

Rad prezentiran na:

14th International Flexible Pavements Conference 2009, Australia

DC Collings, Loudon International, South Africa

RAZUMIJEVANJE BITUMENOM STABILIZIRANIH MATERIJALA

SAŽETAK

U svibnju 2009. godine Asfaltna akademija u Južnoafričkoj Republici je publicirala novi dokument s tehničkim uputama za projektiranje i izvođenje bitumenom stabiliziranih materijala. Pod naslovom „*TG2, drugo izdanje, Bitumenom stabilizirani materijali*“, ova publikacija je rezultat velikih napora istraživača i praktičara da shvate ponašanje tih materijala i razviju odgovarajuće alate za projektiranje. Time ova publikacija obećava novi uzlet bitumenom stabiliziranih materijala. Rasvijetljeni su neke predrasude koje se odnose na ponašanje tih materijala i, što je najvažnije, razriješeno je natjecanje između lobija koji preferiraju bitumensku emulziju i upjenjeni bitumen, postavljanjem oba u isti položaj.

Razumijevanje karakteristika ponašanja tih materijala pod prometom i njihovog načina popuštanja temelji se na rezultatima istraživanja provedenih tijekom prošlog desetljeća, upotpunjenim s podacima o dugoročnom ponašanju kolnika. Dan je pregled nove metodologije projektiranja zajedno s prilagodbom heurističkog pristupa za dobivanje pouzdanih indikatora ponašanja. Završno poglavlje sumira ekonomske koristi i koristi za okoliš koje proizlaze iz korištenja bitumenom stabiliziranih materijala.

1. POZADINA

Da bi se razumjelo tehnologiju stabilizacije bitumenom (materijali obrađeni bitumenskom emulzijom ili upjenjenim bitumenom), važno je poznavati povijest te tehnologije. Ovaj se rad objašnjava proces razvitka ovog materijala u Južnoafričkoj Republici, proces koji je trajao mnogo godina i, zahvaljujući u velikoj mjeri tehničkim uputama za bitumenom stabilizirane materijale (BSM) koje je Asfaltna akademija publicirala u svibnju 2009. godine, uklonjena su vela misterije koja su se nadvila nad tu tehnologiju. Bitumenska stabilizacija je sada prepoznata kao atraktivna opcija za izvedbu ekonomičnih i trajnih kolnika.

1.1 Počeci

Bitumenom stabilizirani materijali (BSM) se koriste u Južnoafričkoj Republici već više od trideset godina. Koncept obrade emulzijom se počeo značajnije koristiti 1970-ih godina kada su novije izgrađene ceste doživjele katastrofalna prijevremena oštećenja. Oštećeni cementom vezani nosivi sloj je ponovno tretiran bitumenskom emulzijom i najveći dio tih dionica je danas u još uvijek zadovoljavajućem stanju.

Od tada se na velikom broju projekata rehabilitiranja cesta koristi bitumenska emulzija za obradu postojećih materijala u kolniku, najviše na području Highveld-a, gdje su drobljeni kameni materijali stalno korišteni za izvedbu nosivog sloja. Pokusi sa Simulatorom teških vozila (HVS), koje je proveo cestovni istraživački tim Savjeta za znanstveno i industrijsko istraživanje (CSIR), ukazali su na očekivani produženi vijek koji proizlazi iz dodatka malih količina bitumena. Dodatno, Južnoafrička asfaltna asocijacija (Sabita), i kao organizacija i njeni pojedinačni članovi aktivno su promovirali korištenje obradu s bitumenskom emulzijom.

Tijekom 1980-ih godina bitumenska emulzija se pionirski koristi za stabiliziranje pješčanih humaka na Makhatini Flats u Northern KwaZulu-Natal. Početni uspjesi su rezultirali korištenjem te tehnologije za poboljšanje nekoliko cesta za upravu Natal parkova (sada KZN Wildlife). Iako su pokazane koristi od upotrebe te vrste zahvata, došlo je i do nekoliko problema povezanih s primjenom bitumenske emulzije. Ti problemi su potaknuli ispitivanje alternativnih načina dodavanja bitumena.

1.2 Početak korištenja upjenjenog bitumena u Južnoafričkoj Republici

Tijekom 1993. godine, u potrazi za alternativom bitumenskoj emulziji, poslovna udruga (JV) jedne velike južnoafričke građevinska tvrtke, manje projektantske tvrtke i stranog proizvođača opreme uvezla je specijalno asfaltno postrojenje kapaciteta 400 t/sat. Jedinstveno svojstvo tog asfaltnog postrojenja je bila mogućnost upjenjavanja bitumena kao zamjene za bitumensku emulziju.

Prvi projekt koji je ova poslovna udruga realizirala bila je izvedba 150 mm debelog bitumenom stabiliziranog sloja pijeska između Mbazwana and Sodwana zaljeva, duljine 14 kilometara. Ugovor za taj posao, tretiran kao „pokusni“, ispregovaran je s Provincijskom upravom za ceste. Postrojenje za miješanje je u potpunosti instalirano na gradilištu u travnju 1994. godine. Razdoblje izvedbe je bilo četiri tjedna.

Ovaj ugovor je za sve sudionike bio iskustvo iz kojeg je puno naučeno. Sve što je moglo krenuti loše, krenulo je loše. Postrojenje za miješanje je oštećeno tijekom prijevoza na gradilište po neravnoj prilaznoj cesti. Kada je postrojenje popravljeno i rad započeo, postalo je brzo očito da sustav za proizvodnju upjenjenog bitumena nije pouzdan zbog stalnih začepjenja koja nisu omogućavala da male količine vode, potrebne za upjenjavanje bitumena, dospiju do ekspanzionih komora. Izgubljene su velike količine bitumena dok se pokušavalo ispraviti uočeni nedostatak i proizvesti zadovoljavajuću mješavinu. Odnosi na gradilištu su se zaoštrili i stranci su napustili zemlju, tvrdeći da ih je njihova vlada savjetovala da napuste Južnoafričku Republiku prije prvih demokratskih izbora. Južnoafrikancima je ostavljeno da sami riješe problem koji nisu razumjeli.

Kada je upjenjeni bitumen ipak bio povremeno proizveden, rezultirajući bitumenom stabilizirani materijal omogućio je uspješnu izvedbu 150 mm debelog nosivog sloja. Zbog toga su preostali partneri u poslovnoj udruzi potrošili još slijedeća tri mjeseca na gradilištu, radeći dan i noć da bi riješili problem začepijavanja uređaja za upjenjavanje bitumena. Razvijen je elementarni postupak za rad postrojenja, omogućavajući da se proizvede zadovoljavajuća mješavina, ali jako sporom dinamikom. Srećom, naručitelj je razumio te probleme i nije zaračunao penale zbog tromjesečnog produžetka dovršetka radova. Ta cesta je i sada, nakon petnaest

godina, još uvijek u dobrom stanju, unatoč velikom opterećenju koji je cesta pretrpjela zbog prijevoza drvene građe.

Nakon Mbazwana – Sodwana Bay debakla realizirano je nekoliko drugih projekata (uglavnom mali radovi sa svrhom demonstriranja ove tehnologije). Problemi začepljivanja su se, međutim, nastavili. Rad s postrojenjem je iziskivao iskusnog čovjeka koji razumije problem i, kada je on otišao, donesena je odluka da se odustane. Sustav s upjenjenim bitumenom je bio krajnje nepouzdan i izvoditelj je premjestio postrojenje za miješanje materijala. Unatoč frustracija, dvije su glavne koristi proizišle iz tih skupih lekcija:

- ✚ Upjenjeni bitumen se pokazao mogućom i vrlo atraktivnom zamjenom za bitumensku emulziju kao stabilizirajuće sredstvo (proizvod je bio dobar, oprema je bila s manama); i
- ✚ Došlo se do dobrog razumijevanje problema kada je korištena ekspanziona komora za proizvodnju upjenjenog bitumena.

To je ohrabrilo one koji su bili osobno uključeni u projekt da podijele svoje iskustvo s njemačkim proizvođačem opreme, s ciljem da se razvije dobar inženjerski sustav za proizvodnju upjenjenog bitumena.

1.3 Novi „pravilni inženjerski“ sustav

Nakon kratkog ali intenzivnog istraživačkog i razvojnog truda inženjerskog projektnog tima proizvođača, prototip grede za prskanje za proizvodnju upjenjenog bitumena je podvrgnut u studenom 1995. godine seriji proba u Njemačkoj. Te su probe pokazale da su njemački inženjeri uspjeli otkloniti problem začepljivanja opreme projektiranjem sustava kojim se izbjegavaju stanja koja uzrokuju začepljivanje. Sustav je onda montiran na novu generaciju reciklera i brodom poslan u Južnoafričku Republiku zbog proba na terenu. Tijekom svibnja 1995. godine cestovna uprava je odabrala nekoliko ruralnih cesta u centralnoj KwaZulu-Natal provinciji kao kandidate za obnovu recikliranjem uz korištenje upjenjenog bitumena. Nakon šest tjedana kontinuiranog rada nijemci su potvrdili da sustav zadovoljavajuće radi i napustili Južnoafričku Republiku. (Sustav koji se sada proizvodi od strane te kompanije, dakle oko 13 godina kasnije, potpuno je isti.)

U godinu dana nakon dovršetka tih proba, četiri južnoafričke tvrtke su kupile velike strojeve za recikliranje opremljene za korištenje upjenjenog bitumena. Te tvrtke su brzo prepoznale ekonomske prednosti koje se mogu postići korištenjem upjenjenog bitumena umjesto bitumenske emulzije u tenderima u kojima je predviđena izvedba emulzijom tretiranog nosivog sloja (ETB). Kao rezultat, dodijeljeno je nekoliko ugovora u korist upjenjenog bitumena, unatoč činjenici da cestovna uprava nije bila sigurna da li je upjenjeni bitumen zaista učinkovit kao bitumenska emulzija. Time se uspjelo izazvati gnjev proizvođača bitumenske emulzije.

Bez obzira na to, tvrtke su bile privučene konceptom recikliranja korištenjem upjenjenog bitumena. Najveći broj respektabilnih tvrtki koje danas rade u cestovnom sektoru Južnoafričke Republike posjeduju barem jedan od tih skupih strojeva. Prema posljednjoj evidenciji (kolovoz 2009. godine), južnoafričkim tvrtkama je prodano 34 reciklera opremljenih sa sustavom za upjenjeni bitumen (preko 600 sustava je

prodano širom svijeta). Atraktivno svojstvo sustava (iz perspektive izvoditelja radova) je dvostruka mogućnost korištenja ili upjenjenog bitumena ili bitumenska emulzije, zavisno od toga koje je stabilizirajuće sredstvo propisano u pojedinom projektu.

Uz razvoj sustava za montažu na velikim reciklerima, razvijena je i mala laboratorijska jedinica za podršku projektantskom aspektu ove nove tehnologije. Početni otpor proizvođača opreme je bio razumljiv, tvrtka je bila u poslu da razvije velike robusne strojeve za glodanje i recikliranje cestovnih kolnika a ne preciznu malu laboratorijsku opremu. Međutim, proizvođači opreme su shvatili da bez mogućnosti da proizvedu upjenjeni bitumen u laboratoriju, ta tehnologija ne bi mogla napredovati. Što više, kako je postupak upjenjavanja relativno nov, nijedan proizvođač standardne laboratorijske opreme nije bio zainteresiran za proizvodnju takve opreme. Proizvodnja najmanjeg stroja u njihovom proizvodnom asortimanu je započela 1997. godine i do danas je više od 200 tih jedinica kupljeno širom svijeta, samo šest u Južnoafričkoj Republici.

1.4 Natjecanje između bitumenska emulzije i upjenjenog bitumena

Već su 1993. godine lokalni proizvođači bitumenske emulzije bili suočeni s neminovnom pojavom upjenjenog bitumena kao prijetnje „njihovom tržištu“. Na svoj račun proizvođači bitumenske emulzije poduzeli inicijativu sponzoriranja dvije publikacije kroz Južnoafričku asfaltnu asocijaciju, obje sastavljene od strane Savjeta za znanstveno i industrijsko istraživanje (CSIR) i gorljivo promoviranih od strane proizvođača bitumenske emulzije:

- ✚ *Upute broj 14, GEMS – Projektiranje i korištenje mješavina kamenog agregata i emulzije* (objavljene u listopadu 1993). Te upute daju opsežan set uputstava za obradu bitumenskom emulzijom cijelog raspona materijala različitih kvaliteta. Zavisno o količini dodane bitumenske emulzije, produkt miješanja je bio klasificiran ili kao modificirani materijal (preostali bitumen < 1,5%) ili kao stabilizirani materijal (preostali bitumen > 1,5%). Primjenjeni su različiti kriteriji projektiranja, zavisno da li je materijal bio modificiran ili stabiliziran. Da se postigne traženi kriterij čvrstoće, preporučen je dodatak cementa (do 2%).
- ✚ *Upute broj 21, ETB – Projektiranje i korištenje nosivog sloja tretiranog emulzijom* (objavljene u svibnju 1999. godine). Te upute su u suštini poboljšale dio koji se odnosi na „modificirani materijal“ u prethodnoj GEMS publikaciji. Maksimalni preporučeni sadržaj preostalog bitumena je povećan na 1,8% u kombinaciji s maksimalno 1,5% cementa. Kriteriji čvrstoće za projektiranje su temeljeni na CBR i UCS vrijednostima postignutim na ispitnim uzorcima.

Te publikacije su dale inženjerima alat za projektiranje i specificiranje GEMS-a ili ETB-a za rehabilitiranje kolnika i brojni tenderi su nakon toga raspisani temeljem takvog projektiranja. Međutim, nakon 1996. godine, izvoditelji su počeli nuditi smanjenje cijena supstituirajući upjenjeni bitumen s istom količinom preostalog bitumena. Kako nisu postojale definitivne upute specifično za upjenjeni bitumen, odlučivanje dali ili ne prihvatiti takvu alternativu bilo je teško opravdati. Ne iznenađujuće, cestovne uprave su bile zainteresirane i na kraju je Odjel za transport provincije Gauteng (Gautrans) donio odluku da njihov Simulator teških vozila (HVS) ispita kolnik blizu Vereeniginga gdje je upjenjeni bitumen upotrebljen kao zamjena za bitumensku emulziju.

Savjet za znanstveno i industrijsko istraživanje (CSIR), radeći zajedno s Odjelom za transport provincije Gauteng (Gautrans), analizirao je rezultate tog pokusa i pripremio izvješće. Rezultati su pokazali da se sloj obrađen upjenjenim bitumenom ponaša na sličan način kao sloj obrađen s cementom. To nije bilo iznenađenje jer je količina korištenog cementa premašivala količinu korištenog upjenjenog bitumena. Kratko nakon toga, Asfaltna akademija je dobila sponzorstvo Južnoafričke asfaltno asocijacije i Odjela za transport provincije Gauteng kako bi kompilirala prvo izdanje „privremenih“ tehničkih uputa pod nazivom *“TG2, Projektiranje i korištenje materijala tretiranih upjenjenim bitumenom.”* Taj dokument se jako oslanjao na rezultate jednog pokusa provedenog Simulatorom teških vozila i paralelnog programa laboratorijskog ispitivanja.

TG2 je bio publiciran početkom 2002. godine. Iskazane sumnje da postupci projektiranja nisu točno odražavali ponašanje bitumenom stabiliziranih materijala obuhvaćene su uključivanjem „privremeni“ u naslovu zajedno s obećanjima o ažuriranju uputa čim budu dostupne dodatne informacije. U vrijeme publiciranja, oni koji su bili uključeni u zahvate s upjenjenim bitumenom su smatrali da je bolje imati „nešto“ napisano o upjenjenom bitumenu nego ništa. To se pokazalo ozbiljnom smetnjom za upjenjeni bitumen. U vrijeme publiciranja je bila nepoznata veličina ograničenja ugrađenih u te upute – te upute su stalno ukazivale da bi se stabiliziranjem samo s cementom postigao isti konačni proizvod i da bi bio ekonomičniji od mješavine s upjenjenim bitumenom. Međutim, primjenjujući preporuke iz GEMS ili ETB uputa Južnoafričke asfaltno asocijacije, rezultati su potpuno drugačiji za preostalu količinu bitumena. To je bilo očigledno netočno.

1.5 TG2 Drugo izdanje i razvoj tehnologije

Srećom, bilo je suosjećajnih pojedinaca na utjecajnim pozicijama koji su bili spremni poslušati sumnje onih koji su bili uključeni u projektiranje i izvedbu brojnih projekata gdje se upjenjeni bitumen pokazao vrlo uspješnim. Projektiranja za te projekte, i u Južnoafričkoj Republici i na drugim kontinentima, bili su stalno suprotni TG2 uputama.

U potrazi za daljnjim informacijama, Odjel za transport provincije Gauteng (Gautrans) je, uz sufinanciranje Odjela za transport provincije Western Cape, proveo drugi pokus Simulatorom teških vozila na dionici N7 ceste blizu Cape Town-a. Postojeći granulirani drobljeni kamen nosivog sloja je recikliran upjenjenim bitumenom prema odgovarajućem projektu mješavine koji je pripremljen pod nadzorom Prof. Jenkinsa sa Sveučilišta Stellenbosch (primjenjeno je 2,5% upjenjenog bitumena i 1% cementa). Rezultati su bili vrlo različiti od prvog pokusa Simulatorom teških vozila; stanje popuštanja se nije moglo postići s dostupnim proračunom. Taj rezultat je podupirao kritičnost prema TG2 i pokrenuo veliki istraživački projekt koji je uključio i zahvate s bitumenskom emulzijom i upjenjenim bitumenom kao „bitumenom stabilizirani materijali“ (BSM). Na projektu su bili uključeni Prof. Jenkins sa Stellenbosch University (aspekti projektiranja mješavine) i Dr. Fritz Jooste i Dr. Fenella Long iz tvrtke Sustavi modeliranja i analiza, autori Rubicon softvera (aspekti projektiranja kolnika).

Proveden je ogroman broj originalnih istraživanja a kompletiranje tog rada je potrajao skoro pet godina. Financiranje je osigurala Južnoafrička asfaltna asocijacija (Sabita) i Odjel za transport provincije Gauteng (Gautrans). Dokument s novim tehničkim uputama je publiciran u svibnju 2009. godine pod nazivom *TG2 Drugo izdanje, Bitumenom stabilizirani materijali, Upute za projektiranje i izvođenje bitumenskom emulzijom i upjenjenim bitumenom stabiliziranih materijala*.

Ta nova publikacija je promijenila sve u svijetu bitumenskih stabilizacija. Značajno je istaknuti da ona uključuje i bitumenske emulzije i upjenjeni bitumen uz iste zakone projektiranja. TG2 - Drugo izdanje zbog toga zamjenjuje Upute Južnoafričke asfaltna asocijacije (Sabita) 14 i 21 kao i originalnu publikaciju TG2. Bez obzira koristi li se bitumenska emulzija ili upjenjeni bitumen kao stabilizirajući medij, za oba se primjenjuju isti postupci projektiranja mješavine i kolnika i nova metoda klasificiranja bitumenom stabiliziranih materijala (BSM) ne uzima u obzir koji je stabilizirajući medij korišten u mješavini.

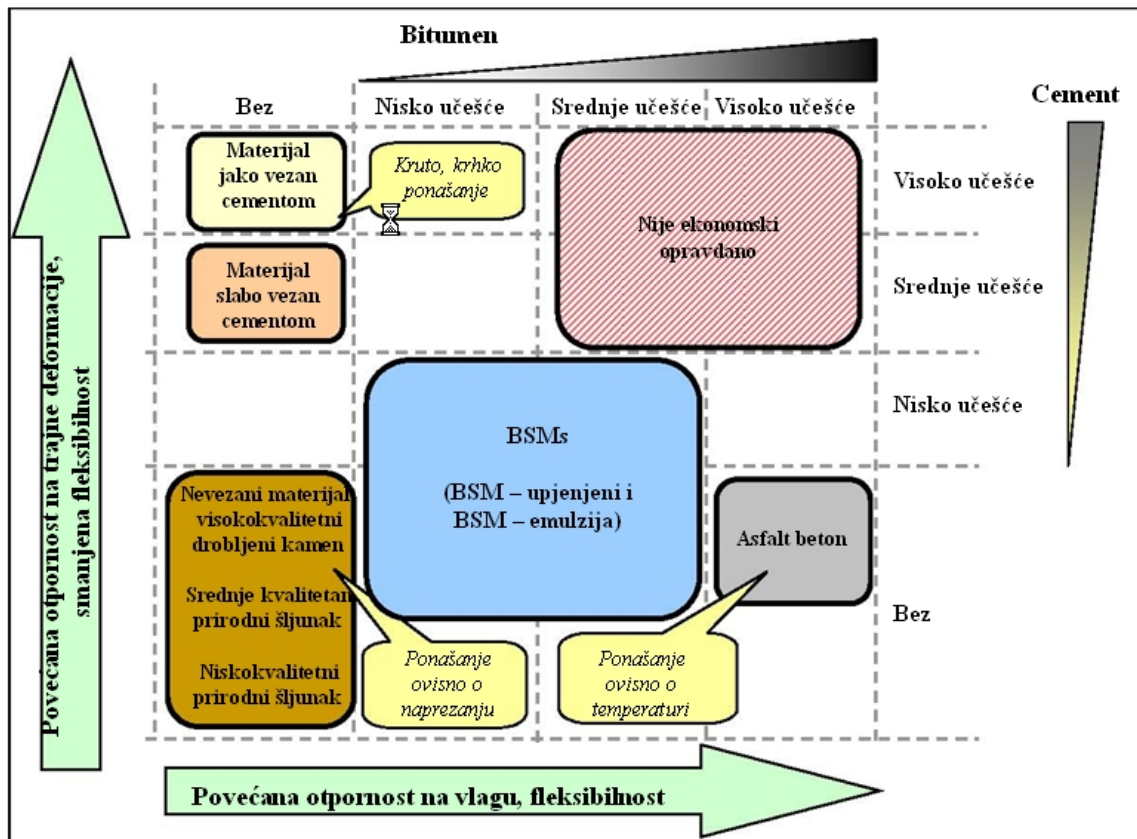
2. KARAKTERISTIKE I PONAŠANJE BITUMENOM STABILIZIRANIH MATERIJALA

Bitumenom stabilizirani materijali (BSM) su materijali za kolnike koji su obrađeni ili s bitumenskom emulzijom ili s upjenjenim bitumenom. Obrađeni materijali su ili obnovljeni materijali iz postojećeg kolnika ili novi materijali. Uključeni su granulirani materijali, prethodno cementom obrađeni materijali ili stari asfaltni (RA) slojevi. Tamo gdje se postojeći kolnik reciklira, stare površinske obrade ili asfaltni završni sloj se obično miješaju s doljnjim slojem i obrađuju da se formira novi nosivi ili donji nosivi sloj.

Količina preostale bitumenske emulzije ili upjenjenog bitumena koja se dodaje tipično ne premašuje 3% mase suhog agregata. U mnogim situacijama se također u mješavinu dodaje aktivni filer u obliku cementa ili hidratiziranog vapna. Sadržaj cementa ne bi trebao premašivati 1%, i nikada ne bi trebao premašiti postotak bitumenskog stabilizatora. Ako se dodaje više cementa nego bitumena, tada bi se materijal trebao smarati cementom obrađenim materijalom i trebale bi se koristiti relevantne upute za te vrste materijala.

Dodavanje bitumenske emulzije ili upjenjenog bitumena u proizvodnji bitumenom stabiliziranih mješavina rezultira povećanjem čvrstoće materijala i smanjenjem osjetljivosti na vlagu kao posljedica načina na koji se bitumen raspršuje između sitnih čestica agregata. „Nekontinuirana“ vezujuća priroda pojedinačnih čestica agregata čini bitumenom stabilizirane materijale različitim od svih drugih kolničkih materijala. Raspršeni bitumen mijenja posmična svojstva materijala, značajno povećavajući kohezijsku vrijednost i izazivajući malu promjenu unutrašnjeg kuta trenja. Zbijeni sloj bitumenom stabiliziranog materijala ima sadržaj šupljina sličan onome u granuliranom sloju a ne onome u asfaltu. Bitumenom stabilizirani materijali su zbog toga po prirodi granulirani i kao takvi se tretiraju tijekom izvedbe. Mehanizam oštećivanja za bitumenom stabilizirane materijale u strukturi kolnika, podvrgnute ponavljajućim osovinskim opterećenjima, je trajna deformacija a ne pojava pukotina uslijed zamora materijala. Bitumenom stabilizirani materijali su zbog toga više slični

granuliranim materijalima nego asfalbetonima. Ponašanje bitumenom stabiliziranih materijala u odnosu na druge materijale u kolniku ilustrirano je na slici 1.



Slika 1. Konceptualno ponašanje materijala kolnika (slika 1.2 u TG2 - Drugo izdanje)

3. TG2 - DRUGO IZDANJE

Istraživanja uključena u ovu publikaciju trajala su pet godina i bila su službeno prezentirana u svibnju 2009. godine na seriji seminara održanih u važnijim gradovima širom Južnoafričke Republike. Seminarima je prisustvovanje gotovo 300 delegata, što je bio pokazatelj visoke razine interesa pokazane od strane industrije. Dobivene povratne informacije sugeriraju da će ta tehnologija biti šire prihvaćena u budućnosti, uglavnom kao rezultat boljeg razumijevanja ponašanja materijala (naročito mehanizma oštećivanja), dopunjenog s novim pojednostavljenim postupcima projektiranja.

Također je bila dobrodošla i odluka da se tehnologija postavi na web stranicu Asfaltne akademije, omogućavajući da se upute na 136 stranica skinu u pdf formatu bez ikakvih troškova. Sve nove i nestandardne metode laboratorijskih ispitivanja za projektiranje bitumenom stabiliziranih mješavina su također stavljene na web stranicu, što je bolje nego da su uključene u same upute. To je bila mudra odluka jer će neke novije metode ispitivanja s vremenom iziskivati revidiranje kako se bude prikupilo više iskustva a mogu biti dodane i nove metode ispitivanja. Te promjene se mogu učiniti kada to bude potrebno, bez da upute prestanu biti ažurne.

Druga uloga web stranice je uključivanje programa za klasifikaciju materijala i projektiranja kolnika. Iako se ti programi ne mogu skinuti, korisnici mogu pristupiti web stranici u bilo koje vrijeme, logirati se i koristiti softver bez naplate. Input podaci i rezultati se mogu, međutim, pohraniti na vlastiti kompjutor. Kao kod metoda ispitivanja, ta mogućnost dopušta da se poboljšanja uvedu u bilo kojoj fazi. Web stranica također omogućava da se prati učestalost njenog korištenja i da se registriraju oni koji provedu najviše vremena koristeći programe, omogućavajući onima koji su odgovorni za održavanje i poboljšavanje softvera da kontaktiraju i prime povratne informacije od pravih ljudi. Web stranica također omogućava da se poruke odmah pošalju onima koji redovito koriste softver, savjetujući ih oko uočenih problema ili uključenih poboljšanja.

Predviđa se da će ta web stranica biti predmet stalnog razvoja kako sve više korisnika bude pružalo povratne informacije i kako se budu dobijale dodatne informacije od istraživačkih inicijativa. Već se razmatra i mogućnost uvođenju nekoliko jezičnih opcija, kao rezultat iskazanog interesa korisnika u različitim zemljama južne Amerike, Europe i Azije.

Upute uvode skraćenicu BSM za „bitumenom stabiliziran materijal“ i uključuju i materijal obrađen bitumenskom emulzijom pod nazivom “BSM-emulzija” i materijal obrađen upjenjenim bitumenom pod nazivom “BSM-pjena”. Brz obzira koji je zahvat usvojen, rezultirajući bitumenom stabilizirani materijal se iz perspektive projektiranja i ponašanja smatra generičkim proizvodom. Uključene su četiri glavna dijela:

- ✚ Pristup korištenju i projektiranju koji uvodi koncept bitumenske stabilizacije i pojašnjava razvoj tehnologije;
- ✚ Klasifikacija materijala i projektiranje mješavine koje uvode “projektno ekvivalentnu klasu materijala” (DEMAC) u svrhu klasifikacije, plus novi koncept “učinkovite dugoročne krutosti” (ELTS) za različite materijale korištene za izvedbu slojeva kolnika, uključujući bitumenom stabilizirane materijale;
- ✚ Strukturno projektiranje kolnika korištenjem novog “inteligentnog” pristupa korištenjem strukturnih brojeva nazvanog “Brojevi kolnika”; i
- ✚ Aspekti izvođenja koji opisuju temeljne zahtjeve za dobivanje traženog konačnog proizvoda na terenu, kao i kontrola kvalitete koju bi trebalo usvojiti.

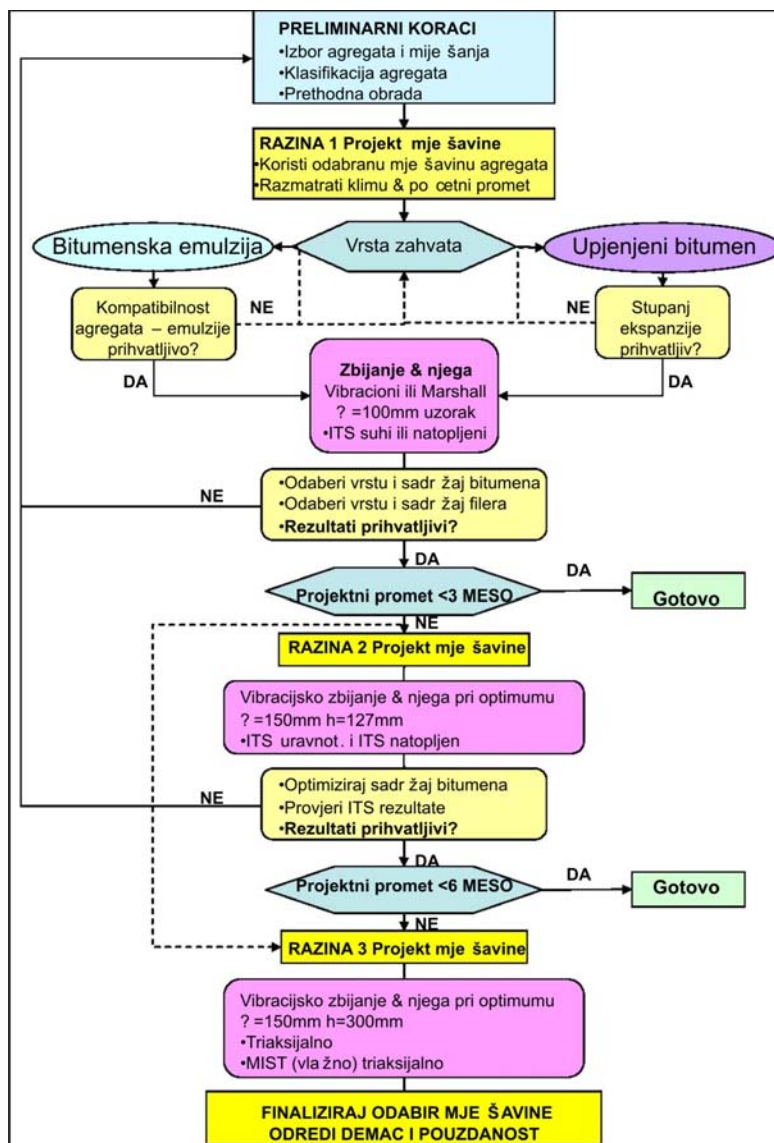
Različita poglavlja su namjerno skraćena da budu pristupačna korisnicima i održe usmerenost. Detalji koji su smatrani “faktorima zbog kojih se diže galama” bili su izostavljeni iz teksta i navedeni su u opsežnoj listi referenci ili su uključeni u jedan od četiri dodataka:

- ✚ Dodatak A: Sustav klasifikacije materijala, uključujući primjere,
- ✚ Dodatak B: Laboratorijska ispitivanja. Ovaj dodatak uključuje raspored svih ispitivanja koji se koriste u postupcima projektiranja zajedno s direktorijem koji navodi gdje se mogu naći različiti postupci mjerenja (tj. web stranica, ASTM).
- ✚ Dodatak C: Postupak strukturnog projektiranja korištenjem broja kolnika, uključujući primjer,
- ✚ Dodatak D: Kontrola izvedbe za obradu bitumenom, s fokusiranjem uglavnom na in situ postupak recikliranja, procedure i kontrole.

Međutim, najvažniji dio novog pristupa projektiranju je izravna povezanost između inženjerskih svojstava materijala u različitim slojevima kolnika i ponašanja kolnika, sve temeljeno na iskustvu (rezultati LTPP pregleda i pokusa Simulatorom teških vozila). Za klasifikaciju bitumenom stabiliziranih materijala u ujednu od tri klase koje određuju kako će se materijal ponašati u strukturi kolnika korišteni su rezultati ispitivanja dobiveni iz postupaka projektiranja mješavine, kao što je to pojašnjeno u narednim poglavljima.

3.1 Novi postupci projektiranja mješavine

Slika 2 prikazuje tri razine ispitivanja koje su usvojena za klasifikaciju proizvoda u jednu od tri razreda za bitumenom stabilizirane materijale. Razinu potrebnog ispitivanja uvjetuje projektni promet (zahtjev strukturnog kapaciteta); što je viša razina ispitivanja, to je veća razina postignute pouzdanosti.



Slika 2. Karta s tijekom projektiranja mješavine (slika 4.5 u TG2 - Drugo izdanje)

Sva projektiranja mješavine započinju s Razinom 1 ispitivanja koji koriste rezultate ispitivanja indirektno vlačne čvrstoće (ITS) na uzorku promjera 100 mm, koja ukazuje

na pogodnost bitumena za stabiliziranje, optimalni postotak bitumena i na potrebu za dodavanjem aktivnog filera. Uzorci se u pećnici izlažu temperaturi od 40°C (ispod točke omekšanja bitumena) i ispituju u suhom stanju da se dobije ITS_{SUH} vrijednost i nakon 24-satnog potapanja u vodi da se dobije ITS_{MOKAR} vrijednost. Temperatura uzoraka za sva ispitivanja indirektno vlačne čvrstoće je ista, 25°C.

Tamo gdje je projektni promet manji od 3 milijuna ekvivalentnih standardnih osovina (meso), rezultati ispitivanja indirektno vlačne čvrstoće se smatraju dostatnim za klasifikaciju bitumenom stabiliziranih mješavina. Odnos vlačne čvrstoće (TSR), dobiven izražavanjem ITS_{MOKAR} vrijednosti kao postotka ITS_{SUH} vrijednosti, koristi se kao indikator potrebe za, ili učinkovitosti dodavanja aktivnog filera (cementa ili cestovnog vapna, s maksimalnom dozvoljenom primjenom od 1%).

Tamo gdje je projektni promet između 3 i 6 milijuna ekvivalentnih standardnih osovina, provodi se Razina 2 ispitivanja na uzorcima promjera 150 mm visine 127 mm, ista kao ona korištena u CBR ispitivanju. Uzorci su pripremljeni da simuliraju uravnotežen sadržaj vlage (otprilike 50% optimalnog sadržaja vlage). Kao kod Razine 1, ispitivanja indirektno vlačne čvrstoće se provode da se odrede ITS_{URAVN} i $ITS_{NATOPLJEN}$ vrijednosti. Kako veći uzorci bolje odražavaju uvjete na terenu, ta ispitivanja se često koriste da se optimizira količina primjenjenog bitumena kroz ispitivanja koja se provode u intervalima od 0,1%. Rezultati tih ispitivanja se koriste da se poveća pouzdanost klasificiranja materijala iznad one koja se postiže s manjim uzorcima promjera 100 mm.

Trebalo bi naglasiti da je korištenje vibracionog čekića obvezno za zbijanje uzorka promjera 150 mm koji se ispituju u Razini 2 i 3 i preporučena za uzorke promjera 100 mm koji se ispituju u Razini 1.

Razina 3 projektiranja mješavine potrebna je za one kolnika kod kojih projektni promet prelazi 6 milijuna ekvivalentnih standardnih osovina (gdje se provodi Razina 3 ispitivanja, Razina 2 ispitivanja se ispušta). Triaksijalno ispitivanje se provodi pri tri različita ograničena pritiska da se odrede posmična svojstva (kohezija i kut trenja). Texas triaksijalni test (TTT) je modificiran za veće uzorke s poboljšanim odnosom visine i promjera (uzorci promjera 150 mm su visoki 250 mm). Slično TTT-u, ograničeni pritisak je postignut korištenjem gumenog mjehura (slično unutrašnjoj zračnici za male gume) obavijenog preko uzorka i stavljenog u metalni cilindar prije upumpavanja zraka da se postigne traženi ograničeni pritisak (ispitivanja se normalno provode pri tri pritiska: 50 kPa, 100 kPa i 200 kPa). Rezultati se onda koriste kao primarni input za klasifikaciju materijala s daleko većim stupnjem pouzdanosti.

Razvijeno je dodatno ispitivanje za mjerenje osjetljivosti bitumenom stabiliziranog materijala na vlagu. To "ispitivanje osjetljivosti na vlagu" (MIST) pulsira vodu u triaksijalne uzorke prije ispitivanja. Preostala vrijednost kohezije se onda koristi kao jedan od navažnijih parametara za potrebe klasificiranja.

Ključ za smislenost tih rezultata ispitivanja, od kojih svaki objašnjava samo dio ponašanja materijala, bio je usvajanje potpunog pristupa obuhvaćanjem svih dostupnih informacija, i za izvorni materijal i za stabilizirani proizvod. Klasifikacijski sustav koji su razvili Dr. Jooste i Dr. Long je utemeljen na neizravnoj logici i teoriji

sigurnosti. On pridodaje faktor sigurnosti (CF) svakom ispitivanju koje indicira osnovna svojstva materijala (posmičnu čvrstoću i krutost), kao faktor sigurnosti koji odražava subjektivnu pouzdanost mogućnosti ispitivanja da služi kao točan indikator. Taj postupak omogućava da se sve informacije o materijalu usporede i rangiraju, dajući na taj način dokaz koji podržava specifičnu klasifikaciju. (Klase materijala definiraju ponašanje različitih materijala u vidu posmične čvrstoće i krutosti, koje su osnovni zahtjevi za postupak projektiranja kolnika.)

Prema tome, TG2 - Drugo izdanje klasificira materijale stabilizirane bitumenom u tri razreda, zavisno o kvaliteti izvornog materijala, učinkovitosti stabilizacije i veličine projektnog prometa. Tri razreda su:

- ✚ **BSM1:** Taj bitumenom stabilizirani materijal ima visoku posmičnu čvrstoću i normalno se koristi za nosivi sloj kolnika kod projektnih prometa preko 6 MESO. Izvorni materijal je tipično granulirani drobljeni kameni materijal ili stari asfalt.
- ✚ **BSM2:** Taj bitumenom stabilizirani materijal ima umjereno veliku posmičnu čvrstoću i normalno se koristi za nosivi sloj kolnika kada je projektni promet manji od 6 MESO. Izvorni materijal je tipično prirodni šljunak dobre kvalitete, često pomiješan sa starim asfaltom.
- ✚ **BSM3:** Taj bitumenom stabilizirani materijal se tipično sastoji od zemlje-šljunka i/ili pijeska stabiliziranog s većim sadržajem bitumena. Ima relativno nisku posmičnu čvrstoću i pogodan je za primjenu za samo relativno niske razine prometa.

Tablica 1 sumarno prikazuje granične vrijednosti za različite rezultate ispitivanja, koja su primarni indikatori korišteni za klasificiranje bitumenom stabiliziranih materijala u jednu od tri klase. Također su prikazane vrijednosti faktor sigurnosti (CF) za svako ispitivanje.

Tablica 1. Ključni indikatori i ispitivanja za klasifikaciju bitumenom stabiliziranih materijala (iz tablica A.8 u TG2 - Drugo izdanje)

Ispitivanje / indikator	Vrsta materijala	BSM1	BSM2	BSM3	CF
Kvaliteta materijala prije stabiliziranja					
CBR natopljenog materijala	Drobljeni kamen	> 80	25 do 80		0.4
	Prirodni šljunak		> 25	10 do 25	
Postotak < 0.075mm	Svi	2 do 12	5 do 20	3 do 40	0.35
Indeks plastičnosti	Drobljeni kamen	< 6	< 10	< 12	0.25
	Prirodni šljunak	< 10	6 do 12	< 15	
Ispitivanja nakon stabilizacije bitumenom					
ITS _{SUH}	Svi (uzorak promjera 100mm)	> 225	175 do 225	125 do 175	0.1
ITS _{MOKAR}		> 100	75 do 100	50 do 75	0.1
ITS _{SURAVNOT}	Svi (uzorak promjera 150mm)	> 175	135 do 175	95 do 135	0.15
ITS _{NATOPLJEN}		> 150	100 do 150	60 do 100	0.15
Kohezija	Svi (uzorak promjera 150mm)	> 250	100 do 250	< 100	0.45
Kut trenja		> 40	30 do 40	< 30	0.4
Preostala kohezija		> 75	60 do 75	50 do 60	0.45

Pouzdanost u pridodavanju klase materijala je ovisna o dostupnom broju rezultata ispitivanja i faktoru sigurnosti (CF) pridodanom svakom ispitivanju. Razina pouzdanosti u ocijenjivanju se može kvantificirati zbrajanjem pojedinačnih vrijednosti

faktora sigurnosti (CF), na taj način dajući indirektni indikator pouzdanosti odabrane klase. Tablica 2 daje upute predložene u TG2 - Drugom izdanju za ocjenjivanje pouzdanosti pridruženoj klasifikaciji materijala.

Tablica 2. Pouzdanost klasificiranja materijala (iz tablice 3.4 u TG2 - Drugo izdanje)

Ukupna sigurnost	Pouzdanost u klasifikaciji
< 0,3	Vrlo niska pouzdanost. Jako se preporuča prikupiti više podataka, da se omogući pouzdanija ocjena.
0,3 do 0,5	Niska pouzdanost. Materijali pogodni za kolnike izložene malom prometu (tipično ruralne ceste).
0,5 do 0,7	Srednja pouzdanost. Materijali pogodni za kolnike koji čine sekundarnu cestovnu mrežu (poveznice gradova).
> 0,7	Visoka pouzdanost. To je minimalno preporučljivo za važne kolnike koji su izloženi relativno teškom prometu, naročito tamo gdje se projektiranje rehabilitacije kolnika potpuno oslanja na kvalitetu i stanje postojećih slojeva kolnika.

Na primjer, ako su rezultati Razine 1 projektiranja mješavine (ITS_{SUH} i ITS_{SMOKAR} vrijednosti) jedine dostupne informacije, kumulativna sigurnost indicirane klase materijala bi bila 0,2. Ako je CBR vrijednost izvornog materijala poznata i veličina uzorka uključuje šest rezultata, kumulativna sigurnost će se porasti na 0,6. Uključivanje rezultata ispitivanja plastičnosti će povećati kumulativnu sigurnost na 0,85 što će omogućiti visoku razinu sigurnosti kod klasificiranja materijala. Alternativno, ako su jedina provedena dodatna ispitivanja ona za Razinu 3 projektiranja mješavine (triaksijalna), rezultati će dati kumulativnu sigurnost preko 1, omogućavajući da materijal bude klasificiran s totalnom sigurnošću.

3.2 Novi pristup projektiranju kolnika

Strukturno projektiranje kolnika u TG2 - Drugo izdanje koristi pristup temeljen na znanju koji koristi *broj kolnika (PN)* temeljen na konceptu *AASHTO strukturnog broja*. Međutim, nedostaci metode *strukturnog broja* su uzeti u obzir pri razvoju ove PN metode.

Ova metoda je bila temeljena na obilju podataka prikupljenih iz brojnih kolnika u eksploataciji gdje vrsta i detaljnost podataka sugeriraju usvajanje relativno jednostavne metode (ona također isključuje korištenje mehanističko-empirijskog pristupa projektiranju).

Dodatno na „dobro pristajanje” terenskim podacima, ova metoda je robusna i, za razliku od prethodne, ovom metodom se ne može lako manipulirati da se dobiju neodgovarajuća projektiranja. Ona je u suštini metoda „inteligentnog strukturnog broja” koja je primjenjiva za sve kolnike koji se uobičajeno koriste u Južnoafričkoj Republici (i drugdje) a koji su izvedeni iz više granuliranih slojeva i stabiliziranih materijala i sa samo relativno tankim asfaltnim slojevima. Metoda počiva na osnovnim dobro ustanovljenim „pravilima kolnika” koja odražavaju principe ponašanja kolnika. Kao što to najveći broj praktičara zna, pridržavanje tih osnovnih pravila će osigurati odgovarajuće rješenje projektiranja kolnika.

Ta pravila su prikazana u dvije glavne grupe, ona koja se odnose na sustave kolnika općenito i ona specifična za određeni sloj kolnika.

Pravila koja se odnose na sustave kolnika:

- ✚ Strukturni kapacitet kolnika je uvjetovan sposobnošću raspodjele opterećenja u različitim slojevima kolnika u kombinaciji s potporom posteljice ispod kolnika
- ✚ Stanje potpore posteljice ispod kolnika (in situ karakteristike krutosti) je polazna točka za projektiranje kolnika (posteljica je čimbenik koji određuje defleksiju pod opterećenjem koja, zauzvrat, uvjetuje rezultirajuću razinu naprezanja i deformacija u različitim slojevima kolnika)
- ✚ Kada kolnik ima samo tanke površinske slojeve, nosivi sloj preuzima najveća naprezanja i postaje najkritičniji sloj u kolniku. Potrebno je iskustvo da se u takvim kolnicima osigura da se pogodna vrsta materijala koristi za izvedbu nosivog sloja, posebno tamo gdje se mogu očekivati teška prometna opterećenja.

Pravila koja se odnose na specifične slojeve kolnika:

- ✚ Sposobnost raspodjele opterećenja pojedinog sloja kolnika je kombinacija debljine tog sloja i njegove in situ krutosti (poznata kao „efektivna dugoročna krutost”, (ELTS)).
- ✚ ELTS sloja zavisi o vrsti i razredu materijala u sloju, kao i o njegovoj relativnom položaju unutar kolničke strukture i potpore sloja koji je ispod.
- ✚ Krupni materijali (i prirodni materijali i bitumenom stabilizirani materijali koji nisu kontinuirano vezani) djeluju na način naprezanja-ukrućivanja kada su podvrgnuti opterećenju (ovisnost o naprezanju). Efektivna dugoročna krutost (ELTS) pojedinog sloja je određena kvalitetom materijala i relativnom krutosti doljnjeg potpornog sloja. ELTS tih materijala se povećava s povećanom krutosti doljnje potpore sve dok se ne dosegne granica, određena kvalitetom materijala. Ta pojava je poznata kao „modularni pokazatelj”.
- ✚ Sitni materijali kada se izlože opterećenju omekšavaju pod pritiskom. ELTS tih materijala je jako ovisan o kvaliteti materijala i režimu vlage (posebno klime). Ukupna debljina kolnika ima značajan utjecaj na ELTS materijala posteljice, koja ima tendenciju gubitka krutosti (omekšavanja) sa smanjivanjem debljine kolnika iznad posteljice.

Za bitumenom stabilizirane materijale se pretpostavlja da se ponašaju na sličan način kao krupni materijali ali s većom kohezivnom čvrstoćom. Iako to nije potvrđeno, za kohezivnu čvrstoću se pretpostavlja da smanjuje posljedice ponavljanja opterećenja i zbog toga se s vremenom može pojaviti određeno omekšanje. Međutim, takav postotak omekšanja je uglavnom određen s krutosti podloge, koja određuje stupanj posmika u sloju. Međutim, zahvaljujući višoj kohezivnoj čvrstoći, ti slojevi su manje osjetljivi na čvrstoću podloge nego nevezani granulirani materijali (viša granica modularnog pokazatelja).

Tablica 3 sumira granice primjenljive za modularni pokazatelj i pravila maksimalne krutosti.

Tablica 3. Modularni pokazatelj i granice maksimalne krutosti za klase materijala (iz tablice C.4 TG2 - Drugo izdanje)

Vrsta materijala	Klasa materijala	Ključni podaci	Granica modularnog pokazatelja	Maksimalna krutost (MPa)	Osnovna pouzdanost
Asfalt po vrućem postupku	HMA		5.0	2500	1.0
Zalijevanje površine	S1 – S6	Zatvaranje kamenim posipom	2.0	800	n/a
Bitumenom stabilizirani	BSM 1	> G4 materijal	3.0	600	1.0
	BSM 2	< G4 materijal	2.0	450	0.7
Cementom stabilizirani	C3	1.5 < UCS < 3.0	4.0	550	0.6
	C4	0.75 < UCS < 1.5	3.0	400	0.4
Granulirani drobljeni kamen	G1	88% gustoća	2.0	700	1.1
	G2	102% mod AASHTO	1.9	500	0.8
	G3	100% mod AASHTO	1.8	400	0.7
Prirodni šljunak	G4	CBR > 80	1.8	375	0.2
	G5	CBR > 45	1.8	320	0.1
	G6	CBR > 25	1.8	180	-2.0
Tlo	G7	CBR > 15	1.7	140	-2.5
	G8	CBR > 10	1.6	100	-3.0
	G9	CBR > 7	1.4	90	-4.0
	G10	CBR > 3	1.2	70	-5.0

3.3 Projektiranje kolnika korištenjem PN postupka

Privlačnost tog postupka leži u njegovoj jednostavnosti. Postupak započinje definiranjem strukture kolnika u vidu debljina slojeva i klase materijala za svaki sloj.

Korak 1. Određivanje osnovne krutosti posteljice na temelju klase materijala (tablica 5). Ona se onda prilagođava za klimatsku regiju (vlažna ili suha) i za ukupnu debljinu kolnika. Rezultirajuća krutost je ELTS posteljice – polazna točka za daljnji postupak.

Korak 2. Za svaki sloj se određuje modularni pokazatelj i maksimalna dopuštena krutost za klasu materijala pridodanu sloju (tablica 5).

Korak 3. Za svaki sloj, idući prema gore od posteljice, treba pomnožiti krutost donjeg sloja s modularnim pokazateljem pridodanog u Koraku 2 i usporediti ga s maksimalnom dopuštenom krutosti (također pridodanoj u koraku 2). ELTS za sloj je niža od te dvije vrijednosti.

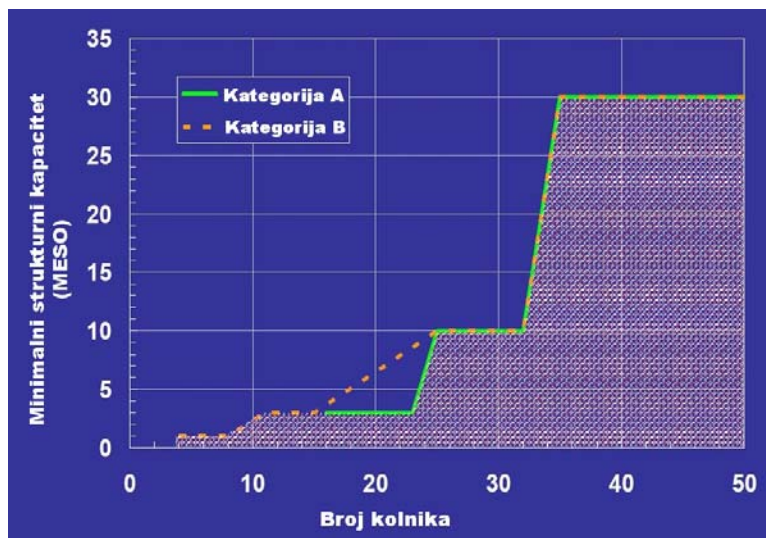
Korak 4. Određivanje faktora osnovne pouzdanosti za nosivi sloj (tablica 5). Cementom stabilizirani sloj također traži prilagodbu određenu debljinom sloja (slojevi < 300 mm se prilagođavaju prema dolje).

Korak 5. Za svaki sloj treba izračunati doprinos sloja množenjem debljine sloja (u mm) s ELTS i dijeljenjem s 10.000 da se brojevi drže u praktičnim relacijama. Nosivi i cementni slojevi su također pomnoženi s faktorom za podešavanje (korak 4).

Korak 6. Dodaju se doprinosi individualnih slojeva da se odredi PN za kolnik.

Korak 7. Određivanje strukturnog kapaciteta iz graničnog dijagrama za projektiranje prikazanog na slici 3. Treba razumjeti da je ova granica utvrđena pomoću LTPP podataka. Maksimalno opterećenje kojemu je izložen bilo koji kolnik uključen u set podataka je bilo 30 meso. Stoga je granica prometnog opterećenja za taj postupak

projektiranja 30 meso, što korespondira s PN vrijednosti 35. Kada PN vrijednosti premašuju 35, strukturni kapacitet kolnika će biti veći od 30 meso. Međutim, razmatrajući nagib granice između PN vrijednosti 32 i 35, nije preporučljivo da se ekstrapolira vrijednost. Tada bi se trebali koristiti alternativni postupci projektiranja (tj. mehanistički postupci temeljeni na naprezanjima; treba se referencirati na Dodatak 3 u Uputama za Wirtgen hladno recikliranje).

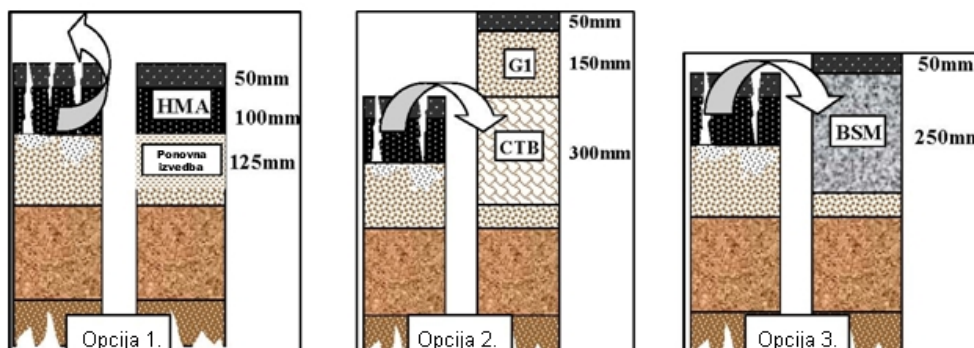


Slika 3. Karta s granicom krivuljom projektiranja (iz slike C.8 TG2 - Drugo izdanje)

4. EKONOMSKE KORISTI I KORISTI ZA OKOLIŠ

Rad prezentiran na godišnjem TRB sastanku u Washingtonu DC je objasnio prirodu bitumenom stabiliziranih materijala, zajedno s razlozima zašto se ti materijali sve više koriste u gradnji i rehabilitaciji fleksibilnih kolnika širom svijeta.

Koristi od korištenja bitumenom stabiliziranih materijala u strukturi kolnika su prikazane usporedbom različitih opcija za rehabilitaciju kolnika istih strukturnih kapaciteta. Tri odabrane opcije (ilustrirane na slici 4) predstavljaju različite tehnologije.



Slika 4. Opcije za rehabilitaciju kolnika koje osiguravaju isti vijek služnosti

Opcija 1 iziskuje uklanjanje glodanjem oštećenog asfalta, zatim popravak gornjeg nosivog sloja ispod uklonjenog asfalta prije ugradnje novih slojeva asfalta. Taj postupak rehabilitacije je dosta popularan jer se može izvesti uz minimalno ometanje prometa (naročito ako se zatvaranje ceste može razmatrati samo izvan vršnih sati). Međutim, ova opcija je relativno skupa i rezultira značajnim prijevozom i deponiranjem materijala.

Opcija 2 ponovno koristi postojeće slojeve kolnika koji se recikliraju s cementom i predstavljaju novi donji nosivi sloj. Tada se izvodi novi nosivi sloj (ili korištenjem granuliranog kamenog materijala ili asfalta) i relativno tanki asfaltni završni sloj. Postupak korištenja nosivog sloja od drobljenog kamenog materijala, usvojen u ovom primjeru, popularan je u nekim dijelovima svijeta, prvenstveno radi relativno male cijene u usporedbi s opcijom 1. Međutim, tijekom izvođenja radova se promet mora preusmjeriti tijekom dužeg razdoblja (nekoliko tjedana) da se omogući izvedba te vrste kolnika.

Opcija 3 ponovno koristi postojeće slojeve kolnika koji se recikliraju s bitumenom i predstavljaju novi bitumenom stabilizirani nosivi sloj, iziskujući samo relativno tanki asfaltni završni sloj. Taj postupak rehabilitacije je postao popularan jer je relativno jeftin u usporedbi s prve dvije opcije i može se izvoditi na dijelovima širine kolnika a promet se može normalno pustiti odmah nakon što su radovi dovršeni.

4.1 Ekonomska usporedba

Procjena vrste i obima radova održavanja tijekom dvadeset-godišnjeg vijeka kolnika sugeriraju da bi se asfaltni završni sloj trebao zamijeniti svakih 7 do 8 godina za sve opcije. Obzirom na osjetljivost na prodiranje vode, dodatni 35 mm debeli asfalt bi bio potreban za Opciju 2 nakon otprilike 14 godina. Na kraju vijeka služnosti se određuju potrebne mjere rehabilitiranja kolnika, temeljene na stanju koje opisuje propali kolnik:

Opcija 1 (stanje propalog kolnika: pukotine izazvane zamorom kroz cijelu debljinu asfalta na preko 10% dužine). Rehabilitirati nanošenjem 60 mm debele asfaltne presvlake plus nova završna asfaltna površina;

Opcija 2 (stanje propalog kolnika: vlaga je uzrokovala oštećenje tampona od drobljenog kamenog materijala s udarnim jamama koje se pojavljuju na 10% dužine ceste). Rehabilitirati recikliranjem da se izvede bitumenom stabilizirani nosivi sloj plus nova završna asfaltna površina (slično kao rehabilitacija korištenjem Opcije 3);

Opcija 3 (stanje propalog kolnika: trajne deformacije dubine 20 mm na 10% ukupne dužine tragova kotača). Rehabilitirati glodanjem završnog asfaltnog sloja, izvođenjem izravnavajućeg asfaltnog sloja (35 mm nominalne debljine) i izvođenjem nove završne asfaltna površine.

Troškovi građenja su obično specifični za svaku zemlju, a u nekim slučajevima i regionalno specifični. Usporedba troškova građenja kroz novčani iznos nije zbog toga zadovoljavajući način uspoređivanja tri opcije. Određivanje jediničnih troškova po kilometru kolnika tijekom životnog ciklusa i svođenje troškova na relativni indeks daje, međutim, bezdimenzionalnu osnovu za usporedbu. Sukladno tome, svakoj opciji je pridružena cijena koristeći prosječne jedinične ugovorne cijene u južnoafričkoj

građevinskoj industriji (izražene u US\$), koje su zatim podijeljene s troškom opcije 1 da se dobije troškovni indeks, kao što je to prikazano u tablici 4.

Tablica 4. Trošak po kilometru uz sadašnji (2009. godine) odnos (u US\$)

Opcija rehabilitacije	Početna rehabilitacija	Intervencija nakon 7 godina	Intervencija nakon 14 godina	Rehabilitacija nakon 20 godina	Ukupni trošak u 2009.	Troškovni indeks
Opcija 1	356,500	75,400	75,400	233,506	740,806	100
Opcija 2	331,875	75,400	153,950	191,825	753,050	102
Opcija 3	191,825	75,400	75,400	153,950	496,575	67

Taj primjer ukazuje na to da je recikliranje s bitumenom za oko 30% troškovno učinkovitije nego druge dvije opcije kod kojih inicijalna rehabilitacija znači 20-godišnju služnost.

4.2 Usporedba potrošnje energije

Povećana razina svijesti o klimatskim promjenama čini da društvo vodi računa o opotrošnji energije. Građevinska industrija nije izuzetak te je provedeno nekoliko studija da se procijeni utrošena količina energije, naročito pri gradnji cesta za koju se koriste veliki strojevi i troše se ili prebacuju velike količine materijala.

Detaljni primjer realiziran u Novom Zelandu u 2008. godini (referenca 8, Patrick) izvještava o podacima o utrošku energije za različite aktivnosti građenja. Korištenjem tih podataka je realiziran sličan primjer gore opisanom sa svrhom da se procijeni ukupan utrošak energije potreban za svaku opciju tijekom dvadeset-godišnjeg razdoblja. Rezultati su prikazani u tablici 5.

Tablica 5. Utrošena energija po kilometru (u GJ)

Opcija rehabilitacije	Početna rehabilitacija	Intervencija nakon 7 godina	Intervencija nakon 14 godina	Rehabilitacija nakon 20 godina	Ukupna energija	Energetski indeks
Opcija 1	482.5	71.3	71.3	184.2	809.3	100
Opcija 2	545.3	71.3	154.4	276.9	1,047.9	129
Opcija 3	276.9	71.3	71.3	154.4	573.9	71

Ovaj primjer ukazuje da su za opciju kod koje se koristi bitumenom stabilizirani materijal (opcija 3) kombinirane aktivnosti građenja tijekom ciklusa od dvadeset godina energetski gotovo 30% učinkovitije nego za opciju 1 koja je, zauzvrat, energetski oko 30% učinkovitija od opcije 2.

5. ZAKLJUČCI

Publiciranje TG2 - drugo izdanje je dokazalo novi pogled na ponašanje bitumenom stabiliziranog materijala i uvelo nove odvojene klase materijala za korištenje u kolničkim strukturama. Potvrđujući da je konačni proizvod (materijal) sličan bez obzira da li se bitumen koristi u emulziranom ili upjenjenom stanju, ova publikacija je učinkovito eliminirala sukob lobija koji zastupaju bitumenske emulzije ili upjenjeni bitumen. Dodatno, TG2 - drugo izdanje je osiguralo relativno jednostavan set uputa

za kompetentno projektiranje i građenje kolnika koji sadrže bitumenom stabilizirane materijale.

Češće korištenja recikliranja postojećih materijala iz kolnika svodi na minimum korištenje novih materijala, na taj način osiguravajući i ekonomske koristi i koristi po okoliš. Dodavanje stabilizirajućeg sredstva na bazi bitumena poboljšava ponašanje recikliranog materijala, osiguravajući i njegovu fleksibilnost i trajnost. Zbog trajnosti, bitumenom stabilizirani materijal nudi niži trošak tijekom životnog vijeka kolnika kroz manje potrebe za održavanjem i ostalim intervencijama koje su potrebne da se postigne prihvatljiva razina služnosti tijekom projektnog vijeka kolnika, kao i niži trošak rehabilitiranja jednom kada se dosegne za to predviđeno stanje. Prava vrijednost bitumenom stabiliziranog materijala tek sada počinje dobivati pažnju koju zaslužuje. Kako se korištenje bitumenom stabiliziranog materijala povećava, povećavat će se i sredstva za istraživanje, omogućavajući toj tehnologiji da se širi kako se stječe sve veće povjerenje u te materijale, zajedno s poboljšanim razumijevanjem i mogućnostima tih materijala.

U međuvremenu, briga za očuvanje okoliša dobiva na važnosti kod gradnje kolnika, što je posljedica globalne brige zbog promjena klime. Povećana pažnja usmjerena na utjecaj gradnje i rehabilitiranja cesta na okoliš učinila je dostupnim dovoljne količine podataka koji se mogu koristiti za analize i donošenje odluka. Odluke temeljene samo na početnim troškovima građenja u budućnosti će biti zamjenjene sa složenijim modelom koji uključuje i potrošnju energije i troškove tijekom vijeka kolnika. Primjer naveden u ovom radu za tri realistične opcije koje se danas koriste za rehabilitaciju cesta je pokazao ekonomske koristi i koristi po okoliš koje mogu proisteći iz usvajanja rješenja s bitumenom stabiliziranim materijalima.

REFERENCES

1. Long, F.M. and Jooste, F.J. Summary of LTPP Emulsion and Foamed Bitumen Treated Sections. *Technical memorandum compiled on behalf of SABITA and GDPTRW. Modelling and Analysis Systems, Cullinan, South Africa.* (Gautrans report: CSIR/BE/ER/2007/0006/B).
2. Wirtgen Cold Recycling Manual, 2nd Edition, ISBN 3-936215-05-7, *Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany*, November 2004
3. Collings, D.C. and Jenkins, K.J. Characteristics of Materials Stabilised with Foamed Bitumen. *Eurobitume Conference*, Copenhagen, Denmark. May 2008
4. Paige-Green P. and Ventura D. Durability of Foamed Bitumen Treated Basalt Base Courses. *Council for Scientific and Industrial Research, Transportek Division.* Contract Report: CR-2004/08, Pretoria, South Africa. 2004
5. Long, F.M. and Jooste, F.J. A Materials Classification and Knowledge Based Structural Design Method for Pavements with Bituminous Stabilised Materials. *Conference for Asphalt Pavements in Southern Africa CAPSA 2007*, Gaborone, Botswana.

6. Technical Recommendations for Highways Series, TRH 4 (draft). The Design of Flexible Pavements for Interurban and Rural Roads. *Committee of State Road Authorities*, Pretoria, South Africa. 1996
7. Technical Recommendations for Highways Series, TRH 14. Guidelines for Road Construction Materials. *Committee of State Road Authorities*, Pretoria, South Africa. 1985
8. Patrick, J. and Moorthy, H. Quantifying the Benefits of Waste Minimisation in Road Construction. *Recycling and Stabilisation Conference*, New Zealand Institute of Highway Technology, June 2008, Takapuna Beach, Auckland, New Zealand.
9. Loizos, A. and Papavasiliou, V. In situ Characterization of Pavement Materials Stabilised with Foamed Asphalt and Cement. *International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials ICACPSEM 2007*, Athens, Greece.
10. Interim Report – Construction completion for cold-in-place recycling, Placer 80 PM 14.3 / 33.3, *California Department of Transportation (Caltrans)*, North Region Materials, Marysville, Ca, August 2006
11. Theyse, H.L., de Beer, M. and Rust, F.C. Overview of the South African Mechanistic Pavement Design Analysis Method. Paper Number 961294, *Annual Transportation Research Board Meeting, Washington, D.C.* January 1996
12. Collings, D.C. Bitumen Stabilised Materials – A New Dimension in Flexible Pavements. Paper Number 09-3733, *Annual Transportation Research Board Meeting, Washington, D.C.* January 2009
13. Asphalt Academy, TG2, Second Edition, Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials. ISBN 978-0-7988-5582-2, *Asphalt Academy, Pretoria, South Africa.* May 2009
14. Collings D., Lindsay R. and Shunmugam K. 2004. LTPP Exercise on a Foamed Bitumen Treated Base – Evaluation of Almost 10 Years of Heavy Trafficking on MR 504 in KwaZulu-Natal. *Paper presented at the 8th Conference on Asphalt Pavements in Southern Africa (CAPSA'04)*, Sun City, South Africa