TEHNIČKO VELEUČILIŠTE U ZAGREBU ZAGREB UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

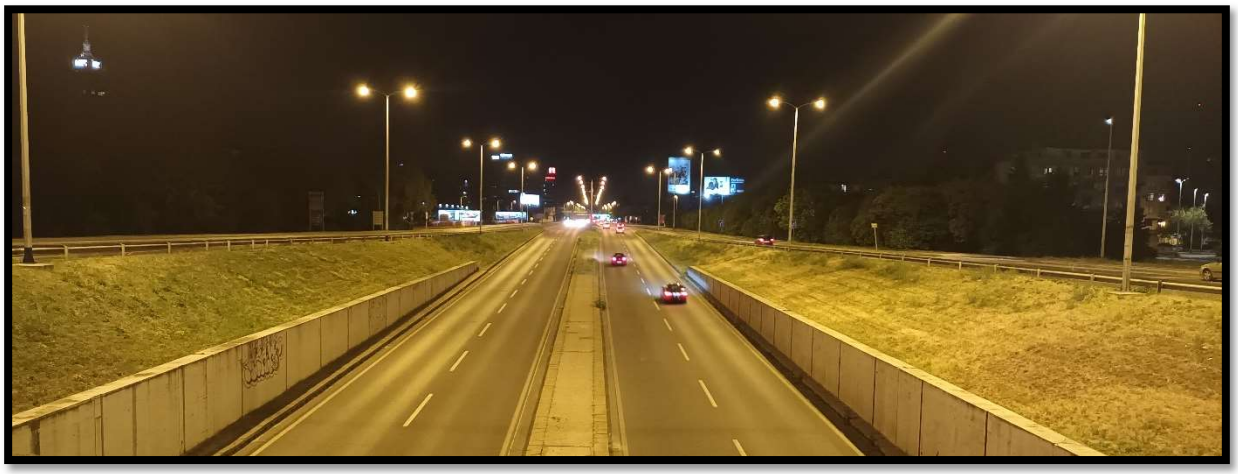
**PRIRUČNICI TEHNIČKOG VELEUČILIŠTA U ZAGREBU**

**MANUALIA POLYTECHNICI STUDIORUM ZAGREBIENSIS**

# K O L N I K

Izv.prof.dr.sc. **Miroslav Šimun**, dipl.ing.građ., viši predavač





**TEHNIČKO VELEUČILIŠTE U ZAGREBU – TVZ**

**ZAGREB UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES – ZUAS**

**Zagreb, 2022.**

# K O L N I K

TEHNIČKO VELEUČILIŠTE U ZAGREBU ZAGREB UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**Izdavač:** Tehničko veleučilište u Zagrebu
Vrbik 8, Zagreb

**Za izdavača:** izv.prof.dr.sc. Jana Žiljak Gršić, prof.v.šk.

**Autor:** izv.prof.dr.sc. Miroslav Šimun, dipl.ing.građ., v.pred.

**Recenzenti:** prof.dr.sc. Tatjana Rukavina, dipl.ing.građ.

prof.dr.sc. Sanja Dimter, dipl.ing.građ.

**Lektorica:** Amelia Kovačević, prof.

**Vrsta djela:** PRIRUČNIK

Objavljivanje je odobrilo Stručno vijeće
Tehničkog veleučilišta u Zagrebu
Odlukom broj: 5173-10/22 od 14.07.2022.

**ISBN:** 978-953-8444-05-0

**CIP zapis** Dostupan u računalnom katalogu
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu
pod brojem 001147314

PRIRUČNIK UZ PREDAVANJA

# K O L N I K

Izv.prof.dr.sc. **Miroslav Šimun**, dipl.ing.građ.,

Viši predavač

Dio predavanja na preddiplomskom stručnom studiju graditeljstva za sve studente IV. semestra i studente usmjerenje Niskogradnja V. semestra te III. i IV. semestra specijalističkog stručnog diplomskog studija za usmjerenja Niskogradnja i Okoliš u graditeljstvu kao i za studente sveučilišnog diplomskog studija građevinarstva III. semestra smjer Prometnice.

# SADRŽAJ

PREDGOVOR ……5

1. UVOD ……6
   1.1. Pojmovi i kratice ……6
   1.2. Vrste slojeva kolničkih konstrukcija i tehnologija vozne površine kolnika ……7
2. POSTELJICA ……13
   2.1. Općenito ……13
   2.2. Uvjeti kvalitete posteljice kolničkih konstrukcija ……14
      *2.2.1. Kriteriji kvalitete posteljice od zemljanog materijala ……15*
      *2.2.2. Kriteriji kvalitete posteljice od miješanog ili kamenog materijala ……15*
      *2.2.3. Kriteriji kvalitete izvedene posteljice ……16*
   2.3. Radovi na izvođenju – uređenju i kontroli kvalitete posteljice ……16
      *2.3.1. Kontrola kvalitete izrade – izvođačka odnosno tekuća ispitivanja ……17*
      *2.3.2. Kontrola kvalitete izrade – investitorske odnosno kontrolna ispitivanja ……18*
3. MEHANIČKI ZBIJENI NOSIVI SLOJ OD ZRNATOG KAMENOG MATERIJALA BEZ VEZIVA – MNS ……20
   3.1. Općenito ……20
   3.2. Granulometrijski sastav MNS-a ……22
   3.3. Fizikalno-mehanička svojstva zrna ……24
   3.4. Izvedba mehanički zbijenog sloja ……25
   3.5. Kontrola kvalitete izvedbe sloja MNS-a ……26
4. NOSIVI SLOJ OD ZRNATOG KAMENOG MATERIJALA STABILIZIRAN HIDRAULIČKIM VEZIVOM – CNS ……27
   4.1. Općenito ……27
   4.2. Svojstva sastavnih materijala i mješavine CNS-a ……27
   4.3. Svojstva izvedenog sloja CNS-a ……30
5. ASFALTNI SLOJEVI I ASFALTNE TEHNOLOGIJE ……34
   5.1. Općenito ……34
   5.2. Sastavni materijali asfaltne mješavine i asfaltnih tehnologija ……38
   5.3. Kontrola i osiguranje kvalitete ……41
   5.4. Svojstva vozne površine kolnika ……47
   5.5. Modul krutost asfalta ……52
   5.6. Otpornost asfalta na pojavu kolotraženja ……54
   5.7. Prionjivost i povezanost asfaltnih slojeva ……56
6. KRITERIJI RAVNOSTI VOZNE POVRŠINE KOLNIKA ……58
   6.1. Mjerni uređaji za mjerenje ravnosti ……58
   6.2. Međunarodni indeks ravnosti – IRI ……60
7. SUSTAV HIDROOZOLACIJA – ASFALTNI KOLNICI NA CESTOVNIM OBJEKTIMA (MOST ILI VIJADUKT) ……65
8. DIMENZIONIRANJE KOLNIČKIH KONSTRUKCIJA ……70

LITERATURA ……76
Popis slika ……79
Popis tablica ……81

## *PREDGOVOR*

*Ovaj priručnik pisan je na osnovi izrađenih nastavnih materijala koji se koriste na stručnom preddiplomskom i specijalističkom diplomskom te sveučilišnom diplomskom studiju. Kroz višegodišnje iskustvo održavanja predavanja i vježbi te studentskih seminarskih, završnih i diplomskih radova (u sklopu kolegija Ceste I i Ceste II, zatim Kolničke konstrukcije, Gradske prometnice i Karakteristike završnog sloja kolnika) - postojala je potreba da se studentima i nastavnicima osigura objedinjeno gradivo koje se odnosi na Kolnike. Kolnici, odnosno kolničke konstrukcije, gornji su ustroj cestovnih prometnica, parkirališta i ostalih površina koje koriste vozila na pneumaticima, ali i biciklisti i pješaci.*

*Priručnik sadrži zasebna poglavlja koja se bave podlogom – posteljicom, zatim nosivim slojevima kolničke konstrukcije (MNS – mehanički zbijeni nosiv sloj, CNS – cementom stabilizirani nosivi sloj), asfaltnim slojevima (nosivi, vezni, zaštitni sloj hidroizolacije, nosivo-habajući i habajući) te asfaltnim tehnologijama. Kriteriji ravnosti vozne površine kolnika obrađeni su u zasebnom poglavlju zbog opsežnosti i važnosti ovog parametra na osnovu kojeg se pristupa gospodarenju cestovne infrastrukture. Asfaltni kolnici na cestovnim objektima u specifičnim su eksploatacijskim okolnostima te su stoga obrađeni u zasebnom poglavlju. Na kraju priručnika nalazi se poglavlje Dimenzioniranje koje se odnosi na kolničke konstrukcije u cjelini.*

*Cilj objavljivanja priručnika pod naslovom Kolnik je približiti suvremene kolničke konstrukcije studentima, ali i investitorima kod postavljanja projektnog zadatka novogradnje ili sanacije, projektantima kod izrade projektne dokumentacije, izvoditeljima kod izvođenja te nadzornim inženjerima u postupku nadzora s kontrolom kvalitete te provođenje održavanja tijekom uporabe.*

izv.prof.dr.sc. ***Miroslav Šimun***, dipl.ing.građ., v.pred.

# 1. UVOD

## 1.1. Pojmovi i kratice

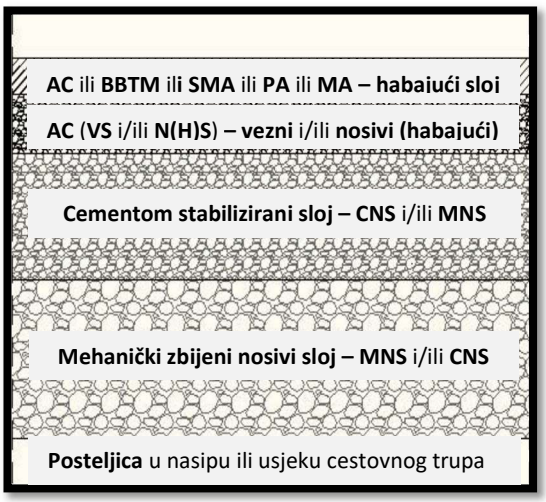
*Asfaltni sloj* – ugrađena bitumenska mješavina u građevinu, odnosno u kolnik
*Asfaltni uzorak* – asfalt pripremljen u laboratoriju ili izvađen iz kolnika
*Bitumenska = asfaltna mješavina* – homogeno umiješani sastavni materijali
*Posteljica* – završni sloj nasipa odnosno donjeg ustroja trupa ceste
*Sastavni materijali bitumenskih mješavina* – bitumen, agregat i kameno brašno te dodaci
*Vozna površina kolnika* – završna površina namijenjena za kretanja pneumatika vozila te biciklista i pješaka.

AASHO – američka udruga državnih cesta (eng. American Association of State Highway Officials)
AC – asfaltbeton (eng. asphalt concrete)
BAK – besprekidno armirano-betonski kolnici
BBTM – asfaltbeton za vrlo tanke asfaltne slojeve (fr. béton bitumineux très mince)
CBR – kalifornijski indeks nosivosti (eng. california bearing ratio)
CNS –nosivi sloj stabiliziran cementom
COST – europska suradnja u znanosti i tehnologiji, (eng. European Cooperation in Science and Technology)
EAPA – europsko asfalersko društvo (eng. european asphalt pavement association)
FGZ – fakultet građevinskih znanosti
FWD – uređaj s padajućim teretom (eng. falling weight deflectometer)
HS – habajući asfaltni sloj
IRI – međunarodni indeks ravnosti (eng. international roughness index)
ITT – indirektni vlačni test (eng. indirect tensile test)
LA – otpornost agregata na predrobljavanje (eng. los angeles)
MA – lijevani asfalt (eng. mastics asphalt)
MNS – mehanički zbijeni nosivi sloj
NHS – nosivo-habajući asfaltni sloj (NHS)
NS – nosivi asfaltni sloj (NS)
NT – niskotemperaturna bitumenska mješavina
OTU – opći tehnički uvjeti za radove na cestama
PA – porozni asfalt (eng. porous asphalt)
PGDP – prosječni godišnji dnevni promet
PmB – polimerom modificirani bitumen
PSV – otpornost agregata na polirnost (eng. polish stone value)
RA – reciklažni asfaltni agregat
SD – površinska obrada (eng. surface dressing)
SMA – splitmastiksasfalt (eng. split mastics asphalt)
SS – tankoslojna hladna asfaltna prevlaka (eng. slurry surfacing)
TP – tehnički propis za asfaltne kolnike
TTA – tehničko tehnološki elaborat
TU – tehnički uvjeti za asfaltne kolnike
USS – uzletno-sletna staza u zračnim lukama
VS – vezni asfaltni sloj
ZSH – zaštitni (izravnavajući) sloj hidroizolacije asfaltom

## 1.2. Vrste slojeva kolničkih konstrukcija i tehnologija vozne površine kolnika

Vozne površine savitljivih kolničkih konstrukcija izrađuju se od valjanih ili lijevanih asfalta te primjenom asfaltnih tehnologija dok se vozne površine krutih kolničkih konstrukcija izrađuju od betonskih mješavina. Pored navedenih izrađuju se i vozne površine od kocke, fleksibilno-krute vozne površine (porozni asfalt ispunjen cementnom pastom) te površine od epoksiasfalta (umjesto bitumena vezivo je epoksid).
Na Slici 1 prikazan je poprečni presjek asfaltne kolničke konstrukcije te moguće kombinacije slojeva koje se mogu pojaviti tijekom dimenzioniranja ovisno o kategoriji ceste, a radi se o sljedećim slojevima:

- habajući asfaltni sloj – vozna površina i završni sloj
- vezni asfaltni sloj (za vrlo teška prometna opterećenja i autoceste te USS) i/ili
- nosivi asfaltni sloj
- nosivo-habajući sloj (za vrlo laka prometna opterećenja izvodi se samo jedan sloj asfalta)
- cementom stabilizirani nosivi sloj – CNS (za vrlo teška prometna opterećenja i autoceste te USS) i/ili
- mehanički zbijeni kameni nosivi sloj od kamenog agregata – MNS.



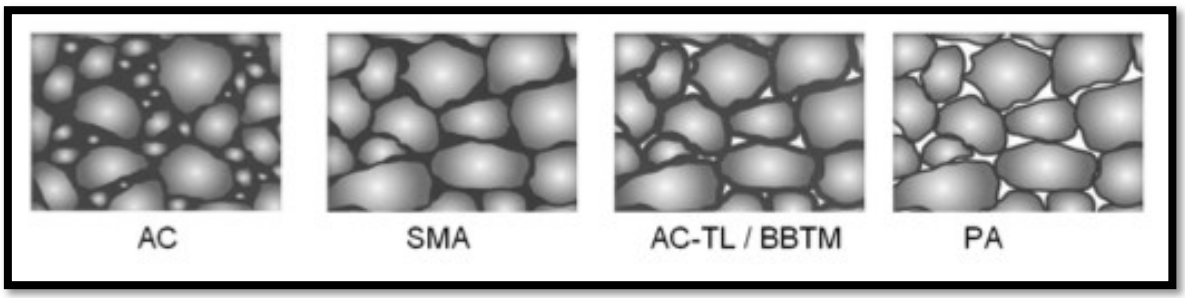

***Slika 1. Poprečni presjek asfaltne kolničke konstrukcije** [1]*

Vrste slojeva kolničkih konstrukcija i tehnologija vozne površine kolnika:

**a)** Valjani asfalti definirani su u okviru harmoniziranih europskih normi. Na Slici 2 prikazana je posebnost sastava pojedine vrste bitumenske mješavine valjanog asfalta, a razlikuju se sljedeći tipovi:

- Asfaltbeton – ***AC*** (eng. asphalt concrete) prema HRN EN 13108-1 [2]
  - asfaltbeton za habajuće slojeve – AC 4, 8 i 11 *surf* (tipovi M1/M2/M3/M4)
  - asfaltbeton za nosivo-habajuće slojeve – AC 16 *surf* (samo tip M4)
  - asfaltbeton za vezne slojeve i zaštitne slojeve hidroizolacije – AC 11, 16 i 22 *bin* (tipovi M1 i M2)
  - asfaltbeton za nosive slojeve – AC 16, 22 i 32 *base* (tipovi M1 i M2)
- Asfaltbeton za vrlo tanke slojeve – ***BBTM***/AC-TL (fr. béton bitumineux très mince - ili eng. asphalt concrete – Thin Layer) prema HRN EN 13108-2 [3]
  - upotrebljava se za izvedbu tankih habajućih slojeva debljine 20-30 mm
  - izvodi se BBTM (8 A/B ili 11 A/B/C)

  - tipovi mješavine (M1-M4)
  - diskontinuirana granulometrijska krivulja te udio šupljina u sloju (7-15%)
- Splitmastiksasfalt – ***SMA*** (eng. stone mastic asphalt) prema HRN EN 13108-5 [4];
  - izvodi se SMA (4, 8, 11 i 16 mm)
  - tipovi mješavine (M1 i M2 za habajuće slojeve, M3 za zaštitni sloj hidroizolacije)
  - diskontinuirana granulometrijska krivulja s dodatkom celuloznih vlakna
  - ima dobru otpornost na kolotraženje (skeletna struktura) koristi se za teško prometno opterećenje
- Porozni asfalt – ***PA*** (eng. porous asphalt) prema HRN EN 13108-7 [5]
  - izvodi se PA (8 i 11 mm)
  - tipovi mješavine M1 i M2
  - udio šupljina u sloju od 16% do 28% ima drenažnu funkciju u kolniku
  - izvodi se i dvoslojno PA 16 kao donji sloj u svrhu smanjenja buke
- Ultra tanki asfaltni slojevi – AUTL (eng. asphalt for ultra thin layer) prema EN 13108-9 [6]
  - izvodi se PA (4, 8 i iznimno 11 mm)
  - asfaltne prevlake izvedene su po vrućem postupku u debljini 10 do 20 mm
  - rizik odvajanja sloja, ali dobra otpornost na kolotraženje
  - zbog vrlo tanke debljine sloja, stroži su zahtjeve u pogledu fizikalno-mehaničkih svojstva agregata i manja je uporaba eruptiva.




***Slika 2. Shematski prikaz posebnosti sastava pojedine vrste valjanog asfalta*** *[7]*

Označavanje valjanih asfalta – primjer (***AC 11 surf 45/80-65 AG1 M1***):

- vrsta bitumenske mješavine (***AC*** ili *BBTM* ili *SMA* ili *PA*)
- maksimalno zrno u mješavini (*4* ili *8* ili ***11*** ili *16* ili *22* ili *32*) mm
- sloj u kolniku (***surf*** ili *bin* ili *base*), HS - habajući, VS - vezni, NS - nosivi, NHS – nosivo-habajući, ZSH - zaštitni sloj hidroizolacije
- vezivo (cestograđevni B ili polimerom modificirani PmB bitumen) oznaka vrste i tipa (***45/80-65****)*
- vrsta agregata (primjenske oznake kategorije ***AG1***, *AG2*, *…*, *AG9*)
- tip bitumenske mješavine ovisi o fizikalno-mehaničkim svojstvima (***M1*** ili *M2* ili *M3* ili *M4*)
- ukoliko bitumenska mješavina sadrži reciklažni asfaltni agregat (RA), dodaje se oznaka *RAx* (*x* je maseni postotni udio RA)
- ako se radi o niskotemperaturnoj bitumenskoj mješavini, dodaje se oznaka *NT.*

**b)** Lijevani asfalt, ***MA*** (eng. Mastic Asphalt), definiran je u okviru harmonizirane europske norme HRN EN 13108-6 [8]

  - izvodi se MA (4, 8 i 11 mm)

- tip M1 za zaštitne slojeve hidroizolacije, a tip M2 za habajuće slojeve
- dubina utiskivanja **I** – svojstvo kvalitete
- često se upotrebljavaju dodaci za snižavanje temperature mješavine.

Na Slici 3 prikazan je spoj valjanog i lijevanog asfalta ispred metalne dilatacijske prijelazne naprave u kolniku cestovnog nadvožnjaka. Lijevani se asfalt postavlja radi postizanja bolje ravnosti vozne površine u području prijelazne dilatacijske naprave.



***Slika 3. Valjani asfalt (lijevo) i lijevani asfalt (desno) ispred dilatacijske naprave***

Način označavanju lijevanih asfalta isti je kao i kod valjanih asfalta.

**c)** Asfaltne tehnologije definirane su u okviru harmoniziranih europskih normi kao površinske obrade i tankoslojne asfaltne prevlake, a primjenjuju se na voznim površinama u svrhu zatvaranja mikropukotina i poboljšanja hvatljivosti:

- Površinske obrade (**PO**)– ***SD*** (eng. surface dressing) prema HRN EN 12271 [9]
  - izvode se :
    - A – jednostruke
    - B – jednostruke s dvostrukim posipom
    - C – dvostruke
    - D – obrnute dvostruke
    - E – s prethodnim posipom („sendvič")
  - kao agregat koriste se frakcije 2/4, 4/8, 8/11 i 11/16 mm
  - vezivo su: bitumenske emulzije i bitumen (razrijeđeni, omekšani, B i PmB)
  - tipovi M1, M2 i M3.

Označavanje površinskih obrada – primjer (***SD A C 67 BP Z AG1 M1***):

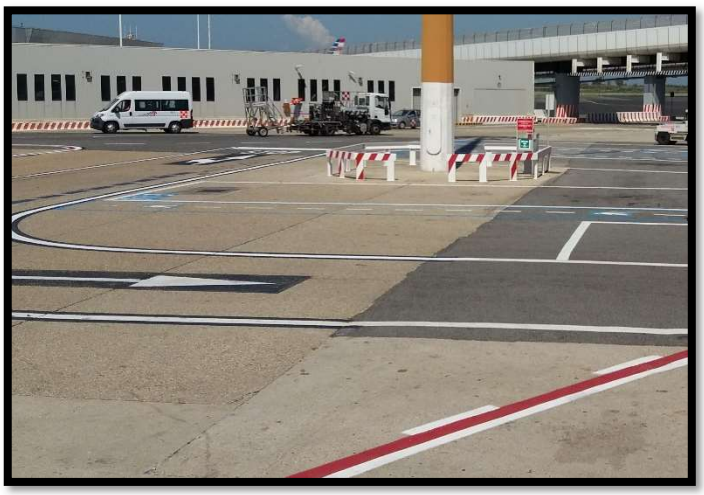
- SD – oznaka za površinsku obradu (eng. surface dressing)
- vrsta (A, B, C, D, ili E) – oznaka vrste površinske obrade
- bitumensko vezivo – oznaka vrste i tipa upotrijebljenog bitumenskog veziva
- tip *M1* ili *M2* ili *M3* – oznaka tipa površinske obrade.

- Tankoslojne asfaltne prevlake izrađene hladnim postupku – ***SS*** (eng. s*lurry surfacing*) prema HRN EN 12273 [10]
  - izvode se SS 4; 8 ili 11 mm: A-jednoslojne i B-dvoslojne hladne asfaltne prevlake,
  - kao agregat koriste se frakcije kategorije (AG1 i AG4)
  - vezivo su kationske bitumenske emulzije polimerom (ne)modificirane
  - tipovi mješavine (M1, M2 i M3).

Označavanje tankoslojne asfaltne prevlake – primjer (***SS A C 60 BP Z AG1 M1***):

- SS – oznaka za tankoslojnu asfaltnu prevlaku (eng. slurry surfacing)
- D – najveće zrno agregata tankoslojne asfaltne prevlake (mm)
- vrsta (A ili B) – oznaka vrste tankoslojne asfaltne prevlake
- bitumensko vezivo – oznaka vrste i tipa upotrijebljenog bitumenskog veziva
- tip *M1* ili *M2* ili *M3* – oznaka tipa tankoslojne asfaltne prevlake.

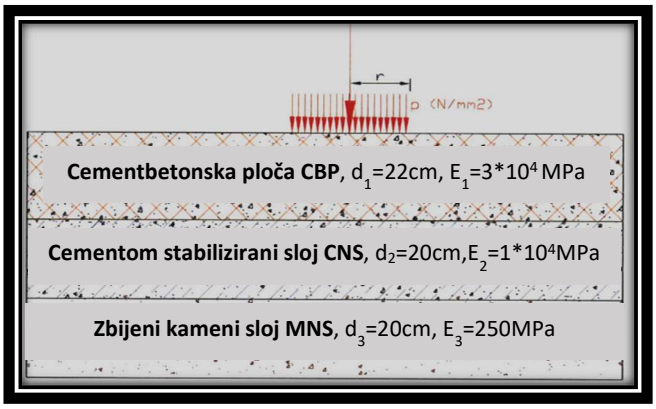
**d)** Kruti kolnici izvode se završnim slojem od cementbetonske ploče i to najčešće na uzletno-sletnim stazama (USS) i stajankama zračnih luka (Slika 4), ali i na autocestama s izrazito teškim prometnim opterećenjem, kod dužih tunela te raskrižjima i autobusnim ugibalištima/stajalištima i terminalima te cestarskim naplatnim i graničnim prijelazima gdje su učestala zaustavljanja vozila. Primjenjuju se i na manipulativnim površinama za teška vozila i u skladišnim prostorima tereta kao, na primjer, za kontejnere.



***Slika 4. Betonski i asfaltni kolnik u zračnoj luci***

Betonske kolničke konstrukcije sastoje se od sljedećih slojeva (Slika 5):

- habajući betonski sloj/ploča – vozna površina (kamen silikatnog sastava) i/ili
- donji sloj betonske ploče (kamen karbonatnog sastava)
- cementom stabilizirani sloj – CNS (za vrlo teška prometna opterećenja) i/ili
- mehanički zbijeni kameni nosivi sloj – MNS.




***Slika 5. Poprečni presjek betonske kolničke konstrukcije*** *[1]*

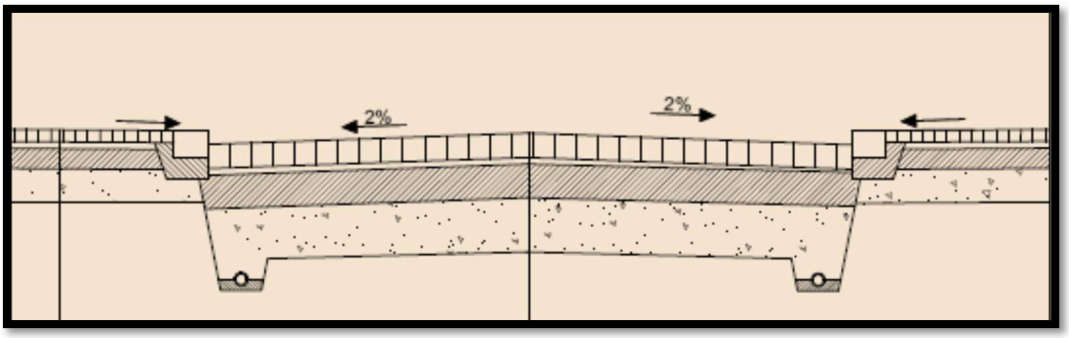
U primjeni su sljedeći tipovi krutih betonskih kolnika:

- klasični nearmirani betonski kolnik
- betonski kolnik s ugrađenom armaturom
- besprekidno armirani betonski kolnik – BAK, (eng. CRCP – continuously reinforced concrete pavement)
- prednapregnuti betonski kolnici
- kolnik od uvaljanog betona (Slika 6).




***Slika 6. Kolnik od uvaljanog betona***

**e)** Kolnik od kamenih kocki ili prizmi primjenjuje se uglavnom u kulturno povijesnoj baštini pojedinih gradskih, odnosno industrijskih područja (Slika 7).




***Slika 7. Presjek kroz kolnik od kamene kocke** [11]*

**f)** Kompozitni kolnici izvode se na prometnim površinama s izrazitim i koncentriranim prometnim opterećenjem koje ima i karakteristike dugotrajnog statičkog opterećenja. Sloj poroznog asfalta čije su šupljine ispunjene cementnom pastom, komercijalnog naziva *salviacim*, upotrebljava se na parkirališnim površinama, stajankama ili skladišnim površinama i primjer je takvog kolnika (Slika 8).




***Slika 8. Asfaltcementni kolnik za izrazito teško prometno opterećenje*** *[12]*

**g)** Inovativni kolnici od ekoloških materijala: u sklopu projekta (*Greenway)* na biciklističko-pješačkim stazama primjenjuje se ekološki kolnik sa završnim slojem izvedenim epoksidnom mješavinom s reciklažnim agregatom pod nazivom epoksi asfalt (Slika 9).



***Slika 9. Pogled na buduću rutu biciklističke staze Greenway*** *[13]*

## 2. POSTELJICA

### 2.1. Općenito

***Posteljica je završni sloj cestovnog nasipa*** **(donji ustroj)** određene debljine ili ***sloj tla ceste u usjeku*** određene dubine, - uređen prema projektiranim zahtjevima [14].
Debljina sloja posteljice nije strogo definirana. Najveća debljina posteljice iznosi 50 cm, dok stvarna debljina ovisi o vrsti tla, odnosno mogućnostima strojeva za zbijanje određene vrste tla.
Najslabiji materijal od kojeg se može raditi posteljica je ***glina srednje plastičnosti*** (može se uspješno zbiti u sloju debljem od oko 25 cm). Ova vrijednost smatra se najmanjom debljinom posteljice.
Debljina posteljice definirana je projektom, a određuje se na temelju laboratorijskih ispitivanja materijala, odnosno identifikacije tla. Posteljica je važan element u postupku dimenzioniranja kolničke konstrukcije. O njezinoj kvaliteti ovisi nosivost kolnika.
Posteljica preuzima prometno opterećenje na kolničku konstrukciju i opterećenje od slojeva same izvedene kolničke konstrukcije. Mora imati određenu nosivost s kojom se ulazi u proračun pri dimenzioniranju kolničke konstrukcije, a iskazuje se koeficijentom CBR (%) (eng. california bearing ratio) i/ili modulu reakcije podloge **k**.
Nosivost posteljice tijekom cijele godine u eksploataciji mora biti postojana. Osim postignute nosivosti bitna je kvalitetna odvodnja i odgovarajući nagibi na izvedenoj površini.
Ako se na slojevima nasipa postiže kvaliteta koja se traži na razini posteljice, završni sloj nasipa proglašava se posteljicom kolničke konstrukcije.
Ako prirodno tlo u usjeku ne zadovoljava propisane uvjete kvalitete izvodi se zamjena ili stabilizacija sloja.
Posteljica od **prirodnih materijala** [14] izvodi se od sljedećih stijena i tla:

- ***Zemljani materijal*** (sitnozrna koherentna tla) – gline niske do visoke plastičnosti, prašine, glinoviti pijesci i slični materijali osjetljivi na prisutnost vode (dio materijala iskopne kategorije **C**). Na Slici 10 prikazana je posteljica od zemljanog materijala u izvođenju
- ***Kameni materijal*** – dobiveni iskopom pomoću miniranja, kamene drobine i šljunci (materijali iskopne kategorije **A** i dio materijala iskopne kategorije **C**)
- ***Miješani materijal*** – miješani kameni i zemljani materijali, glinoviti šljunci, zaglinjene kamene drobine, trošne stijene – škriljci i lapori, flišni materijali i slično (većina materijala iskopne kategorije **C** i dio materijala iskopne kategorije **B**).

Posteljica od **stabiliziranih** (**poboljšanih**) **materijala** izvodi se kad se prirodnim materijalima ne mogu postići svojstva propisana projektom, pa se primjenjuju sljedeći postupci stabiliziranja:

- ***mehanički*** (postizanje odgovarajuće granulometrije)
- ***geosintetikom i/ili geomrežom***
- ***vapnom*** (sitnozrna koherentna tla)
- ***cementom*** (nekoherentna tla)
- ***bitumenom*** (nekoherentna tla – pijesak)
- ***druga kemijska sredstva***.



***Slika 10. Posteljica od prirodnih zemljanih materijala***

## 2.2. Uvjeti kvalitete posteljice kolničkih konstrukcija

Uvjeti kvalitete posteljice ovise o vrsti materijala od kojeg se izvode. S*itnozrnati vezani* materijali manje su kvalitetni i imaju više uvjeta kvalitete od *miješanih* i *kamenih materijala*.
Svi tipovi materijala imaju uvjet granulometrijskog sastava (stupanj neravnomjernosti U) i minimalne vrijednosti suhe prostorne mase $\gamma_d$ određene prema standardnom Proctorovom pokusu [15]).
*Koeficijent nejednolikosti materijala* (U) - definira odnos promjera zrna kojih je u materijalu 60% i onih kojih je 10% ($U = d_{60}/d_{10}$). Da bi se materijal mogao dobro zbiti (pakirati) koeficijent **U** mora biti: veći od 9 za koherentne materijale i veći od 4 za kameni materijal. Materijali s manjim koeficijentom nejednolikosti od 9. odnosno 4, pretežno su jednozrnati i mehanički su nestabilni.
*Suha prostorna masa* $\gamma_d$**.** Prema standardnom Proctorovom pokusu suha prostorna masa materijala tla odnos je težine prema njenom volumenu zajedno s porama i šupljinama pri propisanoj temperaturi i vlažnosti sredine u kojoj se određuje. Određuje se vaganjem i mjerenjem uzorka valjkastog oblika (promjera 60-120 mm; visina uzorka 50-150 mm). Prije određivanja suhe prostorne mase uzorak se suši u laboratorijskom sušioniku na temperaturi 100-110 $^0$C do konstantne težine ($\gamma_d = W_d / V$), gdje je:

- $\gamma_d$ – suha prostorna masa uzorka
- $W_d$ – težina suhog uzorka
- V – volumen vlažnog uzorka u $cm^3$.

Zemljani materijali imaju dodatne uvjete:

- granice tečenja $W_2$
- indeksa plastičnosti $I_p$
- bubrenja nakon 4 dana potapanja u vodi i
- kalifornijskog indeksa nosivosti CBR (više od 3%).

Sva ispitivanja pojedinih svojstava provode se sukladno važećim hrvatskim normama.
*Granica tečenja* $W_2$ određuje se pomoću Cassagrandeovog aparata. Na pripremljenom uzorku odredi se količina vode, pri kojoj se žlijeb napravljen posebnim nožem u materijalu zatvori na

duljini 12–13 mm, poslije 25 padova posude s visine od 10 mm na elastičnu podlogu, rezultati se unose u dijagram. Na apscisu se i u logaritamskom mjerilu unosi broj padova posude, a na ordinatu količina vode u postotcima u linearnom omjeru. Spajanjem točaka dobiva se pravac, a presjek pravca s ordinatom (25 padova) daje količinu vode u postotcima – granicu tečenja $W_2$.

*Indeks plastičnosti* $I_p$ – razlika je između vlažnosti na granici tečenja $W_2$ i na granici plastičnosti $W_p$ ($I_p = W_2 - W_p$). Granica plastičnosti ($W_p$) određuje se na uzorku mase oko 50 grama (od pripremljene mase gnječenjem se oblikuje kugla koja se valjanjem na staklenoj ploči oblikuje u valjak promjera oko 6 mm). Pritiskujući valjak istom jakošću pomoću dlana ruke valjak se okreće naprijed natrag 5 do 10 puta (za gline visoke plastičnosti 10 do 15 puta) dok se ne postigne promjer od 3 mm. Debljina valjka kontrolira se uspoređivanjem s metalnom žicom promjera 3 mm. Kada se na valjku pojave pukotine, određuje se količina vode, a ako se napukline ne pojave uzorak se nanovo gnječi u loptu i ponavlja se postupak sve do pojave pukotine. Ispitana količina vode je $W_p$ – *granica plastičnosti.* Ispituje se na najmanje dva uzorka, a za rezultat se uzima prosjek. Dopuštena razlika između pojedinačnih rezultata ne smije prelaziti vrijednost od 1%. U suprotnom ponavlja se postupak pripreme uzorka i ispitivanje.

*Bubrenje nakon 4 dana potapanja u vodi.* Postupak se koristi za mjerenje promjena volumena valjka prije i nakon potapanja u vodi (%). Volumen uzorka prije i nakon potapanja određuje se pomoću mikrometra. Mjeri se promjer u dva pravca na tri mjesta (gore, dolje i u sredini uzorka) i mjerenjem visine na pet mjesta (četiri nasuprotna ruba i u sredini). Promjena volumena određuje se najmanje na dva uzorka, a rezultat je prosjek. Dozvoljena je razlika pojedinih rezultata do 2% ili se ispitivanje ponavlja.

Kalifornijski indeks nosivosti CBR određuje se sukladno HRN EN 13286-47 [16], izračun prema Formuli (1). Predstavlja odnos između pritiska **p** potrebnog da se cilindrični klip kružnog presjeka površine 19,4 $cm^2$ utisne u materijal tla do dubine 2,54 mm, brzinom 1,27 mm/min te standardnog pritiska $\mathbf{p_n}$ koji je potreban da se isti klip istom brzinom utisne do iste dubine u standardni materijal (drobljeni kameni materijal MNS).

$$CBR = (p/p_n) \times 100\% \quad (1)$$

### *2.2.1. Kriteriji kvalitete posteljice od zemljanog materijala*

Propisani su sljedeći kriteriji kvalitete posteljice od zemljanog materijala [14]:

- *koeficijent nejednolikosti* - $U=d_{60}/d_{10} > 9$
- *maksimalna suha prostorna masa* prema standardnom Proctorovom pokusu mora biti veća od 1,65 $t/m^3$ ($\gamma_d$)
- *granica tečenja* W mora biti manja od 40% (max)
- *indeks plastičnosti* Ip manji od 20% (max)
- *bubrenje nakon 4 dana potapanja u vodi* ne smije biti veće od 3% (max)
- *kalifornijski indeks nosivosti* CBR veći od 3% (min)
- *vlažnost* materijala ne smije varirati više od ±2% od optimalne vlažnosti sukladno HRN EN 1097-6 [17] određene standardnim Proctorom.

Ako zemljani materijal posteljice u usjecima ne zadovoljava tražene kriterije pogodnosti, potrebno je provesti zamjenu ili poboljšanje lošeg materijala posteljice (najčešće se provodi u kombinaciji s primjenom geotekstila ili/i stabilizacije tla).

### *2.2.2. Kriteriji kvalitete posteljice od miješanog ili kamenog materijala*

Propisani su sljedeći kriteriji kvalitete posteljice od miješanog ili kamenog materijala [14]:

- *Koeficijent nejednolikosti*: $U=d_{60}/d_{10} > 9$ (kod miješanog materijala) i $U= d_{60}/d_{10} > 4$ (kod kamenog materijala).
- *Maksimalna veličina zrna* materijala od kojeg se izrađuje posteljica može biti 60 mm pri čemu se dopušta da 10% zrna bude veličine do 70 mm.
- Kao i kod posteljice od zemljanih materijala vlažnost kod miješanog materijala ne smije varirati više od ±2% od optimalne vlažnosti određene standardnim Proctorovim postupkom.

### *2.2.3. Kriteriji kvalitete izvedene posteljice*

Propisani su sljedeći kriteriji kvalitete izvedene posteljice[14] :

- *Stupanj zbijenosti* određuje se prema standardnom Proctoru: Sz≥100%.
- *Modul stišljivosti* predstavlja nosivost posteljice, a određuje se pomoću kružne ploče promjera Ø 30 cm sukladno HRN U.B1.046 [18]. Modul stišljivosti mjeren kružnom pločom promjera Ø 30 cm treba biti:
  - za posteljicu od zemljanih materijala: $Ms≥30$ MN/m$^2$
  - za posteljicu od miješanih materijala: $Ms≥35$ MN/m$^2$
  - za posteljicu od kamenih materijala: $Ms≥40$ MN/m$^2$.

Postizanje navedenih kriterija, *modula stišljivosti* i *stupnja zbijenosti* ovisi o *vlažnosti materijala tla* koja prilikom zbijanja treba biti približno oko optimalne vrijednosti određene Proctorovim pokusom u laboratoriju.

## 2.3. Radovi na izvođenju – uređenju i kontroli kvalitete posteljice

Zemljane posteljice planiraju se po visini i smjeru, širini i nagibu te se izvodi eventualna sanacija pojedinih manjih površina slabije kvalitete boljim materijalom.
Vlaženje zemlje, odnosno presušivanje zemlje i zbijanje do propisane zbijenosti, u usjecima prije zbijanja posteljice, u nekim je slučajevima potrebno preoravati temeljno tlo (homogeniziranje).
Nasuti zemljani materijal za posteljicu ili materijal posteljice u iskopu potrebno je odmah zbiti. Ako je zbijena posteljica duže vrijeme izložena vremenskim nepogodama ili oštećenjima, izvođač je dužan prije nastavka radova dovesti je u stanje zahtijevano projektom odnosno propisanim kriterijima kvalitete. Ako je zbijanje onemogućeno zbog velike prirodne vlažnosti ili nepovoljnih vremenskih prilika, treba primijeniti neki od načina sanacije temeljnog tla odnosno posteljice. Postupak sanacije predlaže izvođač, a odobrava nadzorni inženjer. Posteljica od miješanog i kamenog materijala izvodi se istim postupcima kao kod posteljice od zemljanih materijala (planiranje i zbijanje). Kada je materijal posteljice u usjeku vrlo nehomogen (kamen s proslojcima gline), iskop treba produbiti za 30 do 50 cm i izraditi sloj od homogenog miješanog ili kamenog materijala. Izrada posteljice od kamenog materijala obuhvaća poravnanje preostalih vrhova stijena, nasipavanje i razastiranje izravnavajućeg sloja od čistog sitnijeg kamenog materijala te njegovo planiranje, eventualno vlaženje i zbijanje do propisane zbijenosti. Kod nasipa završni sloj treba izravnati sitnijim kamenim materijalom čiju kvalitetu treba provjeriti prije nasipavanja. Radovi na izradi posteljice ne smiju se obavljati kada je temeljno tlo smrznuto odnosno kada na trasi ima snijega i leda. [14]
Materijali od kojeg ili u kojem se radi posteljica treba najprije *isplanirati* pogodnim sredstvom i to najčešće grejderom. *Vlažnost* materijala treba dovesti u stanje oko optimalne vlažnosti. Ako je materijal previše suh, vlaži ga se pomoću cisterne s vodom i ostavlja određeno vrijeme da se voda upije i jednoliko rasporedi po materijalu, ako je pak materijal previše vlažan rije ga

se i ostavlja na suncu i vjetru da ga prosuši. Ukoliko su vremenske prilike takve da za prosušivanje treba mnogo vremena ili ono uopće nije moguće (pred kraj građevinske sezone) primjenjuju se posebni postupci stabilizacije.
Z*bijanje* se obavlja pomoću pogodnih sredstava ovisno o vrsti materijala, – za kamenite materijale koriste se vibracijski i teški statički valjci, a za miješane materijale vibracijski, statički valjci i valjci na kotačima s gumama. Zemljani materijali zbijaju se pomoću ježeva i valjaka na kotačima s gumama.
Površina posteljice projektira se i izvodi u nagibu od minimalno 4% (zbog učinkovite odvodnje vode, a koja na bilo koji način dospije u kolničku konstrukciju i na posteljicu).
*Ravnost* posteljice mjerena letvom dužine 3 m ne smije odstupati:

- više od 3 cm kod zemljanih materijala
- više od 4 cm kod miješanih materijala
- više od 5 cm kod kamenih materijala.

Izvođač je dužan rezultate ispitivanja i mjerenja predati nadzornom inženjeru putem građevinskog dnevnika. Ako rezultati zadovoljavaju *provode se kontrolna/investitorska ispitivanja*. Na osnovu zadovoljavajućih rezultata kontrolnih/investitorskih ispitivanja, upisanih u građevinski dnevnik, nadzorni inženjer odobrava početak izrade slojeva kolničke konstrukcije na preuzetoj posteljici.

### *2.3.1. Kontrola kvalitete izrade posteljice – izvođačka odnosno tekuća ispitivanja [14]*

U sklopu izvođačkih odnosno tekućih ispitivanja kontrole kvalitete geometrije izrade posteljice provodi se kontrola:

- Kote površine posteljice mogu odstupati od projektiranih najviše za ±3/4/5 cm (ovisno vrsti materijala tla).
- Poprečni i uzdužni nagibi posteljice moraju biti prema projektu, pri čemu se ravnost mjeri uzdužno, poprečno i dijagonalno (rezultanta odvodnje).
- Visina izrađene posteljice dokazuje se nivelmanskim zapisnikom (geodetski).
- Ravnost izrađene posteljice mora biti takva da pri mjerenju letvom dužine 3 m u bilo kojem smjeru odstupanje ne smije biti veće od 3 cm u koherentnom materijalu.
- Ispitivanje ravnosti kao i poprečnog pada posteljice obavlja se na svakih 100 m.
- Tek po odobrenju visinskog (geodetskog) položaja posteljice pristupa se kontroli postignute zbijenosti – nosivosti.

Izvođačka – tekuća ispitivanja nosivosti posteljice obuhvaćaju:

- određivanje stupnja zbijenosti u odnosu na standardni Proctorov postupak (Sz)
- određivanje modula stišljivosti (Ms) kružnom pločom ∅ 30 cm uređene površine posteljice (Slika 11)
- određivanje granulometrijskog sastava materijala ugrađenog u posteljicu.

Minimalni broj tekućih – izvođačkih ispitivanja nosivosti posteljice je:

- jedno određivanje stupnja zbijenosti na 1.000 $m^2$
- jedno ispitivanje modula stišljivosti na 1.000 $m^2$
- jedno određivanje granulometrijskog sastava materijala posteljice na 6.000 $m^2$
- jedno ispitivanje stupnja zbijenosti ili modula stišljivosti na svakih 200 m u zoni bankine.

Ispitivanja se obavljaju u serijama pri čemu je najmanji broj pokusa u jednoj seriji 5, ako je broj ispitivanja u jednoj kontrolnoj seriji veći ili jednak 5 u tom slučaju mogu se dopustiti sljedeće tolerancije u odnosu na minimalne zahtijevane vrijednosti korištene pri kontroli. U jednoj seriji može biti jedan od 5 rezultata manji od minimalno traženoga, ali po apsolutnoj vrijednosti ne smije odstupati za više od:

- 5% pri mjerenju potrebne mase u suhom stanju ($\gamma_d$) i
- 10% pri mjerenju modula stišljivosti (Ms).

Ako je broj ispitivanja u jednoj kontrolnoj seriji manji od 5, onda sve vrijednosti (rezultati) određene ispitivanjem trebaju biti veće od minimalno zahtijevanih.



***Slika 11. Određivanje modula stišljivosti (Ms) statičkom kružnom pločom ∅30 cm***

### *2.3.2. Kontrola kvalitete izrade posteljice – investitorska odnosno kontrolna ispitivanja*

Kontrolna ispitivanja provode se dvostruko rjeđe od izvođačkih, odnosno tekućih ispitivanja, a obuhvaćaju:

- određivanje stupnja zbijenosti u odnosu na standardni Proctorov postupak (Sz) na svakih 2.000 $m^2$
- određivanje modula stišljivosti (Ms) kružnom pločom ∅ 30 cm na svakih 2.000 $m^2$ uređene površine posteljice
- određivanje granulometrijskog sastava materijala posteljice na svakih 10.000 $m^2$
- ispitivanje stupnja zbijenosti ili modula stišljivosti na svakih 400 m' u zoni bankine.

Zbog diskontinuiranog karaktera ispitivanja može se pretpostaviti da između ispitanih mjesta mogu zaostati i slabije površine. U svrhu njihovog pronalaženja primjenjuje se tzv. *proof rolling* (probno valjanje) – po posteljici se prođe s vrlo teškim valjkom koji na slabijim mjestima izazove deformaciju. Takva se mjesta zatim popravljaju dopunjavanjem i dodatnim zbijanjem, presušivanjem ili zamjenom materijala.

Kod suvremenih valjaka postoji mogućnost praćenja postignute zbijenosti kroz izravno mjerenje i digitalno očitanje na upravljačkoj ploči stroja.

Primjenjuje se i kontrola nosivosti posteljice, ispitivanjem modula stišljivosti (Ms) pomoću metode dinamičke ploče s padajućim teretom (Slika 12). Prednost ove metode je u mogućnosti progušćivanja pozicija mjerenja, ali uz obavezno prethodno kalibriranje statičkom pločom.



***Slika 12. Određivanje modula stišljivosti (Ms) dinamičkom kružnom pločom ∅30 cm***

Posteljica je u fazi građenja osjetljiva na odvijanje gradilišnog prometa, a ako je od zemljanih materijala i na vlagu.
Za poboljšanje kvalitete posteljice koriste se specijalni postupci postizanja propisane nosivosti, pomoću metode stabilizacije tla.

## 3. MEHANIČKI ZBIJENI NOSIVI SLOJ OD ZRNATOG KAMENOG MATERIJALA BEZ VEZIVA – MNS

### 3.1. Općenito

Nosivi sloj kolničke konstrukcije od nevezanog mehanički zbijenog zrnatog kamenog materijala – MNS, ugrađuje se između posteljice i gornjeg nosivog sloja (cementom vezanog - CNS ili bitumenom vezanog – AC). Primjenjuje se kao donji nosivi sloj kolničkih konstrukcija s asfaltnom površinom ili s betonskom pločom. Ugrađuje se u kolničku konstrukciju cesta svih skupina prometnog opterećenja (od vrlo lakog do vrlo teškog). Izvedba sloja je jednostavna i relativno niske cijene, ovisno o dostupnosti šljunka ili drobljenog kamenog materijala u blizini same prometnice.
Nedostaci primjene i izvođenja mehanički zbijenog nosivog sloja kolničke konstrukcije:

- Sloj za vodu u fazi građenja je propustan, kiša može prodrijeti po debljini sloja i prekomjerno navlažiti zemljanu posteljicu i ugroziti njenu nosivost.
- Sloj nije otporan na gradilišni promet, dolazi do njegove degradacije te je potrebno ponovo uređenje prije preuzimanja sloja.
- Uglavnom su velikih debljina (50 cm i više), pa su potrebne velike količine materijala, odnosno prirodnih resursa, što uzrokuje ekološke probleme kod otvaranja ili proširenje kamenoloma odnosno vađenje šljunka iz rijeka ili nalazišta (Slika 13).
- Prisutan je problem kvalitetnog nalazišta u blizini gradilišta.
- Prijevozom materijala do gradilišta, dolazi do oštećenja lokalne cestovne mreže, ometanja redovnog prometa te stvaranja prašine i buke u naseljenim mjestima.



***Slika 13. Kameni materijal za mehanički zbijeni sloj*** *[1]*

Pri projektiranju suvremenih kolničkih konstrukcija nastoji se smanjiti debljina mehanički zbijenog sloja upotrebom vezanih materijala i ograničenje debljina na 20 do 30 centimetra. Naziv “tamponski sloj” nije ispravan jer MNS ima prvenstveno nosivu funkciju, a izrađuju se od nevezanih zrnatih kamenih materijala koji se stabiliziraju mehaničkim zbijanjem. Mehanička stabilizacija postiže se povoljnim granulometrijskim sastavom zrnatog materijala koja osiguravaju odgovarajuće pakiranje uslijed zbijanja sloja. Koristi se odgovarajući materijal u prirodnom obliku, ili se materijal proizvodi, ili sastavlja odnosno miješa tako da ima pogodnu granulometriju. Pogodan materijal doprema se na gradilište i zbija u sloj projektirane debljine.

Nosivi sloj od nevezanog mehanički zbijenog zrnatog kamenog materijala (MNS) čini mješavina nedrobljenog (šljunak) i/ili drobljenog zrnatog kamenog materijala. Sloj projektom, odnosno

važećim tehničkim uvjetima [19], ima definiranu kakvoću materijala i ugradljivosti te zahtijevanu kakvoću ugrađenog sloja.
Glavni uvjeti za kvalitetu zrnatog materijala su:

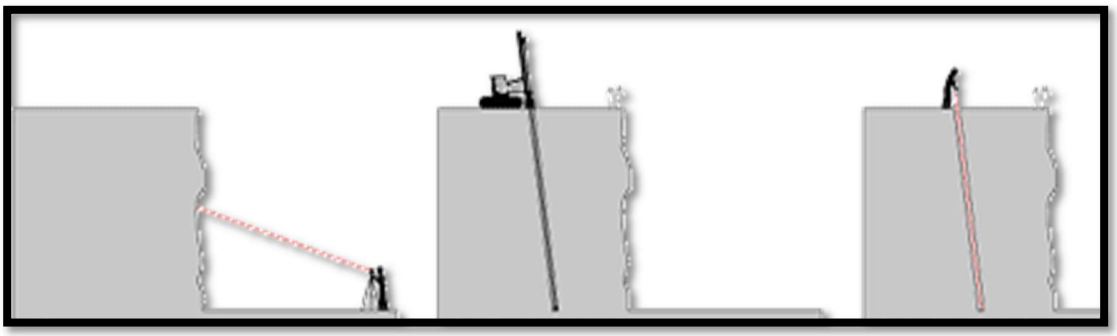
- granulometrijski sastav i
- fizičko-mehanička svojstva samih zrna.

Glavni uvjet kavalitete sloja je nosivost, a utvrđuje se:

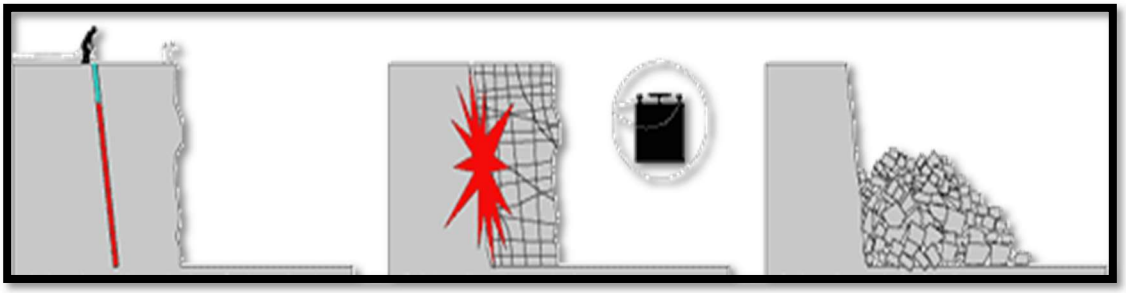
- stupnjem zbijenosti Sz (%) i
- modulom stišljivosti Ms (MN/m$^2$).

Za izradu mehanički zbijenog sloja (MNS) koristi se [19]:

- Prirodni pjeskoviti šljunak: prirodni šljunak ili prirodna sipina za izradu MNS-a dobivaju se odsijavanjem nadzrnja, koji se nakon toga svrstavaju u odgovarajuću frakciju ili se mogu predrobiti na odgovarajuću granulaciju.
- Drobljeni kameni materijal: zrnati kameni materijal za izradu MNS-a proizvodi se drobljenjem odminirane stjenske mase (Slika 14) ili drobljenjem većih valutica šljunka (batuda).
- Mješavina prirodnog šljunka i drobljenog kamenog materijala: ako u proizvedenom ili prirodnom zrnatom materijalu nedostaju zrna određene granulacije, granulometrijski sastav može se korigirati dodatkom potrebne frakcije zrnatog kamenog materijala (mješavinu treba dobro homogenizirati).



***Slika 14. Postupak otpucavanja stijene u kamenolomu*** *(iznad i ispod) [1]*



Na slici 15 nalazi se drobilišno postrojenje u kamenolomu sa separiranjem drobljenih kamenih frakcija materijala.



***Slika 15. Drobilišno postrojenje kamenog agregata***

### 3.2. Granulometrijski sastav MNS-a

Određena prema normi HRN EN 933-1 [20] i HRN EN ISO 17892-4 [21] granulometrijska krivulja zrnatog kamenog materijala treba se nalaziti unutar propisanog graničnog područja. Vrijednosti su prikazane u Tablici 1 po pojedinom situ prosijavanja (Slika 16).

***Tablica 1. Vrijednosti granulometrijske krivulje MNS-a po pojedinom situ*** *[19]*

| Otvor sita (kvadratični) [mm] | Prolaz kroz sito [%] |
|---|---|
| 0,1 | 2-15 |
| 0,2 | 3-20 |
| 0,5 | 7-28 |
| 1 | 13-38 |
| 2 | 20-48 |
| 4 | 29-60 |
| 8 | 40-75 |
| 16 | 54-90 |
| 31,5 | 73-100 |
| 50 | 90 |
| 63 | 100 |

Granulometrijska krivulja mora biti kontinuirana i unutar graničnih krivulja. Diskontinuirane krivulje ne odgovaraju jer se takav materijal ne može dobro pakirati odnosno zbiti.
Udio zrna manjih od 0,02 mm ne smije biti veći od 3% (do 5% u područjima blagih klimatskih uvjeta ukoliko se radi o česticama kamenog porijekla). Veća količina sitnih čestica (0,02mm) od propisanih 3% u sloju uzrokuje pojavu kapilarnih svojstva, odnosno upijanja i zadržavanje vode u sloju, a tada MNS nema otpornost na smrzavanje. Oštećenja od smrzavice na cestama

uzrokovana “prljavim materijalom MNS-a” potvrđuju da ovaj propisani zahtjev treba biti zadovoljen.
Promjer najvećeg zrna ne smije biti veći od polovice debljine sloja, odnosno najviše 63 milimetara.
Uvjet dobre ugradljivosti materijala (prema Allan-Hazen-ovom uvjetu) iskazuje se *Koeficijentom nejednolikosti* U ($d_{60}/d_{10}$):

- $15 \leq U \leq 100$ za šljunak i
- $15 \leq U \leq 50$ za drobljeni kameni materijal

$d_{60}$ – promjer zrna pri kojem ima 60% mase materijala,
$d_{10}$ – promjer zrna pri kojem ima 10% mase materijala.

U pojedinim specifičnim slučajevima mogu se dopustiti i zrnati kameni materijali s nešto drugačijim sastavima, ukoliko se ostalim ispitivanjima dokaže njihova uporabivost i uz odobrenje nadzornog inženjera.
Provode se ispitivanja kemijskih svojstava agregata prema HRN EN 1744-1 [22] te određivanje zagađenosti i sadržaj organskih tvari HRN U.B1.024 [23] i HRN B.B8.034 [24]. Ispitivanje se provodi potapanjem uzorka u otopinu s reagensom te se nakon određenog vremena boja otopine iznad uzorka usporedi sa bojom standardne otopine. Ukoliko je boja iznad uzorka tamnija od standardne u uzorku se gravimetrijski određuje udio organskih tvari i lakih čestica. Uzorak ne smije sadržavati više od 2% organskih tvari i lakih čestica kao što su drveni ostaci, korijenje, čestice ugljena i slično (ispitna epruveta na Slici 17).





***Slika 16. Sita za prosijavanje kamenog materijala*** *[25],* ***Slika 17. Ispitna epruveta*** *[25]*

Utvrđivanje *gustoće i upijanja vode* sukladno HRN EN 1097-6 [26] te određivanje *vlažnosti* prema HRN EN ISO 17892-1 [27] provode se na uzorku zrnatog kamenog materijala koji se zbija energijom modificiranog *Proctorovog* postupka (2,66 $MNm/m^3$). Rezultat ispitivanja optimalna je vlaga, odnosno količina vode u uzorku koja omogućuje maksimalnu zbijenost materijala uz navedenu energiju (pri kojoj se dobiva maksimalna suha prostorna masa).
Ugradnja zrnatog kamenog materijala u nosivi sloj najbolja je pri optimalnoj vlazi, što je posebno važno kod pijeska koji brzo gubi potrebnu vlažnost). Maksimalna suha prostorna masa po modificiranom *Proctorovom* postupku (koristi se kao parametar pri određivanju stupnja

zbijenosti ugrađenog sloja) ovisi o mineraloško-petrografskom sastavu materijala i njegovu granulometrijskom sastavu.
Nosivost sloja ocjenjuje se na temelju laboratorijski određenog kalifornijskog indeksa nosivosti – CBR, a određuje se na pokusnim tijelima.
Zahtjevi za nosivost zrnatog kamenog materijala – CBR su [19]:

- za prirodni šljunak ili mješavinu šljunka s manje od 50% drobljenog kamenog materijala min 40% i
- za drobljeni kameni materijal ili mješavinu prirodnog šljunka s više od 50% drobljenog kamenog materijala min 80%.

### 3.3. Fizikalno-mehanička svojstva zrna

Uvjet da će se zrna moći ispravno ugrađivati i da neće tijekom vremena pretrpjeti ikakve loše posljedice pod utjecajem klimatskih čimbenika propisane su u Tablici 2.

***Tablica 2. Fizikalno-mehanička svojstva zrna MNS-a*** *[19]*

| Svojstvo | Traženi zahtjev (maksimum) |
|---|---|
| Određivanje oblika zrna, indeks oblika, HRN EN 933-4 [28] | 40% |
| Upijanje vode, HRN EN 1097-6 [26] | 1,6% |
| Trošna, nekvalitetna zrna, HRN B.B8.037 [29] | 7% |
| Ispitivanja toplinskog i vremenskog utjecaja na svojstva agregata, ispitivanje magnezijevim sulfatom, HRN EN 1367-2 [30] | 12% |
| Otpornost prema drobljenju i habanju po metodi Los Angeles, HRN EN 1097-2 [31] | 45% |

Uređaj za ispitivanje kamena na otpornost prema drobljenju i habanju po metodi Los Angeles [31] prikazan je na Slici 18.




***Slika 18. Uređaj za ispitivanje otpornosti kamena prema drobljenju i habanju*** *[25]*

### 3.4. Izvedba mehanički zbijenog sloja

Nevezani donji nosivi sloj od zrnatih materijala izvodi se na posteljici, koja je prethodno uređena i ispitana te od strane nadzornog inženjera preuzeta putem građevinskog dnevnika. Provjerava se ravnost i položaj površine, te projektirani nagib podloge (posteljice), pravilnost izvedene odvodnje i traženi uvjeti kakvoće materijala i izvedenog sloja.

Nosivi se sloj ne smije ugrađivati na smrznutu podlogu, od smrznutog materijala, nakon obilnijih kiša i otapanja snijega.
Mogu se primijeniti dvije tehnologije izrade [19]:

- navoženje zrnatog materijala, razastiranje i poravnavanje grejderom i zbijanje ili
- razastiranje zrnatog materijala pomoću razastirača ili finišera i zbijanje.

Postupak obuhvaća navoženje zrnatog materijala, razastiranje i poravnavanje grejderom, zbijanje, doprema na gradilište kamionima kiperima, istovar u hrpe u rasporedu koji će nakon razastiranja osigurati traženu debljinu sloja. Treba paziti da prilikom prijevoza i istovara ne dođe do segregacije materijala. Materijal se grejderom razastire u sloj jednolične debljine, koja u rahlom stanju mora biti veća od projektirane onoliko koliko je potrebno da se nakon zbijanja ostvari upravo projektirana debljina (određuje na *pokusnoj dionici* oko 20 do 30% više od projektirane debljine). Prilikom zbijanja vlažnost materijala treba biti blizu optimalne ($w_{opt} \pm$ 2%).
Nakon završenog planiranja i profiliranja započinje se sa zbijanjem vibracijskim sredstvima za zbijanje: vibroločama, kompaktorima, vibrovaljcima ili valjcima s gumenim kotačima, kombiniranim valjcima s gumenim i metalnim kotačima (posebno ili u kombinaciji).
*Vibracijski valjci* (Slika 19) zbog male dodirne površine, često nemaju dobar učinak i izazivaju segregaciju materijala u sloju. Sredstvo za zbijanje ili garnituru sredstava za zbijanje treba odabrati tako da odgovara zrnatom materijalu koji se ugrađuje, odnosno da ima dobar učinak u pogledu zbijanja. Zbijanje treba obaviti istim brojem prijelaza preko čitave površine. Brzina kretanja valjaka ili uređaja za nabijanje treba biti kontinuirana (od 2,5 do 4 km/h).



***Slika 19. Vibracijski valjak prilikom zbijanja MNS-a***

Tijekom razastiranja zrnatog materijala pomoću razastirača ili finišera te zbijanja, kamionima kiperima puni se košara razastirača (automatski razastire sloj) ili finišera koji djelomično i zbija sloj. Materijal mora imati optimalnu količina vode i pijeska, zbijanje slijedi neposredno po

razastiranju. Za izradu slojeva drobljenog zrnatog materijala granulometrijski sastav mora biti strogo kontroliran (načelo “mineralni beton”).
Površina sloja mora biti dobro i jednoliko zatvorena – mozaičkog izgleda mjesta koja nisu dostupna velikim strojevima za zbijanje treba zbiti manjim prikladnim sredstvima i načinima u skladu sa zahtjevima projekta, koje odobrava nadzorni inženjer na prijedlog izvođača.
Zbijanje sloja mora se ponoviti ukoliko u razdoblju između ugradnje sloja MNS-a i sljedećeg sloja kolničke konstrukcije dođe do smrzavanja, jačih oborina, oštećenja zbog gradilišnog prometa ili naknadnih radova na postojećem sloju. Svi zahtjevi za ugrađeni sloj moraju biti ispitani i potvrđeni upisom u građevinski dnevnik prije polaganja sljedećeg sloja.

### 3.5. Kontrola kvalitete izvedbe sloja

Kontrola kvalitete izvedbe obuhvaća prethodna i tekuća ispitivanja (izvođačka) i kontrolna ispitivanja (investitorska) sukladno Tehničkim uvjetima za radove na cestama [19].
U *prethodnim ispitivanjima* u laboratoriju se ispituju karakteristike i uspoređuju s traženim zahtjevima te se izdaje nalaz o kvaliteti materijala (pogodnost). Kod većih nalazišta (šljunčara) treba uspostaviti stalnu prethodnu kontrolu osnovnih svojstava, a kod većih promjena svojstava materijala treba ponoviti kompletna prethodna ispitivanja.
*Tekuća ispitivanja* obavlja izvođač tijekom izvođenja, a ispituju se prema sljedećim učestalostima:

- stupanj zbijenosti Sz ili modul stišljivosti Ms, na svakih 500 $m^2$ sloja
- granulometrijski sastav, na 3000 $m^2$ sloja
- ravnost i nagib sloja, na svakom poprečnom profilu
- položaj i visina sloja, na svakom poprečnom profilu.

*Kontrolna ispitivanja* obveza su investitora i provode se na sljedeći način:

- rezultati kontrolnih ispitivanja potvrđivanje su rezultata tekućih ispitivanja i služe za preuzimanje sloja
- vrste ispitivanja iste su kao kod tekućih, a frekvencija je u pravilu upola manja.

# 4. NOSIVI SLOJ OD ZRNATOG MATERIJALA STABILIZIRAN HIDRAULIČKIM VEZIVOM – CNS

## 4.1. Općenito

Nosivi sloj kolničke konstrukcije od zrnatih kamenih materijala stabiliziranih cementom upotrebljava se od 1945. (londonski aerodrom Heathrow). Kod nas se šljunak stabilizirani cementom počeo upotrebljavati prije više od 50 godina – prvo na gradskim ulicama, a zatim na autocestama i na aerodromskim površinama. Nosivi slojevi stabilizirani cementom odlikuju se znatnom krutošću (polukrute kolničke konstrukcije) te su dobra i pouzdana podloga za slojeve iznad njih, osobito za fleksibilne asfaltne slojeve. Preuzimaju veliki dio naprezanja od prometnog opterećenja i rasterećuju slojeve ispod (posebno posteljicu).
Kolničke konstrukcije s nosivim slojevima stabiliziranim cementom manje su osjetljive na vremenske utjecaje te im je nosivost u tijekom godine znatno ujednačenija. Ovaj sloj izvodi se u središnjem dijelu kolničke konstrukcije i nalaze se u relativno povoljnim uvjetima utjecaja temperature i vlage. Asfaltni slojevi u velikoj mjeri modificiraju razlike u temperaturi tijekom dana s gornje strane CNS-a u, pa su naprezanja od utjecaja (nejednolike) temperature mala. Kod krutih kolničkih konstrukcija (s betonskom pločom) ovaj sloj služi prvenstveno za sprječavanje pojave “pumpanja” i pada vlažnosti kod stvrdnjavanja betona. Eisenmann-ova istraživanja pokazala su da se može računati i s učinkom sprezanja betonske ploče i CNS-a što se odražava na povećanje nosivosti krutih kolnika. [32]
Slojevi od zrnatih kamenih materijala stabiliziranih cementom bitno se razlikuju od cementbetonskih ploča, u usporedbi s betonom (količina cementa od 200 do 300 kg/$m^3$). Kod stabiliziranih nosivih slojeva (količina se kreće od 50 do 100 kg/$m^3$) udio veziva je (3-5%) ovisno o karakteristikama zrnatog kamenog materijala. Karakteristika ovog sloja nepotpuna je obavijenost zrna cementnim mortom (“točkasto povezivanje”) i velika šupljikavost. Stoga stezanje tog materijala nije veliko s promjenama temperature, pa se slojevi mogu izrađivati bez razdjelnica. Kad su tlačne čvrstoće iznad propisanih, u CNS-u se pojavljuju strukturne pukotine koje se odražavaju na asfaltne slojeve koji se nalaze iznad njega u gornjem dijelu kolničke konstrukcije. Pojava mikro pukotina normalna je za ovu vrstu slojeva i one nisu nedostatak jer su nepravilne i hrapave, a opterećenje se može prenositi preko cijelog sloja, zadržavajući potrebnu nosivost.

## 4.2. Svojstva sastavnih materijala i mješavine CNS-a

Glavno mehaničko svojstvo cementom stabiliziranog gornjeg nosivog sloja je *tlačna čvrstoća,* koja nakon 28 dana treba biti u granicama od 3,0 do 6,5 MN/$m^2$ . Donja granica potrebna je da bi sloj imao određenu nosivost, a gornja da u njemu ne bi nastale izražajne pukotine.
Debljina CNS-a u kolničkoj konstrukciji kreće se između 15 i 25 cm, a ako ispod nema sloja mehanički zbijenog zrnatog kamenog materijala (MNS) debljina može biti i do 40 cm. Tada se obavezno izvodi u dva sloja. U Zračnoj luci Osijek u sastavu kolničke konstrukcije uzletno-sletne staze izrađen je CNS debljine 30 centimetra.
Sastavni materijali nosivih slojeva stabiliziranih cementom su: zrnati kameni materijali, cement i voda.
Zrnati kameni materijal može biti: prirodni pjeskoviti šljunak, drobljeni kameni materijal ili mješavina prirodnog šljunka i drobljenog kamenog materijala, a mora imati svojstva materijala koja su propisana normama HRN U.E9.024 [33] i HRN EN 14227-1 [34]:

- propisana su fizičko-mehanička svojstva

- određeni granulometrijski sastav (propisan je graničnim krivuljama, postoje dva tipa zrnatog kamenog materijala (tablica 3): sitniji (tip A) od 8 do 31,5 mm i krupniji (tip B) od 31,5 do 50 mm)
- ne smije sadržavati štetne sastojke.

Granulometrijska krivulja mora se nalaziti unutar graničnih područja (blaži su zahtjevi nego kod MNS-a). Stabilnost materijalu daje cement. Ako je granulometrijski sastav bolji, lakše se postiže potreban stupnja zbijenosti i početne stabilnosti sloja (dok još nema djelovanja cementa). U Francuskoj se CNS upotrebljava pri radovima na pojačanju postojećih kolnika, a upotrebljava se drobljeni materijal vrlo kontinuirane krivulje što uz sporo djelujuće vezivo (leteći pepeo ili cement s usporivačima) omogućuje brzo puštanje prometa preko sloja. Traženi granulometrijski sastav postiže se izborom odgovarajućeg prirodnog materijala ili proizvodnjom drobljenog materijala sastavljanjem mješavine iz frakcija kamenog agregata (Tablica 3) [35].

***Tablica 3. Granulometrijske krivulje cementom stabiliziranog sloja*** *[35]*

| **Otvor sita** (kvadratični) [mm] | **Prolaz kroz sito** [%] (autoceste i ceste vrlo teškog prometnog opterećenja) **Tip A** (8 - 31,5 mm) | **Prolaz kroz sito** [%] (autoceste i ceste vrlo teškog prometnog opterećenja) **Tip B** (31,5-50 mm) | **Prolaz kroz sito [%]** (ceste teškog i srednjeg prometnog opterećenja) |
|---|---|---|---|
| 0,1 | 3-25 | 0-12 | 0-55 |
| 0,2 | 7-32 | 2-18 | 2-70 |
| 0,5 | 12-45 | 5-27 | 5-100 |
| 1 | 17-57 | 8-36 | 8 |
| 2 | 24-70 | 14-47 | 13 |
| 4 | 32-84 | 21-60 | 21 |
| 8 | 44-100 | 33-73 | 33 |
| 16 | 60 | 49-90 | 50 |
| 31,5 | 100 | 75-100 | 72 |
| 50 | | 100 | 100 |

Za ceste teškog, srednjeg i lakog prometnog opterećenja mogu se upotrijebiti:

- šljunkovito-pjeskoviti materijali sa udjelom prašinasto glinovitih čestica od 0 do 10% (čestice manje od 0,02 mm)
- pjeskoviti materijal riječnog, glacijalnog ili eolskog porijekla uz zadovoljenje uvjeta granulometrije.

Ispitivanja kemijskih svojstava agregata provode se prema HRN EN 1744-1 [22] te određivanje zagađenosti i sadržaj organskih tvari HRN U.B1.024 [22] i HRN B.B8.034 [24] – isto kao i kod MNS-a.

Utvrđivanje *gustoće i upijanja vode* sukladno HRN EN 1097-6 [25] te određivanje *vlažnosti* prema HRN EN ISO 17892-1 [27] ispituje se:

- Uzorak zrnatog kamenog materijala zbija se energijom modificiranog Proctorovog postupka (2,66 MNm/m$^3$).
- Rezultat je ispitivanja optimalna vlaga, odnosno količina vode u uzorku koja omogućuje maksimalnu zbijenost materijala, koja je dostatna i za hidrataciju veziva.

- Ugradnja CNS-a najbolja je pri optimalnoj vlazi ili pri optimalnoj vlazi uvećanoj za 1%.
- Maksimalna suha prostorna masa (po modificiranom Proctorovom postupku) – koristi se kao parametar pri određivanju stupnja zbijenosti ugrađenog sloja.

Karakteristike zrna materijala: ako se zahtjevi (Tablica 4) usporede s onima kod nevezanog nosivog sloja (Tablica 2), vidljivo je da su isti (osim oblika zrna). Količina cementa u sloju je mala i ne može zaštititi zrna obavijanjem, a sloj se nalazi u zoni smrzavanja.

***Tablica 4. Fizikalno-mehanička svojstva zrna CNS-a*** *[35]*

| Svojstvo | Traženi zahtjev (maksimum) |
|---|---|
| Određivanje oblika zrna, indeks oblika, HRN EN 933-4 [28] | 50% |
| Upijanje vode, HRN EN 1097-6 [26] | 1,6% |
| Trošna, nekvalitetna zrna, HRN B.B8.037 [29] | 7% |
| Ispitivanja toplinskog i vremenskog utjecaja na svojstva agregata, ispitivanje magnezijevim sulfatom, HRN EN 1367-2 [30] | 12% |
| Otpornost prema drobljenju i habanju po metodi Los Angeles, HRN EN 1097-2 [31] | 45% |

U zrnatom materijalu ne smije biti štetnih sastojaka u prekomjernim količinama. Štetni su sastojci organske tvari i sulfati koji mogu usporiti ili omesti proces vezivanja i očvršćivanja cementa.

Za mješavinu CNS-a upotrebljavaju se: čisti portland cement, portland cement s dodatkom pucolana ili zgure i metalurški cement. Koriste se cementi manjih čvrstoća (PC-25, PC-35, PC-45) s ciljem što manjih stezanja i sprječavanja eventualnog nastajanja pukotina. Postoje i druga hidraulična veziva najčešće na bazi letećeg pepela i mljevene zgure, ali prije primjene potrebno je provesti detaljna ispitivanja budući da se radi o promjenljivim i nestandardnim materijalima. Na uzorcima veziva ispituju se sljedeća svojstva [35]:

- standardna konzistencija
- vrijeme vezivanja
- postojanost zapremine
- ostatak na situ 4900 otvora/$cm^2$
- tlačna čvrstoća (za cement klase 25 i 35 nakon 7 i 28 dana, a za cement klase 45 nakon 3 i 28 dana).

*Voda* mora biti pogodna za radove sa cementom. Zbog raznih lokacija gradilišta može se doći u situaciju da se treba provjeriti kvaliteta vode. Norma propisuje detaljne kriterije koje voda mora zadovoljiti [35]:

- PH vrijednost veća od 6,0
- udio sulfata ($SO_3$) manji od 2700 mg/l vode
- udio klorid iona ($Cl^-$) manji od 300 mg/l vode
- pokazatelj organskih tvari (humusne kiseline, šećeri i dr.) – izražen kao utrošak kalijeva permanganata po metodi oksidacije manji od 200 mg/l vode
- ukupna količina soli (izražena kao suhi ostatak) manja od 5000 mg/l vode.

Stvrdnuta stabilizacijska mješavina treba biti otporna na smrzavanje. Ono se dokazuje izlaganjem uzoraka određenom broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja i ispitivanju tlačne čvrstoće. Pad tlačne čvrstoće smrzavanih uzoraka u odnosu na ne smrzavane ne smije biti veći od 20%. Propisane vrijednosti tlačne čvrstoće ovisno o prometnom opterećenju kolnika nalaze se u Tablici 5.

***Tablica 5. Propisane vrijednosti tlačne čvrstoće stabilizacijske mješavine CNS-a*** *[35]*

| **Sloj** | **Tlačna čvrstoća stabilizacijske mješavine** [MN/m2] **nakon 7 dana** | **Tlačna čvrstoća stabilizacijske mješavine** [MN/m2] **nakon 28 dana** |
|---|---|---|
| Nosivi sloj kolničke konstrukcije autocesta i cesta vrlo teškog prometnog opterećenja | od 2,0 do 5,5 | od 3,0 do 6,0 |
| Nosivi sloj kolničke konstrukcije cesta teškog i srednje teškog prometnog opterećenja | od 1,5 do 5,5 | od 2,5 do 6,0 |

*Prethodni radni sastav mješavine* (receptura) određuje se u laboratoriju, a ispituje se sljedeće [35]:

- granulometrijski sastav zrnatog materijala
- udio osnovnog zrnatog kamenog materijala
- udio veziva
- udio vode – optimalna vlažnost po modificiranom Proctoru
- maksimalna suha prostorna masa po modificiranom Proctoru
- tlačna čvrstoća mješavine (nakon 7 i 28 dana njege uzoraka u vlažnom prostoru pri temperaturi $20^0$C)
- otpornost prema smrzavanju.

### 4.3. Svojstva izvedenog sloja CNS-a

Na izvedenom sloju odmah nakon polaganja i prije početka vezivanja ispituje se zbijenost izražena stupnjem koji je propisan i iznosi min. 98% od modificiranog *Proctora*. Tlačna čvrstoća stabilizacijske mješavine mora se nalaziti unutar propisanih granica (Tablica 5). Uzorci na kojima se određuje čvrstoća valjkastog su oblika (∅ 15 cm i visine 15 cm).
Geometrijski parametri izvedenog sloja utvrđuju se na osnovi sljedećih ispitivanja:

- ravnost – max 1,5 cm, mjereno letvom dužine 3 m
- odstupanje od debljine sloja – max $\pm$ 1,5 cm
- visina i položaj sloja – odstupanje može biti najviše $\pm$1,5 cm (mjeri se na rubovima i u sredini kolnika)
- nagib površine sloja – odstupanje max. 0,4%.

Stabilizacijska mješavina najčešće se proizvodi u postrojenjima za miješanje (eng. mixed-in-plant) prema prethodnom radnom sastavu (recepturi). Postrojenje mora imati mogućnost masenog doziranja sastojaka i treba moći postizati jednoličnu kvalitetu proizvodnje. Ovakav način proizvodnje u prošlosti nije bio primjenjiv jer se rijetko mogao dobiti potreban kapacitet,

a betonare nisu bile precizne kod doziranja malih količina cementa kakve se primjenjuju kod stabilizacija. Nekada su se za proizvodnju stabilizacijskih mješavina uspješno koristile prerađene asfaltne baze ali danas se stabilizacijske mješavine CNS proizvode u betonarama (Slika 20).



***Slika 20. Betonara - postrojenje za proizvodnju stabilizacijske mješavine CNS-a***

Baze – betonare za proizvodnju stabilizacijskih mješavina su kontinuiranog tipa, a u pravilu se sastoje od ovih dijelova:

- silosa za zrnati materijal (dozator)
- silosa za vezivo
- rezervoara za vodu
- miješalice
- silosa za gotovu stabilizacijsku mješavinu.

Umiješana svježa masa stabilizacijske mješavine prevozi se na gradilište kamionima kiperima, gdje se razastire na prethodno pripremljenu podlogu (najčešće nevezani nosivi sloj MNS).
Razastiranje je moguće obaviti grejderom (Slika 21) ili finišerom (betonskim ili asfaltnim). Finišerska ugradnja kvalitetnija je, debljina sloja u nezbijenom stanju mora biti veća od projektirane debljine kako bi se nakon zbijanja dobio sloj projektirane debljine. Razlika u debljini određuje se na pokusnoj dionici na početku izvođenja sloja (iznosi obično oko 20 %). Slijedi zbijanje sloja koje se obavlja vibracijskim sredstvima (vibroločama ili vibrovaljcima), a vrlo dobre rezultate daju i valjci na kotačima s gumama.




***Slika 21. Razastiranje stabilizacijske mješavine grejderom** [1]*

Mješavina nosivog sloja stabiliziranog cementom može se proizvoditi na licu mjesta, odnosno na samom gradilištu (eng. mixed-in-place). Razastirač za cement posipava vezivo u doziranoj količini na prethodno nanesen zrnati kameni materijal projektom određene debljini te se reciklerom (Slika 22) miješaju cement i kameni materijala uz optimalni dodatak vode kako bi se dobio homogenizirani sloj.



***Slika 22. Recikler za umješavanje stabilizacijske mješavine u sloju***

Broj prijelaza valjaka ili način rada s više raznih sredstava (vibroploče, odnosno valjak na kotačima s gumama) potreban za postizanje tražene zbijenosti, određuje se na početku rada na probnoj dionici. Nakon završenog valjanja sloj je (osobito po toplom vremenu) potrebno određeno vrijeme njegovati vlaženjem, poslije čega se može nastaviti s izradom daljnjih slojeva kolničke konstrukcije. Propisano vrijeme njege je 7 dana (polijevanje) ili 3 dana (polijevanje), a zatim prskanje nepropusnom prevlakom (bitumenska emulzija ili sredstva za zaštitu betona).
Pri izradi nosivih slojeva stabiliziranih cementom treba znatnu pažnju posvetiti uvjetima okoline jer se isti mogu znatno odraziti na kvalitetu nosivog sloja. Tijekom izvođenja poželjne su temperature između 10 i 25 $^0$C. Nije preporučljivo izvoditi radove pri nepovoljnim uvjetima: po kišnom vremenu, na visokim temperaturama zraka i pri kraju građevinske sezone na niskim temperaturama. U slučaju nailaska kiše razastiranje veziva treba odmah prekinuti i što brže ugraditi u sloj, a završno miješanje i zbijanje obaviti po prestanku kiše. Ako se stabilizacija radi od mješavine proizvedene u postrojenju za miješanje i razastiranjem pomoću grejdera ili finišera potrebno je predvidjeti zaštitu razastrtog sloja (plastičnim folijama ili drugim sredstvima). Nije dopušten rad pri temperaturama nižim od 5$^0$C. Izrađeni sloj treba u slučaju pojave smrzavanja zaštititi pogodnim pokrovom. Po toplom vremenu najvažnija je intenzivna njega sloja vlaženjem, da se spriječi gubitak vlage iz sloja prije vezivanja cementa.
*Zbijanje* treba obaviti istim brojem prijelaza po cijeloj površini, gdje brzina kretanja valjaka (Slika 23) za nabijanje treba biti kontinuirana (2,5 do 4 km/h).




***Slika 23. Zbijanje sloja CNS-a valjkom***

Sustav kontrole kvalitete izvedbe sloja sadrži sljedeće postupke:

- *Prethodna ispitivanja* obuhvaćaju ispitivanje svih sastavnih materijala i izradu prethodnog radnog sastava (recepture).
- Prije početka izrade stabiliziranog sloja određuje se *dokazni radni sastav,* odnosno prenošenje recepture na proizvodno postrojenje ili doziranje mehanizacijom za miješanje i verifikaciju postizanja potrebnih svojstava.
- Na *pokusnoj dionici* utvrđuje se način ugradnje i zbijanja sloja. Ovaj postupak izvodi se na svim većim gradilištima.
- *Tekuća ispitivanja* tijekom radova na izvedbi sloja provodi izvođač prema propisanoj učestalost pojedinih ispitivanja, a to su:
  - ispitivanje stupnja zbijenosti izrađenog sloja (Sz)
  - ispitivanje granulometrijskog sastava zrnatog materijala (Tablica 3).
  - ispitivanje osnovnih parametara koji određuju kvalitetu cementa
  - ispitivanje tlačne čvrstoće stabilizacijske mješavine
  - kontrolu geometrijskih elemenata sloja (ravnost, točnost profila, debljina).
- *Kontrolna ispitivanja* obveza su investitora, a obuhvaćaju uglavnom ista ispitivanja u dvostruko manjoj učestalosti od tekućih-izvođačkih ispitivanja.

## 5. ASFALTNI SLOJEVI I ASFALTNE TEHNOLOGIJE

### 5.1. Općenito

Asfalt se dobiva umješavanjem vrućeg bitumena u vrući kameni materijal ili miješanjem bitumenske emulzije s nezagrijanim kamenim materijalom kod asfaltnih tehnologija [36] i [37]. Proizvodnja bitumenskih mješavina odvija se na asfaltnom postrojenju (bazi). Vrsta postrojenja je stacionarni ili mobilni tip s kontinuiranim ili diskontinuiranim načinom miješanja.
Kontrola tvorničke proizvodnje obveza je proizvođača, a obuhvaća sljedeće postupke:

- kontrolu svojstava i uskladištenja sastavnih materijala
- kontrolu proizvodnog pogona i procesa proizvodnje bitumenskih mješavina
- kontrolu proizvedenih bitumenskih mješavina
- uskladištenje sastavnih materijala:
  - separirane frakcije, a sitni agregati zaštićeni su i od vlaženje (frakcije 0/2 ili 0/4 mm)
  - punilo u cisternama, iznimno u vrećama, kako bi se spriječila pojava vlažnosti
  - bitumen u označenim cisternama, iznimno u bačvama.

Prijevoz bitumenskih mješavina u količinama potrebnim za kontinuiranu ugradnju obavlja se kamionima kiperima (Slika 24) čistih sanduka, poprskanih sredstvom za sprečavanje lijepljenja proizvedenog asfalta, pri čemu se ne smije se koristiti nafta. Tijekom prijevoza kamioni moraju biti prekriveni vodonepropusnom i termostabilnom ceradom. Prijevoz od mjesta proizvodnje do mjesta ugradnje smije trajati najviše 2 sata odnosno dozvoljena je udaljenost prijevoza do najviše 120 kilometra. Za skladištenje vruće bitumenske mješavine na gradilištu koriste se zatvoreni kontejneri s grijanim stjenkama.



***Slika 24. Kamioni kiperi za prijevoz bitumenske mješavine***

Najniža *temperatura zraka* pri ugradnji asfalta ovisno o debljinama slojeva i vrstama bitumenske mješavine – tip asfalta je:

- $0^0$ C za nosive i vezne slojeve od *asfaltbeton* (AC)
- $+5^0$ C za habajuće slojeve, d>30 mm od *asfaltbeton* (AC); *splitmastiksasfalt* (SMA) i *lijevani asfalt* (MA)
- $+10^0$ C za habajuće slojeve, d≤30 mm od AC; SMA i MA
- $+10^0$ C za habajuće slojeve od *asfaltbeton za vrlo tanke slojeve* (BBTM) i *porozni asfalt* (PA)
- *temperatura podloge* $+5^0$ C, d≤30 mm za sve tipove habajućih slojeva asfalta.

Podloga asfaltnom sloju mora biti stabilna i nosiva (preuzeta kroz građevinski dnevnik), suha i čista, propisane ravnosti ovisno o vrsti sloja te poprskana bitumenskom emulzijom na vezani sloj u potrebnoj količini za postizanje propisane prionjivosti (Slika 25).



***Slika 25. Prskanje bitumenske emulzije za povezivanje slojeva*** *[38]*

Bitumenizirani međusloj služi za sljepljivanje asfaltnog sloja sa slojem CNS-a i asfaltnog sloja s asfaltnim slojem u kolničkoj konstrukciji. Sloj se nanosi prskanjem bitumenske emulzije u količini 0,15-0,6 kg/$m^2$ na sloj CNS-a (najmanje 24 sata) odnosno na asfaltni sloj nekoliko sati (ovisno o vremenu razbijanja emulzije) prije asfaltiranja. Nanošenje se vrši pri temperaturi zraka i podloge iznad $5^0$C.
U sklopu izvođačke kontrole (tekuća ispitivanja) utvrđuje se udio veziva i vrijeme raspada bitumenske emulzije, a u sklopu investitorske kontrole (kontrolna ispitivanja) utvrđuje se količina bitumenske emulzije nanošene prskanjem.

Ugradnja bitumenskih mješavina izvodi se strojno finišerom (Slika 26) kontinuirane kretnje i ujednačene brzine te iznimno ručno na malim nepristupačnim površinama.



***Slika 26. Finišer za strojnu ugradnju asfalta*** *[39]*

Valjanje bitumenske mješavine za postizanje određene zbijenosti asfaltnog sloja provodi se određenim brojem, vrstom i masom valjaka. Broj prijelaza valjka po istoj površini mora osigurati: postizanje stupanja zbijenosti (Sz) određenog projektom, debljinu definiranu projektom, traženu teksturu (Slika 27) i propisanu ravnost asfaltnog sloja (uzdužnu i poprečnu). Zbijanje poroznog asfalta i asfaltnih slojeva na cestovnim objektima (mostovi, nadvožnjaci,

vijadukti i sl.) ne obavlja se valjcima s vibrirajućim djelovanjem već samo oscilatornim tipom valjka.



***Slika 27. Tekstura izvedene asfaltne površine***

Uzdužni radni spoj gornjeg asfaltnog sloja u odnosu na uzdužni radni spoj donjeg asfaltnog sloja mora biti razmaknut najmanje 15 cm (Slika 28). Izvedba „vrućeg" uzdužnog spoja, postiže se polaganjem asfaltnog sloja istovremeno s dva finišera razmaknuta za najviše jednu duljinu finišera. Pri izvedbi „hladnog" uzdužnog radnog spoja, rubni dio prethodno položenog asfaltnog sloja mora biti okomit i premazan bitumenskom masom za sljepljivanje asfaltnog sloja s drugom vrstom materijala ili se treba izraditi razdjelnica ispunjena vrućom brtvenom bitumenskom masom ili predgotovljenom bitumenskom trakom.
Poprečni radni spoj asfaltnog sloja u odnosu na donji asfaltni sloj mora biti razmaknut najmanje 2 m. Stalni rubovi izvode se konusom noža valjka pod $45^0$.
Puštanje u promet odvija se na temperaturi sloja ispod $30^0$ C (kod SMA nakon 24 sata, da dođe do potpune stabilizacije mješavine u asfaltnom sloju).



***Slika 28. Uzdužni radni spoj i asfaltni sloj u boji***

Izvedba površinske obrade (eng. *surface dressing* – SD) primjenjuje se u svrhu poboljšanja hvatljivosti i zatvaranja mikro pukotina vozne površine kolnika. U prvom koraku motornom se prskalicom nanosi bitumensko vezivo, pri ujednačenoj brzini 3-10 km/h i ravnomjernom tlaku prskanja 0,4-0,8 bara. Zatim se posipačem (Slika 29) nanosi agregat (na razmaku 30 m iza prskalice, a on se kreće unazad da bi pneumaticima prolazio po posipanom agregatu) i ima

ravnomjernu brzinu posipavanja 4-6 km/h. Valjci s gumenim kotačima i kombinirani (masa 10-20 tona) kreću se 4-6 km/h preko nanesenog agregata. Motorne krute rotacijske četke koriste se za čišćenje podloge prije nanosa veziva, a meke rotacijske usisne četke služe za uklanjanje nevezanih zrna nakon izvedbe površinske obrade. Najviša dopuštena količina ispalih zrna iznosi 20% ukupne količine agregata. Ispala zrna uklanjaju se tri do pet dana nakon izvedbe površinske obrade.

Uvjeti temperature podloge i zraka tijekom izvedbe površinske obrade su + $10^0$ C i to 24 sata +$5^0$ C.



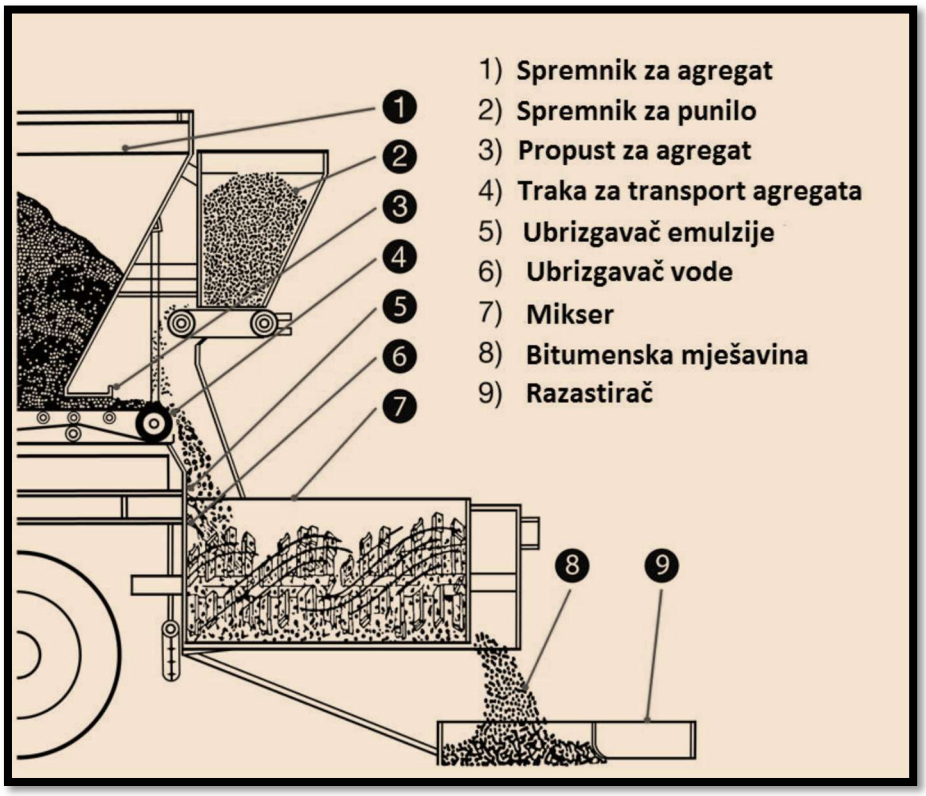
***Slika 29. Posipač kamene sitneži kod izvedbe površinske obrade***

Izvedba tankoslojne asfaltne prevlake hladnim postupkom (eng. s*lurry surfacing* – SS) primjenjuje se kao i površinska obrada u svrhu poboljšanja hvatljivosti i teksture te zatvaranja mikro pukotine vozne površine kolnika (Slika 30). U samohodnom stroju (Slika 31) miješa se i homogenizira smjesa frakcije agregata s bitumenskom emulzijom i potrebnim dodacima (*stabilizator za emulziju, cement, hidratizirano vapno, voda*, *pigmenti boje*). Prije nanošenja obavezno je čišćenje podloge pod tlakom 80-150 bara.



***Slika 30. Izvedba tankoslojne asfaltne prevlake*** *[40]*

Nedostatke na postojećem kolniku (korekcija profila, "ispusi", kolotrazi, pukotine, udarne jame i sl.) potrebno je sanirati prije polaganja tankoslojne asfaltne prevlake, isto kao i prije izvedbe površinskih obrada.
Uvjeti temperature podloge i zraka tijekom izvedbe površinske obrade su + $10^0$ C (24 sata prije izvedbe +$5^0$ C). Podloga treba biti suha ili vlažna (ne mokra) i ne pretopla.




***Slika 31. Dijelovi samohodnog stroja za izvedbe tankoslojne prevlake*** *[40]*

### 5.2. Sastavni materijali asfaltne mješavine i asfaltnih tehnologija

Sastavni materijali asfaltne mješavine su frakcije kamenog agregata, punilo i bitumensko vezivo te dodaci. Kationska bitumenska emulzija koristi se kao sastavni materijal za površinske obrade i tankoslojne asfaltne prevlake u svojstvu veziva kamenog agregata.

***Agregat*** namijenjen za proizvodnju bitumenskih mješavina vrućim i toplim postupkom, te površinske obrade i hladne asfaltne prevlake dijele se prema (pod)frakcijama na:

- sitni 0/2 mm
- krupni 2/4, 4/8, (8/11*)*, 8/16, (11/16), (16/22), 16/32, (22/32) mm
- miješani 0/4, 0/8, 0/11, 0/16, 0/22, 0/32 mm
- punilo – sadrži većinu čestica manjih od 0,063 mm i potpuno prolazi kroz sito od 2 mm, a upotrebljava se kao vlastito punilo i dodano punilo.

Vlastito punilo dobiva se otprašivanjem agregata u procesu sušenja u rotacijskom bubnju na asfaltnom postrojenju i to svih kamenih frakcija osim onih koje su silikatnog sastava.
Dodano punilo proizvodi se zasebno na industrijskim postrojenjima (kamenolomima) od kamena karbonatnog sastava. Vrste dodanog, industrijskog punila su:

- mineralno punilo (vapnenačko ili dolomitno)

- miješano punilo (smjesa mineralnog punila i kalcijevog hidroksida), hidratizirano vapno
- cement i leteći pepeo od izgaranja ugljena.

Uporaba vlastitog punila kao i cementa u svojstvu dodanog punila nije dopuštena u asfaltima tipa: splitmastiksasfalt SMA, asfalbeton za vrlo tanke slojeve BBTM i porozni asfalt PA.

Razvrstavanje agregata izvršeno je u ukupno devet kategorija primjenske oznake AG1-AG9 prema nacionalnoj regulativi [36] i [37]. Postoji agregat silikatnog ili karbonatnog sastava određene granulometrije sitne (0/2 ili 0/4) ili krupne.

Za habajuće slojeve koriste se kategorije AG1 do AG5, a za nosivo-habajuće, vezne i nosive asfaltne slojeve koriste se kategorije AG6 do AG9.

Razlikuju se sljedeći agregati:

- prirodni kameni agregat
- industrijski agregat – za proizvodnju bitumenskih mješavina mogu se upotrijebiti slijedeći industrijski agregati:
  - zgura iz proizvodnje čelika i zgura iz proizvodnje bakra (kao krupni, sitni i miješani agregat za sve asfaltne slojeve)
  - granulirana zgura iz visokih peći (kao sitni i miješani agregat za sve asfaltne slojeve);
  - zgura iz proizvodnje ferokroma i zgura iz proizvodnje feromangana (krupni i sitni agregat za sve asfaltne slojeve)
  - zgura iz visokih peći hlađena zrakom (kao krupni i miješani agregat za nosive slojeve)
  - silikomanganska zgura (kao krupni, sitni i miješani agregat za sve asfaltne slojeve).
- reciklirani agregat, koji je dopušteno koristiti isključivo za proizvodnju asfaltbetona za vezne, nosive i nosivo-habajuće slojeve kolničke konstrukcije
- reciklažni asfaltni agregat (RA) dobiva se glodanja asfaltnih slojeva ili drobljenjem lomljenih asfaltnih ploča iz kolnika (Slika 32). Upotrebljava se kao sastavni materijal za proizvodnju bitumenskih mješavina po vrućem i toplom postupku. Ako točka razmekšanja (PK) izdvojenog veziva ispitanih uzoraka nije viša od $70^0$C (*S*70) pogodan je kao agregat za proizvodnju bitumenskih mješavina.

  Normom HRN EN 13108-8 [41] ispituju se uređena svojstva (granulometrija i udio bitumena), a za proizvodnju bitumenskih mješavina upotrebljava se reciklažni asfaltni agregat oznake F1 (kategorije agregata).

  Najveća moguća količina reciklažnog asfaltnog agregata u bitumenskoj mješavini određuje se pomoću definiranih relacija. Tip bitumenskog veziva u reciklažnom asfaltnom agregatu mora se dokumentirati i naznačiti. Primjenjuje se kod asfaltbetona – AC i lijevanog asfalta – MA. Uporaba reciklažnog asfaltnog agregata nije dopuštena za habajuće asfaltne slojeve od: splitmastiksasfalta – SMA, asfaltbetona za vrlo tanke slojeve – BBTM i poroznog asfalta – PA.

  Tip bitumenskog veziva u reciklažnom asfaltnom agregatu mora biti posebno naznačen (je li vezivo većinom cestograđevni, tvrdi cestograđevni ili polimerom modificirani bitumen). Kada je udio RA veći od 10%(m/m) u bitumenskim mješavinama, a sadrži asfalt u kojemu je bilo koji bitumen osim cestograđevnog, mora se izraditi izjava o prirodi i svojstvima veziva.

  U RA najveće zrno *D* ne smije biti veće od veličine najvećeg zrna *D* bitumenske mješavine u koju se dodaje.

Bitna svojstva agregata iz reciklažnog asfaltnog agregata su: oblik zrna i udio drobljenog zrna, otpornost na smrzavanje i otpornost na poliranje (PSV).
Homogenost reciklažnog agregata određuje se ispitivanjem: granulometrijskog sastava, udjela bitumena i točke razmekšanja izdvojenog bitumena (PK).
Maksimalno dopušteni udjeli reciklažnog asfaltnog agregata, bez obzira na najveće moguće udjele određene temeljem homogenosti RA prema relacijama, ovise o namjeni bitumenske mješavine i načinu doziranja reciklažnog asfaltnog agregata u procesu proizvodnje bitumenske mješavine na asfaltnom postrojenju.
Tri su osnovna načina doziranja RA kod proizvodnje bitumenskih mješavina:

- *hladnim postupkom*: doziranje do najviše 10%(*m*/*m*) u habajućem sloju i do najviše 20% (*m*/*m*) u nosivom asfaltnom sloju
- *toplim postupkom – neizravno* zagrijavanje vrućim agregatom: doziranje do najviše 20% (*m*/*m*) u habajućem sloju i do najviše 40%(*m*/*m*) u nosivom asfaltnom sloju
- *toplim postupkom – izravno* zagrijavanje u paralelnom bubnju: doziranje do najviše 30% (*m*/*m*) u habajućem sloju i do najviše 60% (*m*/*m*) u nosivom asfaltnom sloju.

Proizvođač bitumenske mješavine obvezan je izraditi pisani dokument o klasifikaciji RA koji mora sadržavati podatke o: raspoloživoj količini reciklažnog asfaltnog agregata, vrsti i svojstvima bitumena, osnovnim svojstvima agregata, homogenosti i najvećim mogućim udjelima RA temeljem analize homogenosti.
Oznaka reciklažnog asfaltnog agregata (U RA d/D mm): U (veličina najveće nakupine reciklažnog asfaltnog agregata, izražena veličinom otvora sita), veličine agregata izražena u obliku *d*/*D* mm, pri čemu je *D* veličina najvećeg zrna a *d* najmanjeg zrna frakcije.
Udio bitumena u reciklažnom asfaltnom agregatu, bez obzira o kojoj vrsti bitumena se radi, određuje se ekstrakcijom.



***Slika 32. Reciklažni asfaltni agregat***

Vrste ***bitumenskog veziva*** su:

- *cestograđevni bitumen* (HRN EN 12591 [42]) koji se koristi kod svih tipova valjanog asfalta. Tipovi ovog bitumena su: B (20/30; 35/50; 50/70; 70/100 i 160/220), a vrijednosti se odnose na (min/max penetracija)
- *tvrdi cestograđevni bitumen* (HRN EN 13924 [43]) koristi se kod lijevanog asfalta, a tipovi ovog bitumena su: B (10/20 i 15/20)

- *bitumen modificiran polimerom* (HRN EN 14023 [44]) elastomer (e) ili plastomer (p) modificirani koristimo kod svih tipova valjanog asfalta**,** a vrijednosti se odnose na min/max penetraciju - točku razmekšanja. Tipovi bitumena modificiranog polimerom su: PmB (10/40-65; 25/55-55; 45/80-55 i 45/80-65) e (elastomer) ili p (plastomer) i PmB (40/100-65 i 90/150-45) e (elastomer). Bitno svojstvo je elastični povrat.
- *razrijeđeni* (eng. *cut-back*) i *omekšani* (eng. *flux*) bitumen (HRN EN 15322 [45]), a tipovi bitumena su: Fm (2/3/4 B 0) i Fm (2/3/4 BP 0). Koriste se kod površinskih obrada SD.

Maksimalne temperature skladištenja bitumena u cisternama na asfaltnom postrojenju te temperature pri miješanju i ugradnji ovise o vrsti i tipu bitumena.

Svrha ***dodataka*** bitumenskim mješavinama je:

- poboljšanje prionjivosti bitumenskog veziva
- povećanje otpornosti bitumenskog veziva prema starenju
- smanjenje osjetljivosti bitumenskih mješavina na djelovanje vode (ITSR)
- snižavanje temperature proizvodnje, prijevoza i ugradnje bitumenskih mješavina (parafini, "sasobit" i upjenjavanje)
- sprečavanje otjecanja bitumenskog veziva sa zrna agregata uporabom celuloznih ili prirodnih vlakna.

Vrsta i svojstva dodataka bitumenskoj mješavini moraju se obavezno propisno naznačiti uz pripadni tip bitumenske mješavine.

Kationske ***bitumenske emulzije*** sukladno HRN EN 13808 [46] upotrebljavaju se za:

- povezivanje asfaltnih slojeva međusobno i s podlogom (CNS ili beton), a tipovi su: C(50/55/60 B1; 50/55 BF1; 50/55/60/65 BP1) – S, gdje je C-kationska (različiti udjeli bitumena, vrsta bitumena -stabilnost)
- površinske obrade – SD, a tipovi su: C65/69B4-SD i C65/69BP4-SD – razlikuju se po udjelima bitumena
- za tankoslojne hladne asfaltne prevlake – SS, a tipovi su: C65B1-SS i C65BP1-SS, razlikuju se po udjelima bitumena.

### 5.3. Kontrola i osiguranje kvalitete

Postoje dva pristupa provođenju kontrole i osiguranja kvalitete asfaltnih radova: po razredima tehnološkog nadzora ovisno o prometnom opterećenju ili kategorizacije ceste i po učestalosti ispitivanja ovisno o veličini asfaltne površine.

Razredi tehnološkog nadzora su (I-III):

- I. vrlo teško prometno opterećenje: aerodromi, autoceste (AC) i brze ceste (BC)
- II. srednje i teško prometno opterećenje: javne ceste (JC) I kategorije i II kategorije
- III. lako i vrlo lako prometno opterećenje: javne ceste (JC) III kategorije i IV kategorije te nerazvrstane ceste (NC).

Učestalosti ispitivanja (prema pripadnim tablicama u TU[36]) određene su za sljedeće:

- asfaltne površine veće od 6000 $m^2$
- asfaltne površine između 2000 $m^2$ i 6000 $m^2$
- asfaltne površine manje od 2000 $m^2$
- površinske obrade
- tankoslojne asfaltne prevlake hladnim postupkom.

Izvođačku kontrolu (tekuća ispitivanja) provodi izvođač u vlastitom ili iznajmljenom laboratoriju sukladno važećim normama, a investitorsku kontrolu (kontrolna ispitivanja) provodi akreditirani laboratorij.

Tehničko – tehnološki elaborat (TTA) izrađuje izvođač, a koji sadrži sljedeće [36]:

- opis građevinskog projekta
- asfaltne slojeve kolnika predviđene projektom
- popis vrsta, tipova i količinu sastavnih materijala i bitumenskih mješavina
- popis pripadajućih isprava, izjavu o svojstvima ili dokazima uporabljivosti
- detaljan opis tehnološkog procesa (priprema podloge, proizvodnja, transport, polaganje i zbijanje, njegovanje do puštanja u promet)
- popis potrebne opreme, strojeva i osoblja – terminski plan izvedbe
- definirane posebne načine izvedbe (ako su projektirani)
- program izvođačke kontrole kvalitete – vrste i minimalni obim ispitivanja
- izjavu o posjedovanju ili ugovor o najmu laboratorija za provedbu izvođačke kontrole kvalitete
- laboratorij mora raspolagati odgovarajućom mjerenom opremom, pogodnim laboratorijskim prostorom i osobljem osposobljenim za provedbu propisanih ispitivanja
- imenovanje voditelja građenja
- voditelja izvođačke kontrole kvalitete.

U sklopu *prethodnih ispitivanja* utvrđuju se pogodnosti sastavnih materijala te sastav i fizikalno-mahanička svojstva bitumenske mješavine. Utvrđivanje se provodi postupkom izrade prethodnog sastava u laboratoriju i određivanjem radnog sastava prenesenog na asfaltno postrojenje.

Na *pokusnoj dionici* izvođač dokazuje predloženo TTA-om, investitorska kontrola to potvrđuje, a provode se ispitivanja:

- sastava i fizikalno-mehaničkih svojstava bitumenske mješavine
- svojstava ugrađenog asfaltnog sloja
- svojstava površine sloja, a ona su najzahtjevnija za habajući sloj – voznu površinu.

Ispitivanja sastava i fizikalno-mahaničkih svojstva proizvedene i ugrađene bitumenske mješavine provodi se *tijekom izvođenja* asfalterskih radova te *poslije izvođenja* radova. Utvrđuju se svojstva izvedenog asfaltnog sloja, a provode se u okviru *Izvođačke* kontrole kvalitete (“tekuća kontrola”) i u okviru *Investitorske* kontrole kvalitete (“kontrolna ispitivanja”).

Kontrola i osiguranje kvalitete sastava i svojstava ***sastavnih materijala*** (punilo, agregat, bitumen i bitumenska emulzija) obuhvaća sljedeće:

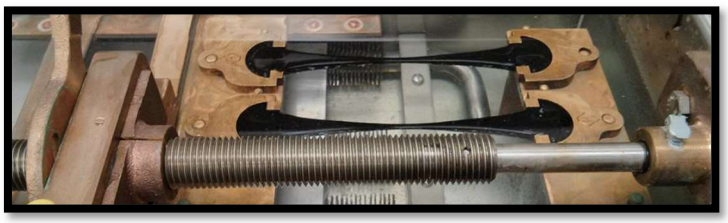
- *Punilo:*
  - granulometrijski sastav
  - kvaliteta sitnih čestica
  - šupljine suhozbijenog punila po Rigdenu
  - udio vode dodanog punila
  - topljivost punila u vodi.

- *Agregat:*
  - granulometrijski sastav
  - udio sitnih čestica (muljevitost)
  - kvaliteta sitnih čestica
  - indeks oblika
  - uglatost zrnja
  - petrografska analiza
  - otpornost na predrobljavanje (LA)
  - otpornost na poliranje (PSV), Slika 33.



***Slika 33. Uzorci agregata za utvrđivanje PSV-a***

- *Bitumen:*
  - penetracija na 25°C, (0,1 mm)
  - točka razmekšanja – PK, (°C)
  - točka loma po Frassu, (°C)
  - elastični povrat (PmB) na 25 °C, (%)
  - otpornost na otvrdnjavanje – starenje bitumenskog veziva (skladištenje i proizvodnja asfalta):
    - zadržana penetracija, (%)
    - porast/pad točke, (°C)
    - elastični povrat (PmB) na 25 °C, (%), Slika 34.



***Slika 34. Duktilometar za utvrđivanje elastičnog povrata*** *[47]*

- *Bitumenska emulzija:*
  - polaritet čestica: pozitivan (+)kationske ili negativan (-)anionske
  - udio veziva, (% (*m*/*m*))
  - stupanj stabilnosti: (stabilne, polustabilne i nestabilne)
  - izdvojeni bitumen:
    - penetracija na 25°C; (0,1 mm)

- točka razmekšanja – PK, (°C)
- elastični povrat (PmB) na 10°C, (%)
- energija kohezije (PmB), (J/cm$^2$).

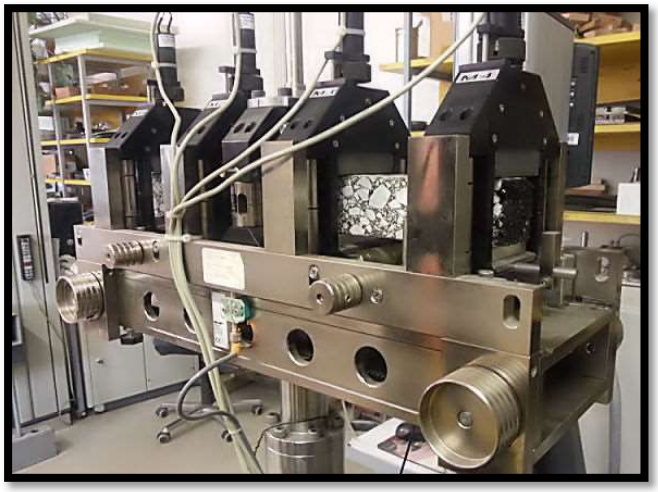
Kontrola i osiguranje kvalitete ***bitumenske mješavine / asfaltnog uzorka*** provodi se na sljedeći način:

- Određivanje sastava (postupkom ekstrakcije bitumenske mješavine – odvajanje veziva od kamena u otapalu (Slika 35) ili spaljivanjem veziva s agregata) kojima se utvrđuje:
  - *granulometrijski sastav*; (% (*m*/*m*)) – propisano granično područje odnosno granulometrijska krivulja ovisno o vrsti bitumenske mješavine
  - *udio veziva*; (% (*m*/*m*)); +/- optimalni (*$B_{min}$)+/- radni sastav*)
  - penetracija, točka razmekšanja i elastični povrat na PmB-u određuje se na bitumenu izdvojenom ekstrakcijom.




***Slika 35. Asfaltni analizator za ekstrakciju bitumenske mješavine*** *[1]*

- Određivanje piknometarske *gustoće* bitumenske mješavine i *prostorna masa* asfaltnog Marshall uzorka pripremljenog u laboratoriju. Slijedi izračun *udjela šupljina*; (% (*V*/*V*)); vrijednosti su propisane $V_{min}$ do $V_{max}$ ovisno o tipu bitumenske mješavine.
- Izračun *ispuna šupljina bitumenom, VFB* (%) – nema uvjeta ako se ispituje otpornost na kolotraženje.
- Ispitivanje svojstva *otpornosti na djelovanje vode* (omjer ITSR indirektne vlačne čvrstoće suhih i asfaltnih uzoraka zasićenih vodom) – propisane su minimalne vrijednosti u postotku (%) prema tipu bitumenske mješavine.
- U okviru fundamentalnog pristupa ispituju se: *modul krutosti, zamor i utjecaj niske temperature* na asfaltnim uzorcima pripremljenim u laboratoriju ili izvađenim iz kolnika (Slika 36).



***Slika 36. Dinamičko ispitivanje asfaltnih uzoraka*** *[48]*

- Ispitivanjem *otpornosti na kolotraženje* (Slika 37) – utvrđuje najveću brzinu deformacije $WTS_{AIR}$; (*mm/10*$^3$*ciklusa*) i najveću relativnu dubinu kolotraga $PRD_{AIR}$ (%).
- Kod splitmastiksasfalta SMA određuje se *ocjeđivanje veziva*; (%(*m*/*m*)).
- Kod poroznog asfalta PA određuje se *gubitak čestica – PL;* (%(*m*/*m*)).
- Kod lijevanog asfalta MA određuje se *dubina utiskivanja – I; (*mm); Imin-Imax propisana područja ovise o tipu bitumenske mješavine.
- *Temperatura* bitumenske mješavine propisana je kod pripreme ispitnih uzoraka, odnosno proizvodnje te kod ugradnje u asfaltni sloj i to ovisno o tipu bitumena.

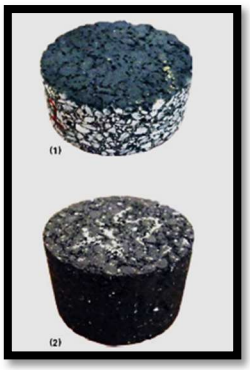


***Slika 37. Ispitivanje otpornosti na kolotraženje***

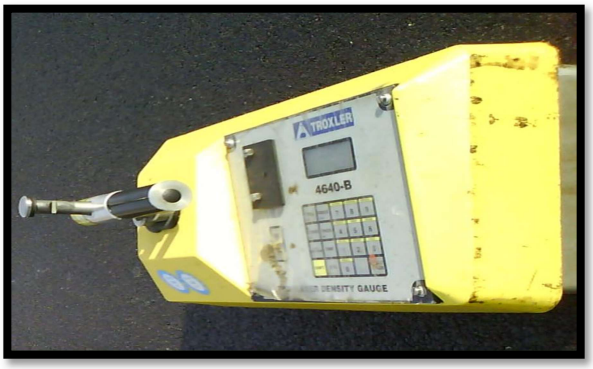
Kontrola i osiguranje kvalitete ***izvedenog asfaltnog sloja*** provodi se na slijedećem niz parametara čije su vrijednosti propisane ovisno o tipu asfaltnog sloja:

- Utvrđivanje *debljine sloja* prema HRN EN 12697-36 [49] u vrijednosti (mm); propisana su odstupanja +/- od projektirane debljine određene postupkom dimenzioniranja.
- Određivanje *prostorne mase uzorka iz kolnika* i povezivanje s prethodno određenom prostornom masom *Marshall* uzorka prema HRN EN 12697-6 [50].

- Izračun *stupnja zbijenosti sloja* iz odnosa prostorne mase (Slika 38) uzorka iz kolnika i *Marshall* uzorka ili mjerenje u kolniku uređajem (Slika 39), propisana je minimalna postotna vrijednost (%) $S_{min}$.
- Izračun *udjela šupljina u sloju* iz odnosa gustoće i prostorne mase uzorka iz kolnika, propisano je područje u postotnim vrijednostima (% (*V*/*V*)); $V_{min}$ do $V_{max}$.
- Ispitivanje *povezanosti slojeva* metodom pull/off ili Leutner metodom, propisane su vrijednosti u $N/mm^2$.
- Mjerenje *teksture* površine asfaltnog sloja, metodom pijeska, vode ili laserom, propisane su vrijednosti u milimetrima.
- Mjerenje *hvatljivosti* površine asfaltnog sloja, metodom klatna ili blokiranim kotačem, propisane su vrijednosti u SRT ili μ.
- Ispitivanjem *otpornost prema trajnoj deformaciji* metodom kolotraženja određuju se parametri *WTS i PRD*; isto kao i kod ispitivanja bitumenske mješavine propisane su vrijednosti.
- *Uzdužna (ne)ravnost* mjeri se metodom letve u mm ili profilomjerom u parametru IRI (eng. *international roughness index*) iskazanom u m/km.
- *Poprečna (ne)ravnost / kolotrazi* na kolnicima u eksploataciji mjeri se metodom letve u mm ili profilomjerom u milimetrima.
- *Visina sloja, poprečni pad i položaj* izvedenog asfaltnog sloja provjeravaiu se mjerenjem odgovarajućim geodetskim instrumentima i metodama.




***Slika 38. Uzorci iz sloja (1) i laboratorija (2)***




***Slika 39. Uređaj za mjerenje gustoće sloja***

Kontrola i osiguranje kvalitete ***površinske obrade*** *i* ***tankoslojne asfaltne prevlake izvedene po hladnom postupku*** provode se ispitivanjima na nizu sljedećih parametara:

- Na vezivu *bitumenske emulzije* utvrđuje se:
  - ostatak na situ 0,5 mm (%(*m*/*m*))
  - ostatak na situ 0,5 mm – 7 dana skladištenja (%(*m*/*m*))
- Na *izvedenom sloju* utvrđuje se:
  - (makro)tekstura; (mm)
  - kohezija veziva; (J/cm2)
  - vizualna procjena nedostataka – VAD
  - karakteristike razastiranja veziva (SD) – odstupanja (%)
  - karakteristike razastiranja agregata (SD) – odstupanja (%)
  - prianjanje veziva/agregata – ploča VIALIT (adhezivnost).

***Investitorska kontrola kvalitete na isteku jamstvenog roka*** (dvije ili pet godina), provodi postupak utvrđivanja svojstava vozne površine asfaltnog kolnika. Ispitivanja se provode dva mjeseca prije isteka jamstvenog roka, a provjeravaju se izmjerene vrijednosti svojstva u odnosu na propisane kod izvođenja. Dozvoljena odstupanja definirana su Tehničkim propisom [37]:

- *hvatljivost* – klatnom u SRT vrijednostima
- *poprečna ravnost* – kolotrazi u milimetrima
- *uzdužna ravnost* – iskazana indeksom neravnosti $IRI_{100}$ u jedinici m/km
- *pukotine* iskazane u m'/1000 $m^2$.

### 5.4. Svojstva vozne površine kolnika

Karakteristike vozne površine kolnika utvrđuju se ispitivanjem svojstva hvatljivosti, teksture, uzdužne i poprečne ravnosti, bučnosti, raspucalosti (pukotine) i evidentiranjem ostalih površinskih oštećenja kolnika. Za utvrđivanje pojedinog svojstava vozne površine koriste se standardizirani uređaji i metode.

- *Hvatljivost*
  - Točkasto i statičko mjerenje hvatljivosti *klatnom* (eng. *Pendlum)* (Slika 40) sukladno HRN EN 13036-4 [51], a rezultati mjerenja se iskazuju parametrom SRT (eng. s*kid resist test)* jedinica. Uvjeti za parametar SRT prema *Tehničkim uvjeti za asfaltne kolnike* (TU) [36], nalaze se u Tablici 6.

***Tablica 6. Propisane vrijednosti hvatljivosti u SRT-u*** *[36]*

| Svojstvo vozne površine | Ispitna norma HRN EN | Kategorija agregata AG4 | Kategorija agregata AG3 | Kategorija agregata AG2 | Kategorija agregata AG1 |
|---|---|---|---|---|---|
| Hvatljivost | 13036-4 | ≥ 45 (AC) | ≥ 50 (AC) | ≥ 52 (AC) | ≥ 55 (AC, BBTM, SMA, PA) |




***Slika 40. Uređaj klatno za mjerenje hvatljivosti***

- Kontinuirano i dinamičko mjerenje hvatljivosti provodi se uređajima prema načelu blokiranog kotača (ovisno o kutu). Rezultat mjerenja iskazan je u koeficijentu trenja μ (Slika 41). Kriteriji (prema COST [52] – European Cooperation in Science and Technology) su SFC prema načelu bočnog trenja mjernog kotača i LFC prema načelu tangencionalnog trenja mjernog kotača (uvjeti su iskazani koeficijentom trenja μ i nalaze se u Tablici 7).

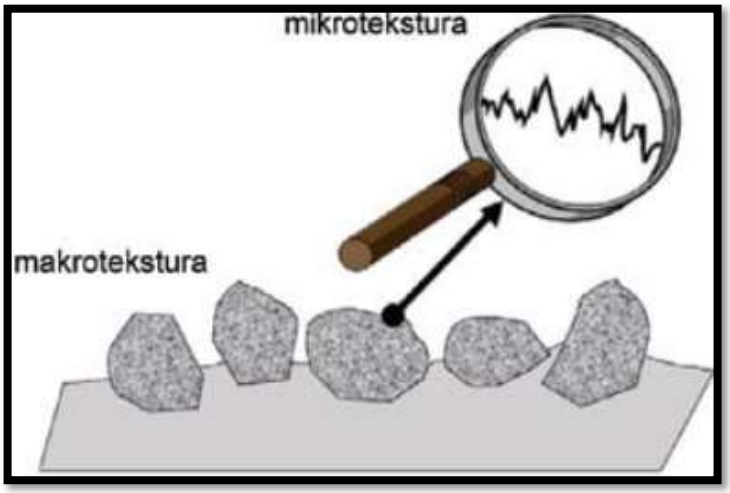
***Tablica 7. Propisane vrijednosti hvatljivosti u koeficijentu trenja μ*** *[52]*

| **Razred** | **Otpor klizanju** | **SFC** (60km/h) | **LFC** (50km/h) |
|---|---|---|---|
| vrlo dobar | 0-1 | 0,64 – 0,58 | 0,67 – 0,60 |
| dobar | 1-2 | 0,64 – 0,52 | 0,60 – 0,53 |
| prihvatljiv | 2-3 | 0,52 – 0,47 | 0,53 – 0,46 |
| loš | 3-4 | 0,47 – 0,41 | 0,46 – 0,38 |
| vrlo loš | 4-5 | 0,41 – 0,35 | 0,38 – 0,31 |




***Slika 41. Uređaji za mjerenje hvatljivosti Greptester*** *(lijevo)* ***i Skidometar*** *(desno)*

- *Tekstura*
  Razlikujemo (Slika 42) mikroteksturu koja ovisi o površini zrna agregata i makroteksturu koja se odnosi na raspored zrna agregata u voznoj površini.




***Slika 42. Mikrotekstura i makrotekstura vozne površine*** *[53]*

- Točkasto i statičko mjerenje teksture izvodi se: metodom pijeska (Slika 43) odnosno volumometrijski sukladno HRN EN 13036-1 [54], a iskazuje se izračunom MTD – srednja dubina teksture / *Mean Texture Depth* (mm). Formula (2) je:

$$\mathrm{MTD} = \frac{4\mathrm{V}}{\pi \mathrm{D}^2} \qquad (2)$$

  V je volumen uzorka pijeska, a D je prosječan promjer kružne površine.
  Koristi se i metoda mjerenja brzine istjecanja vode pomoću uređaja *outflow meter* i uređaja CTM – *circular texture meter*.
  Uvjeti MTD – tekstura u milimetrima prema TU [36], nalaze se u Tablici 8.

***Tablica 8. Propisane vrijednosti teksture prema TU*** *[36]*

| Svojstvo vozne površine | Ispitna norma HRN EN | Tip asfalta AC 11 | Tip asfalta SMA 8 / SMA 11 i 16 | Tip asfalta BBTM 8 / BBTM 11 | Tip asfalta PA 8 / PA 11 i 16 |
|---|---|---|---|---|---|
| Tekstura (mm) | 13036-1 | ≥ 0,35 | ≥ 0,5 / 0,6 | ≥ 0,6 / 0,8 | ≥ 0,7 / 0,9 |



***Slika 43. Određivanje teksture metodom pijeska***

- Kontinuirano i dinamičko mjerenje teksture izvodi se pomoću visokofrekventnog lasera (62,5 kHz), Slika 44. Uvjeti MTD – tekstura u milimetrima prema COST [52], vrijednosti se nalaze u Tablici 9 zasebno za autoceste AC i državne ceste DC te županijske ceste ŽC.

***Tablica 9. Propisane vrijednosti teksture prema COST-u*** *[52]*

| **Razred** | **Makrotekstura** | **MPD (mm)** za **AC** i **DC** | **MPD (mm)** za **ŽC** |
|---|---|---|---|
| vrlo dobar | 0-1 | 1,25 – 1,06 | 1,01 – 0,87 |
| dobar | 1-2 | 1,06 – 0,87 | 0,87 – 0,72 |
| prihvatljiv | 2-3 | 0,87 – 0,68 | 0,72 – 0,58 |
| loš | 3-4 | 0,68 – 0,49 | 0,58 – 0,43 |
| vrlo loš | 4-5 | 0,49 – 0,30 | 0,43 – 0,29 |




***Slika 44. Određivanje teksture pomoću lasera***

- *Ravnost* vozne površine određuje se na objektivan način u funkciji indeksa ravnosti IRI (eng. *international roughness index*). U postupku ocjene ravnosti u sklopu *AASHO Road Test* dobivena su dva parametra: PSR (eng. *present serviceability rating*) – PSR = 5 $e^{-0,26(IRI)}$ i PSI (eng. *present serviceability index*). PSI izračunava se uvrštavanjem u izraz: SV (promjena nagiba u uzdužnom smjeru), C (postotak ispucanih dijelova površine), P (postotak dijelova površine na kojima su potrebni ili su izvršeni popravci) i RD (dubina kolotraga). Korelacija PSI i IRI prema Formuli (3).

$$PSI = 5.03 - 1.91\, log(1 + SV) - \ 0.01\sqrt{C + P} - \ 1.38\, RD^2$$

PSI = 5 – IRI/100 (korelacija je između PSI i IRI) (3)

  - Mjerenje ravnosti provodi se:
    - letvom duljine 3 metra sukladno HRN EN 13036-7 [55], u milimetrima se dobije inicijalni podatak o ravnosti sloja točkastim mjerenjem (Slika 45 lijevo)
    - Hodajućim profilomjerom (eng. w*alking profiler)* sukladno australijskoj normi za postupak mjerenja AGPT/T450 utvrđuje se indeks IRI (Slika 45 desno) u jedinici m/km.



***Slika 45. Mjerna letva** (lijevo) **i Hodajući profilomjer** (desno)*

    - Inercijalnim profilomjerom jednim laserom tipa LaserProf (Slika 46) ili pomoću više lasera (mjerna greda) utvrđuje se indeks uzdužne ravnosti IRI.



***Slika 46. Uređaj LaserProf***

- *Poprečna ravnost* iskazuje se dubinom kolotraga u milimetrima, a mjeri se inercijalnim profilomjerom sukladno HRN EN 13036-6 [56]. Koristi se *mjerna greda* s laserima 16 kHz u području kolotraga i jedan ili dva visokofrekventna 62,5 kHz za teksturu, a ostali su za uzdužnu ravnost (Slika 47).



***Slika 47. Mjerna greda shematski** (lijevo) **i Inercijalni profilograf** (desno)*

- *Bučnost* vozne površine kolnika utvrđuje se mjerenjem pojedinačnog vozila u mirovanju i u kretnji te mjerenjem prometnog toka mikrofonima i kamerama (Slika 48).



***Slika 48. Mjerenje bučnosti prometnog toka***

- *Raspucalost (pukotine)* i *površinska oštećenja* kolnika utvrđuju se detektorima u sklopu automatskog analizatora poput uređaja ARAN, zatim vizualnim evidentiranjem prema

katalogu oštećenja (hodanjem ili u vožnji) te snimanjem infraspektralnim ili laserskim kamerama u analognom ili digitalnom zapisu.

- Mjerenje svojstva vozne površine kolnika *nizom uređaja na jednom mjernom vozilu* (Slika 49):
  - automatsko otkrivanje i odabir pukotina
  - uzdužni profil za određivanje ravnosti kolnika iskazane indeksom IRI
  - poprečni profil za utvrđivanje dubine kolotraga u voznoj površini kolnika
  - uzdužni i poprečni nagib odnosno geometrija kolnika
  - tekstura vozne površine
  - hvatljivost (trenje) površine kolnika
  - stanje i veličina oštećenja kolnika
  - videozapis za katastar cesta
  - svjetlosne značajke horizontalne signalizacije kolnika
  - stacionaže kolnika i GPS koordinate ceste
  - oznake pored kolnika i na raskrižjima.



***Slika 49. Mjerno vozilo za mjerenje niza svojstava kolnika***

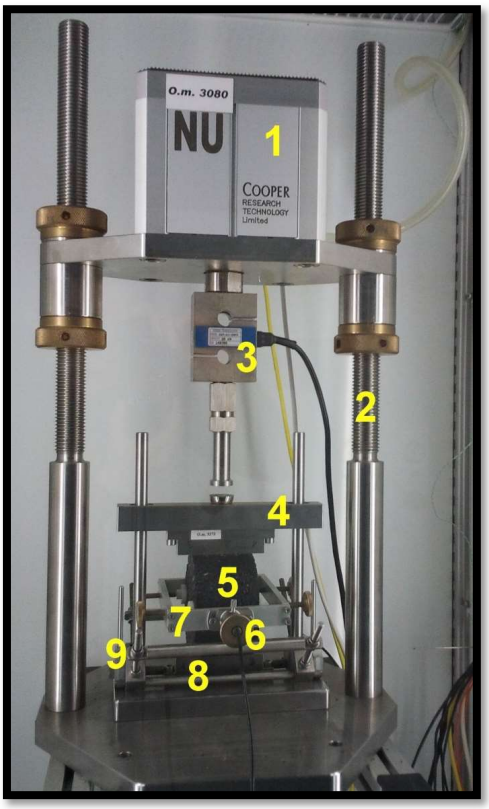
### 5.5. Modul krutosti asfalta

Krutost asfalta S odnos je naprezanja (simulacija prometnog opterećenja) σ i deformacije ε asfaltnog uzorka koja ovisi o trajanju opterećenja t i temperaturi ispitivanja T: $S(t,T)=\sigma/\varepsilon$. Utvrđuje se metodom indirektnog vlačnog ispitivanja ITT (eng. *indirect tensile test*). Krutost asfaltne mješavine ovisi o sastavu i fizikalno-mehaničkim svojstvima: šupljine u sloju zaustavljaju napredovanje mikropukotina i omogućavaju širenje asfalta na visokim temperaturama, razina krutosti može se održati dobrom preraspodjelom čestica punila, a na krutost asfaltne mješavine utječu puzanje, starenje bitumena i njegova topivost, te debljina bitumenskog filma oko zrna agregata. Kompleksnost ponašanja asfalta povećava se sa heterogenošću komponenata, bitumen utječe na viskoelastična svojstva, a zrna agregata na elastična i plastična svojstva asfalta. Način ponašanja asfalta ovisi o vremenu opterećenja i temperaturi na kojoj je naneseno opterećenje te količini vlage. [57]
Modul krutosti asfaltnih mješavina može se mjeriti na više načina. Sukladno normi HRN EN 12697-26 [58], najčešće se upotrebljava indirektno vlačno ispitivanje (prema dodatku C) – ITT.

Prednost indirektnog vlačnog ispitivanja su dimenzije uzoraka jednake Marshallovim uzorcima (⌀=100mm) jer se mogu lako proizvesti u laboratoriju ili izbušiti iz kolnika.
Rezilijentni modul omjer je ponavljanog naprezanja i povratne (rezilijentne) relativne deformacije, uslijed kratkotrajnog cikličkog opterećenja koje odgovara opterećenju kotača vozila u pokretu, izračun prema Formuli (4).

$$S_m = \frac{F \times (\nu + 0{,}27)}{(z \times h)} \qquad (4)$$

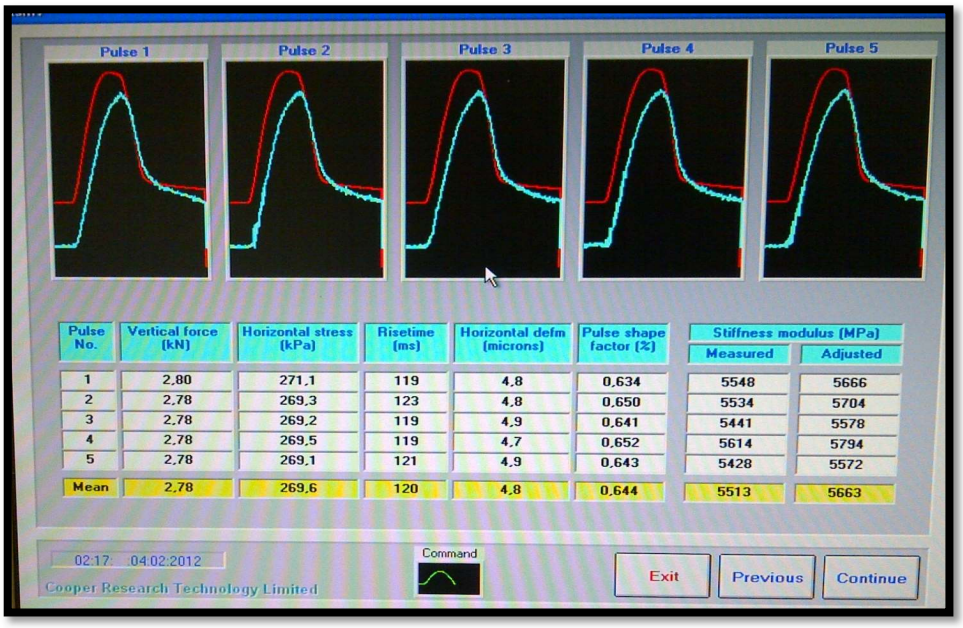
Gdje je:
***Sm*** – rezilijentni modul u *MPa* odnosno modul krutosti
***F*** – vršna vrijednost primijenjenog vertikalnog opterećenja u (*N - Newton*)
***z*** – amplituda horizontalne deformacije postignuta tijekom ciklusa opterećenja (mm)
***h*** – srednja vrijednost debljine uzorka (mm)
***v*** – Poissonov koeficijent.
Dijelovi uređaja za indirektno vlačno ispitivanje (Slika 50) su: pneumatski impulzator opterećenja (1), čelični okvir za opterećivanje (2), uređaj za prijenos opterećenja (3), gornja prizma za opterećivanje uzorka (4), ispitni uzorak asfalta (5), vijci za podešavanje (6) LVDT (linearno varijabilno diferencijalno osjetilo), nosivi okvir LVDT (7), donja prizma za opterećivanje uzorka (8) i čeljust za postavljanje LVDT okvira (9).




***Slika 50. Uređaj za ispitivanje modula krutosti*** [1]

Vrijednosti modula krutosti asfaltnih mješavina ovise o temperaturi ispitivanja koja se prilagođava uvjetima u eksploataciji, pa su uobičajene temperature ispitivanja na 5°C, 15°C, 25°C i 35°C. U sklopu postupka ispitivanja u računalni program unose se ulazni podaci (dimenzije ispitnog uzorka i temperatura ispitivanja), zatim slijedi podešavanje asfaltnog uzorka u uređaju (programsko praćenje i potvrđivanje), a nakon provedenog ispitivanja izlazni

podatak je rezultat modul krutosti Sm u MPa. Na Slici 51 je grafički prikaz pet cikličkih ispitivanja s utvrđenim parametrima i izračun vrijednosti modula krutosti.




***Slika 51. Rezultati ispitivanje modula krutosti***

Metodom indirektnog vlačnog ispitivanja (ITT) na osnovu utvrđenog modula krutosti primjenjuje se postupak optimiziranja sastava i svojstva asfaltne mješavine. Prilikom dimenzioniranja uporabom izmjerenih modula izračun će biti bliže stvarnom ponašanju asfaltnih kolničkih konstrukcija u eksploatacijskim uvjetima. Metoda ITT treba biti sastavni dio postupka strukturnog projektiranja i sustavne kontrole kvalitete izvođenja i održavanja asfaltnih kolnika.

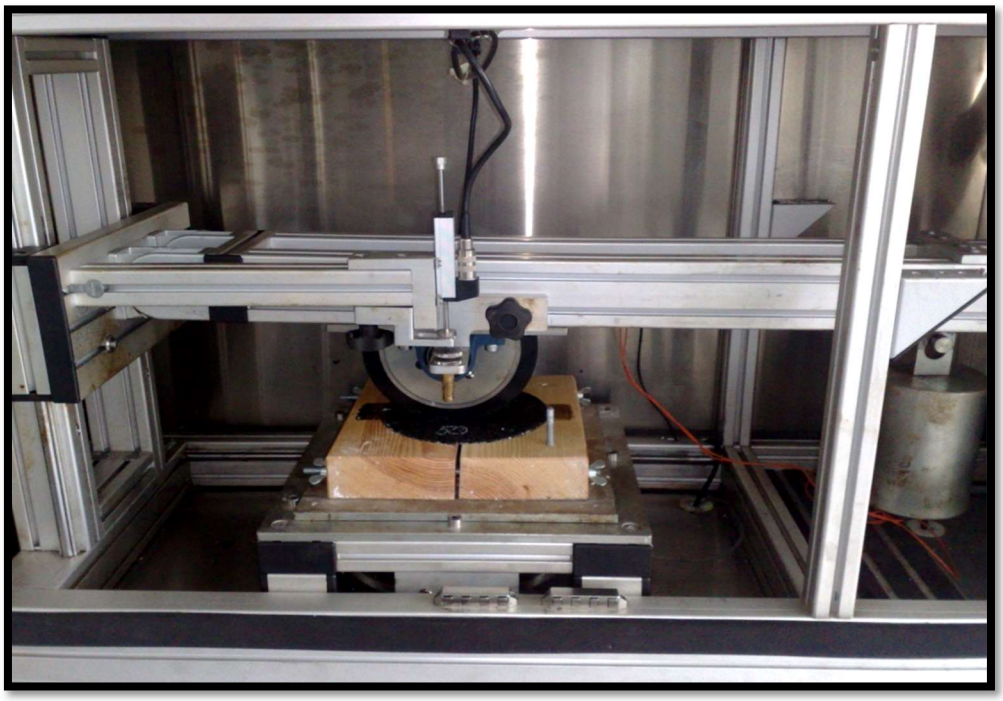
### 5.6. Otpornost asfalta na pojavu kolotraženja

Poprečnu ravnost vozne površine kolnika utvrđujemo mjerenjem dubine kolotraga, a iskazuje se u milimetrima.
Uzroci kolotraženja asfaltnog sloja su:

- plastično tečenje, ulegnuće uslijed posmične deformacije u asfaltu
  - visoki udio bitumena i neodgovarajući (mekši nisko viskozan) tip veziva u bitumenskoj mješavini
  - loša granulometrija i nepovoljan oblik zrna agregata
  - visoka temperatura i vlaga tijekom eksploatacije
- konsolidacija slabo zbijenog sloja (visok udio šupljina) – slijeganje.

Otpornost asfalta na trajnu deformaciju u obliku kolotraga ispituje se sukladno normi HRN EN 12697-22 [59]. Ispitivanje se provodi opterećenjem kotača na asfaltnu površinu i iznosi 700 N, duljina mjerne putanje kotača na kojoj se registrira kolotrag iznosi 230 mm. Frekvencija nanošenja opterećenja kotača na asfalt je 26,5 prijelaza po minuti, temperatura ispitivanja tijekom ciklusa kolotraženja kao i prethodno temperiranog ispitnog uzorka iznosi $60^0$C. Kompletan postupak kolotraženja obuhvaća 20.000 prijelaza ispitnog kotača.

Otpornost asfalta na trajnu deformaciju u obliku kolotraga ispituje se uređajem *wheel tracker*, malim uređajem prema normiranom postupku **B** na zraku (Slika 52). Ispitni uzorci su kružni ⌀200mm ili kvadratni 300x300 mm.



***Slika 52. Uređaj za ispitivanje otpornosti asfalta na kolotraženje***

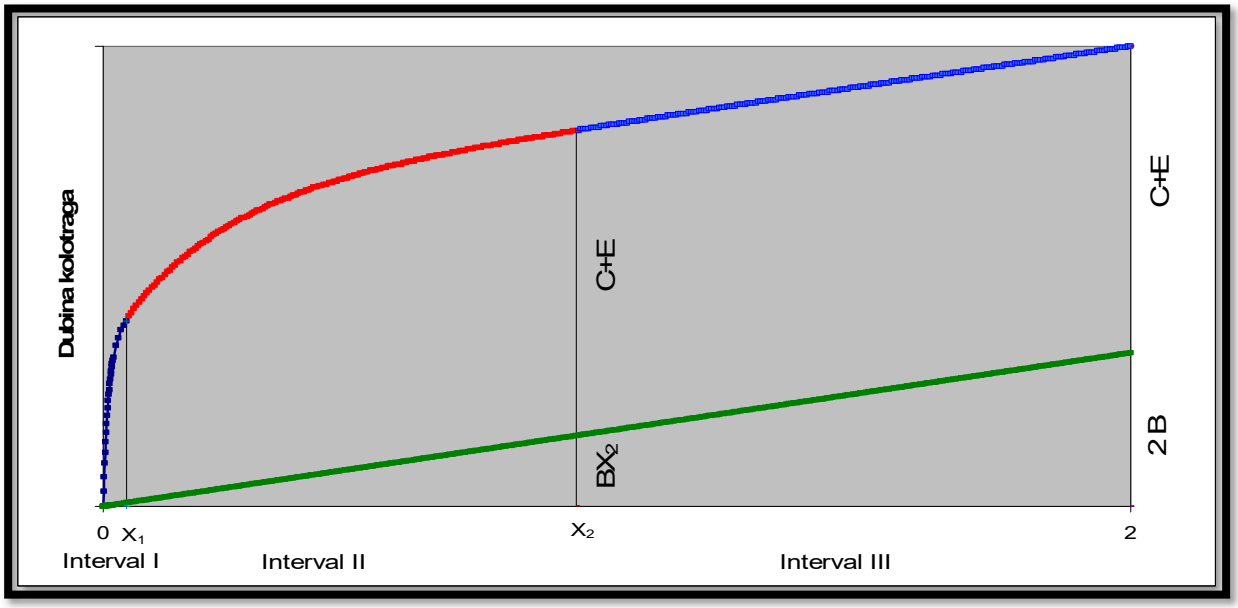
Ispitivanju trajne deformacije postupkom kolotraženja prethodi određivanje *debljine* i *prostorne mase* te izračun *udjela šupljina* ispitnog uzorka uz prethodno ispitanu *gustoću* bitumenske mješavine. Nakon učvršćivanja uzorka u kalup za ispitivanje slijedi kondicioniranje uzorka u temperaturnoj komori uređaja za kolotraženje ($60^0$C) te postavljanje kalupa s uzorkom na hodnu ploču za ispitivanje. Ispitivanje počinje postavljanjem parametara u programu za praćenje tijekom ispitnog ciklusa i puštanja uređaja u postupak kolotraženja opetovanim prolaskom ispitnog/ih kotača.
Nakon završetka ispitivanja od 20.000 prijelaza kotača, odnosno 10.000 ciklusa, iz krivulje kolotraženja očitavaju se i izračunavaju sljedeći parametri:

- maksimalna dubina kolotraga ($RD_{20000}$)
- brzina kolotraženja ($WTS_{ZRAK}$) – porast kolotraga tijekom ispitnog procesa (izračun prema Formuli (5)
- relativna maksimalna dubina kolotraga ($PRD_{ZRAK}$).

$$WTS_{ZRAK} = \frac{(RD_{20000} - RD_{10000})}{5} \tag{5}$$

Gdje je:
$\boldsymbol{WTS_{ZRAK}}$ – brzina kolotraženja u (mm/1000 ciklusa)
$\boldsymbol{RD_{20000}}$ – dubina kolotraga nakon 20000 prijelaza u (mm)
$\boldsymbol{RD_{10000}}$ – dubina kolotraga nakon 10000 prijelaza u (mm)
$\boldsymbol{h}$ – visina / debljina ispitnog uzorka u (mm)
$\boldsymbol{PRD_{ZRAK}}$ – relativna maksimalna dubina kolotraga u (%).

Krivulja kolotraženja (**y**) pojedinog ispitnog uzorka sastoji se od triju prepoznatljivih dijelova. Prvi dio krivulje (Interval **I**) karakterizira vrlo brzi prirast deformacije, zatim se postupno smanjuje (Interval **II**) te posljednji dio krivulje (Interval **III**) karakterizira linearan prirast deformacije (Slika 53).




***Slika 53. Krivuja kolotraženja asfaltnog uzorka*** [57]

### 5.7. Prionjivost i povezanost asfaltnih slojeva

Povezanost **μ** završnog sloja kolnika s veznim i/ili nosivim asfaltnim slojem ima izravan utjecaj na ponašanje asfaltnog kolnika. Pri proračunu naprezanja u višeslojnim sustavima usvojene su dvije pretpostavke – *potpune povezanosti* između slojeva (μ=100%) ili *nema povezanosti* između slojeva (μ=0%), a realno stanje u kolničkoj konstrukciji djelomična je povezanost između slojeva sustava (0%<μ<100%).
Metoda za ispitivanje čvrstoće prionjivosti (eng. *pull-off*) prema HRN EN 13596 [60] za asfaltne slojeve kolnika provodi se uređajem *pull-off (*Slika 54).




***Slika 54. Pull-off uređaj za ispitivanje prionjivosti asfaltnog sloja***

Postupak ispitivanja povezanosti sastoji se od sljedećih faza: bušenja kroz sloj asfalta (kruna Φ=50 mm), lijepljenja ispitnog čepića te ispitivanja čvrstoće prionjivosti.
Tijekom eksploatacije pod djelovanjem prometnog opterećenja i temperaturnih oscilacija smanjuje se vrijednost posmika (povezanost) između asfaltnog sloja i podloge.
Za kvantitativno određivanje povezanosti slojeva služi metoda smicanja kod koje se dobiva sila u ravnini smicanja između slojeva asfalta. Laboratorijska metoda za ispitivanje povezanosti asfaltnih slojeva je standardizirana Njemačka metoda Leutner, koja je prihvaćena slovenskom specifikacijom TSC 06.753 [61].
Maksimalna sila smicanja (**F**) i pripadajuća posmična deformacija (**ε)** ovise o nizu čimbenika povezanosti slojeva (**P**) u N/mm$^2$: teksturi površine između završnog sloja i podloge, vrsti i količini sredstva za povezivanje (bitumenska emulzija) te veličini zrna u asfaltnom sloju.
Ispitna metoda koristi čeljust pripadnog promjera Φ=150 ili Φ=100 mm koja se montira na prešu Marshall (Slika 55). Ispitivanje se može provoditi osim na Mashall uzorcima i na izbušenim jezgrama Φ=100 mm iz izvedenog kolnika.




***Slika 55. Marshall preša za ispitivanje povezanosti asfaltnog sloja***

## 6. KRITERIJI RAVNOSTI VOZNE POVRŠINE KOLNIKA

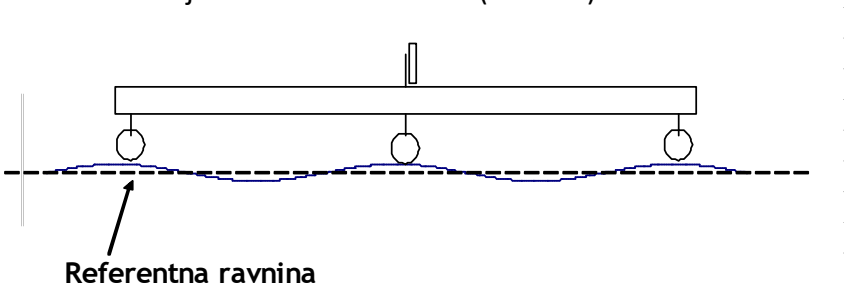
Uzdužna ravnost vrlo je bitan pokazatelj stanja služnosti kolnika ceste. Moderne cestovne prometnice zahtijevaju objektivnu ocjenu pokazatelja udobnosti vožnje, a regulativa u području cestogradnje treba definirati jednoznačne kriterije uzdužne ravnosti kolnika. Razina ravnosti vozne površine u eksploataciji ima utjecaj na: *korisnika* – vozača/putnika sa aspekta udobnosti i/ili *vlasnika vozila* vezano za trajnost dijelova i troškova servisa, te *investitora* – *vlasnika ceste* u pogledu troškova građenja i održavanja, odnosno gospodarenja kolnikom i cestovnom infrastrukturom u cjelini.

### 6.1. Mjerni uređaji za mjerenje ravnosti

Za utvrđivanje uzdužne ravnosti postoji niz uređaja koji su se koristili prije suvremenog načina mjerenja hodajućim elektroničkim i inercijalnim profilografima, ali zbog jednostavnosti za točkasto mjerenje uzdužne ravnosti koristi se mjerna letva.

a) *Mjerna letva* – dužine 3 metra (norma HRN EN 13036-7 [56]), koristi se pri izradi radnih spojeva i za utvrđivanje inicijalne ravnosti tijekom izvođenja ili stanja vozne površine kolnika u eksploataciji, te za aerodromske površine s betonskim kolnikom.

b) *Kotrljajuća greda HI-LO detektor* mjerna je greda duljine 4 metra oslonjena svojim krajevima na male kotače, a u sredini je mjerni kotač. Kao parametar ravnosti izračuna se indeks ravnosti (IR) na osnovu odstupanja mjerne skale koja je povezana s mjernim kotačem, te ručno evidentiranje vrijednosti. Bitne pogreške javljaju se kod neravnosti mjerne površine valova dužine oko 4 metra jer su izmjerene duplicirane amplitude, a kod valova dužine oko 2 metra izmjeri se idealna ravnost (Slika 56).



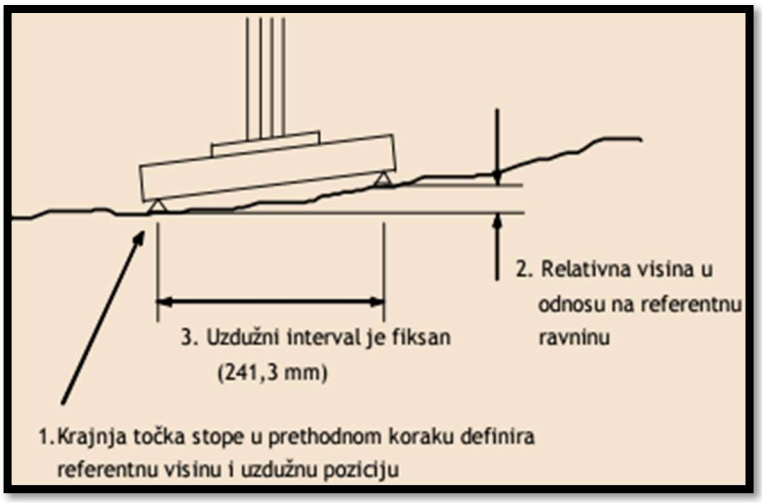

***Slika 56. Skica kotrljajuće grede HI-LO detektor*** [1]

c) *Bump integrator* je jedno-osovinska prikolica s mjernim kotačem i masivnim metalnim okvirom koji predstavlja referentnu ravninu (Slika 57). Uređaj nema mogućnost mjerenja geometrije profila već mjeri dinamičku reakciju vozila na neravnost površine kolnika tako da nakon izvršenog mjerenja ne postoje podaci o amplitudama. Nedostatak uređaja *bump integratora* je različitost mjernih elemenata (krutost opruga, viskoznost amortizera, odnos balastne mase i mase kotača s osovinom i ostalo) te neusporedivost dobivenih rezultata indeksa ravnosti (R) na globalnoj razini.



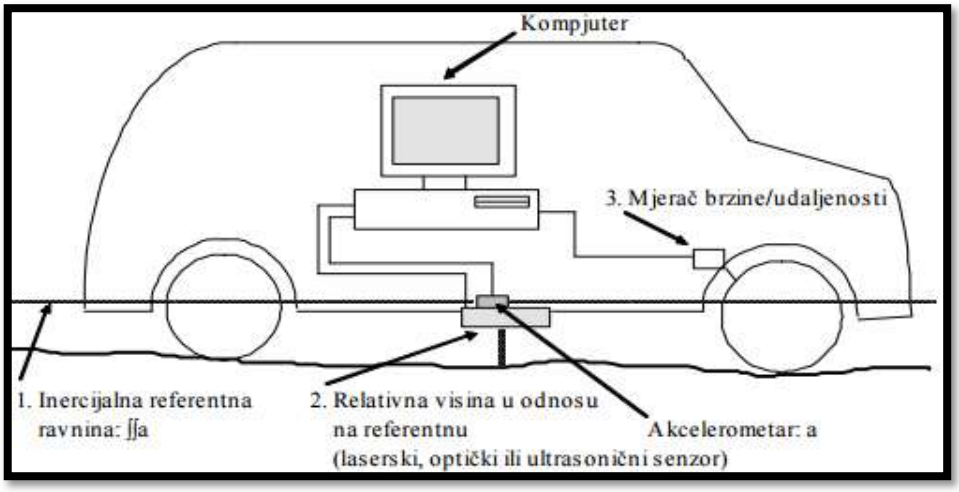
***Slika 57. Bump Integrator***

d) *Hodajući elektronički profilomjer* (eng. w*alking profiler):* glavni dio uređaja je metalna stopa duljine 241,3 mm (Slika 58), a mjerenje se provodi naizmjeničnim polaganjem stope duž profila kolnika. Za svaki novi korak uređaja, program računa novu referentnu visinu uvećanu za relativnu visinu prethodnog koraka. Relativna visina računa se iz nagiba stope (kuta) prema okomici i poznate duljine mjerne stope. Rezultat mjerenja uzdužni je profil s utvrđenim točkama na razmaku od 241,3 mm.




***Slika 58. Mjerna stopa hodajućeg profilomjera*** *[1]*

e) *Inercijalni profilomjer* vrši snimanja mjernog profila brzinom od 30 do 150 km/h. Ugrađeni akcelerometar bilježi okomito ubrzanje mjernog vozila. Podaci o okomitom ubrzanju vozila definiraju inercijalnu referentnu ravninu (položaj akcelerometra), a senzor (laser/i) mjeri udaljenosti od akcelerometra do profila vozne površine kolničke konstrukcije (Slika 59). Profilomjeri tijekom mjerenja utvrđuju i pohranjuju podatke o uzdužnom mjernom profilu i poprečnom profilu uz zemljopisni (GPS) položaj i video zapis.




***Slika 59. Skica inercijalnog profilomjera*** *[1]*

### 6.2. Međunarodni indeks ravnosti - IRI

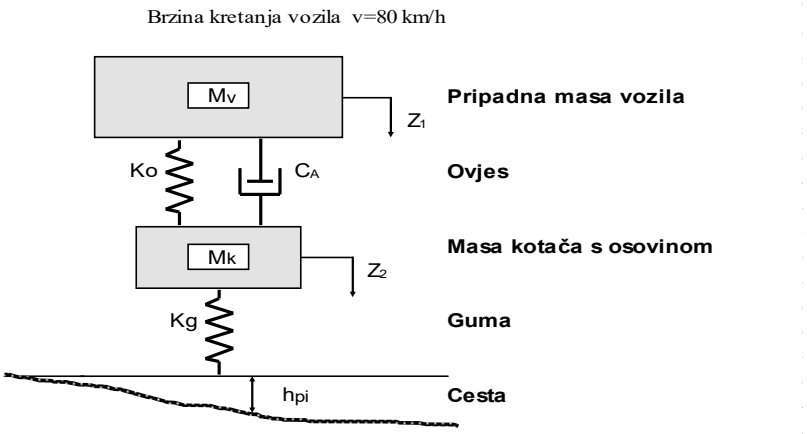
Ovo je najzastupljeniji pokazatelj uzdužne ravnosti i stanja kolnika jer predstavlja varijablu realnog profila vozne površine, izmjerenog bilo kojim suvremenim profilomjerom (hodajućim, WP ili inercijalnim, IP). Nakon mjerenja vozne površine slijedi postupak filtriranja interpolacija mjernog profila kod laserskog snimanja. Razmak točaka promjenjiv je, odnosno može se odabrati najprikladniji.
Normizacija u području ravnosti vozne površine – mjerenja profila vozne površine:

- ASTM E 950-98(04) [62] – mjerenje inercijalnim profilomjerom
- HR EN 13036-6 [55] – mjerenje poprečnog i uzdužnog profila vozne površine u području valova ravnosti i megateksture
- HR EN 13036-7 [56] – mjerenje neravnosti mjernom letvom.

Metode proračuna pokazatelja uzdužne ravnosti:

- ASTM E 1926-98 [63] – proračun međunarodnog indeksa *(IRI)* i
- EN 13036-5 [64] – određivanje pokazatelja uzdužne neravnosti, dio norme a) Proračun međunarodnog indeksa ravnosti, IRI.

Proračun indeksa ravnosti, IRI, temelji se na ISO/EN normiranom matematičkom modelu (Slika 60) četvrtine putničkog vozila (eng. *quarter car model – golden car*).




***Slika 60. Normirani matematički model četvrtine vozila*** *[1]*

Gdje je:
**Mv** – masa vozila koju nosi jedan kotač
**Mk** – masa kotača s gumom i polovice osovine/ovjesa
**Ko** – koeficijent elastičnosti opruge ovjesa
**Kg** – koeficijent elastičnosti opruge koja predstavlja pneumatik
$\mathbf{C_A}$ – koeficijent viskoznosti amortizera
***hpi*** *– visina izravnanog (filtriranog) profila.*

**IRI** (eng. international roughness index) dobiva se sumiranjem razlika pomaka mase vozila koju nosi jedan kotač ($\mathbf{z_1}$) te mase kotača s pneumatikom i polovinom ovjesa ($\mathbf{z_2}$) normaliziranih po duljini mjernog profila **L** (m) u vremenu (dt).
Matematički izraz prema Formuli (6) međunarodnog indeksa ravnosti je:

$$\mathbf{IRI = 1/L \sum | \dot{z}1 - \dot{z}2 | dt} \quad \text{(m/km)} \qquad (6)$$

$\mathbf{\dot{Z}_1}$ – okomita brzina pripadne mase vozila (**Mv**)
$\mathbf{\dot{Z}_2}$ – okomita brzina mase kotača s osovinom (**Mk**)

Čimbenici koji utječu na ravnost vozne površine kolnika su donji nosivi slojevi kolničke konstrukcije i podloga te tip asfaltnog kolnika (jednoslojni ili dvoslojni ili troslojni). Kod asfaltnih kolnika na cestovnim objektima (mostovi, vijadukti) bitna je neravnost površina nosivih kolničkih ploča objekta i tanki asfaltni zaštitni (izravnavajući) sloj hidroizolacije.

Prekidi u voznoj površini kolnika, poklopci revizijskih okana, rešetke slivnika te prijelazne dilatacijske naprave (ugradnja prije ili nakon asfaltiranja) izravno utječu na razinu ravnosti. Postupci tijekom asfaltiranja, proizvodnja asfalta (granulometrija i fizikalno-mehanička svojstva), kontinuirana ugradnja pri optimalnim temperaturama i valjanje (Slika 61) te minimiziranje radnih spojeva (poprečnih i uzdužnih) također bitno utječu na uzdužnu ravnost ceste.




***Slika 61. Ugradnja asfaltnog sloja na autocesti***

Savezna država Virginia (SAD) ima važeće kriterije ravnosti na osnovi međunarodnog indeksa IRI. U kanadskom Quebecu od 1998. godine primjenjuje se kriterij za uzdužnu ravnost IRI ≤ 1,2 m/km (na 70% dionice) i IRI ≤ 1,4 m/km (na cijeloj dionici). Danska, Španjolska, Italija i Švedska

primjenjuju nacionalne kriterije na osnovi indeksa IRI. Slovenija ima prihvaćene tehničke specifikacije za ravnost na osnovi $IRI_{20}$ i $IRI_{100}$. U Hrvatskoj postoje uvjeti za ravnost habajućih slojeva – $IRI_{100}$: OTU/2001 EN 13036-5 (novogradnja), TU/2004 (održavanje autocesta) i Tehnički uvjeti za asfaltne kolnike [36] (HC) i EN 13036-5 [64].
Prema važećem *Pravilniku* [65] javne se ceste dijele:

- prema veličini motornog prometa (PGDP)
- prema zadaći povezivanja (državne, županijske, lokalne)
- prema projektnoj brzini, kategoriji terena i razini usluge.

Za potrebe definiranja kriterija uzdužne ravnosti indeksa **$IRI_{100}$** provedena je klasifikacija (Tablica 10) i kategorizacija javnih cesta prema obimu građevinskog zahvata na asfaltnom kolniku (Tablica 11) [66].

***Tablica 10. Klasifikacija javnih cesta** [66]*

| Klasa | Razred ceste | Razina usluge (prometni tok) | Projektna Brzina (km/h) | PGDP (vozila/dan) |
|---|---|---|---|---|
| I. | autocesta | C/D | 80-130 | više od 14000 |
| II. | državne ceste | D | 60-110 | 3000-14000 |
| III. | gradske ceste | E | 40-80 | do 7000 |

***Tablica 11. Kategorizacija javnih cesta prema obimu građevinskog zahvata** [66]*

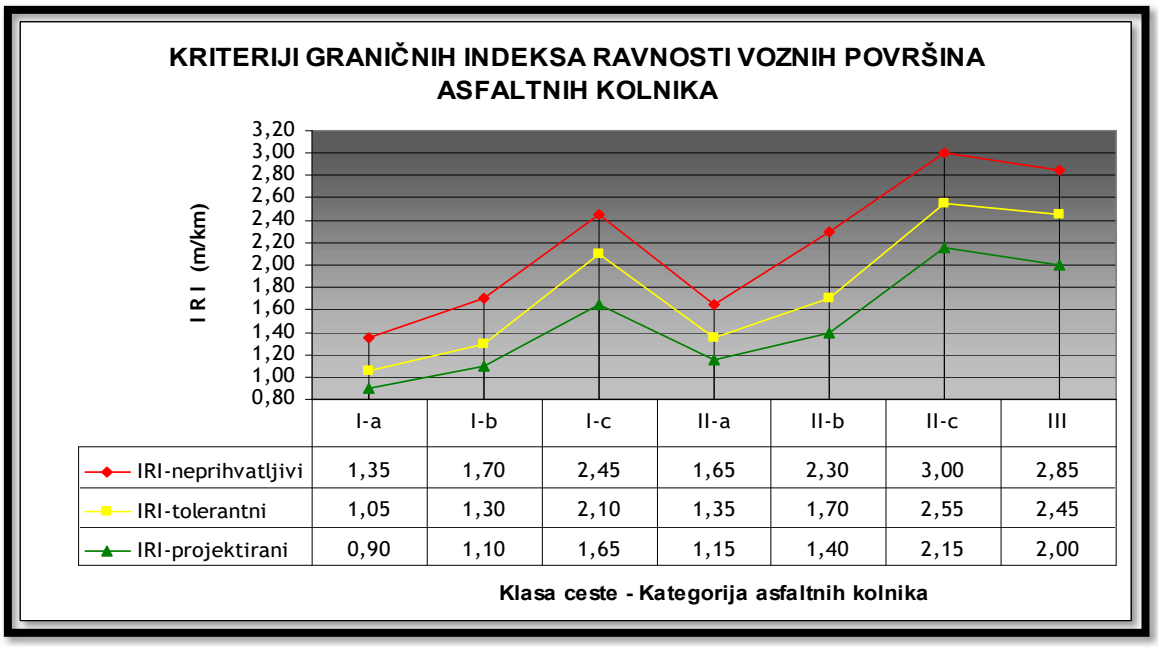
| Klasa ceste | Kategorija asfaltnog kolnika | Obim građevinskog zahvata |
|---|---|---|
| I-a | autocesta – novogradnja | - novo izvedena asfaltna kolnička konstrukcija u sklopu novogradnje autocesta (bez objekata) |
| I-b | autocesta – obnova | - novo izvedeni asfaltni slojevi u sklopu obnove kolnika autocesta (bez objekata) |
| I-c | autocesta – objekti | - novo izvedeni asfaltni kolnički zastor objekata u sklopu novogradnje i obnove autocesta |
| II-a | državna cesta – novogradnja | - novo izvedena asfaltna kolnička konstrukcija u sklopu novogradnje državnih cesta |
| II-b | državna cesta – rekonstrukcija | - novo izvedeni asfaltni slojevi u sklopu rekonstrukcije kolnika državnih cesta |
| II-c | državna cesta – nadogradnja (presvlačenje) | - novo izvedeni asfaltni slojevi u sklopu nadogradnje (presvlačenja) kolnika državnih cesta |
| III | gradske ceste | - novo izvedeni asfaltni slojevi u sklopu novogradnje i rekonstrukcije kolničkih konstrukcija gradskih cesta (prekidi) |

Na osnovi dovoljno velikog broja statistički obrađenih vrijednosti izmjerenih $IRI_{100}$ ravnosti u pojedinoj kategoriji ceste određena su područja kriterija ravnosti (Tablica 12) [66].

***Tablica 12. Kriteriji uzdužne ravnosti po kategorizacijama javnih cesta*** *[66]*

| **Klasa ceste** | **Kategorija asfaltnog kolnika** | **PROJEKTIRANI $IRI_P$** (m/km) | **TOLERANTNI $IRI_T$** (m/km) | **NEPRIHVATLJIVI $IRI_N$** (m/km) |
|---|---|---|---|---|
| I-a | AC - novogradnja | $IRI_{PAN} \leq 0,90$ | $IRI_{TAN} = 1,05$ | $1,35 \leq IRI_{NAN}$ |
| I-b | AC - obnova | $IRI_{PAO} \leq 1,10$ | $IRI_{TAO} = 1,30$ | $1,70 \leq IRI_{NAO}$ |
| I-c | AC - objekti | $IRI_{PAB} \leq 1,65$ | $IRI_{TAB} = 2,10$ | $2,45 \leq IRI_{NAB}$ |
| II-a | DC - novogradnja | $IRI_{PDN} \leq 1,15$ | $IRI_{TDN} = 1,35$ | $1,65 \leq IRI_{NDN}$ |
| II-b | DC - rekonstrukcija | $IRI_{PDR} \leq 1,40$ | $IRI_{TDR} = 1,70$ | $2,30 \leq IRI_{NDR}$ |
| II-c | DC - nadogradnja (presvlačenje) | $IRI_{PDD} \leq 2,15$ | $IRI_{TDD} = 2,55$ | $3,00 \leq IRI_{NDD}$ |
| III | gradske ceste | $IRI_{PGC} \leq 2,00$ | $IRI_{TGC} = 2,45$ | $2,85 \leq IRI_{NGC}$ |

Na autocestama zahtjevi ravnosti su najviši i očekuju se najmanji indeksi. Kriteriji ravnosti na objektima (mostovi, vijadukti) autocesta znatno su niži od onih na trasi i veće su vrijednosti indeksa IRI. Najlošije ravnosti, odnosno najveći indeksi su kod nadogradnje (presvlačenja) državnih cesta, a nešto su bolji indeksi na gradskim cestama iako one spadaju u nižu klasu javnih cesta.
Grafički prikaz graničnih kriterija uzdužne ravnosti voznih površina ovisno o klasi ceste i kategoriji asfaltnog kolnika nalazi se na Slici 62.




***Slika 62. Grafički prikaz kriterija indeksa ravnosti voznih površina kolnika*** *[66]*

Ravnost vozne površine kolnika *zadovoljavajuća* je ako je $\mathbf{IRI_{100} \leq IRI_P}$ (projektirani indeks). Ukoliko je postignuti indeks ravnosti manji od projektiranog postoji mogućnost nagrade izvođaču vozne površine kolnika.
Ako je ravnost vozne površine $\mathbf{IRI_N \leq IRI_{100}}$ ona se smatra *neprihvatljivom* za prometovanje i potrebno je sanairati vozne površine.
*Tolerantno područje* ravnosti je postignuto ako je zadovoljen sljedeći uvjet: $\mathbf{IRI_P \leq IRI_{100} \leq IRI_N}$
*I-stupanj tolerantnosti* postignut je ako je $\mathbf{IRI_P < IRI_{T\text{-}I} \leq IRI_T}$, indeks ravnosti ima blaža

odstupanja. Ona mogu, ali i ne moraju biti sankcionirana, uz sagledavanje objektivnih okolnosti izvođenja te prekida u voznoj površini, kao što su slivnici i revizijska okna te dilatacijske naprave, željezničke tračnice ili slično.

*II-stupanj tolerantnosti* $\mathbf{IRI_T < IRI_{T\text{-}II} \leq IRI_N}$, indeks ravnosti ima znatna odstupanja od projektiranih vrijednosti te se pristupa financijskom sankcioniranju izvođača vozne površine kolnika.

Definirani kriteriji prema $\mathbf{IRI_{100}}$ mogu se primijeniti i na kolnike u eksploataciji tako da vozne površine koje imaju indekse ravnosti u tolerantnom području budu obnovljene ili rekonstruirane prije nego dosegnu neprihvatljive granične vrijednosti udobnosti vožnje.

## 7. SUSTAV HIDROOZOLACIJA – ASFALTNI KOLNIK NA CESTOVNOM OBJEKTU (MOST ILI VIJADUKT)

Kolnik na mostu ili vijaduktu u posebnim je uvjetima, podloga je kruta betonska ili čelična nosiva ploča na kojoj se nalaze dva tanka asfaltna sloja od sitnozrnate asfaltne mješavine preko izvedene hidroizolacije. Iz navedenih razloga, ali i zbog većih temperaturnih oscilacija, kolnik na cestovnom objektu nalazi se u zahtjevnijoj ulozi nego na trasi ceste, stoga su svojstva i pojavnosti na voznoj površini bitno izražajnijih vrijednosti.
Sustav hidroizolacija – asfaltni kolnik (H-AK) cestovnog objekata (most ili vijadukt) čine sljedeći slojevi:

- temeljni sloj
- brtveni sloj
- zaštitni (izravnavajući) asfaltni sloj (ZSH)
- vezni asfaltni sloj (autoceste)
- završni habajući asfaltni sloj.

Kvaliteta projektiranog i izvedenog sustava H-AK izravno utječe na sljedeće:

- razinu služnosti objekta s gledišta sigurnosti (hvatljivost; kolotrazi; pukotine) i udobnosti vožnje (neravnost – IRI)
- troškove održavanja sustava i objekta (most ili vijadukt) tijekom eksploatacije – gospodarenje infrastrukturom
- uporabni vijek infrastrukturne građevine mosta, predviđeno trajanje je 100 godina.

Na hrvatskim javnim cestama najčešće se primjenjuje klasični sustav H-AK:

- dva sloja sitnozrnate asfaltne mješavine (maksimalno zrno agregata 11 ili 8 mm)
- zaštitni (izravnavajući) asfaltni sloj promjenjive debljine od 2 do 5 cm, što je iznad tehnološke debljine sitnozrnate asfaltne mješavine; stoga je kvaliteta sloja vrlo upitna, a kontrolu fizikalno-mehaničkih svojstava treba obavezno provoditi
- podloga tankim asfaltnim slojevima kruta je i neravna betonska ili čelična ploča, koja je ljeti izložena ekstremnom zagrijavanju.

Na cestovnim mostovima ili vijaduktima primjenjuju se sljedeći tipovi sustava hidroizolacija – asfaltni kolnik:

a) *Bitumenskim trakama* (Slika 63 i 64):
   a1) *Jednoslojni sustav*:
      - epoksidna smola – temeljni sloj
      - elastomerna ili plastomerna bitumenska traka – brtveni sloj
      - zaštitni sloj od lijevanog ili valjanog asfalta
      - habajući sloj od valjanog asfalta.

   a2) *Dvoslojni sustav*:
      - epoksidna smola ili bitumenski premaz – temeljni sloj
      - dvije elastomerne ili plastomerne ili elastomerna i plastomerna bitumenska traka – brtveni sloj
      - zaštitni – izravnavajući sloj od valjanog asfalta
      - habajući sloj od valjanog asfalta.



***Slika 63. Betonska ploča i hidroizolacija bitumenskim trakama***



***Slika 64. Hidroizolacija bitumenskim trakama i zaštitni asfaltni sloj***

b) *Asfaltni mastiks* koristi se za lako prometno opterećenje i na autocestovnim objektima (propustima) malih raspona, a slojevi su:
   - temeljni sloj od epoksidne smole ili bitumenskog premaza
   - brtveni sloj od asfalt mastiksa na staklenom voalu (Slika 65)
   - zaštitni sloj od lijevanog asfalta
   - habajući sloj od valjanog asfalta.



***Slika 65. Hidroizolacija asfaltnim mastiksom***

c) *Servidek – servipak* sustav (slika 66):
- SERVIDEK (bitumen i lateks), temeljno-brtveni sloj;
- SERVIPAK bitumenom impregnirani karton, povezan samoljepivom trakom (zaštitni sloj)
- nosivi sloj valjanog asfalta minimalne debljine od 8 cm
- habajući sloj valjanog asfalta.



***Slika 66. Hidroizolacija servidek-servipak sustavom***

d) *Sustav s poliuretanskom elastičnom hidroizolacijskom membranom sadrži*:
- temeljni sloj od dvokomponentne reakcijske epoksidne smole
- brtveni sloj od poliuretanske elastične hidroizolacijske membrane, nanosi se prskanjem u debljini od 2 mm (Slika 67)
- vezni sloj između brtvenog i zaštitnog sloja na bazi bitumena
- zaštitni sloj hidroizolacije lijevanim asfaltom
- vezni i habajući sloj od valjanog asfalta.



***Slika 67. Prskanje poliuretanskog brtvenog sloja***

e) *Sustav s elastično poliuretansko-bitumenskim brtvenim slojem* (Slika 68) sadrži:
- temeljni sloj od dvokomponentnog poliuretanskog premaza bez otapala
- brtveni sloj od elastičnog poliuretansko-bitumenskog premaza
- zaštitni sloj hidroizolacije od lijevanog ili valjanog asfaltnog sloja
- vezni valjani asfaltni sloj (na cestama teškog prometnog opterećenja)
- habajući valjani asfaltni sloja.

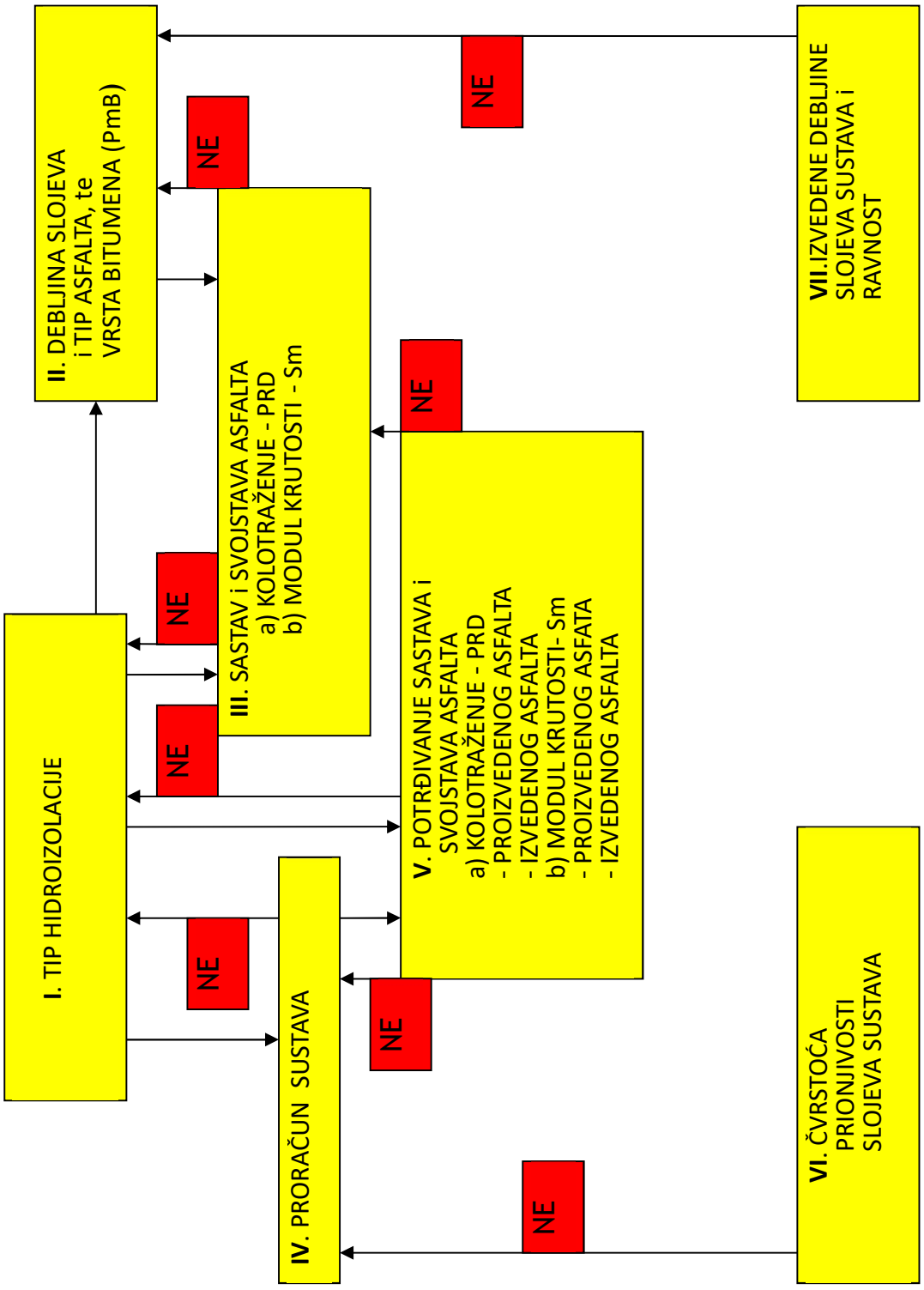


***Slika 68. Izravnanje podloge epoksimortom prije temeljnog sloja hidroizolacije***

f) *Sustav H-AK s bitumenskim trakama i s istim asfaltnim slojevima kao na trasi ispred i iza objekta (most ili vijadukt)* sadrži:
- temeljni sloj od dvokomponentne reakcijske epoksidne smole bez otapala i punila obrađene kvarcnim pijeskom
- brtveni sloj od dvije plastomerne ili elastormene bitumenske trake debljine 4 mm zavarene izravno na temeljni sloj, odnosno na donju bitumensku traku
- nosivi sloj asfalta tipa asfaltbeton
- vezni sloj asfalta tipa asfaltbeton, vezivom PmB
- habajući sloj asfalta tipa splitmastiksasfalt SMA vezivo PmB.

Na Slici 69 nalazi se hodogram čimbenika I-VII sustava hidroizolacija – asfaltni slojevi kolnika (H-AK) na cestovnom objektu kao što su most ili nadvožnjak [57].
Ovaj tip hodograma može se primijeniti za projektiranje asfaltnih kolnika na trasi ceste, izvan infrastrukturnog objekta uz izostavljanje prvog čimbenika (tip hidroizolacije), ali se uzima u obzir tip odnosno kvaliteta podloge (nosivih slojeva kolničke konstrukcije) koji se nalaze ispod asfaltnih slojeva. Ostali čimbenici II-VII odnose se na postupak definiranja i provjere svojstava kvalitete asfaltnih slojeva i vozne površine kolnika.

Izradom tehničkog propisa ili uvjeta koji se temelje na domaćoj i inozemnoj regulativi te stručnom iskustvu pridonosi se pojednostavljenju te tipiziranju projektnih rješenja i kvalitativnom poboljšanju sustava hidroizolacije – asfaltnog kolnika (H-AK) cestovnih građevina.




***Slika 69. Čimbenici sustava hidroizolacija – asfaltni slojevi kolnika na objektima*** *[57]*

## 8. DIMENZIONIRANJE KOLNIČKIH KONSTRUKCIJA

Empirijskim metodama dimenzioniranja na temelju određenih eksperimenata dobivaju se odgovarajući rezultati (debljine pojedinih slojeva od materijala određene vrste i svojstava) bez podataka o naprezanjima i deformacijama u kolničkim konstrukcijama.
Teorijskim metodama dimenzioniranja na temelju određivanja naprezanja i deformacija u pojedinim osjetljivim razinama kolničke konstrukcije vrši se usporedba s izdržljivošću materijala odnosno provjerava se fenomen umora materijala.
Razvoj empirijskih metoda kreće početkom 20 stoljeća. Do tada je bilo malo prometa pa je tehnologija izrade kolnika bila vrlo jednostavna, bez proračunavanja kolničke konstrukcije, koja se je sastojala od kamene podloge i sloja tucanika – makadama. S pojavom teških vozila kolnici su počeli propadati. Na osnovu opažanja, uočeni uzroci oštećenja na kolnicima su pored jačine prometa, vrsta i kvaliteta tla (podloge).
Prve metode za dimenzioniranje uključivale su mali broj čimbenika. Na primjer, metoda CBR koristila je *nomogram* (Slika 70) iz kojeg se izravno određivala debljina kolničke konstrukcije preko vrijednosti podloge u *kalifornijskom indeksu nosivosti* (CBR).
Slijedile su brojne modifikacije i poboljšanja CBR metode, a nastale su na temelju iskustava dobivenih opažanjima na postojećim cestama. Zatim se prešlo na izradu posebno građenih pokusnih dionica koje su opterećivane intenzivnim prometom. Provođena su potrebna opažanja, a rezultati su se dobivali znatno brže.
U okviru AASHO (American Association of State Highway Officials) cestovnih pokusnih dionica izrađen je veliki broj različitih kolničkih konstrukcija (savitljivih i krutih), izgrađena su dva manja i četiri velika prstena u ukupnoj dužini preko 10 km s nekoliko stotina savitljivih i krutih kolničkih konstrukcija.

Metoda AASHO omogućila je uzimanje u obzir sljedećih čimbenika:

- različitih karakteristika tla u posteljici
- raznih vrsta materijala pojedinih slojeva kolničke konstrukcije
- različitih klimatskih i hidroloških okolnosti.

Metoda AASHO za dimenzioniranje savitljivih kolnika (koraci I-VI) [67] :

I. Prometno opterećenje – izražava se prosječnim dnevnim brojem ekvivalentnih 80 kN osovina. Ukupno opterećenje koje se kreće po cesti (prognozirano za projektni period) preračunava se pomoću faktora ekvivalencije.
II. Projektni period – broj godina nakon kojega je potrebno obaviti rekonstrukciju kolnika (za indeks vozne sposobnosti kolnika ($p_t$) od 2 do 2,5), prema ovoj metodi uzima se vrijeme od 20 godina.
III. Indeks vozne sposobnosti kolnika ($\mathbf{p_t}$) dobiva se ocjenom stanja kolnika na osnovi uzdužne neravnosti, kolotraga i pukotina na voznoj površini, a kreće se od 5,0 na idealnom novom kolniku do 0 na potpuno uništenom kolniku. Uzima se pomoću odgovarajućeg nomograma za dimenzioniranje, kod autocesta i cesta viših razreda uzima se $p_t = 2,5$ (manja dotrajalost kolnika na kraju perioda), a za ostale ceste obično se usvaja $p_t = 2,0$
IV. Regionalni faktor uključuje utjecaj klime (smrzavanje/voda). Kreće se u granicama od 0,5 do 5,0 (veće vrijednosti su nepovoljnije). U našim prilikama (kontinentalno područje) veličina ovog faktora uzima se od 1,5 ili 2,0.
V. Nosivost tla može se odrediti ispitivanjem kalifornijskog indeksa nosivosti CBR ili pomoću grupnog indeksa na temelju klasifikacijskih geomehaničkih ispitivanja.

VI. Strukturni broj (indeks debljine) SN – debljina kolničke konstrukcije ovisi o vrsti upotrijebljenih materijala i tanja je što su materijali kvalitetniji.
Nomogrami imaju skale za nosivost tla "S", broj 80 kN ekvivalentnih osovina W (ukupno i prosječno dnevno), regionalni faktor R, pomoćnu skalu (SN' bez utjecaja regionalnog faktora) i skalu za strukturni broj SN. Spajanjem određenih parametara S, W, i R po ključu naznačenom na nomogramu dobiva se vrijednost potrebnog strukturnog broja (SN).

Dimenzioniranje se obavlja tako da se pretpostavi neka konstrukcija, izračuna njezin strukturni broj i usporedi s potrebnim strukturnim brojem dobivenim iz nomograma.
Strukturni broj pretpostavljene konstrukcije računa se po Formuli (7):

$$\mathbf{SN} = \mathbf{a_1} \times \mathbf{D_1} + \mathbf{a_2} \times \mathbf{D_2} + \mathbf{a_3} \times \mathbf{D_3} \quad (7)$$

Gdje je:
**SN** – strukturni broj kolničke konstrukcije (cm)
$\mathbf{a_{1,2,3}}$ – koeficijenti zamjene koji se odnose na vrstu materijala sloja
$\mathbf{D_{1,2,3}}$ – debljine pojedinih slojeva kolničke konstrukcije (cm).

Kolnička konstrukcija je ispravno pretpostavljena ako zadovoljava zahtjev:

**SN** konstrukcije ≥ **SN** potrebno (iz nomograma)

Metoda ne daje smjernice za određivanje debljina pojedinih slojeva ($\mathbf{D_{1,2,3,\ldots n}}$), a treba ih uzeti iz važećih tehničkih propisa i uvjeta prema tehnološkim karakteristikama pojedine vrste sloja sukladno kvaliteti materijala i radova.

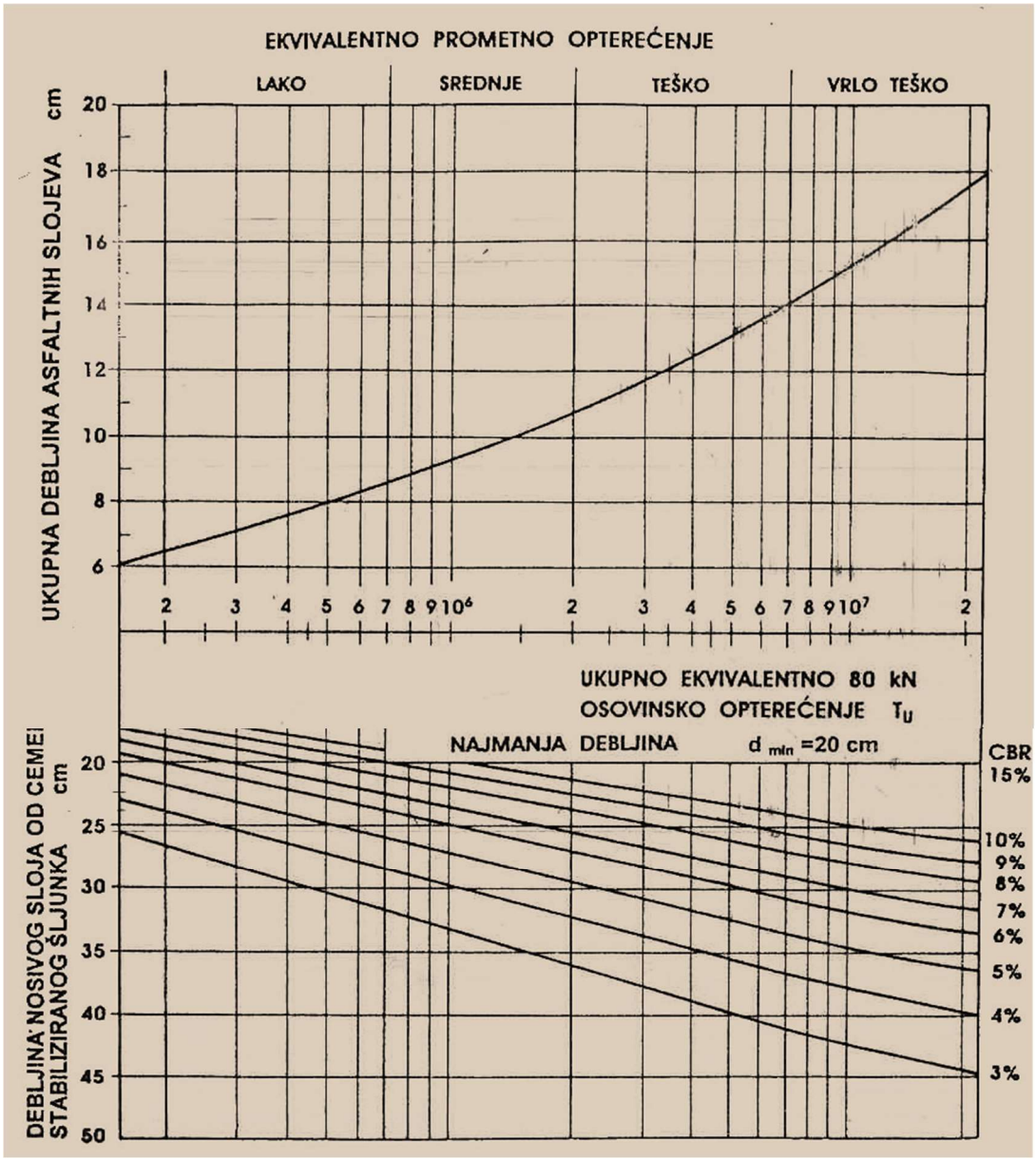
*Metoda za dimenzioniranje asfaltnih kolničkih konstrukcija po HRN U.C4.012 (1981)* [67]
Norma je izrađena na osnovi AASHO metode uz dva pojednostavljenja tako da se uzimaju konstantni parametri:

- vozna sposobnost kolnika $\mathbf{p_t}$ = 2,5 i
- regionalni faktor **R** = 2

Predviđena je mogućnost dimenzioniranja tri tipa kolničke konstrukcije:

A. asfaltni slojevi na mehanički zbijenom nosivom sloju od zrnatog kamenog materijala bez veziva (MNS)
B. asfaltni slojevi na nosivom sloju od zrnatog kamenog materijala stabiliziranog hidrauličkim vezivom (CNS)
C. asfaltni slojevi na mehanički zbijenom nosivom sloju od zrnatog kamenog materijala bez veziva MNS i nosivom sloju od zrnatog kamenog materijala stabiliziranog hidrauličkim vezivom CNS.

Sastavni dio norme su dijagrami za projektni period od 20 godina, a prometno opterećenje određuje se prema normi HRN U.C4.010 [68] i izražava se brojem prijelaza standardnog ekvivalentnog 82 kN osovinskog opterećenja.
Na Slici 70 nalazi se dijagram za dimenzioniranje kolničke konstrukcije, sastoji se od asfaltnih slojeva i nosivog sloja od cementom stabiliziranog sloja CNS (Tip II).




***Slika 70. Nomogram za dimenzioniranje asfaltnog kolnika Tipa II prema HRN U.C4.012*** *[67]*

***Metode za dimenzioniranje pojačanja kolničkih konstrukcija*** primjenjuju se:

- kod postupka rekonstrukcije ceste i
- u procesu zahvata na kolniku tijekom eksploatacije ceste.

Kolnička konstrukcija pod utjecajem prometnog opterećenja i djelovanja klimatoloških obilježja, doživljava postepenu degradaciju. Zbog umora materijala u konstrukciji dolazi do smanjenja nosivosti i nastaju brojne nepoželjne pojave u obliku pukotina, deformacije u obliku kolotraga i raznih oštećenja vozne površine. Nastale pojave smanjuju sigurnost i udobnost vožnje te dovode do progresivnog propadanja kolnika.

***I. Dimenzioniranje pojačanja kolničkih konstrukcija*** – na osnovi nosivosti tla odnosno posteljice i vrednovanja postojećih slojeva, provode se sljedeći istražni radovi:

- sondiranje postojećeg kolnika i tla posteljice (Slika 71),

- laboratorijsko utvrđivanje sastava slojeva konstrukcije i svojstava ugrađenih materijala
- ispitivanje nosivosti posteljice dinamičkom pločom.



***Slika 71. Uzimanje uzoraka pojedinog sloja kolničke konstrukcije i posteljice***

Za kontinuirano utvrđivanje debljina slojeva kolničke konstrukcije upotrebljava se uređaj za radarsko snimanje po dubini kolnika *ground penetration radar* (GPR), prikupljeni podaci o variranju debljina pojedinih slojeva važni su za točnost određivanja homogenih odsječaka kod dimenzioniranja pojačanja kolničke konstrukcije. Na Slici 72 nalazi se mjerno vozilo s montiranim antenama za radarsko snimanje slojeva kolnika u kolotragu i po sredini vozne trake.



***Slika 72. Mjerno vozilo s montiranim antenama za radarsko snimanje slojeva kolnika***

Nakon pribavljenih potrebnih ulaznih podataka, pristupa se određivanju pojačanja metodom AASHO.
Na osnovi prometnog opterećenja, regionalnih uvjeta i nosivosti tla određuje se potreban strukturni broj (SN). Postojeća konstrukcija vrednuje se pomoću reduciranih koeficijenata

zamjene i određuje strukturni broj (SN**'**). Od ukupnog potrebnog strukturnog broja SN oduzima se strukturni broj postojeće konstrukcije SN**'** i dobiva strukturni broj potrebnog pojačanja SN**''** (SN**''** = SN – SN**'**). Projektira se pojačanje i provjerava odgovara li njegov strukturni broj ( SN**'''**) strukturnom broju potrebnom za pojačanje (SN**''**) odnosno mora biti zadovoljen uvjet: SN**'''** ≥ SN**''.**

Bitno je određivanje koeficijenata zamjene u reduciranom iznosu u odnosu na AASHO koeficijente zamjene za nove materijale. Reduciranje koeficijenata zamjene provodi se na osnovi laboratorijskih ispitivanja (kreće se od 20% do 50% pa i više, u odnosu na nove istovrsne materijale).

Kada je utvrđen sastav postojeće kolničke konstrukcije i određeni reducirani koeficijenti zamjene, strukturni broj stare konstrukcije određuje se po Formuli (8):

$$\mathbf{SN'} = \Sigma\, \mathbf{a_{ir}} \times \mathbf{d_i} \qquad (8)$$

Gdje je:

$\mathbf{a_{ir}}$ – reducirani koeficijenti zamjene materijala pojedinih postojećih slojeva

$\mathbf{d_i}$ – debljine slojeva postojeće kolničke konstrukcije.

***II. Dimenzioniranje pojačanja kolničkih konstrukcija*** *na osnovi defleksija postojećeg kolnika*

Pod pojmom **defleksija** (progib) kolničke konstrukcije smatra se njena deformacija savijanja koja nastaje pod djelovanjem određenog opterećenja. Ova deformacija kod ispravno projektirane i izvedene kolničke konstrukcije nije velika i ima gotovo potpuno elastični karakter. Kod slabih i dotrajalih kolničkih konstrukcija defleksija pod opterećenjem je znatno veća – po rasterećenju vraća se samo dio deformacije (elastična defleksija), a dio deformacije ostaje (plastična defleksija). Veličina defleksije obrnuto je proporcinalna s nosivošću kolničke konstrukcije.

Razlikujemo niz tipova uređaja za mjerenje defleksije:

- ***uređaji sa statičkim djelovanjem:*** *Benkelmanova* greda i deflektograf *La Croix*
- ***uređaji s dinamičkim djelovanjem:*** *road rater, dynaflect i* deflektometar s padajućim teretom (eng. *falling weight deflectometer* – FWD) na Slici 73.

Nosivost kolničke konstrukcije mijenja se tijekom godine. Zbog promjene temperature u konstrukciji i tlu te promjene vlažnosti moduli elastičnosti materijala mijenjaju svoje vrijednosti. Time se mijenja nosivost cijele konstrukcije, a to se odražava i na veličinu defleksije.

Da bi se dobili podaci za realno dimenzioniranje pojačanja, defleksije se moraju mjeriti u vrijeme kada su one najveće (proljeće, nakon otapanja snijega).

Defleksije se ne smiju mjeriti ako su konstrukcija i tlo ispod zamrznuti, niti pri višim temperaturama od $30^0$C. Raspon temperatura u asfaltu tijekom mjerenja je od $5^0$C do $30^0$C. Standardna temperatura za defleksije asfaltnih kolnika usvojena je temperatura od $20^0$C. Defleksije koje se mjere pri temperaturama nižim ili višim od $20^0$C treba korigirati ili pomoću dijagrama ili pomoću formule.

Analizom izmjerenih profila defleksija u postupku proračuna modula elastičnosti potrebno je definirati homogene odsječke.




***Slika 73. Uređaj (FWD) za mjerenje nosivosti slojeva kolničke konstrukcije i posteljice***

**LITERATURA**

[1] Šimun M., Predavanja iz kolegija Kolničke konstrukcije i Karakteristike završnog sloja kolnika, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel, 2021/22.
[2] HRN EN 13108-1 Bitumenske mješavine, Specifikacije materijala, 1. dio: Asfaltbeton (AC)
[3] HRN EN 13108-2 Bitumenske mješavine, Specifikacije materijala, 2. dio: Asfaltbeton za vrlo tanke slojeve (BBTM)
[4] HRN EN 13108-5 Bitumenske mješavine, Specifikacije materijala, 5. dio: Skeletni mortni asfalt (SMA)
[5] HRN EN 13108-7 Bitumenske mješavine, Specifikacije materijala, 7. dio: Porozni asfalt (PA)
[6] EN 13108-9 Bitumenske mješavine, Specifikacije materijala, 9. dio: Asphalt for Ultra-Thin-Layers (AUTL)
[7] Asfaltni proizvodi - EAPA, https://eapa.org/*asphalt-products*, 2022.
[8] HRN EN 13108-6 Bitumenske mješavine, Specifikacije materijala, 6. dio: Lijevani asfalt (MA)
[9] HRN EN 12271 Vozna površina kolnika, Površinska obrada (SD)
[10] HRN EN 12273 Vozna površina kolnika, Tankoslojne asfaltne prevlake izrađene hladnim postupkom (SS)
[11] Glavni projekt rekonstrukcije Radićeve ulice; EKO PLAN d.o.o.; Zagreb; rujan 2015.
[12] Industrial flooring Salviacim, 2022. https://www.bablacktop.com/media/1400408/salviacim_a4_gb_bd.pdf
[13] Glavni projekt Greenway V, Mobilita Evolva d.o.o. Zagreb, listopad 2019.
[14] Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, knjiga II, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb 2001.
[15] HRN EN 13286-2 Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine, 2. dio: Metode ispitivanja za određivanje laboratorijske referentne gustoće i udjela vode, Zbijanje prema Proctoru
[16] HRN EN 13286-47 Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine, 47. dio: Ispitna metoda za određivanje kalifornijskog indeksa nosivosti
[17] HRN EN 1097-6 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata, 6. dio: Određivanje gustoće i upijanja vode
[18] HRN U.B1.046 Geomehanička ispitivanja, Određivanje modula stišljivosti kružnom pločom
[19] Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, knjiga III 5-01, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb 2001.
[20] HRN EN 933-1 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata, 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava, Metoda sijanja
[21] HRN EN ISO 17892-4 Geotehničko istraživanje i ispitivanje, Laboratorijsko ispitivanje tla, 4. dio: Određivanje granulometrijskog sastava
[22] HRN EN 1744-1:2012 Ispitivanja kemijskih svojstava agregata, 1. dio: Kemijska analiza
[23] HRN U.B1.024 Geomehanička ispitivanja, Određivanje sadržaja sagorljivih i organskih tvari
[24] HRN B.B8.034 Kameni agregat, Određivanje postotaka lakih čestica u agregatu
[25] Ispitivanje agregata, https://pavementinteractive.org/testing/aggregate-tests, 2022.
[26] HRN EN 1097-6 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata, 6. dio: Određivanje gustoće i upijanja vode
[27] HRN EN ISO 17892-1 Geotehničko istraživanje i ispitivanje, Laboratorijsko ispitivanje tla, 1. dio: Određivanje vlažnosti
[28] HRN EN 933-4 Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata, 4. dio: Određivanje oblika zrna, Indeks oblika

[29] HRN B.B8.037 Kameni agregat, Određivanje slabih zrna
[30] HRN EN 1367-2 Ispitivanja toplinskog i vremenskog utjecaja na svojstva agregata, 2. dio: Ispitivanje magnezijevim sulfatom
[31] HRN 1097-2 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata, 2. dio: Metode za određivanje otpornosti na drobljenje i habanje po metodi *Los Angeles*
[32] Babić B. & Horvat Z., Građenje i održavanje kolničkih konstrukcija, FGZ Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1987.
[33] HRN U.E9.024 Izrada nosivih slojeva kolničkih konstrukcija cesta od materijala stabiliziranih cementom i sličnim hidrauličkim vezivima – Tehnički uvjeti
[34] HRN EN 14227-1 Mješavine vezane hidrauličnim vezivom, Specifikacije 1. dio: Zrnate mješavine vezane cementom
[35] Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, knjiga III 5-02, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb 2001.
[36] Tehnički uvjeti za asfaltne kolnike, Hrvatske ceste, Zagreb 2015.
[37] Tehnički propis za asfaltne kolnike, Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine, Narodne Novine 48/2021.
[38] Hrvatsko asfaltersko društvo, https://h-a-d.hr, 2022.
[39] Ro-Tehnologija, https://rotech.hr, 2022.
[40] Tankoslojne asfaltne prevlake, *Slurry Surfacing*, https://bitumensales.com, 2022.
[41] HRN EN 13108-8 Bitumenske mješavine, Specifikacije materijala, 8. dio: Reciklažni asfaltni Agregat
[42] HRN EN 12591 Bitumen i bitumenska veziva, Specifikacija za cestograđevne bitumene
[43] HRN EN 13924 Bitumen i bitumenska veziva, Specifikacija za tvrde cestograđevne Bitumene
[44] HRN EN 14023 Bitumen i bitumenska veziva, Okvirna specifikacija za polimerom modificirane bitumene
[45] HRN EN 15322 Bitumen i bitumenska veziva, Okvir za specificiranje razrijeđenih i omekšanih bitumenskih veziva
[46] HRN EN 13808 Bitumen i bitumenska veziva, Okvir za specificiranje kationskih bitumenskih emulzija
[47] Bitumenska veziva, *Ductility Test of Bitumen*, https://civiljungle.com, 2022.
[48] Ispitivanje asfalta, IGMAT, https://igmat.si, 2022.
[49] HRN EN 12697-36 Bitumenske mješavine, Ispitne metode, 36. dio: Određivanje debljine asfaltnih slojeva u kolniku
[50] HRN EN 12697-6 Bitumenske mješavine, Ispitne metode, 6. dio: Određivanje gustoće asfaltnih uzoraka
[51] HRN EN 13036-4 Površinska svojstva cesta i aerodromskih operativnih površina, Metoda mjerenja otpornosti površine na klizanje, Ispitivanje klatnom
[52] COST 354 *Performance Indicators for Road Pavements WP2 "Selection and assessment for individual performance Indicators" 2007.*
[53] Makrotekstura i mikrotekstura, https://researchgate.net, 2022.
[54] HRN EN 13036-1 Površinska svojstva cesta i aerodromskih operativnih površina, Mjerenje dubine makroteksture površine kolnika volumetrijskim postupkom
[55] HRN EN 13036-7 Površinska svojstva cesta i aerodromskih operativnih površina, Mjerenje neravnosti slojeva kolnika, Ispitivanje mjernom letvom
[56] EN 13036-6 Površinska svojstva cesta i aerodromskih operativnih površina, Mjerenje poprečnih i uzdužnih profila u području valnih duljina ravnina i megateksture

[57] Šimun M., Novi pristup sustavu hidroizolacija – asfaltni slojevi kolnika na mostovima, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet u Zagrebu, 2012.
[58] HRN EN 12697-26 Bitumenske mješavine, Ispitne metode, 26. dio: Krutost
[59] HRN EN 12697-22 Bitumenske mješavine, Ispitne metode, 26. dio: Kolotraženje
[60] HRN EN 13596 Hidroizolacija betonskih ploča mostova i drugih betonskih voznih površina: Određivanje čvrstoće veze
[61] TSC 06.753 Ispitne metode, Ispitivanje povezanosti asfaltnih slojeva
[62] ASTM E 950-98(04) *Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Travelled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference*
[63] ASTM E 1926-98 *Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements*
[64] EN 13036-5 Određivanje indeksa uzdužne neravnosti vozne površine kolnika
[65] Pravilnik o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa (NN 110/01)
[66] Šimun M., Kriteriji ravnosti vozne površine kolnika, Magistarski rad, Građevinski fakultet u Zagrebu, 2008.
[67] HRN U.C4.012 Projektiranje i građenje cesta, Metoda dimenzioniranja kolničke konstrukcije
[68] HRN U.C4.010 Projektiranje i građenje cesta, Metoda određivanja prometnog opterećenja

**Popis slika**

*Slika 1. Poprečni presjek asfaltne kolničke konstrukcije*
*Slika 2. Shematski prikaz posebnosti sastava pojedine vrste valjanog asfalta*
*Slika 3. Valjani asfalt (lijevo) i lijevani asfalt (desno) ispred dilatacijske naprave*
*Slika 4. Betonski i asfaltni kolnik u zračnoj luci*
*Slika 5. Poprečni presjek betonske kolničke konstrukcije*
*Slika 6. Kolnik od uvaljanog betona*
*Slika 7. Presjek kroz kolnik od kamene kocke*
*Slika 8. Asfaltcementni kolnik za izrazito teško prometno opterećenje*
*Slika 9. Pogled na buduću rutu biciklističke staze Greenway*
*Slika 10. Posteljica od prirodnih zemljanih materijala*
*Slika 11. Određivanje modula stišljivosti (Ms) statičkom kružnom pločom ∅30 cm*
*Slika 12. Određivanje modula stišljivosti (Ms) dinamičkom kružnom pločom ∅30 cm*
*Slika 13. Kameni materijal za mehanički zbijeni sloj*
*Slika 14. Postupak otpucavanja stijene u kamenolomu (iznad i ispod)*
*Slika 15. Drobilišno postrojenje kamenog agregata*
*Slika 16. Sita za prosijavanje kamenog materijala*
*Slika 17. Ispitna epruveta*
*Slika 18. Uređaj za ispitivanje otpornosti kamena prema drobljenju i habanju*
*Slika 19. Vibracijski valjak prilikom zbijanja MNS-a*
*Slika 20. Betonara - postrojenje za proizvodnju stabilizacijske mješavine CNS-a*
*Slika 21. Razastiranje stabilizacijske mješavine grejderom*
*Slika 22. Recikler za umješavanje stabilizacijske mješavine u sloju*
*Slika 23. Zbijanje sloja CNS-a valjkom*
*Slika 24. Kamioni kiperi za prijevoz bitumenske mješavine*
*Slika 25. Prskanje bitumenske emulzije za povezivanje slojeva*
*Slika 26. Finišer za strojnu ugradnju asfalta*
*Slika 27. Tekstura izvedene asfaltne površine*
*Slika 28. Uzdužni radni spoj i afsaltni sloj u boji*
*Slika 29. Posipač kamene sitneži kod izvedbe površinske obrade*
*Slika 30. Izvedba tankoslojne asfaltne prevlake*
*Slika 31. Dijelovi samohodnog stroja za izvedbe tankoslojne prevlake*
*Slika 32. Reciklažni asfaltni agregat*
*Slika 33. Uzorci agregata za utvrđivanje PSV-a*
*Slika 34. Duktilometar za utvrđivanje elastičnog povrata*
*Slika 35. Asfaltni analizator za ekstrakciju bitumenske mješavine*
*Slika 36. Dinamičko ispitivanje asfaltnih uzoraka*
*Slika 37. Ispitivanje otpornosti na kolotraženje*
*Slika 38. Uzorci iz sloja (1) i laboratorija (2)*
*Slika 39. Uređaj za mjerenje gustoće sloja*
*Slika 40. Uređaj klatno za mjerenje hvatljivosti*
*Slika 41. Uređaj Greptester (lijevo) i Skidometar za mjerenje hvatljivosti (desno)*
*Slika 42. Mikrotekstura i makrotekstura vozne površine*
*Slika 43. Određivanje teksture metodom pijeska*
*Slika 44. Određivanje teksture pomoću lasera*

*Slika 45. Mjerna letva (lijevo) i Hodajući profilomjer (desno)*
*Slika 46. Uređaj LaserProf*
*Slika 47. Mjerna greda shematski (lijevo) i Inercijalni profilograf (desno)*
*Slika 48. Mjerenje bučnosti prometnog toka*
*Slika 49. Mjerno vozilo za mjerenje niza svojstava vozne površine kolnika*
*Slika 50. Uređaj za ispitivanje modula krutosti*
*Slika 51. Rezultati ispitivanje modula krutosti*
*Slika 52. Uređaj za ispitivanje otpornosti asfalta na kolotraženje*
*Slika 53. Krivuja kolotraženja asfaltnog uzorka*
*Slika 54. Pull-off uređaj za ispitivanje prionjivosti asfaltnog sloja*
*Slika 55. Marshall preša za ispitivanje povezanosti asfaltnog sloja*
*Slika 56. Skica kotrljajuće grede HI-LO detektor*
*Slika 57. Bump Integrator*
*Slika 58. Mjerna stopa hodajućeg profilomjera*
*Slika 59. Skica inercijalnog profilomjera*
*Slika 60. Normirani matematički model četvrtine vozila*
*Slika 61. Ugradnja asfaltnog sloja na autocesti*
*Slika 62. Grafički prikaz kriterija indeksa ravnosti voznih površina kolnika*
*Slika 63. Betonska ploča i hidroizolacija bitumenskim trakama*
*Slika 64. Hidroizolacija bitumenskim trakama i zaštitni asfaltni sloj*
*Slika 65. Hidroizolacija asfaltnim mastiksom*
*Slika 66. Hidroizolacija servidek-servipak sustavom*
*Slika 67. Prskanje poliuretanskog brtvenog sloja*
*Slika 68. Izravnanje podloge epoksimortom prije temeljnog sloja hidroizolacije*
*Slika 69. Čimbenici sustava hidroizolacija – asfaltni slojevi kolnika na objektima*
*Slika 70. Nomogram za dimenzioniranje asfaltnog kolnika prema normi HRN U.C4.010*
*Slika 71. Uzimanje uzoraka pojedinog sloja kolničke konstrukcije i posteljice*
*Slika 72. Mjerno vozilo s montiranim antenama za radarsko snimanje slojeva kolnika*
*Slika 73. Uređaj (FWD) za mjerenje nosivosti slojeva kolničke konstrukcije i posteljice*

**Popis tablica**

*Tablica 1. Vrijednosti granulometrijske krivulje MNS-a po pojedinom situ [19]*
*Tablica 2. Fizikalno-mehanička svojstva zrna MNS-a [19]*
*Tablica 3. Granulometrijske krivulje cementom stabiliziranog sloja [35]*
*Tablica 4. Fizikalno-mehanička svojstva zrna CNS-a [35]*
*Tablica 5. Propisane vrijednosti tlačne čvrstoće stabilizacijske mješavine CNS-a [35]*
*Tablica 6. Propisane vrijednosti hvatljivosti u SRT-u prema TU [36]*
*Tablica 7. Propisane vrijednosti hvatljivosti u koeficijentu trenja μ prema COST-u [52]*
*Tablica 8. Propisane vrijednosti teksture prema TU [36]*
*Tablica 9. Propisane vrijednosti teksture prema COST-u [52]*
*Tablica 10. Klasifikacija javnih cesta [66]*
*Tablica 11. Kategorizacija javnih cesta prema obimu građevinskog zahvata [66]*
*Tablica 12. Kriteriji uzdužne ravnosti po kategorizacijama javnih cesta [66]*