5.: Most Đurmanec: a) erozija obale iza upornjaka; b) nagomilani plutajući nanos u središnjem otvoru mosta (Izvor: [11])

SHM (*Structural Health Monitoring*) pruža dragocjen alat za praćenje mostova pogođenih štetama od poplava povezanim sa klimatskim promjenama. Troškovi upravljanja mostovima će rasti kako se intenzitet i učestalost poplava povećavaju. S druge strane, klimatske promjene dovode do ekstremnijih poplavnih događaja, stoga bi praćenje sensorima moglo postati isplativije u budućnosti [4].

2.2.4. Učinci viših očekivanih temperatura

U budućnosti se očekuje da će rastuće temperature zbog klimatskih promjena utjecati na ponašanje građevinskih konstrukcija. Dobro je poznato da se ponašanje materijala mijenja s promjenom temperature. Povećanje temperature uzrokuje širenje materijala, dok smanjenje temperature uzrokuje skupljanje. Dnevne i sezonske promjene u temperaturi zraka rezultirat će varijacijama u raspodjeli temperature unutar pojedinih elemenata konstrukcije. S obzirom na to da je deformacija elementa linearno ovisna o duljini elementa, očito je da će se veće deformacije, a time i naprezanja, pojaviti u elementima veće duljine [6]. Tako ekstremne temperature mogu uzrokovati oštećenja kolnika i željeznica koje prikazuje slika 6.

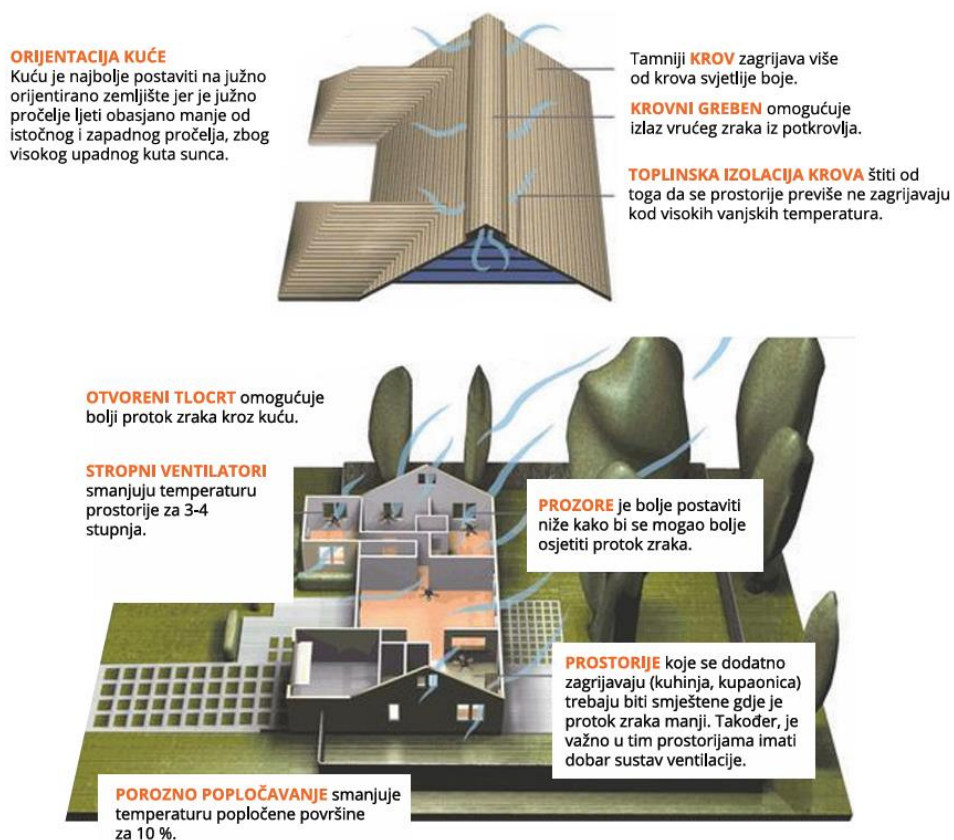


Slika 6.: Oštećenja željeznica (lijevo) i kolnika (desno) zbog ekstremnih temperatura (Izvor: [6])

Jedan od značajnih problema mogao bi biti povećan zamor materijala u mostovima. Studija provedena u Danskoj istraživala je utjecaj temperature na ortotropne ploče mosta analizirajući dugoročne podatke o temperaturi i naprezanjima prikupljene na različitim mjestima ploče mosta. Utvrđeno je da varijacije temperature izravno utječu na raspon naprezanja na zavarenim spojevima, ovisno o njihovom položaju u odnosu na kolnik mosta. Konkretno, istraživanje je pokazalo da bi porast srednje temperature zraka od 2.9°C do 2100. godine mogao skratiti preostali uporabni vijek kritičnih elemenata za otprilike 25 godina zbog problema zamora. Također, nedavna europska istraživanja ukazuju na to da će klimatske promjene vjerojatno izmijeniti projektne termičke utjecaje na mostove, posebno pri višim ekstremnim temperaturama [4].

Reprezentativne vrijednosti u sadašnjim projektantskim normama temelje se na izračunima koji koriste klimatske podatke prikupljene tijekom druge polovice 20. stoljeća. Zbog predviđenih budućih klimatskih promjena, trenutne projektantske vrijednosti za toplinska opterećenja mogle bi postati zastarjele i nedovoljne za nekoliko godina, kada će se prosječna globalna temperatura zraka povećati. Prema globalnim klimatskim modelima, temperature će se mijenjati različito u različitim regijama, što može stvoriti poteškoće u uspostavljanju novih zadanih vrijednosti za projektiranje. Poteškoća leži u procjeni kako će se ekstremne vrijednosti temperature zraka mijenjati. S budućim detaljnijim klimatskim modelima mogle bi se ažurirati projektantske karte. Učinak promjene klime još je teže procijeniti za postojeće konstrukcije, čija je sposobnost da podnose pomake uzrokovane toplinskim opterećenjima već na maksimumu. To može dovesti do oštećenja konstrukcija i uzrokovati velike troškove i druge posljedice. Potrebno je razviti strategiju kako reagirati kada se ti učinci primijete [6]. Ekstremne vrućine utjecat će i na druge prirodne nepogode kao što su učestaliji požari, veće isparavanje, više oborina i intenzivnije poplave [12].

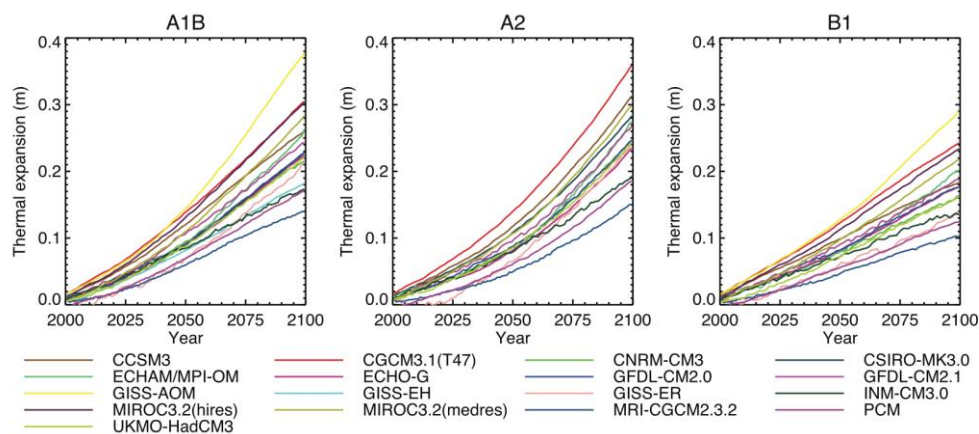
Veličina toplinskih učinaka ovisi o lokalnim klimatskim uvjetima, zajedno s orijentacijom konstrukcije, njezinom ukupnom masom, završnim obradama, grijanjem, ventilacijom, izolacijom itd. [6]. S obzirom na nadolazeće ekstremne temperature na slici 7. prikazane su preporuke za projektiranje kuće.



Slika 7.: Preporuke za projektiranje kuće s obzirom na očekivane više temperature (Izvor: [12])

2.2.5. Učinci porasta razine mora na obalnu infrastrukturu

Budući porast razine mora ovisi o regionalnim karakteristikama što čini lokalne prognoze veoma važnima za predviđanje potencijalnih utjecaja i poboljšanje planiranja potrebnih sigurnosnih mjera [4]. Očekuje se da će vrijednosti porasta razine mora između 2080. i 2100. godine iznositi 1.9 ± 1.0 , 2.9 ± 1.4 i 3.8 ± 1.3 mm/godini prema različitim scenarijima. Ova projekcija jasno je vidljiva na slici 8., gdje je prikazan projektirani globalni prosječni porast razine mora uslijed toplinske ekspanzije tijekom 21. stoljeća u odnosu na razdoblje od 1980. do 1999. prema 3 scenarija [6].



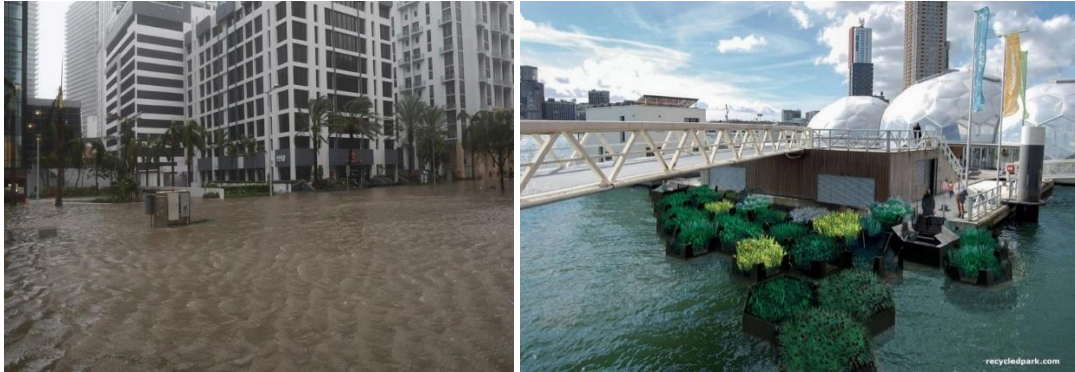
Slika 8.: Projektirani globalni prosječni porast razine mora [6]

Rastuća razina mora prijetnja je mnogim zemljama i gradovima, što je već vidljivo. Solomonovi Otoci pružaju pogled na buduće posljedice globalnog porasta razine mora. Predviđa se da će porast razine mora uzrokovati široko rasprostranjenu eroziju i poplave niskih atola u središnjem Pacifiku. Korištenjem satelitskih snimaka od 1947. do 2014. godine, identificirano je pet vegetiranih grebenastih otoka koji su nestali, dok je još šest doživjelo ozbiljno povlačenje obale. Povlačenje obale na dva mjesta uništilo je sela, što je dovelo do preseljenja zajednica [6].

Također je potrebno razumjeti povezanost između ubrzanog porasta razine mora i drugih promjena u globalnoj klimi, kao što su vjetrovi i valovi te lokalna tektonika i njihov utjecaj na obalne strukture [6]. Poplave uzrokovane povećanjem plimnih ili olujnih valova predstavljaju značajnu opasnost za konstrukcije koje su pod utjecajem porasta razine mora. Kombinacija opasnosti od tsunamija s porastom razine mora je kritična. Međutim, kombinacija djelovanja tsunamija s porastom razine mora još uvijek nije dovoljno istražena. Hitno je potrebno odrediti ove potencijalne opasnosti na temelju regionalnih karakteristika i provesti procjene ranjivosti kritične obalne infrastrukture (npr. transportne i elektroenergetske mreže) smještene na obalama kako bi se identificirala ona koja su izložena visokom riziku [4].

Nedavne poplave (slika 9.a) u Miamiu pokazale su koliko je važna zaštita od porasta razine mora, a novi projekt prevencije u ukupnom iznosu od nekoliko stotina milijuna dolara započet

je kako bi se podigle ceste, instalirale pumpe i vodovodne cijevi te preuredili kanalizacijski sustavi. Novi objekti otporni na rastuće vode projektirani su prema novom građevinskom propisu, gdje su zgrade smještene šest ili sedam stopa iznad stvarne razine tla, tako da u slučaju poplave voda dođe u parkiralište i ne utječe na zgradu [6].



Slika 9.: a) Poplavljene ulice Miamia (Izvor: [13]); b) Rotterdamski plutajući park Izvor: [14])

Porast razine mora neizbježan je i predstavlja izazov za građevinske inženjere. Nove konstrukcije projektiraju se i grade u zemljama koje su najviše pogođene ovim klimatskim promjenama. Plutajući objekti su primjer novog pristupa predstavljen u Nizozemskoj. U Rotterdamu paviljon pluta na platformi od stiropora, betona i visokotehnoloških jastučića (slika 9.b). Potrebno je biti kreativan i prilagodljiv kako bismo gradili nove građevine koje mogu izdržati i prilagoditi se ovom fenomenu. Također, bismo se trebali osvrnuti unazad i upiti znanje iz građevina koje već desetljećima odolijevaju učincima morskih oluja [6].

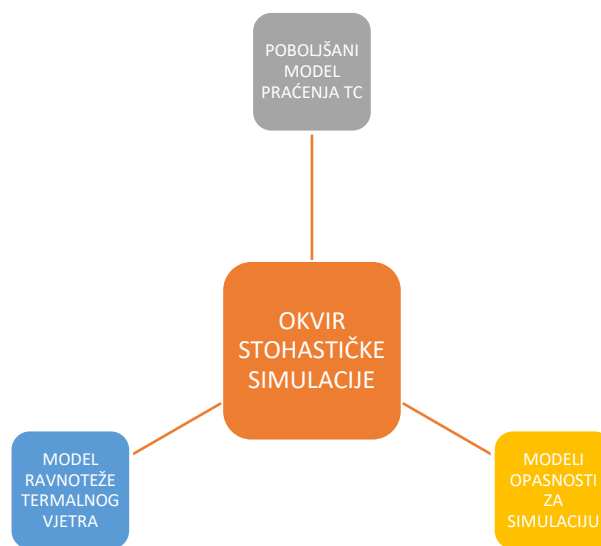
2.2.6. Površinski vjetar tropske ciklone

Većina globalnih klimatskih modela sugerira da će se povećati učestalost intenzivnih, destruktivnih oluja, iako će to varirati ovisno o regiji. Prema [4], može se očekivati određeno povećanje ekstremnih vjetrova u Sjevernoj Europi i sjevernim dijelovima Središnje Europe. Međutim, rezultati značajno ovise o korištenom klimatskom modelu. Klimatski modeli predviđaju značajne promjene u faktorima kao što su temperatura površine mora, smicanje vjetra i vlažnost na razini tropopauze². Površinska temperatura mora najvažniji je faktor i usko je povezan s tropskim ciklonama, a rezultat je globalnih klimatskih promjena zbog povećanih emisija CO₂. Površinska temperatura mora bi se mogla povećati za 4°C do 2060. godine, prema trenutnim trendovima.

Kako bi se poboljšao ovaj pristup, razvijen je nelinearni model intenziteta koji integrira ne samo doprinos površinske temperature mora, nego i drugih važnih varijabli kao što su vertikalno smicanje vjetra i konvektivna nestabilnost. Zbog svoje učinkovitosti i točnosti simulacije,

² Tropopauza je granični sloj između troposfere i stratosfere.

poboljšani model praćenja tropskih ciklona može se učinkovito koristiti u kontekstu promjenjive klime. Opasnosti od površinskog vjetra, kiše i valova pod promjenjivom klimom mogu se procijeniti korištenjem okvira stohastičke simulacije ovisne o klimi za opasnosti od tropskih ciklona razvijenog na Sveučilištu u Buffalou. Okvir se sastoji od tri komponente: poboljšanog modela praćenja tropskih ciklona za generiranje sintetiziranih oluja, novog modela ravnoteže termalnog vjetra za simulaciju profila gradijenta vjetra te učinkovitih modela opasnosti za simulaciju vjetra, kiše i valova. Shematski prikaz na slici 10. Iako će se svaka komponenta okvira poboljšati s vremenom, trenutno pruža smjernice o tome kako integrirati atmosfersku znanost i inženjering vjetra za učinkovitu procjenu učinaka klimatskih promjena na opasnosti od površinskih tropskih ciklona [4].



Slika 10.: Okvir stohastičke simulacije ovisne o klimi za opasnosti od tropskih ciklona razvijen na Sveučilištu u Buffalou

Negativan učinak jakih vjetrova na građevine primjetan je desetljećima. Poznati primjer učinka vjetra je poznati Tacoma Narrows most izgrađen 1940. godine (slika 11.). Most karakterizira vrlo lagana i tanka konstrukcija glavnog raspona 854 metra. Debljina grede za ukrućenje iznosila je 2.4 m, a širina 11.9 m. Zbog težnje ka ostvarenju što većih raspona uz što vitkije i tanje konstrukcije, zanemarila se osjetljivost konstrukcije na dinamička djelovanja koja mogu biti rezultat prometnog opterećenja ili vjetra. Rušenje ovog mosta ukazalo je na neke smjernice za buduću praktičnu primjenu visećih mostova kao što su: primjena rešetkastih greda za ukrućenje, povećati omjer širina/raspon, povećati težinu, prigušiti konstrukciju, povećati krutost i visinu grede za ukrućenje te aerodinamičko oblikovanje grede. Godine 1950. most je dobio novu konstrukciju koju čine rešetkasta greda za ukrućenje debljine 10 m, širine 18.3 m i čelični piloni. Najnovija konstrukcija mosta izrađena je 2007. godine, paralelni most s AB pilonima [15].

Važnost preciznog projektiranja za otpornost na učinke vjetra raste s povećanjem brzine i intenziteta vjetra. S abnormalno visokim temperaturama površine mora, oluje se pojačavaju. Istraživanje je pokazalo da se uragani sada značajno brže intenziviraju nego što su se intenzivirali prije 25 godina. Drugo istraživanje pokazalo je da je globalna brzina vjetra povećana u prosjeku za 5% tijekom posljednja dva desetljeća [6].



Slika 11.: Tacoma Narrows prvotna konstrukcija (lijevo) i najnovija konstrukcija (desno) (Izvor: [15])

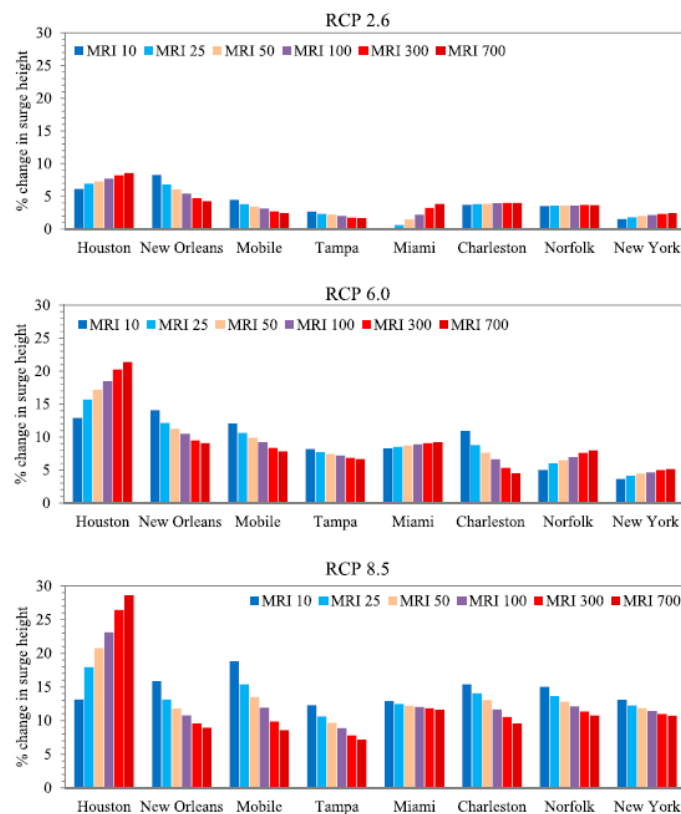
Uragani, cikloni i oluje širom planeta redovito oštećuju mnoge gradove i uzrokuju velike ekonomske gubitke za zemlje i građane. Tendencija rasta vjetra naglašava važnost unapređenja pristupa za izgradnju zgrada otpornih na vjetar. Različite metode mogu pomoći da zgrada preživi jake vjetrove i oluje. Vjetar koji djeluje na konstrukciju krova može inducirati negativni tlak i stoga stvoriti uzgon koji može podići krov zgrade. Da bi se minimizirao ovaj učinak, konstrukcija krova trebala bi biti pričvršćena na temelj. Strukture zaštićene zemljom ili kupole općenito su otpornije na jake vjetrove, a aerodinamička svojstva kupola bolje podnose oluje. Pristupi koji se primjenjuju na niske do srednje visoke građevine mogu biti prekonzervativni za projektiranje vrlo visokih zgrada. Vjetar se smatra kvazistatičnim, međutim neke strukture, posebno one koje su visoke ili vitke, dinamički reagiraju na djelovanje vjetra. Važan problem povezan s dinamičkim kretanjem strukture uzrokovanim vjetrom je ljudska osjetljivost na vibracije. Stoga, kod većine visokih zgrada, razmatranje funkcionalnosti prevladava nad pitanjem čvrstoće. Također, brzina vjetra varira s visinom zgrade. Na velikim visinama iznad površine zemlje, gdje su učinci trenja zanemarivi, kretanja zraka pokreću gradijenti tlaka u atmosferi, koji su pak termodinamičke posljedice promjenjivog sunčevog zagrijavanja Zemlje. Ova gornja razina brzine vjetra poznata je kao gradijent brzine vjetra. Taj gradijent je veći u središtu velikog grada nego na područjima s manjom hrapavošću površine. Drugi složen problem je taj što vjetar nije konstantan i stoga pritisci nisu stabilni, već jako varijabilni, što može rezultirati oštećenjima zbog umora struktura i dinamičkom uzbuđenju. Tlakovi također nisu ravnomjerno raspoređeni po površini strukture, već variraju s položajem [6]. Statički pritisak je određen kao srednja vrijednost 10-minutne brzine vjetra, a dinamički dio pritiska vjetra množi se sa faktorom udara vjetra. Ukupno djelovanje vjetra je zbroj statičkog i

dinamičkog djelovanja vjetra na visini gdje djeluje udar vjetra, (70 m) a na ostalom dijelu djeluje statički pritisak [16]. Ova složenost opterećenja vjetrom trebala bi se uzeti u obzir tijekom projektiranja konstrukcija [6].

2.2.7. Utjecaj na olujne valove

Računalni numerički model SLOSH (*Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes*) je razvila Nacionalna meteorološka služba (*NWS*) za procjenu visina olujnih valova koji nastaju uslijed uragana. Ovaj model koristi podatke o atmosferskom tlaku, veličini, brzini kretanja i putanji. SLOSH se sastoji od skupa fizikalnih jednadžbi koje se primjenjuju na obale specifičnih lokacija uzimajući u obzir jedinstvene karakteristike kao što su konfiguracije zaljeva i rijeka, dubine vode, mostovi, ceste, nasipi i druga fizička obilježja [9].

Model SLOSH koristi se za analizu opasnosti od valova. Slika 12. prikazuje projekcije promjena u visini valova na osam lokacija duž atlantske obale. Za generiranje opasnosti od valova simulirano je 20 000 godina toplinskih ciklusa koristeći verificirani model simulacije. Projekcija koristi tri RCP³-a (RCP 2.6, 6.0 i 8.5). Zapažen je porast razine valova zbog povećanog intenziteta tropskih ciklona [4].



Slika 12.: Promjene u opasnosti od olujnog udara 2020.-2100. godine za različita povratna razdoblja (Izvor: [4])

³ RCP (*Representative Concentration Pathway*) predstavlja putanju koncentracije stakleničkih plinova. Na primjer, RCP 6.0 predstavlja koncentraciju ugljika koja uzrokuje globalno zagrijavanje u prosjeku od 6.0 W/m² diljem planete.

Visina valova koja se danas događa jednom u 100 godina očekuje se da će se kod RCP 8.5 promijeniti u događaj koji će se javljati svakih 25–50 godina. Također, očekuje se da će porast razine mora dodatno pogoršati utjecaj klimatskih promjena na buduće opasnosti od valova. Međutim, visine valova nisu samo funkcija intenziteta tropskih ciklona. Drugi faktori poput topografije, barimetrije i geografske raspodjele igraju veliku ulogu i izravno utječu na resultantnu visinu valova. Nadalje, varijacije u drugim parametrima tropskih ciklona, kao što su kut smjera, translacijska brzina i lokacija udarca na kopno, također igraju ključnu ulogu u visinama valova [4].

Zaštita od olujnih valova postaje sve popularnija u zemljama kojima prijeti opasnost od ovih katastrofa. Dizajn i gradnja novih građevina predstavljaju novi izazov građevinskim inženjerima. Tako je nastala najveća mobilna barijera protiv olujnog vala na svijetu, Maeslantkering (slika 13.), izgrađena je blizu Rotterdama kako bi zaštitila grad od olujnog vala do tri metra. Konstrukcija se sastoji od dvaju čeličnih vrata visokih 22 metra i dugih 210 metara te čeličnih nosača dužine 237 metara. Barijera je uspješno testirana u studenom 2007. godine tijekom oluje.



Slika 13.: Maeslantkering (Izvor: [18])

2.2.8. Posljedice za obalnu infrastrukturu

Ekonomski i ljudski gubici uzrokovani tropskim ciklonama (npr. oštećenja struktura uzrokovana vjetrom, prodor kiše uzrokovan vjetrom, poplave u unutrašnjosti i sl.) izravno ili neizravno su povezani s opasnostima od vjetra, kiše i valova. U budućnosti ti gubici će rasti s povećanjem populacije i infrastrukture u obalnim područjima. Do povećanja će doći zbog klimatskih promjena [4].

Modeli procjene rizika od tropskih ciklona moraju biti u mogućnosti uzeti u obzir nestacionarne aspekte kako bi obuhvatili potencijalne učinke klimatskih promjena na troškove štete uzrokovane tropskim ciklonama. Međutim, mnogi postojeći modeli pretpostavljaju da je brzina vjetra stacionarna, a utvrđeno je da bi povećanje brzine vjetra tropskih ciklona moglo povećati

troškove štete. Prema [4], napravljena je procjena rizika od olujnih valova za obalne mostove u uvjetima promjenjive klime. Njihovi rezultati ukazuju da će promjenjiva klima imati značajan negativan učinak na godišnju stopu zatvaranja mostova s pratećim izravnim i neizravnim ekonomskim gubicima.

Potreba za prilagodbom obalne infrastrukture porastu razine mora je prepoznata. Razina mora izravno utječe na visinu olujnih valova jer se izravno dodaje na njih. Kombinacija rasta statičkih razina vode i povećanja težine i učestalosti tropskih ciklona dovest će do sve većeg potapanja i poplavlivanja obalnih područja, a čak i do ubrzanih stopa erozije obale. Povećanje intenziteta oluja znači da će rizik od teških poplava uzrokovanih olujnim valovima za obalne zajednice također rasti [4]. Problemi će nastati i u prometnoj infrastrukturi. Može doći do potapanja cestovne mreže, promjena u putničkom i teretnom prometu ili potpunog prekida u infrastrukturi.

2.3. Utjecaj klimatskih promjena na karakteristike materijala i uporabivost konstrukcija

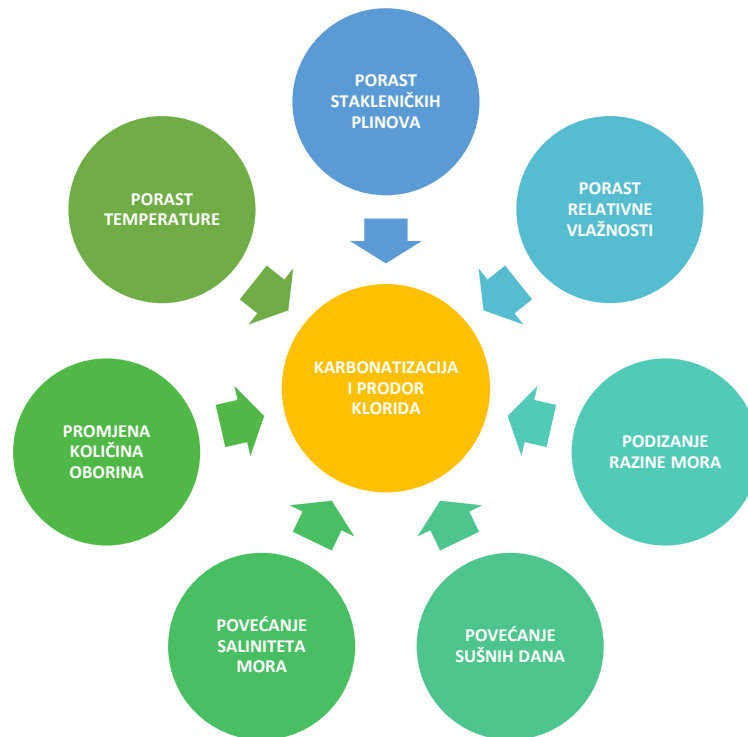
Povećanje koncentracije CO₂ u atmosferi i promjene temperature zbog klimatskih promjena neizbježni su. Ovo povećanje, zajedno s vlagom uzrokuje ubrzanje procesa degradacije materijala. Zbog toga se smanjuje vijek trajanja građevina, uz smanjenje sigurnosti, funkcionalnosti i trajnosti, te se povećavaju troškovi izgradnje i održavanja [6]. Poseban problem imaju mostovi čiji je zahtijevani uporabni vijek do 100 godina. Zbog velike izloženosti okolišu, ovaj uporabni vijek je teško ostvariti bez pravilnog projektiranja trajnosti i održavanja građevine [1]. Međunarodna udruga za mostove i građevinarstvo (*IABSE*) osnovala je Task group 6.1. koja se bavi utjecajem klimatskih promjena na zgrade i građevinske konstrukcije. Skupina stručnjaka sakuplja informacije o utjecajima klimatskih promjena na građevine i ostale konstrukcije u cilju promicanja znanja o klimatskim promjenama nad konstrukcijama [9].

2.3.1. Učinci na procese propadanja

Prodor klorida i karbonatizacija dva su glavna procesa propadanja koja utječu na trajnost AB konstrukcija. Razvoj oba mehanizma može ovisiti o okolnim uvjetima, poput koncentracije atmosferskog CO₂, temperature i vlage (slika 14.). Ovi okolišni uvjeti mogu biti pod utjecajem klimatskih promjena. Očekivane varijacije temperature i vlage zbog klimatskih promjena, mogle bi utjecati na stope difuzije klorida i CO₂, kao i na početak korozije, što bi moglo dovesti do većih oštećenja. Učinke klimatskih promjena bi trebalo uzeti u obzir prilikom procjene otpornosti AB konstrukcija [5].

Procjena učinaka klimatskih promjena na razvoj procesa propadanja zahtijeva korištenje modela koji mogu uzeti u obzir varijacije okoliša. Za prodor klorida i karbonatizaciju takvi modeli obično uzimaju u obzir faktore koji povećavaju ili smanjuju koeficijente difuzije (kloridi, CO₂ i vlaga). Procjena učinaka klimatskih promjena na brzinu korozije armature nije

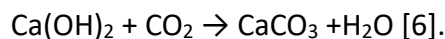
jednostavan zadatak zbog složenosti samog procesa korozije. Brzina korozije ovisi o svojstvima čelika i betona, kao i o okolnim uvjetima (temperaturi, prisutnosti vode i kisika) na koje mogu utjecati pukotine. Stoga ne postoji konsenzus o najboljem modelu za procjenu vijeka trajanja već su potrebna dodatna istraživanja [5].



Slika 14.: Učinci klimatskih promjena koji utječu na karbonatizaciju i prodor klorida (Izvor: [1])

2.3.2. Karbonatizacija

Karbonatizacija je kao proces izravno povezana i pod utjecajem količine ugljikovog dioksida. Karbonatizacija počinje kada kalcijev hidroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) u betonu reagira s ugljikovim dioksidom (CO_2) iz zraka, stvarajući kalcijev karbonat (CaCO_3). Ovaj proces može se opisati kemijskom jednačinom:



Karbonatizacija betona je spor (oko 1.0 mm/godini) i kontinuiran proces koji se odvija od vanjske površine prema unutra. Voda u porama betonskog cementa obično je lužnata s pH vrijednošću između 12.5 i 13.5. U tim uvjetima čelična armatura je pasivirana i zaštićena od korozije. Metal je pasivan kada je pH iznad 9.5, ako su vrijednosti pH u betonu manje od 9.5 nastupa uništavanje pasivirajućeg sloja. Karbonizacija čini vodu u porama kiselijom, što smanjuje pH čak na 8.5, pri čemu pasivni film čelika postaje nestabilan. Količina karbonizacije drastično se povećava s visokim omjerom vode i cementa, niskim sadržajem cementa, kratkim periodom stvrdnjavanja, niskom čvrstoćom i vrlo propusnom ili poroznom pastom.

Karbonizacija također značajno ovisi o relativnoj vlažnosti betona. Najveće stope karbonizacije javljaju se kada je relativna vlažnost između 50 i 75%. Ispod i iznad tih vrijednosti, karbonizacija se smatra zanemarivom. Kao rezultat toga, može doći do korozije čelične armature i oštećenja konstrukcije [6].

Prema istraživanju u Australiji [5], rizici od oštećenja (slika 15.) izazvanih karbonatizacijom mogli bi porasti do 16% do 2100. godine. To znači da bi jedan od šest objekata mogao doživjeti dodatna i skupa oštećenja korozijom do 2100. godine. Važno je prepoznati da su razine CO₂ u urbanim, prigradskim i ruralnim područjima obično više od globalne prosječne vrijednosti zbog antropogenih i prirodnih izvora. Iako mnoge studije izvještavaju samo o najgorem (i najmanje vjerojatnom) scenariju emisija bez ublažavanja, učinak korozije kod manje ozbiljnih projekcija CO₂ također je značajan [5].



Slika 15.: Korozija uzrokovana karbonatizacijom na AB gredi (Izvor: [17])

Karbonatizacija je osjetljivija na klimatske promjene od procesa prodora klorida [1]. Analize osjetljivosti pokazuju da zaštitni sloj betona ima najveći utjecaj na rizike od oštećenja, zatim relativna vlažnost, dok čvrstoća betona ima zanemariv učinak na rizike od oštećenja [5].

2.3.3. Prodor klorida

Prodor klorida je proces u kojem kloridi difuzijom prolaze kroz zaštitni sloj betona do armature. Nalaze se u sastavu betona kao sastojak nekih aditiva ili se koristi agregat zagađen soli. Kloridi u beton prodiru s površine (soljenje cesta, morska sol), a medij u kojem se transportiraju je voda. Proces transporta je brži što je beton više propustan. Brzina prodora klorida ovisi o vrsti cementa, njezi betona i temperaturi. Dopuštena količina klorida u betonu u Hrvatskoj iznosi 0.4% količine cementa [19].

AB konstrukcije uz obalu trpe probleme s propadanjem zbog svog okruženja. Smanjenje poprečnog presjeka čelične armature, smanjenje otpornosti i pucanje betonskog sloja primjeri su negativnih učinaka visokih koncentracija klorida u obalnim područjima. Karakteristični primjeri oštećenja AB konstrukcije prikazani su na slici 16., koja pokazuje propadanje dvaju

mostova u Hrvatskoj. Slika lijevo prikazuje oštećenje glavnih nosača uslijed korozije armature Paškog mosta, a desno je prikazano oštećenje stupova Krčkog mosta uslijed korozije armature. Uočavamo pucanje betona, koroziju čelične armature i smanjenje poprečnog presjeka betona. S obzirom na to da je porast razine mora potencijalni učinak klimatskih promjena, obalne strukture će biti izloženije djelovanju korozije i propadanju. Stoga se očekuje da će učinak morskog okruženja imati pojačan intenzitet na strukture i smanjiti njihovu trajnost [5].



Slika 16.: Propadanje AB konstrukcija uz obalu; Paški most (lijevo) i Krčki most (desno) (Izvor: [19])

Otkriveno je da bi klimatske promjene mogle uzrokovati smanjenje trajnosti od 2% do 18%, ovisno o uvjetima izloženosti i scenarijima klimatskih promjena. Prethodna istraživanja ukazuju na to da bi povećanje dubine karbonizacije, koncentracije klorida na razini armature i brzine korozije uzrokovano klimatskim promjenama moglo rezultirati preranim početkom korozije ili smanjenjem vremena do otkazivanja. Stoga je od ključne važnosti uzeti u obzir ove učinke pri dizajnu i održavanju konstrukcija. Također, treba napomenuti da u nekim regijama, smanjenje hladnih perioda tijekom zime može imati korisne učinke u smislu manje potrebe za korištenjem soli za odleđivanje na mostovima [5].

Još jedan primjer građevine u okolišu bogatom kloridima je Ferrycarrig Bridge (slika 17.). Ovaj most je obnovljen 2007. godine koristeći pet različitih vrsta betona na sedam poprečnih nosača mosta. Nedavna istraživanja ispitala su moguće učinke klimatskih promjena na dvije vrste betona korištenih na mostu, običan Portland cement (OPC) i 40% OPC + 60% mljevene granulirane troske visokih peći (GGBS). Zaključeno je da OPC + GGBS betonu treba četiri puta duže nego OPC betonu da dođe do teških pukotina u scenariju bez klimatskih promjena. Međutim, ova razlika se smanjuje zbog klimatskih promjena. To je prvenstveno zbog činjenice da klimatske promjene utječu na OPC + GGBS beton u većoj mjeri, budući da će ovaj beton

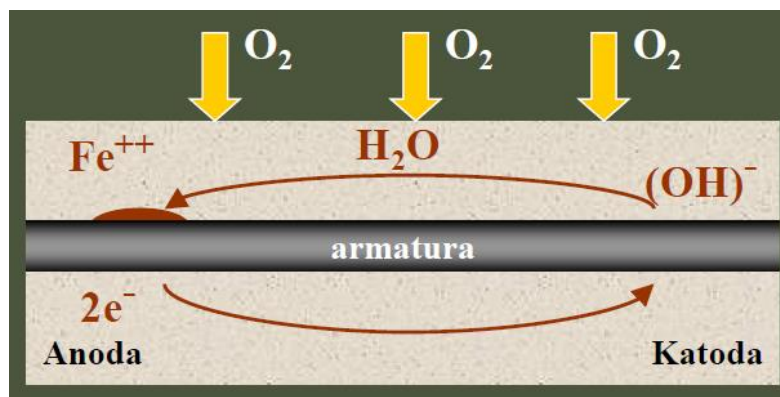
trajati duže u budućem klimatskom scenariju zbog svoje povećane izdržljivosti u agresivnim morskim okruženjima [5].



Slika 17.: Ferrycarrig Bridge (Izvor: [20])

2.3.4. Korozija

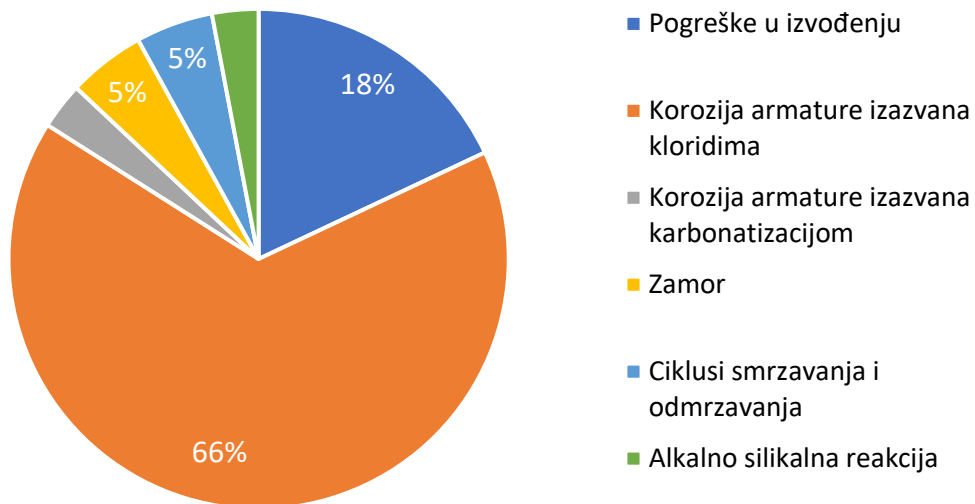
Korozija je elektrokemijski proces koji uključuje protok naboja s anodnim reakcijama (atomi željeza gube elektrone i prelaze u okolni beton kao željezni ioni) i redukcijskim reakcijama (elektroni ostaju u šipki i spajaju se s vodom i kisikom u betonu), što dovodi do stvaranja hrđe. Cijeli proces prikazan je na slici 18. [6].



Slika 18.: Proces korozije (Izvor: [19])

Korozija armature je vodeći uzrok propadanja betona (slika 19.). Korozija šipke stvara hrđu oko šipke, čime se povećava volumen čelika, što dovodi do zateznih naprezanja u betonu, što može dovesti do pucanja, ljuštenja i delaminacije zaštitnog sloja betona. Propadanje zaštitnog sloja betona može imati fatalne posljedice. Interakcija između čelika i betona postaje nedovoljna, a hrđa može potpuno uništiti poprečni presjek čelične šipke, čime armatura više ne ojačava beton u naprezanju, što smanjuje čvrstoću i pouzdanost konstrukcije, te u konačnici može dovesti do sloma dijela ili čak cijele strukture. Sam beton pruža čeliku zaštitu od korozije s

tankim oksidnim slojem na čeliku koji sprječava otapanje metalnih atoma. Taj sloj smanjuje brzinu korozije na zanemarivu razinu (1000 puta nižu nego bez sloja). Međutim, korozija se događa kada se pasivirajući sloj uništi. Stoga je nužno smanjiti koroziju u betonu koja ovisi o karbonatizaciji. To se može postići postavljanjem betona bez pukotina, niske propusnosti i s dovoljnim slojem betona. Nedovoljan zaštitni sloj uz beton niske kvalitete utječe na trajnost konstrukcija do 45% [6].



Slika 19.: Uzroci propadanja betonskih konstrukcija (Izvor: [1])

Korozija armature također može biti pogođena klimatskim promjenama. Ubrzanje korozije može dovesti do prijevremenog sloma konstrukcija. Procjena učinaka klimatskih promjena nakon početka korozije ovisit će o specifičnim karakteristikama konstrukcije. Procjena se vrši na dvije AB grede podvrgnute cikličkom opterećenju te propadanju koje je izazvano prodorom klorida i klimatskim promjenama. Cikličko opterećenje bilo je modelirano nasumičnim opterećenjem kotača s prometnim frekvencijama koje su varirale između 20 i 200 ciklusa dnevno. Razmatralo se granično stanje nosivosti, pri čemu je došlo do sloma konstrukcije kada je otpornost postala manja od momenta savijanja s primijenjenim cikličkim opterećenjem [5].

Za modeliranje promjena temperature i relativne vlažnosti korišteni su stohastički procesi, uzimajući u obzir dva scenarija klimatskih promjena. Na primjer, jedan od scenarija uključuje intenzivnu uporabu fosilnih goriva, značajan porast stanovništva i nedostatak politika za promicanje čistih tehnologija. Uzeti su porasti od 6.5°C za temperaturu i 0.1 za relativnu vlažnost. Sedam slučajnih varijabli uzeto je u obzir kako bi se obradila nesigurnost povezana s prodorom klorida, prijenosom vlage i topline. Dvije dodatne varijable uključene su kako bi se uzela u obzir nesigurnost vezana uz otpornost betona i čelika [5].

U tablici 1. prikazani su prosjeci i koeficijenti varijacije vremena do sloma za različite prometne frekvencije, uvjete izloženosti i scenarije klimatskih promjena. U analizu su uključene dvije razine agresivnosti, pri čemu je svaka razina karakterizirana koncentracijom klorida iz okoline i brzinom korozije. Rezultati pokazuju da prosječno vrijeme do sloma opada u agresivnijim okruženjima i s većim frekvencijama prometa, što je očekivano jer veće koncentracije klorida, veće brzine korozije i frekvencije prometa dovode do kraćeg vremena do sloma [5].

Tablica 1.: Srednja vrijednost (u godinama) i koeficijent varijacije (u zagradama) vremena do sloma AB grede

Prometna frekvencija (ciklusa/dan)	Visoka agresivnost		Niska agresivnost	
	Scenarij bez utjecaja	Najstroži scenarij (RCP 8.5)	Scenarij bez utjecaja	Najstroži scenarij (RCP 8.5)
50	54.1 (16%)	52.7 (15%)	159.3 (35%)	153.1 (36%)
500	36.4 (22%)	35.1 (22%)	105.8 (41%)	99.4 (42%)
1000	33.8 (23%)	32.6 (22%)	99.3 (41%)	92.5 (42%)
2000	32.3 (24%)	30.8 (23%)	93.2 (40%)	86.7 (40%)

Korozija stvara problem ne samo kod armiranobetonskih konstrukcija, već i kod čeličnih konstrukcija. Korozija čelika glavni je faktor za degradaciju stanja i nosivosti čeličnih rešetkastih konstrukcija. Ako se uzmu u obzir korozija na čeličnim komponentama uzrokovana klimatskim promjenama, propadanje stanja konstrukcije i degradacija kapaciteta će se ubrzati [6]. Faktori koji utječu na prodiranje korozije jesu: struktura čelika, homogenost površine, vrijeme vlažnosti površine čelika, kemijske karakteristike vode (temperatura, pH, otopljenost kisika, salinitet...), nutrijenti i mikroklimatski uvjeti [9].

Stvarni primjeri fatalnih posljedica uslijed korozije na čeličnim konstrukcijama su urušavanja mostova Mianus River (Connecticut) i Silver Bridge (Ohio). Urušavanje mosta Mianus River (slika 20.a) uzrokovano je lomom na dva sklopa s klinovima i vješalicama, kada je hrđa nastala unutar ležišta klina izazvala silu na vješalicu koja je bila iznad njezine nosivosti. Kolaps mosta Silver Bridge (slika 20.b) izazvala je mala pukotina formirana na ležištu, koja je narasla zbog unutarnje korozije. Ove katastrofe potvrđuju važnost budućeg razvoja zaštita od korozije čelika, kao što su uporaba nehrđajućeg čelika, pocinčanog čelika, vanjsko ojačanje već izgrađenih struktura, epoksidni premaz i drugi slični postupci [6].



Slika 20.: a) Kolaps mosta Mianus River (Izvor: [21]); b) Kolaps mosta Silver Bridge (Izvor: [22])

Dodatan faktor koji utječe na povećanje korozije metalnih konstrukcija je morsko okruženje. Do smanjenja trajnosti metalnih konstrukcija u morskom okruženju može doći uz sljedeća tri mehanizma: smanjenje pH vrijednosti morske vode, lokalitet korozije i strukturalna stabilnost. Ovo će se ponajviše odnositi na zidove pomorskih luka koji su načinjeni od metala te na luke koje imaju veliki socijalno-ekonomski značaj te igraju veliku ulogu u svijetu što se tiče trgovine i obrane [9]. U budućnosti bi pH vrijednost morske vode mogla pasti sa 8.1 na 7.7 što bi moglo dovesti do malih promjena što se tiče korozije [9].

2.3.5. Truljenje drva

Brzina truljenja drva specifična je za lokaciju i ovisi o uvjetima izloženosti (iznad i ispod tla), klimatskim uvjetima (temperatura, oborine, vlažnost), vrsti drva, početnom stupnju zaštite sredstvima, napadu gljivica itd. Glavni klimatski parametri koji utječu na truljenje drva su vlažnost i temperatura. Izloženost drva vlažnom okruženju povećava njegovu vlažnost i tako pruža pogodno okruženje za razvoj gljivica [5]. Za razvoj gljivica moraju biti zadovoljena četiri uvjeta: drvo mora osiguravati hranu, prisutnost kisika, vlažnost veća od 20% i odgovarajuća temperatura (20-30°C) [16]. Rast gljivica koje uzrokuju truljenje također ovisi o temperaturi zraka i drva. Stoga je jasno da će dugoročna strukturalna otpornost drva biti pogođena budućim klimatskim varijacijama [5].

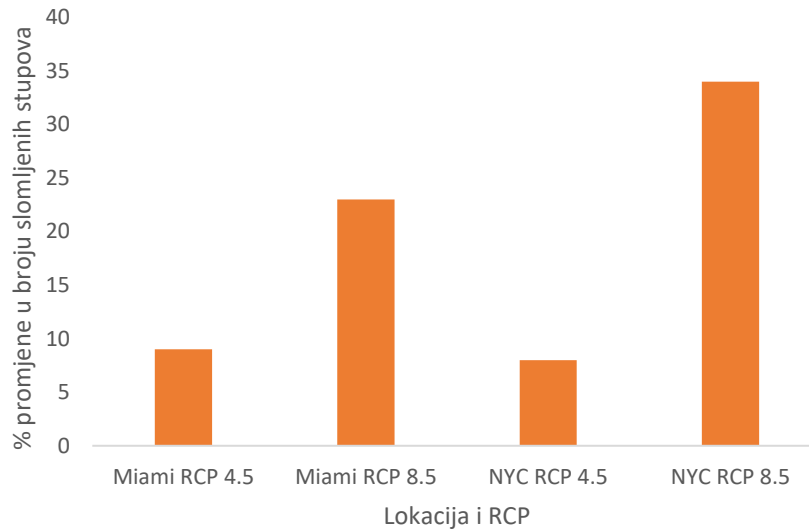


Slika 21.: Truljenje drva (Izvor: [9])

Oštećenje drvenih konstrukcija tijekom vremena uključeno je u prethodna istraživanja. Modeli truljenja temelje se na mjerenjima na terenu ili u laboratoriju i izvještavaju o rezultatima za specifične vrste drva i klimatske uvjete. Jedan od postojećih modela je funkcija vrste drva, srednje godišnje količine oborina (uključujući broj sušnih mjeseci u godini) i srednje godišnje temperature. Ovaj model korišten je za procjenu učinaka truljenja na strukturnu sposobnost drvenih stupaca za električne vodove, uzimajući u obzir učinke degradacije [5].

Drvo je odabrani materijal za podršku električnim vodovima širom svijeta. Drveni stupci su preferirani u odnosu na druge materijale zbog njihove relativno niske cijene, lakoće i jednostavnosti transporta, lakoće podizanja i neprovodljivosti, što ih čini sigurnijima za radnike. Međutim, drveni stupci su skloni truljenju, koje obično nastaje na ili neposredno ispod razine tla. Očekuje se da će brzina truljenja drvenih stupaca biti pogođena klimatskim promjenama, što može povećati brzinu truljenja. Takvo povećanje zahtijevat će od komunalnih tvrtki veća ulaganja u periodičke inspekcije i zamjenu stupaca [5].

Napravljeno je istraživanje o utjecaju klimatskih promjena na drvene stupove na dvije lokacije u SAD-u: Miamiu i New York Cityju. Ova dva grada odgovaraju različitim vrstama klime. Miami ima tropsku monsunsku klimu s vrućim i vlažnim ljetima te kratkim i toplim zimama. New York City ima vlažnu subtropsku klimu, s hladnim zimama i vrućim, vlažnim ljetima. Prema scenariju RCP8.5, očekuje se da će stope truljenja porasti za oko 9% u Miamiu i 17% u NYC-u u usporedbi s godinom 2005. do kraja 21. stoljeća. Veći porast brzine truljenja u NYC-u može se pripisati projekciji većeg povećanja oborina. Slika 22. pokazuje kako će povećano truljenje drvenih stupova zbog klimatskih promjena povećati broj stupova koji će se slomiti zbog ekstremnih vjetrova na te dvije lokacije na kraju 21. stoljeća [5].



Slika 22.: Utjecaj klimatskih promjena na broj slomljenih stupova (Izvor: [5])

2.4. Prilagodba i projekcija klimatskih promjena u Hrvatskoj [1]

Među tri najosjetljivije države članice EU, s najvećim udjelom šteta od ekstremnih vremenskih i klimatskih događaja u odnosu na BNP, nalazi se Republika Hrvatska. Hrvatska je potpisala Okvirnu konvenciju Ujedinjenih naroda o promjeni klime (*UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change*) te je kao takva dužna podnositi izvješća o prilagodbi klimatskim promjenama. Na sjednici, 7. travnja 2020. godine Hrvatski sabor donio je Strategiju prilagodbe klimatskim promjenama u Hrvatskoj za razdoblje do 2040. s pogledom na 2070. godinu.

Strategiju su izradili stručnjaci u raznim područjima (klimatskog modeliranja, poljoprivrede, turizma, bioraznolikosti, graditeljstva...), a sastoji se od 80 mjera za 10 sektora te 3 opće mjere visoke važnosti. U tablici 2. izdvojene su mjere po sektorima za koje su mjerodavne institucije Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine (MPGI), Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture (MMPI) ili sveučilišta (S), a relevantne su za cjelokupnu infrastrukturu odnosno područje graditeljstva. Cilj Strategije prilagodbe je poboljšanje otpornosti građevina i sposobnosti oporavka od utjecaja klimatskih promjena.

Strategija sugerira gradnju i sanaciju hidrotehničkih objekata i sustava zaštite od štetnog djelovanja vode, izgradnju „zelene infrastrukture“, provedbu antierozivnih mjera pri obradi tla itd. Navedene su neke od konstrukcijskih mjera Strategije prilagodbe koje čine njen manji dio, veći dio čine općenite prilagodbe čiji je cilj osvijestiti i proširiti znanja o klimatskim promjenama. Prilagodba je dug i neizvjestan proces stoga treba voditi brigu o osvješćivanju, istraživanju i stvaranju dobrih podloga kako bi se pravovremeno poduzele adekvatne mjere.

U Strategiji prilagodbe za Republiku Hrvatsku nisu sudjelovali građevinski inženjeri zbog toga oni sustavno moraju razmišljati kako doskočiti problemu utjecaja klimatskih promjena na

građevine. Model RegCM4 korišten je za simulaciju klimatskih promjena tijekom izrade Strategije prilagodbe. Klima od 1971. do 2000. godine čini referentno razdoblje označeno P0, u odnosu na koje su razmatrana dva vremenska razdoblja P1 i P2. P1 je razdoblje neposredne budućnosti od 2011. do 2040. godine, dok je P2 klima sredine 21. stoljeća u razdoblju od 2041. do 2070. Također razmatraju se dva klimatska scenarija, RCP 4.5 i RCP 8.5. RCP 8.5 predstavlja najgori scenarij u kojem se predviđa kontinuirano povećanje koncentracije stakleničkih plinova bez poduzimanja značajnih mjera smanjenja i prilagodbe, dok RCP 4.5 predstavlja nešto blaži scenarij u kojem se predviđa rast koncentracije stakleničkih plinova do 2040. godine, a potom smanjenje uz poduzimanje mjera smanjenja i prilagodbe.

Tablica 2 .: Mjere strategije RH za prilagodbu klimatskim promjenama relevantne za graditeljstvo (Izvor: [1])

Oznaka mjere		Naziv mjere	Mjerodavne institucije		
			MPGI	MMPI	S
Vodni resursi	HM-01	Provedba nestrukturnih mjera zaštite od štetnog djelovanja voda i zaštite voda pri pojavama ekstremnih hidroloških prilika čije je povećanje intenziteta i učestalosti pojave uvjetovano klimatskim promjenama			
	HM-03	Jačanje stručnih, istraživačkih i upravljačkih kapaciteta za ocjenu pojavnosti i rizika negativnih utjecaja klimatskih promjena i prilagodbu slatkovodnih i morskih vodnih sustava u postojećim i budućim klimatskim prilikama	✓		✓
	HM-04	Jačanje kapaciteta nadležnih institucija za djelovanje pri pojavama ekstremnih hidroloških prilika	✓		
	HM-05	Smanjenje štetnih posljedica na obalnu vodno-komunalnu infrastrukturu i priobalne vodne resurse uzrokovane podizanjem razine mora zbog klimatskih promjena (nestrukturane mjere)	✓	✓	
	HM-06	Jačanje otpornosti urbanih područja na antropogene pritiske uvjetovane klimatskim promjenama	✓		
Bio-raznolikost	B-07	Unaprjeđenje održivog upravljanja i smanjenje antropogenog utjecaja na (do)prirodne ekosustave, staništa i divlje vrste ponajprije mjerama održivog razvoja primjenom rješenja temeljenih na prirodi	✓		
Energetika	E-03	Jačanje otpornosti postojećih kapaciteta za proizvodnju električne i toplinske energije	✓		
Turizam	T-04	Jačanje otpornosti turističke infrastrukture na različite vremenske ekstreme	✓	✓	✓
Zdravlje	ZD-06	Povećanje broja sigurnih točaka u slučaju ekstremnih meteoroloških uvjeta	✓		
	ZD-07	Jačanje sustava praćenja alergeni vrsta		✓	✓
Prostorno planiranje i uređenje	PP-01	Jačanje baza znanja i ustava praćenja i ocjenjivanja	✓		✓
	PP-02	Jačanje stručnih i institucionalnih kapaciteta stručnih dionika u sustavu prostornog uređenja i planiranja	✓		✓
	PP-03	Integracija mjera prilagodbe u sustav prostornog uređenja i planiranja	✓		✓
	PP-04	Jačanje osviještenosti i senzibiliziranje javnosti i donositelja odluka na svim razinama	✓		✓
	PP-05	Priprema programa i projekata sanacije	✓	✓	✓

Upravljanje rizicima	UR-02	Multisektorska i sektorska procjena rizika za različite scenarije prijetnji/rizika povezanih s klimatskim promjenama	✓	✓	✓
Opće mjere	KM-01	Jačanje stručnih i tehničkih kapaciteta za provedbu istraživačkih i primijenjenih, kao i operativnih aktivnosti, koje uključuju područje klimatskog modeliranja i prediktivnih tehnologija za predviđanje vremenskih i okolišnih uvjeta i povezanih upozorenja na opasne uvjete, te analize i interpretacije opaženih i očekivanih klimatskih promjena i njima uzrokovanih opasnih vremenskih pojava		✓	✓
	OM-01	Povećanje razine znanja i kapaciteta za praćenje utjecaja klimatskih promjena, procjene rizika i prilagodbe klimatskim promjenama			✓
	RP-01	Razvoj pokazatelja učinaka provedbe strategija prilagodbe			✓

Za blaži scenarij predviđa se manji porast količine oborina tijekom zime i proljeća, a smanjenje tijekom ljeta i jeseni sukladno s povećanjem sušnih razdoblja. Očekuje se porast maksimalne temperature zraka i do 2.3°C do 2070. godine. Doći će do smanjenja maksimalne brzine vjetera i vlažnosti tla, a povećat će se evapotranspiracija. U Gorskom kotaru doći će do smanjenja snijega za oko 50% referentne vrijednosti. Procjene porasta razine mora nisu rađene uz model RegCM4, one su vrlo neizvjesne, a iznose 19 do 33 cm uz RCP 4.5 i 22 do 38 cm uz RCP 8.5 do sredine 21. stoljeća. Tablica 3. prikazuje detaljnije projekcije klimatskih parametara za RH prema scenariju RCP 4.5 s utjecajima pojedinih klimatskih promjena na infrastrukturu, osobito mostove.

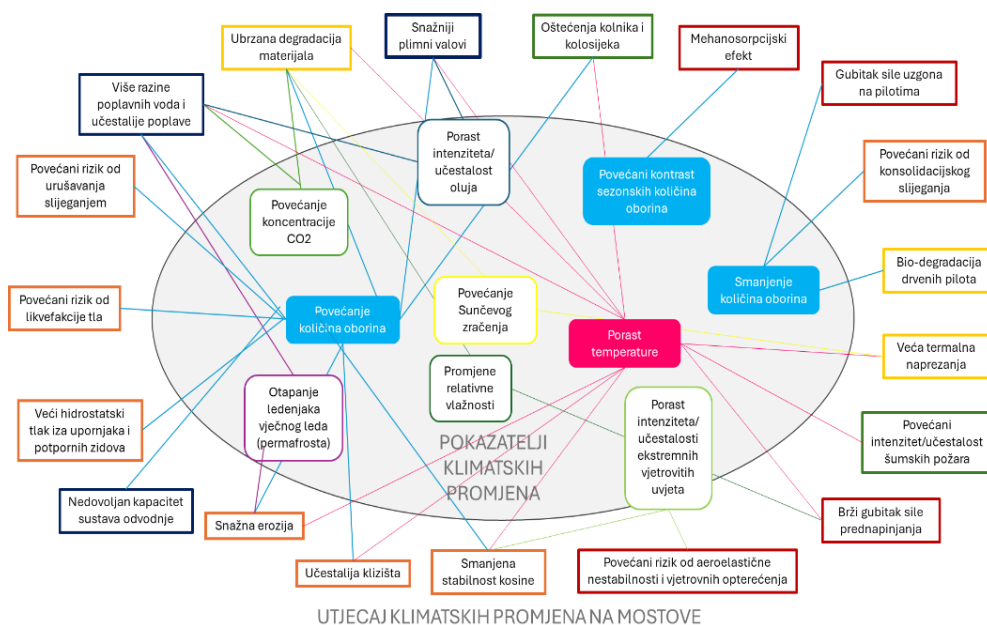
Tablica 3.: Projekcije klimatskih parametara za RH prema scenariju RCP 4.5 u odnosu na razdoblje 1971. – 2000. (Izvor: [1])

Klimatološki parametar	Projekcije buduće klime prema scenariju RCP 4.5 u odnosu na razdoblje 1971.-2000. godine dobivene klimatskim modeliranjem		Mogući utjecaj na infrastrukturu
	2011.-2040.	2041.-2070.	
Oborine	Malo smanjenje srednje godišnje količine (osim manji porast u sjeverozapadnoj Hrvatskoj)	Daljnji trend smanjenja srednje godišnje količine (do 5%), osim u sjeverozapadnim dijelovima RH	<p><u>Smanjenje količine oborina:</u> gubitak sile uzgona na pilotima, bio-degradacija drvenih pilota, veći rizik od konsolidacijskog slijeganja</p> <p><u>Povećani kontrast sezonskih količina oborina:</u> Mehanosorpcijski efekt</p> <p><u>Povećanje količina oborina:</u> više razine poplavnih voda i učestalije poplave, povećani rizik od likvefakcije tla urušavanja slijeganjem, veći hidrostatički tlak iza upornjaka i potpornih zidova, nedovoljan kapacitet sustava odvodnje, snažnija erozija i plimni valovi, učestalija klizišta, oštećenja kolnika/željeznica, ubrzana degradacija materijala, manja stabilnost kosine</p>
	Sezonska ukupna količina: zima i proljeće u većini Hrvatske manji porast (5-10%), ljeto i jesen smanjenje (najviše 5-10% u južnoj Lici i sjevernoj Dalmaciji)	Sezonska ukupna količina: do 10% smanjenja (gorje i sjeverna Dalmacija) osim zimi (povećanje 5 do 10% sjeverna Hrvatska)	
	Smanjenje broja kišnih razdoblja (osim u središnjoj Hrvatskoj manji porast). Povećanje sušnog razdoblja.	Povećanje sušnog razdoblja.	

Površinsko otjecanje	Bez većih promjena osim u gorju i zaleđu Dalmacije smanjenje do 10%	Smanjenje otjecanja u cijeloj Hrvatskoj (osobito u proljeće)	Gubitak sile uzgona na pilotima, biodegradacija drvenih pilota, veći rizik od konsolidacijskog slijeganja	
Evapotranspiracija	Povećanje u proljeće i ljeti 5-10% (vanjski otoci i zapadna Istra > 10%)	Povećanje do 10% za veći dio Hrvatske te do 15% na obali i zaleđu i do 20% na vanjskim otocima	Gubitak sile uzgona na pilotima, biodegradacija drvenih pilota, veći rizik od konsolidacijskog slijeganja	
Temperatura zraka	Srednja: porast 1-1.4°C (sve sezone, cijela Hrvatska)	Srednja: porast 1.5-2.2°C (sve sezone, cijela Hrvatska – naročito kontinent)	Veća termalna naprezanja, povećani intenzitet/učestalost šumskih požara, brži gubitak sile prednapinjanja, smanjena stabilnost kosine, učestalija klizišta, snažnija erozija i plimni valovi, više razine poplavnih voda i učestalije poplave, ubrzana degradacija materijala, oštećenja kolnika i željeznica	
	Maksimalna: porast u svim sezonama 1-1.5°C	Maksimalna: porast do 2.2°C u ljetu (do 2.3°C na otocima)		
	Minimalna: najveći porast zimi 1.2-1.4°C	Minimalna: najveći porast na kontinentu zimi 2.1-2.4°C, a 1.8-2°C primorski krajevi		
Sunčevo zračenje	Ljeto i jesen porast, proljeće porast u sjevernoj, a smanjenje u zapadnoj Hrvatskoj; zimi smanjenje u cijeloj Hrvatskoj	Porast u svim sezonama osim zimi (najveći porast u gorskoj i središnjoj Hrvatskoj)	Veća termalna naprezanja, ubrzana degradacija materijala	
Snježni pokrov	Smanjenje (najveće u Gorskom kotaru, do 50%)	Daljnje smanjenje (naročito planinski krajevi)	Snažnija erozija, više razine poplavnih voda i učestalije poplave	
Vlažnost zraka	Porast cijele godine (najviše ljeti na Jadranu)	Porast cijele godine (najviše ljeti na Jadranu)	Brži gubitak sile prednapinjanja, ubrzana degradacija materijala	
Vlažnost tla	Smanjenje u sjevernoj Hrvatskoj	Smanjenje u cijeloj Hrvatskoj (najviše ljeti i ujesen)	Gubitak sile uzgona na pilotima, biodegradacija drvenih pilota, veći rizik od konsolidacijskog slijeganja, mehanosorpcijski efekt	
Ekstremni vremenski uvjeti	Dani s Tmax > +30°C	Povećanje od 6 do 8 dana (referentno razdoblje: 15-25 dana godišnje)	Veća termalna naprezanja, povećani intenzitet/učestalost šumskih požara, brži gubitak sile prednapinjanja, ubrzana degradacija materijala, oštećenja kolnika i željeznica	
	Dani s Tmin < -10°C	Daljnje smanjenje i porast Tmin vrijednosti (1.2-1.4°C)		Daljnje smanjenje
	Noći s Tmin ≥ +20°C	U porastu		U porastu
Vjetar	Srednja brzina na 10 m	Ljeti i ujesen na Jadranu porast do 20-25%	Zima i proljeće uglavnom bez promjene, no trend jačanja ljeti i ujesen na Jadranu	Smanjena stabilnost kosine. Povećani rizik od aeroelastične nestabilnosti i vjetrovnih opterećenja
	Maks. Brzina na 10 m	Smanjenje zimi na južnom Jadranu i zaleđu Dalmacije	Smanjenje sve sezone osim ljeti. Najveće smanjenje zimi na južnom Jadranu	
Srednja razina mora	2046.-2065.: 19-33 cm (IPCC AR5)	2081.-2100.: 32-65 cm	Degradacija materijala (korozija armiranobetonskih i čeličnih)	

			konstrukcija), snažnija erozija i plimni valovi, više razine poplavnih voda i učestalije poplave
--	--	--	--

Klimatske promjene će uzrokovati učestalija i intenzivnija oštećenja na konstrukciju. Utjecat će na djelovanja na konstrukciju, svojstva materijala, uporabivost i sigurnost konstrukcije. Slika 23. prikazuje uzročnike utjecaja i utjecaje klimatskih promjena na mostove. Najveći utjecaj na konstrukcije imaju promjene u intenzitetu i količini oborina te promjene temperature. Promjene oborina rezultiraju sve učestalijim poplavama, degradacijom materijala, nedovoljnim kapacitetom sustava odvodnje i oštećenjima kolnika i željeznica. Poplave za posljedicu imaju sve veći rizik od urušavanja. Do urušavanja može doći zbog podlokavanja stupova uslijed aktiviranja klizišta, erozije i likvefakcije tla. S obzirom da ih se većina nalazi u blizini ili iznad vode, najčešći uzroci njihova urušavanja su podlokavanje i erozija. U budućnosti se predviđa povećanje rizika od podlokavanja mostova stoga je potrebna integracija sustava ranog upozoravanja na poplave i upravljanje infrastrukturom te uključivanje hidrauličke komponente u preglede mostova. Pri proračunu nosivosti mosta, norme za projektiranje primjenjuju širok raspon temperaturnog opterećenja stoga stabilnost mosta neće biti ugrožena, ali povećanje temperature bi moglo ugroziti trajnost i uporabivost infrastrukture. Jedan od primjera je izvijanje tračnica uslijed visokih temperatura. Utjecaj može biti vidljiv i kod dinamike građenja čeličnih mostova, kod raspucavanja betona betonskih mostova i smanjenje sile prednapinjanja kod sve učestalijih prednapetih mostova. Smanjenje sile prednapinjanja može biti i do 50%, a vezano je uz skupljanje i puzanje betona koje je pod utjecajem uvjeta okoliša.



Slika 23.: Utjecaj klimatskih promjena na mostove (Izvor: [1])

3. UGLJIČNI OTISAK GRAĐEVINA

Problemi klimatskih promjena, a posebno emisije ugljika, nedavno su postali značajniji i za javnost i za inženjersku struku. Jedno od ključnih pitanja u ograničavanju klimatskih promjena je potreba smanjenja trenutnih emisija ugljičnog dioksida. Kako bismo ograničili i smanjili emisije ugljika, moramo razumjeti gdje i koliko ga trenutno koristimo [23].

Zrak, voda i tlo zagađeni su ispuštanjem štetnih tvari koje nepovoljno djeluju na okoliš i ljudsko zdravlje, a rezultat su građevinske industrije [24]. Izgradnja i korištenje zgrada značajan su doprinositelj emisija CO₂-ekvivalenta, s gotovo četvrtinom ukupnih emisija CO₂-ekvivalenta koje se pripisuju potrošnji energije u zgradama. Zgrade čine više od 40% potrošnje energije u Europskoj uniji, pri čemu stambeni objekti predstavljaju 63% ukupne potrošnje energije. Ta potrošnja energije značajno pridonosi globalnom zagrijavanju planeta. U novije vrijeme građevinska industrija nastoji smanjiti svoj štetni utjecaj na okoliš. Povećanje energetske učinkovitosti zgrada igra ključnu ulogu u smanjenju ukupne potrošnje energije i emisija CO₂ povezanih s energijom. Emisije CO₂ prisutne su u svim fazama životnog ciklusa zgrada stoga se mogu razmatrati kao međusobno povezane, a uključuju izgradnju, korištenje i rušenje [25].

Autoceste, željeznice i mostovi također emitiraju velike količine ugljika. Mostovi su građevine s karakteristikama visoke potrošnje energije, visokih emisija ugljika i velike potrošnje resursa tijekom cijelog životnog ciklusa, te su jedan od najkapitalnijih ugljično intenzivnih elemenata prometne infrastrukture [26]. Mostovi i vijadukti imaju relativno visoki intenzitet emisija ugljika u usporedbi s prosječnom cestom ili željeznicom po kilometru. Stoga, mostovi koji su prikladno projektirani mogu pomoći u smanjenju emisija ugljika projekta [23]. U posljednjem desetljeću prosječna godišnja stopa izgradnje cestovnih mostova u Kini iznosila je 27.000 godišnje. Do kraja 2021. godine bilo je 961.100 cestovnih mostova širom zemlje, što je povećanje od 48.300 u odnosu na kraj prethodne godine. Stoga, izgradnja mostova u Kini ubrzano napreduje. Istovremeno, potrošnja energije brzo raste, emisije stakleničkih plinova naglo se povećavaju, a razmjeri projekata izgradnje mostova nanose veliku štetu okolišu [26].

Proizvodnja, transport i ugradnja materijala aktivnosti su početne faze izgradnje svih građevina, stoga nikako ne smijemo zanemariti njihove emisije ugljika. Na primjer, cementna industrija je odgovorna za oko 8% globalnih emisija CO₂. Otprilike 45% emisija cementa uzrokovano je potrebom za toplinom i električnom energijom tijekom njegove proizvodnje (sušenje, pečenje...), a 55% je uzrokovano kemijskim procesom dobivanja kalcijevog oksida, važnog za proizvodnju cementnog klinkera [24]. Emisija ugljičnog dioksida tijekom izvedbe mosta značajno ovisi o načinu transporta materijala i predgotovljenih elemenata do mjesta ugradnje. Lokacija izgradnje mosta može biti udaljenija od uobičajenih građevinskih objekata. Kao rezultat toga, treba uzeti u obzir transport do lokacije i povratno putovanje bez tereta [7]. Transport na gradilištu također može zahtijevati izgradnju prometnica, nasipa i privremenih mostova, što sve doprinosi ugljičnom otisku. Za konstrukcije iznad autocesta i željeznica, mogu

se pojaviti dodatne emisije ugljika zbog ometanja i preusmjerenja prometa tijekom gradnje, osobito ako je potrebno srušiti postojeće konstrukcije ili dijelove građevina kao dio radova [23].

Kako bi se kvantificirale emisije ugljika primjenjuje se tzv. ugljični otisak (Carbon Footprint). Ugljični otisak mjeri se ukupne emisije stakleničkih plinova koju izravno ili neizravno uzrokuje neka osoba, proizvod, tvrtka ili događaj. Plinovi uključeni u ugljični otisak su: ugljikov dioksid, metan, dušikov oksid te fluorirani plinovi, a najvažniji od njih je CO₂. Ugljikov otisak mjeri se u tonama ugljikov dioksid ekvivalenta (tCO₂e). Koncept ugljikov dioksid ekvivalenta (CO₂e) omogućuje usporedbu klimatskih utjecaja koncentracija različitih stakleničkih plinova u odnosu na jednu jedinicu CO₂. Ugljikov dioksid ekvivalent se izračunava množenjem emisija svakoga od navedenih stakleničkih plinova s njegovim 100-godišnjim potencijalom globalnog zagrijavanja [7].

Ugljični otisak može se izračunati na razini države, grada, pojedinca, tvrtke ili proizvoda [24]. Nadalje u ovom radu, bavit ćemo se izračunom ugljičnog otiska na razini građevina, fokusirajući se na mostove i zgrade te navesti razlike među njima.

3.1. Razlika između zgrada i mostova

Organizacije se udružuju, ujedinjuju resurse te izmjenjuju ideje. Na taj način njihov utjecaj na smanjenje klimatskih promjena mnogo više dolazi do izražaja. Jedna od takvih zajednica je Net Zero Bridges Group. Net Zero Bridges Group je udruženje inženjera mostova u Ujedinjenom Kraljevstvu i Irskoj osnovano u kolovozu 2021. godine. Glavni cilj grupe je napraviti što vidljiviji pomak u smanjenju klimatskih promjena u pogledu mostova, razmijeniti znanja i ideje te uspostaviti najbolju praksu za postizanje tog pomaka. Tablica 4. prikazuje deset razlika između mostova i zgrada koje daju odgovor na pitanje zašto je organizacija usmjerena samo na mostove isplativa [7].

Iako se obnove i prenamjene sve češće primjenjuju u zgradarstvu, kada je potrebno ispuniti neke nove zahtjeve, zgrade se obično grade od nule. Kod mostova je važno dekarbonizaciju usmjeriti na produljenje uporabnog vijeka već postojećih, održavanih mostova, a ne izgradnju novih, zamjenskih. Mostovi su dio prometne infrastrukture. Stoga, postoje alternative pružanja mosta, a to su nasip, usjek, tunel ili potpuno skrenuti transportni put. Time se otvara potencijal za značajne uštede u ranim fazama projektiranja u kojima se mogu istražiti razna alternativna rješenja. Kod potrebe za zgradom rijetko postoji alternativa njene lokacije, gradi se tamo gdje je potrebna. Uobičajeno je projektirati mostove s dugim uporabnim vijekom (100 godina) zato je njihove emisije ugljika na kraju životnog vijeka teško kvantificirati jer su daleko u budućnosti. Nasuprot tome, zgrade su obično projektirane na 50 ili 60 godina. Emisije ugljika u svim fazama životnog ciklusa zgrade vjerojatno će se vidjeti unutar jedne generacije. Iako je ugljični otisak cijelog uporabnog vijeka važan, hitna klimatska situacija zahtijeva primarni fokus na smanjenje ugljika sada kako ne bi došlo do stvaranja problema za budućnost. Industrijski i građevinski procesi se sve više dekarboniziraju, stoga je opravdano očekivati da će odgađanje zamjene što je duže moguće smanjiti povezane emisije ugljika. Utjecaj klimatskih promjena bit će vidljiv na

čitavoj infrastrukturi i zahtijevat će povećanu otpornost na sve jači utjecaj ekstremnih događaja. Ovo je često značajnije za mostove koji će biti izloženi ekstremnim opterećenjima okoliša (vjetar, strujanja, valovi, visoke temperature...). Vjerojatnost da će morati izdržati ekstremna opterećenja okoliša u zgradama projektiranim na 50 ili 60 godina je znatno manja od mosta projektiranog na 100 ili više godina. Strukturni elementi mostova obično su izloženi većem utjecaju okoliša nego elementi zgrada. Čelični mostovi podložni su potencijalno većoj emisiji ugljika zbog korozije ili zbog nanošenja i obnove zaštitnih slojeva. Za betonske mostove obično je potreban dodatni betonski sloj. Mostovi imaju visok udio ugljika (CapCarb⁴) kako bi se osiguralo da su zahtjevi izdržljivosti za dug životni vijek zadovoljeni. Zgrade imaju kraći životni vijek i njihov CapCarb koji se primjenjuje za rješavanje okolišnih uvjeta je niži. Oko 20% CapCarb-a u zgradama povezano je s fasadama i unutarnjim završnim obradama, nudeći tako priliku za uštede koje ne postoje kod mostova. Mostovi strukturno zahtijevaju više ukupnog materijala od zgrada. Neki materijali s niskim udjelom ugljika koji su lako primjenjivi u zgradama možda neće biti primjenjivi za mostove. Mnogo je primjera postizanja smanjenja ugljika putem optimizacije rasporeda zgrada, npr. kraći rasponi mogu dovesti do značajnih ušteda ugljika. Za mostove je optimizacija gotovo nemoguća jer su oni obično ograničeni preprekom koju treba premostiti. Dulji rasponi i veće konstrukcije dovode do povećanog opsega konstrukcije, temelja, građevinskih postrojenja itd. Veći građevinski radovi mogu značiti da su emisije modula A4/A5⁵ veće za mostove nego za zgrade. Za procjenu veličine tih emisija i sposobnosti da se na njih utječe, inženjeri moraju surađivati kako bi poboljšali svoje razumijevanje. Postojeća okvirna pravila i smjernice određene za zgrade mogu podcijeniti emisije u fazi izgradnje za infrastrukturne projekte uključujući mostove. Za zgrade OpCarb⁶ obično je veći od CapCarb-a (iako se ravnoteža mijenja tijekom vremena) i stoga ulaganje u CapCarb može rezultirati značajnim uštedama OpCarb-a. Na primjer, ako inženjer specificira dvoslojnu oblogu, energija grijanja i hlađenja (OpCarb) bit će manja za zgradu, ali to može zahtijevati više strukturnog materijala (CapCarb). To nije slučaj za mostove, na primjer razina rasvjete na kolniku ne ovisi o konstrukciji. Međutim, UseCarb⁷ kao što su emisije cestovnog prometa je značajan [28].

Dok je smanjenje UseCarb-a uvelike izvan kontrole inženjera, potencijal utjecaja na promjenu načina putovanja i vrijeme trajanja putovanja predstavlja mogućnosti za značajno smanjenje ugljika. Izdržljivije strukture vjerojatno će uštedjeti UseCarb zbog smanjenog održavanja i posljedično smanjene smetnje korisnicima prometne infrastrukture. CapCarb ušteda prvenstveno će se odnositi na izbjegavanje obnove ili zamjene imovine u budućnosti, a ne na smanjenje održavanja. Inženjeri mostova često imaju priliku ostvariti potencijalno značajne uštede ugljika u tim područjima. Kod zgrada nije takav slučaj, zamjenska zgrada može pružiti

⁴ Kapitalni ugljik izraz je koji koristi PAS 2080 za opisivanje stakleničkih plinova povezanih sa stvaranjem, obnavljanjem i tretmanom imovine na kraju životnog vijeka.

⁵ Emisije modula A su emisije stakleničkih plinova povezane s proizvodnjom i gradnjom.

⁶ Operativni ugljik izraz je koji koristi PAS 2080 za opisivanje emisija stakleničkih plinova povezanih s radom infrastrukture potrebne za rad i pružanjem usluga.

⁷ Korisnički ugljik izraz je koji koristi PAS 2080 za opisivanje emisija stakleničkih plinova povezanih s korištenjem infrastrukture od strane korisnika i usluge koju ona pruža tijekom rada.

veliko poboljšanje OpCarb-a u usporedbi sa starom zgradom, tako da mogu postojati jaki argumenti za zamjenu. Želja klijenta da isproba nešto novo ili bude inovativan kako bi smanjio emisije ugljika je ključna. Različiti klijenti imaju će različite apetite i pristupe. Investicijski orijentirane organizacije u privatnom vlasništvu koje žele izgraditi nove urede mogle bi biti spremne uložiti u novu tehnologiju ili materijale. Vjerojatnije je da investitori javnih institucija neće uopće ili će nevoljko učiniti isto jer će dugo živjeti s posljedicama pogreške. Oni često rješavaju ovaj rizik strožom primjenom tehničkih propisa u praksi i mogu zahtijevati jače argumente za prijedloge koji nisu u skladu s postojećim standardima, postupcima i specifikacijama [28].

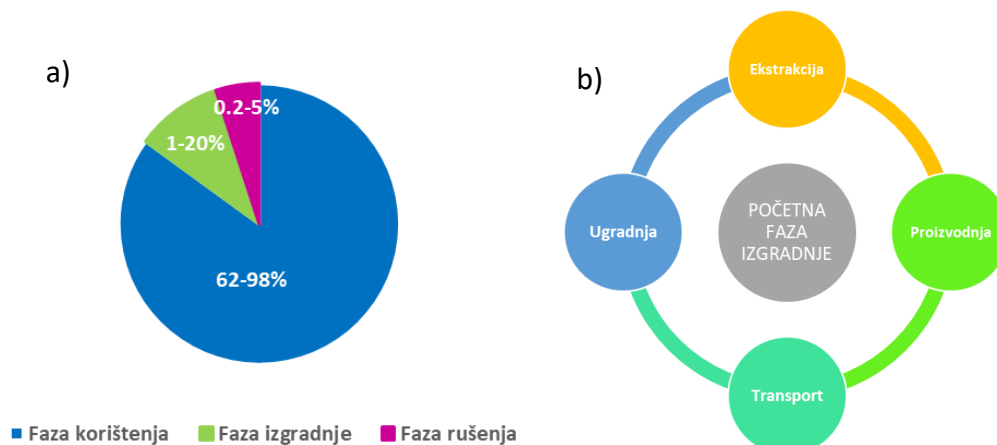
Tablica 4.: Razlike između mostova i zgrada

MOSTOVI	ZGRADE
Zahtjevi za novogradnju	
Dekarbonizacija se usmjerava na produljenje uporabnog vijeka već postojećih mostova.	Gradnja od nule u slučaju novih zahtjeva.
Alternative	
Postoje alternative pružanja, a to su nasip, usjek, tunel ili potpuno skrenuti transportni put. Time se otvara potencijal za značajne uštede u ranim fazama projektiranja u kojima se mogu istražiti razna alternativna rješenja.	Rijetko postoji alternativa njenog pružanja, gradi se tamo gdje je potrebna.
Projektiranje	
Projektiranje s dugim uporabnim vijekom (100 godina) zato je njihove emisije ugljika na kraju životnog vijeka teško kvantificirati jer su daleko u budućnosti. Iako je ugljični otisak cijelog uporabnog vijeka važan, hitna klimatska situacija zahtijeva primarni fokus na smanjenje ugljika sada kako ne bi došlo do stvaranja problema za budućnost.	Projektiranje na 50 ili 60 godina. Emisije ugljika u svim fazama životnog ciklusa vjerojatno će se vidjeti unutar jedne generacije.
Elastičnost	
Izloženi ekstremnim opterećenjima okoliša (vjetar, strujanja, valovi, visoke temperature...), stoga se zahtijeva povećana otpornost na sve jači utjecaj ekstremnih događanja.	Izdržavanja ekstremnih opterećenja okoliša znatno manja.
Robusnost	
Imaju visok udio ugljika (CapCarb) kako bi se osiguralo da su zahtjevi robusnosti za dug životni vijek zadovoljeni. Zahtijevaju više ukupnog materijala i neki materijali s niskim udjelom ugljika koji su lako primjenjivi u zgradama možda neće biti primjenjivi za mostove.	Imaju kraći životni vijek i njihov CapCarb koji se primjenjuje za rješavanje okolišnih uvjeta je niži. Oko 20% CapCarb-a povezano je s fasadama i unutarnjim završnim obradama, nudeći tako priliku za uštede koje ne postoje kod mostova.
Mogućnosti smanjenja ugljika	
Optimizacija gotovo nemoguća jer su obično ograničeni preprekom koju treba premostiti.	Optimizacija rasporeda doprinosi smanjenju ugljika, npr. kraći rasponi mogu dovesti do značajnih ušteda ugljika.

Izgradnja	
Dulji rasponi i veće konstrukcije dovode do povećanog opsega konstrukcije, temelja, građevinskih postrojenja itd. Veći građevinski radovi mogu značiti veće emisije ugljika.	Kraći rasponi i manje konstrukcije dovode do manjeg opsega konstrukcije, temelja, građevinskih postrojenja itd. Manji građevinski radovi mogu značiti manje emisije ugljika.
Kapitalni ugljik vs operativni ugljik	
CapCarb je veći od OpCarb-a, ali UseCarb (emisije cestovnog prometa) najznačajniji.	OpCarb obično je veći od CapCarb-a i stoga ulaganje u CapCarb može rezultirati značajnim uštedama OpCarb-a.
Održavanje i upravljanje	
Ušteda UseCarb-a zbog smanjenog održavanja i posljedično smanjene smetnje korisnicima prometne infrastrukture. CapCarb ušteda uključuje izbjegavanje obnove ili zamjene u budućnosti, a ne smanjenje održavanja. Značajne uštede ugljika u tim područjima.	Zamjenska zgrada može pružiti veliko poboljšanje OpCarb-a u usporedbi sa starom zgradom, tako da mogu postojati jaki argumenti za zamjenu.
Aspiracije kupaca	
Želja klijenta da isproba nešto novo ili bude inovativan kako bi smanjio emisije ugljika je ključna. No javne institucije nevoljko žele odobriti novitete zbog odgovornosti.	Želja klijenta da isproba nešto novo ili bude inovativan kako bi smanjio emisije ugljika je ključna. No javne institucije nevoljko žele odobriti novitete zbog odgovornosti.

3.2. Zgrade

Napravljeno je istraživanje ukupne potrošnje energije za obiteljske kuće izgrađene u Švedskoj [25]. Pokazano je da je 85% ukupne potrošnje energije potrebno tijekom faze korištenja (UseCarb), dok energija korištena za proizvodnju građevinskih materijala, njihovu ugradnju i renovaciju (CapCarb) čini otprilike 15% ukupne potrošnje energije. Prema nekoliko studija, faza korištenja ima najveći utjecaj na okoliš, predstavljajući oko 62-98% ukupnog utjecaja tijekom životnog ciklusa, dok faza izgradnje doprinosi s ukupno 1-20%, a faza rušenja samo s 0,2-5% (slika 24.a).

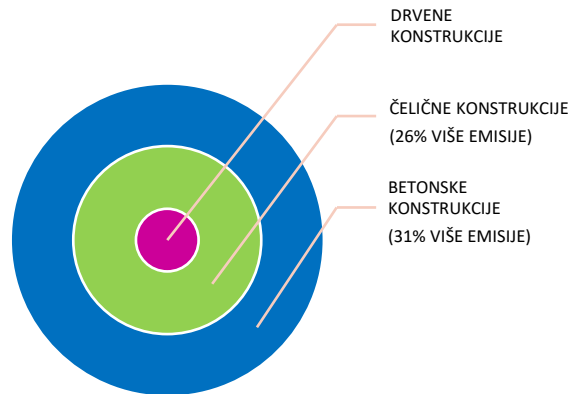


Slika 24.: a) Utjecaj faza životnog ciklusa građevina na okoliš; b) Početna faza izgradnje

Poboljšana energetska učinkovitost zgrada osigurava smanjenje operativne energije i povećava količinu ugrađene energije u ukupnoj količini energije korištene tijekom životnog ciklusa. No, ovo povećanje ugrađene energije zbog proizvodnje materijala, više je nego nadoknađeno većim smanjenjem energije tijekom faze korištenja zgrade, što rezultira značajnim uštedama energije u životnom ciklusu. Unatoč tome što energija korištena tijekom faze korištenja zgrade predstavlja većinu emisija CO₂-ekvivalenta u njezinom životnom ciklusu, postoji značajan ugljični utjecaj povezan s početnom fazom izgradnje (slika 24.b). Ekstrakcija, proizvodnja, transport i ugradnja materijala također, imaju veliki utjecaj na okoliš i emisiju ugljika. Studija u Hong Kongu pokazala je da 82-87% ukupnih emisija dolazi od ugrađenog CO₂-ekvivalenta konvencionalnih materijala, 6-8% od transporta, a 6-9% od potrošnje energije građevinskih strojeva [25].

Rezultati studije analize potrošnje energije tijekom životnog ciklusa stambenih i poslovnih zgrada pokazali su da su faze korištenja (80-90%) i faza izgradnje (10-20%) važni doprinositelji ukupnoj energetskoj potrošnji zgrada tijekom njihovog životnog ciklusa. Studija četiri tipične belgijske stambene zgrade pokazala je da ugrađena energija zgrada s propisanim energetske standardima odgovara 1/3 - 1/4 operativne potrošnje energije tijekom 30 godina korištenja. Samo kod zgrada s izuzetno niskom potrošnjom energije ugrađena energija dosegla je veću vrijednost od operativne energije tijekom 30 godina [25].

Izbor materijala može imati višestruke učinke na potrošnju energije i emisije u različitim fazama životnog ciklusa. Ti učinci mogu biti kontradiktorni, na primjer, svojstva poput visoke izolacijske vrijednosti mogu donijeti relativne uštede u operativnoj energiji uz povećanje ugrađene energije. Ravnoteža ovih čimbenika posebno je značajna jer fasada zgrade često čini najveći dio njene ugrađene energije. Biljni materijali poput drva imaju nisku ugrađenu energiju jer se sirovina proizvodi korištenjem solarne energije. Studija bilance stakleničkih plinova za zgrade od drva u usporedbi s betonskim zgradama iz perspektive životnog ciklusa pokazala je da je energija korištena za proizvodnju materijala za betonske zgrade bila 60-80% viša nego za drvene konstrukcije. Ugrađene emisije ugljika čeličnih konstrukcija bile su 26% više nego za kuće s drvenim okvirima, bez obzira na pohranjeni ugljik. Kada se uključi ugljik pohranjen u drvu za cijeli životni vijek kuće, razlika iznosi 120%. Emisije iz betonskih zidova bile su 31% više nego kod kuća s drvenim okvirima, a 156% više kada se uključi pohranjeni ugljik. Shematski prikaz emisija ugljika konstrukcija različitih materijala prikazuje slika 25. Stabla zadržavaju stabilnu razinu ugljika, dok se ugljik pohranjen u materijalima povećava svakom sječom, stvarajući rastuću zalihu ugljika koja se smanjuje samo kada materijali dosegnu kraj svog korisnog vijeka. Većina biljnih materijala u zgradama može trajati 80 godina ili više, a kumulativni ugljik pohranjen u tim materijalima predstavlja značajnu zalihu ugljika. Analiza pohranjenog ugljika i neto emisija iz alternativnih materijala na temelju analize životnog ciklusa važna je za učinkovite zelene građevinske standarde [25].

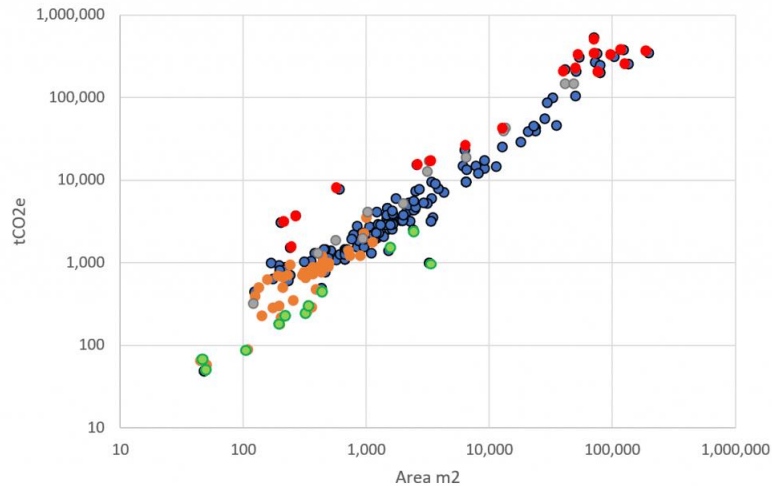


Slika 25.: Emisije ugljika konstrukcija različitih materijala

3.3. Mostovi

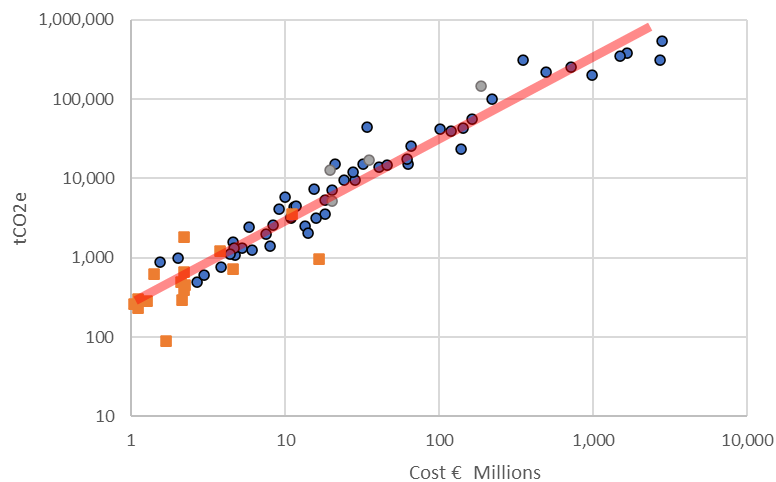
Proizvodnja čelika i cementa čini približno 8% svjetskih emisija ugljika. Zbog upotrebe čelika i cementa, mostovi i vijadukti zahtijevaju visoke razine unosa ugljika u usporedbi s drugim vrstama infrastrukture, kao što su ceste i željeznice [29].

Postoji korelacija između povećanih emisija ugljika i opće strukture mostova (duljina, raspon i površina). Mostovi variraju od pješačkih mostova širine 2 m do visećih mostova autoceste širine 50 m. Kako bi se eliminirao utjecaj različitih širina, najbolja metrika za analizu je površina mosta. Kao što je prikazano na slici 26., ugljični otisak mjeri se u tonama emisija ugljika. Podaci otkrivaju da 10 najvećih mostova čini nevjerojatnih 75% ukupnih emisija ugljika. To naglašava važnost veličina mostova u mjerenju emisije ugljika i kao takvi moramo razmotriti smanjenje emisije ugljika na našim najvećim mostovima. Raspon kapitalnog ugljika za cestovne mostove je između 1.4 i 4.8 tCO₂e/m², pri čemu su veće vrijednosti povezane s konstrukcijama dužih raspona. Pješački mostovi (narančaste točke), projekti popravka i obnove te pravilno održavanje postojećih mostova daju manju emisiju ugljika. Vrsta opterećenja utječe na sadržaj ugljika, pri čemu željeznički mostovi imaju više ugljika u usporedbi s cestovnim i pješačkim mostovima. Mostovi većih gabarita imaju veće temelje i podzemne dijelove, te obraćajući više pažnje na dijelove ispod mostova, možemo značajno utjecati na smanjenje ugljičnog otiska [23, 29].



Slika 26.: Odnos ugljičnog otiska i površine mosta; male emisije (zeleno) i velike emisije (crveno) (Izvor: [29])

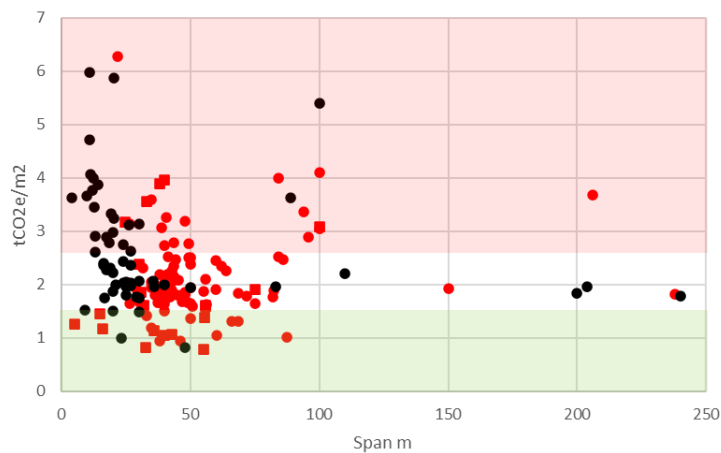
Troškovi su ključni aspekt gradnje mostova i pažljivo ih pregledavaju projektanti, investitori i graditelji. Postoji korelacija između cijene mosta i njegovog ugljičnog otiska (slika 27.). Podaci jasno pokazuju da kako se cijena mosta povećava, tako raste i njegov sadržaj ugljika [23].



Slika 27.: Odnos ugljičnog otiska i troškova mosta s BDP-om ugljika u Velikoj Britaniji/Europi prikazanim kao ružičasta linija (Izvor: [26])

Pouzdanost podataka ključna je pri izradi baze podataka o ugljiku i njenoj analizi. Ako je most izgrađen, procjena ugljika se smatra pouzdanijom nego za neizgrađene mostove jer su detalji značajnih metoda gradnje, značajnog transporta materijala ili velikih privremenih radova također vjerojatno poznati. Kod mostova veliki problem predstavlja nedostatak dostupnih podataka. Jedna od metoda za jednostavniji prikaz podataka je normaliziranje podataka, a radi se na način da podijelimo podatke o ugljiku s površinom samog mosta tako da se najmanji

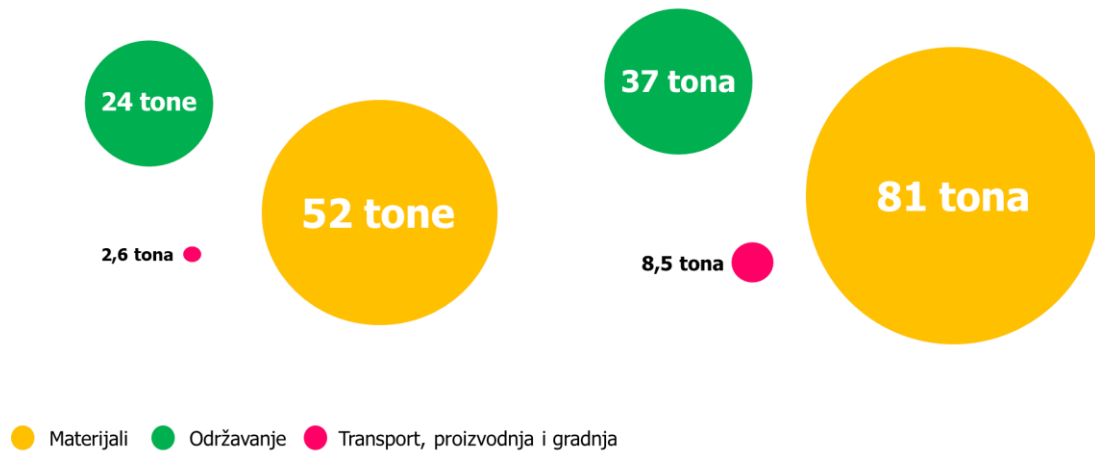
pješaćki most može izravno usporediti s najvećim visećim mostom. Normalizacija podataka može dati drugačiju perspektivu i pomoći u uspoređivanju novih mostova. Prosječna normalizirana količina ugljika za mostove je 2.4 tone po kvadratnom metru mosta. Na slici 28. prikazana je usporedba betonskih i čeličnih mostova s obzirom na raspon i normaliziranu količinu emitiranog ugljika. Mostovi od čelika i betona imali su sličan normalizirani sadržaj ugljika, dok su mostovi čelik-beton kompozit imali nešto manje ugljika [23, 29].



Slika 28.: Odnos ugljičnog otiska s rasponom mosta i materijalom; čelik (crveno) i beton (crno) (Izvor: [29])

Sadržaj ugljika ovisi o specifikaciji materijala, strukture koje koriste reciklirani čelik ili beton s visokom zamjenom cementa značajno smanjuju emisije. Varijacija u podacima otkriva da ne razmatraju svi arhitekti ili inženjeri ugljik na isti način u svojim projektima. Inženjeri i arhitekti ulažu puno truda u dijelove mosta koje vidimo. Istraživanja pokazuju da stavljamo puno čelika i betona u zemlju. U budućnosti moramo posvetiti više pažnje ovom nevidljivom, zakopanom ugljiku [23,29].

Drveni mostovi emitiraju gotovo polovicu stakleničkih plinova manje, gledano od početka eksploatacije materijala do izgradnje samog mosta i njegovog održavanja. Na slici 29. vidljiva je usporedba drvenog i betonskog mosta s obzirom na određene faze projekta mosta i količinu ugljičnog otiska u tonama. Drveni most emitira 79 tona ugljika tijekom svog vijeka trajanja, dok betonski most ispušta 127 tona. Kod drvenog mosta, čelik koji se koristi za izradu ograde doprinosi velikom dijelu utjecaja na emisiju. Drvo je resurs koji se konstantno obnavlja, te se drveni most može vrlo lako rastaviti i upotrijebiti za neku drugu svrhu. Prikazane emisije CO₂ variraju od projekta do projekta, pa razlika neće uvijek biti ista, međutim jasno je prikazana prednost drveta u smislu utjecaja na ugljični otisak mostova [7,30].

DRVENI MOST**BETONSKI MOST**

Slika 29.: Usporedba drvenih i betonskih mostova prema ugljičnom otisku za određene faze projekta (Izvor: [30])

4. NAPREDAK PREMA NULTOJ EMISIJI

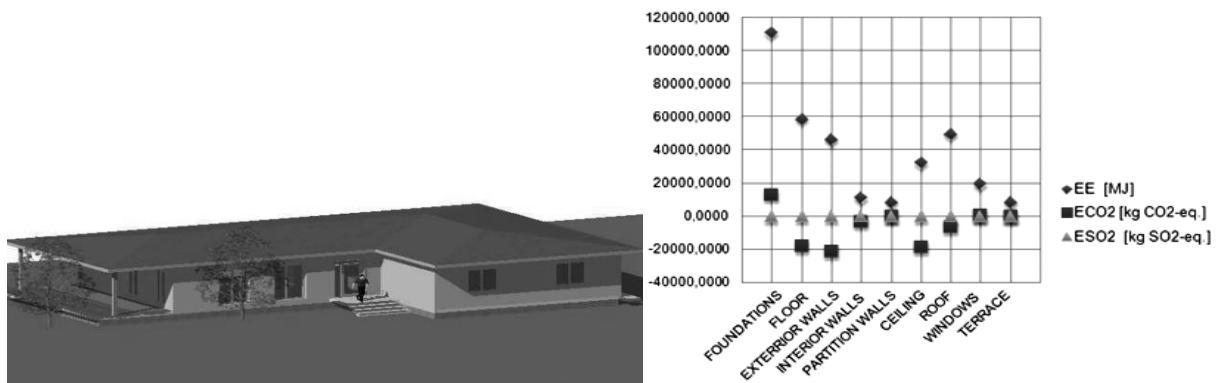
Promjena klime postala je jedan od najvećih problema današnjice. Zadire u ekološke, političke i ekonomske sfere naših života i ne možemo ga više ignorirati. Suočavanje s realnošću je već započeto, 1997. godine na Trećoj Konferenciji stranaka Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC) prihvaćen je Kyotski protokol kojim se države obvezuju na smanjenje emisija stakleničkih plinova. Protokol je stupio na snagu 2005. godine [31]. Godine 2015. zamijenio ga je Pariški sporazum kojem je glavni cilj smanjenje emisije stakleničkih plinova kako bi se spriječilo globalno zagrijavanje i porast temperature iznad 1.5 °C, a stupio je na snagu 2016. [24]. U skladu sa sporazumom, članice EU uzele su za cilj da postanu prvo klimatski neutralno gospodarstvo i društvo do 2050. godine [32]. Najnovija istraživanja pokazuju kako je EU na dobrom putu ka ostvarenju cilja zbog napretka u korištenju obnovljivih izvora energije diljem Europe. Kako bi se cilj u potpunosti ostvario važno je da mu svi doprinesemo.

4.1. Energetska učinkovitost

Inženjeri trebaju apelirati na održivu gradnju koja, osim zadovoljenja potreba, rješava problem zaštite i prevencije negativnih utjecaja na prirodu u cijelom životnom ciklusu, od izgradnje preko korištenja do rušenja građevine i njezinog recikliranja. Postoje brojna rješenja smanjenja negativnih utjecaja na okolinu [24].

Utjecaji građevina na okoliš usko su vezani s njihovom energetske učinkovitosti. Primjerice, što je veća energetska potrošnja zgrade to je veći i njezin utjecaj. Utjecaj se može minimizirati upotrebom obnovljivih izvora energije. Tako primjenom New Green Savings Programme-a u Češkoj, kućanstva mogu ostvariti subvencije kako bi smanjila potrošnju energije ili izgradila novi niskoenergetski objekt [24]. Gradnja pasivnih kuća je još jedan od načina poboljšanja energetske učinkovitosti. Prve se grade krajem 20. stoljeća u Njemačkoj, a one svoje energetske potrebe zadovoljavaju iskorištavanjem sunčeve energije. Osim financijske isplativosti, pasivni način gradnje omogućava i visoku kvalitetu života [33]. Slika 30. prikazuje primjer pasivne kuće s drvenim okvirom u Slovačkoj i njen utjecaj na okoliš. Unutarnji nosivi zidovi sastoje se od glinenih žbuka, drvenih vlaknastih ploča DHF, slamnatih bala između I-greda, a pregradni zidovi od glinenih žbuka i glinenih opeka. Ovi materijalni sastavi struktura predstavljaju inovativan pristup tradicionalnoj arhitekturi. Temelj od betonskih traka s toplinskom izolacijom od XPS-a ima najnegativniji utjecaj. Ostale optimizirane strukture postižu minimalne vrijednosti ekoloških pokazatelja s obzirom na korištenu količinu građevinskih materijala. Unatoč povećanoj količini materijala za ovaj dizajn, pokazano je da strukture ove kuće mogu osigurati smanjenje energije i emisija povezanih s energijom ne samo u fazi

korištenja, već i u fazi izgradnje, zahvaljujući pravilnom odabiru i kombinaciji građevinskih materijala [25].



Slika 30.: Primjer pasivne kuće s drvenim okvirom u Slovačkoj i njen utjecaj na okoliš (Izvor: [25])

4.2. Primjeri pristupa u nekim državama

4.2.1. Smanjenje ekološkog otiska betona u Danskoj

Još jedan od načina ostvarenja cilja nulte emisije donosi Danska [34]. Danska industrija cementa i betona naporno je radila na smanjenju ekološkog otiska betona u posljednjih 15 godina. Korištenje dodatnih cementnih materijala uobičajena je praksa u gotovo svakoj betonari. Posebno se leteći pepeo opsežno dodaje za sve vrste primjena betona. Primarni ekološki pokazatelj i dalje je ugljični otisak kada se beton procjenjuje i uspoređuje s drugim građevinskim dizajnima. Međutim, iako beton ima relativno visoku emisiju CO₂ tijekom proizvodnje, od iznimne je važnosti uvrstiti životni vijek zgrada u ovu vrstu izračuna. Toplinska masa betona pomaže poboljšati energetska učinkovitost zgrade, što će ponovno smanjiti učinak visokog početnog ugljičnog otiska. Mala razlika u energetska učinkovitosti dizajna zgrade može preokrenuti ravnotežu od ekološki prihvatljivog dizajna do potpune suprotnosti u smislu energetska učinkovitosti. Nakon završetka životnog vijeka, beton je pogodan za recikliranje i ponovnu upotrebu. Na primjer, betonski šut će karbonatizirati i apsorbirati CO₂ iz atmosfere.

U Danskoj je konkurencija za kvalificiranu radnu snagu i opća želja za većom produktivnošću značajno potaknula uporabu samozbijajućeg betona. Samozbijajući beton je beton koji tečenjem u potpunosti popunjava presjek konstruktivnog elementa bez upotrebe vibracijskih uređaja. Otprilike trećina danas proizvedenog gotovog betona u Danskoj je samozbijajući. Izvođači koji prelaze na samozbijajući beton smatraju da je teško vratiti se na konvencionalni

beton jer njihovo osoblje za rad s betonom oklijeva raditi s konvencionalnim betonom ponovno [34].

4.2.2. Monetiziranje emisija ugljika u Kini

Kina predlaže kvantificiranje emisije ugljika u fazi izgradnje mostova, a potom njenu monetizaciju, tj. pretvaranje utjecaja emisija ugljika u izravne ekonomske gubitke unutar poduzeća kako bi se poduzeća potaknula na svjesno poduzimanje mjera za smanjenje emisija ugljika. Ugljični trošak je najveća pokretačka snaga koja potiče poduzeća na provođenje mjera smanjenja emisije ugljika.

Emisije ugljika trebaju se monetizirati kroz određeni mehanizam određivanja cijene ugljika. Trenutno postoje dva glavna mehanizma određivanja cijene ugljika - porez na ugljik i trgovanje emisijama ugljika. Porez na ugljik odnosi se na postavljanje poreznih stopa od strane vlade za emisije stakleničkih plinova. Smatra se da porezi na okoliš mogu djelovati kao ekonomski poticaji za poticanje poduzeća na inovacije i traženje ekonomičnih metoda proizvodnje koje imaju mali utjecaj na okoliš. Primjena politike trgovanja emisijama ugljika u zemljama širom svijeta može učinkovito smanjiti globalne emisije ugljika i potaknuti poduzeća da koriste ekološki prihvatljive tehnologije i inovacije. Uvođenjem mehanizma određivanja cijene ugljika, emisije stakleničkih plinova postat će trošak za poduzeća. Poduzeća mogu odabrati različite resurse ili proizvode prema vlastitim uvjetima kako bi kontrolirali emisije stakleničkih plinova i time obuzdali globalno zagrijavanje [26].

S održavanjem Klimatske konferencije u Kopenhagenu krajem 2009. godine, koncept i praksa nisko ugljične ekonomije postali su istaknuti, a želja za njenim razvojem uzrokovala je da se istraživanja o okolišnim troškovima postupno usmjere na troškove emisija ugljika. Istraživanja pokazuju da je korištenje sustava oporezivanja i trgovanja ugljikom za izračun troškova emisija ugljika u gradnji pouzdano i primjenjivo za izračunavanje troškova emisija ugljika za mostove. Međutim, do danas, u Kini nedostaje posebnih istraživanja o troškovima emisija ugljika za mostove [26].

4.2.3. Smanjenje bilance ugljika konceptom s 11 poluga u Njemačkoj

Mogu se poduzeti brojne mjere kako bi se bilanca CO₂ frankfurtskih mostova smanjila na četvrtinu. Stoga oni kao rješenje uvode koncept s 11 poluga, koji se temelji na kombinaciji vrlo različitih područja djelovanja [27]. Najvažnije poluge uključuju upotrebu čelika proizvedenog na način koji je gotovo CO₂ neutralan, favoriziranje klimatski prihvatljive pogonske energije vozila i proizvodnju zelene električne energije. Za svaku od 11 poluga objašnjen je odgovarajući način djelovanja i kvantificirana je ušteda CO₂ koja se pretpostavlja u svakom slučaju (tablica 5.).

Tablica 5.: 11 poluga i način djelovanja svake

Poluga 1 - Eko-beton	Količina cementa u betonu smanjena je inovativnim konceptima materijala, takozvanim eko-betonom.
Poluga 2 - Zamjena čelika	Zamijenite sadržaj čelika u betonu i/ili čelik u drugoj strukturi ugljičnim vlaknima, bambusom itd.
Poluga 3 - Zamjena betona	Zamjenjujete beton u potpunosti, npr. prirodnim kamenom ili drvom.
Poluga 4 - Betonsko hvatanje ugljika u proizvodnji cementa	Hvatanje i ponovna upotreba CO ₂ proizvedenog u proizvodnji cementa omogućuje korištenje betona koji su ekološki prihvatljiviji za mostove u Frankfurtu.
Poluga 5 - Ušteda CO ₂ u proizvodnji čelika uz pomoć vodika	Emisije CO ₂ za čelik mogu se drastično smanjiti kroz inovativni proces zamjene kokska vodikom kao reakcijskim partnerom u ekstrakciji željeza iz željezne rude.
Poluga 6 - Korpus mosta kao temeljna ploča	Upotrijebljeni beton i čelik preuzimaju funkciju temeljnih ploča za zgrade na mostovima, tako da se nove zgrade mogu izbjeći drugdje.
Poluga 7 - Zgrade svodova mostova	U dalekoj budućnosti frankfurtski mostovi mogu preuzeti funkciju nosive konstrukcije za zgrade s lukovima ispod sebe, što znači da je potrebno manje građevinskog materijala za te građevine.
Poluga 8 - Optimiziran protok prometa na "drugoj razini "	Mostovi nose promet "druge razine" koji putuje vlasničkom rutom. Time je po prvi put moguć učinkovit sustav autonomne vožnje usred grada.
Poluga 9 - Ubrzanje odmicanja od motora s unutarnjim izgaranjem	Ako se, zahvaljujući gustoj mreži jeftinih opcija punjenja gorivom, više vlasnika vozila u Frankfurtu prebaci na čistu pogonsku energiju ranije nego što su planirali, to će značiti trenutnu uštedu u emisijama CO ₂ povezanih s vozilima.
Poluga 10 - Fotonapon	Mostovi su izložena ovesna površina za fotonapon. Tijelo infrastrukturnog projekta koristi se za proizvodnju obnovljive energije. U slučaju mostova, površine (estetski lijepe ili nevidljive) služe kao fotonaponski park. Osim toga, zbog svoje mrežne strukture mogu primati i solarnu energiju koja se stvara duž mostova i prenositi je potrošačima.
Poluga 11 - Geotermalna energija	Velik dio od 15.000 stupova frankfurtskih mostova koristi se za stvaranje energije geotermalnim aktiviranjem, što im omogućuje grijanje i hlađenje zgrada na mostovima.

4.2.4. Prilagodba mostova klimatskim promjenama u Ujedinjenom Kraljevstvu

Inženjeri Lee Franck, David Knight i David Collings, godine 2020., govorili su na konferenciji Bridges 2020 u Ujedinjenom Kraljevstvu o izvanrednom stanju što se tiče klime, potrebi za hitnim djelovanjem i o tome što bi to moglo značiti za mostove. Net Zero je znanstveno utemeljen put prema postizanju nulte emisije stakleničkih plinova do 2050. godine. U UK Odbor za klimatske promjene (Climate Change Committee) postavio je niz smanjenja

proračuna ugljika u petogodišnjim intervalima, koji se pridržavaju znanstveno utemeljenog puta i cilja Net Zero. Proračuni zahtijevaju da UK smanji svoje emisije ugljika za 40% do 2030. godine. Zadane su tri ključne poruke koje bi trebalo usvojiti [36].

- Prvo, nula znači nula. Nužna je promjena navika koje radimo kao nacija, a pogotovo industrija mora ozbiljnije shvatiti ulogu u tome.
- Drugo, ne možemo čekati do 2050. godine. Moramo biti predani većem smanjenju emisija što je brže moguće.
- Treće, ideja proračuna je značajna. Moramo preći, kao nacija i kao industrija s težnji na mjerenja. Takve odluke će sve više utjecati na poslovanje građevinskog sektora.

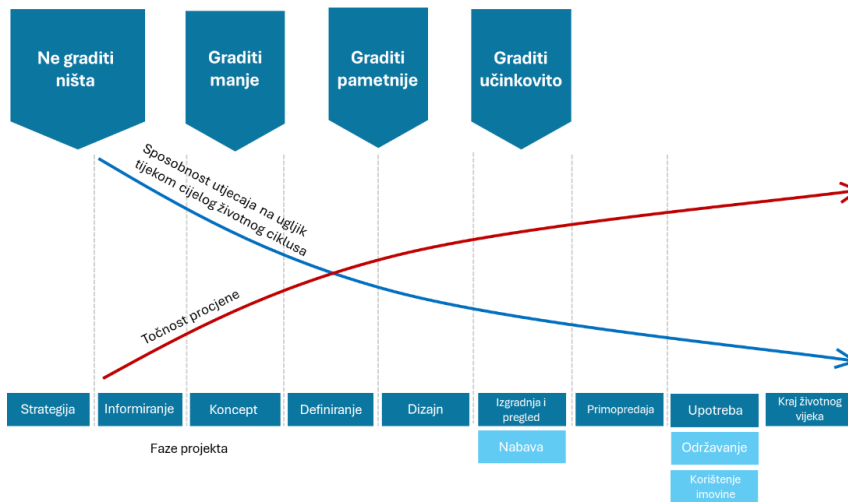
4.2.4.1. Smjernice udruženja koje se bavi smanjivanjem ugljičnog otiska mostova

Net Zero Bridges Group predložila je niz smjernica smanjenja ugljičnog otiska namijenjenih svima koji sudjeluju u projektima mostova. Osnovana je s ciljem kako bi pomogla inženjerima i sudionicima u gradnji mostova pronaći put kroz veliki broj izvještaja o klimi i smjernica za ugljik. Količina izvještaja, strategija i smjernica relevantnih za graditeljstvo i građevinsku industriju brzo raste, ali mnoge od tih dokumenata je teško povezati s onim što projektanti mostova i inženjeri rade svakodnevno. Net Zero Bridges Group pregledava dokumente i iz njih izdvaja najrelevantnije. Dostupni su brojni tehnički dokumenti o ugljičnom otisku, izračunu ugljika i uspoređivanju ugljika, ali manje je dostupnih smjernica za smanjenje ugljičnog otiska, što je praznina koju treba popuniti [36].

Svaki član Net Zero Bridges Group potpisao je javnu izjavu kojom potvrđuje hitnu klimatsku situaciju i obećava da će dijeliti znanje i najbolju praksu smanjenja ugljičnog otiska. Postoje ekvivalentne izjave za izvođače, za voditelje projekata i ostale sudionike. Od organizacija se zahtijeva da razumiju svoj ugljični otisak, postavljaju ciljeve za smanjenje, razvijaju planove i prate napredak. Ovo bi trebalo biti jednako važno kao i sigurnost jer nedjelovanje ima posljedice, čak i ako su daleko u budućnosti i teže vidljive. Moramo početi mjeriti i kontrolirati svoje ugljične otiske jer inače ne možemo znati hoćemo li dosegnuti ugljične proračune. Na razini projekta to možemo učiniti usvajanjem standarda kao što je PAS 2080 [35]. PAS 2080 je prvi svjetski standard za upravljanje ugljikom u infrastrukturi. Prema smjernicama Vijeća za zelenu gradnju Ujedinjenog Kraljevstva očekuje se da tvrtke u Ujedinjenom Kraljevstvu ciljaju na korištenje ovoga standarda na 80% svoje djelatnosti do 2025. godine.

4.2.4.2. Razmatranje smanjenja ugljičnog otiska kroz cijeli životni vijek (PAS 2080)

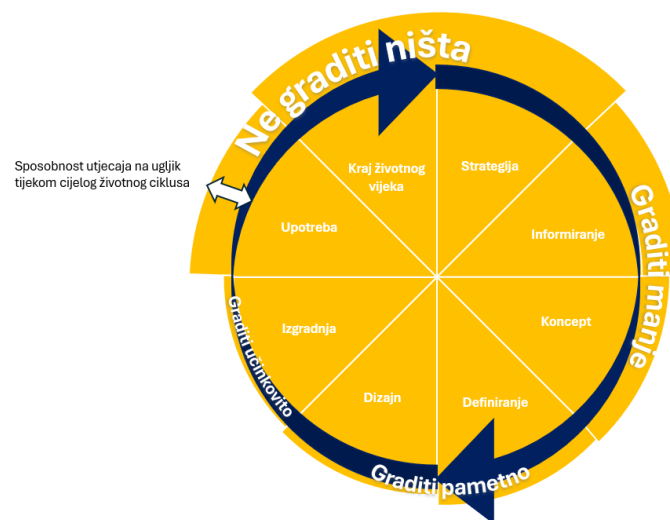
Upravljanje ugljikom ne postiže ništa ako nas ne dovede do donošenja drugačijih i boljih odluka. Dijagram na slici 31. središnji je dio za pristup standardu PAS 2080 [35]. Prikazuje faze životnog ciklusa projekta i ukazuje na to da je naša sposobnost da utječemo na smanjenje ugljika najveća na početku projekta, a brzo se smanjuje kako razvoj projekta napreduje. Istodobno se povećava točnost procjene ugljika. Odluke koje mogu imati najveći učinak moraju se donijeti u ranoj fazi, ali tada imamo najmanje detaljnih podataka o ugljiku.



Slika 31.: Pristup PAS 2080 standarda (Izvor: [36])

PAS 2080 postavlja hijerarhiju smanjenja ugljika, s četiri široke ideje o tome kako smanjiti ugljik. Svakoj ideji se smanjuje utjecaj dok prolazimo kroz faze projekta. Dijelovi ova hijerarhije smanjenja ugljika su: 'ne graditi ništa' (Build Nothing), 'graditi manje' (Build Less), 'graditi pametno' (Build Clever), i 'graditi učinkovito' (Build Efficiently) [36].

Proces upravljanja građevinom nije linearan, to je ciklus. Novi projekti mostova često započinju kada je postojeća infrastruktura dosegla kraj svog vijeka trajanja. Ciklus upravljanja građevinom prikazan je na slici 32. Za vlasnika infrastrukture, faza eksploatacije je faza u kojoj želimo provesti najviše vremena. To znači da će se nastojati maksimizirati vijek trajanja mosta, odnosno spriječiti ponovno pokretanje ciklusa nove gradnje. Hijerarhija smanjenja ugljika i naša sposobnost smanjenja emisije ugljika izbjegavanjem gradnje, počinje od faze eksploatacije građevine, pokušavajući izbjeći obnovu građevine gdje god je to moguće. To je ključni dio procesa izgradnje mostova u kojem se donose bolje odluke [36].



Slika 32.: Ciklus upravljanja građevinom (Izvor: [36])

4.2.4.3. Hijerarhija smanjenja ugljika

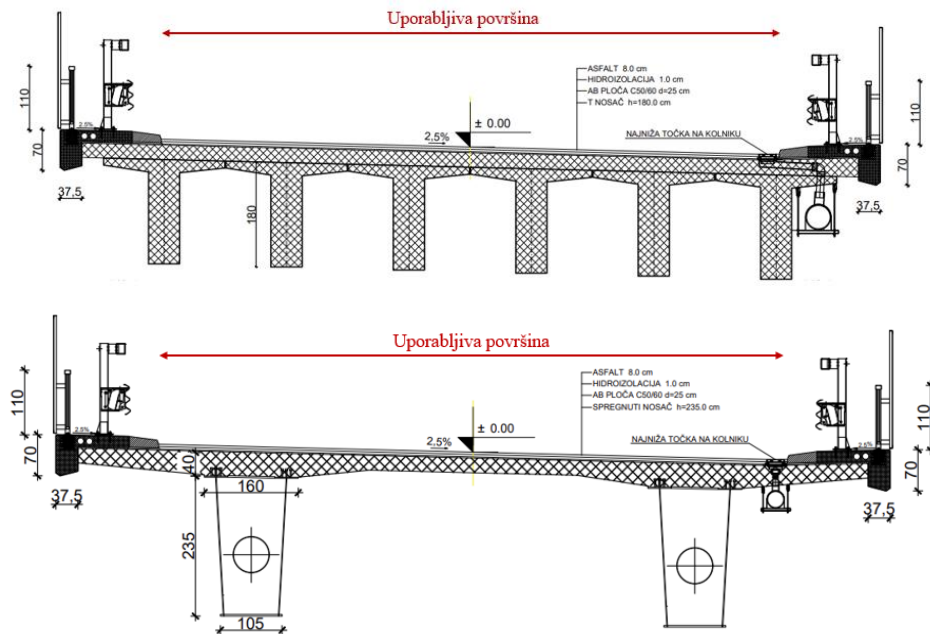
Hijerarhija smanjenja ugljika počinje s pitanjem trebamo li uopće nešto graditi. Odluka o izgradnji ima najveći pojedinačni utjecaj na ugljični otisak projekta. Osim pitanja o potrebi gradnje konstrukcije, moramo se zapitati i možemo li je sagraditi unutar proračuna za ugljik, i je li prednosti gradnje opravdavaju utjecaj ugljika. Jedno od opravdanja za novu infrastrukturu može biti da nam omogućuje smanjenje ugljičnih otisaka drugih aktivnosti. Primjeri: izgradnja novih željezničkih linija velikih brzina kako bi se omogućila veća upotreba željeznice; izgradnja novog riječnog prijelaza kako bi se omogućilo kraće vrijeme putovanja, a time i manje emisije iz prometa. Predviđa se brza dekarbonizacija površinskog prometa u nadolazećim desetljećima. Uštede ugljika koje možemo ostvariti u emisijama iz prometa stoga će se također brzo smanjiti. Odbor za klimatske promjene UK očekuje da će emisije ugljika iz površinskog prometa 2030. godine biti 50% današnjih, a do 2040. 10% današnjih. Posljedica je da će uštede u ugljičnom otisku nove prometne infrastrukture prestati opravdavati njenu izgradnju [36].

Proračun za ugljik se smanjuje, tako da će biti mnogo teže opravdati novu infrastrukturu na temelju emisija iz prometa. Stoga se moramo usredotočiti na Net Zero na mostovima koje već imamo. To znači produžiti njihov vijek trajanja, održati njihovu vrijednost i učiniti ih otpornijima na određene utjecaje. Sve to se može ostvariti uz pravilno održavanje i razvoj načina očuvanja konstrukcije s razmatranjem ugljika. Potrebno je kolektivno postati mnogo pametniji u pogledu sigurnog održavanja postojećih konstrukcija sa što manje fizičkih izmjena te prihvatiti inženjerske načine očuvanja [36].

Ne graditi nove građevine neće uvijek biti opravdanje, a razumljivo je da bi u zemljama u razvoju ova ideja bila odbačena. Sljedeći korak u hijerarhiji smanjenja ugljika je 'graditi manje'. Emisije ugljika u korelaciji su s veličinom, odnosno što je veći most, njegov ugljični otisak je veći. U standardu PAS 2080 [35], dio 'graditi manje' znači smanjenje veličine potrebne nove izgradnje. Primjeri smanjenja: ako je dovoljna kraća konstrukcija s jednim rasponom, je li nam potrebna konstrukcija s tri raspona; je li širina konstrukcije predimenzionirana, te možemo li je kako smanjiti. Uz dane primjere o smanjenju veličine građevine, možemo se zapitati i je li se umjesto mosta može sagraditi podzemna željeznica, budući da zemljani radovi imaju niži ugljični otisak od gradnje mosta. Ni jedna ideja projekta ni sam projekt neke građevine nisu isti tako da će se ovakve usporedbe razlikovati od projekta do projekta.

Treći dio hijerarhije smanjenja ugljika je 'graditi pametno' i odnosi se na to da postoji još puno prostora za poboljšanje faza projekta, od ideje, izgradnje do upravljanja građevinom. Već sada postoje mnogi projekti koji se predstavljaju kao projekti smanjenog ugljičnog otiska, koji je uspoređivan na različitim uzorcima s referentnim dizajnom. Temelj za pametnu gradnju je promatranje konstrukcija i korištenje podataka o ugljiku za optimizaciju projektiranja. U gotovo svakom slučaju to bi značilo istiskivanje nepotrebnog materijala. Sljedeći korak nije usporedba s uzorcima dizajna, već usporedba s drugim projektima. Ono što je ključno za pametnu izgradnju je mjerenje ugljičnog otiska u svakoj fazi životnog ciklusa projekta mosta. Također ključne su usporedbe mjerenja i korištenih metoda među projektima. Na primjer, korisno je pri

odabiru rješenja usporediti mogućnosti izvedbe betonskog i spregnutog mosta (slika 33.). Minimiziranje materijala je jako važna stavka u procesu, a od projektanta ona zahtijeva projektiranje s puno više pažnje i uključenosti [7].



Slika 33.: Primjer usporedbe betonskog i spregnutog mosta (Izvor: [7])

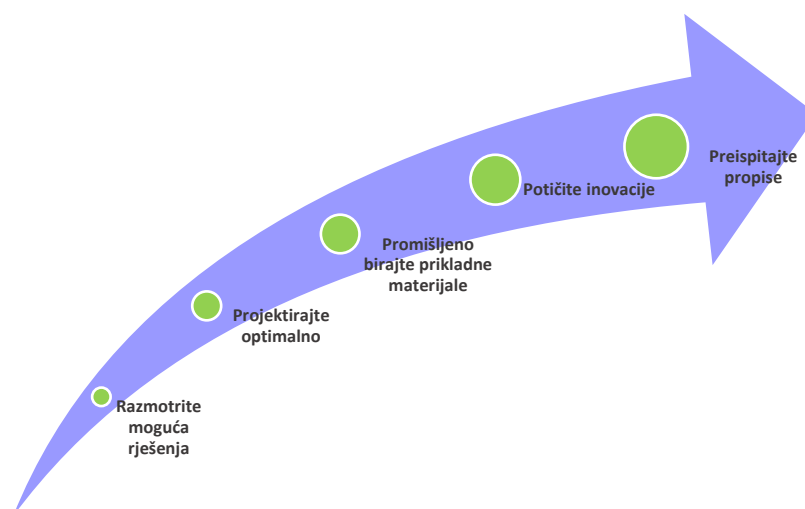
U području 'graditi učinkovito' uštede ugljika koje možemo dobiti su obično manje, ali nisu zanemarive. Pojavljuju se čelici i betoni s niskim udjelom ugljika i postaju sve dostupniji, iako neki od njih zahtijevaju opsežna ispitivanja kako bi se pokazala njihova dugoročna učinkovitost. Ako želimo koristiti čak i materijale s nižim udjelom ugljika od čelika i betona, moramo početi biti puno hrabriji. Testiranje nekog programa duže vrijeme može biti od velike pomoći, ili korištenje prednosti betona koji sporije stvrdnjava. Net Zero Bridges Group surađuje sa Steel Bridge Group i Concrete Bridge Development Group kako bi se bolje razumjele ove mogućnosti. Drvene mostove imamo širom Njemačke, Španjolske, Sjedinjenih Američkih Država i u državama Skandinavije, te je samo pitanje može li se korištenje drveta kao materijala, uz stručnost u projektiranju, proizvodnji i izgradnji uspješno razviti i u drugim zemljama. Što se tiče kamena kao materijala, ima relativno nizak ugljični otisak s velikom izdržljivošću. Kao i kod drveta ključno je stručno projektiranje i izgradnja. Dakle, treba steći određeno iskustvo.

4.2.4.4. Utjecaj inženjera

Uravnoteženi put prema nultoj emisiji definira akcije u nekoliko sektora relevantnih za izgradnju: opskrba energijom, industrija i proizvodnja, transport i uklanjanje stakleničkih plinova. Dok je trenutno djelovanje moguće i događa se u nekim od ovih sektora, dekarbonizacija u drugima tek počinje. Zajedno s usvajanjem Specifikacije za upravljanje

ugljikom u infrastrukturi, PAS 2080 [35], ovo su područja u kojima obični inženjer može imati najveći utjecaj:

- **Razmotrite moguća rješenja:** Izazovite potrebu za smanjenom potrošnjom i oblikujte rješenja te potrebe.
- **Projektirajte optimalno:** moramo postići smanjenje emisija od 10% kroz učinkovitost projektiranja u sljedećih 10 godina do 2033. Dizajn bi trebao biti funkcionalan, promicati jednostavnost i izbjegavati nepotrebnu redundantnost materijala. Inženjeri bi trebali razmotriti projektiranje bez održavanja ili s niskim/lakim održavanjem i razmotriti materijale otporne na koroziju gdje bi to moglo smanjiti rizik budućeg održavanja. Napredne tehnike analize mogu se koristiti za optimizaciju elementa ili cijelih struktura, posebno tamo gdje postoji visok stupanj ponavljanja, i trebale bi biti korisne i za troškove ishoda i za ugljik.
- **Promišljeno birajte prikladne materijale:** potaknite poticaje za materijale s niskim udjelom ugljika tako što ćete ih specificirati čim postanu dostupni i razmotrite alternativne materijale (npr. drvo, zidanje) gdje je primjenjiva smanjena potrošnja i zamjena materijala. Inženjeri bi trebali testirati različite izbore materijala u fazi razvoja opcija dizajna kako bi pronašli optimalno rješenje za cijeli životni vijek ugljika. Inženjeri bi se trebali uključiti u industriju proizvodnje materijala kako bi razumjeli njihov razvoj u proizvodnji s niskim ugljikom.
- **Potičite inovacije:** rano usvajanje materijala s niskim udjelom ugljika na projektima ili komponentama niskog rizika za stjecanje znanja i iskustva u tim materijalima i stvaranje tržišta za ulaganja i istraživanje. Na primjer, korištenje recikliranih materijala i pokazivanje da oni pokazuju odgovarajuća pouzdana rješenja.
- **Preispitajte propise:** preispitajte kriterij izvedbe, faktore opterećenja, opterećenje itd. Pri tome razmotrite koji bi dokazi trebali poduprijeti i omogućiti promjenu na siguran način, poput citiranja tehničkih dokumenata, internih studija, prethodnih nalaza uspješne izvedbe projekta, sadržaja drugih nacionalnih normi itd., koji se mogu koristiti kao opravdanje.



Slika 34.: Područja u kojima inženjer može imati najveći utjecaj na upravljanje ugljikom

Tijekom cijelog životnog ciklusa nekog projekta moramo pronaći vrijeme za unaprjeđenje odluka vezanih za ugljik. Podaci o ugljiku često su nesigurni u fazama koncepta, fazama upotrebe, na kraju životnog vijeka pa bi bilo poželjno određeno vrijeme u tim fazama odvojiti na što bolju ispravnost donošenja odluka. Tijekom faza projektiranja i izgradnje, posebno tamo gdje želimo graditi pametno ili učinkovito, moramo imati dovoljno vremena za provedbu programa. Naravno, više vremena zahtjeva i dodatne financijske izdatke za takvu provedbu programa. To će omogućiti inženjerima da potroše vrijeme na optimizaciju projektiranja mosta, a cijelom projektnom timu dati vremena za istraživanje, testiranje, odobravanje i usvajanje opcija materijala s nižim udjelom ugljika. Vrijeme je ključno, jer ako se ne pronađe dodatno vrijeme za preispitivanje određenih odluka, teško da će doći do poboljšanja [7].

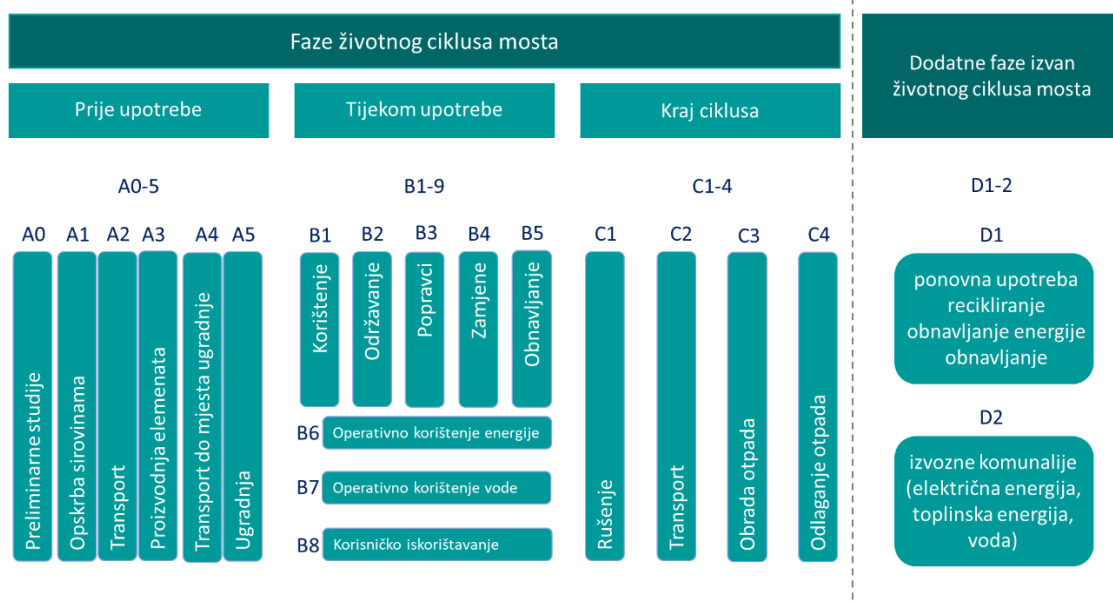
Suradnja svih sudionika u projektu je izrazito bitna, te se potrebno usredotočiti na odnose koji će pomoći u napredovanju istraživanja i razvoja dekarbonizacije, razumijevanju novih materijala i promicanju promjena. Na razini projekta, najučinkovitija suradnja zahtijeva rano uključivanje cijelog lanca opskrbe projekta. Za mogućnost korištenja materijala s niskim udjelom ugljika, potrebno je uključiti opskrbni lanac u ranoj fazi.

5. SMJERNICE ZA PRORAČUN UGLJIČNOG OTISKA MOSTOVA PREMA NET ZERO BRIDGES GROUP

Smjernice su prihvaćen pristup za provođenje izračuna ugljika za mostove od strane Net Zero Bridges Group kako bi se podržala procjena i usporedba ugljika u mostovima. Faktori ugljika navedeni u ovom poglavlju usmjereni su na Ujedinjeno Kraljevstvo i Europu, ali se mnogi mogu primijeniti na projekte premošćivanja u različitim zemljopisnim područjima. Format i sveobuhvatna metodologija odgovaraju vodiču How to calculate embodied carbon (HTCEC) [38]. U ovom radu pojednostavljeno prikazujemo smjernice proračuna ugljičnog otiska koje su ažurirane u srpnju ove godine s najnovijom verzijom PAS 2080 [39].

5.1. Faze životnog ciklusa

Prvi korak prilikom proračuna ugljičnog otiska je podijeliti životni vijek mosta u četiri faze: prije korištenja mosta, za vrijeme korištenja, kraj životnog ciklusa te zasebna faza vezana za recikliranje (slika 35.) . Net Zero Bridges Group predlaže smjernice za izračun emisije ugljika tijekom prve faze. Također, most je potrebo raščlaniti na grupe elementa i elemente te za svaki element zasebno odrediti emisiju ugljika. Elementi se razmatraju s dogovorenom granicom, npr. ako skup elemenata doprinosi manje od 1% ukupnom broju može se zanemariti. Prijedlog raščlambe je dan u tablici 6. Svaka faza se dalje dijeli u module. Za svaki modul se mjeri ekvivalentna masa emisije ugljičnog dioksida [40].



Slika 35.: Faze životnog ciklusa mosta prema PAS 2080 (Izvor: [40])

Tablica 6.: Kategorizacija elemenata (Izvor: [40])

GRUPA ELEMENATA	ELEMENT	
Gornji ustroj	Nosači	Glavni nosači
		Sekundarni nosači
	Štapni elementi	
	Kabelski sustav	
Donji ustroj	Upornjak	Temelj upornjaka
		Krila upornjaka (bez temelja)
		Prijelazna ploča
	Stupište	Temelji
		Stupovi
		Grede
	Luk	
Pilon		
Temelji	Plitki temelji	
	Duboki temelji	
Oprema	Hodnik	Hodnik za pješake
		Hodnik za bicikliste
	Zaštitna ograda	Zaštitna ograda za udar vozila
		Zaštitna ograda za pješake
	Dilatacijski spojevi	
	Ležajevi	
	Cesta/pješačka staza	
	Željeznička pruga	
	Drenaža	
	Ostalo	
Zemljani radovi	Iskopavanje	
	Zatrpavanje	
	Sustav zadržavanja zemlje	
Izgradnja (razno)	Pripremni radovi	
	Prijevoz osoblja na gradilište	
	Prekid prometa tijekom izgradnje	

5.2. Prva faza životnog ciklusa

Prva faza životnog ciklusa je faza prije korištenja mosta. Podijeljena je na 6 modula A0-A5: preliminarnе studije, opskrba sirovinama, transport sirovina, proizvodnja, transport do mjesta ugradnje te ugradnja. Moduli A1 do A3 obično upravljaju konstrukcijskim utjelovljenim ugljikom mosta. Međutim, kada se uspoređuju opcije infrastrukturnog sustava s različitim duljinama mostova i povezanim zemljanim radovima, emisije A4-A5 ne bi se trebale zanemariti jer bi emisije povezane s iskopavanjem, transportom i punjenjem na licu mjesta mogle biti glavna komponenta ukupnog ugljičnog otiska. Osim konstrukcijskih materijala u mostu, obično će biti relevantno uzeti u obzir i nekonstrukcijske elemente mosta, npr. kolnik ili željezničke elemente, kada se razmatraju opcije u fazi koncepta [40].

5.2.1. Preliminarnе studije (A0)

Preliminarnе studije odnosno planiranje i izrada projektne dokumentacije. U ovoj fazi postoji značajan prostor za smanjenje emitiranog ugljika razmatranjem postoji li uopće potreba za mostom te može li se veličina mosta smanjiti. Zatim, potrebno je razmotriti oblik i geometriju mosta te materijale od kojih će most biti izveden. Potrebno je težiti opciji koja bi smanjila potrošnju materijala i građevinski utrošak energije [7].

5.2.2. Opskrba sirovinama (A1)

Materijali se značajno razlikuju po svojim svojstvima pa tako i po količini emisije ugljika u atmosferi. Net Zero Bridges Group daje referentni skup faktora ugljika za uobičajene materijale za izgradnju mostova navedenih u tablici 7. [38]. Općenito, ako su za proizvodnju materijala/proizvoda dostupni provjereni EPD-ovi⁸ potvrđenih dobavljača koje je provjerila treća strana, trebalo bi ih upotrijebiti umjesto prosječnih vrijednosti prikazanih u tablici 7.

Tablica 7.: Količina emitiranog ugljika za uobičajene materijale (Izvor: [40])

MATERIJAL	TIP	SPECIFIKACIJA	UTJELOVLJENI UGLJIK A1-A3 (tCO _{2e} /t)
Aluminij	Ploča		6,58
			13,0
	Ekstrudirani profil		6,83
			13,2

⁸ Deklaracija proizvoda za okoliš (EPD): neovisno verificiran i registriran dokument koji prenosi transparentne i usporedivе informacije o životnom ciklusu utjecaja proizvoda na okoliš.

Opeka	Jednostruka inženjerska glinena opeka		0,213	
Kompoziti	Opća plastika		3,31	
	Polistiren		3,43	
	Staklom ojačani polimeri (GFRP)	Šipke armature		2,8
		Lijevani profili i rešetke		3,4
		Cijevi i oluci		2,1
	Ojačanja karbonskim vlaknima		N/A	
	Polimeri ojačani bazaltnim vlaknima		N/A	
Pjenasti uretan ojačan vlaknima (plastični pragovi)		N/A		
Beton (nearnirani)	C20/25	Prosječna kombinacija za UK	0,112	
	C25/30	Prosječna kombinacija za UK	0,119	
	C28/35	Prosječna kombinacija za UK	0,126	
	C32/40	Prosječna kombinacija za UK	0,138	
	C35/45	Prosječna kombinacija za UK	0,149	
	C40/50	Prosječna kombinacija za UK	0,159	
	C45/55	Prosječna kombinacija za UK	0,170	
	C50/60	Prosječna kombinacija za UK	0,184	
	Ostale specifične betonske mješavine		varira	
Mort	1:4 mješavina cementa i pijeska	Prosječna mješavina cementa za Ujedinjeno Kraljevstvo	0,149	
Čelik	Ravna ploča	Primjenjivo za sve tipične stupnjeve	2,46	
	Šuplji profili		2,46	

	Otvoreni profili	čvrstoće za ugljični čelik i čelik otporan na atmosferilije	1,55
	Armatura		1,99
	Šipke za prednaprezanje		1,99
	Natege za prednaprezanje visoke čvrstoće s malim opuštanjem		2,72
Nehrđajući čelik	Ploča / presjek		2,74
	Armatura		3,78
	Šipke za prednapinjanje		3,78
	Hladno valjana ploča / profil		3,39
Kamen	Granit		0,093
	Vapnenac		0,090
	Pješčenjaka		0,060
Drvena građa	Meko drvo		0,263
	Tvrdo drvo		0,306
	Šperploča		0,681
	Križno lamelirano drvo (CLT)		0,250
	Ljepljeno drvo		0,280

Prilikom uspoređivanja dvaju materijala (npr. beton i čelik) potrebno je voditi računa o tome da su emisije ugljika izražene u tonama emitiranog ugljika po toni materijala. Iz tablice 7. je vidljivo da najveću emisiju ugljika po toni imaju čelik i aluminij, no čelik ima znatno veću nosivost u odnosu na beton te je potrebno znatno manje tona čelika za premostiti isti raspon. Također, bitno je napomenuti da je u tablici dana količina emitiranog ugljika za nearmirani beton. Toj količini je potrebno nadodati i količinu emitiranog ugljika za armaturu.

5.2.3. Transport (A2)

Emisija ugljičnog dioksida tijekom izvedbe mosta značajno ovisi o načinu transporta materijala i predgotovljenih elemenata do mjesta ugradnje. Za poznate načine prijevoza i udaljenosti mogu se upotrijebiti podaci iz tablice 8.

Tablica 8.: Faktori emisije ugljika za poznate načine prijevoza (Izvor: [40])

NAČIN PRIJEVOZA	VRSTA PRIJEVOZNOG SREDSTVA	FAKTOR EMISIJE UGLJIKA	MJERNA JEDINICA
Cesta	Teško teretno vozilo (dizel) - 0% natovareno	0,642	kgCO ₂ e/km
Cesta	Teško teretno vozilo (dizel) - 50% natovareno	0,119	kgCO ₂ e /(tona.km)
Cesta	Teško teretno vozilo (dizel) - 100% natovareno	0,0722	kgCO ₂ e /(tona.km)
More	Prosječni brod za rasuti teret	0,00353	kgCO ₂ e /(tona.km)
More	Prosječni kontejnerski brod	0,0161	kgCO ₂ e /(tona.km)
Željeznica		0,0278	kgCO ₂ e /(tona.km)

Tablica 9.: Emisija ugljika za predložene transportne scenarije (Izvor: [40])

Transportni scenarij	Tip	Udaljenost ceste (km)	Udaljenost željeznice (km)	Udaljenost more (km)	Faktor emisije ugljika	Jedinice
Lokalna proizvodnja	Cesta – 100% natovaren i prazan povratak	50			0,00682	tCO ₂ e/t
Nacionalna proizvodnja	Cesta – 100% natovaren i prazan povratak	300			0,0409	tCO ₂ e/t
Nacionalna proizvodnja	Cesta – 50% natovaren + željeznica	50	150		0,0101	tCO ₂ e/t
Europska proizvodnja	Cesta – 50% natovaren	1500			0,179	
Europska proizvodnja	Cesta – 50% natovaren + željeznica	500	1000		0,0873	tCO ₂ e/t

Globalna proizvodnja	Cesta – 50% natovaren + more (kontejner)	200		10000	0,185	tCO ₂ e/t
----------------------	---	-----	--	-------	-------	----------------------

Priroda izgradnje mosta može značiti da lokacija može biti udaljenija od uobičajenih gradilišta. Kao rezultat toga, treba uzeti u obzir putovanje do lokacije i povratno putovanje bez tereta. Malo je vjerojatno da će materijal koji se prevozi dosegnuti 100% kapaciteta teškog vozila s potpuno praznim povratnim putovanjem, ali radi jednostavnosti, ove su vrijednosti uključene kao početna točka. Za točne emisije iz prometa važno je uzeti u obzir cijelu udaljenost putovanja materijala [40].

Specijalizirana teretna vozila nisu pronađena u javno dostupnim podacima. Za te specijalizirane načine cestovnog prijevoza preporučuje se da se kao polazište upotrijebi vrijednost "Sva teška teretna vozila" pri čemu se povezani ugljik procjenjuje na temelju faktora ugljika. Pomorski i željeznički prijevoz može se izračunati pod pretpostavkom 100% opterećenja na jednosmjernom putovanju [40].

5.2.4. Proizvodnja (A3)

Osim za elemente mosta koji se izvode od materijala navedenih u tablici 7. potrebno je izračunati emisiju ugljikovog dioksida i za sastavne dijelove mosta koji se proizvode u tvornici poput: ležajeva, prijelaznih naprava, ograda, cijevi... Ovi faktori ugljika (tablica 10.) uglavnom su izračunati pomoću faktora ugljika navedenih u tablici 7. i količina dobivenih iz niza tehničkih detalja specijaliziranih dobavljača. Kao takvi, ti faktori ugljika ne uključuju nikakve dodatne emisije zbog rasipanja materijala, obrade ili sastavljanja osnovnih materijala u konačni proizvod.

Tablica 10.: Količina emitiranog ugljika za sekundarne elemente mosta (Izvor: [40])

ELEMENT	PODJELA 1	PODJELA 2	UTJELO- VLJENI UGLJIK A1- A3 [tCO ₂ e]	MJERNA JEDINICA
Ležajevi	Čelična klackalica/valjak	Vertikalna nosivost <400 t	2,00	
	Elastomerni	Vertikalna nosivost <1000 t	0,20	Po ležaju
		Vertikalna nosivost 1000 t < X < 2000 t	0,80	Po ležaju

	Kuglasti	Vertikalna nosivost <1000 t	1,21	Po ležaju
		Vertikalna nosivost 1000 t < X < 2000 t	5,63	Po ležaju
		Vertikalna nosivost 2000 t < X < 3000 t	10,26	Po ležaju
		Vertikalna nosivost 3000 t < X < 4000 t	15,75	Po ležaju
		Vertikalna nosivost 4000 t < X < 5000 t	21,57	Po ležaju
	Lončasti	Vertikalna nosivost <1000 t	0,97	Po ležaju
		Vertikalna nosivost 1000 t < X < 2000 t	5,09	Po ležaju
		Vertikalna nosivost 2000 t < X < 3000 t	9,29	Po ležaju
		Vertikalna nosivost 3000 t < X < 4000 t	14,28	Po ležaju
		Vertikalna nosivost 4000 t < X < 5000 t	18,07	
Dilatacijski spojevi	Svi tipovi	Raspon pomaka < 99 mm	0,14	Duljina spoja [m]
		Raspon pomaka 100 mm < X < 120 mm	0,37	Duljina spoja [m]
		Raspon pomaka X >120 mm	0,61	Duljina spoja [m]
Oplata	Trajna / privremena	GRP oplata ojačana čelikom	0,14	Površina oplata [m ²]
Zaštita od korozije	Boja na bazi polimera	Na bazi otapala - tipično	0,0018	Primijenjena površina [m ²]
		Na bazi otapala - morski	0,0041	Primijenjena površina [m ²]
	Vruće pocinčavanje	Samo cink premaz	0,0031	Primijenjena površina [m ²]
Cijevi	PVC cijev	Promjer <150mm	0,01	Duljina cijevi [m]
	Cijev od lijevanog željeza	Promjer <150mm	0,08	Duljina cijevi [m]
	Vitrificirana glinena cijev	Promjer <150mm	0,01	Duljina cijevi [m]

Zaštitni slojevi	Hidroizolacija	Fleksibilna folija / nanesena raspršivanjem	0,012	Površina hidroizolacije [m ²]
		Bitumenski sloj	0,005	Površina hidroizolacije [m ²]
	Asfalt	Prosječni sadržaj veziva	0,125	Volumen asfalta [m ³]
	Balast	Općenito	0,010	Volumen balasta [m ³]
	Kombinirana hidroizolacija i obloga	Općenito	0,026	Površina [m ²]
Ograde	Za vozilo – betonske ograde	Visoko zadržavanje	0,67	Duljina ograde [m]
		Standardno zadržavanje - vozila uz pješačku stazu	0,26	Duljina ograde [m]
	Za vozilo – čelične ograde	Standardno zadržavanje, visina 1,0 -1,5 m (pješačka staza)	0,18	Duljina ograde [m]
		Standardno zadržavanje, visina 1,5 - 1,8 m (biciklistička staza)	0,21	Duljina ograde [m]
		Standardno zadržavanje, visina >1,8 m (konjička staza)	0,25	Duljina ograde [m]
	Za vozilo – aluminijske ograde	Standardno zadržavanje, visina 1,0 -1,5 m (pješačka staza)	0,12	Duljina ograde [m]
		Standardno zadržavanje, visina 1,5 - 1,8 m (biciklistička staza)	0,13	Duljina ograde [m]
		Standardno zadržavanje, visina	0,16	Duljina ograde [m]

		>1,8 m (konjička staza)		
	Za pješake – čelične ograde	Standardno zadržavanje	0,18	Duljina ograde [m]
		Zadržavanje biciklističke staze	0,20	Duljina ograde [m]
		Zadržavanje konjičke staze	0,22	Duljina ograde [m]
	Za pješake – aluminijske ograde	Standardno zadržavanje	0,12	Duljina ograde [m]
		Zadržavanje biciklističke staze	0,16	Duljina ograde [m]
		Zadržavanje konjičke staze	0,20	Duljina ograde [m]

5.2.5. Izgradnja (A5)

Za aktivnosti izgradnje Net Zero Bridges Group predlaže izvođenje posebnih izračuna. To se može učiniti korištenjem faktora ugljika za potrošnju goriva izravno od izvođača ili korištenjem procjena vremena / goriva iz SPONS-a [41] ili slične referentne vrijednosti troškova / vremena / resursa. Sljedeća tablica 11. uključuje predloženi popis preliminarnih ECF-ova za uobičajene građevinske aktivnosti na temelju metode s upotrebom SPONS-a.

Tablica 11.: Emisija ugljika po aktivnostima (Izvor: [40])

AKTIVNOST	PROCES	NAPOMENA	FAKTOR UGLJIKA A5	MJERNA JEDINICA
Iskop - temelji (ne stijena do 5 m dubine)			4,7	kgCO ₂ e/m ³
Iskop - općenito (ne stijena do 5 m dubine)			3,7	kgCO ₂ e/m ³
Iskop (stijena)			15,2	kgCO ₂ e/m ³
Punjenje			2,2	kgCO ₂ e/m ³
Transport zemlje	Kruto teretno vozilo (50% natovareno)		0,215	kgCO ₂ e/(tona.km)

Duboko temeljenje - bušeni piloti			0,042	kgCO ₂ e/kgCO ₂ e(A1-3)
Duboko temeljenje - pomični piloti			0,043	kgCO ₂ e/kgCO ₂ e(A1-3)
Zidovi od lima			0,017	kgCO ₂ e/kgCO ₂ e(A1-3)
Podizanje	Dizalica (≤20 t nosivosti)		0,004	kgCO ₂ e/kg
	Dizalica (>40t nosivosti)		0,002	kgCO ₂ e/kg
Betoniranje na licu mjesta	Konstrukcijski beton	Baze, temelji, kape pilota i temeljne grede	7,6	kgCO ₂ e/m ³
		Zidovi	7,1	kgCO ₂ e/m ³
		Viseće ploče, palubne ploče, parapeti	10,9	kgCO ₂ e/m ³
		Stupovi, pristaništa i grede	19,1	kgCO ₂ e/m ³
	Oplata		2,2	kgCO ₂ e/m ³
	Pojačanje		0,01	tCO ₂ e/t
Nalijevanje	Baza		1,2	kgCO ₂ e/m ³
	Šljunak pomiješan sa katranom		5,7	kgCO ₂ e/m ³
	Asfalt		5,7	kgCO ₂ e/m ³
	Šljunak pomiješan sa katranom		2,9	kgCO ₂ e/m ³
	Asfalt		2,9	kgCO ₂ e/m ³
Proizvodnja čelika		Općenito	0,3	tCO ₂ e/t

Također pod ovim modulom potrebno je uzeti u obzir i sve gubitke materijala prilikom izgradnje. Oni se uzimaju u obzir pomoću faktora povećanja količine materijala ovisno o materijalu. Faktori povećanja su prikazani u tablici 12.

Tablica 12.: Gubici prilikom izvedbe za pojedini material (Izvor: [40])

MATERIJAL	STOPA OTPADA
Aluminij	1%
Cigla	20%
Staklo	5%
Beton, insitu	5%
Beton, montaža	1%
Mort/estrih	5%
Čelična ploča	1%
Čelično ojačanje	5%
Kamen	10%
Drveni okviri	1%
Drvena oplata	10%

5.3. Druga i treća faza životnog ciklusa

Za ove životne faze Net Zero Bridges Group ne daje smjernice [40].

Druga faza se dijeli na devet modula B1-B9: korištenje, održavanje, popravci, zamjene, obnavljanje itd. (slika 35.). Modul B9 predstavlja korisničku uporabu infrastrukture. Važno ga je uzeti u obzir za mostove, budući da emisije povezane s prometom na mostu mogu u nekim slučajevima nadmašiti kapitalni ugljik.

Treća faza životnog ciklusa predstavlja količinu emitiranog ugljika nakon prestanka korištenja mosta. Dijeli se na četiri modula C1-C4: rušenje, transport, obrada otpada, odlaganje otpada.

Postoje još dva modula koja pripadaju dodatnoj fazi izvan životnog ciklusa mosta, D1-D2. Oni obuhvaćaju: ponovnu upotrebu, recikliranje, električnu, toplinsku energiju itd. (slika 35.).

5.4. Normalizacija rezultata

Jedna od metoda za jednostavniji prikaz podataka je normalizacija podataka, a radi se na način da podijelimo podatke o ugljiku s površinom samog mosta tako da se mostovi mogu izravno usporediti. Normalizacija podataka može dati drugačiju perspektivu i pomoći u uspoređivanju novih mostova.

6. PRORAČUN

U ovom radu kao primjer proračuna ugljikovog otiska napravljena je usporedba dva mosta – prednapetog i spregnutog. Svi podaci o mostovima su preuzeti iz *Statički proračun prednapetog betonskog mosta* [42] i *Statički proračun spregnutog mosta* [43]. Mostovi su proračunati u sklopu programskog zadatka iz kolegija Mostovi 3 Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu. Dispozicije mostova priložene su u Prilogu A (spregnuti most) i Prilogu B (prednapeti most).

Mostovi premošćuju istu prepreku, imaju istu projektnu širinu prometnice, ali su različitog ustroja. Gornji ustroj spregnutog mosta čini spregnuta konstrukcija od dva glavna uzdužna nosača i betonske ploče te poprečni sekundarni nosači postavljeni na mjestima iznad ležajeva. Glavni nosači su čelični sandučasti nosači, a sekundarni nosači su čelični I profili. Donji ustroj čine dva armirano betonska upornjaka s paralelnim krilima, zidom promjenjive debljine i temeljem. Također, u donji ustroj spadaju tri stupišta promjenjive visine, koja se sastoje od dva stupa kružnog presjeka, naglavne grede i temelja. Oprema mosta se sastoji od kolničkog zastora, hidroizolacije, pješačkih staza, ograda, vijenaca, prijelazne ploče, prijelazne naprave i ležajeva.

Gornji ustroj spregnutog mosta čini predgotovljena betonska konstrukcija od četiri glavna uzdužna nosača i betonske ploče te poprečni sekundarni nosači postavljeni na mjestima iznad ležajeva. Glavni nosači su betonski Bulb tee profili, a sekundarni nosači su betonski kvadratni profili. Donji ustroj čine dva armirano betonska upornjaka s paralelnim krilima, zidom promjenjive debljine i temeljem. Također, u donji ustroj spada pet stupnih mjesta promjenjive visine, koja se sastoje od dva stupa kružnog presjeka, naglavne grede i temelja. Oprema mosta se sastoji od kolničkog zastora, hidroizolacije, pješačkih staza, ograda, vijenaca, prijelazne ploče, prijelazne naprave i ležajeva.

Proračun ugljičnog otiska napravljen je za prvu fazu životnog ciklusa mosta. Obuhvaćena su dva modula - opskrba sirovinama (A1) i proizvodnja dijelova (A3) (slika 35.). U proračunu se razmatra utjecaj na okoliš glavnih materijala i glavnih komponenti potrebnih za izgradnju ova dva mosta. Transport i ugradnja nisu uključeni u proračun zbog nedovoljne količine informacija. Također, uvedene su pojedine aproksimacije koje će biti naglašene u proračunu.

Za proračun modula A1 izračunate su količine građevinskog materijala potrebne za izgradnju elemenata i množene su faktorom emisije ugljikovog dioksida preuzetom iz tablice 7., dok su za proračun modula A3 vrijednosti dobivene gotovo identičnim postupkom. Obzirom da je riječ o sastavnim dijelovima mosta proizvedenim u tvornicama, množe se faktorom emisije sukladno specifikacijama dijelova (tablica 10.).

6.1. Proračun ugljičnog otiska spregnutog mosta

U tablici 13. napravljena je kategorizacija elemenata s obzirom na grupe elemenata. Slijedi proračun elemenata po grupama.

Tablica 13.: Raščlamba elemenata spregnutog mosta

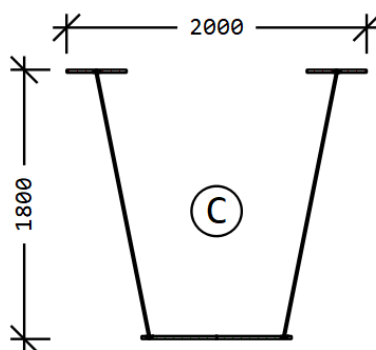
GRUPA ELEMENATA	ELEMENT	
Gornji ustroj	Nosači	Glavni nosači
		Sekundarni nosači
	Ploča	
Donji ustroj	Upornjaci	Temelj upornjaka
		Krila upornjaka (bez temelja)
		Prijelazna ploča
		Zid
	Stupište	Temelji
		Stupovi
		Grede
Oprema	Kolnik	
	Hodnik	Rubnjak i pješačka staza
		Vijenac
	Zaštitna ograda	Zaštitna ograda za udar vozila
		Zaštitna ograda za pješake
	Ležajevi	
Prijelazna naprava		

6.1.1. Proračun ugljičnog otiska elemenata gornjeg ustroja

6.1.1.1. Nosači

Glavni nosači

Most ima dva glavna uzdužna čelična sandučasta nosača promjenjive debljine pojasnica i hrptova duž mosta. Napravljena je aproksimacija tako što je uzeta srednja vrijednost površine nad ležajem i u polju. Površina nosača nad ležajem iznosi $A_{ležaj} = 0,1806 \text{ m}^2$, a onog u polju $A_{ležaj} = 0,1806 \text{ m}^2$. Srednja vrijednost površine koja će se primijeniti u proračunu iznosi $A_{nosač} = 0,1323 \text{ m}^2$. Poprečni presjek nosača prikazan je na slici 36.



Slika 36. Poprečni presjek glavnog nosača (Izvor: [43])

$$A_{\text{nosač}} = 0,1323 \text{ m}^2$$

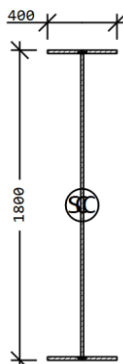
$$V_{\text{nosač}} = A_{\text{nosač}} \cdot L_{\text{nosač}} = 0,1323 \cdot 163 = 21,56 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{nosač}} = V_{\text{nosač}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 21,56 \cdot 82,4 = 1776,54 \text{ kN} \cdot 0,1 = 177,65 \text{ t}$$

$$E_{\text{nosač}} = G_{\text{nosač}} \cdot \beta^9 = 177,65 \cdot 1,55 = 275,36 \cdot 2 = \mathbf{550,72 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Sekundarni nosači

Na mostu ima pet poprečnih nosača postavljenih na mjestima iznad ležajeva. Poprečni presjek nosača je čelični I profil. Poprečni presjek nosača prikazan je na slici 37.



Slika 37.: Poprečni presjek poprečnog nosača (Izvor: [43])

$$A_{\text{nosač}} = 0,0442 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{nosač}} = A_{\text{nosač}} \cdot L_{\text{nosač}} = 0,0442 \cdot 5,9 = 0,2608 \text{ m}^3$$

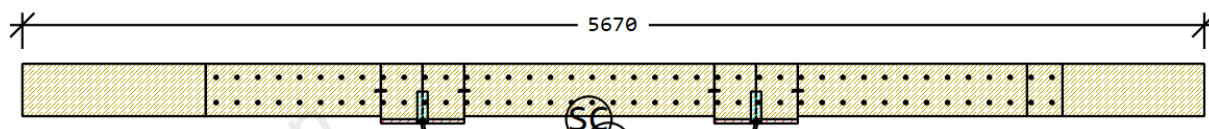
$$G_{\text{nosač}} = V_{\text{nosač}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 0,2608 \cdot 82,4 = 21,49 \text{ kN} \cdot 0,1 = 2,15 \text{ t}$$

$$E_{\text{nosač}} = G_{\text{nosač}} \cdot \beta = 2,15 \cdot 1,55 = 3,33 \cdot 5 = \mathbf{16,65 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

⁹ β – oznaka koju ćemo upotrebljavati za faktor emisije ugljika u proračunu.

6.1.1.2. Ploča

Na glavne nosače oslanja se ploča od armiranog betona. Upotrijebljeni materijali u ploči su beton kvalitete C35/45 te armatura kvalitete B500B. Debljina ploče je 25 cm, a armatura je postavljena u gornju i donju zonu unutar sudjelujuće širine pojedinog nosača (slika 38.). Potrebno je proračunati emisiju ugljika i za beton i za armaturu kako bi se dobila ukupna emisija ugljika ploče.



Slika 38.: Poprečni presjek betonske ploče (Izvor: [43])

- Beton

$$A_{\text{beton}} = 3,00 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot L_{\text{ploča}} = 3,00 \cdot 163 = 489 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 489 \cdot 25 = 12225 \text{ kN} \cdot 0,1 = 1222,5 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 1222,5 \cdot 0,149 = \mathbf{182,15 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm}} = 0,00824 \cdot 2 = 0,0164 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm}} \cdot L_{\text{ploča}} = 0,0164 \cdot 163 = 2,687 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 2,687 \cdot 78,5 = 210,90 \text{ kN} \cdot 0,1 = 21,09 \text{ t} \cdot 2 = 42,18 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 42,18 \cdot 1,99 = \mathbf{83,94 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{ploča}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 182,15 + 83,94 = \mathbf{266,09 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.1.2. Proračun ugljičnog otiska elemenata donjeg ustroja

6.1.2.1. Upornjaci

Na mostu se nalaze dva upornjaka čiji su elementi: temelj, krila, zid i prijelazna ploča. Potrebno je izračunati emisiju ugljika svakog od elemenata. Elementi su izrađeni od betona C35/45. U proračun je uzeta maksimalna armatura kvalitete B500B. Mali zaglavni zidić nije uzet u

proračun. Nacrti (pogledi, tlocrt i presjek upornjaka), sa naznačenim dimenzijama upornjaka nalaze se u Prilogu A.

Temelj upornjaka

- Beton

$$A_{\text{beton}} = B_{\text{temelj}} \cdot H_{\text{temelj}} = 7,75 \cdot 1,20 = 9,3 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot L_{\text{temelj}} = 9,3 \cdot 12,1 = 112,53 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 112,53 \cdot 25 = 2813,25 \text{ kN} \cdot 0,1 = 281,33 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 281,33 \cdot 0,149 = 41,92 \cdot 2 = \mathbf{83,84 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm,max}} = 0,2046 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot L_{\text{temelj}} = 0,2046 \cdot 12,1 = 2,48 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 2,48 \cdot 78,5 = 194,34 \text{ kN} \cdot 0,1 = 19,43 \text{ t} \cdot 2 = 38,87 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 38,87 \cdot 1,99 = \mathbf{77,35 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{temelj}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 83,84 + 77,35 = \mathbf{161,19 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Zid upornjaka

- Beton

$$A_{\text{beton}} = B_{\text{zid}} \cdot H_{\text{zid}} = 2,1 \cdot 5,5 = 11,55 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot L_{\text{zid}} = 11,55 \cdot 11,10 = 128,21 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 128,21 \cdot 25 = 3205,13 \text{ kN} \cdot 0,1 = 320,51 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 320,51 \cdot 0,149 = 47,76 \cdot 2 = \mathbf{95,52 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm,max}} = 0,2541 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot L_{\text{zid}} = 0,2541 \cdot 11,10 = 2,82 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 2,82 \cdot 78,5 = 221,41 \text{ kN} \cdot 0,1 = 22,14 \text{ t} \cdot 2 = 44,28 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 44,28 \cdot 1,99 = \mathbf{88,12 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{zid}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 95,52 + 88,12 = \mathbf{183,64 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Prijelazna ploča

- Beton

$$A_{\text{beton}} = B_{\text{ploča}} \cdot H_{\text{ploča}} = 4,0 \cdot 0,2 = 0,8 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot L_{\text{ploča}} = 0,8 \cdot 6,4 = 5,12 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 5,12 \cdot 25 = 128 \text{ kN} \cdot 0,1 = 12,8 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 12,8 \cdot 0,149 = 1,91 \cdot 2 = \mathbf{3,82 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm,max}} = 0,018 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot L_{\text{ploča}} = 0,018 \cdot 6,4 = 0,113 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 0,113 \cdot 78,5 = 8,84 \text{ kN} \cdot 0,1 = 0,88 \text{ t} \cdot 2 = 1,77 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 1,77 \cdot 1,99 = \mathbf{3,52 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{ploča}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 3,82 + 3,52 = \mathbf{7,34 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Krila upornjaka

- Beton

$$A_{\text{beton}} = 24,89 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot B_{\text{krila}} = 24,89 \cdot 0,5 = 12,44 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 12,44 \cdot 25 = 311,08 \text{ kN} \cdot 0,1 = 31,12 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 31,12 \cdot 0,149 = 4,64 \cdot 4 = \mathbf{18,56 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm,max}} = 0,548 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot B_{\text{krila}} = 0,548 \cdot 0,5 = 0,274 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 0,274 \cdot 78,5 = 21,49 \text{ kN} \cdot 0,1 = 2,15 \text{ t} \cdot 4 = 8,6 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 8,6 \cdot 1,99 = \mathbf{17,11 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{krila}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 18,56 + 17,11 = \mathbf{35,67 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{upornjak}} = 161,19 + 183,64 + 7,34 + 35,67 = \mathbf{387,84 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.1.2.2. Stupište

Postoje tri stupna mjesta u konstrukciji. Sastoje se od dva stupa u poprečnom smjeru kružnog presjeka. Visine stupova se mijenjaju i iznose u uzdužnom smjeru s lijeva na desno 7,93; 6,95; 5,16 m. Napravljena je aproksimacija visine tako da je uzeta srednja vrijednost visine stupova koja iznosi 6,68 m. Stupovi su izrađeni od betona C30/37 i armirani armaturom B500B. U tablici 7. nema faktora emisije ugljika za beton C30/37, stoga je uzet faktor za beton C28/35. Iznad stupova nalazi se naglavna greda, a ispod temelj. U proračun je uzeta maksimalna armatura temelja stupišta.

Temelj stupišta

- Beton

$$A_{\text{beton}} = B_{\text{temelj}} \cdot H_{\text{temelj}} = 4,3 \cdot 1,2 = 5,16 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot L_{\text{temelj}} = 5,16 \cdot 10,2 = 52,63 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 52,63 \cdot 25 = 1315,8 \text{ kN} \cdot 0,1 = 131,58 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 131,58 \cdot 0,138 = 18,15 \cdot 3 = \mathbf{54,45 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

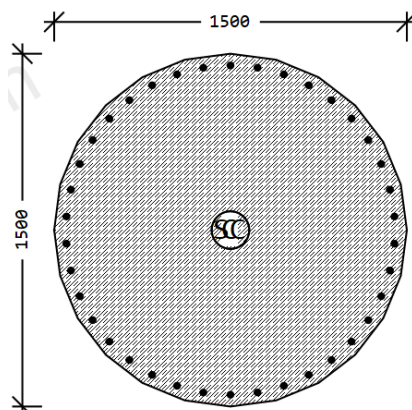
$$A_{\text{arm,max}} = 0,114 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot L_{\text{temelj}} = 0,114 \cdot 10,2 = 1,16 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 1,16 \cdot 78,5 = 90,9 \text{ kN} \cdot 0,1 = 9,09 \text{ t} \cdot 3 = 27,27 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 27,27 \cdot 1,99 = \mathbf{54,26 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{temelj}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 54,45 + 54,26 = \mathbf{108,71 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Stupovi

Slika 39.: Poprečni presjek stupa (Izvor: [43])

- Beton

$$A_{\text{beton}} = 1,767 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot H_{\text{stup}} = 1,767 \cdot 6,68 = 11,80 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 11,80 \cdot 25 = 295,09 \text{ kN} \cdot 0,1 = 29,51 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 29,51 \cdot 0,138 = 4,07 \cdot 6 = \mathbf{24,42 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

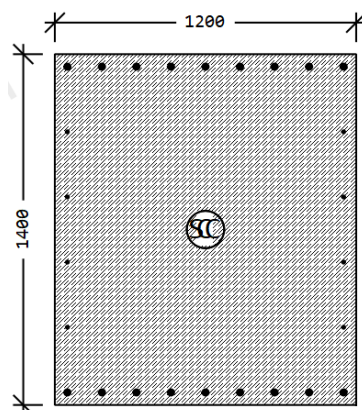
$$A_{\text{arm}} = 0,0186 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm}} \cdot H_{\text{stup}} = 0,0186 \cdot 6,68 = 0,125 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 0,125 \cdot 78,5 = 9,77 \text{ kN} \cdot 0,1 = 0,978 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 0,978 \cdot 1,99 = 1,95 \cdot 6 = \mathbf{11,7 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{stupovi}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 24,42 + 11,7 = \mathbf{36,12 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Naglavna greda

Slika 40.: Poprečni presjek naglavne grede (Izvor: [43])

- Beton

$$A_{\text{beton}} = 1,68 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot L_{\text{grede}} = 1,68 \cdot 10,2 = 17,14 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 17,14 \cdot 25 = 428,5 \text{ kN} \cdot 0,1 = 42,85 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 42,85 \cdot 0,138 = 5,91 \cdot 3 = \mathbf{17,73 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm}} = 0,00589 \cdot 2 = 0,0118 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm}} \cdot L_{\text{grede}} = 0,0118 \cdot 10,2 = 0,120 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 0,120 \cdot 78,5 = 9,43 \text{ kN} \cdot 0,1 = 0,943 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 0,943 \cdot 1,99 = 1,88 \cdot 3 = \mathbf{5,64 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

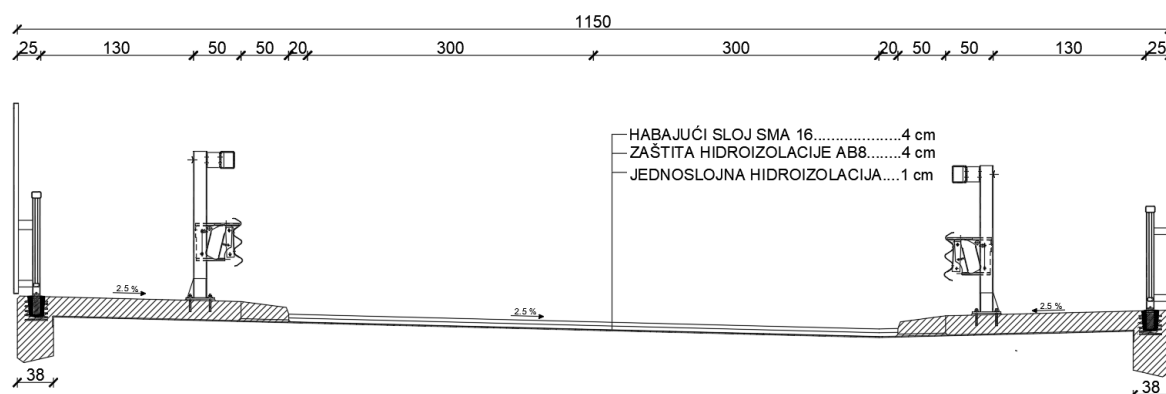
$$E_{\text{grede}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 17,73 + 5,64 = \mathbf{23,37 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{stupišta}} = 108,71 + 36,12 + 23,37 = \mathbf{168,2 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.1.3. Proračun ugljičnog otiska opreme mosta

U opremu mosta spadaju: kolnički zastor, hidroizolacija, pješačke staze, zaštitne ograde, vijenac, rubnjak, prijelazne naprave i ležajevi. Napravljena je aproksimacija širine pješačke

staze sa 160 cm na 130 cm, kako bi odgovarala onoj na prednapetom mostu (slika 41.). Rubnjak, pješačka staza i vijenac su armirani maksimalnom armaturom kvalitete B500B.



Slika 41.: Oprema mosta (Izvor: [43])

6.1.3.1. Kolnik

Hidroizolacija

$$A_{\text{hidro}} = B_{\text{kolnik}} \cdot L_{\text{kolnik}} = 6,4 \cdot 177,35 = 1135,04 \text{ m}^2$$

$$E_{\text{hidro}} = A_{\text{hidro}} \cdot \beta = 1135,04 \cdot 0,005 = \mathbf{5,675 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Asfalt

$$V_{\text{asfalt}} = A_{\text{hidro}} \cdot d_{\text{asfalt}} = 1135,04 \cdot 0,08 = 90,80 \text{ m}^3$$

$$E_{\text{asfalt}} = V_{\text{asfalt}} \cdot \beta = 90,80 \cdot 0,125 = \mathbf{11,35 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.1.3.2. Hodnik

Rubnjak i pješačka staza

- Beton

$$V_{\text{beton}} = H_{\text{hodnik}} \cdot B_{\text{hodnik}} \cdot L_{\text{hodnik}} = 0,2 \cdot 2,17 \cdot 177,35 = 76,97 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 76,97 \cdot 25 = 1924,25 \text{ kN} \cdot 0,1 = 192,42 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 192,42 \cdot 0,149 = 28,67 \cdot 2 = \mathbf{57,34 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm,max}} = 0,00955 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot L_{\text{hodnik}} = 0,00955 \cdot 177,35 = 1,69 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 1,69 \cdot 78,5 = 132,95 \text{ kN} \cdot 0,1 = 13,30 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 13,30 \cdot 1,99 = 26,46 \cdot 2 = \mathbf{52,92 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{rub}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 57,34 + 52,92 = \mathbf{110,26 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Vijenac

- Beton

$$V_{\text{beton}} = H_{\text{vijenac}} \cdot B_{\text{vijenac}} \cdot L_{\text{vijenac}} = 0,38 \cdot 0,7 \cdot 177,35 = 47,18 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 47,18 \cdot 25 = 1179,38 \text{ kN} \cdot 0,1 = 117,94 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 117,94 \cdot 0,149 = 17,57 \cdot 2 = \mathbf{35,15 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm,max}} = 0,00585 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot L_{\text{hodnik}} = 0,00585 \cdot 177,35 = 1,04 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 1,04 \cdot 78,5 = 81,47 \text{ kN} \cdot 0,1 = 8,15 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 8,15 \cdot 1,99 = 16,21 \cdot 2 = \mathbf{32,43 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{vijenac}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 35,15 + 32,43 = \mathbf{67,58 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{hodnik}} = 110,26 + 67,58 = \mathbf{177,84 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.1.3.3. Ograde

Za vozila

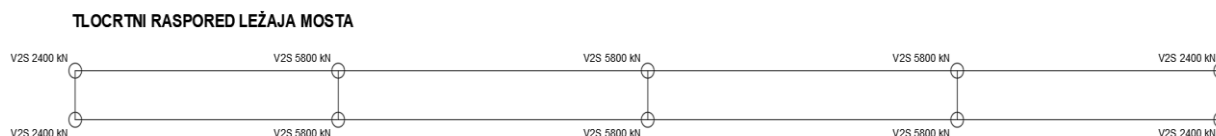
$$E_{\text{ograda}} = L_{\text{ograda}} \cdot \beta = 177,35 \cdot 0,21 = 37,24 \cdot 2 = \mathbf{74,48 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Za pješake

$$E_{\text{ograda}} = L_{\text{ograda}} \cdot \beta = 177,35 \cdot 0,18 = 31,92 \cdot 2 = \mathbf{63,84 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.1.3.4. Ležajevi

Na mostu se nalazi ukupno deset elastomernih ležajeva. Na svakom stupištu i na svakom upornjaku se nalaze po dva ležaja (slika 42.). Vertikalna nosivost svakog ležaja je manja od 1000 t.



Slika 42.: Tlocrtni raspored ležajeva mosta (Izvor: [43])

$$E_{\text{ležaj}} = N_{\text{ležaj}} \cdot \beta = 10 \cdot 0,2 = \mathbf{2,00 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.1.3.5. Prijelazna naprava

Na mostu se nalaze dvije prijelazne naprave. Na sjevernom kraju mosta na upornjaku U1 mjerodavna vrijednost pomaka je 80,9 mm te je odabrana prijelazna naprava tipa D160. Na južnom kraju mosta na upornjaku U2 mjerodavna vrijednost pomaka je 79,9 mm te je odabrana prijelazna naprava tipa D160.

$$E_{\text{naprava}} = L_{\text{naprava}} \cdot \beta = 6,4 \cdot 0,14 = 0,896 \cdot 2 = \mathbf{1,79 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.1.4. Rekapitulacija rezultata

U tablici 14. prikazana je rekapitulacija rezultata proračuna ugljičnog otiska spregnutog mosta. Prikazana je ukupna emisija pojedinih elemenata kao i emisija po grupama elemenata. Obzirom da beton i čelik uzrokuju najveći dio ukupne emisije, u tablici su navedene i količine emisije betona i čelika.

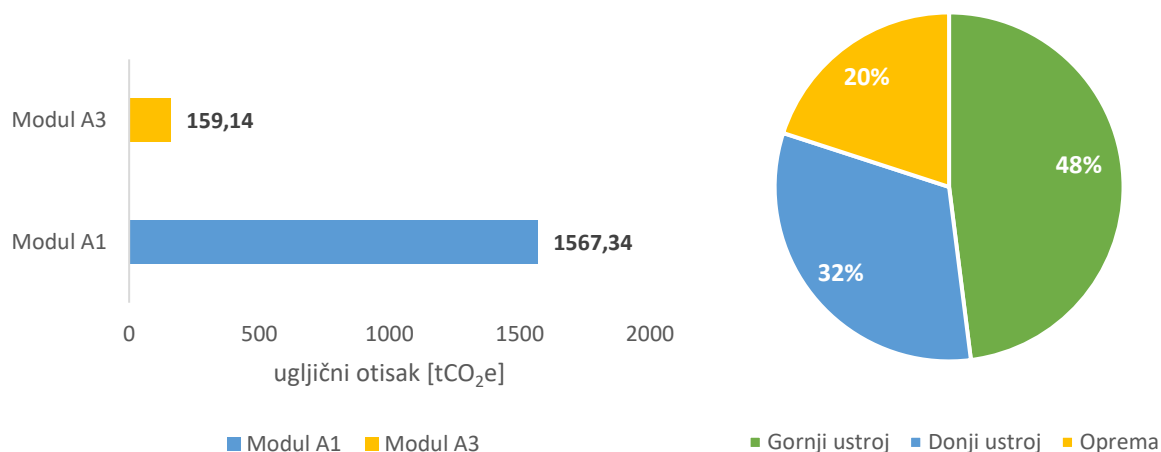
Tablica 14.: Rekapitulacija rezultata spregnutog mosta

Grupa elemenata	Podjela 1	Podjela 2	Emisija betona [tCO ₂ e]	Emisija čelika [tCO ₂ e]	Ukupna emisija [tCO ₂ e]
Gornji ustroj	Nosачи	Glavni nosачи		550,72	550,72
		Sekundarni nosачи		16,65	16,65
	Ploča		182,15	83,94	266,09

= 833,46 tCO₂e					
Donji ustroj	Upornjaci	Temelj upornjaka	83,84	77,35	161,19
		Krila upornjaka (bez temelja)	18,56	17,11	35,67
		Prijelazna ploča	3,82	3,52	7,34
		Zid	95,52	88,12	183,64
	Stupište	Temelji	54,45	54,26	108,71
		Stupovi	24,42	11,7	36,12
		Grede	17,73	5,64	23,37
= 556,04 tCO₂e					
Oprema	Kolnik	Hidroizolacija			5,68
		Asfalt			11,35
	Hodnik	Rubnjak i pješačka staza	57,34	52,92	110,26
		Vijenac	35,15	32,43	67,58
	Zaštitna ograda	Zaštitna ograda za udar vozila			74,48
		Zaštitna ograda za pješake			63,84
	Ležajevi				2,00
	Prijelazna naprava				1,79
	= 336,98 tCO₂e				
UKUPNO = 1726,48 tCO₂e					

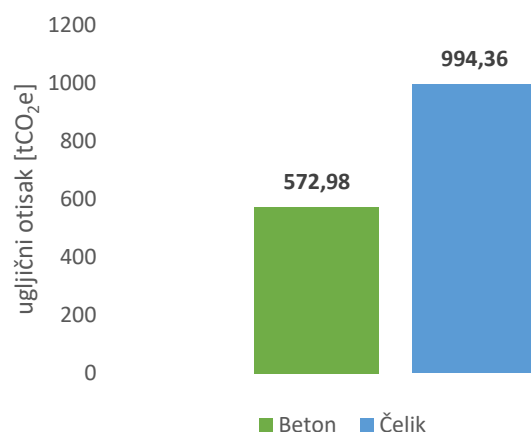
Lijevi grafikon na slici 43. prikazuje ugljični otisak spregnutog mosta obzirom na proračunate module A1 i A3. Na grafikonu je vidljivo da je za modul A1 emisija ugljika veća gotovo za deset puta od modula A3. U ugljični otisak modula A1 uključeni su svi elementi gornjeg i donjeg ustroja te elementi hodnika (rubnjak, pješačka staza i vijenac). Ugljični otisak hidroizolacije, asfalta, zaštitnih ograda, ležajeva i prijelaznih naprava pripada ukupnom ugljičnom otisku modula A3.

S obzirom na ugljični otisak spregnutog mosta po grupama elemenata (slika 43. desno), možemo zaključiti da najveći ugljični otisak ima gornji ustroj koji iznosi gotovo polovicu ukupnog ugljičnog otiska mosta. Potom slijedi donji ustroj s količinom od 32% te oprema mosta koja čini 20% ukupnog ugljičnog otiska spregnutog mosta.



Slika 43.: Ugljični otisak spregnutog mosta s obzirom na module (lijevo) i s obzirom na grupe elemenata (desno)

Na slici 44. prikazana je usporedba vrijednosti ugljičnog otiska betona i čelika spregnutog mosta. Vidljivo je da je ugljični otisak čelika gotovo duplo veći od ugljičnog otiska betona. Vrijednosti su očekivane s obzirom da su glavni i sekundarni nosači spregnutog mosta u potpunosti čelični, dok su elementi donjeg ustroja izvedeni od armiranog betona. U prilog tome ide i faktor emisije ugljika koji je za čelik znatno veći od onoga za beton.



Slika 44.: Ugljični otisak betona i čelika spregnutog mosta

6.2. Proračun ugljičnog otiska prednapetog mosta

U tablici 15. napravljena je kategorizacija elemenata s obzirom na grupe elemenata. Slijedi proračun elemenata po grupama.

Tablica 15.: Raščlamba elemenata prednapetog mosta

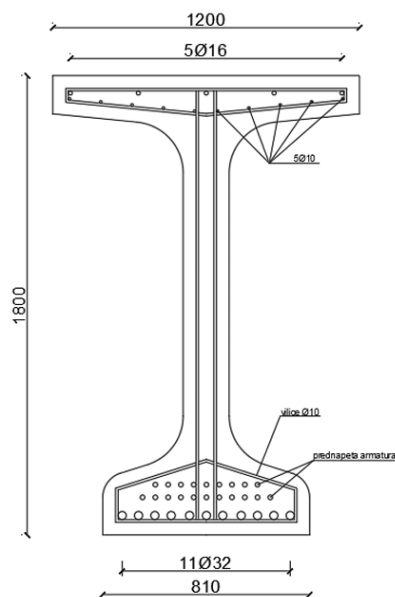
GRUPA ELEMENATA	ELEMENT	
Gornji ustroj	Nosači	Glavni nosači
		Sekundarni nosači
	Ploča	
Donji ustroj	Upornjaci	Temelj upornjaka
		Krila upornjaka (bez temelja)
		Prijelazna ploča
		Zid
	Stupište	Temelji
		Stupovi
		Grede
Oprema	Kolnik	
	Hodnik	Rubnjak i pješačka staza
		Vijenac
	Zaštitna ograda	Zaštitna ograda za udar vozila
		Zaštitna ograda za pješake
	Ležajevi	
Prijelazna naprava		

6.2.1. Proračun ugljičnog otiska elemenata gornjeg ustroja

6.2.1.1. Nosači

Glavni nosači

Most ima četiri glavna uzdužna betonska nosača Bulb tee profila. Izvedeni su od betona klase C45/55. Armirani su armaturom B500B i prednapetom armaturom. Nosači su adhezijski prednapinjani. Potrebno je izračunati emisije ugljika za obje armature i beton kako bi se dobio ukupan ugljični otisak nosača. Poprečni presjek nosača prikazan je na slici 45.



Slika 45.: Poprečni presjek glavnog nosača (Izvor: [42])

- Beton

$$A_{\text{beton}} = 0,7009 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot L_{\text{nosača}} = 0,7009 \cdot 180 = 126,16 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 126,16 \cdot 25 = 3154,05 \text{ kN} \cdot 0,1 = 315,41 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 315,41 \cdot 0,170 = 53,61 \cdot 4 = \mathbf{214,44 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm}} = 0,0101 + 0,0113 + 0,000785 = 0,0222 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm}} \cdot L_{\text{nosača}} = 0,0222 \cdot 180 = 3,99 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 3,99 \cdot 78,5 = 313,47 \text{ kN} \cdot 0,1 = 31,35 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 31,35 \cdot 1,99 = 62,38 \cdot 4 = \mathbf{249,52 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Prednapeta armatura

$$A_{\text{arm}} = 0,003 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm}} \cdot L_{\text{nosača}} = 0,003 \cdot 180 = 0,54 \text{ m}^3$$

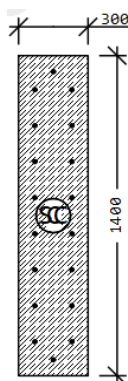
$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 0,54 \cdot 78,5 = 42,39 \text{ kN} \cdot 0,1 = 4,24 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 4,24 \cdot 1,99 = 8,44 \cdot 4 = \mathbf{33,76 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{nosač}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} + E_{\text{arm}} = 214,44 + 249,52 + 33,76 = 124,43 \cdot 4 = \mathbf{497,72 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Sekundarni nosači

Na mostu ima sedam poprečnih nosača, postavljenih na mjestima iznad ležajeva. Poprečni presjek nosača je betonski kvadratni profil. Izrađeni su od betona C40/50. Poprečni presjek nosača prikazan je na slici 46.



Slika 46.: Poprečni presjek poprečnog nosača (Izvor: [42])

- Beton

$$A_{\text{beton}} = 0,42 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot L_{\text{nosača}} = 0,42 \cdot 8,7 = 3,65 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 3,65 \cdot 25 = 91,35 \text{ kN} \cdot 0,1 = 9,14 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 9,14 \cdot 0,159 = 1,45 \cdot 7 = \mathbf{10,15 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm}} = 0,00201 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm}} \cdot L_{\text{nosača}} = 0,00201 \cdot 8,7 = 0,017 \text{ m}^3$$

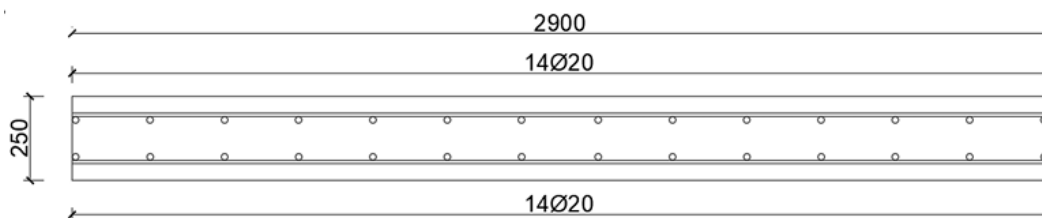
$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 0,017 \cdot 78,5 = 1,37 \text{ kN} \cdot 0,1 = 0,137 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 0,137 \cdot 1,99 = 0,273 \cdot 7 = \mathbf{1,91 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{nosač}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 10,15 + 1,91 = \mathbf{12,06 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.2.1.2. Ploča

Na glavne nosače oslanja se ploča od armiranog betona. Upotrijebljeni materijali u ploči su beton kvalitete C 35/45 te armatura kvalitete B 500 B. Debljina ploče je 25 cm, a armatura je postavljena u gornju i donju zonu unutar sudjelujuće širine pojedinog nosača (slika 47.). Potrebno je proračunati emisiju ugljika i za beton i za armaturu.



Slika 47.: Poprečni presjek betonske ploče (Izvor: [42])

- Beton

$$A_{\text{beton}} = 3,00 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot L_{\text{ploča}} = 3,00 \cdot 180 = 540 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 540 \cdot 25 = 13500 \text{ kN} \cdot 0,1 = 1350 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 1350 \cdot 0,149 = \mathbf{201,15 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm}} = 0,0044 \cdot 2 = 0,0088 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm}} \cdot L_{\text{ploča}} = 0,0088 \cdot 180 = 1,584 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 1,584 \cdot 78,5 = 124,34 \text{ kN} \cdot 0,1 = 12,43 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 12,43 \cdot 1,99 = 24,74 \cdot 4 = \mathbf{98,96 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{ploča}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 201,15 + 98,96 = \mathbf{300,11 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.2.2. Proračun ugljičnog otiska elemenata donjeg ustroja

6.2.2.1. Upornjaci

Na mostu se nalaze dva upornjaka čiji su elementi: temelj, krila, zid i prijelazna ploča. Potrebno je izračunati emisiju ugljika svakog od elemenata. Elementi su izrađeni od betona C35/45. U proračun je uzeta maksimalna armatura kvalitete B500B. Mali zaglavni zidić nije uzet u

proračun. Nacrti (pogledi, tlocrt i presjek upornjaka), sa naznačenim dimenzijama upornjaka nalaze se u Prilogu B.

Temelj upornjaka

- Beton

$$A_{\text{temelj}} = B_{\text{temelj}} \cdot H_{\text{temelj}} = 8,15 \cdot 1,5 = 12,23 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{temelj}} = A_{\text{temelj}} \cdot L_{\text{temelj}} = 12,23 \cdot 11,15 = 136,31 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{temelj}} = V_{\text{temelj}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 136,31 \cdot 25 = 3407,63 \text{ kN} \cdot 0,1 = 340,76 \text{ t}$$

$$E_{\text{temelj}} = G_{\text{temelj}} \cdot \beta = 340,76 \cdot 0,149 = 50,77 \cdot 2 = \mathbf{101,54 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm,max}} = 0,2691 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot L_{\text{temelj}} = 0,2691 \cdot 11,15 = 3,0 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 3,0 \cdot 78,5 = 235,5 \text{ kN} \cdot 0,1 = 23,55 \text{ t} \cdot 2 = 47,1 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 47,1 \cdot 1,99 = \mathbf{93,73 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{temelj}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 101,54 + 93,73 = \mathbf{195,27 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Zid upornjaka

- Beton

$$A_{\text{beton}} = B_{\text{zid}} \cdot H_{\text{zid}} = 1,5 \cdot 5,0 = 7,5 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot L_{\text{zid}} = 7,5 \cdot 10,15 = 76,13 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 76,13 \cdot 25 = 1903,13 \text{ kN} \cdot 0,1 = 190,31 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 190,31 \cdot 0,149 = 28,36 \cdot 2 = \mathbf{56,72 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm,max}} = 0,165 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot L_{\text{zid}} = 0,165 \cdot 10,15 = 1,67 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 1,67 \cdot 78,5 = 131,47 \text{ kN} \cdot 0,1 = 13,15 \text{ t} \cdot 2 = 26,29 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 26,29 \cdot 1,99 = \mathbf{52,32 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{zid}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 56,72 + 52,32 = \mathbf{109,04 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Prijelazna ploča

- Beton

$$A_{\text{beton}} = B_{\text{ploča}} \cdot H_{\text{ploča}} = 4,0 \cdot 0,3 = 1,2 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot L_{\text{ploča}} = 1,2 \cdot 6,4 = 7,68 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 7,68 \cdot 25 = 192 \text{ kN} \cdot 0,1 = 19,2 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 19,2 \cdot 0,149 = 2,86 \cdot 2 = \mathbf{5,72 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm,max}} = 0,0264 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot L_{\text{ploča}} = 0,0264 \cdot 6,4 = 0,169 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 0,169 \cdot 78,5 = 13,26 \text{ kN} \cdot 0,1 = 1,33 \text{ t} \cdot 2 = 2,65 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 2,65 \cdot 1,99 = \mathbf{5,28 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{ploča}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 5,72 + 5,28 = \mathbf{11,0 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Krila upornjaka

- Beton

$$A_{\text{beton}} = 15,09 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot B_{\text{krila}} = 15,09 \cdot 0,6 = 9,05 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 9,05 \cdot 25 = 226,35 \text{ kN} \cdot 0,1 = 22,64 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 22,64 \cdot 0,149 = 3,38 \cdot 4 = \mathbf{13,49 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm,max}} = 0,332 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot B_{\text{krila}} = 0,332 \cdot 0,6 = 0,199 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 0,199 \cdot 78,5 = 15,64 \text{ kN} \cdot 0,1 = 1,56 \text{ t} \cdot 4 = 6,25 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 6,25 \cdot 1,99 = \mathbf{12,45 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{krila}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 13,49 + 12,45 = \mathbf{25,94 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{upornjak}} = 195,27 + 109,04 + 11,0 + 25,94 = \mathbf{341,25 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.2.2.2. Stupište

Postoji pet stupnih mjesta u konstrukciji. Sastoje se od dva stupa u poprečnom smjeru kružnog presjeka. Visine stupova se mijenjaju i iznose u uzdužnom smjeru s lijeva na desno 8,82; 8,26; 7,30; 5,71; 4,18 m. Napravljena je aproksimacija visine tako da je uzeta srednja vrijednost visine stupova koja iznosi 6,85 m. Stupovi su izrađeni od betona C35/45 i armirani armaturom B500B. Iznad stupova nalazi se naglavna greda, a ispod temelj. U proračun je uzeta maksimalna armatura temelja stupišta.

Temelj stupišta

- Beton

$$A_{\text{temelj}} = B_{\text{temelj}} \cdot H_{\text{temelj}} = 6,5 \cdot 1,5 = 9,75 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{temelj}} = A_{\text{temelj}} \cdot L_{\text{temelj}} = 9,75 \cdot 12,71 = 123,92 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{temelj}} = V_{\text{temelj}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 123,92 \cdot 25 = 3098,06 \text{ kN} \cdot 0,1 = 309,81 \text{ t}$$

$$E_{\text{temelj}} = G_{\text{temelj}} \cdot \beta = 309,81 \cdot 0,149 = 46,16 \cdot 5 = \mathbf{230,81 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

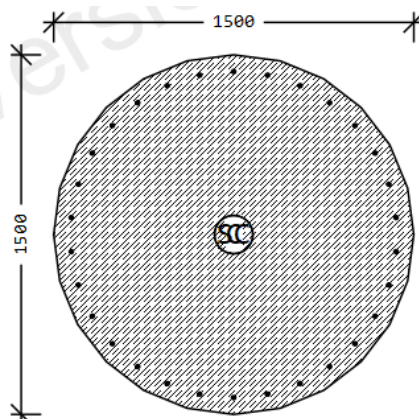
$$A_{\text{arm,max}} = 0,215 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot L_{\text{temelj}} = 0,215 \cdot 12,71 = 2,73 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 2,73 \cdot 78,5 = 214,01 \text{ kN} \cdot 0,1 = 21,40 \text{ t} \cdot 5 = 107 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 107 \cdot 1,99 = \mathbf{212,94 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{temelj}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 230,81 + 212,94 = \mathbf{443,75 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Stupovi

Slika 48.: Poprečni presjek stupa (Izvor: [42])

- Beton

$$A_{\text{beton}} = 1,767 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot H_{\text{stup}} = 1,767 \cdot 6,85 = 12,10 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 12,10 \cdot 25 = 302,60 \text{ kN} \cdot 0,1 = 30,26 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 30,26 \cdot 0,149 = 4,51 \cdot 10 = \mathbf{45,09 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

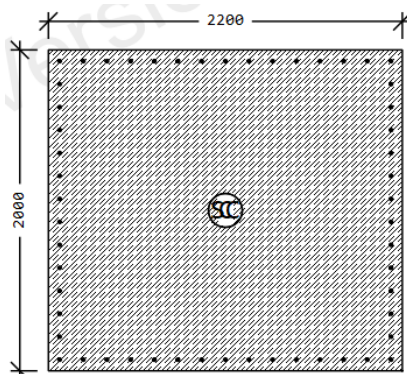
$$A_{\text{arm}} = 0,00628 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm}} \cdot H_{\text{stup}} = 0,00628 \cdot 6,85 = 0,043 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 0,043 \cdot 78,5 = 3,38 \text{ kN} \cdot 0,1 = 0,338 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 0,338 \cdot 1,99 = 0,67 \cdot 10 = \mathbf{6,72 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{stupovi}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 45,09 + 6,72 = \mathbf{51,81 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Naglavna greda

Slika 49.: Poprečni presjek naglavne grede (Izvor: [42])

- Beton

$$A_{\text{beton}} = 4,4 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{beton}} = A_{\text{beton}} \cdot L_{\text{grede}} = 4,4 \cdot 10,35 = 45,54 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{beton}} = V_{\text{beton}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 45,54 \cdot 25 = 1138,5 \text{ kN} \cdot 0,1 = 113,85 \text{ t}$$

$$E_{\text{beton}} = G_{\text{beton}} \cdot \beta = 113,85 \cdot 0,149 = 16,96 \cdot 5 = \mathbf{84,8 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm}} = 0,00471 \cdot 2 = 0,00942 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm}} \cdot L_{\text{grede}} = 0,00942 \cdot 10,35 = 0,120 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 0,097 \cdot 78,5 = 7,65 \text{ kN} \cdot 0,1 = 0,765 \text{ t}$$

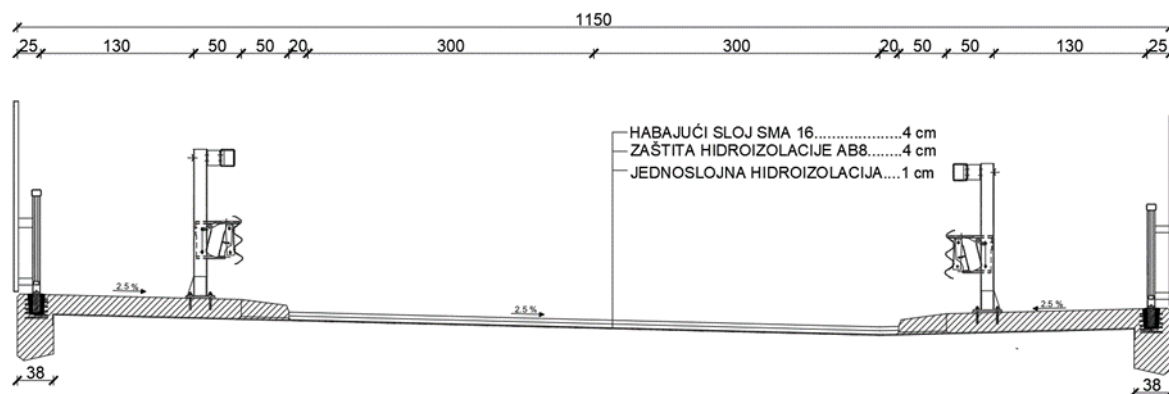
$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 0,765 \cdot 1,99 = 1,52 \cdot 5 = \mathbf{7,6 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{grede}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 84,8 + 7,6 = \mathbf{92,4 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{stupišta}} = 443,75 + 51,81 + 92,4 = \mathbf{587,96 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.2.3. Proračun ugljičnog otiska opreme mosta

U opremu mosta spadaju: kolnički zastor, hidroizolacija, pješačke staze, zaštitne ograde, vijenac, rubnjak, prijelazne naprave i ležajevi. Napravljena je aproksimacija širine pješačke staze sa 160 cm na 130 cm, kako bi odgovarala onoj na spregnutom mostu (slika 50.). Rubnjak, pješačka staza i vijenac su armirani maksimalnom armaturom kvalitete B500B.



Slika 50.: Oprema mosta (Izvor: [42])

6.2.3.1. Kolnik

Hidroizolacija

$$A_{\text{hidro}} = B_{\text{kolnik}} \cdot L_{\text{kolnik}} = 6,4 \cdot 189,75 = 1214,4 \text{ m}^2$$

$$E_{\text{hidro}} = A_{\text{hidro}} \cdot \beta = 1214,4 \cdot 0,005 = \mathbf{6,072 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Asfalt

$$V_{\text{asfalt}} = A_{\text{hidro}} \cdot d_{\text{asfalt}} = 1214,4 \cdot 0,08 = 97,152 \text{ m}^3$$

$$E_{\text{asfalt}} = V_{\text{asfalt}} \cdot \beta = 97,152 \cdot 0,125 = \mathbf{12,14 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.2.3.2. Hodnik

Rubnjak i pješačka staza

- Beton

$$V_{\text{hodnik}} = H_{\text{hodnik}} \cdot B_{\text{hodnik}} \cdot L_{\text{hodnik}} = 0,2 \cdot 2,17 \cdot 189,75 = 82,35 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{hodnik}} = V_{\text{hodnik}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 82,35 \cdot 25 = 2058,79 \text{ kN} \cdot 0,1 = 205,88 \text{ t}$$

$$E_{\text{hodnik}} = G_{\text{hodnik}} \cdot \beta = 205,88 \cdot 0,149 = 30,68 \cdot 2 = \mathbf{61,36 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm,max}} = 0,00955 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot L_{\text{hodnik}} = 0,00955 \cdot 189,75 = 1,81 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 1,81 \cdot 78,5 = 142,25 \text{ kN} \cdot 0,1 = 14,23 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 14,23 \cdot 1,99 = 28,31 \cdot 2 = \mathbf{56,62 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{rub}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 61,36 + 56,62 = \mathbf{117,98 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

Vijenac

- Beton

$$V_{\text{vijenac}} = H_{\text{vijenac}} \cdot B_{\text{vijenac}} \cdot L_{\text{vijenac}} = 0,38 \cdot 0,7 \cdot 189,75 = 50,47 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{vijenac}} = V_{\text{vijenac}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 50,47 \cdot 25 = 1261,84 \text{ kN} \cdot 0,1 = 126,18 \text{ t}$$

$$E_{\text{vijenac}} = G_{\text{vijenac}} \cdot \beta = 126,18 \cdot 0,149 = 18,8 \cdot 2 = \mathbf{37,6 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

- Armatura

$$A_{\text{arm,max}} = 0,00585 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{arm}} = A_{\text{arm,max}} \cdot L_{\text{hodnik}} = 0,00585 \cdot 189,75 = 1,11 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} \cdot \gamma_{\text{čelik}} = 1,11 \cdot 78,5 = 87,14 \text{ kN} \cdot 0,1 = 8,71 \text{ t}$$

$$E_{\text{arm}} = G_{\text{arm}} \cdot \beta = 8,71 \cdot 1,99 = 17,34 \cdot 2 = \mathbf{34,68 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{vijenac}} = E_{\text{beton}} + E_{\text{arm}} = 37,6 + 34,68 = \mathbf{72,28 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

$$E_{\text{hodnik}} = 117,98 + 72,28 = \mathbf{190,26 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.2.3.3. Ograde

Za vozila

$$E_{\text{ograda}} = L_{\text{ograda}} \cdot \beta = 189,75 \cdot 0,21 = 39,85 \cdot 2 = \mathbf{79,7 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

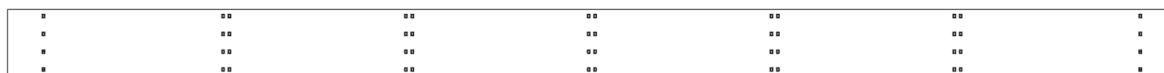
Za pješake

$$E_{\text{ograda}} = L_{\text{ograda}} \cdot \beta = 189,75 \cdot 0,18 = 34,16 \cdot 2 = \mathbf{68,32 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.2.3.4. Ležajevi

Na mostu se nalazi ukupno 48 elastomernih ležajeva. Na svakom stupištu se nalazi osam ležajeva, a na svakom upornjaku se nalaze po četiri ležaja. Vertikalna nosivost svih ležajeva je manja od 1000 t.

TLOCRTNI RASPORED LEŽAJA MOSTA



Slika 51.: Tlocrtni raspored ležajeva mosta (Izvor: [42])

$$E_{\text{ležaj}} = N_{\text{ležaj}} \cdot \beta = 48 \cdot 0,2 = \mathbf{9,6 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.2.3.5. Prijelazna naprava

Na mostu se nalaze dvije prijelazne naprave. Na sjevernom kraju mosta na upornjaku U1 mjerodavna vrijednost pomaka je 23,55 mm te je odabrana prijelazna naprava tipa D160. Na južnom kraju mosta na upornjaku U2 mjerodavna vrijednost pomaka je 23,94 mm te je odabrana prijelazna naprava tipa D160.

$$E_{\text{naprava}} = L_{\text{naprava}} \cdot \beta = 6,4 \cdot 0,14 = 0,896 \cdot 2 = \mathbf{1,79 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

6.2.4. Rekapitulacija rezultata

U tablici 16. prikazana je rekapitulacija rezultata proračuna ugljičnog otiska prednapetog mosta. Prikazana je ukupna emisija pojedinih elemenata kao i emisija po grupama elemenata. Obzirom da beton i čelik uzrokuju najveći dio ukupne emisije, u tablici su navedene i količine emisije betona i čelika.

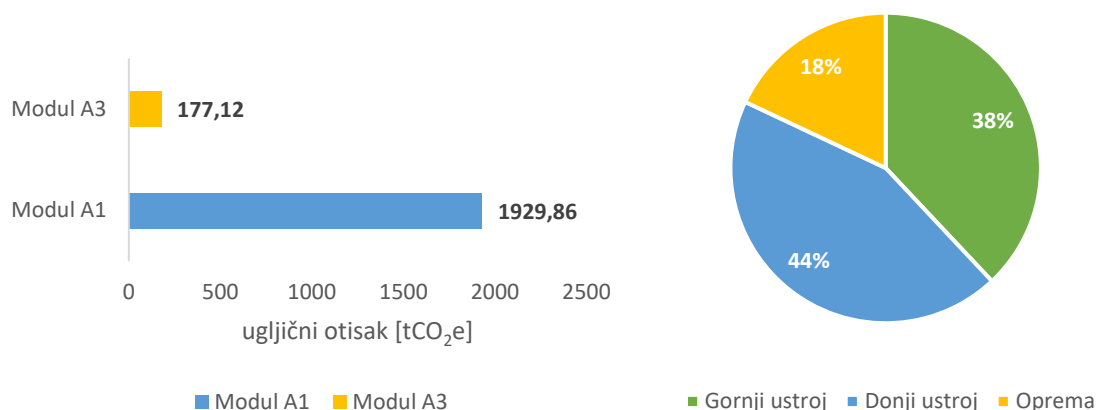
Tablica 16.: Rekapitulacija rezultata prednapetog mosta

Grupa elemenata	Podjela 1	Podjela 2	Emisija betona [tCO ₂ e]	Emisija čelika [tCO ₂ e]	Ukupna emisija [tCO ₂ e]
Gornji ustroj	Nosачи	Glavni nosачи	214,44	283,28	497,72
		Sekundarni nosачи	10,15	1,91	12,06
	Ploča		201,15	98,96	300,11
= 809,89 tCO₂e					
Donji ustroj	Upornjaci	Temelj upornjaka	101,54	93,73	195,27
		Krila upornjaka (bez temelja)	13,49	12,45	25,94
		Prijelazna ploča	5,72	5,28	11,0
		Zid	56,72	52,32	109,04

	Stupište	Temelji	230,81	212,94	443,75	
		Stupovi	45,09	6,72	51,81	
		Grede	84,8	7,6	92,4	
					= 929,21 tCO₂e	
Oprema	Kolnik	Hidroizolacija			6,07	
		Asfalt			12,14	
	Hodnik	Rubnjak i pješačka staza	61,36	56,62	117,98	
		Vijenac	37,6	34,68	72,28	
	Zaštitna ograda	Zaštitna ograda za udar vozila			79,7	
		Zaštitna ograda za pješake			68,32	
	Ležajevi				9,6	
	Prijelazna naprava				1,79	
						= 367,88 tCO₂e
						UKUPNO: 2106,98 tCO₂e

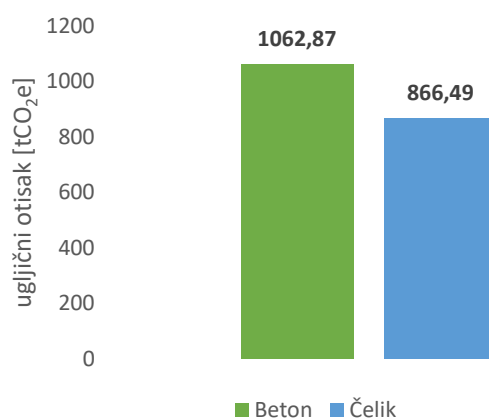
Lijevi grafikon na slici 52. prikazuje ugljični otisak spregnutog mosta obzirom na proračunate module A1 i A3. Na grafikonu je vidljivo da je za modul A1 emisija ugljika veća za više od deset puta od modula A3. U ugljični otisak modula A1 uključeni su svi elementi gornjeg i donjeg ustroja te elementi hodnika (rubnjak, pješačka staza i vijenac). Ugljični otisak hidroizolacije, asfalta, zaštitnih ograda, ležajeva i prijelaznih naprava pripada ukupnom ugljičnom otisku modula A3.

S obzirom na ugljični otisak prednapetog mosta po grupama elemenata (slika 52. desno), možemo zaključiti da najveći ugljični otisak ima donji ustroj koji iznosi 44%, potom slijedi gornji ustroj s količinom od 38% te oprema mosta koja čini 18% ukupnog ugljičnog otiska prednapetog mosta.



Slika 52.: Ugljični otisak prednapetog mosta s obzirom na module (lijevo) i s obzirom na grupe elemenata (desno)

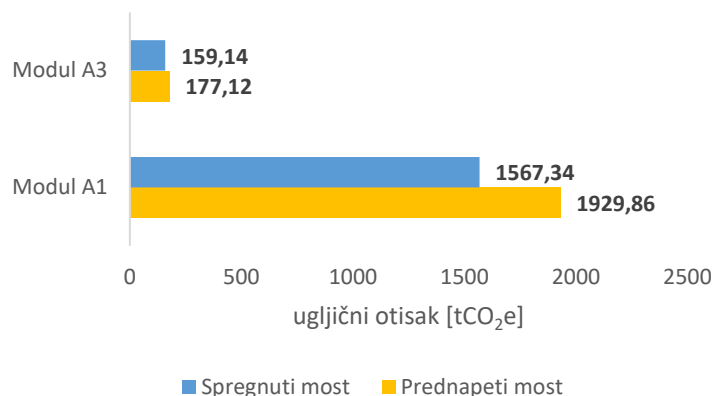
Na slici 53. prikazana je usporedba vrijednosti ugljičnog otiska betona i čelika prednapetog mosta. Vidljivo je da je ugljični otisak betona veći od ugljičnog otiska čelika. Kod prednapetog mosta svi elementi gornjeg i donjeg ustroja izvedeni su od armiranog betona. Čelik ima znatno veći faktor emisije ugljika od faktora emisije betona, stoga je ugljični otisak čelika u prednapetom mostu veoma visok.



Slika 53.: Ugljični otisak betona i čelika prednapetog mosta

6.3. Usporedba rezultata spregnutog i prednapetog mosta

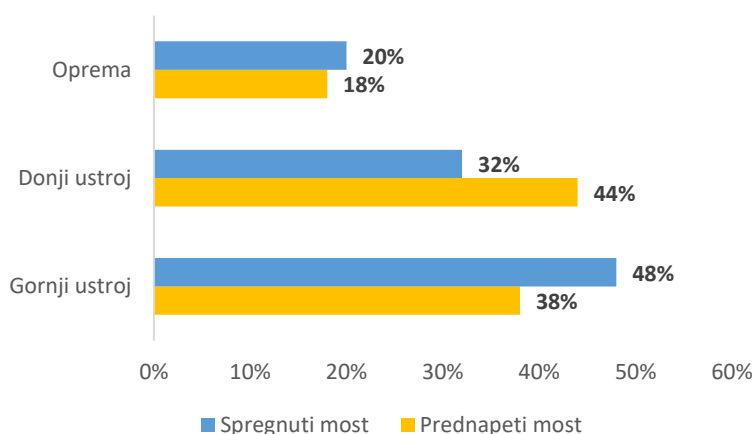
Na temelju dobivenih vrijednosti iz proračuna ugljičnog otiska spregnutog i prednapetog mosta napravljena je usporedba rezultata s obzirom na module A1 i A3, grupe elemenata, emisije betona i čelika te izravna usporedba normaliziranih rezultata mostova s obzirom na njihovu korisnu površinu.



Slika 54.: Usporedba ugljičnog otiska spregnutog i prednapetog mosta s obzirom na module

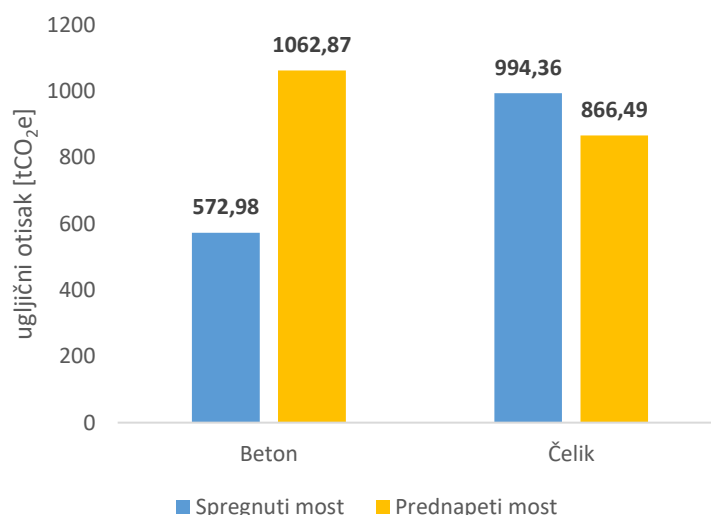
Na slici 54. vidljivo je da je i na spregnutom i na prednapetom mostu ugljični otisak približno deset puta veći za modul A1 nego za modul A3. Razlog tomu je što svi elementi gornjeg i donjeg ustroja te elementi hodnika (rubnjak, pješačka staza i vijenac) pripadaju modulu A1. Iz grafikona na slici 55. vidljivo je da gornji i donji ustroj imaju znatno veće ugljične otiske od opreme koja pripada modulu A3. Ugljični otisak hidroizolacije, asfalta, zaštitnih ograda, ležajeva i prijelaznih naprava pripada ukupnom ugljičnom otisku modula A3.

S obzirom na ukupnu količinu emisije ugljika, veći ugljični otisak ima prednapeti most. No, ne mora značiti da će prednapeti most imati veću emisiju za cijelu prvu fazu životnog ciklusa. U ovom radu nisu proračunati moduli transporta i ugradnje koji itekako mogu imati veliki utjecaj na količinu ugljičnog otiska konstrukcije.



Slika 55.: Usporedba ugljičnog otiska spregnutog i prednapetog mosta s obzirom na grupe elemenata

Uspoređujući ugljični otisak s obzirom na grupe elemenata (slika 55.) uočavamo da oprema ima najmanji udio u ukupnom ugljičnom otisku i za spregnuti i za prednapeti most. Taj ugljični otisak je približno jednak za oba mosta. Razlika koju možemo uočiti vezana je uz gornji i donji ustroj mostova. Spregnuti most ima najveći ugljični otisak za gornji ustroj koji iznosi gotovo polovicu ukupnog ugljičnog otiska spregnutog mosta. Kod prednapetog mosta najveći ugljični otisak ima donji ustroj u iznosu 44% ukupnog ugljičnog otiska prednapetog mosta.



Slika 56.: Usporedba ugljičnog otiska betona i čelika za spregnuti i prednapeti most

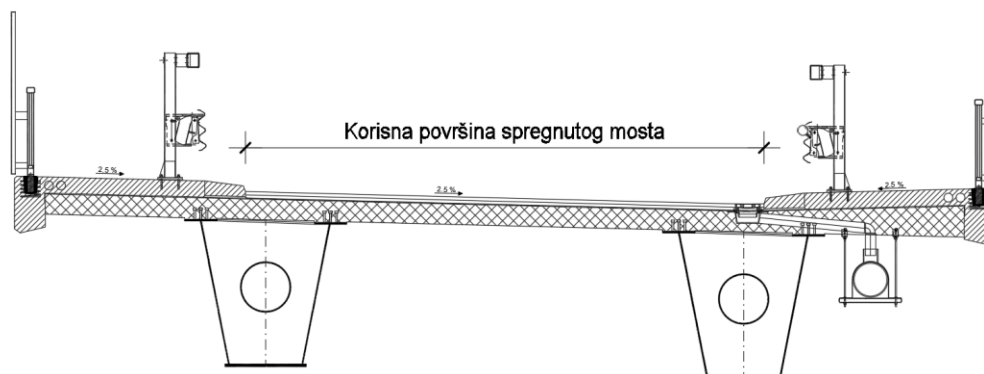
Beton i čelik su glavni materijali koji se koriste prilikom izvedbe elemenata ovih mostova. Na slici 56. vidljivo je da prednapeti most ima duplo veći ugljični otisak betona od spregnutog mosta. To je nekako i očekivano s obzirom da su glavni nosači spregnutog mosta izvedeni od čelika, a prednapetog mosta od betona. Vrijednosti ugljičnog otiska čelika su veće za spregnuti most iako razlika nije ni približno velika kao za beton.

6.3.1. Normalizacija rezultata

Kako bi izravno mogli usporediti rezultate proračuna ugljičnog otiska spregnutog i prednapetog mosta napraviti ćemo normalizaciju rezultata. Ona služi za jednostavniji prikaz podataka, a radi se na način da podijelimo ukupni ugljični otisak pojedinog mosta s njegovom korisnom površinom.

Spregnuti most

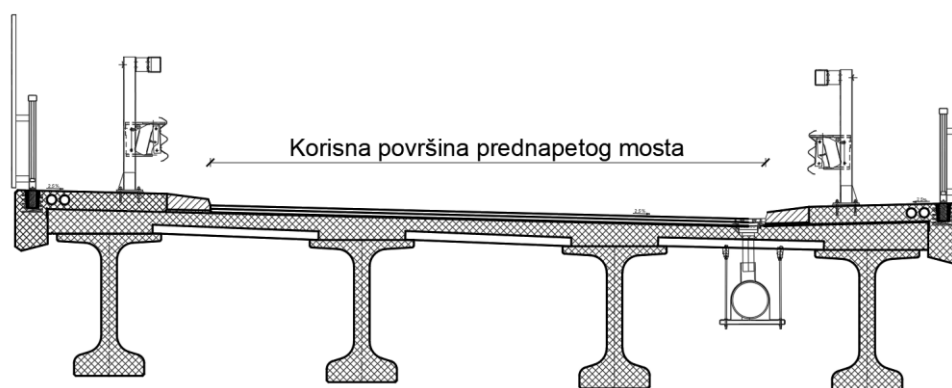
$$N = \frac{\text{ukupan ugljični otisak spregnutog mosta}}{\text{korisna površina spregnutog mosta}} = \frac{1726,48}{163} = 10,59 \frac{\text{tCO}_2\text{e}}{\text{m}^2}$$



Slika 57.: Korisna površina spregnutog mosta (Izvor: [43])

Prednapeti most

$$N = \frac{\text{ukupan ugljični otisak prednapetog mosta}}{\text{korisna površina prednapetog mosta}} = \frac{2106,98}{180} = 11,71 \frac{\text{tCO}_2\text{e}}{\text{m}^2}$$



Slika 58.: Korisna površina prednapetog mosta (Izvor: [42])

Normalizacijom potvrđujemo da prednapeti most ima veći ugljični otisak. Stvarnu situaciju na kraju životnog ciklusa mosta ne možemo znati jer je proračun napravljen samo za module A1 i A3. Preostali moduli prve faze te moduli druge i treće faze mogu značajno promijeniti trenutne rezultate.

Vidjeli smo koliko je proračun ugljičnog otiska složen, zahtjevan i još uvijek nedovoljno istražen postupak. Ovisi o nizu faktora koji se učestalo ažuriraju. Za proračun ugljičnog otiska razvijaju se i razni računalni programi koji svojim modelima olakšavaju ovaj postupak.

7. ZAKLJUČAK

Zaključak ovoga rada može se sažeti kroz nekoliko ključnih točaka koje se tiču utjecaja klimatskih promjena i ugljičnog otiska građevinskih konstrukcija. Klimatske promjene predstavljaju sve veći izazov kako za našu budućnost tako i za građevinske konstrukcije. Ekstremni vremenski uvjeti, poput povećanja temperature, promjena u količini padalina, poplava, podizanja razine mora te uragana mogu značajno utjecati na trajnost i stabilnost konstrukcija. Ove promjene donose nove izazove građevinskim inženjerima, koji moraju osigurati da građevine budu otporne i prilagođene nadolazećim klimatskim uvjetima. Kako bi inženjeri mogli ispuniti svoju zadaću potrebna su istraživanja utjecaja porasta intenziteta i učestalosti ekstremnih događaja na građevine u bliskoj i daljoj budućnosti. Za to su potrebni razni modeli koje struka redovito unapređuje kako bi se u obzir moglo uzeti što više čimbenika i prikazati što realnija situacija.

Građevine, osobito mostovi zbog svoje velike izloženosti okolišnim utjecajima, osjetljive su na proces degradacije materijala. Posljedice su: smanjenje vijeka trajanja građevine, smanjenje sigurnosti, funkcionalnosti i trajnosti, sukladno se povećavaju troškovi izgradnje i održavanja. Očekuje se da će učestalije poplave, promjene u protoku rijeka i porast temperature ubrzati dva glavna procesa propadanja – prodor klorida i karbonatizaciju. Ovi procesi ubrzat će napredak prema vodećem uzroku propadanja betonskih konstrukcija, koroziji armature. Posebno su ugrožene obalne građevine. Inženjeri će morati prilagoditi metode projektiranja i održavanja kako bi produžili vijek trajanja građevina, osobito mostova koji imaju dug zahtijevani uporabni vijek i do 100 godina. Jedan od ključnih aspekata ove prilagodbe je primjena novih materijala i tehnologija, koji smanjuju emisije ugljičnog dioksida te pomažu u smanjenju ukupnog ugljičnog otiska građevina, a samim time i smanjenju klimatskih promjena koje su izravna posljedica prevelike količine stakleničkih plinova u atmosferi.

Vezano uz ugljični otisak, ovaj rad naglašava da građevinska industrija ima velik udio u emisiji stakleničkih plinova, prvenstveno zbog korištenja materijala kao što su beton i čelik. Proizvodnja ovih materijala naročito povećava emisiju CO₂. Usporedbe ugljičnih otisaka građevina, pokazuju da mostovi imaju veći ugljični otisak u odnosu na zgrade, zbog veće količine korištenog materijala i dužeg uporabnog vijeka. Dekarbonizacija mostova usmjerena je na produljenje uporabnog vijeka već postojećih mostova. Cilj je izbjeći potrebu za gradnjom novog mosta što je ostvarivo ukoliko se postojeće mostove prikladno održava, ocjenjuje te im se dokaže dostatna nosivost prikladnim proračunom. Ugljični otisak zgrada vezan je uz njihovu energetske učinkovitost, veća potrošnja energije rezultira većim emisijama ugljika. Kako bi se smanjio ugljični otisak potrebno je postaviti ciljeve smanjenja, razviti planove i pratiti napredak. Kako bi se mogao uočiti napredak moramo početi mjeriti svoje ugljične otiske. Sposobnost inženjera da utječu na smanjenje ugljika najveća je u ranim fazama projektiranja, a brzo se smanjuje kako razvoj projekta napreduje. Smanjenje ugljičnog otiska moguće je kroz

razne mjere, kao što su optimizacija projektiranja, korištenje recikliranih materijala i implementacija novih tehnologija koje omogućuju energetske učinkovitost. Zemlje poput Danske, Kine, Njemačke i UK uvode svoje smjernice kako bi postale u potpunosti klimatski neutralne u budućnosti.

Pojednostavljenim proračunom ugljičnog otiska koji uspoređuje spregnuti i prednapeti most ustanovljeno je da je emisija ugljika veća kod prednapetog mosta. Proračun je napravljen samo za module A1 i A3 tako da stvarnu situaciju na kraju životnog ciklusa mosta ne možemo znati. Iako je za premostiti prepreku potrebna manja količina čelika nego betona, faktor emisije ugljika za čelik je znatno veći od onoga za beton pa su emisije konkurentne. Proračun ugljičnog otiska je veoma složen i još uvijek nezastupljen postupak koji ovisi o nizu faktora. Za olakšanje postupka proračuna danas se koriste različiti softverski modeli.

Konačno, ovaj rad pokazuje da su klimatske promjene neizbježne i da će njihovi učinci postati sve izraženiji. Građevinska industrija ima ključnu ulogu u prilagodbi na ove promjene, ali i u smanjenju svog doprinosa klimatskim promjenama putem smanjenja emisija ugljika. Inženjeri građevinarstva moraju preuzeti odgovornost u osmišljavanju rješenja koja će biti održiva, dugotrajna i u skladu s potrebama budućih generacija.

POPIS LITERATURA

- [1] Milić P., Kušter Marić M. Utjecaj klimatskih promjena na trajnost mostova i druge infrastrukture. *Građevinar*. 2023; 9: 893-906.
- [2] European Commission. Our planet, Our future. *European Commission*. Dostupno: https://our-planet-our-future.climate.ec.europa.eu/impacts_en [Pristupljeno: 25. srpnja 2024.].
- [3] European Commission. Our planet, Our future. *European Commission*. Dostupno: https://our-planet-our-future.climate.ec.europa.eu/causes_en [Pristupljeno: 25. srpnja 2024.].
- [4] Orcesi A. i dr. Investigating the Effects of Climate Change on Structural Actions. *Structural Engineering International*. 2022; 4: 563-576.
- [5] Orcesi, A. i dr. Investigating the Effects of Climate Change on Material Properties and Structural Performance. *Structural Engineering International*. 2022; 4: 577-588.
- [6] Kuba M. Impact of Climate Changes on Civil Engineering Structures. *Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet*. 2017.
- [7] Goleš N., Kukuljica P., Milutinović N. Ugljični otisak mostova – Carbon Footprint of Bridges. *Sveučilište u Zagreb, Građevinski fakultet*. 2024.
- [8] Klimatske promjene. *Europska unija*. Dostupno: https://climate-pact.europa.eu/about/climate-change_hr [Pristupljeno: 25. srpnja 2024.].
- [9] Biškup D., Gagula L. Utjecaj klimatskih promjena na konstrukcije. *Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet*. 2023.
- [10] Ilić Z. Stanje zbog poplava u Njemačkoj i dalje kritično. *DW*. Dostupno: <https://www.dw.com/bs/stanje-zbog-poplava-u-njema%C4%8Dkoj-i-dalje-kriti%C4%8Dno/a-16863142> [Pristupljeno: 3. kolovoza 2024.].
- [11] Kuspilić N., Gilja G. Utjecaj vodotoka na sigurnost mostova. *E-ZBORNİK*. 2018;16.
- [12] Ekstremne temperature. *Hrvatska platforma za smanjenje rizika od katastrofa*. Dostupno: https://civilnazastita.gov.hr/UserDocsImages/CIVILNA%20ZA%C5%A0TITA/PDF_ZA%20WEB/Ekstremne%20temperature_bro%C5%A1ura%20A5%20-%20web.pdf [Pristupljeno: 7. kolovoza 2024.].
- [13] Snimke Miamijsa prije i poslije uragana prikazuju štetu. *N1 Info*. Dostupno: <https://n1info.ba/svijet/a203880-snimak-miamija-prije-i-poslije/> [Pristupljeno: 18. kolovoza 2024.].

-
- [14] Kalebić B. Rotterdamski plutajući park od reciklirane plastike. *Ekovjesnik*. Dostupno: <https://www.ekovjesnik.hr/clanak/796/rotterdamski-plutajuci-park-od-reciklirane-plastike> [Pristupljeno: 18. kolovoza 2024.].
- [15] Neuspjesi, nesreće, katastrofe [Kolegij: Trajnost konstrukcija 1]. *Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet*. Dostupno: [09 trajnost konstrukcija I.pdf](#) [Pristupljeno: 18. kolovoza 2024.].
- [16] Betonski tornjevi osnovni dijelovi, temeljenje, proračun i dimenzioniranje [Kolegij: Specijalne građevine]. *Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet*. Dostupno: [03 SIG betonski tornjevi temeljenje dimenzioniranje.pdf](#) [Pristupljeno: 18. kolovoza 2024.].
- [17] Važnost projektiranja trajnosti betona za osiguranje trajnosti betonskih građevina. *Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet*. Dostupno: [03 SIG betonski tornjevi temeljenje dimenzioniranje.pdf](#) [Pristupljeno: 18. kolovoza 2024.].
- [18] Maeslantkering: Najveća barijera za olujni udar na svijetu. *TheCivilEngineer*. Dostupno: <https://www.thecivilengineer.org/news/video-maeslantkering-the-biggest-storm-surge-barrier-in-the-world> [Pristupljeno: 18. kolovoza 2024.].
- [19] Mehanizmi razaranja konstrukcija [Kolegij: Trajnost konstrukcija 1]. *Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet*. Dostupno: [file:///C:/Users/nikag/Downloads/02 trajnost konstrukcija I.pdf](file:///C:/Users/nikag/Downloads/02%20trajnost%20konstrukcija%20I.pdf) [Pristupljeno: 25. kolovoza 2024.].
- [20] Ferrycarrig Bridge. *WEXFORDHUB*. Dostupno: <https://wexfordhub.blogspot.com/2014/12/ferrycarrig-bridge.html> [Pristupljeno: 25. kolovoza 2024.].
- [21] Cassidy M. Lessons of Mianus River Bridge collapse not yet learned. *Stamford Advocate*. Dostupno: <https://www.stamfordadvocate.com/local/article/lessons-of-mianus-river-bridge-collapse-not-yet-4628743.php> [Pristupljeno: 25. kolovoza 2024.].
- [22] The Collapse of Silver Bridge. *Structural Engineer*. Dostupno: <https://www.thestructuralengineer.info/news/the-collapse-of-silver-bridge> [Pristupljeno: 25. kolovoza 2024.].
- [23] Collings D. The Carbon Footprint of Bridges. *Structural Engineering International*. 2021; 4: 501-506
- [24] Krejza Z. Varijante određivanja ugljičnog otiska građevinske proizvodnje. *Građevinar*. 2023; 3: 273-281
- [25] Čuláková M. i dr. Reduction of Carbon Footprint of Building Structures. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*. 2012; 29

- [26] Wang J. Integrated Carbon Emissions and Carbon Costs for Bridge Construction Projects Using Carbon Trading and Tax Systems-Taking Beijing as an Example. *Applied Sciences*. 2022;12
- [27] Carbon Footprint of Bridges. *Altes Neuland Frankfurt*. Dostupno: <https://www.altes-neuland-frankfurt.com/en/stadtklima-weltklima/die-co2-bilanz-der-bruecken> [Pristupljeno: 5. rujna 2024.].
- [28] Why are bridges different? *Net Zero Bridges Group*. Dostupno: <https://www.netzerobridges.org/> [Pristupljeno: 5. rujna 2024.].
- [29] Collings D. The Carbon Footprint of Bridges. *The Academic*. Dostupno: [Ugljični otisak mostova - The Academic](#) [Pristupljeno: 6. rujna 2024.].
- [30] Construction material key to lowering carbon footprint of bridge project. *Swedish Wood*. Dostupno: <https://www.swedishwood.com/building-with-wood/about-glulam/glulam-and-the-environment/lca-for-broar/> [Pristupljeno: 6. rujna 2024.].
- [31] Kyotski protokol. *RH Ministarstvo gospodarstva*. Dostupno: <https://mingo.gov.hr/o-ministarstvu1065/djelokrug-4925/klima/zastita-klime/kyotski-protokol/1883> [Pristupljeno: 7. rujna 2024.].
- [32] Pariški sporazum o klimatskim promjenama. *Europsko vijeće*. Dostupno: <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/paris-agreement/> [Pristupljeno: 7. rujna 2024.].
- [33] Škara A. Pasivna kuća [Završni rad]. *Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet*. Dostupno: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:849115> [Pristupljeno: 7. rujna 2024.].
- [34] Nielsen V. C. Carbon Footprint of Concrete Buildings seen in the Life Cycle Perspective. *Proceedings NRMCA 2008 Concrete Technology Forum*. 2008.
- [35] PAS 2080. Carbon Management in Infrastructure. *British Standards Institution*. 2016.
- [36] Accelerating progress towards Net Zero bridges. *Net Zero Bridges Group*. Dostupno: <https://www.netzerobridges.org/> [Pristupljeno: 7. rujna 2024.].
- [37] Timelines. *Net Zero Bridges Group*. Dostupno: <https://www.netzerobridges.org/> [Pristupljeno: 7. rujna 2024.].
- [38] How to calculate embodied carbon. *The Institution of Structural Engineers*. Dostupno: [HTCEC-\(2nd-edition-v1-1\).pdf](#) [Pristupljeno: 11. rujna 2024.].
- [39] PAS 2080. Carbon Management in Infrastructure. *British Standards Institution*. 2023.
- [40] Guidance Note: Carbon Calculations for Bridges. *Net Zero Bridges Group*. Dostupno: <https://www.netzerobridges.org/> [Pristupljeno: 11. rujna 2024.].
- [41] AECOM (Ed.). Spon's Civil Engineering and Highway Works Price Book. s.l. *CRC Press*. 2021.

- [42] Bučanac L. Statički proračun prednapetog betonskog mosta [Programski zadatak iz kolegija Mostovi 3]. *Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet*. 2023./2024.
- [43] Goleš N. Statički proračun spregnutog mosta [Programski zadatak iz kolegija Mostovi 3]. *Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet*. 2023./2024.

POPIS SLIKA

Slika 1.: Uzroci klimatskih promjena (Izvor: [1]).....	3
Slika 2.: a) Rušenje krova zbog prevelikog opterećenja snijegom (Izvor: [9]); b) Vijadukt Zečeve Drage tijekom snježne mećave krajem veljače 2023. (Izvor: [1])	4
Slika 3.: Sezonska potrošnja soli za odleđivanje po kilometru voznoga traka na hrvatskim i kanadskim prometnicama (Izvor: [1])	5
Slika 4.: Poplave u Njemačkoj (Izvor: [10])	6
Slika 5.: Most Đurmanec: a) erozija obale iza upornjaka; b) nagomilani plutajući nanos u središnjem otvoru mosta (Izvor: [11])	7
Slika 6.: Oštećenja željeznica (lijevo) i kolnika (desno) zbog ekstremnih temperatura (Izvor: [6])	8
Slika 7.: Preporuke za projektiranje kuće s obzirom na očekivane više temperature (Izvor: [12])	9
Slika 8.: Projektirani globalni prosječni porast razine mora [6]	10
Slika 9.: a) Poplavljene ulice Miamia (Izvor: [13]); b) Rotterdamski plutajući park Izvor: [14])	11
Slika 10.: Okvir stohastičke simulacije ovisne o klimi za opasnosti od tropskih ciklona razvijen na Sveučilištu u Buffalou	12
Slika 11.: Tacoma Narrows prvotna konstrukcija(lijevo) i najnovija konstrukcija (desno) (Izvor: [15])	13
Slika 12.: Promjene u opasnosti od olujnog udara 2020.-2100. godine za različita povratna razdoblja (Izvor: [4])	14
Slika 13.: Maeslantkering (Izvor: [18]).....	15
Slika 14.: Učinci klimatskih promjena koji utječu na karbonatizaciju i prodor klorida (Izvor: [1])	17
Slika 15.: Korozija uzrokovana karbonatizacijom na AB gredi (Izvor: [17])	18
Slika 16.: Propadanje AB konstrukcija uz obalu; Paški most (lijevo) i Krčki most (desno) (Izvor: [19])	19
Slika 17.: Ferrycarrig Bridge (Izvor: [20])	20
Slika 18.: Proces korozije (Izvor: [19])	20
Slika 19.: Uzroci propadanja betonskih konstrukcija (Izvor: [1])	21
Slika 20.: a) Kolaps mosta Mianus River (Izvor: [21]); b) Kolaps mosta Silver Bridge (Izvor: [22])	23
Slika 21.: Truljenje drva (Izvor: [9])	24
Slika 22.: Utjecaj klimatskih promjena na broj slomljenih stupova (Izvor: [5]).....	25
Slika 23.: Utjecaj klimatskih promjena na mostove (Izvor: [1]).....	29
Slika 24.: a) Utjecaj faza životnog ciklusa građevina na okoliš; b) Početna faza izgradnje	34
Slika 25.: Emisije ugljika konstrukcija različitih materijala	36

Slika 26.: Odnos ugljičnog otiska i površine mosta; male emisije (zeleno) i velike emisije (crveno) (Izvor: [29]).....	37
Slika 27.: Odnos ugljičnog otiska i troškova mosta s BDP-om ugljika u Velikoj Britaniji/Europi prikazanim kao ružičasta linija (Izvor: [26])	37
Slika 28.: Odnos ugljičnog otiska s rasponom mosta i materijalom; čelik (crveno) i beton (crno) (Izvor: [29])	38
Slika 29.: Usporedba drvenih i betonskih mostova prema ugljičnom otisku za određene faze projekta (Izvor: [30]).....	39
Slika 30.: Primjer pasivne kuće s drvenim okvirom u Slovačkoj i njen utjecaj na okoliš (Izvor: [25])	41
Slika 31.: Pristup PAS 2080 standarda (Izvor: [36])	45
Slika 32.: Ciklus upravljanja građevinom (Izvor: [36])	45
Slika 33.: Primjer usporedbe betonskog i spregnutog mosta (Izvor: [7]).....	47
Slika 34.: Područja u kojima inženjer može imati najveći utjecaj na upravljanje ugljikom	48
Slika 35.: Faze životnog ciklusa mosta prema PAS 2080 (Izvor: [40]).....	50
Slika 36. Poprečni presjek glavnog nosača (Izvor: [43])	64
Slika 37.: Poprečni presjek poprečnog nosača (Izvor: [43])	64
Slika 38.: Poprečni presjek betonske ploče (Izvor: [43])	65
Slika 39.: Poprečni presjek stupa (Izvor: [43]).....	69
Slika 40.: Poprečni presjek naglavne grede (Izvor: [43])	70
Slika 41.: Oprema mosta (Izvor: [43]).....	71
Slika 42.: Tlocrtni raspored ležajeva mosta (Izvor: [43])	73
Slika 43.: Ugljični otisak spregnutog mosta s obzirom na module (lijevo) i s obzirom na grupe elemenata (desno)	75
Slika 44.: Ugljični otisak betona i čelika spregnutog mosta	75
Slika 45.: Poprečni presjek glavnog nosača (Izvor: [42])	77
Slika 46.: Poprečni presjek poprečnog nosača (Izvor: [42])	78
Slika 47.: Poprečni presjek betonske ploče (Izvor: [42])	79
Slika 48.: Poprečni presjek stupa (Izvor: [42]).....	83
Slika 49.: Poprečni presjek naglavne grede (Izvor: [42])	84
Slika 50.: Oprema mosta (Izvor: [42]).....	85
Slika 51.: Tlocrtni raspored ležajeva mosta (Izvor: [42])	87
Slika 52.: Ugljični otisak prednapetog mosta s obzirom na module (lijevo) i s obzirom na grupe elemenata (desno)	89
Slika 53.: Ugljični otisak betona i čelika prednapetog mosta.....	89
Slika 54.: Usporedba ugljičnog otiska spregnutog i prednapetog mosta s obzirom na module	90
Slika 55.: Usporedba ugljičnog otiska spregnutog i prednapetog mosta s obzirom na grupe elemenata.....	90
Slika 56.: Usporedba ugljičnog otiska betona i čelika za spregnuti i prednapeti most	91
Slika 57.: Korisna površina spregnutog mosta (Izvor: [43]).....	92

Slika 58.: Korisna površina prednapetog mosta (Izvor: [42]) 92

POPIS TABLICA

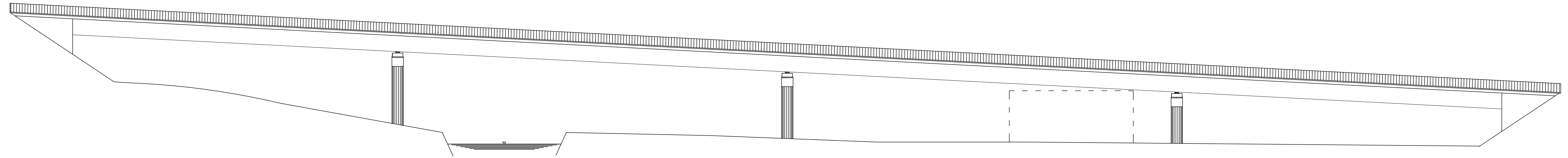
Tablica 1.: Srednja vrijednost (u godinama) i koeficijent varijacije (u zgradama) vremena do sloma AB grede.....	22
Tablica 2 .: Mjere strategije RH za prilagodbu klimatskim promjenama relevantne za graditeljstvo (Izvor: [1])	26
Tablica 3.: Projekcije klimatskih parametara za RH prema scenariju RCP 4.5 u odnosu na razdoblje 1971. – 2000. (Izvor: [1])	27
Tablica 4.: Razlike između mostova i zgrada	33
Tablica 5.: 11 poluga i način djelovanja svake	43
Tablica 6.: Kategorizacija elemenata (Izvor: [40])	51
Tablica 7.: Količina emitiranog ugljika za uobičajene materijale (Izvor: [40])	52
Tablica 8.: Faktori emisije ugljika za poznate načine prijevoza (Izvor: [40]).....	55
Tablica 9.: Emisija ugljika za predložene transportne scenarije (Izvor: [40])	55
Tablica 10.: Količina emitiranog ugljika za sekundarne elemente mosta (Izvor: [40])	56
Tablica 11.: Emisija ugljika po aktivnostima (Izvor: [40])	59
Tablica 12.: Gubici prilikom izvedbe za pojedini material (Izvor: [40])	61
Tablica 13.: Raščlamba elemenata spregnutog mosta	63
Tablica 14.: Rekapitulacija rezultata spregnutog mosta.....	73
Tablica 15.: Raščlamba elemenata prednapetog mosta	76
Tablica 16.: Rekapitulacija rezultata prednapetog mosta	87

PRILOG A

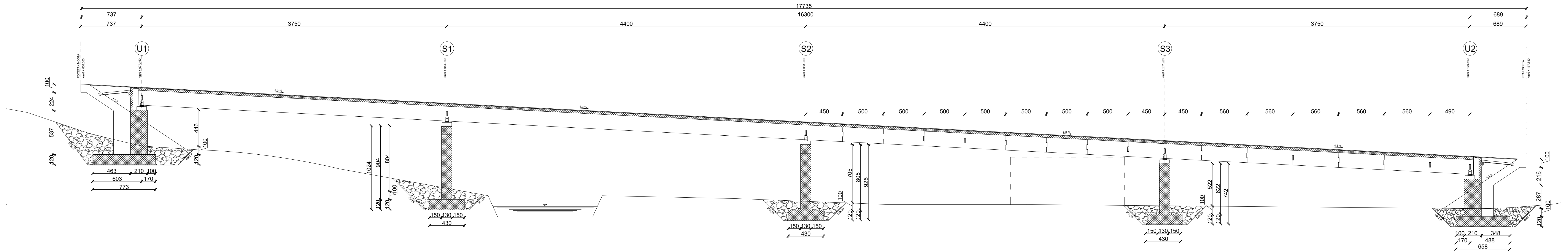
Popis nacрта spregnutog mosta:

1. Uzdužni presjek mosta (1:200)
2. Pogled na most (1:200)
3. Poprečni presjek u polju (1:50)
4. Poprečni presjek iznad stupa (1:50)
5. Poprečni presjek s pogledom na upornjak sprijeda (1:50)
6. Poprečni presjek s pogledom na upornjak straga (1:50)
7. Tlocrt gornjeg ustroja (1:200)
8. Tlocrt donjeg ustroja (1:200)
9. Uzdužni presjek upornjaka (1:50)
10. Tlocrt upornjaka (1:50)

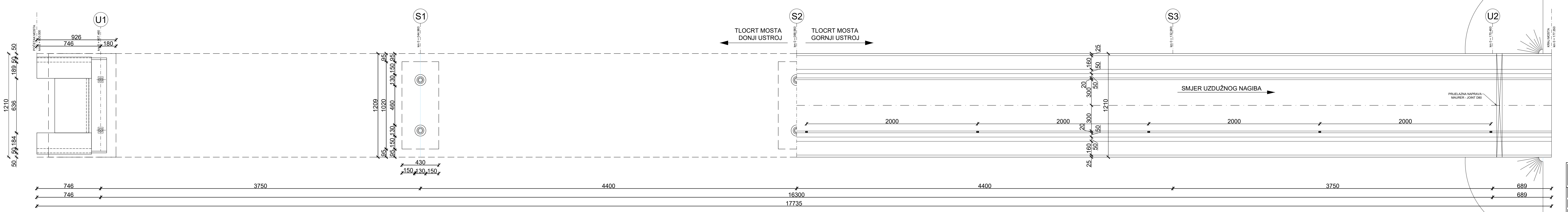
POGLED NA MOST
MJ 1:200



UZDUŽNI PRESJEK MOSTA
MJ 1:200

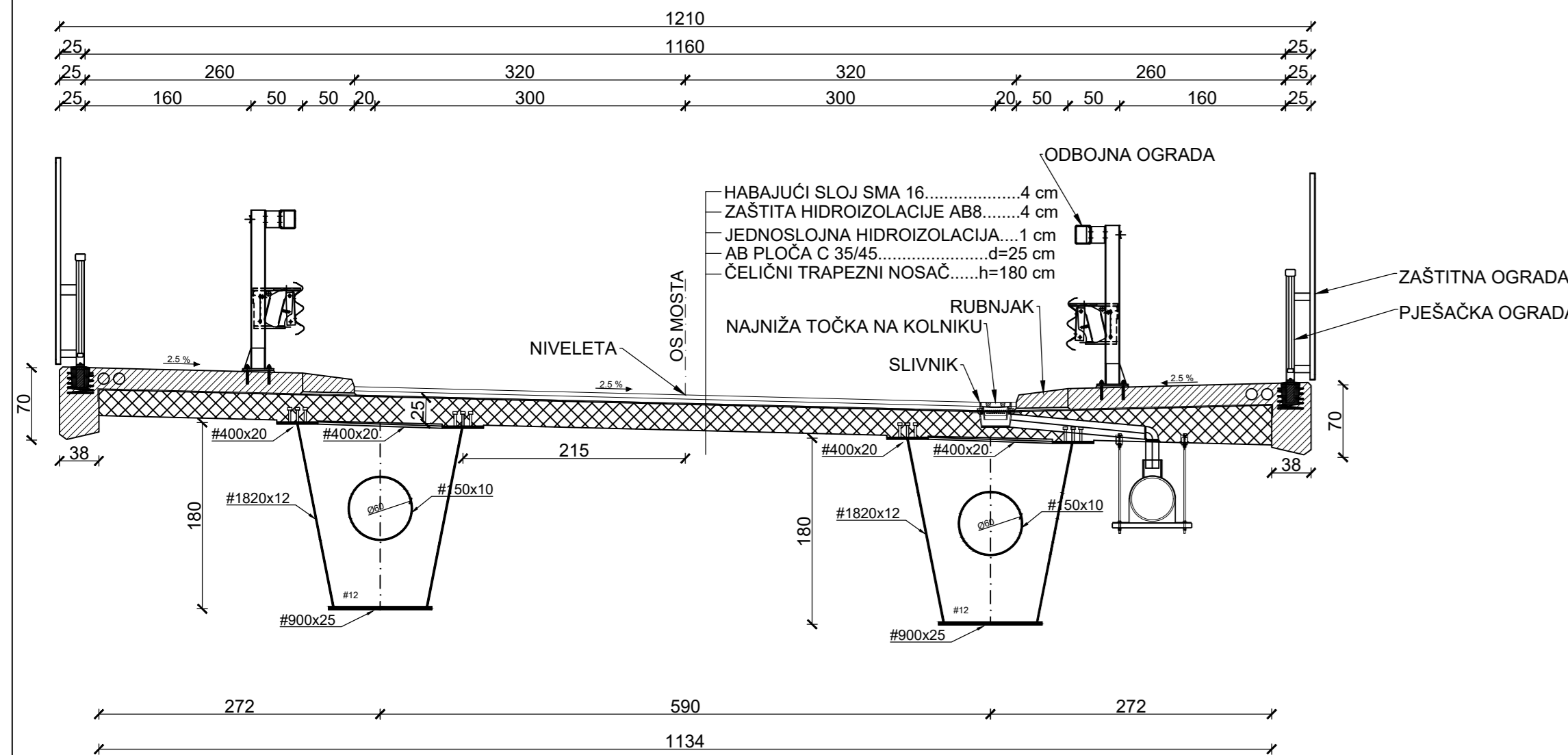


TLOCRT MOSTA
MJ 1:200

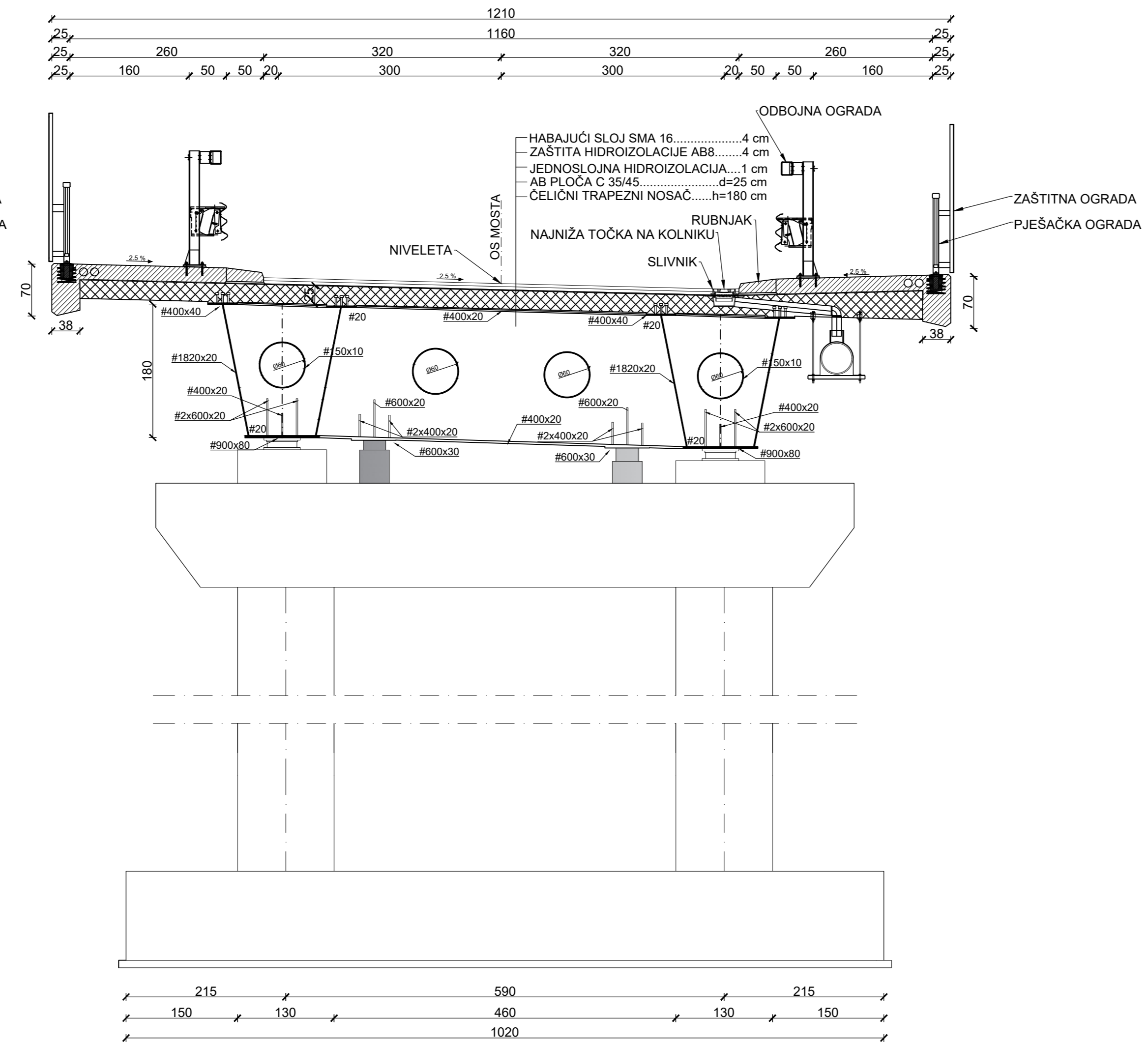


		DIZAJN I PROJEKTOVANJE INŽENJERSKI BUREAU Kraljeva St. Zagreb	
MOSTOVI II			
PROGRAMSKI ZADATAK			
UZDUŽNI PRESJEK, TLOCRT I POGLED			
Autor: Andrija Vlačić		Projektant:	
Datum: 18.01.2023.g.		Skala: 1:200	
Broj projekta: 2022/2023.		Datum:	
Nika Golob, 0082064773			

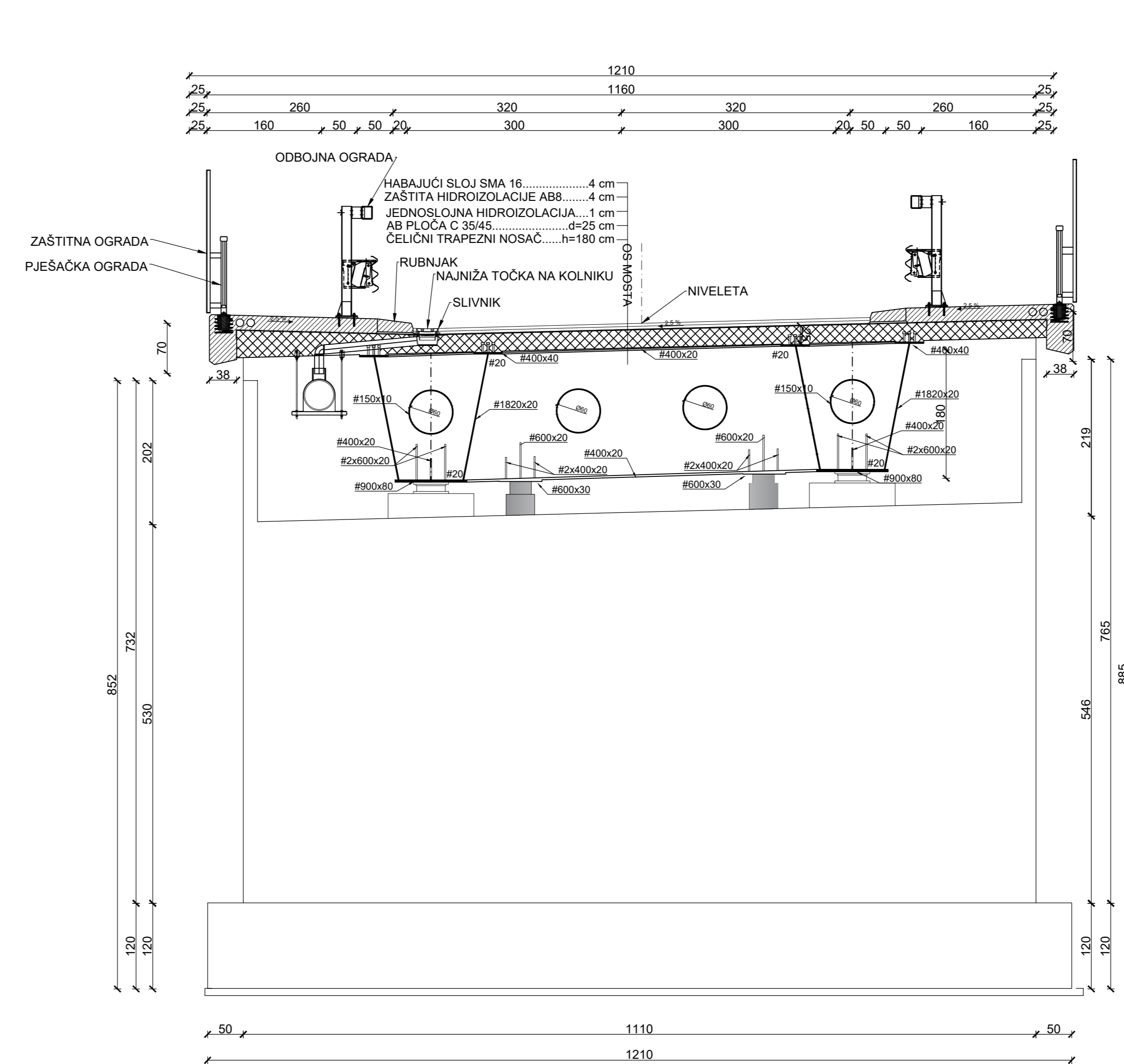
POPREČNI PRESJEK U POLJU
MJ 1:50



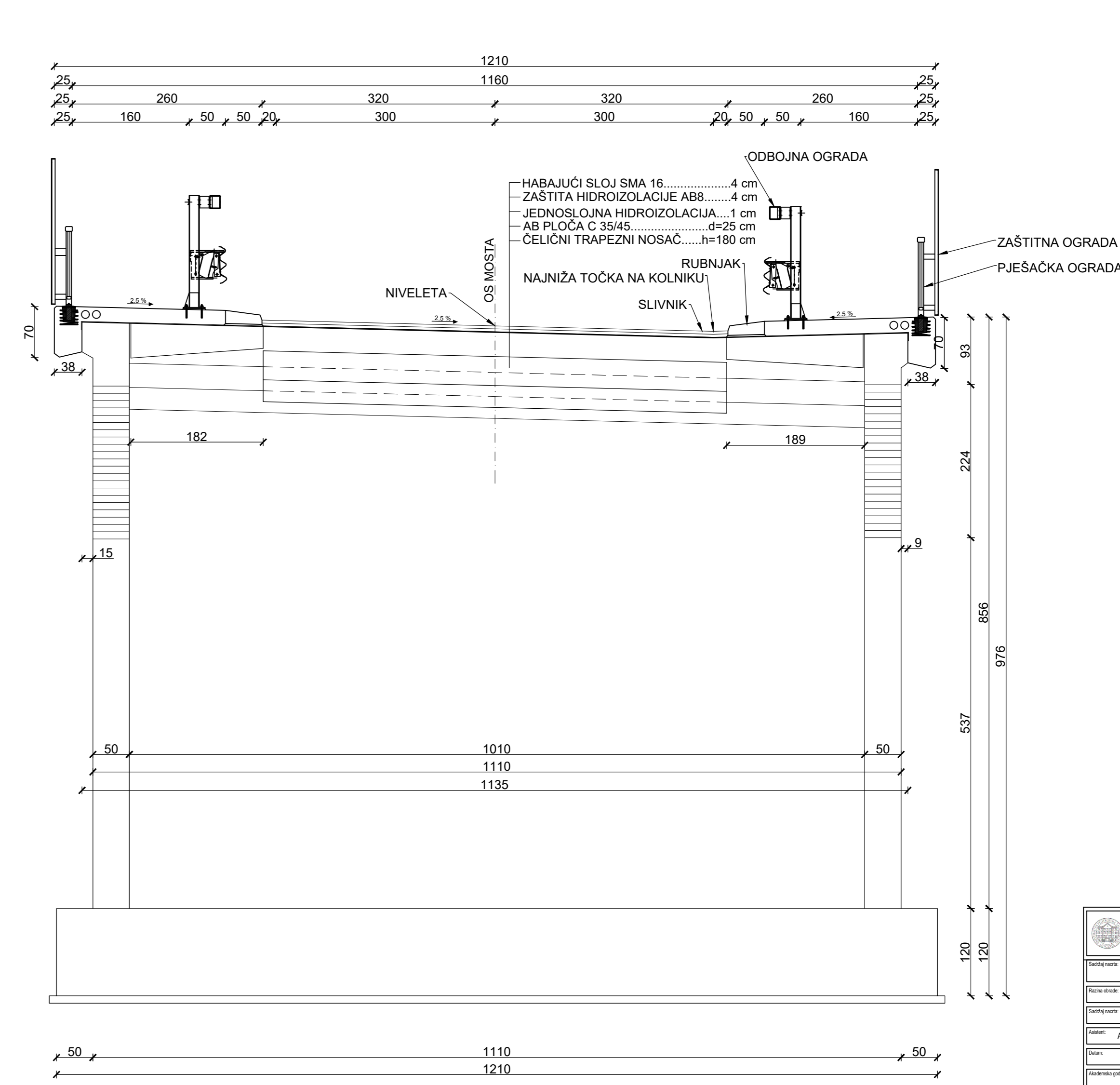
POPREČNI PRESJEK NAD STUPOM
MJ 1:50



POGLJED NA UPORNJAK S PREDNJE STRANE
MJ 1:50



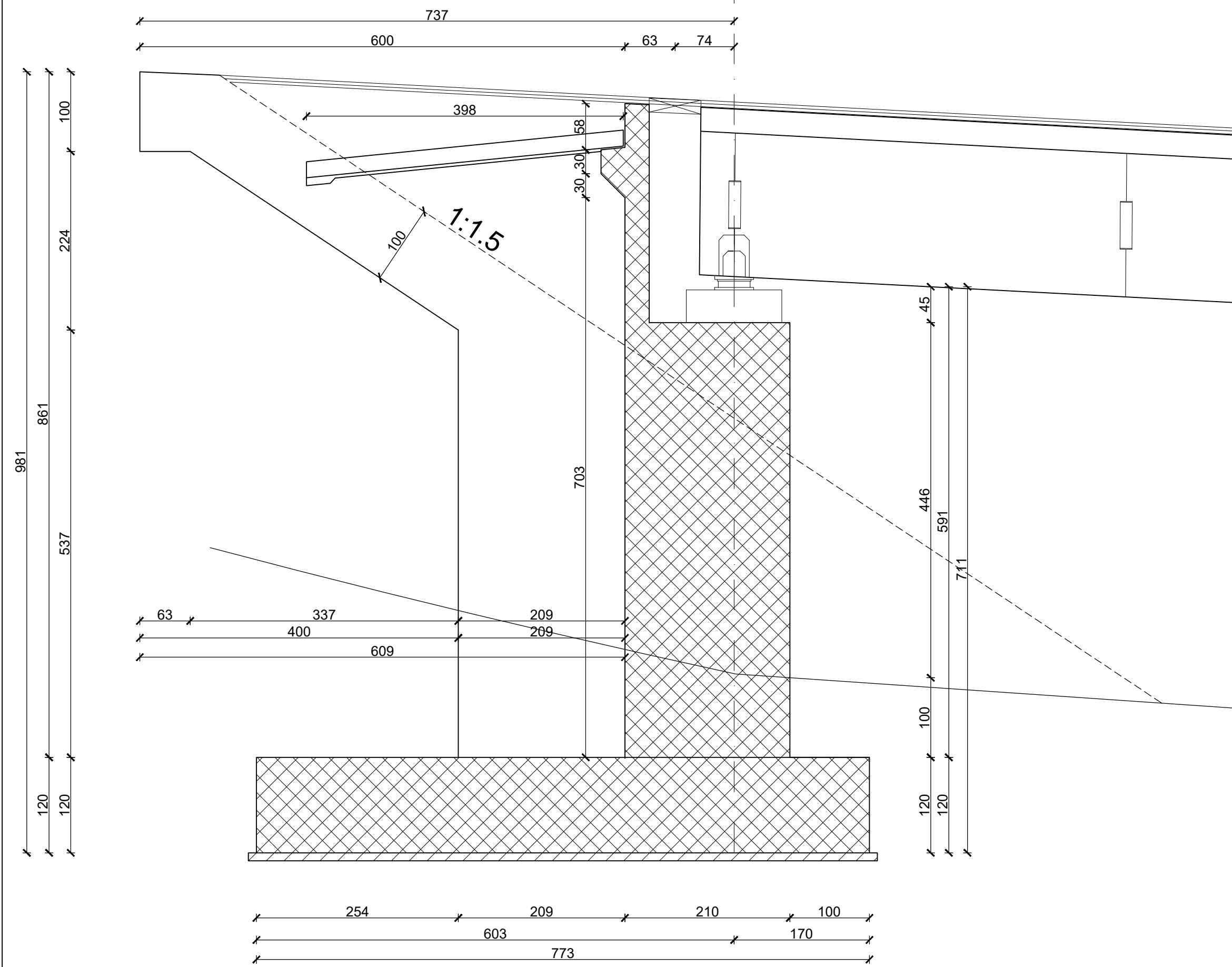
POGLJED NA UPORNJAK SA ZADNJE STRANE
MJ 1:50



		DOPISNO IZJELENJE GREDNOG MOSTA REBRATOG POPREČNOG PRESJEKA
MOSTOVI II		
PROGRAMSKI ZADATAK		
PRESJECI		
Autor: Andriko Vlačić	Projektant:	
Datum: 18.01.2023.g.	Skala: 1:50	
Datum izdavanja: 2022./2023.		
Projekat: Nika Goleš, 0082064773		

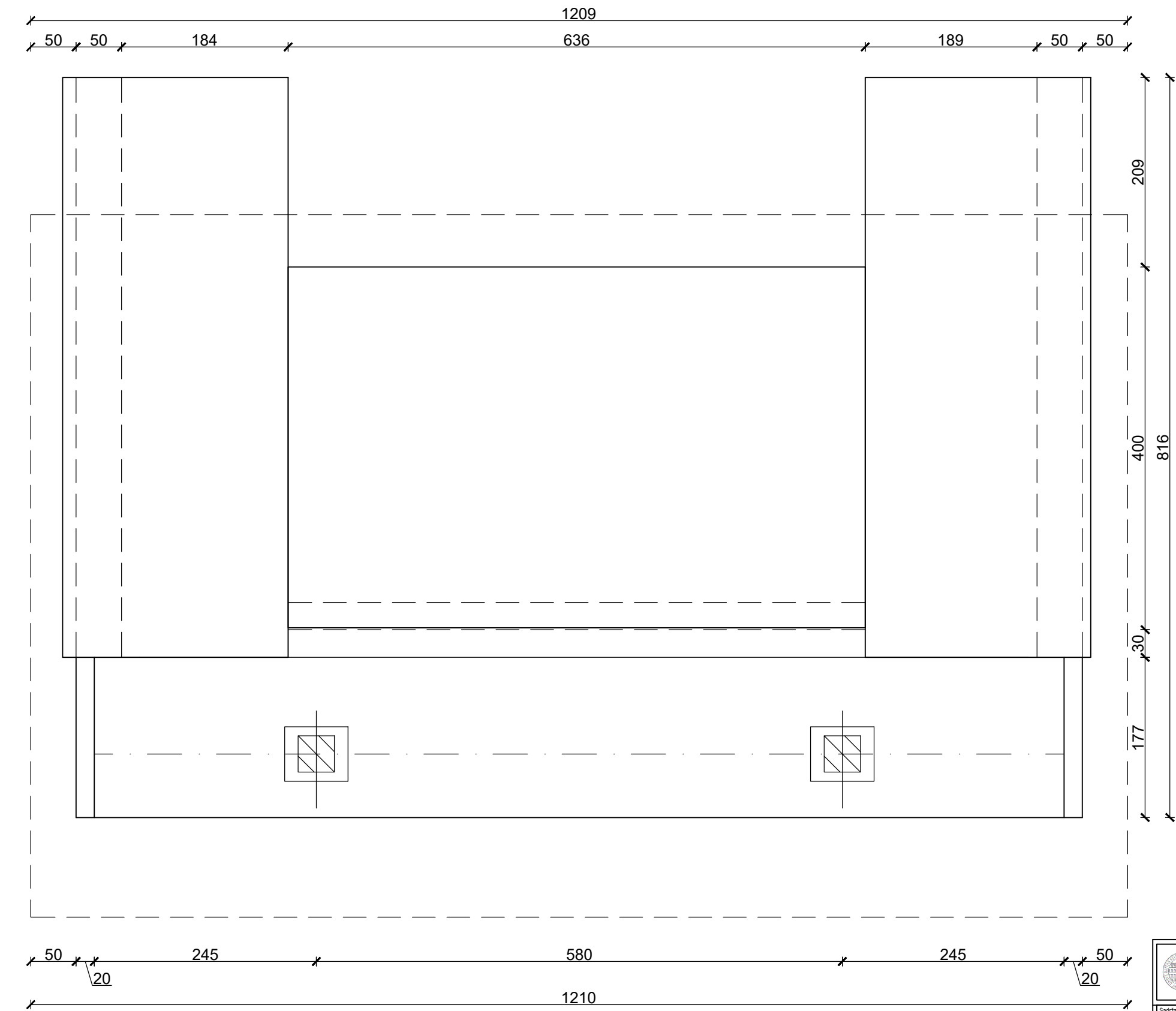
PRESJEK KROZ OS UPORNJAKA

MJ 1:50



TLOCRT UPORNJAKA

MJ 1:50



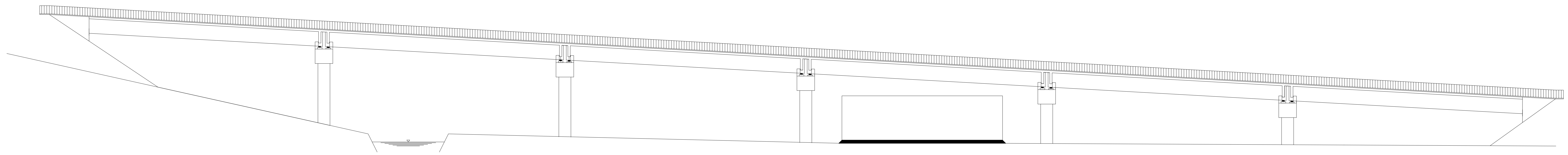
 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINARSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb		DISPOZICIJSKO RJEŠENJE GREĐNOG MOSTA REBRASTOG POPREČNOG PRESJEKA
Projekat: MOSTOVI II		
Razina obrade: PROGRAMSKI ZADATAK		
Sadržaj: PRESJECI		
Autor: Anđelko Vlašić	Pregledao:	
Datum: 18.01.2023.g.	Mjerilo: 1:50	
Akademsko godište: 2022./2023.		
Grafičar: Nika Goleš, 0082064773		

PRILOG B

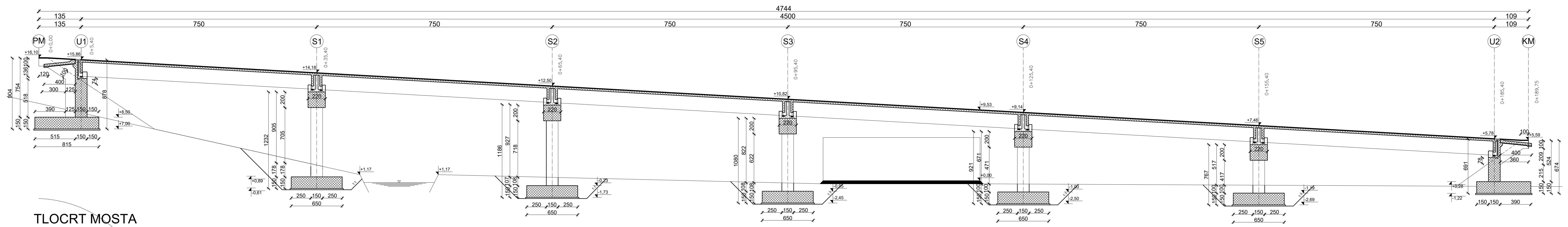
Popis nacrtu prednapetog mosta:

1. Uzdužni presjek mosta (1:200)
2. Pogled na most (1:200)
3. Poprečni presjek u polju (1:50)
4. Poprečni presjek iznad stupa (1:50)
5. Poprečni presjek s pogledom na upornjak sprijeda (1:50)
6. Poprečni presjek s pogledom na upornjak straga (1:50)
7. Tlocrt gornjeg ustroja (1:200)
8. Tlocrt donjeg ustroja (1:200)
9. Uzdužni presjek upornjaka (1:50)
10. Tlocrt upornjaka (1:50)

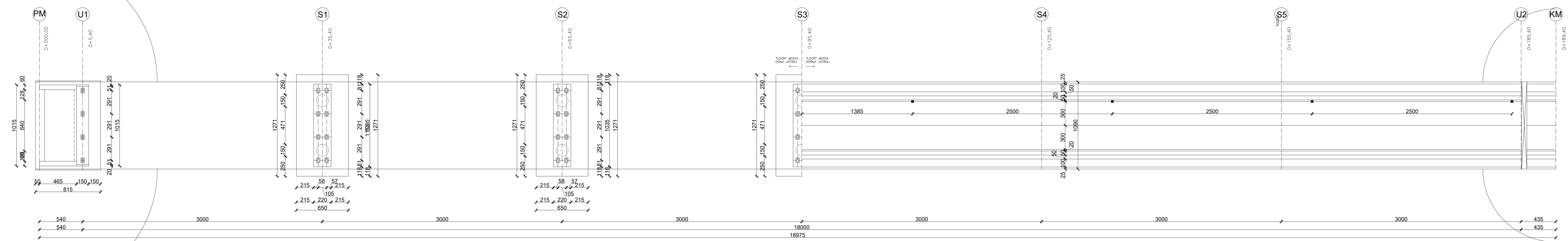
POGLED NA MOST
MJ 1:200



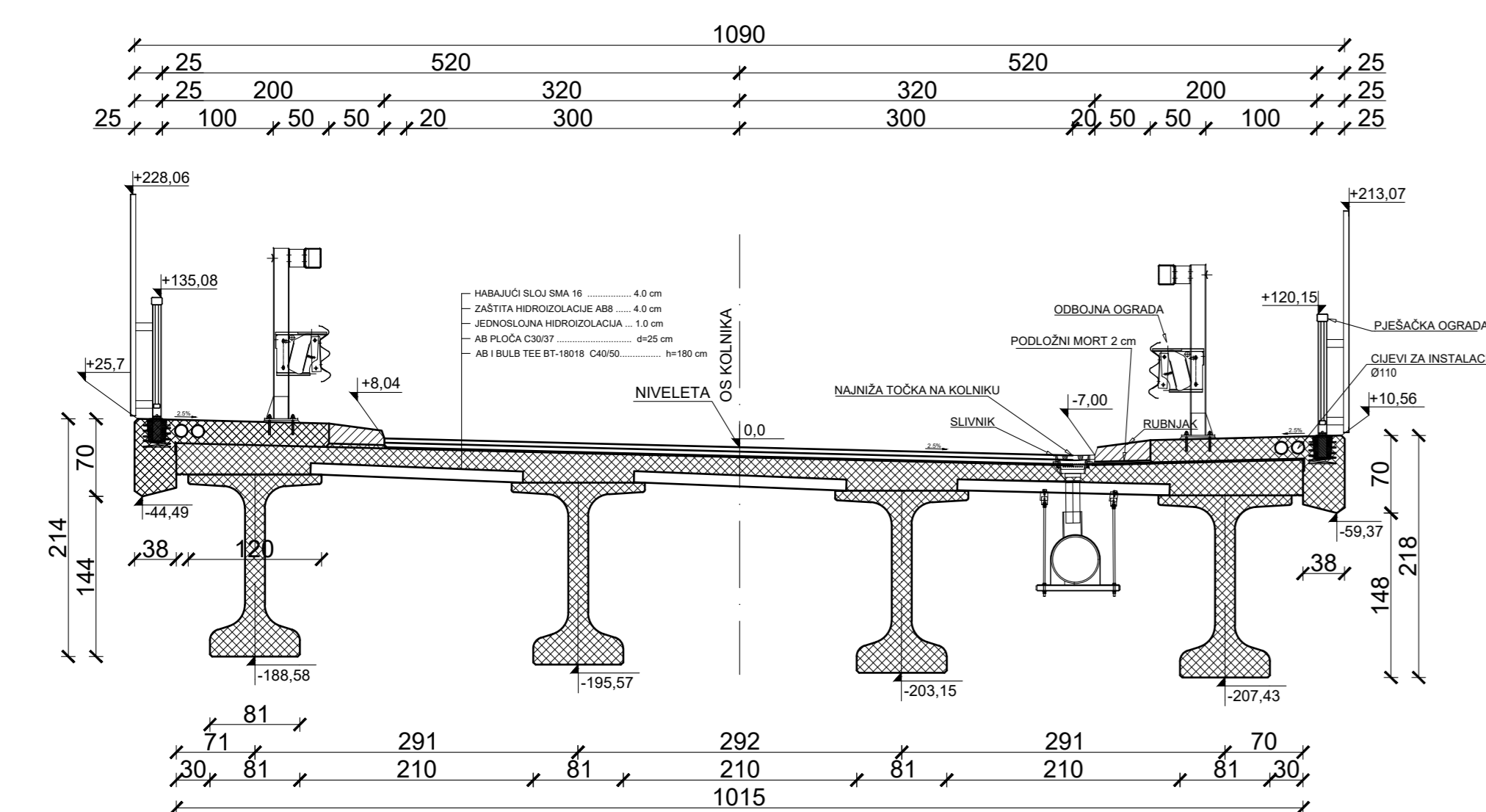
UZDUŽNI PRESJEK MOSTA
MJ 1:200



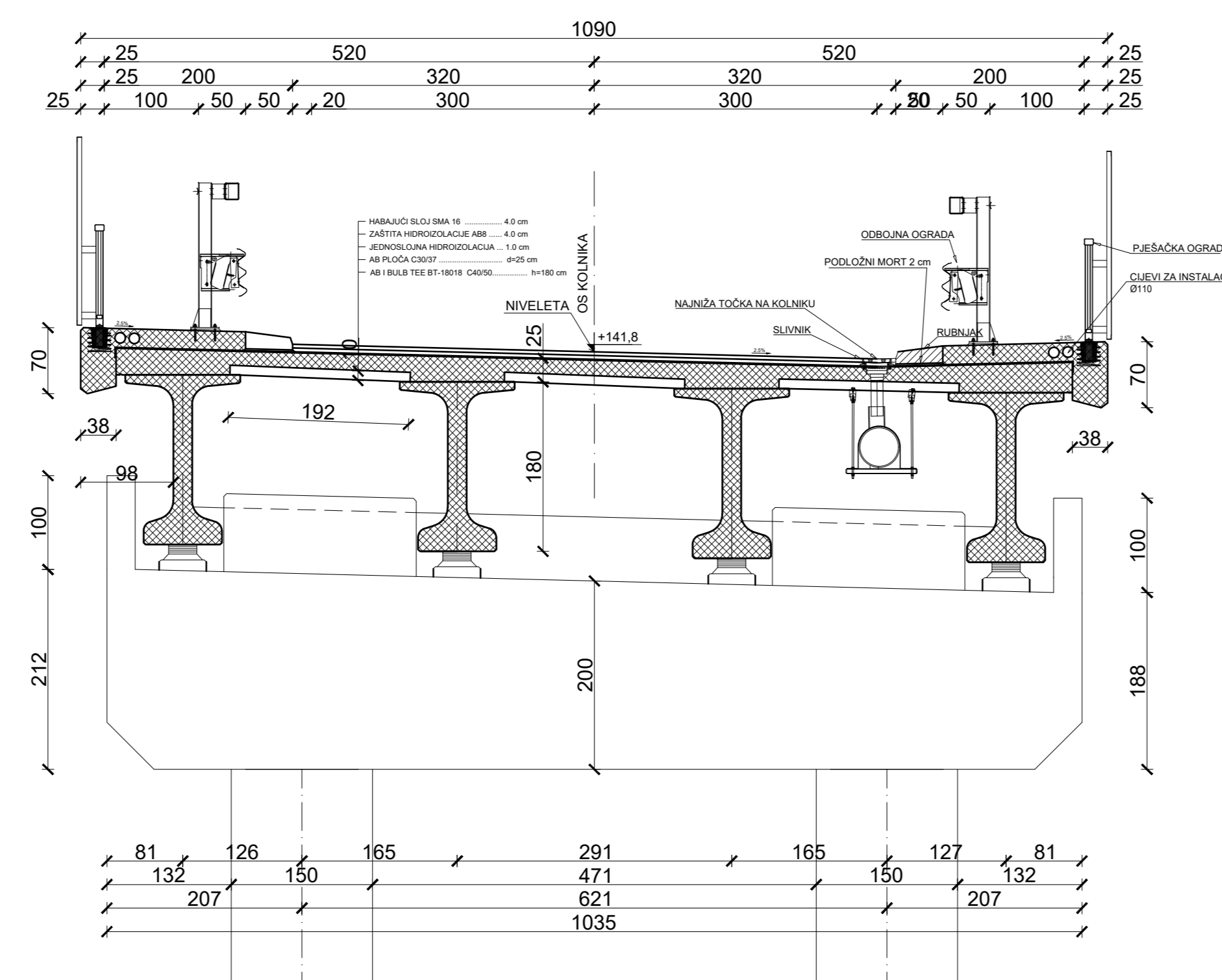
TLOCRT MOSTA
MJ 1:200



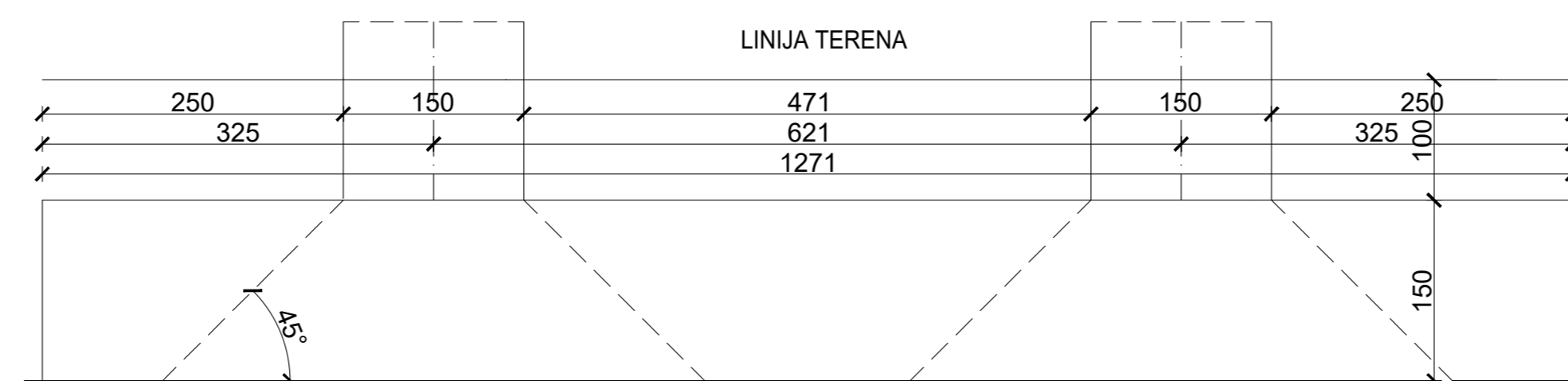
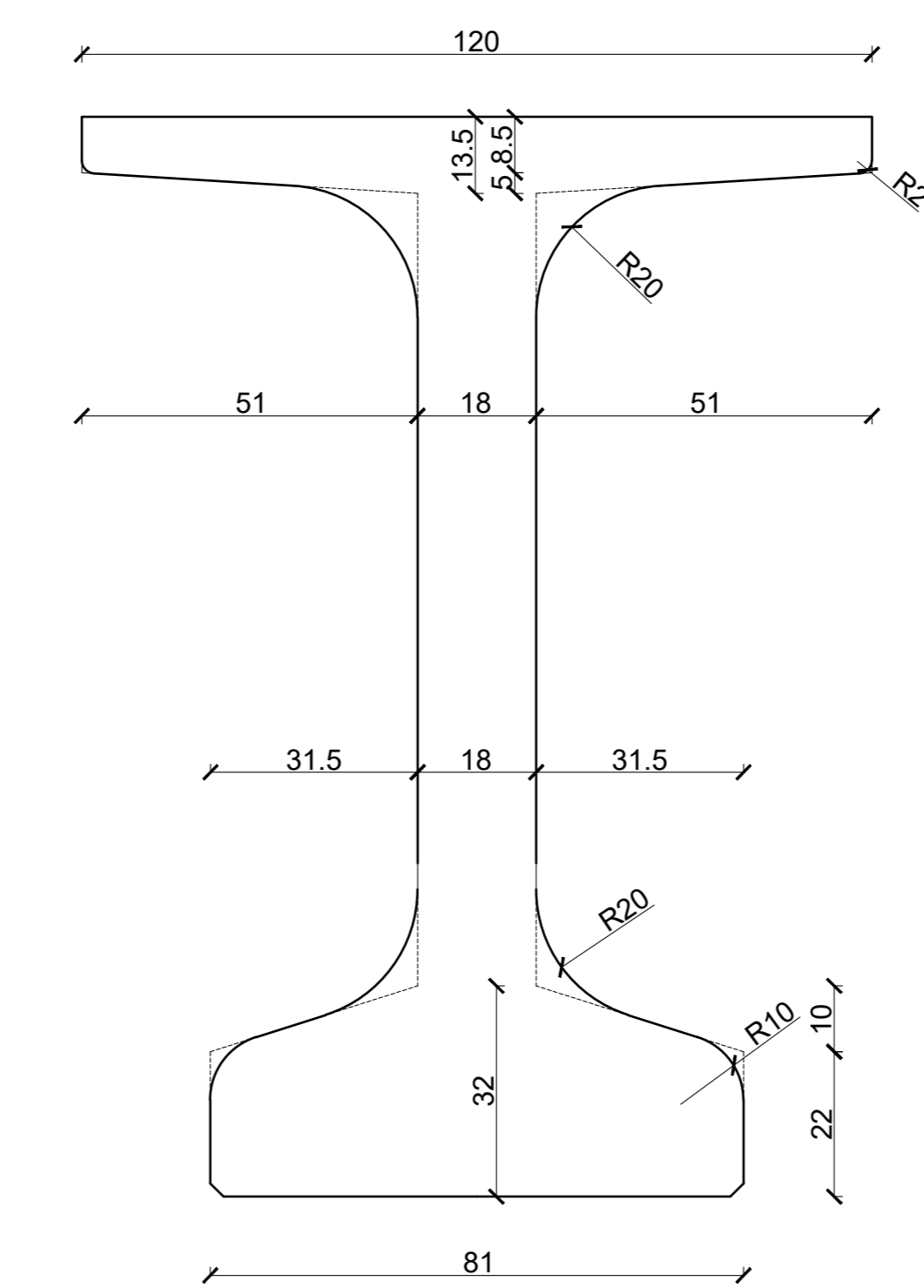
POPREČNI PRESJEK U POLJU
MJ 1:50



POPREČNI PRESJEK NAD STUPOM S1
MJ 1:50



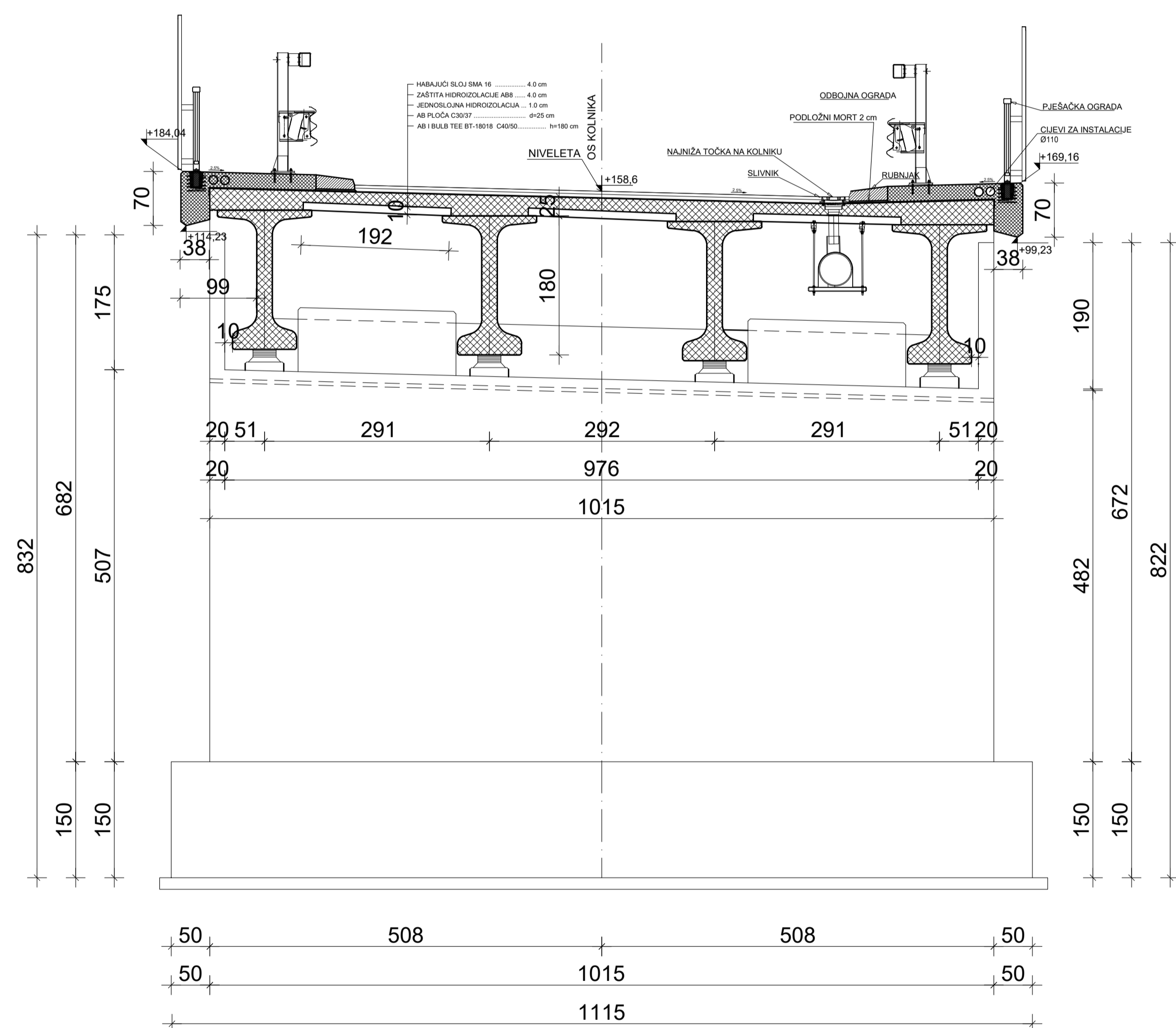
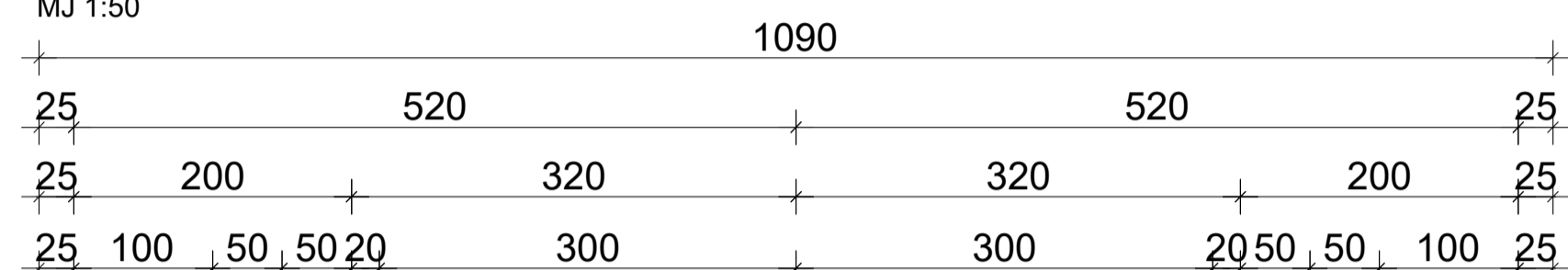
POPREČNI PRESJEK NOSAČA BT-18018 MJ - 1:25



		DISPOZICISKO RJEŠENJE MOSTA OD PREGOTOVljenih NOSAČA
Karlovačka 26, Zagreb		
Naziv projekta: MOSTOVI 2		
Razina obrade: PROGRAMSKI ZADATAK		
Sadržaj nacrt: POGLED, UZDUŽNI, TLOCRT, PRESJECI		
Autor: ANBELKO VLAŠIĆ		Projektor:
Datum: 14.11.2022.		Mjerna: 1:200, 1:50
Skupina godina: 2022./2023.		
LUCIA BUČANAC		

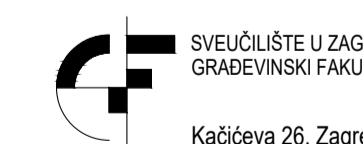
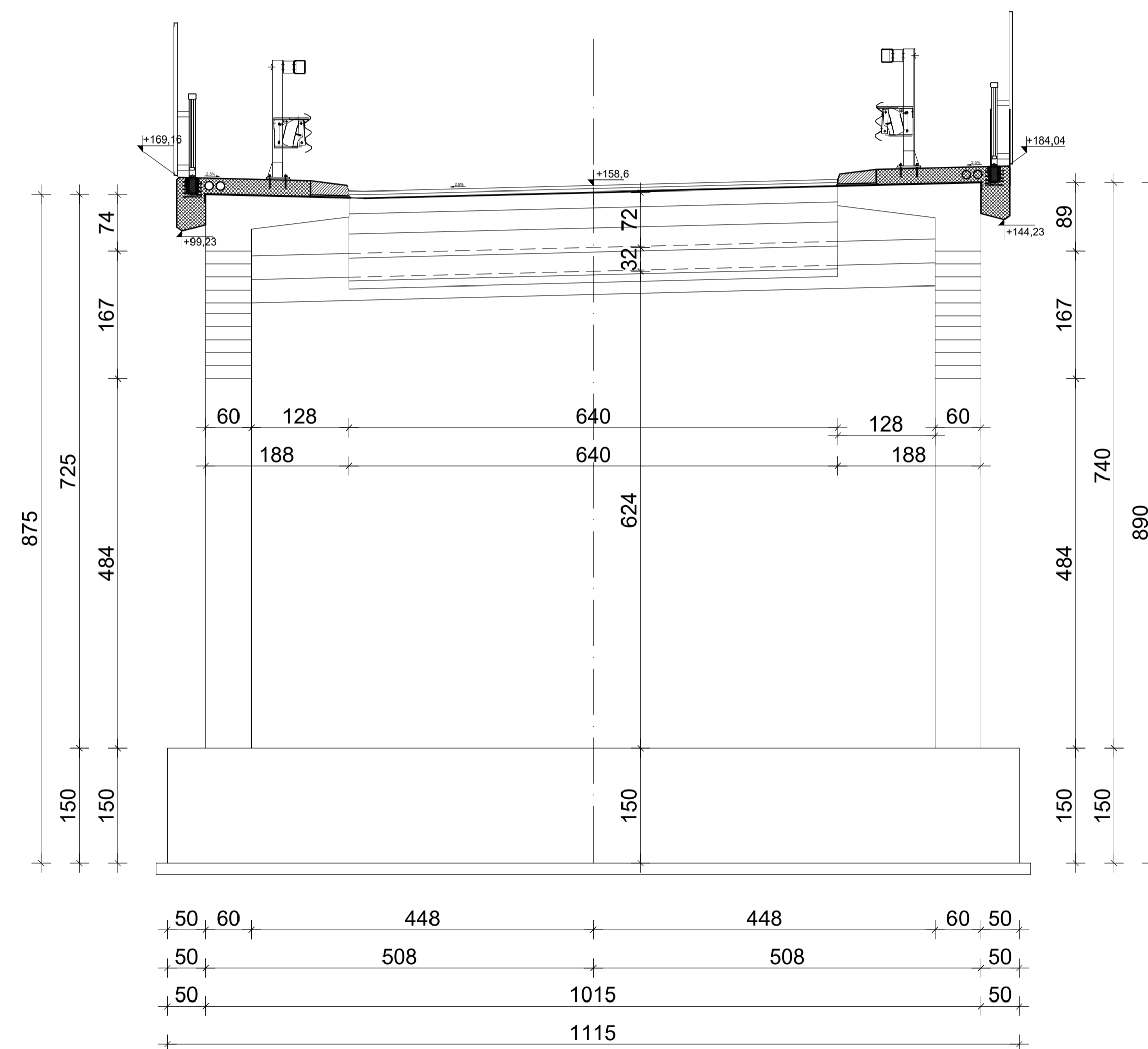
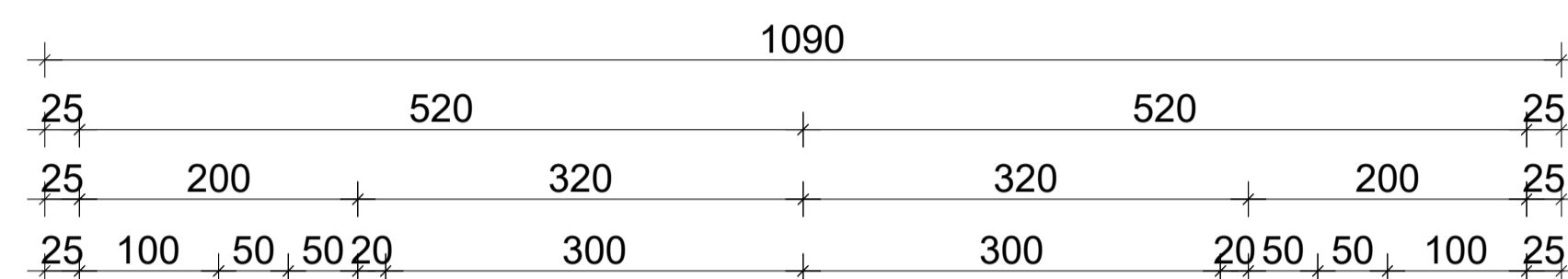
POGLED NA UPORNJAK S PREDNJE STRANE

MJ 1:50



POGLED NA UPORNJAK STRAGA

MJ 1:50



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET
Kačićeva 26, Zagreb

DISPOZICIJSKO RJEŠENJE MOSTA
OD PREGOTOVLJENIH NOSAČA

Sadržaj nacrt: MOSTOVI 2

Razina obrade: PROGRAMSKI ZADATAK

Sadržaj nacrt: POGLEDI NA UPORNJAK

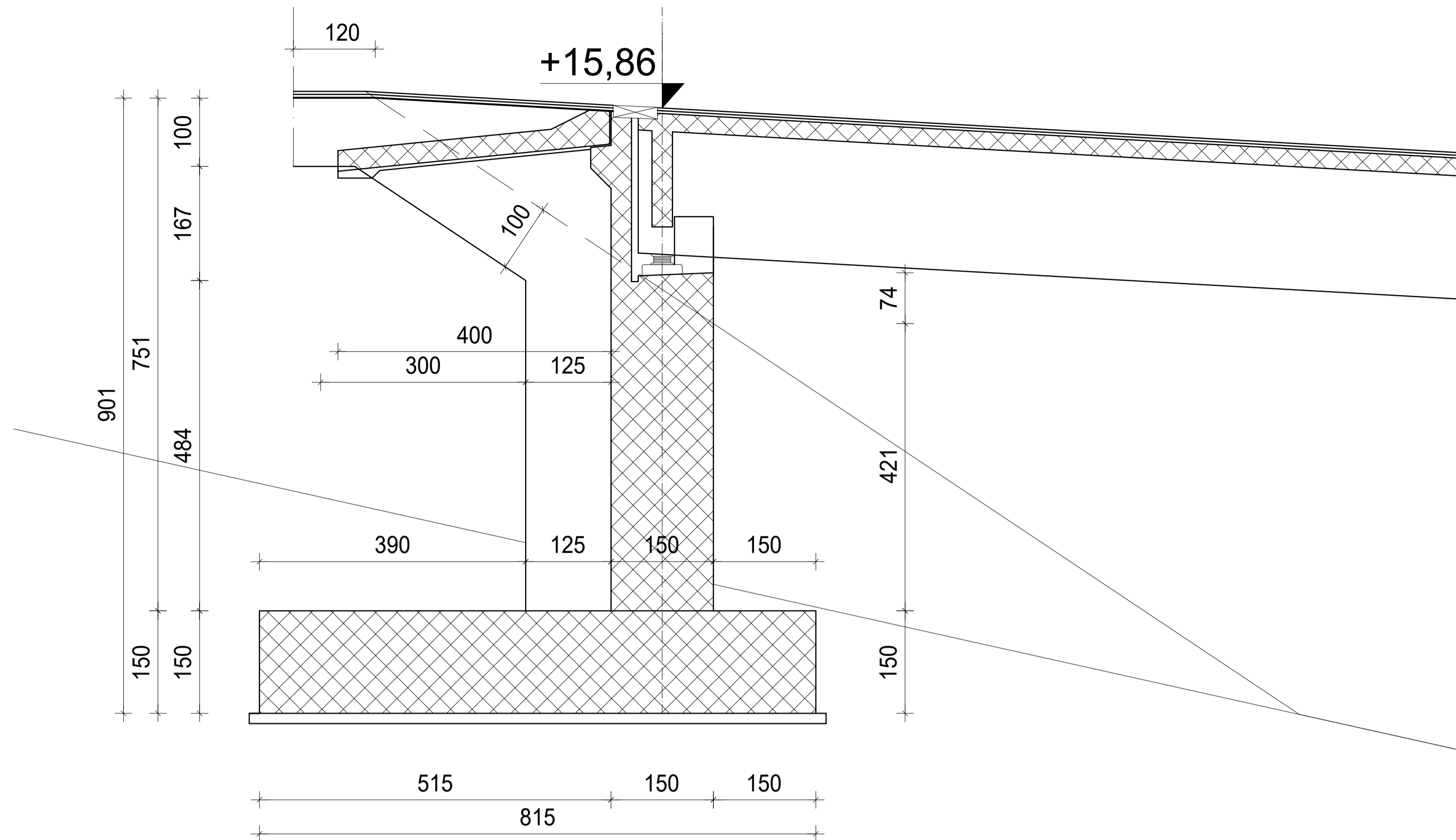
Asistent: ANDELKO VLAŠIĆ Pregledao:

Datum: 14.11.2022. Mjerilo: 1:50

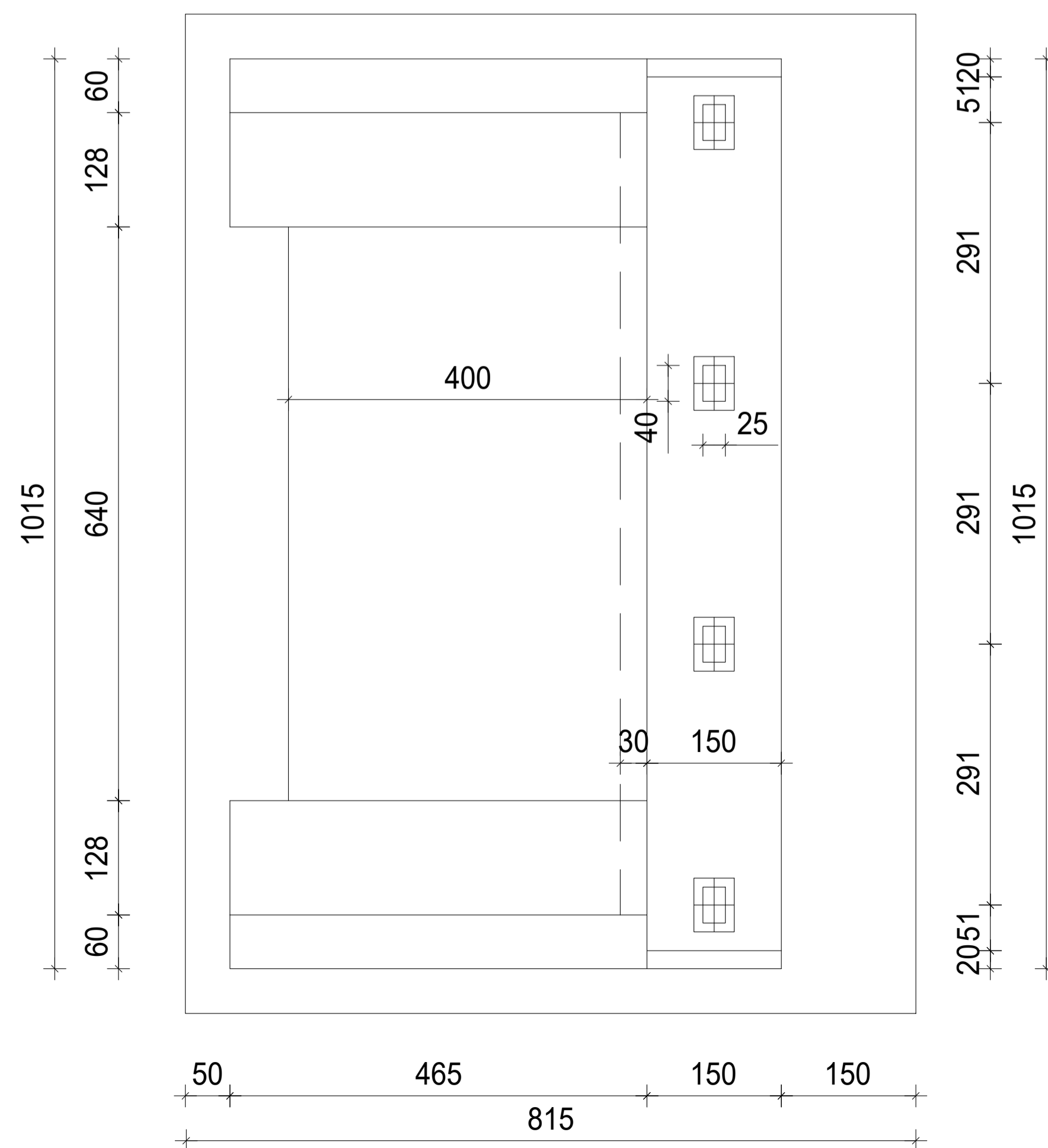
Školska godina: 2022./2023.

LUCIJA BUČANAC

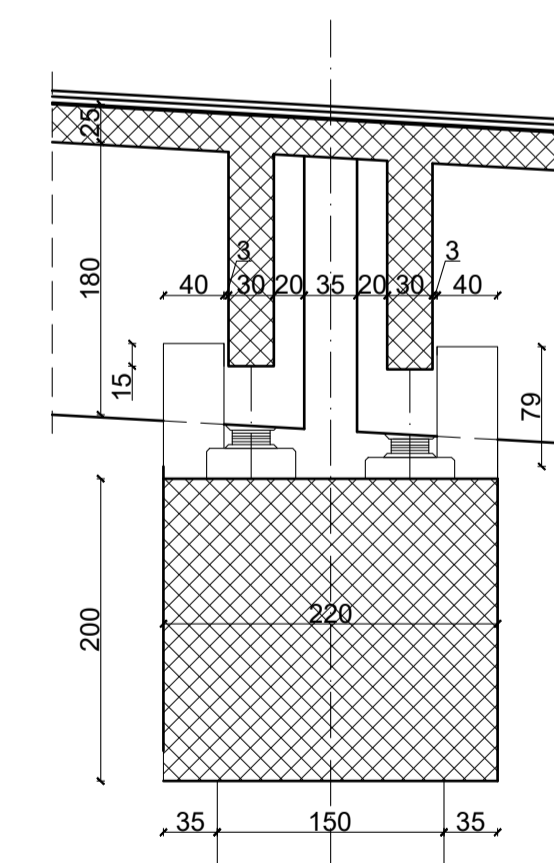
UZDUŽNI PRESJEK UPORNJAKA
MJ 1:50



TLOCRT UPORNJAKA
MJ 1:50



DETALJ OSLANJANJA NA STUP
MJ 1:50



		DISPOZICIJSKO RJEŠENJE MOSTA OD PREGOTOVLJENIH NOSAČA	
Sadržaj nacrt:		MOSTOVI 2	
Razina obrade:		PROGRAMSKI ZADATAK	
Sadržaj nacrt:		POGLEDI NA UPORNJAK	
Asistent:	ANDELKO VLAŠIĆ	Pregledao:	
Datum:	14.11.2022.	Mjerilo:	1:50
Školska godina:	2022./2023.		
LUCIJA BUČANAC			