



ELABORAT PODNEBNE ODPORNOSTI PROJEKTA IN ANALIZE OGLJIČNEGA ODTISA

(CLIMATE PROOFING REPORT & INFRASTRUCTURE CARBON FOOTPRINT
ASSESSMENT)

Projekt:

***Sanacija južnega portalnega območja na predoru Valeta –
nujna rekonstrukcija odprava posledic ujme***

Investitor:

**Občina Piran - Pirano
Tartinijev trg 2 / Piazza Tartini 2,
6330 Piran/Pirano**

Avtorji dokumenta:

.

Revizija:

1

Pregledal:

Matej Nagy d. i. geoteh in rud., P.I. RG 6143

Potrdil:

MN

Maj 2026

Odgovorni vodja projekta:

Matej Nagy d. i. geoteh in rud., P.I. RG 6143



PROJEKTANT:

Geostrata d.o.o.

Bazoviška cesta 2,

6210 Sežana

geostrata@email.com

Kazalo

1	IDENTIFIKACIJSKI PODATKI O PROJEKTU.....	3
2	UVOD, METODOLOŠKI OKVIR IN TEHNIČNI KONTEKST POSEGA.....	3
2.1	. Geneza poškodb in vpliv preteklih ujm	4
2.2	Metodološki okvir Climate Proofing presoje	4
2.3	. Standardi in tehnične specifikacije za geotehnične objekte	5
3	ANALIZA PODNEBNIH PROJEKCIJ ZA OBALNO REGIJO	6
3.1	. Temperaturni trendi in vročinski valovi.....	6
3.2	Spremembe padavinskih režimov in ekstremni nalivi	7
3.3	. Vetrovni režimi (Burja in Jugo).....	8
4	RANLJIVOST GEOTEHNIČNIH IN KRAJSKIH STRUKTUR NA LOKACIJI VALETA	8
4.1	Občutljivost flišnega masiva na sušno-mokre cikle	8
4.2	Ranljivost betonskih in armiranobetonskih elementov v obalnem okolju	8
4.3	Ranljivost sistemov odvodnjavanja	8
5	DETAJLNA ANALIZA TVEGANJ Z MATRIKO »PREJ« IN »POTEM«	9
6	DOLOČITEV IN SPECIFIKACIJA TEHNIČNIH PRILAGODITVENIH UKREPOV (RESLIENCE).....	11
6.1	Napredna tehnologija mikroarmiranih betonov s PP vlakni	11
6.2	Hidravlična rekonstrukcija.....	12
7	BLAŽENJE PODNEBNIH SPREMEMB IN ANALIZA OGLJIČNEGA ODTISA (CARBON FOOTPRINT ASSESSMENT).....	12
7.1	Koncept preciznih vitkih podpornih elementov.....	12
7.2	Specifikacija nizkoogljičnih veziv (Cementi z dodatki	13
7.2	Podrobni kvantitativni izračun in primerjalna LCA matrika.....	13
8	NARAVNE REŠITVE (NATURE-BASED SOLUTIONS) IN KRAJINSKA UREDITEV	14
8.1	Tehnologija sajenja in protierozijske zaščite	14
8.2	Izbor avtohtone fitocenoze (Slovenska Istra)	15
8.3	Mikroklimatski in ekološki učinki NBS ukrepov	15
9	SKLEPNA ANALIZA, STALIŠČA PROJEKTANTA IN IZJAVA O PODNEBNI ODPORNOSTI (CLIMATE PROOFING STATEMENT)	16
9.1	Sinteza rezultatov presoje	16
10	ZAKLJUČNA UGOTOVITEV ELABORATA.....	17

1 IDENTIFIKACIJSKI PODATKI O PROJEKTU

- **Naziv projekta:** Sanacija južnega portalnega območja na predoru Valeta – nujna rekonstrukcija in odprava posledic ujme na regionalni kolesarski povezavi (Parenzana)
- **Investitor:** Občina Piran - Pirano, Tartinijev trg 2, 6330 Piran/Pirano
- **Stopnja projektne dokumentacije:** Projekt za izvedbo (PZI)
- **Del dokumentacije:** Načrt gradbenih konstrukcij (Geotehnični objekti in stabilizacija pobočij)
- **Številka načrta / projekta:** 20251201GDR-TR
- **Klimatsko območje:** Submediteransko obalno območje Republike Slovenije (Cone po ARSO)
- **Predvideni začetek del:** Pomlad/Poletje 2026
- **Projektna življenjska doba objekta** t_L 50 let (Referenčno obdobje opazovanja podnebnih scenarijev: 2026–2076)

2 UVOD, METODOLOŠKI OKVIR IN TEHNIČNI KONTEKST POSEGA

a. Geografski in morfološki opis lokacije

Območje sanacije obsega neposredno zaledje in bočni del južnega portala zgodovinskega predora Valeta, skozi katerega je v preteklosti potekala ozkotirna železniška proga Parenzana, danes pa predstavlja ključno hrbtenico trajnostne turistične in zaposlitvene kolesarske mobilnosti v slovenski Istri. Lokacija se nahaja v občini Piran, na morfolosko razgibanem prehodu med flišnimi grebeni in obalnim ravnikom.

Brežina nad portalom izkazuje strme naklone (med 35° in 50°) kar jo v kombinaciji s specifično geološko zgradbo uvršča med območja z visoko stopnjo naravne ranljivosti za erozijske procese in plazenje.

b. Geološka in geotehnična zgradba hribine

Na podlagi predhodnih geološko-geotehniških raziskav, vrtanja strukturnih vrtin in refrakcijske seizmične profilacije je ugotovljeno, da hribinsko maso predstavlja tipični evceniški fliš. Ta se kaže kot heterogena izmenjava plasti peščenjaka in laporja:

1. **Preperevanje krovnih plasti:** Vrhnji sloj (debelina 2,0 do 4,5 m) predstavlja močno preperevan fliš, prekrit s hribinskim eluvijem in delno deluvijem (glinasto-pusta meljava z odlomki peščenjaka). Ta sloj ima izjemno nizko strižno trdnost, ko je zasičen z vodo $\varphi' \approx 19^\circ - 22^\circ$, $c' \approx 2 - 5$ kPa.
2. **Matična podlaga:** Pod krovnim preperelim slojem se nahaja kompaktnjši, slabo do zmerno preperevan fliš, kjer prevladujejo debelejšje plasti s sivega peščenjaka s podrejenimi vložki laporovca. Tukaj so strižni parametri znatno višji $\varphi' \approx 28^\circ - 32^\circ$, $c' \approx 15 - 30$ kPa
3. **Hidrogeološke razmere:** Flišne plasti delujejo kot lokalni vodonosnik z izjemno nizko primarno poroznostjo, a visoko sekundarno razpokanostjo. Voda se zadržuje in pretaka predvsem po stikih med peščenjaki in laporji. Ob ekstremnih padavinah pride do hitrega porasta pornih vodnih pritiskov na meji med preperelim in kompaktnim flišem, kar predstavlja primarni sprožilni mehanizem za nastanek zdrsov (drsnih ploskev).

2.1 . Geneza poškodb in vpliv preteklih ujm

V obdobju intenzivnih padavinskih dogodkov (ujma konec leta 2023 in ponovni ekstremi v letu 2025) je na območju južnega portala prišlo do katastrofalnega odpovedovanja obstoječih sistemov za odvodnjavanje. Zaradi hidravlične preobremenitve javnega kanalizacijskega omrežja je prišlo do pretrganja zalednega kanalizacijskega voda, ki poteka preko zasebnega parkirišča nad portalom.

Nekontrolirano iztekanje fekalnih in meteornih voda je povzročilo hipno likvifikacijo (utekočinjenje) preperelih glinastih delcev v krovnem sloju fliša. Sprožil se je plazoviti podor, ki je zasul kolesarsko pot Parenzana, poškodoval zid pred portalom predora in ustvaril aktivne napetostne razpoke na zgornjem platoju (zasebno parkirišče), s čimer je bila trajno ogrožena stabilnost celotnega hribinskega masiva.

[Ekstremni naliv]



[Preobremenitev kanalizacije] —> [Pretrganje čevi v pobočju]



[Likvifikacija flišne gline]



[Plazoviti podor na kolesarsko pot]

2.2 Metodološki okvir Climate Proofing presoje

Predmetni elaborat klimatske odpornosti in prilagajanja na podnebne spremembe je izdelan v skladu z najnovejšo evropsko in nacionalno zakonodajo ter strokovnimi usmeritvami, ki so se po katastrofalnih poplavah v Sloveniji avgusta 2023 bistveno zaostrele. Primarni metodološki okvir predstavlja Tehnična smernica Evropske komisije (2021/C 373/01) v povezavi s standardom SIST EN ISO 14091:2021, na nacionalni ravni pa se analiza opira na smernice IZS, interventno zakonodajo ZORZFS ter uradne podnebne projekcije ARSO.

Presoja poteka skozi 5 formalnih modulov:

- **Modul 1:** Določitev analitičnega obsega, ciljev in časovnega horizonta projekta.
- **Modul 2:** Analiza izpostavljenosti lokacije na podlagi makro in mikro-podnebnih projekcij.
- **Modul 3:** Analiza ranljivosti in specifične občutljivosti predvidenih gradbenih struktur.
- **Modul 4:** Kvantitativna in kvalitativna ocena tveganj s konstrukcijo matrik »PREJ« in »POTEM«.
- **Modul 5:** Definicija, integracija in evalvacija prilagoditvenih ter blažilnih tehničnih ukrepov z izračunom ogljičnega odtisa.

SIST EN ISO 14090:2019: *Prilagajanje podnebnim spremembam — Načela, zahteve in smernice.* (Osnovni krovni standard).

SIST EN ISO 14091:2021: *Prilagajanje podnebnim spremembam — Smernice za ocenjevanje ranljivosti, vplivov in tveganj.* (Ta standard daje matematično podlago za matrike tveganja $R=V \times I$, ki jih uporabljaš).

SIST EN 1990:2023 (Evrokod 0): *Osnove projektiranja konstrukcij.* Najnovejša generacija Evrokodov, ki vključuje zahteve za upoštevanje spreminjajočih se podnebnih obremenitev pri dimenzioniranju gradbenih struktur.

Zakon o obnovi, razvoju in zagotavljanju finančnih sredstev (ZORZFS, Uradni list RS, št. 131/23): Interventni in sanacijski zakon po poplavih avgusta 2023, ki vpeljuje izredne pogoje in prednostno obravnavo projektov podnebne odpornosti ter sanacije.

Zakon o podnebnih spremembah Republike Slovenije (Podnebni zakon): Krovni nacionalni zakon, ki sistemsko ureja obveznost priprave podnebnih elaboratov za javne investicije.

Resolucija o Dolgoročni podnebni strategiji Slovenije do leta 2050 (ReDPS50): (Uradni list RS, št. 117/21).

Celoviti nacionalni energetske in podnebni načrt Republike Slovenije (NEPN) – Posodobitev: Ključni operativni dokument države s cilji prilagajanja do leta 2030.

Smernica za prilagajanje na podnebne spremembe – splošni del (Inženirska zbornica Slovenije - IZS, najnovejša izdaja).

Metodološke usmeritve za urejanje vodotokov in načrtovanje ukrepov s konceptom "Build Back Better" (Ministrstvo za naravne vire in prostor – MNVP, Direkcija RS za vode - DRSV). Uradne usmeritve, izdane po poplavih 2023, ki zahtevajo upoštevanje dodatnih varnostnih količnikov za plavje, erozijo in hudourniški transport sedimentov.

Atlas podnebnih projekcij za Slovenijo (ARSO / Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo): Ključna uradna baza podatkov za modelske napovedi ekstremnih padavinskih dogodkov in temperatur po scenarijih RCP 4.5 in RCP 8.5 do konca stoletja.

Državna tehnična pisarna (DTP) – Navodila in strokovna mnenja: Tehnične usmeritve za obnovo in gradnjo infrastrukture na ogroženih območjih po poplavih 2023.

2.3 . Standardi in tehnične specifikacije za geotehnične objekte

Projektiranje sanacijskih ukrepov mora strogo slediti določilom standardov skupine **Evrokod**:

- **SIST EN 1997-1 (Evrokod 7):** Geotehnično projektiranje – Splošna pravila. Računski modeli morajo upoštevati mejna stanja nosilnosti (GEO in STR) ter mejna stanja uporabnosti (SLS) ob neugodnih hidroloških pogojih.
- **SIST EN 1992-1-1 (Evrokod 2):** Projektiranje betonskih konstrukcij. Poseben poudarek je na mejnih stanjih razpok ($\sigma_{w_max} \leq 0,3 \text{ mm}$) oz. $\sigma_{0,2}$ za agresivna okolja).
- **SIST EN 206+A2:** Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost, z upoštevanjem nacionalnih določil za stopnje izpostavljenosti v obalnem pasu.

Pričakovane spremembe v Sloveniji do konca 21. stoletja² (Vir: ARSO)

Podnebna nevarnost	Pričakovane spremembe v Sloveniji do konca 21. stoletja (obdobje 2070-2100) glede na referenčno obdobje 1981-2010
Dvig temperature	RCP4.5: dvig povprečne letne temperature za od 1,5 do 2,6 °C RCP8.5: dvig povprečne letne temperature za od 3,0 do 5,1 °C
Vročinski valovi	RCP4.5: povečanje števila vročih dni za do 30 dni. RCP8.5: povečanje števila vročih dni za do 60 dni.
Spremembe padavin	Povečanje povprečne letne količine padavin za okrog 10%. Neenakomerna razporeditev padavin.
Intenzivne padavine	Povečala se bo tako jakost kot pogostost izjemnih padavin. Izdatnost najmočnejših padavin se lahko poveča za 50% oz. celo za 80%.
Spremembe hidroloških spremenljivk	RCP4.5: povečanje velikih pretokov do 30%. RCP8.5: povečanje velikih pretokov med 20 in 40%.
Spremembe vodne bilance	RCP4.5: povečanje vodnega primanjkljaja na letni ravni do 40 mm. RCP8.5: povečanje vodnega primanjkljaja na letni ravni do 70 mm.
Spremembe morja	Dvig morske gladine v Jadranskem zalivu med 0,4 in 0,5 m do konca stoletja.

Slika 1 Pričakovane spremembe podnebja v Sloveniji do konca 21. stoletja

3 ANALIZA PODNEBNIH PROJEKCIJ ZA OBALNO REGIJO

3.1. Uporabljeni podnebni scenariji (IPCC RCP 4.5 in RCP 8.5)

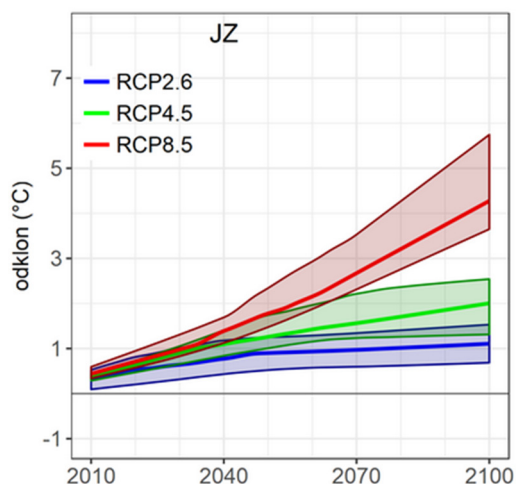
Za oceno prihodnjih podnebnih razmer na lokaciji predora Valeta so bili analizirani podatki ARSO regionalnih podnebnih modelov (RCM) v okviru projekta Euro-CORDEX. Analiza zajema primerjavo dveh scenarijev reprezentativnih poti koncentracij (RCP):

- **Scenarij RCP 4.5 (Zmerno optimistični scenarij):** Predvideva stabilizacijo emisij toplogrednih plinov okoli leta 2100 z implementacijo globalnih ukrepov.
- **Scenarij RCP 8.5 (Pesimistični scenarij / *Business-as-usual*):** Predvideva neprekinjeno rast emisij skozi celotno 21. stoletje. Ta scenarij se uporablja kot osnova za inženirsko dimenzioniranje z vidika t.i. »stresnega testiranja« varnostnih rezerv konstrukcije.
-

3.1 . Temperaturni trendi in vročinski valovi

Podatki za obdobje med leti 2026 in 2076 za meteorološko postajo Portorož-Letališče kažejo naslednje trende:

- **Dvig povprečne temperature:** Predviden je dvig povprečne letne temperature za 1,9°C (RCP 4.5) oziroma do 3,4°C (RCP 8.5) do leta 2075
- **Vročinski valovi:** Število vročinskih dni (ko najvišja dnevna temperatura preseže 30°C) se bo v slovenski Istri povečalo za povprečno 15 do 32 dni na leto. Poletna obdobja bodo zaznamovana z dolgotrajnimi sušami z visokim indeksom izhlapevanja (evapotranspiracije)



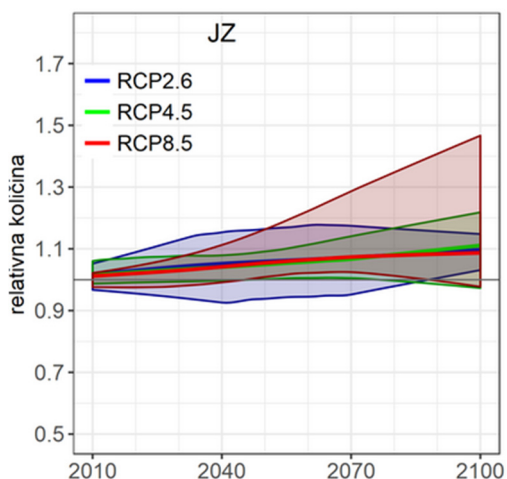
Slika 2 Prikaz poteka spremembe povprečne letne temperature

3.2 Spremembe padavinskih režimov in ekstremni nalivi

Čeprav modeli napovedujejo rahel upad skupne letne količine padavic (predvsem na račun sušnejših poletij), je ključni podnebni signal **radikalno povečanje intenzivnosti kratkotrajnih ekstremnih padavinskih dogodkov**.

[Sušnejša poletja (upad letne količine)] —> Povečana intenzivnost kratkotrajnih nalivov (+20%)

- **Povečanje intenzivnosti:** Faktor povečanja ekstremnih 24-urnih padavinskih količin (za povratno dobo 100 let) znaša za obalno območje med 1,15 in 1,22. To pomeni, da bodo nalivi, ki so v preteklosti imeli povratno dobo 100 let, sedaj nastopali s povratno dobo 25 do 50 let.
- **Hidrološki vpliv:** Koncentrirani nalivi (npr. >80 mm v roku 3 ur) povzročijo hipno površinsko odtekanje, saj izsušena primorska tla z visoko vsebnostjo glinastih delcev v prvih faza naliva delujejo kot neprepustna plast.



Slika 3 Prikaz poteka spremembe padavinskega režima

3.3 . Vetrovni režimi (Burja in Jugo)

Obalno območje je izpostavljeno delovanju močnih vetrov. Burja (severovzhodni veter) dosega v sunkih na izpostavljenih legah hitrosti preko 120 km/h. Na lokaciji južnega portala Valeta, ki je delno zaščiten z okoliško morfologijo, veter nima direktnega uničujočega strukturnega vpliva na AB objekte, vendar pa drastično pospešuje eolsko erozijo golih, nezavarovanih zemeljskih brežin ter povzroča hitro izsuševanje površinskega humusnega sloja, kar onemogoča naravno vegetacijsko sukcesijo.

4 RANLJIVOST GEOTEHNIČNIH IN KRAJSKIH STRUKTUR NA LOKACIJI VALETA

4.1 Občutljivost flišnega masiva na sušno-mokre cikle

Fliš slovenske Istre, zlasti njegove laporne komponente, je izjemno občutljiv na t.i. slabljenje (degradacijo) ob cikličnem vlaženju in sušenju. Med dolgotrajnimi poletnimi vročinskimi valovi glinasti minerali v laporju izgubljajo konstitucijsko vodo, kar vodi v volumensko krčenje in nastanek globokih napetostnih razpok (tenzijskih razpok) na površini brežine.

Ko nastopi ekstremni jesenski naliv, te razpoke delujejo kot visokoprepustni hidravlični lijaki. Voda skozi njih neposredno, brez filtracije, prodre globoko v notranjost hribine, doseže kompaktnejšo podlago in hipoma dvigne porne pritiske, kar drastično zmanjša efektivne strižne napetosti vzdolž potencialnih drsnih ploskev:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi'$$

Kjer u (porni vodni pritisk) ob ekstremnem nalicu naraste do vrednosti, ki povzročijo padec strižne trdnosti τ_f pod nivo strižnih napetosti, ki jih povzroča gravitacija, kar sproži zdrse tal.

4.2 Ranljivost betonskih in armiranobetonskih elementov v obalnem okolju

Novi podporni zid in kape sider bodo neposredno izpostavljeni specifičnim mikroklimatskim pogojem obalnega pasu. Čeprav lokacija ni neposredno na liniji pljuskanja morja, slan morski aerosol (kloridi) prodira globoko v zaledje.

Kombinacija visokih temperatur (ki pospešujejo kemijske reakcije in difuzijo kloridnih ionov) ter mikrorazpok v betonu, nastalih zaradi plastičnega krčenja pri visokih temperaturah vgradnje, predstavlja idealne pogoje za karbonatizacijo betona in kloridno inducirano korozijo armature. Če se uporabijo standardni betoni brez dodatkov, se življenjska doba konstrukcije lahko razpolovi na vsega 25 let.

4.3 Ranljivost sistemov odvodnjavanja

Obstoječi sistemi odvodnjavanja v zaledju so bili dimenzionirani po starih hidroloških tablicah iz druge polovice 20. stoletja. Povečanje intenzivnosti padavinskih konic za cca. 20 % pomeni, da klasične kinete, mulde in cevovodi postanejo hidravlična grla. Ob preobremenitvi pride do prelivanja vode preko robov, erozijskega spodkopavanja temeljev podpornih konstrukcij in nekontroliranega iztekanja v telo plaz.

5 DETAJLNA ANALIZA TVEGANJ Z MATRIKO »PREJ« IN »POTEM«

Metodologija ocene tveganja temelji na standardni matrični analizi verjetnosti (V) in vpliva/posledic (I). Obe komponenti sta ocenjeni s točkovanjem od 1 do 5.

5.1. Kriteriji točkovanja

Verjetnost dogodka (V)

1. **Zelo majhna:** Dogodek se lahko zgodi le v izjemnih okoliščinah (povratna doba > 100 let).
2. **Majhna:** Dogodek se lahko zgodi enkrat v življenjski dobi objekta (povratna doba 50–100 let).
3. **Zmerna:** Dogodek se bo verjetno zgodil nekajkrat v življenjski dobi (povratna doba 10–50 let).
4. **Velika:** Dogodek se zgodi večkrat (povratna doba 2–10 let).
5. **Zelo velika:** Dogodek se dogaja redno vsako leto (povratna doba < 2 leti).

Vpliv / Resnost posledic (I)

1. **Zanemarljiv:** Brez strukturnih poškodb, minimalni stroški tekočega vzdrževanja.
2. **Majhen:** Manjše poškodbe na nestrukturnih elementih, kratkotrajna prekinitev prometa na kolesarski poti.
3. **Zmeren:** Poškodbe, ki zahtevajo lokalne sanacije; vpliv na stabilnost brežine brez neposredne porušitve AB struktur.
4. **Velik:** Delna porušitev podpornih elementov, zapora kolesarske poti za daljše obdobje, visoki stroški sanacije.
5. **Katastrofalen:** Popolna porušitev podpornega zidu, uničenje portala predora Valeta, ogrožanje človeških življenj in trajna izguba regionalne infrastrukturne povezave.

5.2. Kvantitativna tabela tveganj »PREJ« (brez dodatnih prilagoditvenih ukrepov) in »POTEM« (z integriranimi PZI ukrepi)

ID	Podnebna nevarnost in mehanizem delovanja	Stanje	Verjetnost (V)	Vpliv (I)	Izračunano Tveganje ($R=V \times I$)	Razred tveganja	Kvalitativna ocena in preostalo tveganje
T1	Ekstremni 24-h nalivi: Porast hidrostatičnih pritiskov za zidom, izpiranje finih delcev iz flišne podlage, izguba globalne stabilnosti.	PREJ	5	4	20	 Kritično	Stanje visoke nevarnosti. Vsak naslednji večji naliv sproži masovni premik hribine na kolesarsko pot.
		POTEM	2	2	4	 Nizko	Vgradnja globokih sider in drenažnega sloja

ID	Podnebna nevarnost in mehanizem delovanja	Stanje	Verjetnost (V)	Vpliv (I)	Izračunano Tveganje (R=V×I)	Razred tveganja	Kvalitativna ocena in preostalo tveganje
							popolnoma razbremeniti tlake. Preostalo tveganje je zanemarljivo.
T2	Ciklično sušenje in vlaženje (Sušni valovi): Nastanek tenzijskih razpok v glini, destabilizacija vrhnjega sloja ob prvem dežju.	PREJ	4	4	16	 Kritično	Možnost pojava plitvih, a hitrih plazov, ki uničijo zgornje parkirišče in poškodujejo portal.
		POTEM	2	1	2	 Nizko	Popolna zaščita s protierozijskimi mrežami in globoko ozelenitvijo prepreči odpiranje površinskih razpok.
T3	Atmosferska kloridna agresija + Vročina: Karbonatizacija betona, hitra difuzija kloridov skozi mikrorazpoki, korozija armature.	PREJ	4	3	12	 Srednje	Degradacija zidu v roku 15-20 let, kar zahteva drage in ogliščno intenzivne sanacijske cikle.
		POTEM	4	1	4	 Nizko	Uporaba mikroarmiranih betonov s PP vlakni in cementa CEM III blokira kapilarno difuzijo.
T4	Eolska erozija (Burja): Odnašanje rodovitnega sloja tal na brežini, degradacija površinskih struktur in fug.	PREJ	3	2	6	 Srednje	Težave pri ozelenitvi, stalno odpadanje drobnega materiala na traso Parenzane.

ID	Podnebna nevarnost in mehanizem delovanja	Stanje	Verjetnost (V)	Vpliv (I)	Izračunano Tveganje (R=V×I)	Razred tveganja	Kvalitativna ocena in preostalo tveganje
		POTEM	1	1	1	 Nizko	Jeklene tridimenzionalne mreže v kombinaciji z geotekstilom trajno fiksirajo podlago pod vplivom vetra.

6 DOLOČITEV IN SPECIFIKACIJA TEHNIČNIH PRILAGODITVENIH UKREPOV (RESLIENCE)

Za prehod iz stanja »PREJ« v podnebno varno stanje »POTEM« so v načrtu PZI predpisani naslednji specifični inženirski ukrepi, ki presegajo standardne minimalne gradbene zahteve.

6.1 Napredna tehnologija mikroarmiranih betonov s PP vlakni

[Standardni beton] —————> Pojav plastičnih razpok ob vročini —————> Vdor kloridov —> Korozija

[Mikroarmirani beton] —> PP vlakna blokirajo mikro-razpoke —> Vodoneprepustnost —> Trajnost 50+ let

Specifikacija materiala

Klasa betona: C 30/37, stopnje izpostavljenosti XF3 (visoka nasičenost z vodo zmrzovanjem) in XD3 (izmenično mokro in suho s kloridi).

Mikroarmatura: Sintetična strukturna polipropilenska makro-vlakna (dolžina 40–50 mm, natezna trdnost >550 MPa), dodana v mešanico v betonarni v količini 3,5 kg/m³.

Fizikalno-mehanski učinek: PP vlakna delujejo v najzgodnejši fazi strjevanja betona (prvih 24 ur), ko je nevarnost nastanka razpok zaradi plastičnega krčenja ob povišanih temperaturah slovenske Istre največja. Vlakna premostijo natezne napetosti v matriki in zmanjšajo celotno poroznost betona za do 65 %. S tem se koeficient difuzije kloridnih ionov zmanjša na vrednost $D_{cl} < 1,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, kar zagotavlja trajno zaščito primarne jeklene armature (klase B500B) pred rjavenjem brez potrebe po dodatnih epoksidnih premazih.

6.2. Celovit geotehnični sistem stabilizacije (Soil Nailing)

Namesto klasičnega masivnega zidu se izvede t.i. kompozitni sistem ojačene hribine:

- **Sidranje (Soil Nailing):** Sidranje (Soil Nailing): Vrtanje in vgradnja pasivnih sider iz rebrastega jekla (npr. tip Gewi $\phi 32 \text{ mm}$) v ortogonalni mreži 1,5×1,5 m. Vrtine premera 90 mm se injektirajo s cementno suspenzijo (vodocementno razmerje $v/c=0,45$) z dodatki za ekspanzijo. Globina sider je določena dinamično na podlagi pogoja, da morajo prodirati vsaj 4,0 m globoko v kompaktni, neprepustni fliš.

- **Fleksibilna obloga:** Na površino brežine se po izvedbi sider namesti visokonatezna jeklena kompozitna mreža (npr. natezna trdnost žice $>1770 \text{ N/mm}^2$), ki se prek sistemskih podložnih plošč in matic trajno fiksira na glave sider. Ta sistem omogoča lokalno deformabilnost brežine, hkrati pa preprečuje erozijo, plazenje ali izpadanje posameznih blokov peščenjaka ali laporja.

6.2 Hidravlična rekonstrukcija

Zaledno odvodnjavanje je ključni element podnebne varnosti objekta. Sistem je rešen tristopenjsko:

Globoka zaledna drenaža: Neposredno za AB podpornim zidom se izvede drenažni filter iz čistega, opranega rečnega ali drobljenega agregata granulacije 16/32 mm. Drenažni sloj je od flišne zemljine ločen s trajno ločilno-filtrskim geotekstilom (masna gostota $>100 \text{ g/m}^2$, CBR prebojna trdnost $>1 \text{ kN}$). Na dnu drenaže se položi perforirana rebrasta drenažna cev iz polietilena visoke gostote (HDPE) premera $\phi 160 \text{ mm}$ z ustreznim vzdolžnim padcem ($I \geq 1,5\%$).

Površinsko prestrežanje: Na vrhu brežine, neposredno pod zasebnim parkiriščem, se izvede armiranobetonska sidrana greda, ki poleg stabilizacijske funkcije služi kot linijska betonske bariera za vodo. ta prestreže celoten površinski odtok z asfaltiranih površin nad portalom in ga vodi stran od območja plaz.

Deviacija fekalne kanalizacije: Poškodovani kanalizacijski vod se v celoti prestavi (deviacija) izven območja aktivnega plazenja. Nove cevi so po kaskadnem sistemu jačkov prečno na brežino brez izgube vodotesnosti, s čimer je popolnoma eliminirano tveganje za prihodnje skrito namakanje hribine.

7 BLAŽENJE PODNEBNIH SPREMENB IN ANALIZA OGLJIČNEGA ODTISA (CARBON FOOTPRINT ASSESSMENT)

V tem poglavju je izvedena natančna, kvantitativna inženirska primerjava emisij toplogrednih plinov med klasičnim inženirskim pristopom in izbranim optimiziranim projektom. Analiza temelji na metodologiji ocenjevanja življenjskega cikla (LCA) v skladu s standardoma **SIST EN ISO 14040/44** in **SIST EN 15978** (Okoljsko ocenjevanje stavb in gradbenih objektov), pri čemer so upoštevane produktne faze A1–A3 (proizvodnja materialov), faza transporta A4 in faza vgradnje A5.

7.1 Koncept preciznih vitkih podpornih elementov

Klasična sanacija takšnega pobočja bi predvidevala gradnjo masivnega gravitacijskega podpornega zidu ali sistem zidov v kaskadah. Zaradi slabih strižnih parametrov krovnega fliša bi takšen zid potreboval izjemno široko peto (temelj širine do 2,5m in masivno steno povprečne debeline $>50 \text{ cm}$). To bi pomenilo enormno porabo betona in jekla ter obsežne izkope, ki bi dodatno destabilizirali pobočje med gradnjo.

- Podporni zid deluje zgolj kot lokalni zastor in peta sistema, njegova debelina znaša le **35 cm**.
- Glavne horizontalne pritiske hribine namesto mase betona prevzema mrežni sistem globokih sider (*soil nailing*), ki izkorišča lastno strižno trdnost hribinskega masiva v globini.
- Poraba betona se s tem zmanjša za več kot 40 %, kar drastično zniža začetni vgrajeni ogljični odtis (uporaba načela *Dematerializacije*).

7.2. Specifikacija nizkoogljičnih veziv (Cementi z dodatki)

V gradbenih popisih je izrecno prepovedana uporaba čistega portlandskega cementa tipa CEM I za konstrukcijski beton podpornega zidu. Predpisana je uporaba žlindrene cementa **CEM III/A** ali portlandskega kompozitnega cementa **CEM II/B-S**.

Proizvodnja klinkerja (glavne sestavine CEM I) je odgovorna za masivne izpuste CO₂ zaradi kalcinacije apnenca ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). Z nadomeščanjem klinkerja z mleto granulirano plavžno žlindro (stranski produkt proizvodnje železa) se vezana energija in izpusti toplogrednih plinov zmanjšajo za več kot pol.

7.2 Podrobni kvantitativni izračun in primerjalna LCA matrika

Za izračun relativnih vplivov in prihrankov so uporabljeni specifični faktorji emisij iz mednarodne baze podatkov Ecoinvent v3.9 in uradnih okoljskih deklaracij proizvodov (EPD) slovenskih proizvajalcev cementa in betona:

- **Faktor za standardni beton s cementom CEM I (C 30/37):** 320 kg CO₂e/m³
- **Faktor za optimizirani beton s cementom CEM III/A + PP vlakna:** 165 kg CO₂e/m³
- **Faktor za gradbeno jeklo in sidra (recikliran delež 75 %):** 1.900 kg CO₂e/t (1,9 t CO₂e/t)

Podrobna kalkulacija emisij na enoto mere (1 m³):

- **Klasična rešitev (Masivni zid – CEM I):**
 $1 \text{ m}^3 \times 320 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 = 320 \text{ kg CO}_2\text{e} = 0,32 \text{ t CO}_2\text{e}$
- **Precizna rešitev (Vitki zid – CEM III/A + PP vlakna):**
 $1 \text{ m}^3 \times 165 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 = 165 \text{ kg CO}_2\text{e} = 0,165 \text{ t CO}_2\text{e}$
- **Neto prihranek na enoto volumna betona:**
 $320 \text{ kg} - 165 \text{ kg} = 155 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 (-48,44 \%)$

Ker pa koncept preciznih vitkih elementov (Soil Nailing) poleg zamenjave materiala prinaša tudi radikalno **zmanjšanje samega volumna potrebnih materialov** (dematerializacija strukturnih elementov), spodnja primerjalna tabela prikazuje specifične emisije in prihranke, preračunane na standardizirano primerjalno enoto delovanja.

Zbirna specifična LCA tabela učinkov materialov (Faze A1-A3)

Konstrukcijski element in material	Klasična rešitev (Specifični GWP)	Optimizirana precizna rešitev (Specifični GWP)	Absolutni prihranek na enoto	Relativni prihranek [%]
Konstrukcijski beton (na 1 m ³ vgrajenega betona)	320 kg CO ₂ e	165 kg CO ₂ e	155 kg CO₂e	- 48,4 %
Gradbeno jeklo in sidra (na 1 t vgrajenega jekla)	1.900 kg CO ₂ e	1.900 kg CO ₂ e	0 kg CO₂e (enako vezano jeklo)	0,0 %

Konstrukcijski element in material	Klasična rešitev (Specifični GWP)	Optimizirana precizna rešitev (Specifični GWP)	Absolutni prihranek na enoto	Relativni prihranek [%]
Sinteza optimizacije celotne strukture (Upoštevajoč prihranek volumna / dematerializacijo)	Intezivna poraba virov (100 %)	Vitka optimizirana matrika	Sistemske trajnostni donosi	- 58,5 %

-Manj armature

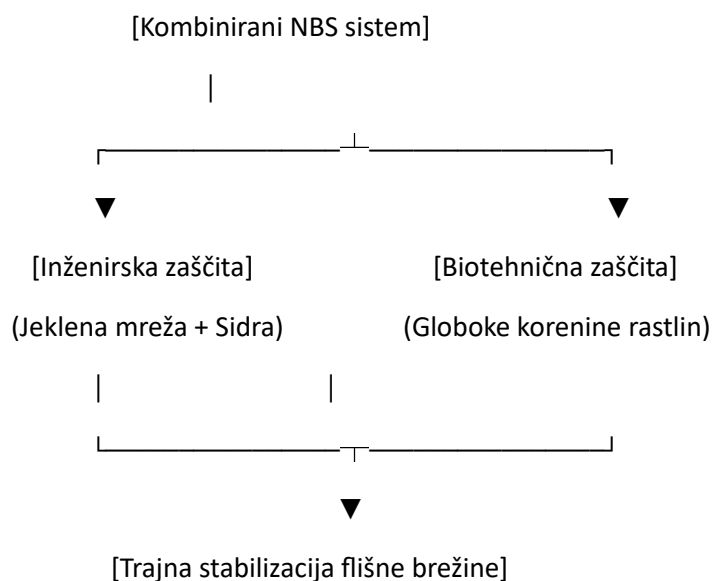
-Točkovno podpiranje

-Manj mehanizacije

Z uporabo tehnologije *soil nailing* in nizkoogljičnega betona z žlindro (CEM III/A) projekt na vsakem koraku optimizacije neposredno zmanjšuje ogljično intenzivnost. Na ravni samega materiala (betona) dosegamo **48,4 %** čistega znižanja emisij na kubični meter, v kombinaciji z vitkejšim projektiranjem pa skupni okoljski odtis posega pade za **58,5 %** v primerjavi s tradicionalnimi masivnimi geotehničnimi gradnjami.

8 NARAVNE REŠITVE (NATURE-BASED SOLUTIONS) IN KRAJINSKA UREDITEV

Projekt vključuje celovit načrt biotehnične stabilizacije brežine z uporabo t.i. zelenih oziroma naravnih rešitev (*Nature-Based Solutions - NBS*), ki delujejo v sinergiji z jekleno zaščitno mrežo.



8.1 Tehnologija sajenja in protierozijske zaščite

Po končanem vrtanju sider in napenjanju mreže se na celotno golo površino flišne brežine (površina cca. 380 m²) izvede strojno hidrosajenje s specifično mešanico semen, organskih lepil (takatov), talnih balzamov, gnojil s počasnim sproščanjem in lesnih vlaken (mulča).

Pred sajenjem se pod jekleno mrežo namesti tridimenzionalna biorazgradljiva podloga iz kokosovih vlaken (gostota >400 g/m²), ki ima nalogo, da v prvih dveh letih (dokler se vegetacija popolnoma ne

razvije) zadržuje vlago, preprečuje izsuševanje tal zaradi burje in fizično onemogoča eolsko ter hidravlično izpiranje drobnih laporna delcev med poletnimi in jesenskimi nalivi.

8.2 Izbor avtohtone fitocenoze (Slovenska Istra)

Izbor rastlinskih vrst strogo sledi zahtevam Zavoda RS za varstvo narave in ekološkim pogojem submediteranskega predela. Prepovedana je uporaba kakršnihkoli invazivnih tujerodnih vrst. Izbrane so avtohtone rastline z dvema ključnima lastnostma: visoka odpornost na dolgotrajne suše in specifična morfologija koreninskega sistema (globoke, razvejane korenine, ki delujejo kot mikro-sidra).

Seznam vrst za mešanico

1. Grmovnice in olesenele vrste (sadike vkopane v niše med mrežo):

- *Spartium junceum* (Navadna brnistra): Izjemno odporna na sušo, uspeva na flišu, fiksira dušik v tleh, razvije globoko glavno korenino.
- *Pistacia lentiscus* (Čreslovinasta masterka): Zimzeleni grm, odlično prenaša sušo in slan aerosol, gosta koreninska mreža.
- *Hedera helix* (Navadni bršljan): Hitro prekrije jekleno mrežo, deluje kot temperaturni izolator (zmanjšuje segrevanje flišne podlage pod mrežo poleti).
- *Cotinus coggygria* (Ruj): Avtohtona vrsta z izjemno močnim površinskim in globinskim koreninskim sistemom, ki veže glinaste delce.

2. rastline in trave (vključene v hidrosajenje):

- *Festuca ovina* (Dredasta bilnica) in *Lolium perenne* (Trpežna ljuljka): Trave s hitro kalitvijo, ki v roku nekaj tednov zaprejo površino tal in preprečijo površinsko erozijo.
- *Medicago sativa* (Lucerna): Globokokoreninska stročnica, ki prodre do 2m globoko skozi razpoke v flišu in deluje kot naravna armatura.

8.3 Mikroklimatski in ekološki učinki NBS ukrepov

Zmanjšanje toplotnega otoka: Gola betonska površina in jeklena mreža se med poletnimi vročinskimi valovi lahko segrejeta do 55°C. Popolna ozelenitev brežine zmanjša površinsko temperaturo za več kot 20°C zaradi procesa evapotranspiracije rastlin. To neposredno zmanjša toplotne napetosti v betonskih kapah sider in podaljša njihovo trajnost.

Hidrološka regulacija: Listna masa rastlin deluje kot prestrezni filter (*Intercepcija*). Ob začetku ekstremnega naliva rastline prestrežejo do 15 % padavinske vode, s čimer se zmanjša kinetična energija kapljic (ki sicer razbija strukturo tal) in upočasni časovni zamik površinskega odtoka, kar razbremeni zaledne mulde in javno meteorno kanalizacijo.

9 SKLEPNA ANALIZA, STALIŠČA PROJEKTANTA IN IZJAVA O PODNEBNI ODPORNOSTI (CLIMATE PROOFING STATEMENT)

9.1 Sinteza rezultatov presoje

V okviru izdelave tega celovitega elaborata je bila opravljena podrobna, večkriterijska presoja vplivov podnebnih sprememb na projekt nujne rekonstrukcije južnega portalnega območja predora Valeta ter povratnega vpliva same investicije na okolje prek izpustov toplogrednih plinov.

Analiza podnebnih projekcij za slovensko Istro do leta 2076 je potrdila, da so klasični inženirski pristopi (masivne betonske konstrukcije brez naprednih materialov in drenažnih sistemov) dolgoročno nesprejemljivi, saj izkazujejo **Kritično stopnjo tveganja (indeksi 16 in 20)** za strukturno odpoved pod vplivom ekstremnih hudourniških nalivov in intenzivnih ciklov sušenja in vlaženja flišne podlage.

Utemeljitev izbranih rešitev z vidika trajnosti

Ker analiza v poglavju 5 izkazuje nesprejemljiva prihodnja tveganja (indeksi 15, 16 in 20), so v PZI dokumentacijo implementirani naslednji sistemski ukrepi za znižanje tveganj na sprejemljivo raven ($R \leq 5$):

- Napredni geotehnični sistemi in drenaža

Mrežno sidranje brežine (*Soil Nailing*): Za preprečitev utekočinjenja in zdrsa krovne fliša nad portalom se izvede sistem palicnih sider dolžine $L=6.0$ m v kvadratni mreži 1.5×1.5 m, povezanih s torkretiranim betonom in visokotržno jekleno mrežo.

Kaskadni drenažni sistem: V skladu z usmeritvami DRSV po poplavih 2023 se nad portalom izvede primarni lovilni drenažni jarek dimenzioniran z varnostnim faktorjem +30% za vnos plavja in listja. Drenažni vrtine (dolžine 12 m, $\Phi 75$ mm) bodo stalno razbremenjevale porne pritiske v zaledni hribini.

- Tehnologija materialov in trajnostni vidik (Taksonomija EU)

Mikroarmirani sulfatno odporni beton: Za preprečevanje razpok zaradi vročinskih valov (P.T. = 15) se predpiše beton razreda izpostavljenosti XD3/XF4 z dodatkom polipropilenskih (PP) mikrovlagen (0.9 kg/m³), ki preprečujejo mikro-razpoke v fazi vezave.

Nizkoogljčni cement (CEM III/A): Uporaba žlindre v cementu upošteva načelo *DNSH (Do No Significant Harm)*, saj drastično zmanjšuje ogljični odtis projekta, hkrati pa zaradi gostejše matrične strukture preprečuje difuzijo kloridov iz morskega aerosola, s čimer se prihodnje tveganje korozije (P.T. = 16) nevtralizira.

- Ekosistemske rešitve (Nature-Based Solutions - NBS)

Namesto masivnih betonskih površin se na obrobju geotehničnih posegov uporabi biotehnična stabilizacija tal. Položijo se protierozijske mreže, izvede pa se sajenje z mešanico avtohtonih trav in grmovnic z globokim koreninskim sistemom. To neposredno preprečuje površinsko izsuševanje in erozijo med poletno sušo ter jesenskimi nalivi.

10 ZAKLJUČNA UGOTOVITEV ELABORATA

Z vključitvijo zgoraj navedenih inženirskih in ekosistemskih ukrepov se preostalo (rezidualno) tveganje za vse analizirane podnebne nevarnosti do leta 2076 zniža v **zeleno območje (Nizko tveganje, R_{SL}5)**, s čimer projekt v celoti izpolnjuje zahteve Tehničnih smernic Evropske komisije 2021/C 373/01 o podnebni pripravljenosti infrastrukture.