

Ceste

Gradnja prometnic

Gradnja prometnic sestoji iz:

- a) spodnjega ustroja – SU (zemeljska dela),
- b) objektov (premostitveni objekti /mostovi, viadukti, podvozi, nadvozi/, oporni in podporni zidovi ter predori),
- c) zgornjega ustroja – ZU (voziščne konstrukcije voznih površin /vozišče in kolesarske steze ter pločniki/, naprav za odvodnjavanje in opreme ceste, parkirišča, objekti za potrebe vzdrževanja i.pd.)

ZGORNJI USTROJ - VOZIŠČNA KONSTRUKCIJA (VK)



Objekti pri prometnicah so posebne konstrukcije in obravnavane pri drugih predmetih.

Zgornji ustroj je pri prometnicah gradbena konstrukcija, pri kateri uporabljamo posebej prirejene izbrane materiale, da bi zagotovili izpolnjevanje kvalitete, vzdržljivosti in trajnosti te konstrukcije. Temu primerni so tudi cene teh materialov, ki so bistveno (tudi po 10x) večje od cen materialov za spodnji ustroj. Zato je treba VK načrtovati skrbno in v zadostnih debelinah, ker bi nam preskromne dimenzije VK propadle zelo hitro. Propadanje VK namreč ni linearno. Iz tega tudi sledi, da je treba vzdrževanje VK izvajati sproti in natančno, ker samo s tem preprečimo progresivno propadanje te konstrukcije.

Planum SU kot osnova za kvalitetno izvedbo VK

Vgrajevanje posameznih materialov v VK se izvaja po plasteh (slojih) in praviloma strojno. Vsako spreminjanje debelin posameznih plasti pomeni dodatne gradbene stroške in zamudo časa pri izvedbi del. Zato je smotno, da so debeline posameznih plasti v VK enotne na daljših odsekih prometnic. Iz tega pogoja izhaja, da je treba že pri izvedbi SU na njeni površini (planumu) zagotoviti zahtevano ravnost (odstopanje do 2,5cm pri merjenju z merilno letvijo dolžine 4m in največ 2,0cm glede na v načrtu izračunane višine), nagib za odvodnjavanje planuma (pri vezljivih materialih 4%) in zahtevano zgoščenost (Proctor 98%) ter nosilnost ($E_v > 20 - 60 \text{ MN/m}^2$ v odvisnosti od doseganja te nosilnosti na daljšem odseku).

Kadar na posameznih krajših odsekih ceste (ali železnice) pri gradnji SU (n.pr. pri gradnji z vezljivimi zemljinami) ne moremo doseči zadostne nosilnosti, moramo zaključno plast (sloj) SU izvesti s kamnitim materialom (nasip kamnitega materiala – NKM). To plast imenujemo posteljica (Po). Premer največjega zrna v tej plasti je lahko 300mm (bolje 200mm), največja debelina plasti pa 50cm. Najmanjša debelina te (in vsake druge) plasti je 2/3 velikosti polmera največjega izbranega zrna, torej okoli 20 cm. Običajno je ta debelina minimalno 32cm.

Pri vgrajevanju posteljice je treba na stikih z odsekom z boljšo nosilnostjo (torej, ki n.pr. ne potrebuje dodatne posteljice ali je ta tam tanjša) prehod izvesti v nagibu 10% - vzdolžno in/ali prečno, odvisno kam se »izklinja«.

Najpogosteje se ta »izklinjanja« nahajajo na prehodih iz ukopa na nasip in obratno.

S pravilno izbiro zaključka SU zagotovimo t.i. »homogenost planuma« na daljšem odseku ceste ali železnice in s tem omogočimo vgrajevanje enako debelih plasti VK.

Voziščne konstrukcije v zgodovini

Že stari narodi so poznali razdiralne vplive, ki jih ima kolo vozila na vozno površino. Vedeli so tudi, da so ti vplivi znatno bolj izraziti, če so vozila težja (večji kolesni pritisk) ali če je vozna površina namočena. Zato so gradili te površine, ki so bile prvotno namenjene prvenstveno vojaškim potrebam, iz kamnitih materialov (večja odpornost in nevezljivost) in poskrbeli za primerno odvodnjavanje vozne površine pa tudi samega telesa voziščne konstrukcije (obcestni jarki).

Zaključno plast (obrabno plast) so izvajali praviloma tlakovano. Po nekaterih ne povsem potrjenih podatkih so v prazgodovini Babilonci (2600 let pred začetkom štetja) za ta namen uporabljali celo naravni asfalt.

Slike različnih profilov cest v zgodovini.

Lastnosti voziščne konstrukcije

V teh izvajanjih se omejujemo le na cestne VK. Železniške VK so namreč tipizirane in točno določene, saj so tudi zahteve tam drugačne od cestnih. Vozila so standardizirana in tipizirana in poznan je sistem obremenjevanja podlage, česar na cestah ni.

Glede na njen namen od sodobne cestne VK zahtevamo:

- a) trdnost in nosilnost (prevzem prometne obtežbe),
- b) ravnost (izključitev dinamičnih vplivov in udobnost vožnje),
- c) hrapavost (trenje v povezavi s hrupom),
- d) brezprašnost (udobnost in zaščita okolja) in
- e) ekonomičnost (izbor materialov in potrebne dimenzije).

V tem prispevku se omejujemo le na prvo zahtevo, saj so vse ostale odvisne le od izbranih materialov ali/in točnosti izvedbe del.

Vrste vozišč

a) Klasična vozišča: kamnita (nasuta ali tlakovana)

- McAdam – večplastni (triplastni) sistem drobljenca enakomerne zrnivosti, zgoraj drobnejši, spodaj bolj grob, celotna debelina nad 25 cm
- Telford – podlaga iz zloženih kamnitih prizem, nad njo uvaljani grobi drobljenec in zgoraj zaščitnaplast peska, pogosto uporabljano kot podlaga za tramvaj, uporaben na SU iz vezljivega materiala (sicer deformacije), se ne uporablja – ročno delo!

- Gramozna vozišča – večplasten prodnati material, slaboobstojen (deformacije zaradi naknadne komprimacije pod prometom), podoben makadamu, uporaben za gradbiščne ceste
- Tlakovana vozišča – kamnite plošče in kasneje granitne (tonalitne – čezlakit Pohorje!) kocke 6×6x6, 8×8x8, 10×10x10 ali betonski tlakovci, podložna plast je lahko iz nevezane zmesi kamnitih zrn ter cementne ali apnene malte, odvisno od prometne obremenitve

b) Sodobna vozišča: gibka (vezana z bitumenskimi ali preje s katranskimi /karcinogeno – se ne uporablja več/ vezivi)

toga (vezana s cementom, krajše cementnobetonska vozišča)

- gibka – večplasten sistem: obrabna plast (asfaltbetoni), vezane nosilne plasti (bituminizirani agregat in stabilizirana plast), nevezane nosilne plasti (tamponska plast- mehansko utrjena), filter (mivka, ki se ne uporablja več in namesto nje polipropilenska polst – PPP)
- toga – večplasten sistem: obrabna plast (MB 30), nosilna plast (MB 25 s sidri in mozniki), nevezana plast (tamponska plast)

Razlika med gibkimi in togimi vozišči je predvsem v uporabljenem materialu. Debelina gibkih vozišč je izračunana glede na splošne razmere in glede na prometno obremenitev, pri debelini togih vozišč pa je treba poleg prometne obremenitve upoštevati še napetostne razmere v konstrukciji zaradi temperaturnih razlik zgoraj-spodaj, kar pomeni, da je toga utrditev aktualna praktično samo za najtežje prometne obremenitve (pri ostalih je debelina večja od tiste, ki jo zahteva prometna obremenitev).

Danes se za prometno najbolj obremenjene ceste uporabljajo toga vozišča, ki se jih namesto na nevezano plast zgradi s časovnim zamikom na popolnoma zgrajeno gibko (bitumensko) vozišče. V tem časovnem zamiku se izvedejo pod prometom v konstrukciji morebitne deformacije. Vsled tega je debelina togih (cementnobetonskih) plasti lahko manjša. Tako zgrajeno vozišče je praktično trajno.

Od česa je odvisna debelina VK ?

Dimenzije plasti VK je treba izvesti glede na:

- prometno obremenitev v planski dobi,
- nosilnost temeljnih tal (poenotiti na daljšem odseku!),
- globino zmrzovanja (prodiranje mraza, toplotna prevodnost materialov),
- hidrološke pogoje (prisotnost vode v VK) in
- izbrane materiale za posamezne plasti.

Celotna debelina VK je torej odvisna od debelin posameznih plasti. Ker velja, da se posamezni materiali, vgrajeni v VK, medsebojno lahko (v določeni meri in pod določenimi pogoji, največkrat zaradi uporabe lokalnih materialov pa tudi zaradi zagotavljanja toplotne prevodnosti) nadomeščajo eden z drugim (obstojajo t.i. faktorji ekvivaletnosti med materiali, n.pr. 1 cm bitumensko vezane plasti lahko nadomestimo s 3 cm nevezanega drobljenca), je končna debelina VK odvisna torej tudi od izbora materialov za posamezne plasti.

Pomembno:

Na dimenzije vezanih plasti (bitumenskih ali cementnih) vpliva izključno samo prometna obremenitev in seveda izbor materialov ter vgradnja stabilizirane plasti SNP.

Dimenzija nevezane plasti mora biti izračunana glede na vse navedene pogoje.

Posamezne plasti v VK imajo svoje minimalne (glede na velikost max zrna) in maksimalne (glede na možnost in učinkovitost vgrajevanja) dimenzije debeline. Najpogosteje so presežene max dimenzije nevezane plasti. Takrat je treba zgornji del nevezane (tamponske) plasti izvesti s kvalitetnejšim materialom (stabilizacija – CS ali BS), ali pa izboljšati pogoje (dvig nivelete ceste na področju talne vode ali globoko dreniranje, izboljšanje nosilnosti temeljnih tal – posteljica kot zaključek SU).

Prometna obremenitev

Zakonsko dovoljena največja sila teže posamezne osi vozila je 100 kN (10 T) in posameznega kolesa 50 kN (5 T). Kadar sta namesto po eno kolo na posamezni osi nameščena para koles, velja ista omejitev.

Dimenzioniranje VK se izvaja torej iz kolesnega pritiska, ki ga ustvarja sila teže 50 kN (5 T). Ta pritisk je enak inflacijskemu pritisku v pnevmatiki. Zaradi raznih neidealnosti v pnevmatiki in v strukturi vozišča so dejanske kontaktne napetosti, ki se pojavijo v VK, precej višje. Raziskave so pokazale, da so statični pritiski do 50%, dinamični (gibanje vozila) pa celo do 100% višji od nazivnih.

Poleg vertikalnih sil delujejo v VK tudi horizontalne sile in sicer vzdolžne (zaviranje, pospeševanje – vožnja v klanec) in bočne (vožnja skozi krivino, bočni veter ipd). Te so praviloma bistveno manjše od vertikalnih in delujejo predvsem v zgornjih plasteh VK (do globine 10 cm). Zato jih pri dimenzioniranju VK ne upoštevamo. Upoštevati jih je treba pri recepturah asfaltov in betonov (utrujanje – reologija!) ter pri preiskavah kvalitete vgrajenih materialov. Govorimo o strižni trdnosti materialov.

Pri VK, ki jih gradimo za zelo lahko prometno obremenitev in potrebujejo le tanjše vezane nosilne plasti, se lahko zgodi, da nam bodo pri prevozi posameznih težkih vozil prav strižne sile povzročile poškodbo VK. Zato je treba spodnjo nevezano (tamponsko) plast pri takih VK izvesti skrajno natančno (kvaliteta vgradnje!), ker v njej nastopijo te izjemne napetosti.

Ker so sile teže posameznih osi pri vozilih močno različne (različna vozila, različni sistemi osi, prazno-polno ipd), so bile za dimenzioniranje izvedene raziskave in določeni empirični postopki. Določeno je, da je treba za dimenzioniranje kot prometno obremenitev upoštevati:

- 20 letno obdobje (s prognozo prometnih obremenitev),
- distribucijo prometa po smereh (običajno $\frac{1}{2}$ za vsako smer, razen pri AC, kjer je na voznih pasovih po 45%, na prehitevalnih pa po 5% vozil),
- strukturo prometa (osebni, tovorni, avtobusi itd.) in različno obremenjenost posamezne osi tipičnega vozila (po Standardih sprednja-zadnja, prazno-polno) in
- vse tipične sile teže osi preračunati na t.i. NOO (normalno osno obremenitev) 82 kN (izhaja iz ameriških raziskav in njihovih tedanjih mer) s korekcijskim faktorjem (faktor ekvivalentnosti – FE_{nom}), ki je $FE_{nom} =$

= $10^{-8} \times f_o \times (f_k \times L_{stat})$, pri čemer velja: faktor $f_{o1} = 2,212$ (za enojno os) in $f_{o2} = 1,583$ (za posamezno os v dvojni /tandem/ zapregi) ter $f_{k1} = 1,0$ (za posamezno kolo) in $f_{k2} = 0,9$ (za kolesa v paru).

Iz navedenega izhaja, da je pritisk pod tandemom (dvojna os) pa tudi pod dvojnima kolesoma namesto enega bistveno manjši od pritiska pod enim samim kolesom. Razlika med težkim tovornjakom (nad 7T) in osebnim avtomobilom je tudi preko 30.000-kratna!

Za vse te izračune so določeni posebni standardizirani postopki.

Kadar nimamo na voljo dovolj točnih podatkov o strukturi prometne obremenitve, lahko orientacijske podatke dobimo v ustreznih standardih.

Glede na število prevoženih NOO v planski dobi generalno ločimo:

- zelo težko prometno obremenitev $> 7 \times 10^6$ NOO,
- težko prometno obremenitev $2 \times 10^6 - 7 \times 10^6$ NOO,
- srednjo prometno obremenitev $7 \times 10^5 - 2 \times 10^6$ NOO,
- lahko prometno obremenitev $2 \times 10^5 - 7 \times 10^5$ NOO in
- zelo lahko prometno obremenitev $< 2 \times 10^5$ NOO.

Za te obremenitve so poznane (tuje) standardne dimenzije VK in jih lahko privzamemo.

Obtežba in podlaga

Zaradi prometne obtežbe se v temeljnih tleh (podlagi VK) pojavijo napetosti – natezne in strižne. Temeljna tla so elastični polprostor (mehanika tal!) in v njem veljajo enačbe, ki jih je postavil Boussinesq (σ_z in τ_r).

Kot osnovo za oceno nosilnosti plasti materiala uporabljamo odnos med posedkom (s) in deformacijskim modulom (E_v) in sicer: $E_v = 0,75 \times (p/s) \times D$ [MN/m²], kjer so s posedek, p enakomerna obremenitev plošče in D premer te plošče.

Boussinesqov postopek sta izboljšala Burmister in Odemark. Prvi je izdelal postopek za dvoslojni, drugi pa za večslojni sistem. V obeh postopkih posamezne sloje preračunamo na enoslojni sistem glede na togost posameznih slojev pri čemer je osnova ekvivalentnosti (za preračun) modul elastičnosti v spodnjem sloju.

Globina raznosa nateznih napetosti se v večslojnem sistemu pri uporabi plasti različnih materialov (kvalitetnejših zgoraj in potem po vrsti navzdol) zmanjša. Na kratko povedano: najkvalitetnejši material uporabimo samo v tolikšni debelini, kot je nujno potrebno in potem po istem principu tudi vse naslednje, do temeljnih tal.

Toga vozišča se pod obremenitvijo obnašajo drugače kot gibka. Postopek za njihovo dimenzioniranje je izdelal Westergaard.

Za vse postopke sedaj obstojajo računalniški programi.

Med praktičnimi postopki se je najbolj uveljavil postopek AASHO testa, ki so ga izvedli Američani in s številnimi meritvami ugotovili dejanska razmerja med vgrajenimi materiali, nosilnostjo podlage in prometno obremenitvijo. Postopek sloni na določitvi nosilnosti po postopku CBR (Californian Bearing Ratio – kalifornijski indeks nosilnosti) za posamezne materiale in predstavlja razmerje med dejansko (za preiskovanec) in standardizirano obremenitvijo, ki je potrebna pri izvedbi preizkusa materiala po določenem postopku (vtisnjenje valjastega bata s površino $19,6 \text{ cm}^2$ s hitrostjo $1,27 \text{ mm/min}$ v preiskovani material $2,54 \text{ mm}$ globoko).

Potem ko se po istem postopku določi nosilnost temeljnih tal (na terenu in v laboratoriju), so za posamezne vgrajevane materiale (nevezana in vezana spodnja nosilna plast ter posebej zgornje vezane plasti) izdelani diagrami, s katerih odčitamo zahtevano debelino plasti posameznega materiala v odvisnosti od CBR podlage in od prometne obtežbe (vsota prevozov NOO).

Diagrami.

Izboljšanje nosilnosti podlage - posteljica

Posteljica je zaključni sloj spodnjega ustroja. Izvedemo jo (kadar je potrebno) z NKM (nasip kamnitega materiala), ki nima lastnosti kapilarnega dviga vlage iz podlage. Debelina max zrna je 200 mm in tako min debelina posteljice 30 cm . Pri uporabi večjih zrn (kamnov) mora biti min debelina posteljice vsaj 50% večja od max zrna. Tolikšne dimenzije se običajno uporabljajo v ukopnih delih trase (pazi: dodaten ukop za debelino posteljice!), dočim se na nasipih praktično vedno vgrajuje vsaj debelina 50 cm .

Pri menjavi debeline posteljice (n.pr. z nasipnega v ukopni del) je treba prehod izvesti z izklinjenjem, ki ima relativni nagib 10% .

Posteljico izvedemo za:

- povečanje nosilnosti temeljnih tal (racionalnost, ker so ostali materiali VK močno dražji) in
- poenotenje (homogenizacija) nosilnosti temeljnih tal vzdolž trase (zagotavljanje enake debeline VK na nasipu, v ukopu itd.).

Posteljico pogosto uporabljamo tudi pri manj obremenjenih cestah. Z njo nadomestimo tisto debelino, ki jo je treba zagotoviti zaradi globine zmrzovanja, in jo prometna obremenitev ne zahteva. Tako je VK zares zelo racionalno dimenzionirana.

Ukrepi pri dimenzioniranju VK za zelo težko prometno obremenitev

V primeru zelo velike prometne obremenitve bi bila zahtevana debelina VK velika in bi presegala debelino, ki naj bi jo zagotovili zaradi zaščite VK pred zmrzovanjem. Drugače povedano: zmrzlinsko neodporni materiali (planum SU) se morajo nahajati izpod nivoja zmrzovanja. Ker ima vsaka plast VK svoj koeficient toplotne prevodnosti, ki je višji od tiste pri naravnih materialih, je potrebna debelina VK le $60\text{-}70\%$ globine zmrzovanja; odvisno od hidroloških pogojev.

Prvi ukrep je vgradnja posteljice, da se poveča nosilnost temeljnih tal (glej predhodno poglavje). S tem se zmanjša potrebna debelina spodnje nevezane (tamponske) plasti.

Drugi ukrep je vgradnja stabilizirane plasti.

Upad tlačnih napetosti v globino je odvisen od vgrajenih materialov v VK. Njihov zunanji pokazatelj je modul elastičnosti (ali CBR). Debelina posamezne vgrajene plasti v VK, od zgoraj navzdol, mora biti tolikšna, da v njej napetost upade na tisto vrednost, ki jo je sposobna prevzeti naslednja, nižje ležeča plast.

Pri zelo velikih prometnih obremenitvah je upad napetosti v globino sorazmerno počasen. Ker je razlika med modulom elastičnosti (ali tudi CBR) zgornje vezane nosilne plasti (ZNP ali VNP) in pod njo vgrajene spodnje nevezane (tamponske) plasti (SNP ali NNP) izredno velika, je vgrajena ZNP zelo debela. To pa ni racionalno (drago!).

Zato je v tem primeru smiselno povečati CBR zgornjega dela nevezane (tamponske) plasti. Povečanje nosilnosti te plasti se doseže z njeno stabilizacijo. Kot vezivo se uporabljata ali cement ali bitumen. Gre za manjše količine enega ali drugega veziva, ki ga dodamo tamponskemu agregatu. To plast imenujemo stabilizirana plast. Leži torej med VNP in NNP. Spodnji dimenziji te plasti sta 15 cm pri cementni stabilizaciji (CS) in 18 cm pri bitumenski stabilizaciji (BS). Običajno pa se vgrajujeta debelini 20-25 cm. Tudi iz razlogov kvalitetnega vgrajevanje.

Ker je CBR stabilizirane plasti znatno večji od CBR nevezane tamponske plasti, se potreba po debelini ZNP zmanjša. Hkrati je zaradi večjega CBR stabilizirane plasti tudi upad napetosti v globino intenzivnejši. To pa pomeni, da se posledično hkrati zmanjša tudi potreba po debelini preostale spodnje nevezane (tamponske) plasti.

Uporaba obeh ukrepov omogoča, da se ustvari racionalna debelina VK. Seveda z vgradnjo napetostno boljših (in dragih) materialov ne gre pretiravati, ker naj bi bila celotna debelina VK končno tolikšna, da bo segala do (reducirane) globine zmrzovanja.

Tretji ukrep je izboljšanje kvalitete obrabne plasti (obrus!).

Običajno se za to plast uporablja agregat, pridobljen iz karbonatnih kamenin (apnenec). Le-te imajo trdotno vrednost 3 (diamant je 10!) in so zato močno občutljive na obrus.

Pri težkih prometnih pogojih (velika prometna obremenitev ali pogosto zaviranje ali vožnja na vzponu) je obrus površine sorazmerno hiter in intenziven. Govorimo o zaglajevanju površine, posledica česar je zelo zmanjšana velikost koeficienta drsnega trenja.

V takih primerih za obrabno plast uporabimo agregat, pridobljen iz silikatnih kamnin (eruptivci). Njihova trdotna vrednost je 7. Poleg tega, da so bistveno bolj kot apnenci odporne na obrus, imajo še eno koristno lastnost. Ta agregat se namreč pod prometom ne zaglajuje kot karbonatni materiali ampak se njihova površina rahlo krha. Površina ostaja hrapava, kar zagotavlja visoko vrednost koeficienta drsnega trenja tudi v težkih prometnih pogojih.

Karakteristične oznake materialov VK, ki se uporabljajo (n.pr. bitumenski beton = BB) dobijo v tem primeru dodaten znak (BBs), ki pove, da so v zmesi agregata uporabljene kamnine silikatnega izvora.

Faznost vgrajevanja plasti VK

Pri zahtevnejših VK prometne obremenitve z leti zelo močno naraščajo. Logično je, da n.pr. v prvih 10 letih ne potrebujemo tolikšne debeline VK kot kasneje v 20. Ker je zaradi velikih prometnih obremenitev tudi zaglajevanje obrabne plasti intenzivno, je to plast treba sorazmerno pogosto obnavljati (preplastiti).

Iz obeh zgornjih razlogov se zato pogosto uporablja t.i. fazno vgrajevanje plasti VK. Običajno sta fazi 10 let (novogradnje) in 5 let (obnove vozišč). V prvi fazi se vgradi VK v debelini, izračunani za prometno obremenitev v izbrani planski dobi, po njenem preteku pa se dogradi do končne vrednosti.

S tem se doseže znatna racionalnost, ker se plasti vgrajujejo takrat, ko za to nastopi potreba, in ne na začetku. Pri fazni vgradnji se hkrati tudi izboljša obrabna plast, ki bi jo bilo treba tedaj v vsakem primeru vgraditi.

Za fazno vgrajevanje se seveda upoštevata le obe zgornji vezani plasti (obrabna in zgornja nosilna). Spodnjo nevezano (tamponsko) nosilno plast in morebitno stabilizirano plast je pač treba zgraditi v njunih končnih dimenzijah (za končno plansko dobo), saj kasnejše spreminjanje njunih debelin ni več mogoče.

Kadar pa je potrebno zamenjati tudi ti dve plasti, ne govorimo več o faznosti ampak o obnovi ali rekonstrukciji (odvisno od obsega posega).