

Primljen / Received: 19.2.2024.

Ispravljen / Corrected: 19.5.2024.

Prihvaćen / Accepted: 28.5.2024.

Dostupno online / Available online: 10.6.2024.

# Održivost u gradnji cesta – Dvije studije slučaja

Autor:

Dr.sc. **Kerim Hrapović**, dipl.ing.grad.

Institut za inženjerstvo autocesta na Sveučilištu

RWTH Aachen, Njemačka

Građevinski fakultet

[hrapovic@isac.rwth-aachen.de](mailto:hrapovic@isac.rwth-aachen.de)

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

**Kerim Hrapović**

## Održivost u gradnji cesta – Dvije studije slučaja

Razmatranje održivosti u području izgradnje prometnica treba se odvijati u kontekstu inteligentne zaštite resursa. Holistička procjena održivosti, uključujući razmatranje i procjenu životnog ciklusa, ovdje je od ključne važnosti. U prvom slučaju, kolnička konstrukcija na značajno opterećenom prometnom raskrižju Daimler izvedena je od betona u neposrednom području raskrižja te od betona i asfalta u području sva četiri privoza. Preko postojećeg završnog sloja ceste izveden je nevezani sloj za zaštitu od smrzavanja s granulacijom zrna 0/45 mm, u debljini od 31 cm. Slijedilo je postavljanje asfaltnog nosivog sloja (AC 32) u debljini od 8 cm, koji je ugrađen pomoću asfaltnog finišera. Na kraju se preko asfaltnog nosivog sloja izveo sloj betona debljine 26 cm. U drugom slučaju, prikazana je horizontalna hibridna metoda gradnje na primjeru njemačke autoceste BAB A61 u području Koblenz-a. Horizontalna hibridna metoda gradnje kombinira prednosti asfalta i betona kako bi se stvorila trajna i otporna površina kolnika koja može podnijeti velika prometna opterećenja. Ova inovativna metoda izgradnje omogućuje optimalno korištenje različitih materijala i osigurava učinkovitu rekonstrukciju i poboljšanje infrastrukture autocesta.

### Ključne riječi:

izgradnja cesta, kolnik, održivost, asfalt, beton, otpornost na deformacije, horizontalna hibridna izgradnja, vijek trajanja, polipropilenska vlakna

Research Paper

**Kerim Hrapović**

## Sustainability in road construction – Two case studies

Sustainability in the field of traffic route construction should be considered against the background of intelligent resource conservation. A holistic assessment of sustainability, including life cycle considerations and assessments, is essential. In the first case study, the pavement structure at the heavily loaded Daimler intersection was constructed using concrete in the direct intersection area and using both concrete and asphalt in the connecting areas of all four axes. A 31 cm thick unbound frost protection layer with a grain size of 0/45 mm was placed over the existing road surface. This was followed by an 8 cm thick asphalt base course (AC 32), applied using an asphalt paver. Finally, a 26 cm thick concrete layer was placed over the asphalt base course. In the second case study, a horizontal hybrid construction method is presented using the German motorway BAB A61 in the Koblenz area as an example. Horizontal hybrid construction combines the advantages of asphalt and concrete to create a durable and resistant pavement surface capable of withstanding high traffic loads. This innovative construction method enables the optimum use of different materials and ensures efficient rehabilitation and improvement of motorway infrastructure.

### Key words:

road construction, pavement, sustainability, asphalt, concrete, deformation resistance, horizontal hybrid construction, service life, polypropylene fibres

## 1. Uvod

Održivost u izgradnji cesta - kontradikcija? Ne, ovo uopće ne bi trebala biti kontradikcija! Važnost održivosti u izgradnji cesta u stalnom je porastu. Nije više riječ o svrhovitom građenju cesta za prometovanje. Umjesto toga, moramo prilagoditi nepropusne površine izvedene od betona, asfalta i ploča novim konceptima odvodnje. Posebice asfalt, jer se može zagrijati do ekstremnih temperatura i većih od 60 do 70°C tijekom vrućih dana, što ima ozbiljne posljedice za zdravlje nemoćnih i starijih osoba te također doprinosi globalnom zagrijavanju.

Tijekom 2021. godine, prema Saveznoj agenciji za okoliš Austrije, svakog dana je izgradnjom dodatno "okupirano" 10 hektara zemljišta. Tijekom razdoblja od tri godine, dnevni prosjek iznosio je 11,3 hektara (otprilike površina 12 velikih nogometnih igrališta), što je uglavnom bilo potrebno za građevne aktivnosti, prometnu infrastrukturu i komercijalne prostore [1].

Prema njemačkoj Saveznoj agenciji za okoliš, naseljena područja i površine za prometovanje prosječno su se povećavali za 129 hektara dnevno između 1997. i 2000. godine. Navedena površina odgovara otprilike veličini 180 nogometnih igrališta. U usporedbi, prosječni dnevni porast smanjio se na 55 hektara u razdoblju od 2018. do 2021., s ponovnim blagim porastom krivulje trenda [2].

Održivost u cestogradnji također uključuje odabir ispravnog građevnog materijala za odgovarajuću lokaciju. Održiva gradnja cesta ostvarena je kada se osigura najdulje moguće trajanje konstrukcije. Na primjer, upotreba betona može biti razumna opcija za površine s velikim prometnim opterećenjem kojima učestalo prometuju teška teretna vozila. Upotreba betona na ovakvim lokacijama pruža prednosti u pogledu dugotrajnosti i izdržljivosti prometnica uslijed visoke otpornosti na deformacije. Usmjeravanjem na prednosti različitih građevnih materijala može se povećati održivost infrastrukture te se smanjuju troškovi popravaka i rekonstrukcija kolničke konstrukcije. Kolotrazi i deformacije asfalta nastali uslijed preopterećenja.



Slika 1. Kolotrazi i deformacije asfalta uslijed preopterećenja uzrokovanih kočenjem, zaustavljanjem te pokretanjem u blizini raskrižja i na autobusnim stajalištima [autor, 2020.]

Situacija u kojoj se kolotrazi i deformacije asfalta javljaju uslijed preopterećenja uzrokovanih kočenjem, zaustavljanjem i pokretanjem u blizini raskrižja, poznata je mnogima od nas. Ova slika često se viđa na prometnim cestama i posljedica je stalnih naprezanja kojima je površina ceste izložena uslijed prometnog opterećenja, posebice na mjestima gdje vozila često koče ili polaze. Ovaj fenomen ilustrira kako stalna naprezanja tijekom vremena utječu na površinu kolničke konstrukcije. Kako bi se smanjila takva oštećenja i zajamčila sigurnost i trajnost prometnih pravaca, ključno je redovito održavanje cesta (slika 1.).

U svakodnevnom životu, kao i u području gradnje prometnica, svaki građevni materijal ima svoje prednosti i nedostatke. Asfalt je poznat kao elastični građevni materijal, a beton kao kruti građevni materijal. S druge strane, beton kao kruti građevni materijal ima veću otpornost na deformacije, posebice pod opterećenjem teških vozila. Posljedično, površina betonske kolničke konstrukcije općenito nema tendenciju razvoja dubokih kolotruga koji mogu zadržavati vodu.

Unatoč tome, oba građevna materijala imaju svoje specifične prednosti. Upotreba asfalta ili betona u izgradnji cesta ovisi o raznim čimbenicima, poput prometnog opterećenja, okoliša, vremenskih uvjeta i željenih svojstava ceste. Pažljivo planiranje i odabir materijala stoga su ključni kako bi se pronašlo najbolje moguće rješenje za specifične zahtjeve koji se postavljaju na ceste ili autoceste (slika 2.).



Slika 2. Površina betonske kolničke konstrukcije ne omogućava nastajanje kolotruga s visokom akumulacijom vode [autor, 2016.]

Struktura kolničke konstrukcije u prvoj studiji slučaja kombinira prednosti asfalta i betona kako bi se ostvarila trajna i otporna površina ceste koja može izdržati značajna prometna opterećenja. Beton kao završni sloj osigurava stabilnost i trajnost na prometna opterećenja, posebice uslijed prometa teških teretnih vozila. Kombinacija asfalta i betona omogućuje otpornu cestovnu površinu koja može

izdržati velika prometna opterećenja i temperature oscilacije. Sve to značajno produljuje životni vijek autoceste, što dugoročno smanjuje troškove održavanja.

## 2. Raskrižje s betonskom kolničkom konstrukcijom

### 2.1. Općenito

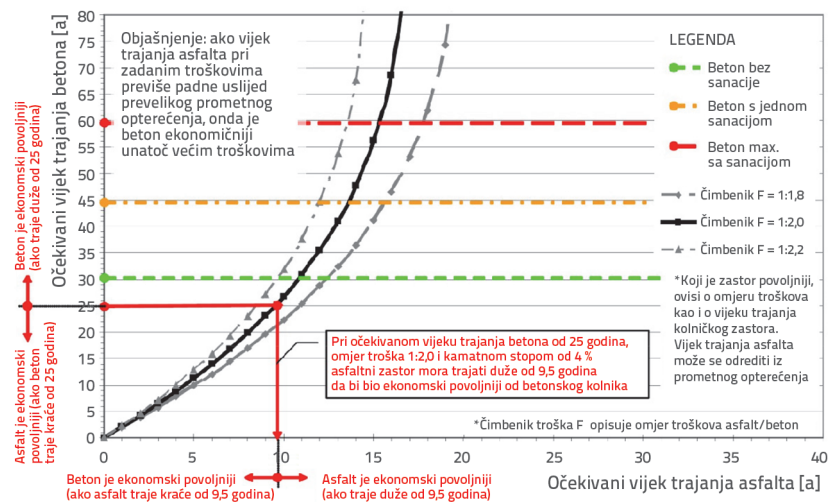
Raskrižje Daimler u Böblingenu prometno je čvorište koje povezuje četvertračnu općinsku cestu K 1073 između Böblingena i Dagersheima (Boeblinger Strasse) s Gottlieb-Daimler-Straße na sjeveru i Dornierstrasse na jugu. U posljednjoj analizi utjecaja prometnog opterećenja na kolničku konstrukciju, posebno veliko prometno opterećenje utvrđeno je za sjevernu prometnicu Gottlieb-Daimler-Strasse. Identificirano je oko 28.000 motornih vozila i 3.640 kamiona težih od 3,5 tone (teška teretna vozila) dnevno. Ovi brojevi ilustriraju golemo prometno opterećenje koje ova cesta svakodnevno podnosi. Obzirom na takva opterećenja, pažljivo planiranje i dimenzioniranje kolničke konstrukcije ključno je kako bi se osigurala dugoročna i sigurna uporaba prometnih pravaca.



Slika 3. Raskrižje tijekom izvedbe betonskog kolnika: raskrižje Daimler, okrug Böblingen [3]

S obzirom na velika prometna opterećenja od teških teretnih vozila, nekadašnje raskrižje Daimlera imalo je duboke kolotrage na asfaltnoj površini kolničke konstrukcije. Kao rezultat, pri planiranju vrlo velikog raskrižja i razmatrajući predviđena značajna povećanja volumena prometa - do 37.700 motornih vozila dnevno kao i 4.310 teških teretnih vozila dnevno - odlučeno je rekonstruirati raskrižje dodavanjem betonskog sloja na nosivu asfaltnu podlogu. To je omogućilo izgradnju otpornije cestovne površine koja bi bolje mogla podnijeti buduća prometna opterećenja. Osim toga,

Vijek trajanja pri istom anuitetu prema čimbeniku troška  $F$  ( $i = 4\%$ )



Slika 4. Ekonomična upotreba kolnika u kružnim tokovima u okviru kapitalnih investicijskih projekata prema opterećenju, vijeku trajanja i omjeru troškova [4] (obradio autor)

bilo je vrlo važno održati prometovanje tijekom građevnih radova kako se ne bi utjecalo na mobilnost korisnika cesta. Takva odluka zahtijevala je temeljito planiranje i koordinaciju kako bi se osiguralo nesmetano izvođenje građevnih radova, uz istovremeno razmatranje sigurnosti svih sudionika u prometu [3] (slika 3.).

Slika 4. prikazuje dijagram ekonomske učinkovitosti kolničke konstrukcije: ekonomična upotreba kolnika u kružnim tokovima u okviru kapitalnih investicijskih projekata prema opterećenju, vijeku trajanja i omjeru troškova [4].

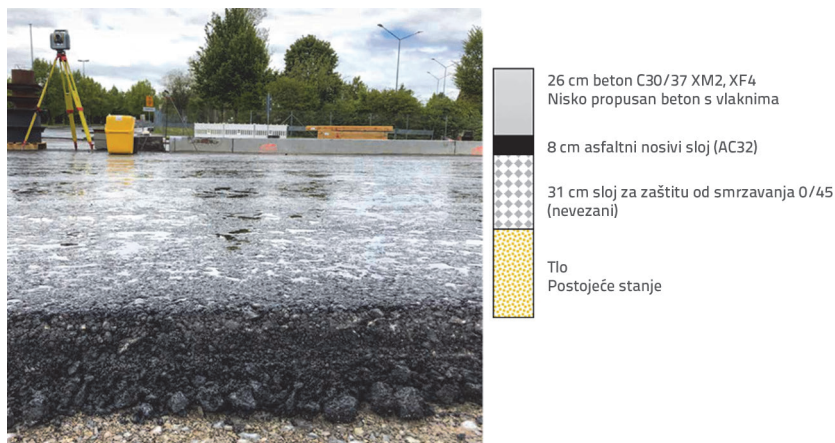
Na temelju navedenih podataka i čimbenika troška  $F$  kao omjera troška asfalta prema betonu, može se primijeniti jednostavan postupak za određivanje ekonomski optimalnog kolnika. Formula anuiteta služi se za određivanje, za zadani omjer troška, vijeka trajanja asfalta i betona kod kojih se javlja isti godišnji trošak. Na primjer, ako se očekuje da će beton imati vijek trajanja od 25 godina, čimbenik troška  $F$  je 1:2,0, a kamatna stopa je 4%, asfaltni kolnik mora trajati duže od 9,5 godina da bi bio ekonomski povoljniji od betonskog kolnika. To znači da ako asfaltni kolnik traje manje od 9,5 godina, betonski kolnik je ekonomski bolji izbor. Međutim, ako asfaltni kolnik traje duže od 9,5 godina, ekonomski je povoljniji od betonskog kolnika za zadane čimbenike troška i kamatnu stopu.

Ovaj postupak omogućuje brzu procjenu ekonomske isplativosti kolnika i može biti koristan pri donošenju odluka o optimalnom tipu kolnika u određenim situacijama [4].

### 2.2. Kolnička konstrukcija na raskrižju Daimler

Na slici 5. prikazana je kolnička konstrukcija raskrižja Daimler. Preko postojeće cestovne površine izveden je nevezani sloj za zaštitu od smrzavanja s granulacijom zrna 0/45 mm, u debljini od 31 cm. Nakon toga slijedi asfaltni nosivi sloj (AC 32),





Slika 5. Ugradnja betonskog kolnika na postojeću kolničku konstrukciju na raskrižju: asfaltni nosivi sloj; poprečni presjek kolničke konstrukcije raskrižja Daimler [3] (uredio autor)

koji je ugrađen pomoću asfaltnog finišera, u debljini od 8 cm. Konačno, preko asfaltnog nosivog sloja ugrađen je sloj betona u debljini od 26 cm. Beton ima specifikacije C30/37 XM2, XF4, WS, a maksimalna veličina zrna je 16 mm. Radi se o nisko propusnom betonu s vlaknima, koji je ugrađen pomoću finišera za beton [3].

Ova kolnička konstrukcija kombinira prednosti asfalta i betona kako bi se ostvarila trajna i otporna cestovna površina koja može izdržati velika prometna opterećenja na raskrižju Daimler. Nevezani sloj za zaštitu od smrzavanja služi kako bi spriječio prodor mraza u cestovnu površinu, a asfaltni nosivi sloj osigurava ravnomjernu raspodjelu opterećenja. Beton kao završni sloj pruža stabilnost i trajnost na prometno opterećenje, posebno u pogledu prometa teških teretnih vozila. Ovakva slojevitost struktura stoga osigurava potrebnu čvrstoću i otpornost ceste za predviđena buduća prometna opterećenja na raskrižju Daimler.

Ugrađivanje asfaltnog nosivog sloja, u debljini od 8 cm, pomoću asfaltnog finišera vođenog žicom izvedeno je bez problema. Takav sloj je idealna podloga za naknadno ugrađeni betonski kolnik zbog relativno visokog modula elastičnosti  $EV_2$ , dobre ravnosti i preciznog niveliranja visine. Asfaltni nosivi sloj tako je ispunio nekoliko važnih funkcija:

- Savršena podloga za betonski kolnik: zbog svojih svojstava, asfaltni nosivi sloj osigurao je izvrsnu podlogu za betonski kolnik koji se naknadno ugradio.
- Prometovanje gradilišnim i dostavnim vozilima: asfaltni nosivi sloj omogućio je promet tijekom faze izgradnje te pristup građevnim vozilima i dostavama materijala.
- Postavljanje rubne oplata: asfaltni nosivi sloj poslužio je kao stabilna podloga za pričvršćivanje rubne oplata potrebne za ugradnju betonske ploče.

Kombinacija visokokvalitetnog asfaltnog nosivog sloja i precizne izvedbe stvorila je čvrstu podlogu koja je olakšala daljnju izgradnju betonskog kolnika i omogućila nesmetan tijek izgradnje. Odabrani pristup osigurava da se na raskrižju Daimler

ostvari čvrsta i trajna cestovna površina koja može izdržati sve prometne zahtjeve [3] (slika 6.).

Ovdje opisani moždanici i sidra imaju važnu ulogu u povezivanju i stabilizaciji betonskih ploča u pločastom sustavu na raskrižju Daimler:

- **Moždanici:** Postavljeni su u držače (košare) otprilike u sredini debljine betonske ploče i umetnuti na udaljenosti od 25 cm prije betoniranja. Njihova glavna funkcija je sprječavanje vertikalnih pomaka (nepravilnosti u položaju ploča) unutar pločastog sustava, koji mogu biti uzrokovani poprečnim silama i momentima savijanja. Ovi vertikalni pomaci obično

se događaju pri prijelazu vozila preko spojeva ili rubova betonskih ploča. Sidra pružaju pouzdano učvršćenje i sprječavaju nekontrolirano odvajanje betonskih ploča.

- **Sidra:** Postavljena su poprečno u odnosu na smjer kretanja prometa i ravnomjerno su raspoređena (u ovom slučaju: 3 sidra po ploči). Njihova glavna funkcija je dodatno učvršćivanje betonskih ploča i sprječavanje bočnog pomaka. Ta sidra pomažu u osiguravanju stabilnosti cjelokupnog pločastog sustava i održavanju položaja betonskih ploča.
- **Armatura za betonske ploče nepovoljnog oblika:** Za betonske ploče s nepovoljnim omjerom duljine prema širini ili neizbježnim oštrim kutovima bilo je potrebno koristiti armaturnu mrežu u jednom sloju u gornjoj zoni betonske ploče. Ta armatura služi kako bi se povećala čvrstoća i stabilnost opisanih betonskih ploča te smanjila mogućnost pojave pukotina ili deformacija.



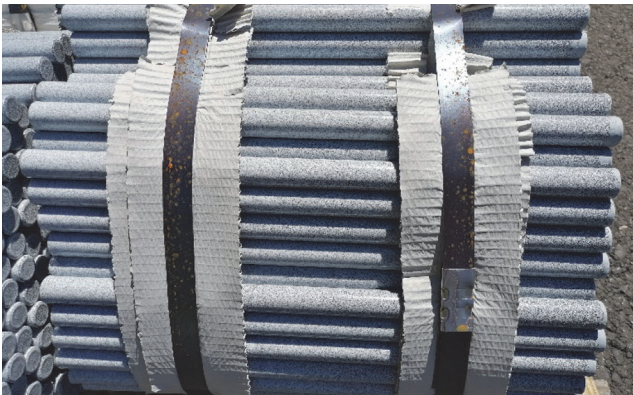
Slika 6. Raskrižje tijekom ugradnje betonskog kolnika: asfaltni nosivi sloj raskrižja Daimler [3]

Kombinacija moždanika, sidra i po potrebi dodatne armature ima odlučujuću ulogu u učinkovitom povezivanju i stabilizaciji betonskih ploča na raskrižju Daimler. Ova kolnička konstrukcija i pažljiva upotreba navedenih elemenata osiguravaju trajnu i otpornu cestovnu površinu koja udovoljava visokim zahtjevima prometa i opterećenjima na tom prometnom raskrižju [3] (slika 7.).

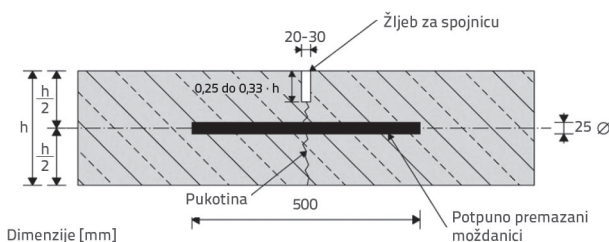


Slika 7. Priprema betonskog sloja s ojačanim, geometrijski kritičnim područjem; prethodno postavljanje moždanika u košare ispod naknadno izvedenog poprečnog spoja [3]

Moždanici (slika 8.) izrađeni su od glatkog čelika S 235 JR, kružnog poprečnog presjeka. Standardnog su promjera od  $\varnothing 25$  mm (varijacija dimenzije  $\pm 0,5$  mm) te duljine od 500 mm (varijacija dimenzije  $\pm 5$  mm). Na obje strane su gotovo bez oštih rubova, bez ikakve promjene poprečnog presjeka, te su presvučeni PE plastikom (otpornom na lužine) cijelom dužinom, uključujući jednu čeonu stranu. Debljina premaza je najmanje 0,3 mm. Jedna čeonu strana moždanika je premazana sredstvom protiv hrđanja. Moždanici se postavljaju u sredinu betonske ploče (slika 9.).



Slika 8. Glatki okrugli čelični moždanici [autor, 2023]

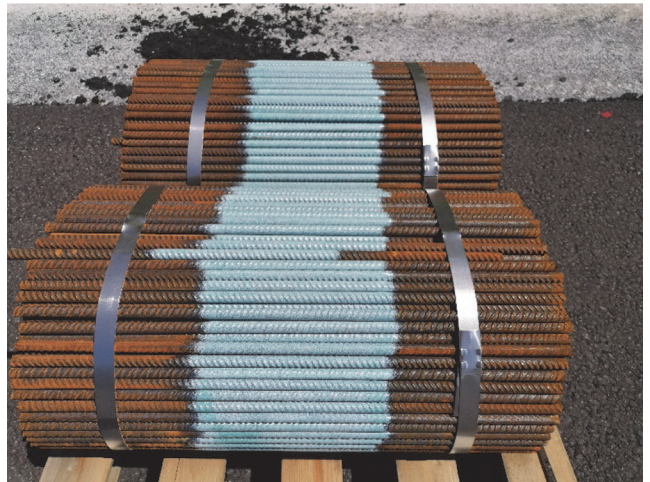


Slika 9. Nebrtvljeni, prividni spoj s moždanikom (dimenzije u mm) [5] (uredio autor)

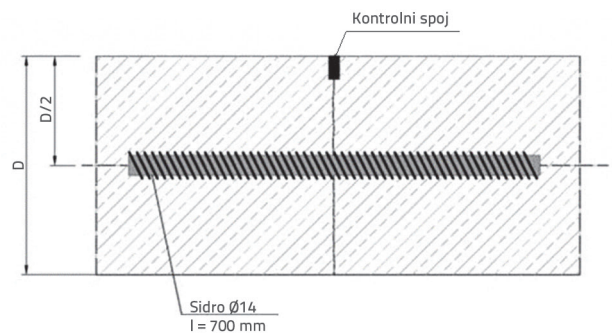
Sidra za uzdužne prividne spojeve (standardna sidra) (slika 10.) izrađena su od rebrastog armaturnog čelika B500B i

standardnog su promjera od  $\varnothing 20$  mm, te duljine od 800 mm (varijacija dimenzije  $\pm 15$  mm). Obostrano su rezana čeličnim škarama za armaturu i presvučena PE plastikom (otpornom na lužine) u srednjem dijelu u dužini od otprilike 200 mm. Debljina premaza je također najmanje 0,3 mm.

Postavljanje rebrastih čeličnih sidara na kontrolnim spojevima izvodi se u sredini betonske ploče (slika 11.) [6].



Slika 10. Sidra napravljena od rebrastog armaturnog čelika B500B [autor, 2023]



Slika 11. Sidro napravljeno od rebrastog armaturnog čelika B500B [6]

Beton za izvođenje kolnika na raskrižju Daimler je razreda konzistencije C1, što znači da ima određenu obradivost i konzistenciju. Isporučeni beton C30/37 XM2, XF4, WS, s vlaknima i maksimalnom veličinom zrna od 16 mm, ugrađen je pomoću finišera za beton. Oznaka "XF4" ovdje opisuje aerirani beton s prosječno 5,5 % umjetno izvedenih zračnih pora u svježem betonu. Te zračne pore nisu vidljive golim okom, ali imaju važnu funkciju: osiguravaju da voda koja prodire u beton (uslijed kapilarnog djelovanja) ima dovoljno prostora za širenje kada se zamrzne. Navedeno svojstvo sprječava oštećenja betonske površine zbog stvaranja leda i povećanja volumena, što je s time povezano. Odluka o upotrebi aeriranog betona s oznakom XF4 važna je kako bi se osigurala otpornost na smrzavanje betona i smanjila šteta od ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.



Raskrižje Daimler posebno je izloženo različitim vremenskim uvjetima i stoga je važno osigurati trajnost i otpornost betonske površine.

Upotreba betona s ovim specifičnim svojstvima, zajedno sa preciznom metodom ugradnje pomoću finišera za beton, pomaže osigurati da betonske ploče tvore čvrstu i trajnu cestovnu površinu koja može izdržati prometne zahtjeve kao i vanjske utjecaje [3] (slika 12.).



Slika 12. Precizna metoda gradnje betonskog kolnika pomoću finišera [3]

Razred izloženosti betona XM2 zahtijeva poseban tretman površine, koji se u klasičnoj gradnji betonskih kolnika obično postiže tzv. "obradom površine metlom". Ovakva metoda obrade izvodi se na površini betonskog kolnika okomito na smjer kretanja vozila. Primjenom završne obrade površine metlom postiže se nekoliko važnih rezultata:

- *Završna obrada površine:* ova metoda stvara potrebnu završnu obradu betonske površine i štiti je od utjecaja okoliša.
- *Poboljšana otpornost na klizanje:* ova metoda daje teksturu betonskoj površini, stvarajući bolju otpornost na klizanje za vozila. Time se povećava sigurnost na cestama, posebice u mokrim ili skliskim uvjetima.
- *Odvodnja kišnice s prometne površine:* ova metoda osigurava smjer u kojem će kišnica otjecati lateralno sa kolničke površine, što je vrlo važno jer se tako izbjegne stvaranje lokvi na kolniku i osigurava njegova drenaža.

Metoda "obrade površine metlom" je dokazana metoda kojom se poboljšava sigurnost i otpornost površine betonskog kolnika za cestovni promet, te ispunjava zahtjeve razreda izloženosti XM2, koji

uključuju posebne mjere obrade površine. Ovaj pristup pomaže osigurati da je cestovna površina raskrižja Daimler sigurna za promet i dobro drenirana kako bi izdržala različite vremenske uvjete i prometna opterećenja (slika 13.) [3].

Plan gradnje bio je obilježen definiranjem dviju faza izgradnje kako bi se izbjeglo potpuno zatvaranje ovog raskrižja za promet. Prva faza izgradnje (zapadna strana) započela je u ožujku i završila u srpnju 2019., a druga se faza nastavila od sredine srpnja do sredine rujna 2019., s otvaranjem raskrižja za promet 25. rujna 2019.



Slika 13. Završna obrada površine betonskog kolnika pomoću metle [3]

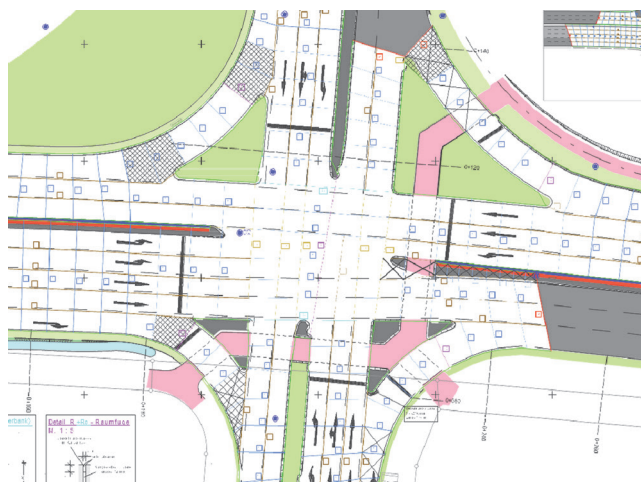
Tijekom izgradnje narmiranih betonskih kolničkih ploča, ključno je i nužno izvoditi spojeve. Spojevi služe za sprječavanje nekontroliranog pucanja u pločastom sustavu, za relaksaciju betonske konstrukcije s predodređenom linijom za pukotine te kako bi se omogućilo tehnički besprijekorno brtvljenje spojeva.



Slika 14. Rezanje prividnih spojeva: u prvom planu je glodanje reza (zaobljenje), u pozadini, stroj za rezanje s prethodno izvedenim prvim te izvođenje drugog spoja (prvo se izvodi "zarezi" spoja, slijedi proširivanje razmaka spoja); poprečni presjek prividnog spoja [3]

Spojevi su pripremljeni primjenom temeljnog premaza kako bi se osiguralo dobro bočno prijanjanje (adhezija). Nakon toga su zapunjeni dvokomponentnim hladnim spojnim brtvilom da se spriječi prodiranje prljavštine i vode. Pravilnim brtvljenjem spojeva sprječava se prodor vode, jer vlaga može uzrokovati cikluse smrzavanja i odmrzavanja koji mogu oštetiti površinu betonske kolničke konstrukcije. Slika 14 prikazuje dva aspekta vezana uz spojeve [3]:

- *Rezanje i freziranje spoja.* U prvom planu može se vidjeti freziranje već izrezanog spoja, također nazvano "zaobljenje". Ovakva priprema spojeva važna je kako bi se odredila linija pukotine i kako bi se kasnije spoj tehnički uredno izveo. U pozadini se može vidjeti stroj za rezanje, koji je prethodno izveo prvi te izvodi drugi rez spoja.
- *Prividni spoj.* Prividni spoj je vidljiva linija ili razdjelnica izvedena na površini betonskih ploča kako bi se stvorio dojam spoja. Ti prividni spojevi mogu imati estetsku funkciju ili pak služiti za podjelu betonskog kolnika na različita područja ili dijelove.



Slika 15. Situacijski plan ciklusa vožnji finišera za beton i rasporeda spojeva [3]

Općenito, spojevi su važan dio projektiranja betonskog kolnika kako bi se osigurala trajnost i otpornost pločastog sustava na raskrižju Daimler, te kako bi se ostvarila sigurnija i tehnički ispravna cestovna površina. Pomoću ovog situacijskog plana detaljno je prikazan raspored prividnih spojeva, prostornih spojeva, kontrolnih spojeva kao i kontrolnih spojeva izvedenih na kraju određenog ciklusa betoniranja (na kraju radnog dana). Planiranje ciklusa vožnji finišera za beton također je prikazano u ovom situacijskom planu [3] (slika 15.).

Betonska ploča, debljine 26 cm, na raskrižju Daimler ojačana je polipropilenskim vlaknima, takozvanom "mikroarmaturom". Vlakna su duga otprilike 6 cm i umiješana su u beton u količini od 3 kg/m<sup>3</sup>. Iako nisu statički relevantna, ona ipak ispunjavaju važne funkcije (slika 16.).

Dodavanje vlakana rezultiralo je sljedećim:

- *Smanjena pojava pukotina uslijed skupljanja betona.* Polipropilenska vlakna značajno smanjuju vjerojatnost pucanja uslijed skupljanja tijekom egzotermnog postupka stvrdnjavanja betona. Ovaj postupak odnosi se na povećanje temperature u betonu kada vezivo reagira s vodom. Vlakna umanjuju pucanje tijekom ovog procesa.
- *Poboljšana kohezija materijala.* Vlakna jačaju koheziju materijala betona, posebice pod mehaničkim opterećenjem, što povećava otpornost betona.
- *Povećana vlačna čvrstoća nakon nastanka pukotina i izduženje pri kidanju.* Polipropilenska vlakna poboljšavaju sposobnost betona da prenosi vlačna naprezanja nakon nastanka pukotina i povećavaju kapacitet izduženja materijala.
- *Unutarnje stvrdnjavanje.* Prianjanje vode na površinu vlakana osigurava vrstu „unutarnjeg stvrdnjavanja“. Voda pomaže u stvrdnjavanju betona i razvoju optimalne čvrstoće i trajnosti.

Korištenje polipropilenskih vlakana kao mikroarmature učinkovit je način za poboljšanje svojstava betona i povećanje trajnosti i performansi betonskog kolnika na raskrižju Daimler. Ova mjera pomaže betonu da bolje podnosi velika prometna opterećenja,



Slika 16. a) Polipropilenska vlakna "AWP Forta Ferro"; b) Beton s polipropilenskim vlaknima [3]



temperатурне осцилације и друга напреzanja, čime се продuljuje trajnost cestovne površine [3] (slika 16.).

### 3. Horizontalna hibridna gradnja

#### 3.1. Općenito

Drugi primjer održivosti u cestogradnji je horizontalna hibridna gradnja cesta. Najbolji građevni materijal neće pomoći ako je, prvo, ugrađen nepravilno i, drugo, ugrađen na pogrešnom mjestu. Asfalt ili beton? Inače, građevna tvrtka u kojoj sam započeo raditi 1994. godine i nastavio daljnjih 17 godina, originalna tvrtka šefa Strabaga dr. Hansa-Petera Haselsteinerja, zvala se "Asfalt i Beton" ("ASPHALT UND BETON"). To se jako dobro uklapa u ovu temu, pa zašto ne kombinirati oba građevna materijala, asfalt i beton?

#### 3.2. Horizontalna hibridna metoda gradnje

Slika 17. prikazuje tzv. "horizontalno-hibridnu metodu gradnje" primijenjenu za rekonstrukciju dionice prometne autoceste A61. Konkretno, tijekom ljeta 2019., istrošeni asfaltni kolnik zamijenjen je betonskim kolnikom na zaustavnom traku i desnom prometnom traku. Savezna njemačka pokrajina "Rheinland-Pfalz" je implementirala ovu metodu gradnje u praksi i prepoznala njen potencijal. Od 2017. godine više od 12 kilometara autocesta uspješno je izvedeno primjenom horizontalne hibridne metode gradnje na području Koblenza [7]. Ova metoda gradnje sastoji se od izrade kolnika od dva različita materijala:

- **Asfaltni kolnik.** Asfaltni kolnik sastoji se od asfaltnog nosivog sloja, asfaltnog veznog sloja te gornjeg, habajućeg sloja od mastiksasfalta. Mastiksasfalt je posebna vrsta asfalta koja nudi visoku otpornost na klizanje zbog svoje homogene površine. Ovaj sloj se koristi na jednom, krajnjem lijevom prometnom traku.
- **Betonski kolnik.** Betonski kolnik je izveden u dvoslojnoj konstrukciji s površinskom obradom tzv. "opranoj betona". "Oprani beton" je metoda obrade betonske površine gdje se vezivo ispire kako bi se stvorila teksturirana površina. Ovako obrađena površina koristi se na drugom prometnom traku, zaustavnom traku ili pak na dodatnim trakovima.

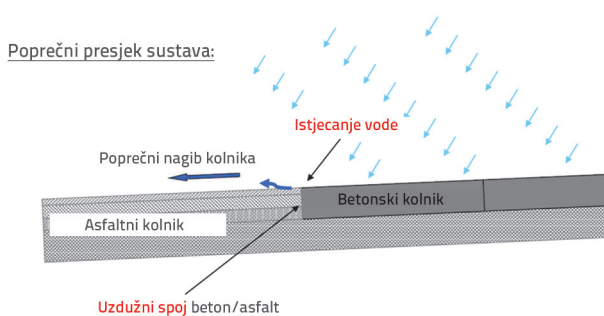
Odluka o primjeni mastiksasfalta za habajući sloj kod asfaltnog kolnika vjerojatno je donesena zbog njegovih posebnih svojstava poput visoke izdržljivosti, dobre otpornosti na klizanje kao i dobre apsorpcije zvuka, što je znatna prednost na prometnim autocestama.

Horizontalna hibridna metoda gradnje tako kombinira prednosti asfalta i betona kako bi stvorila trajnu i otpornu cestovnu površinu koja može podnijeti velika prometna opterećenja. Ta inovativna metoda gradnje omogućuje optimalnu upotrebu različitih materijala i osigurava učinkovitu obnovu kao i poboljšanje infrastrukture autocesta [7].



Slika 17. Horizontalna hibridna metoda gradnje za obnovu prometne autoceste A61, Njemačka [7]

Problem istjecanja vode iz spoja između asfalta i betona izazov je koji se može pojaviti prilikom gradnje horizontalno hibridnom metodom. U toj metodi gradnje susreću se dva različita materijala, asfalt i beton, te je mjesto njihova spoja potencijalno osjetljivo na prodor/istjecanje vode (slike 18. i 19.).



Slika 18. Problem: istjecanje vode iz spoja između asfalta i betona [8]



Slika 19. Problem: istjecanje vode na mjestu spoja asfalta i betona [8]

Problem istjecanja vode iz spoja betona i asfalta može imati različite uzroke:

- **Različita svojstva istezanja.** Asfalt i beton imaju različite koeficijente toplinskog širenja, što znači da se ponašaju različito kada su izloženi promjenama temperature.



Navedene razlike mogu uzrokovati različito širenje ili skupljanje materijala kada su vrući ili hladni, što može dovesti do pojave prslina ili pukotina duž spojeva.

- *Nedovoljno brtvljenje.* Ako spojevi nisu pravilno zabrtvljeni, voda može prodrijeti u kontaktnu površinu između asfalta i betona, što može izazvati probleme osobito nakon oborina ili pri lošim vremenskim uvjetima.
- *Odvijanje prometa.* Stalna izloženost prometu, posebice prometu teških teretnih vozila, može uzrokovati pomicanje i deformaciju kolnika, što može učiniti spojeve osjetljivima na prodor vode.

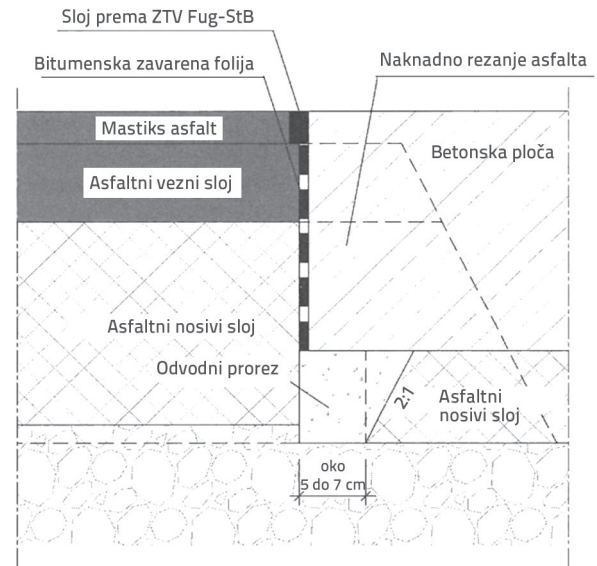
Projektiranje i izvedba spoja između različitih tipova kolnika ključni su za trajnost hibridnog sustava. Spoju se mora posvetiti najveća pažnja tijekom planiranja i izgradnje. Na slici 20 prikazan je detalj spoja. FGSV (Njemačko znanstveno društvo za ceste i promet) objavilo je referentni rad "H BaA" 2017. godine. Ovdje treba obratiti posebnu pozornost na bitumensku zavarenu foliju na spoju betona i asfalta! Kako bi se osigurala odvodnja vode koja eventualno proдре u spoj, u ovoj zoni mora se predvidjeti odvodni prorez kao mogućnost drenaže prema nevezanim slojevima. Odvodni prorez izvodi se kao udubljenje, npr. frezanjem utora, rezanjem ili oblikovanjem rubova podloge 2:1. Zatim se on mora potpuno ispuniti odgovarajućom mješavinom građevnog materijala pogodnog za drenažu, npr. materijalom granulacije 2/5 mm ili 5/8 mm [9] (slika 20.).

Važno je znati da je nakon izvedbe asfaltnog nosivog sloja i asfaltnog vezivnog sloja na lijevom i srednjem prometnom traku, precizno izmjeren položaj naknadno izvedenog desnog ruba spoja. Precizno mjerenje pozicije spoja osigurava postavljanje spoja na pravo mjesto te da je kontaktna površina između asfalta i betona optimalno projektirana.

Odvodni prorez, koji je ispunjen mješavinom građevnog materijala (npr. granulacije 2/5 mm ili 5/8 mm), ispunjava važnu funkciju u horizontalnoj hibridnoj gradnji. Kroz taj prorez voda koja prodire s površine kolnika, odvodi se duž spoja i time se osigurava drenaža kolnika. Odvodnja je od velike važnosti jer pomaže u sprječavanju zadržavanja vode u spoju, što umanjuje rizik od oštećenja uslijed djelovanja mraza te drugih oštećenja uzrokovanih vlagom.

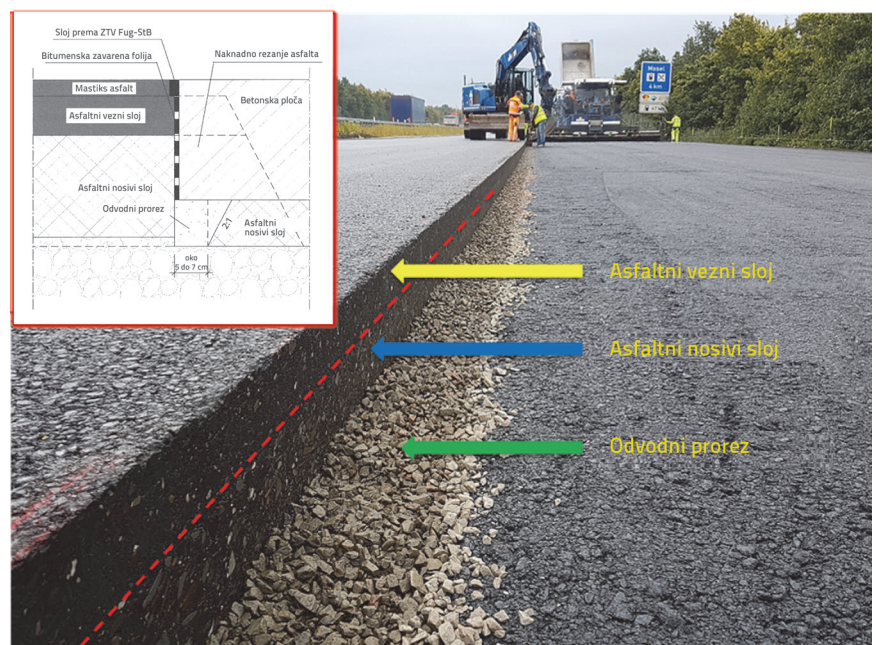
Upotreba različito obojenih zrna ili zrna različitih granulacija za asfaltni nosivi sloj, asfaltni vezivni sloj kao i mješavinu građevnog materijala u odvodnom prorezu čini različite slojeve i funkcije kolničke površine jasno vidljivima. Navedeno je važno ne samo iz praktičnih razloga, već i zbog cjelokupnog estetskog dojma novoizgrađene autoceste.

Točno mjerenje položaja spoja, pažljivo projektiranje odvodnje kolnika kao i jasna razlučivost slojeva, doprinose uspješnoj provedbi horizontalne hibridne metode gradnje i visokoj funkcionalnosti, otpornosti i estetici kolničke površine. Takve mjere ključne su za produljenje uporabljivosti autoceste i omogućavanje sigurne i pouzdane prometne infrastrukture [7] (slika 21.).



Slika 20. Detalj spoja [9]

Potpuno vezanje bitumenske membrane za asfaltni rub reza od presudne je važnosti za funkciju spoja u horizontalnoj hibridnoj gradnji. Ova mjera uzima u obzir različita svojstva ekspanzije betona i asfalta uslijed temperaturnih oscilacija.



Slika 21. Naknadno izvedeni desni rub asfaltnog kolnika rezanjem [7] (obradio autor)

Beton i asfalt imaju različita svojstva toplinskog širenja. Iako beton ima tendenciju širenja na toplini, asfalt se ipak širi više pri visokim temperaturama. Pri niskim temperaturama, beton se skuplja više od asfalta. Ova razlika u toplinskim svojstvima može dovesti do naprezanja i deformacija na spoju asfalta i betona ako građevni materijali nisu pravilno usklađeni jedan s drugim. Preciznim i čvrstim vezanjem bitumenske membrane za asfaltni rub reza, stvara se učinkovita veza između betona i asfalta. Bitumenska membrana djeluje kao elastični razdjelni i spojni sloj koji može apsorbirati širenje ili skupljanje ta dva materijala pod različitim temperaturnim uvjetima. Vezanje bitumenske membrane (folije) osigurava da spoj između betona i asfalta ostane vodonepropusan te smanjuje oštećenja uzrokovana prodorom vode i ciklusima smrzavanja i odmrzavanja.

Isppravno rukovanje i ugradnja bitumenske folije stoga su presudni za osiguranje funkcionalnosti i trajnosti horizontalne hibridne metode gradnje. Precizna izvedba može osigurati da, unatoč različitim svojstvima širenja građevnih materijala betona i asfalta, kolnička površina autoceste ima stabilnu i trajnu vezu, te može izdržati prometna opterećenja kao i različite vremenske uvjete (slika 22.).



Slika 22. Precizno lijepljenje bitumenske folije na rub asfalta [7]

Dionica autoceste A61 izvedena primjenom metode horizontalne hibridne gradnje, dovršena tijekom zime 2017./18., smatra se efektivnim i funkcionalnim primjerom održivosti u cestogradnji. Implementacija horizontalno hibridne metode gradnje nedvojbeno je inovativno i učinkovito rješenje za poboljšanje dugotrajnosti i otpornosti kolničkih konstrukcija autocesta uz istovremeno ispunjavanje zahtjeva održivosti.

Neke od održivih značajki i prednosti ove metode gradnje su ove:

- *Trajnost.* Kombinacija asfalta i betona omogućuje otpornu cestovnu površinu koja može izdržati velika prometna opterećenja i temperaturne oscilacije. Time se značajno produljuje trajanje autoceste, što dugoročno smanjuje troškove održavanja.
- *Zaštita resursa.* Odabir odgovarajućih materijala te pažljivo planiranje i izvođenje ove metode gradnje doprinose zaštiti resursa. Upotreba betona i asfalta na određenim dionicama

kolnika omogućuje učinkovito korištenje specifičnih prednosti tih materijala.

- *Odvodnja vode.* Planiranje učinkovite odvodnje i brtvljenja spojeva smanjuje rizik od prodiranja vode i štiti cestovnu površinu od oštećenja smrzavanjem. Time se dodatno poboljšava dugotrajnost autoceste.
- *Energetska učinkovitost.* Planiranje i odabir materijala, prilagođenih specifičnim zahtjevima horizontalne hibridne gradnje, mogu pomoći u optimizaciji potrošnje energije tijekom izgradnje i u kasnijoj uporabi autoceste.
- *Smanjenje utjecaja na okoliš.* Korištenjem održivih metoda i materijala gradnje, smanjuje se utjecaj na okoliš prilikom izgradnje prometne infrastrukture, što posebno pozitivno utječe na emisiju CO<sub>2</sub> kao i potrošnju resursa.

Uspješna provedba takvog projekta pokazuje da su održiva rješenja u cestogradnji moguća i da mogu ponuditi ekonomske i ekološke koristi (slika 23.). Takvi primjeri su inspirativni i pokazuju da se cestogradnja u budućnosti može sve više oslanjati na održive principe kako bi stvorila infrastrukturu otpornu na buduće izazove.

Klasični primjer hibridne kolničke konstrukcije također se nalazi i na autocesti A10 Tauern kod raskrižja Wengen-Pongau u Austriji (slika 24.).



Slika 23. Horizontalna hibridna dionica autoceste A61 [10]



Slika 24. Tauern - Autocesta A10 na raskrižju Wengen-Pongau, Austrija [autor, 2021.]



## 4. Zaključak

U 2021. godini, prema Austrijskoj saveznoj agenciji za okoliš, svakog dana je dodatno "okupirano" 10 hektara zemljišta. Tijekom razdoblja od tri godine, prosječno je za građevne potrebe dnevno upotrebjeno 11,3 hektara (površina odgovara otprilike 12 velikih nogometnih igrališta), što je uglavnom bilo potrebno za građevne aktivnosti, prometnu infrastrukturu i komercijalne površine. Prema Njemačkoj saveznoj agenciji za okoliš, naseljena područja i prometne površine povećali su se u prosjeku za 129 hektara dnevno, između 1997. i 2000. godine. To odgovara otprilike veličini 180 nogometnih igrališta. Održivost u cestogradnji također uključuje odabir ispravnog građevnog materijala na odgovarajućem mjestu. Održiva gradnja cesta postiže se kada je zajamčen najdulji mogući vijek trajanja konstrukcije.

U dvije prikazane studije slučaja, raskrižje u betonskoj izvedbi te horizontalna hibridna metoda gradnje, istaknut je utjecaj održivosti u cestogradnji kroz odabir odgovarajućeg građevnog materijala, u ovom slučaju betona, za pravo mjesto ili ispravnu uporabu. Ako se vijek trajanja asfaltnog kolnika značajno smanji uz određene troškove zbog velikog prometnog opterećenja,

beton postaje ekonomičan unatoč većim troškovima, iako je beton otprilike upola jeftiniji od asfalta.

U prvoj studiji slučaja provodi se kombiniranje prednosti asfalta i betona kako bi se stvorila trajna i otporna površina ceste koja može izdržati visoka prometna opterećenja na raskrižju Daimler. Nevezani sloj za zaštitu od smrzavanja služi kako bi se spriječilo prodiranje mraza u cestovnu površinu, a asfaltni nosivi sloj osigurava ravnomjernu raspodjelu opterećenja. Beton kao završni sloj pruža stabilnost i trajnost protiv prometnog opterećenja, posebice s obzirom na promet teških teretnih vozila. Takva struktura slojeva kolničke konstrukcije osigurava potrebnu čvrstoću i otpornost ceste na predviđena buduća prometna opterećenja na raskrižju Daimler.

Horizontalna hibridna metoda gradnje u drugoj studiji slučaja kombinira prednosti asfalta i betona kako bi stvorila trajnu i otpornu cestovnu površinu koja može podnijeti velika prometna opterećenja. Ta inovativna metoda gradnje omogućuje optimalno korištenje različitih materijala i osigurava učinkovitu obnovu i poboljšanje infrastrukture autoceste.

Široka i opsežna primjena ovih dviju metoda, na odgovarajućim lokacijama, uvelike bi pridonijela održivosti cestogradnje u budućim projektima, što je velika želja autora ovog rada.

## LITERATURA

- [1] Enzinger, S.: Bodenverbrauch in Österreich, Retrieved 07 22, 2023, from <https://www.umweltbundesamt.at/news221202>, 2022.
- [2] Umweltbundesamt Deutschland, Siedlungs- und Verkehrsfläche, Retrieved 07 22, 2023, from <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsflaeche#anhaltender-flachenverbrauch-fur-siedlungs-und-verkehrszwecke>
- [3] Grünwald, A.: Langlebiger Verkehrsknoten Betonbauweise für eine hoch belastete Straßenkreuzung, Retrieved 07 22, 2023, from Aktuelles zu Betonstrassen und zur Verkehrsinfrastruktur, Ausgabe Januar 2020, update 56: [https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Service/Update/Update\\_56\\_1-2020.pdf](https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Service/Update/Update_56_1-2020.pdf)
- [4] Hoffmann, M.: KVP Richtlinie, Richtlinie Kreisverkehrsplätze, Graz: Das Land Steiermark, ABteilung 18 – Verkehr 2001, 2008.
- [5] Blab, R., Hoffmann, M., Langer, M., Marchtrenker, S., Nischer, P., Peyerl, M., Steigenberger, J.: Betonstrassen, Das Handbuch - Leitfaden für die Praxis. Wien: Zement + Beton Handels- u. Werbeges.m.b.H., 2012.
- [6] Wedl, S.: Kreisverkehre mit Betonfahrbahndecken - Bemessung und Ausführung. Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, E 233 Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Diplomarbeit, Wien, 2007.
- [7] Tiemann, A.: Horizontal-hybrider Straßenbau. (Heinz Schnorpfeil Bau GmbH), Retrieved 07 22, 2023, from Erhaltungszyklen verlängern: [https://www.this-magazin.de/artikel/tis\\_Horizontal-hybrider\\_Strassenbau-3565982.html](https://www.this-magazin.de/artikel/tis_Horizontal-hybrider_Strassenbau-3565982.html), 2020.
- [8] IBA Engineering Jannicke: Arbeitspapier zur Bauweise „Beton an Asphalt“, Retrieved 07 22, 2023, from: [https://www.beton.org/fileadmin/guetegemeinschaft-beton-de/media/Redaktion/PDF-Dateien/7-Jannicke\\_Arbeitspapier.pdf](https://www.beton.org/fileadmin/guetegemeinschaft-beton-de/media/Redaktion/PDF-Dateien/7-Jannicke_Arbeitspapier.pdf), 2017.
- [9] FGSV Nr. 819: Hinweise zur Bauweise: Beton an Asphalt, H BaA Köln: FGSV - Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2017.
- [10] Heinz Schnorpfeil Bau GmbH: Retrieved 07 22, 2023, from Autobahnbau: <https://www.schnorpfeil.eu/content/geschaeftsbereiche/autobahnbau/>, 2018.