

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

Jernej Dolinšek

**NAČRTOVANJE VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE
Z UPOŠTEVANJEM TRAJNIH DEFORMACIJ V
NEVEZANI NOSILNI PLASTI**

Diplomsko delo

Maribor, april 2011



Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo

Diplomsko delo univerzitetnega študijskega programa

**NAČRTOVANJE VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE Z UPOŠTEVANJEM TRAJNIH
DEFORMACIJ V NEVEZANI NOSILNI PLASTI**

Študent: Jernej DOLINŠEK

Študijski program: univerzitetni, Gradbeništvo

Smer: Komunalna

Mentor: izr. prof. dr. Bojan ŽLENDER

Somentor: asist. dr. Helena VRECL KOJC

Maribor, april 2011



Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo

Številka: 93564387
Maribor, 18.03.2011

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 1/10) izdajam

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

Jernej Dolinšek, študent(ka) univerzitetnega študijskega programa GRADBENIŠTVO, smer KOMUNALNA SMER, lahko izdela diplomsko delo pri predmetu Mehanika tal.

MENTOR(ICA):izr. prof. dr. Bojan Žlender
SOMENTOR(ICA): dr. Helena Vrecl Kojc

Naslov diplomskega dela:

NAČRTOVANJE VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE Z UPOŠTEVANJEM TRAJNIH DEFORMACIJ V NEVEZANI NOSILNI PLASTI

Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:

DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURE WITH REGARD TO PERMANENT DEFORMATION IN UNBOUND PAVING LAYERS

Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z "Navodili za izdelavo diplomskega dela" in ga oddati v treh izvodih ter en izvod elektronske verzije do 18.03.2012 v referatu za študentske zadeve.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.



V.D. DEKAN
red. prof. dr. Miroslav Premrov

Obvestiti:

- kandidata -ko,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju dr. Bojanu Žlendru za pomoč in vodenje pri opravljanju diplomskega dela. Prav tako se zahvaljujem somentorici dr. Heleni Vrecl Kojc.

Posebna zahvala velja staršem, ki so mi omogočili študij.

NAČRTOVANJE VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE Z UPOŠTEVANJEM TRAJNIH DEFORMACIJ V NEVEZANI NOSILNI PLASTI

Ključne besede: voziščna konstrukcija, nevezana nosilna plast, prometna obremenitev, program Plaxis, dinamična obremenitev, tehnične specifikacije, trajne deformacije, napetostno stanje, metoda končnih elementov

UDK: 625.032.4(043.2)

Povzetek

Diplomsko delo predstavlja splošen opis voziščne konstrukcije, sledi dimenzioniranje voziščne konstrukcije z uporabo tehničnih specifikacij za javne ceste ter izračun napetostno deformacijskega stanja v nevezani nosilni plasti. Izračun napetosti in deformacij izvedemo po metodi končnih elementov z uporabo geotehničnega programa Plaxis. Dobljene rezultate analiziramo in jih primerjamo z izmerjenimi rezultati na terenu.

V drugem delu diplomske naloge so na praktičnem primeru uporabe murskih prodov prikazani rezultati laboratorijskih preiskav različnih mešanic murskega proda in s pomočjo matematičnih metod izračunane napetosti in deformacije. Rezultati pokažejo, da se z uporabo drobljenih prodov trajne deformacije v nevezani nosilni plasti bistveno zmanjšajo.

DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURE REGARD TO PERMANENT DEFORMATION IN UNBOUND PAVING LAYERS

Key words: pavement structure, unbound paving layer, traffic loading, Program Plaxis, dynamic loading, technical specifications, permanent deformation, stress state, finite element method

UDK: 625.032.4(043.2)

Abstract

Diploma presents general description of pavement structure, then follow design of pavement structure with use of technical specifications for public roads and calculation of stresses and strains in unbound paving layers. Calculation of stresses and strains are made with finite element method with use of geotechnical program Plaxis. The obtained results were analyzed and compared with measured results on the ground.

The second part of diploma is a practical example of Mura gravel and shows the results of laboratory tests of different mixtures of Mura gravel. Stresses and strains are calculated using different mathematical methods. The results showed that the crushing of Mura gravel substantially reduced permanent deformation of unbound paving layer.

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	OPREDELITEV PODROČJA IN OPIS PROBLEMA	1
1.2	NAMEN IN CILJI DIPLOMSKEGA DELA	2
1.3	PREDVIDENE METODE RAZISKOVANJA	2
1.4	STRUKTURA DIPLOMSKEGA DELA	3
2	VOZIŠČNA KONSTRUKCIJA	4
2.1	SESTAVA VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE.....	4
2.2	IZVEDBA VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE	5
2.2.1	<i>Posteljica</i>	6
2.2.2	<i>Nevezane nosilne plasti</i>	6
2.2.3	<i>Vezane nosilne plasti</i>	7
2.2.4	<i>Obrabne in zaporne plasti</i>	9
3	DIMENZIONIRANJE VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE Z UPORABO TEHNIČNIH SPECIFIKACIJ	12
3.1	UPORABLJENE TEHNIČNE SPECIFIKACIJE.....	12
3.2	PROJEKTNI PODATKI ZA DIMENZIONIRANJE VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE.....	15
3.2.1	<i>Vozišče</i>	15
3.2.2	<i>Prometna obremenitev</i>	16
3.2.3	<i>Hidrološki in klimatski pogoji</i>	16
3.3	DIMENZIONIRANJE VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE.....	17
3.3.1	<i>Minimalne debeline plasti in potrebni debelinski indeks</i>	17
4	IZRAČUN NAPETOSTI IN DEFORMACIJ V NEVEZANI NOSILNI PLASTI VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE PO METODI KONČNIH ELEMENTOV	20
4.1	SPLOŠNO O METODI KONČNIH ELEMENTOV	20
4.2	NAPETOSTNO DEFORMACIJSKO STANJE V VOZIŠČNI KONSTRUKCIJI	21
4.2.1	<i>Vrste materialnih modelov</i>	23
4.3	IZRAČUN S PROGRAMOM PLAXIS	24
4.3.1	<i>Geometrija modela</i>	26
4.3.2	<i>Izračun</i>	30

4.3.3	<i>Analiza rezultatov</i>	33
4.3.4	<i>Primerjava rezultatov</i>	41
5	NAČRTOVANJE VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE Z UPOŠTEVANJEM TRAJNIH DEFORMACIJ	43
5.1	DELEŽ VODE	44
5.2	ZGOŠČENOST	44
5.3	NIVO NAPETOSTI.....	45
5.4	ŠTEVILO CIKLOV OBREMENJEVANJA	46
5.5	SESTAVA	47
5.6	OBLIKA ZRN KAMNITEGA MATERIALA	48
5.7	MINERALOŠKA SESTAVA KAMNIN.....	49
5.8	VPLIV ROTACIJ GLAVNIH NAPETOSTI NA TAMPONSKE PLASTI POD PROMETNO OBTEŽBO.....	50
6	VPLIV TRAJNIH DEFORMACIJ NEVEZANE PLASTI NA PRIMERU UPORABE MURSKIH PRODOV	54
6.1	SPLOŠNO O RAZISKOVALNI NALOGI »UPORABA MURSKIH PRODOV ZA VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE«.....	54
6.2	LABORATORIJSKE PREISKAVE.....	54
6.3	DOLOČITEV TRAJNIH DEFORMACIJ	55
6.4	TRAJNE DEFORMACIJE IN ŠTEVILO CIKLOV OBREMENITVE	56
6.5	TRAJNE DEFORMACIJE IN NAPETOST	57
6.6	REZULTATI PREISKAV	60
6.7	ANALIZA REZULTATOV	66
7	SKLEP	69
8	VIRI, LITERATURA	71
9	PRILOGE	74
9.1	SEZNAM SLIK	74
9.2	SEZNAM TABEL.....	75
9.3	NASLOV ŠTUDENTA	76
9.4	KRATEK ŽIVLJENJEPIS.....	76

UPORABLJENI SIMBOLI

W_L	meja židkosti [%]
I_P	indeks plastičnosti [-]
h_m	globina zmrzovanja [cm]
h_{min}	minimalna potrebna debelina voziščne konstrukcije [cm]
D_{max}	premer največjih zrn v zmesi [mm]
CBR	koeficient California bearing ratio [%]
T_d	povprečno število prehodov skozi prečni prerez ceste na dan [NOO 100kN]
T_n	merodajna prometna obremenitev za načrtovano voz. konst. [NOO 100kN]
a_i	faktor ekvivalentnosti cestogradbenih materialov [-]
f_{pp}	faktor vpliva razdelitve prometne obremenitve v prečnem prerezu vozišča [-]
$f_{šp}$	faktor vpliva širine prometnih pasov [-]
f_{nn}	faktor vpliva vzdolžnega nagiba nivelete vozišča [-]
f_{tpp}	faktor vpliva dobe trajanja voziščne konstrukcije in povečanja prometa [-]
f_d	faktor dodatne dinamične obremenitve [-]
σ_h	horizontalna napetost [kPa]
σ_v	vertikalna napetost [kPa]
u_y	vertikalen pomik [mm]
u_x	horizontalen pomik [mm]
E	modul elastičnosti [MPa]
ν	Poissonov količnik [-]
γ	prostorninska teža [kN/m ³]
c	kohezija [kPa]
φ	strižni kot [°]

ψ	kot dilatacije [°]
ε_{yy}	osna deformacija v kompresiji (-) ali ekstenziji (+) [%]
τ_{oct}	strižna napetost [kPa]
K_0	mirni zemeljski pritisk [-]
p	normalna komponenta napetosti [kPa]
q	deviatorična komponenta napetosti [kPa]
ε_1^p	normalizirana aksialna trajna deformacija [-]
A	limita trajnih aksialnih deformacij [-]
σ_1	vertikalna napetost triaksialnega preizkusa [kPa]
σ_3	horizontalen (celičen) tlak triaksialnega preizkusa [kPa]
a, b	regresijska parametra
M	parameter porušne ovojnice
S	parameter porušne ovojnice

1 UVOD

1.1 Opredelitev področja in opis problema

Gradnja cest je pretežno izkustvena veda. Razvijala se je s človeštvom in njegovimi zahtevami. Najpomembnejše zahteve s strani uporabnika so, da cesta zagotavlja varno, udobno in gospodarno vožnjo. Naloga načrtovalca in graditelja cest pa je, da zahtevam uporabnikov v čim večji meri ugoti.

V cestogradbeni praksi so se uveljavile makadamska, tlakovana, asfaltna in cementnobetonska vozišča. Zaradi razvoja motorizacije pa se v današnjem času večinoma uporabljajo asfaltna in cementnobetonska vozišča.

Osnovni namen načrtovanja voziščnih konstrukcij je združiti različne plasti materialov tako, da bo zgrajena voziščna konstrukcija sposobna prevzeti predvidene obremenitve. Poznamo teoretične (statične), empirične in standardizirane osnovne vrste postopkov načrtovanja voziščnih konstrukcij.

Pri načrtovanju voziščne konstrukcije je eno od osnovnih načel vgraditi takšne materiale, da trajne deformacije, ki se pojavijo po določenem ciklu prometnih obremenitev, ne presežejo vrednosti, ki označuje stabilno stanje. V primeru, da temu pogoju ni zadoščeno, trajne deformacije prekoračijo mejno stanje in posledično pride do porušitve.

Trajne deformacije so najbolj opazne v asfaltni plasti, saj se deformacije iz nižjih plasti prenašajo v zgornje plasti voziščne konstrukcije. Zato je zelo pomembno poznavanje dejavnikov, ki vplivajo na trajne deformacije v nevezani nosilni plasti voziščne konstrukcije.

Najpomembnejši dejavniki so število ciklov obremenjevanja, delež vode, zgoščenost, sestava, fizikalne lastnosti kamnitih zrn in nivo napetosti. S podrobnim poznavanjem in prilagajanjem teh lastnosti lahko zmanjšamo vpliv na nastanek trajnih deformacij v nevezani nosilni plasti oziroma posledično na nastanek kolesnic v vezanih plasteh.

1.2 Namen in cilji diplomskega dela

Namen diplomskega dela je prikazati dimenzioniranje voziščne konstrukcije na primeru avtoceste z izredno težko prometno obremenitvijo ter podati napetostno deformacijsko stanje v nevezani nosilni plasti. Zaradi dinamične prometne obremenitve, ki deluje na voziščno konstrukcijo, bodo opisane in na praktičnem primeru predstavljene trajne deformacije nevezane nosilne plasti.

Cilji diplomske naloge so:

- prikazati dimenzioniranje voziščne konstrukcije z uporabo tehničnih specifikacij za javne ceste in ustrezno izbrati materiale, ki bodo prenašali prometno obremenitev,
- izračunati napetosti in deformacije v nevezani nosilni plasti voziščne konstrukcije po metodi končnih elementov z uporabo programa Plaxis,
- predstaviti pomen trajnih deformacij v voziščnih konstrukcijah,
- na praktičnem primeru uporabe murskih prosov prikazati, s kakšnimi postopki zmanjšati trajne deformacije v nevezani plasti.

1.3 Predvidene metode raziskovanja

Pri metodah raziskovanja smo uporabili študije knjižnih in elektronskih virov ter uporabo geotehničnega programa Plaxis.

Uporabili smo metodo deskripcije, metodo kompilacije, metodo klasifikacije ter komparativno metodo.

Metodo deskripcije bom uporabil pri opisovanju pojmov, komparativno metodo za primerjavo rezultatov dobljenih na terenu in v laboratoriju ter metodo kompilacije pri povzemanju sklepov in rezultatov drugih avtorjev.

1.4 Struktura diplomskega dela

Diplomsko delo je sestavljeno iz šestih delov.

- V prvem delu je na kratko opisan problem in področje raziskovanja, njeni cilji in namen ter struktura dela.
- Drugi del predstavlja splošen opis posameznih plasti voziščne konstrukcije.
- Tretji del nas seznani z dimenzioniranjem voziščne konstrukcije z uporabo tehničnih specifikacij za javne ceste. Za dimenziniranje je uporabljen avtocestni odsek Dolga vas – Lendava. Zgradba voziščne konstrukcije se izbere glede na predhodne izkušnje in lastnosti posameznih vgrajenih materialov.
- V četrtem delu so s pomočjo programa Plaxis izračunane napetosti in deformacije v nevezani nosilni plasti voziščne konstrukcije. Na kratko je podan opis programa, kateri vhodni parametri materialov so bili uporabljeni in na koncu analiza dobljenih rezultatov.
- Peti del predstavlja opis trajnih deformacij, vzroke za nastanek in kaj upoštevati pri načrtovanju voziščne konstrukcije, da bodo trajne deformacije čim manjše.
- V šestem delu so na primeru razvojno raziskovalne naloge »Uporaba murskih prosov za voziščne konstrukcije« prikazane zveze med razvojem trajnih deformacij in številom ciklov obremenitev ter med trajnimi deformacijami in napetostmi. Predstavljen je vpliv predrobljenosti murskega proda na trajne deformacije.

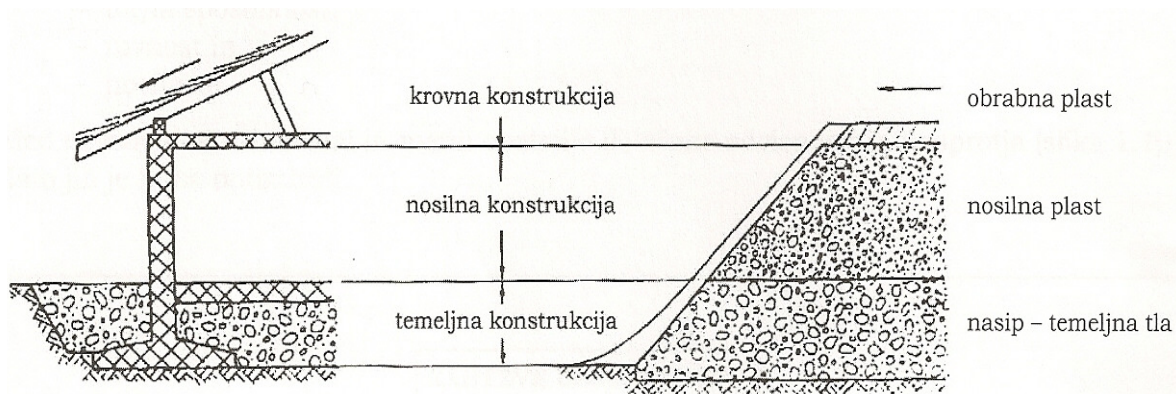
2 VOZIŠČNA KONSTRUKCIJA

2.1 Sestava voziščne konstrukcije

Cesta je gradbeni objekt, ki je zgrajen iz več plasti različnih materialov. Lastnosti teh materialov morajo biti primerne, da bodo prenesli obremenitve, ki jim bodo v času uporabe izpostavljeni.

Cestno zgradbo je v osnovnih elementih mogoče primerjati z visoko zgradbo (slika 2.1): pri obeh so praviloma značilni elementi

- temeljna konstrukcija,
- nosilna konstrukcija in
- krovna konstrukcija.

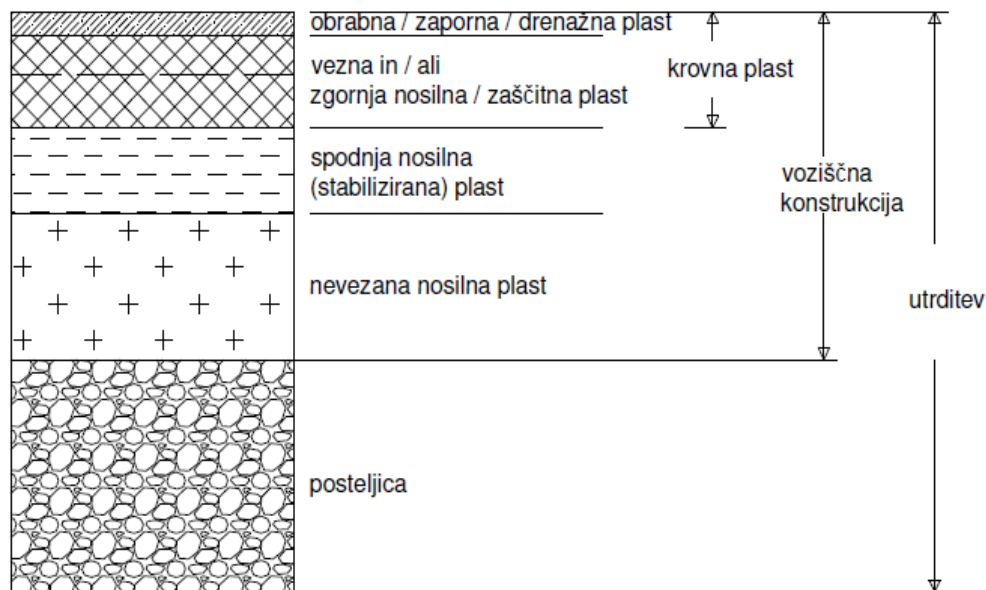


Slika 2.1: Primerjava elementov visoke in cestne zgradbe¹

¹ Žmavc J., Voziščna konstrukcija, str. 12 – 13, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2007

Voziščne konstrukcije so praviloma zgrajene iz naslednjih plasti:

- obrabne/zaporne,
- vezane nosilne,
- nevezane nosilne.



Slika 2.2: Značilna utrditev sodobnega vozišča

2.2 Izvedba voziščne konstrukcije²

Tako pri uporabi asfaltnih zmesi kot tudi cementnobetonskih mešanic označujemo obrabnozaporno in vezano zgornjo nosilno skupaj z nazivom krovna plast.

Vezana nosilna plast je lahko zgrajena

- iz zgornje vezane nosilne plasti, za katero uporabljamo kakovostnejše vezane zmesi zrn oziroma mešanice, in
- iz spodnje vezane nosilne plasti, v katero pa lahko vgradimo tudi manj kakovostne (stabilizirane) zmesi zrn oziroma mešanice.

² Žmavc J., Voziščne konstrukcije, str. 261 – 281, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2007

Na podlagi pod voziščno konstrukcijo oziroma na planumu nasipa je potrebno zagotoviti čimbolj enakomerno nosilnost. To je mogoče doseči z ustrezno posteljico oziroma z zaključno plastjo podlage pod voziščno konstrukcijo.

Vsako plast voziščne konstrukcije, vključno s posteljico, lahko pričnemo vgrajevati šele, ko smo z ustreznimi preizkusi preverili in dokazali, da so zahtevane značilnosti zgrajene podložne plasti v celoti zagotovljene. V to vsekakor štejemo tudi to, da podložna plast praviloma ne sme biti zmrznjena.

2.2.1 Posteljica

Namen izgradnje posteljice pod voziščno konstrukcijo je zagotoviti primerno in trajno nosilno podlago, ter po potrebi zaščititi vgrajene materiale proti škodljivim učinkom mraza. To dosežemo s primerno uporabo materialov oziroma njihovim izboljšanjem, utrditvijo ali s stabiliziranjem, v enaki meri pa tudi z ureditvijo odvodnjavanja.

Za posteljico so primerne vezljive zemljine, predvsem kamnine. V posteljico vgrajeni material mora biti prostorsko stabilen in obstojen v vodi. Zato je ni mogoče graditi, ko je temperatura pod lediščem in v materialu vsebovana potrebna voda zmrznjena. Vezljive zemljine so uporabne, če je meja židkosti manjša od 35 % in indeks plastičnosti manjši od 12 %. Za kamnine je pomembna zrnavost. Premer največjega zrna v zmesi praviloma ne sme biti večji od dveh tretjin debeline celotne plasti.

2.2.2 Nevezane nosilne plasti

Nevezana nosilna plast v voziščni konstrukciji mora

- zagotoviti potrebno nosilnost,
- zagotoviti trajno nosilnost in
- zaščititi morebitne občutljive materiale v podlagi proti škodljivim učinkom mraza.

Trajno nosilnost nevezane nosilne plasti je treba zagotoviti z izbrano zmesjo kamnitih zrn, obstojnih proti koroziji in mrazu. Potrebno nosilnost nevezane nosilne plasti pa je treba

zagotoviti, da bi bila omogočena ustrezna kakovostna vgraditev materialov v nadgrajenih plasteh voziščne konstrukcije.

Sestava zmesi kamnitih zrn za nevezane nosilne plasti mora biti predvsem prilagojena predvideni prometni obremenitvi:

- za težje obremenitve mora biti čimbolj grobozrnata in skeletna in zrna v celoti drobljena
- za lažje obremenitve je zmes lahko tudi drobnozrnata in gosta, zrna pa tudi naravno oblikovana.

Debelina plasti zmesi nevezanih kamnitih zrn h_{\min} in velikost največjih zrn v zmesi D_{\max} morata biti usklajeni oziroma izpolnjen mora biti pogoj:

$$h_{\min} \geq 2,5 D_{\max} \quad (2.1)$$

Poleg najmanjše debeline plasti nevezane zmesi zrn pa je omejitev tudi za največjo gospodarno debelino plasti. Ko je debelina plasti nevezane zmesi zrn večja od približno 40 cm, ustvarijo zrna v njej obok. Zato se pri večji debelini plasti nevezane zmesi zrn njena nosilnost več ne povečuje. Razumljivo pa se sposobnost zaščite materialov pod debelejšo nevezano nosilno plastjo proti škodljivim učinkom mraza sorazmerno z debelino plasti večja.

V nevezane nosilne plasti vgrajujemo zmesi zrn proda in drobirja do velikosti 32 mm.

2.2.3 *Vezane nosilne plasti*

Na osnovi značilnosti materialov, ki jih uporabljamo za vezane nosilne plasti, razlikujemo

- spodnje vezane (stabilizirane) nosilne plasti in
- zgornje vezane nosilne plasti.

Spodnje vezane (stabilizirane) nosilne plasti

Ker za spodnjo vezano nosilno plast vgrajujemo pretežno z vezivi samo stabilizirane zmesi zrn, imenujemo te plasti tudi stabilizirane nosilne plasti.

Namen izvedbe stabilizirane (spodnje vezane) nosilne plasti je predvsem naslednji:

- da zaradi (četudi razmeroma majhne) sposobnosti prevzema upogibnonateznih napetosti zagotovi povečan raznos prometnih obremenitev in delno premostitev lokalno slabše nosilnih mest
- da s (četudi razmeroma šibko) povezavo zrn in ustvaritvijo večjih stičnih ploskev, ki jih zagotovi vezivo z delno zapolnitvijo votlin v zmesi oziroma mešanici, zmanjša specifično obremenitev posameznih zrn v zmesi oziroma mešanici
- da omogoči uporabo zmesi zrn, ki bi sicer zaradi prekomernega deleža drobnih zrn ali neprimerne (nezvezne) sestave ne bila primerna za nevezano nosilno plast.

Medtem ko so takšne stabilizirane nosilne plasti primerne kot spodnje vezane nosilne plasti predvsem v voziščnih konstrukcijah za težje prometne obremenitve, so v voziščnih konstrukcijah za lažje prometne obremenitve lahko vgrajene kot edina vezana nosilna plast.

Za spodnje vezane nosilne plasti so primerni osnovni materiali, to so asfaltne in cementne mešanice. Pri izbiri velikosti zrn je treba upoštevati:

- da je za stabiliziranje zmesi zrn, ki vsebujejo večja zrna, potrebna manjša količina veziva, kar je praviloma ugodnejše, in
- da manjša zrna pogojujejo za stabiliziranje večjo količino veziva, ki zagotavlja tudi nezaželjene značilnosti:
 - pri stabilizaciji z organskim (bitumenskim) vezivom večje preoblikovanje
 - pri stabilizaciji z anorganskim (cementnim) vezivom prekomerno trdnost, ki ima za posledico namesto zaželenih lasastih škodljive širše razpoke.

Zgornje vezane nosilne plasti

Zgornje vezane nosilne plasti so praviloma vgrajene v voziščnih konstrukcijah za vse skupine prometnih obremenitev. Ker za zgornje vezane plasti uporabljamo praviloma znatno bolj kvalitetne zmesi ali mešanice, kot za stabilizirane nosilne plasti, so temu

primerno večje tudi njihove sposobnosti. Te pa so glede na položaj zgornjih vezanih nosilnih plasti v voziščnih konstrukcijah tudi potrebne, kajti

- strižne napetosti so prav v območju zgornjih vezanih nosilnih plasti v voziščnih konstrukcijah največje, velike pa so tudi upogibnonatezne napetosti,
- razmeroma velike so v območju zgornjih vezanih nosilnih plasti že tudi tlačne obremenitve, ki jih povzročajo motorna vozila, zato je čim večja površina stikovanja oziroma naleganja zrn = gostota zmesi ali mešanice koristna za njihov prevzem in raznos,
- gostejša zmes ali mešanica je koristna tudi za oviranje prodiranja vode s površine vozišča v voziščno konstrukcijo in naprej v podlago.

Za zgornje vezane nosilne plasti pretežno uporabljamo asfaltne zmesi, proizvedene po vročem postopku, ki jih označujejo nazivi

- bitumenizirani prodec,
- bitumenizirani prodec z dodatkom drobirja ali drobljenca,
- bitumenizirani drobljenec.

2.2.4 Obrabne in zaporne plasti

Obrabne in zaporne plasti voziščnih konstrukcij so namenjene zagotavljanju čim večje odpornosti vozne površine proti obrabi, ki v veliki meri vpliva na njeno ravnost in torno sposobnost, ter za zaščito celotnega cestnega telesa proti vodi.

Glede na druge namene uporabe na prometnih površinah poznamo nevezane in vezane obrabne plasti.

Nevezane obrabne plasti uporabljamo praviloma samo v voziščnih konstrukcijah za zelo lahko prometno obremenitev ali pa za začasno utrditev vozne površine. V teh pogojih je dodatni namen nevezane obrabne plasti

- zagotoviti čimbolj zaklinjeno zmes zrn na vozni površini, ki bo sposobna prevzeti vertikalne in horizontalne tlačne obremenitve od prometa,

- raznos prometnih obremenitev in
- zmanjšanje učinka mraza na materiale v cestnem telesu in temeljnih tleh.

Za zagotovitev potrebnih značilnosti nevezane obrabne plasti mora biti zmes kamnitih zrn sestavljena iz čimbolj skeletne (grobozrnate) osnovne zrnivosti ter iz zrnivosti za zaklinjanje (bolj fina zrna). Za skelet je treba uporabiti čimbolj odporna kamnita zrna in v sestavi zmesi čim večji delež grobih zrn.

Vežane obrabne in zaporne plasti

V cestogradbeni praksi so kot vrhnje plasti voziščnih konstrukcij uveljavljene obrabnozaporne, obrabne in zaporne plasti.

Odvisno od specifične sestave, ki je prirejena namenu uporabe, morajo biti takšne vrhnje plasti voziščnih konstrukcij sposobne prevzeti horizontalne, t.j. tangencialne in radialne sile med vozilom in voziščno konstrukcijo, ki so v tem območju največje, zagotavljati za varno in udobno vožnjo potrebno torno sposobnost in ravnost vozne površine ter zaščititi cestno telo pred padavinami in drugimi vremenskimi vplivi.

Vežane obrabne in zaporne plasti ločujemo glede na uporabljene zmesi, mešanice in druge materiale v

- asfaltne,
- cementnobetonske in
- tlakovane.

Asfaltne zmesi

V večini primerov se za obrabne in zaporne plasti voziščnih konstrukcij uporabljajo asfaltne zmesi, saj imajo le te najprimernejše lastnosti, ki so potrebne za obrabnozaporne plasti.

Takšne asfaltne zmesi so predvsem:

- bitumenski beton
- drobir z bitumenskim mastiksom
- diskontinuirani bitumenski beton
- hrapavi liti asfalt
- obdelava površin s tankoplastnimi in površinskimi prevlekami.

Značilna asfaltna zmes za obrabno plast je dranažni asfalt, kot zaporna plast pa je značilna asfaltna zmes litega asfalta.

Cementnobetonske krovne plasti voziščnih konstrukcij so za razliko od razmeroma gibkih asfaltnih plasti zelo toge. Tako prevzemajo obremenitev z upogibnonatezno trdnostjo.

V primerjavi z asfaltnimi imajo cementnobetonske krovne plasti nekaj pomembnih *prednosti*:

- boljši raznos obremenitev, ki dopušča manjšo nosilnost podlage
- vozna površina se zaradi vplivov prometa in temperatur ne preoblikuje
- večjo trajnost in manjše stroške vzdrževanja

pomanjkljivosti:

- celotno krovno plast oziroma voziščno konstrukcijo je treba zgraditi naenkrat
- morebitna popravila so zahtevnejša.

Cementnobetonske krovne plasti so primerne in potrebne predvsem na cestah z velikimi prometnimi in osnimi obremenitvami, z velikimi vzdolžnimi nagibi vozišča, na cestah kjer je prisotna dolgotrajna vročina in mraz in na cestah s kanaliziranim in usmerjanim prometom.

Tlakovane obrabne plasti gradimo predvsem za ureditev okolja, t.j. za lažji in mirujoči promet. Glede na pretežni namen uporabe tlakovanih obrabnih plasti uporabljamo poleg tlakovcev iz naravnega kamna tudi ustrezno oblikovane tlakovce iz različno obarvanega cementnega betona, klinkerja in žindre. Za zapolnitev rež med tlakovci lahko uporabimo ustrezno nevezano zmes kamnitih zrn in bitumensko zalivno zmes ali cementno malto.

3 DIMENZIONIRANJE VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE Z UPORABO TEHNIČNIH SPECIFIKACIJ

3.1 Uporabljene tehnične specifikacije

V diplomskem delu smo za dimenzioniranje voziščne konstrukcije uporabili naslednje tehnične specifikacije (TSC), ki jih je izdala Direkcija za ceste Republike Slovenije:

- TSC 06.520: 2009 Projektiranje, Dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij, DRSC
- TSC 06.512: 2003 Projektiranje, Klimatski in hidrološki pogoji
- TSC 06.511: 2009 Prometne obremenitve, določitev in razvrstitev
- TSC 06.100: 2003 Kamnita posteljica in povozni plato
- TSC 06.200: 2003 Nevezane nosilne in obrabne plasti
- TSC 06.330:2 003 Vezane spodnje nosilne plasti z bitumenskimi vezivi
- TSC 06.416: 2003 Vezane asfaltne obrabne in zaporne plasti – tankoplastne prevleke

TSC 06.520: 2009 Projektiranje, Dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij

Tehnična specifikacija za ceste TSC 06.520 določa dimenzije voziščnih konstrukcij na vseh prometnih površinah, ki so namenjene prometu z motornimi vozili, zgrajene pa na posteljici. Specifikacija je namenjena določitvi skupne debeline voziščne konstrukcije ter določitvi debelin plasti posameznih materialov v odvisnosti od vpliva

- prometnih obremenitev na utrujanje, v voziščno konstrukcijo vgrajenih materialov,

- nosilnosti podlage (posteljice) ter
- hidroloških in klimatskih razmer.

Dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij po TSC 06.520 temelji na predpostavki, da so vsi navedeni vplivi na obravnavanem odseku ceste podobni in se ne bodo pomembno spremenili od predvidenih. V tem primeru je zagotovljena načrtovana doba trajanja in uporabnosti zgrajene asfaltno voziščne konstrukcije, pri čemer se ta postopno zmanjšuje.

TSC 06.512: 2003 Projektiranje, Klimatski in hidrološki pogoj

Tehnična specifikacija za ceste TSC 06.512 določa osnove za opredelitev klimatskih in hidroloških pogojev pri gradnji cest, ki neposredno vplivajo na določitev vrste in izmer voziščnih konstrukcij.

V tehnični specifikaciji je opredeljen pomen najbolj uporabljenih izrazov v sklopu zmrzovanja in odtajanja materialov v cestnem telesu, značilnosti zmrzovanja in nastanek poškodb zaradi zmrzovanja in odtajanja.

Na osnovi tehnične specifikacije za ceste TSC 06.512 se določi potrebne ukrepe za zaščito materialov proti poškodbam zaradi zmrzovanja pri načrtovanju, gradnji in ohranitvi cest in zagotovi gospodarnost ukrepov.

TSC 06.511: 2009 Prometne obremenitve, določitev in razvrstitev

Tehnična specifikacija za ceste TSC 06.511 določa postopek za izrednotenje merodajne prometne obremenitve, na osnovi katere se določijo dimenzije plasti voziščnih konstrukcij z asfaltno in cementnobetonsko krovno plastjo za novogradnje kot tudi za popravila in ojačitve obstoječih voziščnih konstrukcij.

TSC 06.100: 2003 Kamnita posteljica in povozni plato

Tehnična specifikacija za ceste TSC 06.100 določa osnovne tehnične zahteve za kakovost materialov, kakovost izvedbe in ugotavljanje skladnosti, vključno z nadzorom kakovosti, ter napotke za izdelavo kamnite posteljice in povoznih platojev pri gradnji cest.

TSC 06.200: 2003 Nevezane nosilne in obrabne plasti

Tehnična specifikacija za ceste TSC 06.200 določa osnovne tehnične zahteve za kakovost izvedbe, ugotavljanje skladnosti, vključno nadzor kakovosti, ter napotke za izdelavo nevezanih nosilnih in nevezanih obrabnih plasti voziščnih konstrukcij.

Zahteve za kakovost izdelave nevezanih nosilnih in obrabnih plasti v teh tehničnih specifikacijah so minimalne ter morajo biti izpolnjene za vse značilne lastnosti.

TSC 06.330: 2003 Vezane spodnje nosilne plasti z bitumenskimi vezivi

Tehnična specifikacija za ceste TSC 06.330 določa tehnične pogoje za izdelavo vezanih spodnjih nosilnih plasti voziščnih konstrukcij z bitumenskimi vezivi po vročem postopku (stabiliziranje z bitumenom).

TSC 06.416: 2003 Vezane asfaltne obrabne in zaporne plasti – tankoplastne prevleke

Tehnična specifikacija za ceste TSC 06.416 določa osnovne tehnične zahteve za kakovost izvedbe in ugotavljanje skladnosti vezanih obrabnih in zapornih plasti – tankoplastnih prevlek voziščnih konstrukcij po hladnem in vročem postopku.

Zahteve za kakovost v tej tehnični specifikaciji so minimalne ter morajo biti izpolnjene za vse značilne lastnosti, pogojene v pogodbeni dokumentaciji.

Tankoplastne prevleke, zgrajene po TSC 06.416, so primerne za obrabne in zaporne plasti na voznih površinah novih in obstoječih cest za vse skupine prometnih obremenitev. Vgrajene morajo biti na z bitumenskim ali hidravličnim vezivom vezano podlago.

S tankoplastnimi prevlekami je predvsem mogoče

- zatesniti površino opustele ali razpokane podložne plasti,
- povečati torno sposobnost vozišča in
- izboljšati obrabljeno vozno površino.

Z ustreznimi postopki je mogoče s tankoplastnimi prevlekami tudi izboljšati ravnost vozne površine in zmanjšati hrupnost.

3.2 Projektni podatki za dimenzioniranje voziščne konstrukcije

3.2.1 Vozišče

Avtocesta je načrtovana kot štiripasovnica z odstavnimi nišami in vmesnim ločilnim pasom. Projektirani normalni prečni profil znaša 21,20 m, in sicer dva vozna pasova širine 3,50 m, dva prehitevalna pasova širine 3,50 m, 2 robna pasova po 0,30 m ob prehitevalnem pasu, 2 robna pasova po 0,50 m ob voznem pasu, srednji ločilni pas širine 3,0 m (2 x 1,50m), in dve bankini po 1,3 m. Vertikalni in horizontalni tehnični elementi upoštevajo računsko hitrost 110km/h.

Pri izračunu skupnega povprečnega števila prehodov NOO 100 kN³ skozi prečni prerez ceste na dan smo izvedli izračun za avtocestni odsek Dolga vas – Lendava. Upoštevali smo faktor za povprečne pogoje vožnje, načrtovana doba trajanja voziščne konstrukcije je 20 let, letna stopnja rasti prometa 5 %.

Podatki za obravnavano vozišče s pripadajočimi faktorji so sledeči:

Število prometnih pasov: 2

$f_{pp} = 0,45$ – faktor razdelitve prometne obremenitve v prečnem prerezu vozišča

Širina prometnega pasu: 3,50m

$f_{sp} = 1,10$ – faktor širine prometnega pasu

Maksimalni vzdolžni nagib nivelete vozišča do 4 %

$f_{nn} = 1,02$ – faktor vzdolžnega nagiba nivelete vozišča

Načrtovana doba trajanja voziščne konstrukcije 20 let, letna stopnja rasti prometa 5 %

$f_{tpp} = 35$ – faktor trajanja in povečanja prometa

Povprečni pogoji vožnje

$f_d = 1,08$ – faktor dodatne dinamične obremenitve

³ NOO 100 kN je nazivna osna obremenitev in pomeni obremenitev enojne osi vozila s 100 kN, ki se prenaša z dvojnimi kolesi (4 x 25 kN) na vozno površino.

3.2.2 Prometna obremenitev

Pri določitvi prometne obremenitve smo upoštevali podatke iz publikacije Promet 2009 (DRSC), števno mesto 884 Lendava AC.⁴

V izračunu je bila upoštevana naslednja prometna obremenitev:

Tabela 3.1: Upoštevana prometna obremenitev

Vrsta vozil		Število vozil	Faktor ekvivalentnosti	Število prehodov NOO
osebna vozila	OV	4113	0,00003	0,12
Avtobusi	A	113	1,40	158,20
Lahka tovorna vozila	LT	1055	0,005	5,28
Srednja tovorna vozila	ST	195	0,6	117,00
Težka tovorna vozila	TT	99	0,7	69,30
Težka tovorna vozila s prikolico, vlačilci	TTP	2289	1,6	3662,4
SKUPAJ				4012,30

3.2.3 Hidrološki in klimatski pogoji

Maksimalna globina prodiranja mraza h_m ⁵ na tem območju znaša približno 75 cm. Temeljna tla sestavljajo materiali, katere uvrščamo v razred odpornih proti učinkom zmrzovanja in odtaljevanja. Hidrološki pogoji po ureditvi ceste bodo neugodni. Potrebna debelina voziščne konstrukcije h_{min} je 70 % globine prodiranja mraza h_m , kar znaša 52,5 cm.

⁴ Direkcija Republike Slovenije za ceste (DRSC), dostopno na:

http://www.dc.gov.si/fileadmin/dc.gov.si/pageuploads/Promet/Prometne_obremenitve_2009v1.pdf

⁵ Povzeto po: Karta globin prodiranja mraza na področju Republike Slovenije TSC 06.512: 2003 Projektiranje, Klimatski in hidrološki pogoji

3.3 Dimenzioniranje voziščne konstrukcije

Tehnična specifikacija za ceste TSC 06.520 temelji na rezultatih AASHO testa (American Association of State Highway Officials). Osnovni parametri pri tem empiričnem postopku določanja dimenzij voziščnih konstrukcij so doba trajanja voziščne konstrukcije, nosilnost podlage oziroma posteljice (CBR), merodajna dnevna prometna obremenitev (T_d) ter značilnosti materialov v načrtovani voziščni konstrukciji (a_i , d_i).

3.3.1 Minimalne debeline plasti in potrebni debelinski indeks

Dimenzioniranje voziščne konstrukcije smo izvedli po tehničnih specifikacijah za javne ceste TSC 06.520:2009 (Projektiranje, Dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij), ki jih je izdala Direkcija Republike Slovenije za ceste.

Skupno povprečno število prehodov NOO 100 kN skozi prečni prerez ceste v načrtovani dobi trajanja je:

$$T_n = 365 \times T_d \times f_d \times f_{pp} \times f_{sp} \times f_{nn} \times f_{ipp} \quad (3.1)$$

$$T_{20} = 365 \times 4012.3 \times 1.08 \times 0.45 \times 1.10 \times 1.02 \times 35$$

$$T_{20} = 2,8 \times 10^7 \text{ prehodov NOO 100 kN}$$

To je izredno težka prometna obremenitev.

Zaradi zagotovitve zmrzlinke odpornosti voziščne konstrukcije in izboljšave nosilnosti temeljnih tal je predvidena vgradnja 30 cm debele plasti zmrzlinke odpornega kamnitega materiala. Vrednost na planumu posteljice je CBR = 10 %.

Na osnovi izračunane prometne obremenitve in predvidene nosilnosti na planumu posteljice je potrebna voziščna konstrukcija sestavljena iz naslednjih plasti:

- 27 cm asfaltne krovne plasti
- 35 cm nevezane zmesi zrn drobljenca

Debelinski indeks takšne voziščne konstrukcije znaša:

$$D_{potr} = 27 \times 0.38 + 35 \times 0.14 = 15.16 \text{ cm} \quad (3.2)$$

Na osnovi izračunane prometne obremenitve $T_{20} = 2,8 \times 10^7$ prehodov NOO 100 kN, vrednosti CBR = 10 % in globine zmrzovanja je izračunana potrebna debelina v voziščno konstrukcijo vgrajenih materialov.

Potrebna globina glede na vpliv mraza je:

$$h_{\min} = 0.7 \times h_m = 0.7 \times 75 = 52.5 \text{ cm} \quad (3.3)$$

Dimenzioniranje voziščne konstrukcije je izvedeno po TSC 06.520 : 2009, na podlagi prometne obremenitve in nosilnosti temeljnih tal (CBR = 10 %).

Tabela 3.2: Izbira materialov voziščne konstrukcije

IZBEREM				
Sloj		d (cm)	a_i	$a_i \cdot d_i$
Drobir z bitumenskim mastiksom	DBM 11S	4	0,42	1,68
Bituminizirani drobljenec	BD 22S	8	0,35	2,80
Bituminizirani drobljenec	BD 32S	8	0,35	2,80
S cementom stabilizirana zmes zrn		20	0,20	4,00
Tamponski drobljenec	TD 32	30	0,14	4,20
Skupaj:		70		15,48

$D_{dej} = 15,48 \geq D_{pot} = 15,16$ pogoj je izpolnjen

$h = 70 \text{ cm} \geq h_{\min} = 52,5 \text{ cm}$ pogoj je izpolnjen

V zadnjem delu diplomskega dela smo opisali vpliv predrobljenosti kamnitih zrn v nevezani plasti voziščne konstrukcije. Zato smo prikazali dimenzioniranje za štiri vrste murskega proda. Prva varianta je drobljen murski prod, nato mešanica drobljenega in nedrobljenega murskega proda v masnem razmerju 1:1, sledi mešanica drobljenega in nedrobljenega murskega proda v razmerju 1:2 in na koncu varianta, kjer bomo uporabili nedrobljen murski prod.

V vseh štirih primerih je zadoščeno tako debelinskemu kot tudi zmrzlinškemu pogoju.

Tabela 3.3: Primerjava štirih različnih mešanic proda

Vrsta materiala	Variante			
	1.	2.	3.	4.
drobir s bitumenskim mastiksom 11S debelina plasti h_1 (cm) $a_1 = 0,42$ debelinski indeks d_1 (cm)	4 1.68	4 1.68	4 1.68	4 1.68
bituminizirani drobljenec 22S debelina plasti h_2 (cm) $a_2 = 0,35$ debelinski indeks d_2 (cm)	8 2.80	8 2.80	8 2.80	8 2.80
bituminizirani drobljenec 32S debelina plasti h_2 (cm) $a_2 = 0,35$ debelinski indeks d_2 (cm)	8 2.80	8 2.80	8 2.80	8 2.80
s cementom stabilizirana zmes zrn debelina plasti h_3 (cm) $a_3 = 0,20$ debelinski indeks d_3 (cm)	20 4.00	20 4.00	20 4.00	20 4.00
drobljen murski prod debelina plasti h_4 (cm) $a_4 = 0,14$ debelinski indeks d_4 (cm)	30 4.20	/ /	/ /	/ /
drobljen in nedrobljen murski prod masno razmerje 1:1 debelina plasti h_4 (cm) $a_4 = 0,125$ debelinski indeks d_4 (cm)	/ /	33 4.125	/ /	/ /
drobljen in nedrobljen murski prod masno razmerje 1:2 debelina plasti h_4 (cm) $a_4 = 0,12$ debelinski indeks d_4 (cm)	/ /	/ /	35 4.20	/ /
nedrobljen murski prod debelina plasti h_4 (cm) $a_4 = 0,11$ debelinski indeks d_4 (cm)	/ /	/ /	/ /	38 4.18
Skupaj: debelina plasti - (cm) debelinski indeks D - (cm) D_{potr} - (cm)	70 15.48 15.16	73 15.41 15.16	75 15.48 15.16	78 15.46 15.16

4 IZRAČUN NAPETOSTI IN DEFORMACIJ V NEVEZANI NOSILNI PLASTI VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE PO METODI KONČNIH ELEMENTOV

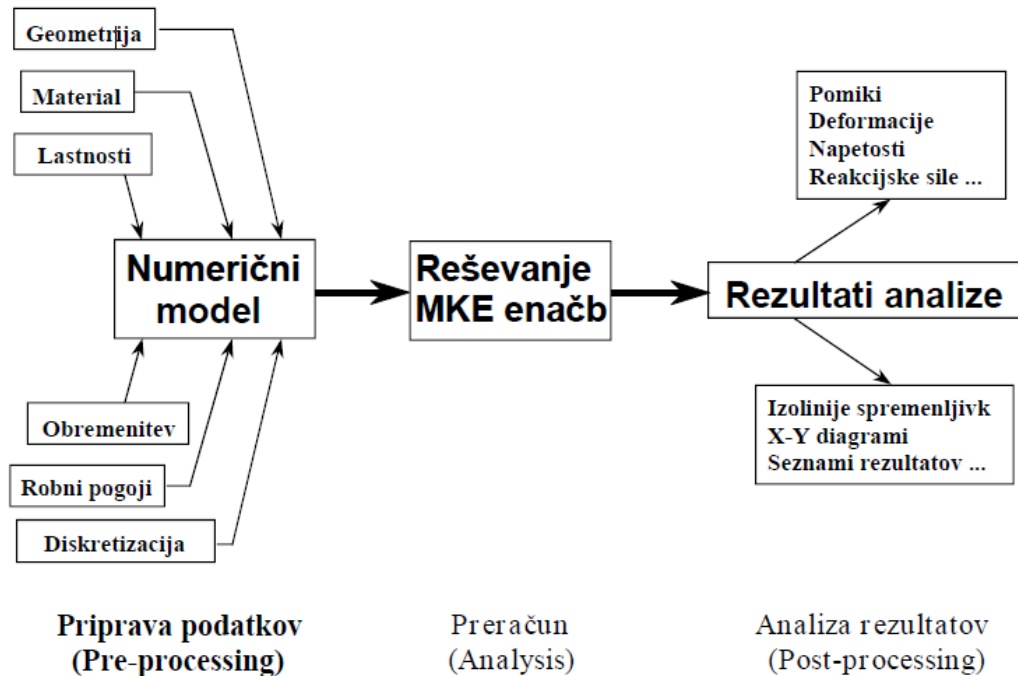
4.1 Splošno o metodi končnih elementov

Metoda končnih elementov (MKE) je numerična metoda, ki temelji na razdelitvi oziroma mreženju obravnavanega telesa na določeno število medsebojno povezanih elementov enostavnih geometrijskih oblik, ki jih imenujemo končni elementi. Mreža končnih elementov je medsebojno povezana v karakterističnih točkah imenovanih vozlišča, v katerih vrednotimo končno število računsko določljivih neznanih osnovnih spremenljivk. Natančnost numerične rešitve je tem večja, čim podrobnejše je mreženje, oziroma čim večje je število končnih elementov ali stopnja interpolacijskih funkcij. Sestavljene konstrukcije pogojujejo mreženje z velikim številom končnih elementov, pri čemer je potrebno numerično določiti veliko število neznank, kar je brez uporabe računalnikov zelo zamudno. Zaradi tega je bilo izdelano veliko število namenskih računalniških programov za analize inženirskih problemov po metodi končnih elementov.

V splošnem lahko potek celovite analize strukture po metodi končnih elementov razdelimo na naslednje korake:

- geometrijsko modeliranje problema,
- vnos materialnih lastnosti,
- izbira primernih končnih elementov in vnos fizikalnih lastnosti posameznih delov strukture,
- vnos robnih pogojev strukture,
- mreženje (diskretizacija) strukture s končnimi elementi,

- izračun po metodi končnih elementov,
- prikaz in analiza rezultatov.



Slika 4.1: Potek numerične analize⁶

Kot je razvidno iz slike, je potek numerične analize razdeljen v tri sklope:

- priprava podatkov oziroma izdelava numeričnega modela,
- preračun po metodi končnih elementov oziroma analiza modela in
- predstavitev ter analiza rezultatov.

4.2 Napetostno deformacijsko stanje v voziščni konstrukciji

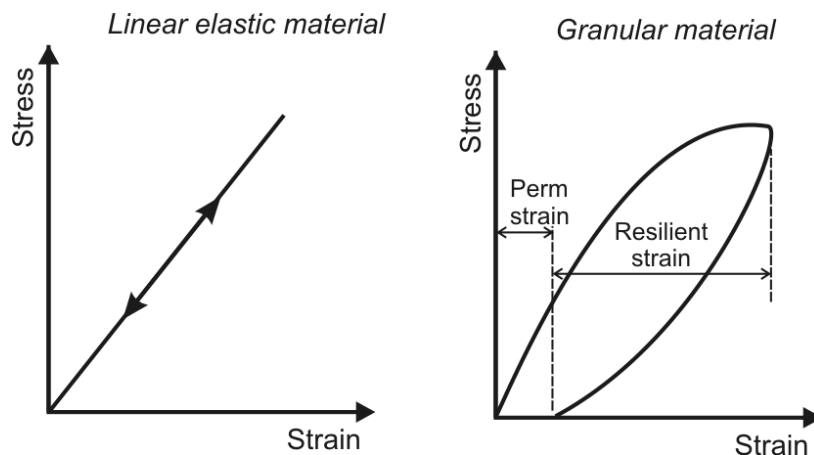
V materialih, ki sestavljajo voziščno konstrukcijo, se pod vplivi obremenitev pojavljata dve vrsti deformacij:

⁶ Povzeto po: Šalamun M., Kontrola vlečne naprave za osebna vozila, Diplomsko delo, Maribor, Fakulteta za strojništvo, 2009

- elastične oziroma prožne ter
- trajne deformacije.

Trajne deformacije imenujemo plastične in so nepovratne deformacije. Za nevezane granularne materiale je značilno, da se kljub nizkem napetostnem stanju obnašajo kot nelinearno elastoplastični materiali in ne prenašajo nateznih napetosti.

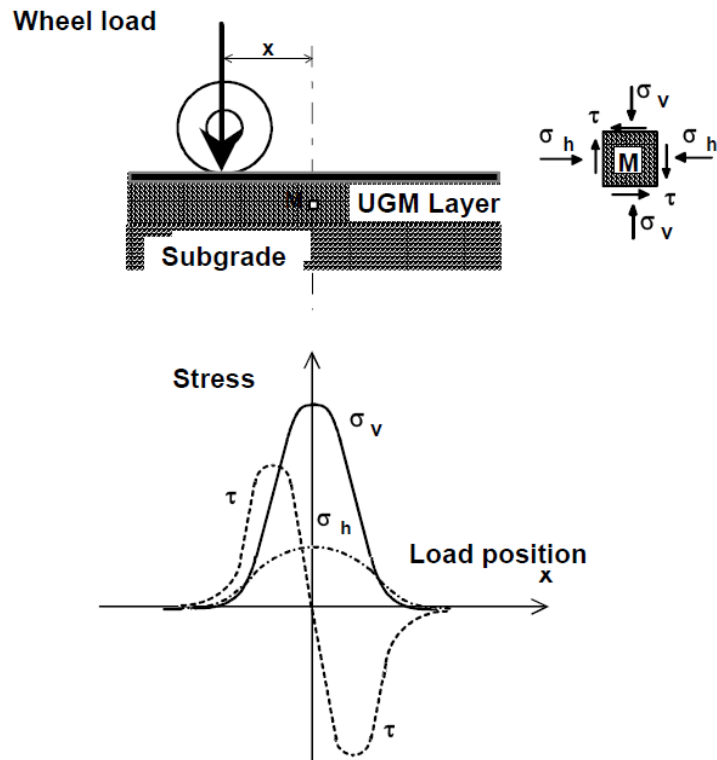
Leva krivulja na sliki 4.2 prikazuje obnašanje linearno elastičnega materiala. Material se po obremenitvi vrne v prvotno stanje. Deformacija je v celoti elastična. Desna krivulja pa prikazuje obnašanje granularnega materiala. Po obremenitvi se material ne vrne prvotno stanje, ampak ostane nekaj trajne deformacije.



Slika 4.2: Deformacije linearno elastičnega materiala in granularnega materiala (Lekarp, 1997)⁷

Na sliki 4.3 so prikazane napetosti v točki M, ki se pojavijo v nevezani nosilni plasti voziščne konstrukcije zaradi premikajoče se obtežbe. Ko se obremenitev premika, vertikalne σ_v in horizontalne napetosti σ_h spreminjajo smer gibanja v obliki sinusne krivulje, maksimalno vrednost pa dosežejo v trenutku, ko je središče obtežbe točno nad točko M ($x = 0$). Gibanje obtežbe povzroča spreminjanje smeri oziroma rotacijo glavnih napetosti. Na sliki 4.3 je rotacija glavnih napetosti vidna s potekom strižnih napetosti.

⁷ Lekarp F., Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials. Licentiate Thesis, Kungliga Tekniska Högskolan, ISSN 1104-683X, str. 78, 1997.



Slika 4.3: Spreminjanje napetosti zaradi premikajoče obtežbe⁸

4.2.1 Vrste materialnih modelov

Pri dimenzioniranju voziščne konstrukcije je zelo pomembno poznavanje obnašanja granuliranih materialov, ki bodo v času svoje uporabe izpostavljeni različnim obremenitvam. Opisali bomo štiri različne materialne modele. Ti modeli so

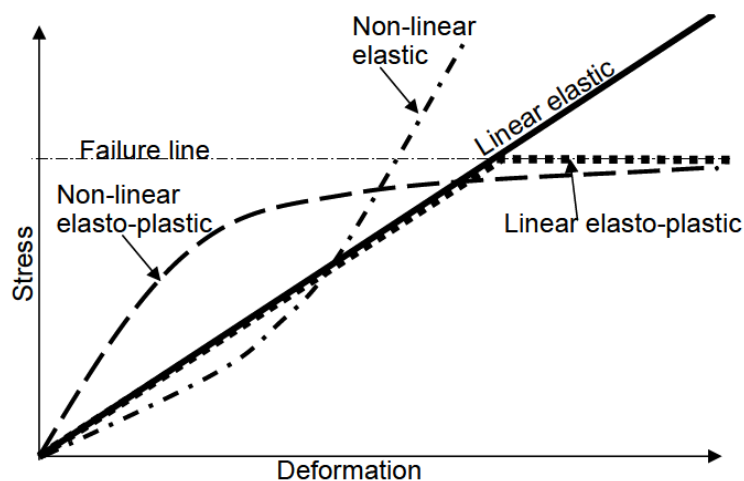
- linearno elastični,
- nelinearno elastični,
- linearno elastoplastični in
- nelinearno elastoplastični model.

⁸ SAMARIS, Selection and evaluation of models for prediction of permanent deformations of unbound granular materials in road pavements, 2004.

Najbolj enostaven je linearno elastični materialni model. Pri tem modelu velja Hookov zakon, potrebna materialna parametra pa sta Youngov modul E in Poissonov količnik ν .

Linearno elastoplastični materialni model vsebuje plastični porušitveni kriterij. Največkrat uporabljen je Mohr - Coulombov (MC) porušitveni kriterij. Pri tem modelu za analizo potrebujemo strižni kot φ in kohezijo c .

Nelinearno elastoplastični model vsebuje tako porušitveni kriterij kot nelinearnost elastičnega obnašanja. Primer nelinearnega elastoplastičnega modela je Hardening soil (HS) model (model utrjevanja).



Slika 4.4: Razmerje napetost – deformacija za različne materialne modele⁹

4.3 Izračun s programom Plaxis

Za izračun napetostnega in deformacijskega stanja smo uporabili program Plaxis. Program je zasnovan po metodi končnih elementov in je bil razvit za analizo deformacij in stabilnosti v geotehničnih inženirskih projektih. Preprosti grafični vhodni procesi omogočajo hitro reševanje kompleksnih računskih modelov. Izračun je popolnoma avtomatičen in temelji na numeričnih procesih, natančne izhodne zmogljivosti programa pa nam omogočajo detajlno predstavitev izračunanih rezultatov.

⁹ Lekarp F., Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials. Licentiate Thesis, Kungliga Tekniska Högskolan, ISSN 1104-683X, str. 78, 1997.

Pri izračunu s programom Plaxis smo upoštevali naslednje trditve:

- tlačne napetosti so negativne, natezne napetosti pa pozitivne,
- izračun je opravljen v osušenih pogojih, saj so plasti voziščne konstrukcije praviloma nenasičene,
- vsi granulirani materiali so obravnavani kot elastoplastični modeli,
- vsi vezani materiali (asfaltna plast) so obravnavani kot linearno elastični modeli,
- izračuni napetosti in deformacij so potekali v 2D osnosimetrični študiji,
- pritisk kolesa na voziščno konstrukcijo je obravnavan kot enakomerno porazdeljena krožna obremenitev z radijem 20 cm (velikost kontaktnega območja enako velika, kot bi imeli pravokotno obtežbo)
- uporabljen je bil Mohr - Coulombov porušitveni kriterij
- izračun napetostnega in deformacijskega stanja z dinamično analizo.

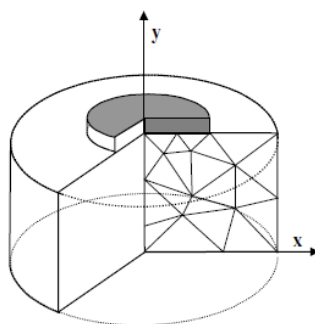
Postopki izračuna v programu Plaxis si sledijo v naslednjem zaporedju:

- geometrija modela
 - določitev splošnih nastavitev
 - izris voziščne konstrukcije
 - določitev obtežbe ter mejnih stanj
 - vnos materialnih karakteristik
 - generiranje mreže
 - določitev začetnih stanj materialov
- izračun
- analiza rezultatov

4.3.1 Geometrija modela

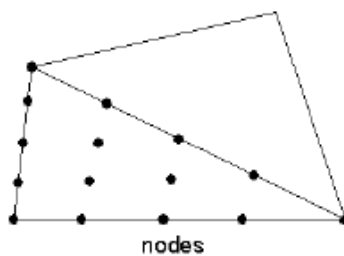
Splošne nastavitve

Obravnavan primer simuliramo z uporabo osnosimetričnega modela (slika 4.5). Ta modelna oblika se uporablja za krožne obremenitve z enakomernim radialnim prerezom in enakomerno obremenitveno shemo okoli središčne osi, kjer predvidevamo, da so deformacijska in napetostna stanja v vseh radialnih smereh enaka. Pri osnosimetričnih problemih x – koordinatna os predstavlja radij, y – koordinata pa aksialno smer.



Slika 4.5: Primer osnosimetričnega problema¹⁰

Elementi, ki bodo tvorili mrežo osnosimetričnega modela, so 15 – vozliščni trikotni elementi (slika 4.6). Omogočajo zelo natančne rezultate različnih problemov. Slabost teh natančnih elementov pa je, da izračun traja bistveno dlje, kot če bi uporabljali 6 – vozliščne elemente.



Slika 4.6: Položaj vozlišč trikotnega elementa

¹⁰ Povzeto po: PLAXIS 2D, Version 8 manual, In: Brinkgreve R.B.J, editors. AA Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2002

Izris voziščne konstrukcije




Za analizo napetostno deformacijskega stanja v voziščni konstrukciji smo uporabili izračunane debeline posameznih plasti iz prejšnjega poglavja »Dimenzioniranje voziščne konstrukcije z uporabo tehničnih specifikacij«.

Na sliki 4.7 voziščno konstrukcijo sestavljajo tri različne plasti materialov. Vrhnja plast, ki je označena s črno barvo je plast asfalta, nato sledi plast tamponskega drobljenca in na koncu plast trdne podlage (obstoječa tla).



Slika 4.7: Sestava triplastne voziščne konstrukcije

Tabela 4.1: Debeline posameznih plasti voziščne konstrukcije

Vrsta materiala		Debelina (cm)
Asfalt		20
Tamponski drobljenec		50
Trdna podlaga		400

Določitev obtežbe ter mejnih stanj

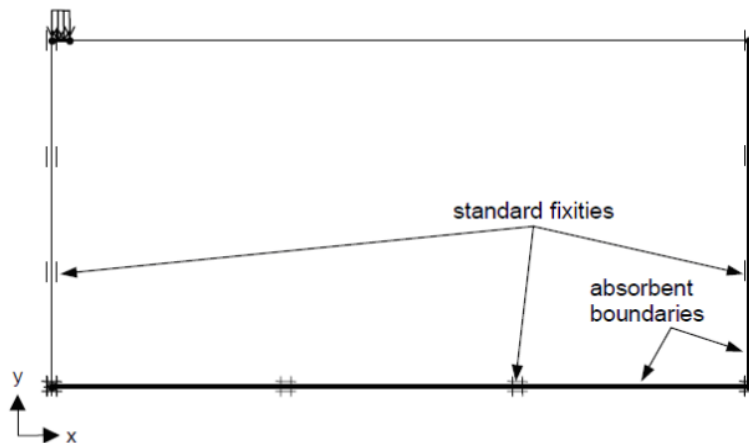
Voziščna konstrukcija je obremenjena z dinamično obtežbo širine 20 cm. Velikost, s katero obtežba pritiska na vozišče je enaka 1MPa.

Leva in desna meja voziščne konstrukcije ima možen pomik le v vertikalni smeri ($u_y \neq 0$), medtem ko je horizontalen pomik enak 0 ($u_x = 0$). Spodnja meja ima preprečena tako vertikalni kot horizontalni pomik.

Spodnji in desni strani voziščne konstrukcije moramo dodati posebne mejne pogoje. Imenujemo jih absorpcijske meje. Absorpcijske meje so namenjene absorbiranju prirastka napetosti, ki se pojavi na mejah zaradi dinamične obtežbe. V primeru, da absorpcijskih mej ne bi upoštevali, bi se te napetosti od mej odbijale nazaj v notranjost zemljine in povzročale motnje. Ker pa teh motenj v celoti ni mogoče zaustaviti, moramo prvotne meje postaviti v čim večji oddaljenosti od območja obravnave.

Leva meja je simetrijska os, zgornja meja pa je prosta površina, zato tukaj absorpcije ne upoštevamo.

Zgoraj naštetje trditve so prikazane na sliki 4.8.



Slika 4.8: Prikaz standardnega vpetja in absorpcijskih mej voziščne konstrukcije

Materialne karakteristike

Materialni parametri, ki smo jih uporabili za analizo napetostno deformacijskega stanja v voziščni konstrukciji, smo pridobili na podlagi že izvedenih laboratorijskih preizkusov ter glede na predhodne izkušnje o velikostih trdnostnih parametrov obravnavanih materialov.

Asfaltno plast smo definirali kot linearno elastični materialni model, spodnji nevezani plasti (plast tampona in podlage) voziščne konstrukcije pa obravnavamo kot Mohr - Coulombov materialni model.

Modul elastičnosti pri tamponskem drobljencu in trdni podlagi je visokih vrednosti zato, ker na vrednost vpliva dinamična obremenitev. Dinamična togost tal je precej večja kot statična togost, saj je dinamična obtežba hitrejša in povzroči zelo male deformacije.

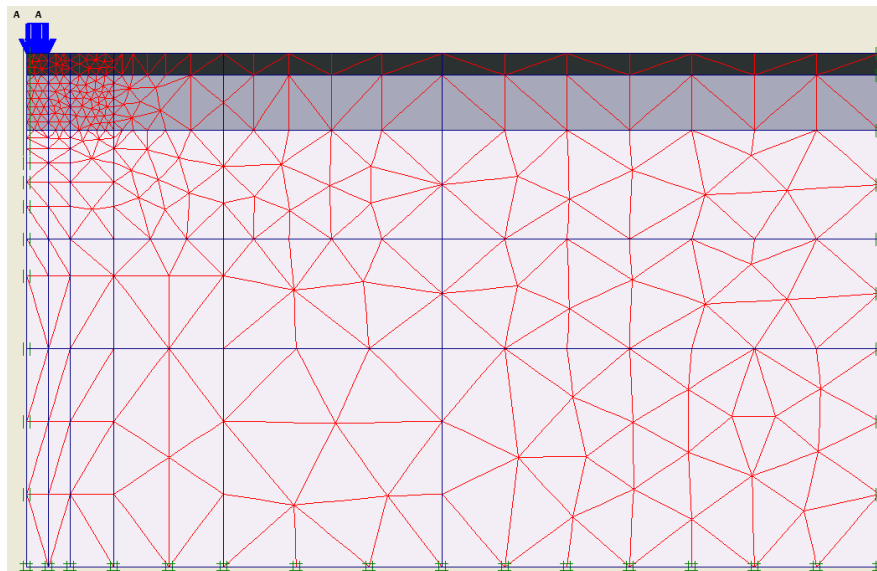
V tabeli 4.2 so prikazane vrednosti vhodnih parametrov za različne plasti materialov.

Tabela 4.2: Vrednosti deformabilnih in trdnostnih parametrov različnih materialov

Material	Oznaka	Enota	Asfalt	Tamponski drobljenec	Trdna podlaga
Materialni model			Linearno elastični (LE)	Mohr - Coulomb (MC)	Mohr - Coulomb (MC)
Modul elastičnosti	E	MPa	5400	500	100
Poissonov količnik	ν	/	0.30	0.35	0.35
Prostorninska teža	γ	kN/m ³	25	22	22
Kohezija	c	kPa	/	1	1
Strižni kot	ϕ	°	/	40	40
Kot dilatacije	ψ	°	/	10	10
Mirni zemeljski pritisk	K_0	/	0.428	0.357	0.357

Generiranje mreže

Zaradi pričakovanih večji koncentracij napetosti v območju pod obremenitvijo, v tem delu voziščne konstrukcije mrežo večkrat izpopolnimo.



Slika 4.9: Generiranje mreže

Začetna stanja materialov

Začetne efektivne napetosti so odvisne od K_0 postopka. Velikosti parametra K_0 so podane v tabeli 4.2.

Prisotnost vodnih tlakov oziroma prisotnosti podtalnice v našem primeru ni.

4.3.2 Izračun

V postopku izračuna smo definirali dinamično obtežbo z aktiviranjem obtežbe kot funkcije časa v odvisnosti od pripadajočega multiplikatorja oziroma množitelja.

Izračun sestoji iz sledečih korakov:

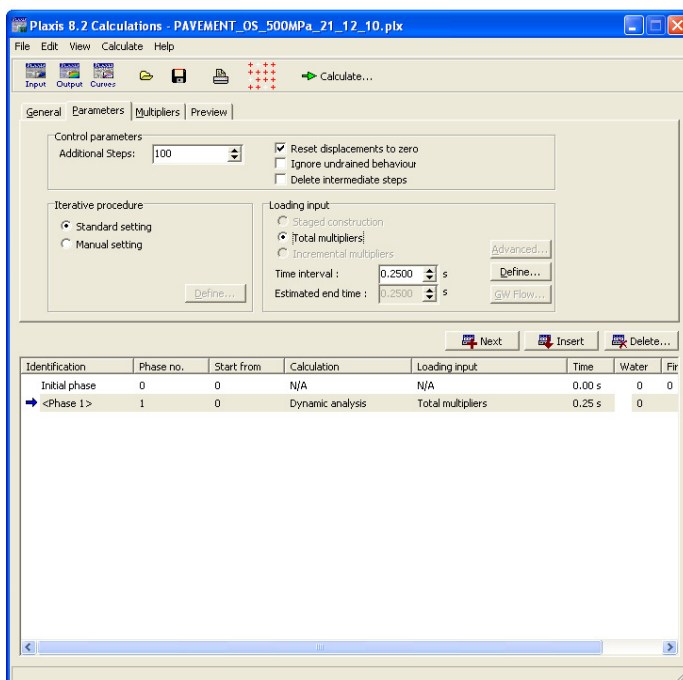
- Izbira dinamične analize
- Določitev dinamičnih parametrov
- Določitev dinamične obtežbe

Določitev dinamičnih parametrov

Pri izbiri dinamičnih parametrov smo upoštevali sledeče:

- izračun izveden v 100 korakih,
- pomiki so enaki 0,
- časovni interval enega cikla je 0.25 s.¹¹

Na sliki 4.10 so prikazane zgoraj naštete lastnosti parametrov.

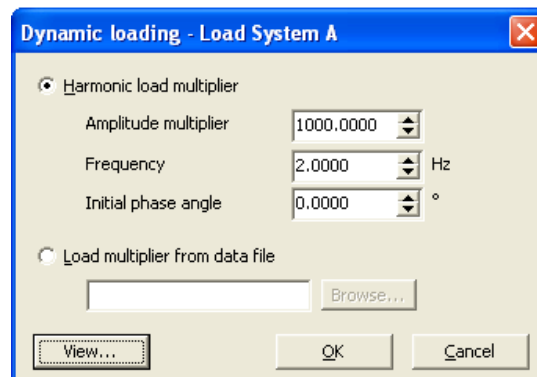


Slika 4.10: Izbira parametrov za dinamično analizo

¹¹ Časovni interval enega cikla povzamemo iz terenskih meritev

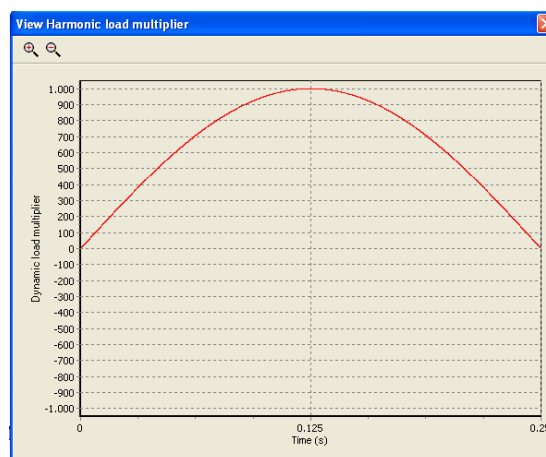
Določitev dinamične obtežbe

Za simuliranje obravnavanega problema smo uporabili vertikalno harmonično obtežbo s frekvenco 2 Hz in amplitudo 1000 kN/m^2 .



Slika 4.11: Dinamična obtežba

Na sliki 4.12 je prikazan en cikel v časovnem intervalu 0.25 sekunde.

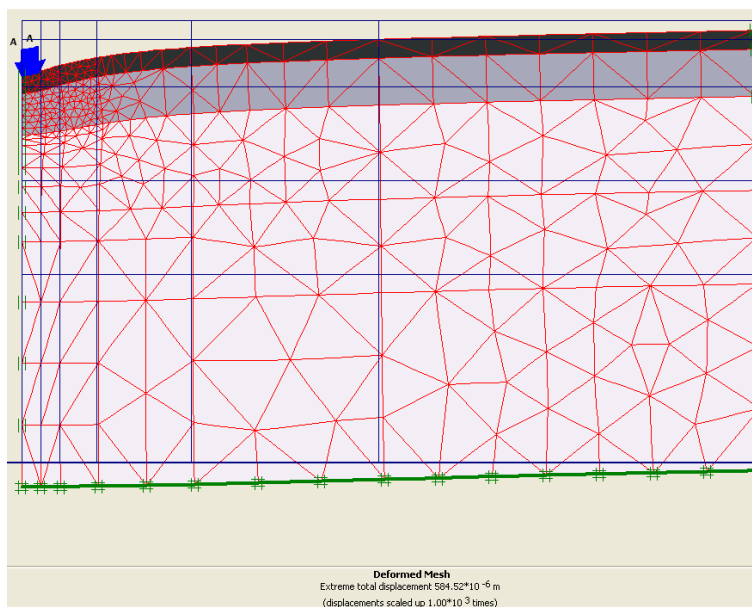


Slika 4.12: Grafični prikaz množitelja v odvisnosti od časa

4.3.3 Analiza rezultatov

Vse vrednosti, ki jih dobimo s programom Plaxis, so izračunane za en cikel obremenjevanja.

Na sliki 4.13 je prikazana sprememba oblike voziščne konstrukcije, ki nastane zaradi vpliva dinamične obtežbe. Zaradi boljše predstave je slika izrisana v povečanem merilu (1000 krat). Maksimalen pomik je na simetrijski osi tik pod obtežbo oziroma na vrhu asfaltne plasti.



Slika 4.13: Deformacija voziščne konstrukcije pod vplivom dinamične obtežbe

V tabeli 4.3 so prikazane napetosti z negativnim predznakom tlačne napetosti, pozitivni predznak pa predstavlja natezne napetosti.

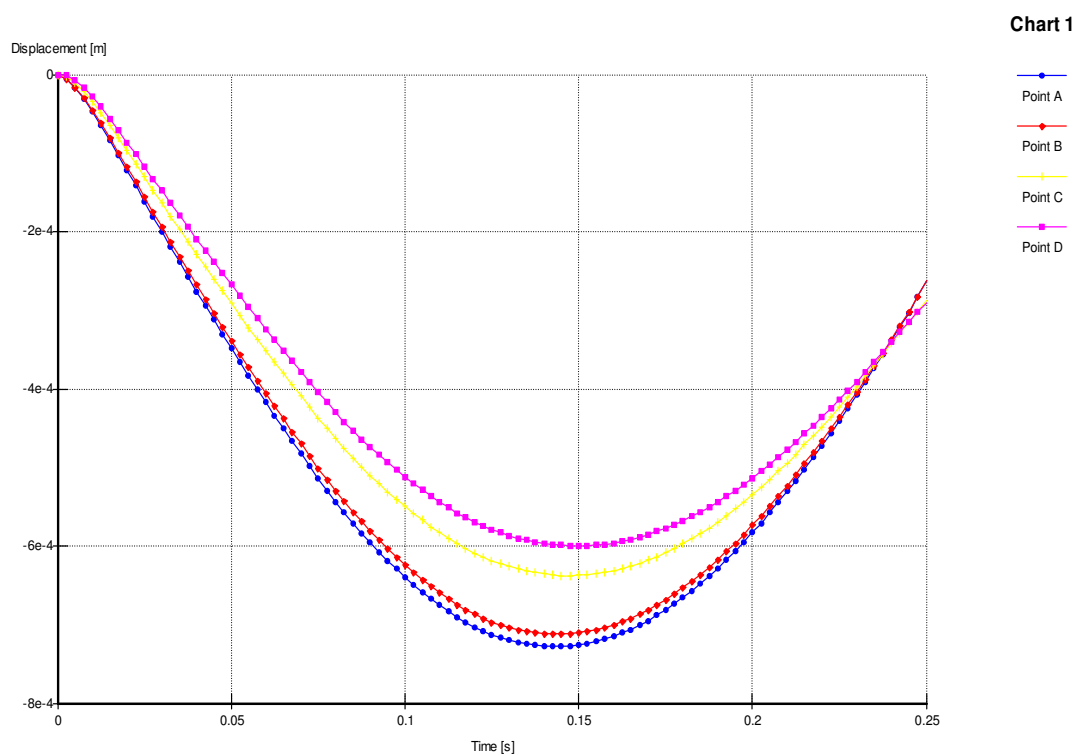
Krivulje na sliki 4.14 predstavljajo časovno spreminjanje velikosti vertikalnih pomikov na simetralni osi voziščne konstrukcije.

Point A - Spreminjanje vertikalnih pomikov na vrhu asfaltne plasti (0, 0)

Point B - Spreminjanje vertikalnih pomikov na vrhu tamponske plasti (0, -0.2)

Point C - Spreminjanje vertikalnih pomikov na sredini tamponske plasti (0, -0.55)

Point D - Spreminjanje vertikalnih pomikov na dnu tamponske plasti (0, -0.7)



Slika 4.14: Spreminjanje vertikalnih pomikov v odvisnosti od časa

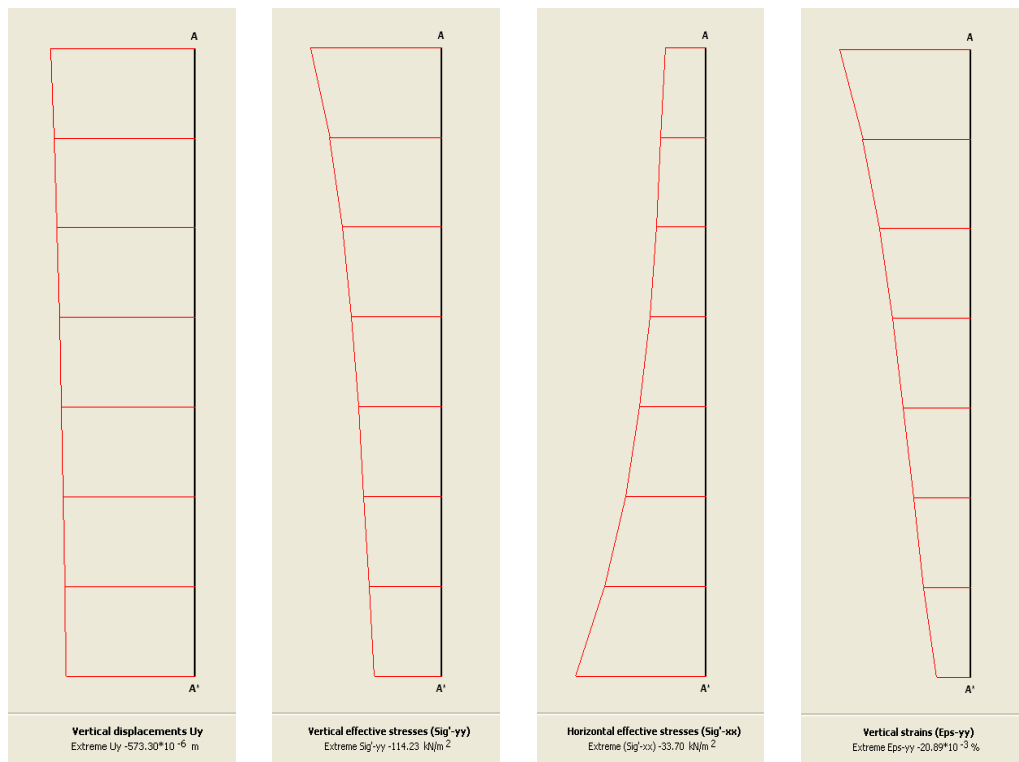
Iz slike 4.14 je razvidno, da so vertikalni pomiki na vrhu voziščne konstrukcije največji, z globino pa te vrednosti upadajo. Maksimalen pomik je tako pri času $t = 0.14$ sekunde in znaša $u_y = 0.7$ mm.

Vrednosti pomikov, napetosti in deformacij tamponskega sloja prikažemo na treh oddaljenostih od simetrijske vertikalne osi.

- napetosti in deformacije na simetrijski osi (X=0) voziščne konstrukcije

Tabela 4.3: Pomiki, napetosti in deformacije na različnih globinah simetrijske osi

X [m]	Y [m]	U _y [mm]	σ _{yy} [kPa]	σ _{xx} [kPa]	ε _{yy} [%]	τ _{oct} [kPa]
0	-0.20	-0.573	-114.225	-10.483	-0.0208	48.904
0	-0.27	-0.559	-98.080	-11.712	-0.0172	40.714
0	-0.34	-0.548	-86.750	-12.830	-0.0145	34.846
0	-0.41	-0.538	-78.678	-14.544	-0.0125	30.233
0	-0.48	-0.530	-72.642	-17.093	-0.0107	26.186
0	-0.55	-0.523	-67.811	-20.816	-0.0091	22.153
0	-0.62	-0.517	-63.478	-26.089	-0.0074	17.625
0	-0.70	-0.512	-58.620	-33.700	-0.0054	11.747



Slika 4.15: Grafični prikaz spreminjanja pomikov, napetosti in deformacij (X=0)

Tabela 4.4: Deviatorične in normalne komponente napetosti na različnih globinah simetrijske osi

X [m]	Y [m]	p [kPa]	q [kPa]	q/p [-]
0	-0.20	-45.075	-103.725	2.3
0	-0.27	-40.508	-86.359	2.1
0	-0.34	-37.473	-73.916	1.9
0	-0.41	-35.923	-64.131	1.7
0	-0.48	-35.611	-55.547	1.5
0	-0.55	-36.482	-46.993	1.2
0	-0.62	-38.553	-37.387	0.9
0	-0.70	-42.007	-24.919	0.5

Strižno napetost dobimo z naslednjo enačbo:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (4.1)$$

kjer je:

$$\sigma_1 = \sigma_{yy} \text{ - vertikalna napetost}$$

$$\sigma_3 = \sigma_{xx} \text{ - horizontalna napetost}$$

Normalne napetosti izračunamo z enačbo:

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad (4.2)$$

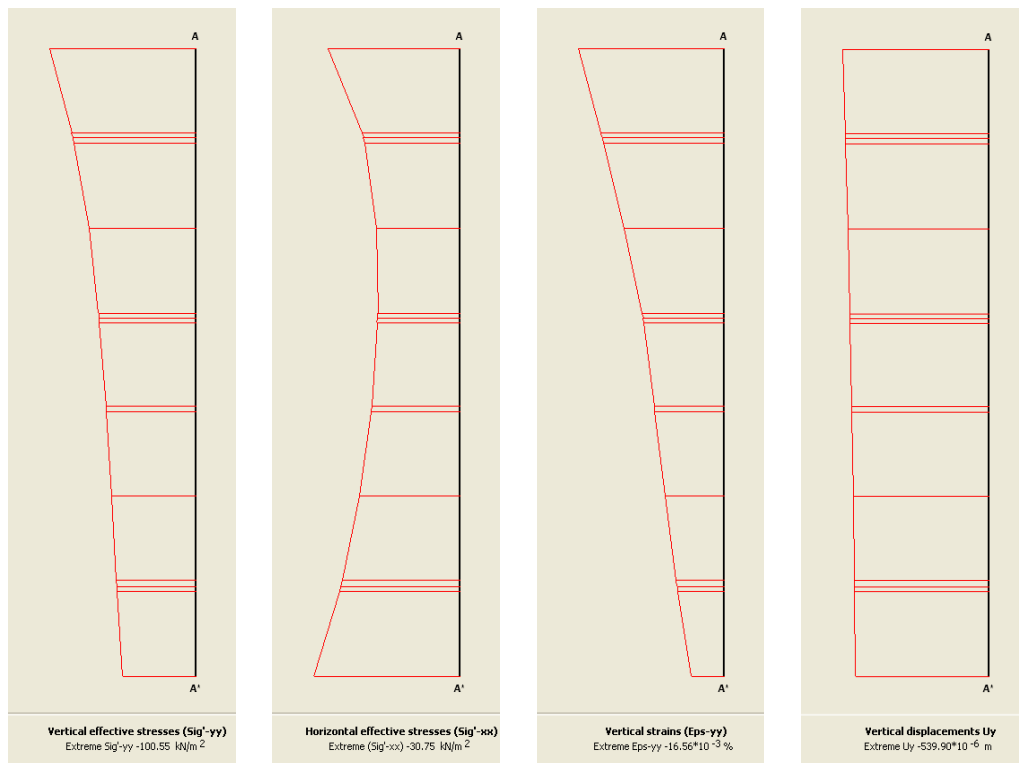
Deviatorične napetosti dobimo z enačbo:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4.3)$$

- **napetosti in deformacije na oddaljenosti 0.20 m od simetrijske osi (X=0,20)**

Tabela 4.5: Pomiki, napetosti in deformacije v različnih točkah voziščne konstrukcije

X [m]	Y [m]	U _y [mm]	σ_{yy} [kPa]	σ_{xx} [kPa]	ϵ_{yy} [%]	τ_{oct} [kPa]
0.20	-0.20	-0.539	-100.550	-27.657	-0.0165	34.362
0.20	-0.27	-0.528	-83.622	-20.050	-0.0137	29.968
0.20	-0.34	-0.520	-73.539	-17.603	-0.0113	26.368
0.20	-0.41	-0.512	-66.577	-17.356	-0.0091	23.203
0.20	-0.48	-0.506	-61.499	-18.686	-0.0079	20.182
0.20	-0.55	-0.501	-57.916	-21.081	-0.0067	17.364
0.20	-0.62	-0.496	-54.554	-25.073	-0.0053	13.897
0.20	-0.70	-0.493	-50.891	-30.749	-0.0037	9.495



Slika 4.16: Grafični prikaz spreminjanja pomikov, napetosti in deformacij (X=0,20)

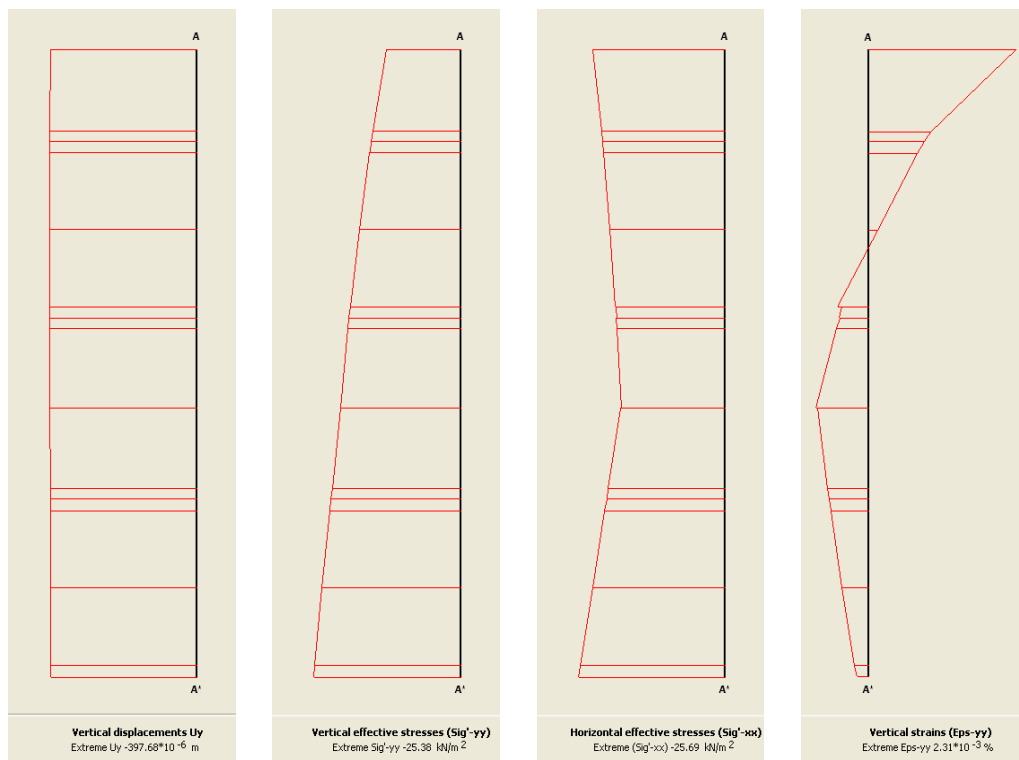
Tabela 4.6: Deviatorične in normalne komponente napetosti v različnih točkah voziščne konstrukcij

X [m]	Y [m]	p [kPa]	q [kPa]	q/p [-]
0.20	-0.20	-51.954	-72.893	1.4
0.20	-0.27	-41.240	-63.572	1.5
0.20	-0.34	-36.248	-55.936	1.5
0.20	-0.41	-33.763	-49.221	1.4
0.20	-0.48	-32.957	-42.813	1.3
0.20	-0.55	-33.359	-36.835	1.1
0.20	-0.62	-34.900	-29.481	0.8
0.20	-0.70	-37.463	-20.142	0.5

- **napetosti in deformacije na oddaljenosti 0.80 m od simetrijske osi (X=0,80)**

Tabela 4.7: Pomiki, napetosti in deformacije v različnih točkah voziščne konstrukcije

X [m]	Y [m]	U _y [mm]	σ_{yy} [kPa]	σ_{xx} [kPa]	ϵ_{yy} [%]	τ_{oct} [kPa]
0.80	-0.20	-0.3976	-12.885	-23.256	0.00230	4.888
0.80	-0.27	-0.3975	-15.433	-21.467	0.00087	2.844
0.80	-0.34	-0.3973	-17.568	-20.189	0.00013	1.235
0.80	-0.41	-0.3970	-19.305	-19.084	-0.00045	1.041
0.80	-0.48	-0.3968	-20.771	-18.313	-0.00080	1.158
0.80	-0.55	-0.3965	-22.388	-20.772	-0.00062	0.761
0.80	-0.62	-0.3961	-23.926	-23.144	-0.00042	0.368
0.80	-0.70	-0.3959	-25.381	-25.688	-0.00018	0.144



Slika 4.17: Grafični prikaz spreminjanja pomikov, napetosti in deformacij (X=0.80)

Tabela 4.8: Deviatorične in normalne komponente napetosti v različnih točkah voziščne konstrukcije

X [m]	Y [m]	p [kPa]	q [kPa]	q/p [-]
0.80	-0.20	-12.553	-24.668	1.9
0.80	-0.27	-13.299	-23.756	1.7
0.80	-0.34	-14.068	-23.448	1.6
0.80	-0.41	-14.780	-23.386	1.5
0.80	-0.48	-15.564	-23.423	1.5
0.80	-0.55	-17.530	-22.513	1.2
0.80	-0.62	-19.511	-21.173	1.1
0.80	-0.70	-21.614	-19.337	0.8

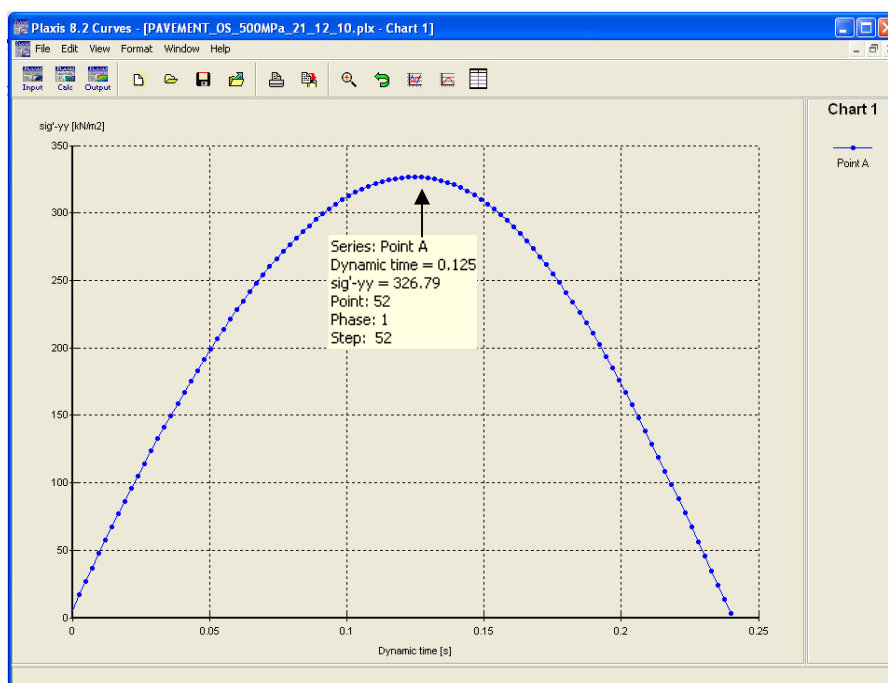
4.3.4 Primerjava rezultatov

Da so rezultati, ki jih dobimo s programom Plaxis realni in približno enaki tistim, ki jih dobimo s pomočjo meritev na terenu, smo na primeru vertikalnih napetosti naredili primerjavo.

V našem primeru je debelina asfaltne plasti enaka 20 cm. Ker pa je debelina asfaltne plasti, od koder smo pridobili meritve enaka 10 cm, smo v programu Plaxis naredili nov geometrijski model, ki bo ustrezal tem debelinam. V novem modelu so vsi geometrijski elementi in vse karakteristike materialov enake kot v modelu z 20 cm asfaltno plastjo (slika 4.7 in tabela 4.2), razlikuje se samo debelina asfaltne plasti.

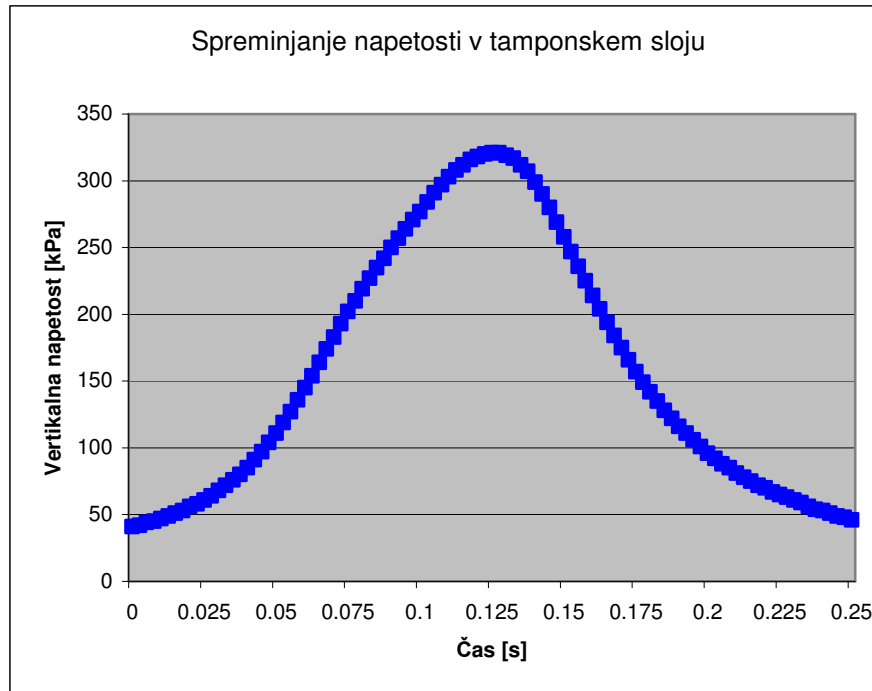
Prikazali bomo krivulji vertikalnih napetosti v globini 15 cm od vrha tamponskega sloja dobljeni s programom Plaxis in izmerjeni na terenu.

Slika 4.18 prikazuje spreminjanje vertikalnih napetosti v odvisnosti od časa. Krivulja ustreza napetostim v globini 15 cm pod vrhom tamponskega sloja. Maksimalna vertikalna napetost se zgodi v času $t = 0.125$ sekunde po začetku cikla in znaša $\sigma_{yy} = 327$ kPa.



Slika 4.18: Spreminjanje vertikalnih napetosti v tamponskem sloju s programom Plaxis

Na sliki 4.19 je prikazan časovni potek spreminjanja vertikalnih napetosti v tamponskem sloju izmerjenih na terenu. Časovni interval enega cikla je 0.25 sekunde. Maksimalna vertikalna napetost je enaka $\sigma_{yy} = 321$ kPa in se zgodi pri času $t = 0.125$ sekunde.



Slika 4.19: Spreminjanje vertikalnih napetosti v tamponskem sloju na terenu

Maksimalna vertikalna napetost, dobljena s programom Plaxis se ujema z maksimalno vrednostjo vertikalne napetosti, ki je bila izmerjena na terenu. Tudi časovno območje enega cikla (maksimalna vertikalna napetost pri času 0.125 s) se pri obeh zgoraj prikazanih primerih (slika 4.18, 4.19) ujema.

Iz zgornjih trditev lahko sklepamo, da nam geometrijski model, ki smo ga definirali za izračun napetostno deformacijskega stanja v nevezani nosilni plasti voziščne konstrukcije, poda rezultate, ki so primerljivi realnemu stanju nevezane nosilne plasti.

5 NAČRTOVANJE VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE Z UPOŠTEVANJEM TRAJNIH DEFORMACIJ

Nevezani materiali v voziščni konstrukciji so pod vplivom dinamičnih obremenitev prometa podvrženi elastičnim oziroma povratnim deformacijam in plastičnim oziroma trajnim deformacijam. Elastične deformacije povzročajo nastanek razpok v zgornjih vezanih plasteh, trajne deformacije pa lahko povzročijo porušitev voziščne konstrukcije. Problema nastanka razpok ali deformacij ni možno rešiti samo na osnovi karakteristik plasti, ki so v voziščni konstrukciji, ampak je potrebno upoštevati med drugim tudi prometne obremenitve in vpliv okolja, v katerem se voziščna konstrukcija nahaja.

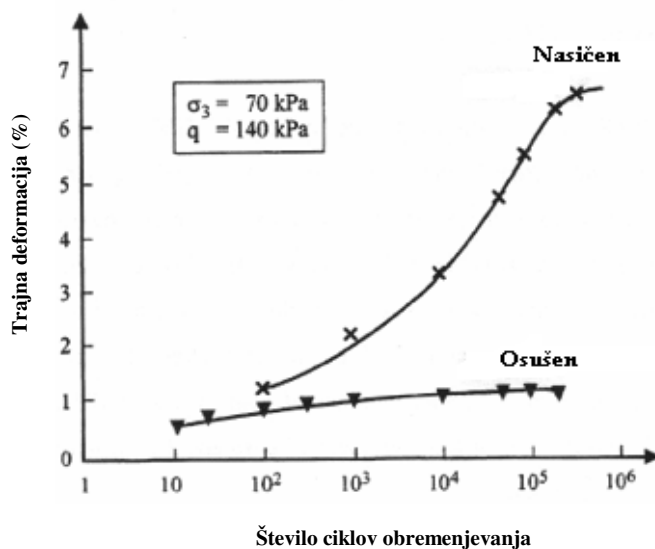
Trajne deformacije so najbolj opazne v asfaltni plasti, saj se deformacije iz nižjih plasti prenašajo v zgornje. Deformacije v asfaltni plasti se pojavljajo v obliki kolesnic. Zato je pri načrtovanju voziščne konstrukcije zelo pomembno poznavanje dejavnikov, ki vplivajo na trajnostne deformacije v spodnjih plasteh oziroma v nevezani nosilni plasti. Ti dejavniki so:

- delež vode
- zgoščenost
- nivo napetosti
- število ciklov obremenjevanja
- sestava
- oblika zrn kamnitega materiala
- mineraloška sestava kamnin

Z dobrim poznavanjem teh dejavnikov in posledično prilagajanjem le teh lahko bistveno omejimo oziroma zmanjšamo nastanek trajnih deformacij v nevezani nosilni plasti.

5.1 Delež vode

Delež vode ima zelo pomembno vlogo pri nastanku trajnih deformacij. Splošno znano je, da se v nevezani nosilni plasti vedno nahaja določen delež vode in ta vodni film na površini zrn vpliva na strižno odpornost materiala. Če je delež vode optimalen, voda pozitivno pripomore k trdnosti, napetosti in deformaciji v voziščni konstrukciji. Če se vsebnost vode v nevezanih materialih povečuje do vrednosti, ki je večja od optimalne, trajne deformacije močno naraščajo. Prekomerna voda povzroči zmanjšanje togosti, posledično pa nastanejo deformacije.



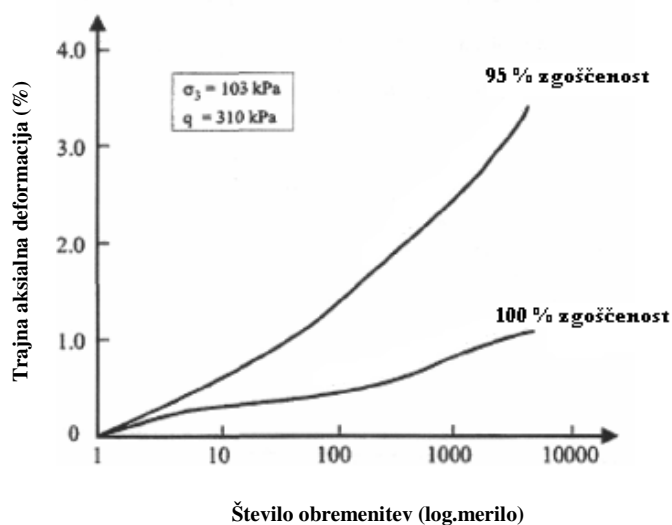
Slika 5.1: Občutljivost trajnih deformacij na vsebnost vode (DAW,1990)¹²

Na sliki je prikazan potek naraščanja trajnih deformacij za osušen in nasičen vzorec materiala. Test je pokazal, da se z večanjem vsebnosti vode povečujejo trajnostne deformacije. Pri 1000 ciklih obremenjevanja se totalna trajnostna deformacija nevezanega zrnavega materiala poveča za 300 %, če se poveča delež vode v plasti iz 3.1 % na 5.7 %. Če se delež vode v plasti zaglinjenega peska poveča iz 3 % na 6.6 %, se totalna trajnostna deformacija poveča za 200 %.

¹² Dawson A. R., Introduction to soils and granular materials, Lecture notes from Residential Course, Bituminous Pavements - materials, design and evaluation, Department of Civil Engineering, University of Nottingham, 1990.

5.2 Zgoščenost

Gostota zmesi kamnitih zrn je eden najbolj pomembnih faktorjev, ki vplivajo na nastanek trajnih deformacij. Povečevanje gostote materiala, še posebej pri drobljenih zrnih pomeni večjo odpornost proti nastanku trajnih deformacij. Pri manj zgoščenih kamnitih materialih pa so trajne deformacije večje. Zgoraj opisane trditve so lepo razvidne na sliki 5.2, saj 95 % zgoščenost po Proctorju izkazuje večje trajnostne deformacije kot pri 100 % zgoščenosti. Ta razlika je vidna predvsem z večanjem števila obremenitev.

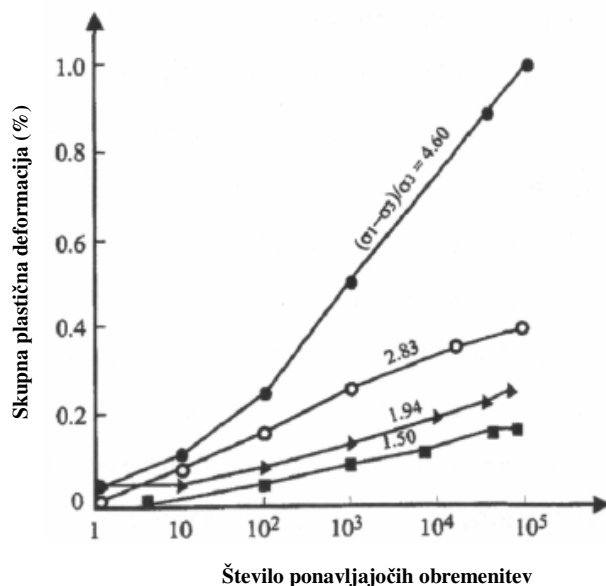


Slika 5.2: Vpliv zgoščenosti materiala na trajne deformacije (Bar, 72)¹³

5.3 Nivo napetosti

V preiskavah, kjer se uporabljajo ciklični triosni aparati, je napetostno stanje opisano z razmerjem normalne napetosti p in deviatorične napetosti q . Raziskave so pokazale, da se trajne deformacije povečujejo z naraščanjem količnika napetosti. V primeru naraščanja normalne napetosti p , pa se trajne deformacije zmanjšujejo.

¹³ Barksdale R. D., Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. Proceeding of 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, str. 161- 174, 1972.

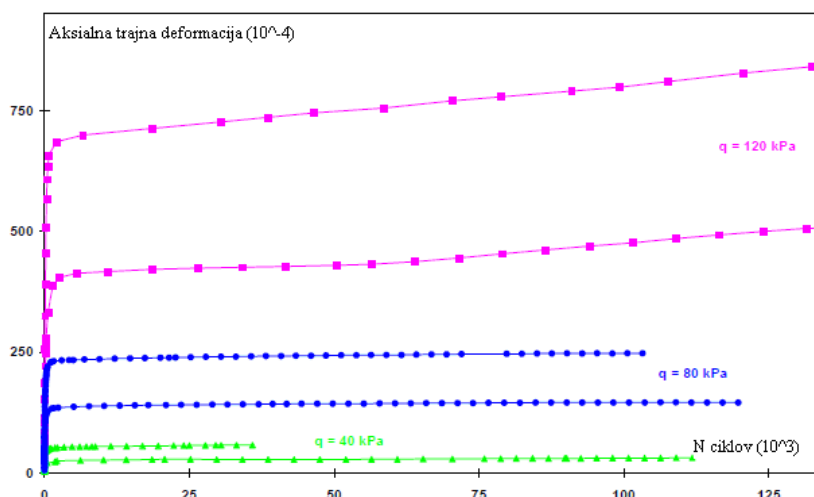


Slika 5.3: Vpliv nivoja napetosti na trajne deformacije (Bar, 72)¹⁴

5.4 Število ciklov obremenjevanja

Samo število ciklov obremenjevanja ne vpliva na odpornost na trajne deformacije, ampak gre za kombinacijo števila obremenitev in napetosti. Ponavadi se v nevezanih plasteh voziščne konstrukcije pojavijo takšni nivoji napetosti, kjer trajne deformacije v prvih nekaj tisoč cikličnih obremenitvah naraščajo zelo hitro, potem pa se začno stabilizirati. Pri višjih napetostih pa trajne deformacije presežejo vrednost, ki označuje stabilno stanje in posledično pride do porušitve.

¹⁴ Barksdale R. D., Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. Proceeding of 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, str. 161- 174, 1972.



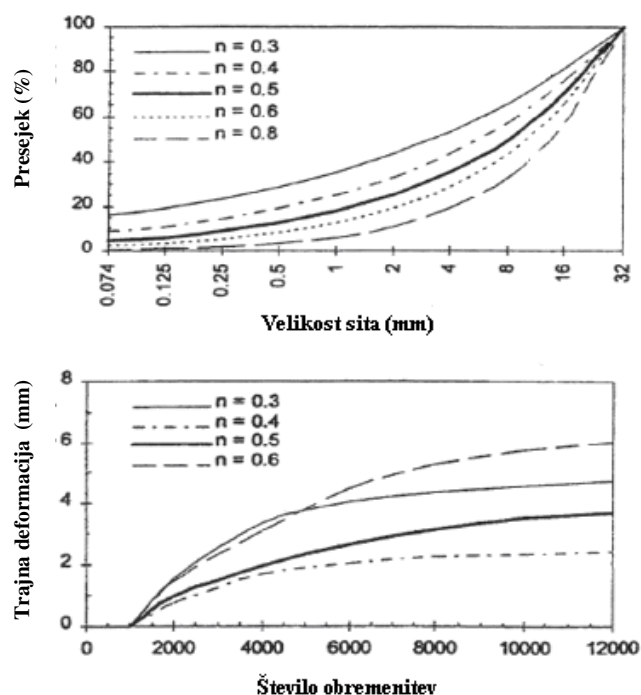
Slika 5.4: Razvoj trajnih deformacij s številom cikličnih obremenitev za različne nivoje deviatoričnih napetosti (Martinez, 1980)¹⁵

5.5 Sestava

Če se presejalna krivulja oziroma sestava spremeni v smeri, da se poveča relativna gostota materiala, potem se odpornost materiala na trajne deformacije povečuje. Predvsem je to zelo opazno pri materialih z neenakomerno sestavo oziroma pri izrazito drobno zrnatih materialih (npr. $d < 0,074$ mm) ali pri materialih z zelo nizko vsebnostjo finih zrn.

Slika 5.5 prikazuje trajne deformacije drobljenega kamnitega materiala apnenca v odvisnosti od različnih presejnih krivulj. V primeru, da imamo v sestavi veliko vsebnost finih zrn ($n = 0,3$) ali skeletno sestavo, kje je prisotnih več grobih zrn ($n = 0,8$), potem so trajne deformacije s povečanjem števila obremenitev večje. To si lahko razlagamo s domnevo, da se pojavi pod določeno obtežbo prestrukturiranje oziroma premikanje zrn v sestavi zaradi nezapolnjenih votlin in drobljenja konic. Zato moramo za čim manjše trajne deformacije izbrati čim boljše razmerje med drobljenimi in nedrobljenimi zrnami kamnitega materiala.

¹⁵ Martinez J., Contribution au dimensionnement des chaussées souples, Comportement des matériaux et méthodes de calcul, *Thèse de Docteur-Ingénieur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes*, str. 311, 1980.



Slika 5.5: Vpliv presejnih krivulj kamnitih materialov na trajne deformacije (BEL, 97)¹⁶

5.6 Oblika zrn kamnitega materiala

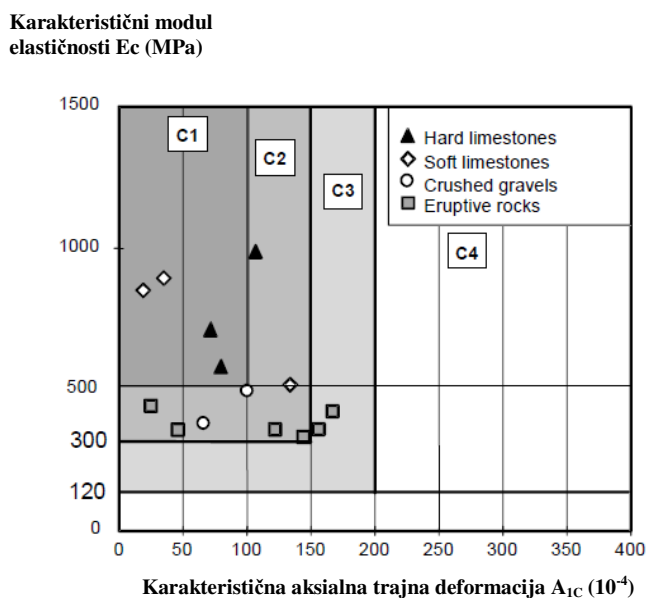
Poznamo dve osnovni obliki zrn: naravna in drobljena. Naravna zrna so zaobljena, njihova površina je gladka. Drobljena zrna pa imajo hrapavo površino in ostre konice. Zato imajo drobljena zrna večjo abrazijo, ki pripomore k manjšim trajnim deformacijam.

Hrapavost površine pa ločimo na fino in grobo. Fina hrapavost se bolje odziva na trajne deformacije kot groba, saj pri odporu sodeluje večja površina zrna, kar pomeni večje število manjših konic.

¹⁶ Belt J., Rynänen T, Ehrola E, Mechanical properties of unbound base course, Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, Vol. 1 str. 771-781, 1997.

5.7 Mineraloška sestava kamnin

Mineralogija materialov vpliva na obliko delcev, njihovo površinsko hrapavost, na kvaliteto finih delcev in občutljivost le teh v vodi. Vsi ti dejavniki vodijo do pomembnih razlik obnašanja vgrajenega materiala. Slika 5.6 predstavlja primerjavo mehanskih lastnosti nevezanih zrnatih materialov z različno mineralogijo. Prikazana je primerjava za naslednje materiale: trdi apnenec, mehki apnenec, drobljena eruptivna kamnina, drobljen gramoz. Vsi preizkušanci so bili testirani pri enaki relativni zgoščenosti (97 % zgoščenost po Proctorju) in pri enaki vsebnosti vode ($W_{\text{optimum}} - 2\%$). Primerjava temelji na dveh parametrih: na karakteristični vrednosti modula elastičnosti E_c , ugotovljene za referenčno vrednost napetosti ($p = 250 \text{ kPa}$, $q = 500 \text{ kPa}$) in pri karakteristični trajni aksialni deformaciji A_{1c} (dosežena po standardni obremenitvi). Rezultati so pokazali, da imajo apnenčasti materiali bistveno boljše karakteristike kot pa eruptivni materiali.



Slika 5.6: Klasifikacija nevezanih zrnatih materialov različnih izvorov glede na njihove mehanske lastnosti (elastični modul E_c in karakteristična trajna aksialna deformacija A_{1c}) (GID, 2001)¹⁷

¹⁷ Gidel G., Hornych P., Chauvin J.J., Breyse D., Denis A., Nouvelle approche pour l'étude des déformations permanentes des graves non traitées à l'appareil triaxial à chargements répétés, Bulletin des LPC n°233, pp 5-21, 2001.

5.8 Vpliv rotacij glavnih napetosti na tamponske plasti pod prometno obtežbo¹⁸

V voziščni konstrukciji je material podvržen premikajoči se obtežbi, zaradi katere se spreminjajo smeri glavnih napetosti. Trajne deformacije nevezanih plasti se pod vplivom dolgotrajne prometne obtežbe postopno povečujejo do neke asimptotične vrednosti, ki označuje stabilno stanje. Obtežba nad mejno vrednostjo pa povzroči povečanje trajnih deformacij in posledično porušitev. Glavni razlog za tovrstno deformiranje je rotacija glavnih napetosti, do katere pride ob vsakokratnem prehodu obtežbe. Z laboratorijskimi preiskavami je mogoče za posamičen material iz vrednotiti mejno velikost glavnih napetosti, katerih rotiranje bo material še ohranjalo v stabilnem stanju. Raziskave z uporabo votlega cilindričnega triaksialnega aparata so pokazale, da trajne deformacije z upoštevanjem rotiranja glavnih napetosti močno naraščajo (pri enaki vrednosti glavnih napetosti).

Laboratorijske preiskave, ki omogočajo rotiranje glavnih napetosti so preiskave s torzijskim triosnim aparatom s kombiniranim vertikalnim in torzijskim obremenjevanjem in preiskave s cikličnim triosnim aparatom s kombiniranim vertikalnim in bočnim obremenjevanjem.

Dinamični torzijski triosni aparat

Osnovna ideja aparata je v uporabi votlega preizkušanca, ki je med preiskavo torzijsko in osno obremenjen. S primerno izbiro razmerij med posameznimi dimenzijami preizkušanca (notranji in zunanji premer, notranja in zunanja višina) in z izbiro notranjega in zunanjega celičnega tlaka, je mogoče v preizkušancu vzpostaviti pogoje identične tistim v prostorsko obremenjeni zemljini. Zasnova preizkuševalnega aparata omogoča kontrolo nad glavnimi napetostmi in smerjo njihovega delovanja, kar omogoča izvedbo preiskav, ki jih s standardno opremo ni mogoče izvesti.

¹⁸ Povzeto po: Lenart S., Likar B., Uničujoč vpliv rotacij glavnih napetosti na temeljna tla in tamponske plasti pod prometno obtežbo, 10. SLOVENSKI KONGRES O CESTAH IN PROMETU, Portorož, 20. - 22. oktobra 2010

Kot α izračunamo s spodnjo enačbo.

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta}, \quad (5.1)$$

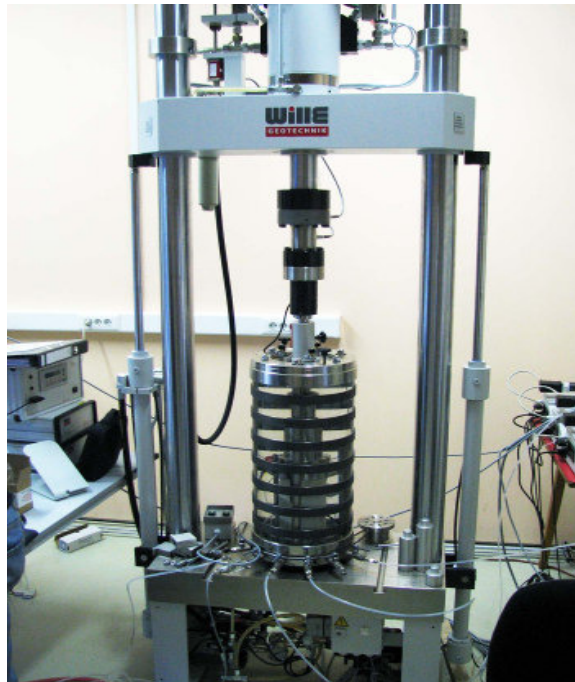
kjer je:

$\tau_{z\theta}$ - strižna napetost,

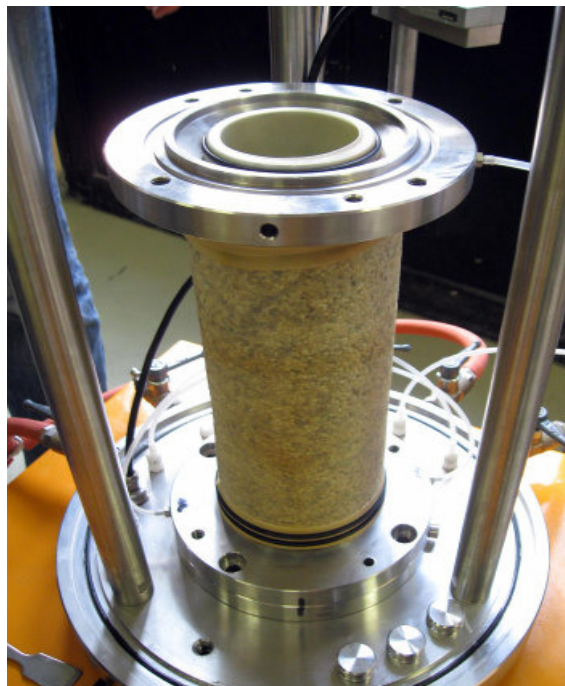
σ_z - vertikalna napetost,

σ_θ - obodna napetost.

S primernim razmerjem med velikostmi omenjenih napetosti lahko dosežemo poljubno smer glavnih napetosti in s tem simuliramo njihovo rotiranje med delovanjem prometne obtežbe. Posebnost aparata je možnost kontinuiranega merjenja in kontrole deformacij v vertikalni (ϵ) in horizontalni (γ) smeri v velikostnem redu od 10^{-5} do 30%.



Slika 5.7: Dinamični torzijski triosni aparat na Zavodu za gradbeništvo Slovenije



Slika 5.8: Votel vzorec za torzijske triosne preiskave

Ciklični triosni aparat

V osnovi je ciklični triosni aparat namenjen preiskavam nevezanih agregatov za voziščne konstrukcije. Od običajnih triosnih aparatov so preizkušanci v cikličnem triosnem aparatu večjih dimenzij, so v nezasičenem stanju, deformacije se merijo direktno na preizkušancih (lokalno) in ciklično obremenjevanje se vrši v vertikalni in bočni smeri.

Zaradi svoje zasnove (uporaba polnih vzorcev), kontroliranje smeri glavnih napetosti med preiskavami v cikličnem triosnem aparatu ni mogoče. Ciklične spremembe vertikalne in bočne obremenitve pa omogočajo kontrolirano ciklanje deviatorične napetosti izotropnega napetostnega stanja. V tem primeru maksimalna in minimalna glavna napetost izmenjujeta smeri, oziroma se smer glavnih napetosti spreminja iz 0 v 90° glede na vertikalno in obratno.



Slika 5.9: Ciklični triosni aparat na Zavodu za gradbeništvo Slovenije



Slika 5.10: Preizkušavec za ciklične triosne preiskave z nameščenimi lokalnimi merilci vertikalnih deformacij

6 VPLIV TRAJNIH DEFORMACIJ NEVEZANE PLASTI NA PRIMERU UPORABE MURSKIH PRODOV

6.1 Splošno o raziskovalni nalogi »Uporaba murskih prodiv za voziščne konstrukcije«

Namen raziskovalne naloge z naslovom »Uporaba murskih prodiv za voziščne konstrukcije«, ki je potekala v letih 2003 in 2004 je bil prikazati odvisnost med trajnimi deformacijami murskih prodiv, ki nastanejo pod vplivi dinamičnih obremenitev prometa in stopnjo predrobljenosti zrn. Rezultati preiskav, ki so prikazani v nadaljevanju so pokazali, da se s predrobljenjem murskih prodiv bistveno izboljšajo njihove lastnosti in odpornost proti nastanku trajnih deformacij. Odvisnost trajnih deformacij od deleža drobljenih zrn je mogoče matematično ovrednotiti. Identifikacija družine porušnih ovojníc pridobljenih na osnovi teh raziskav nam tako omogoča, da lahko za znano obremenitev določimo minimalen delež drobljenih zrn, ki jih mora murski prod za nevezano nosilno plast vsebovati, da bo ostal izven območja porušitve.

6.2 Laboratorijske preiskave

Program preiskav je bil zasnovan tako, da se najprej pridobijo podatki o trajnih deformacijah murskih prodiv v odvisnosti od deleža drobljenih zrn. Na podlagi teh podatkov se ovrednoti najnižji še dopustni delež drobljenih zrn v agregatu murskega prodiv za nevezane nosilne plasti pri katerem nastale trajne deformacije pod vplivi prometnih obremenitev ne bi imele uničujočih vplivov na voziščno konstrukcijo.

Za določitev vpliva predrobljenosti na trajne deformacije so bile preiskane štiri vrste murskega prodiv in sicer

- drobljen murski prod,

- mešanica drobljenega in nedrobljenega murskega v masnem razmerju 1 : 1,
- mešanica drobljenega in nedrobljenega murskega v masnem razmerju 1 : 2, in
- nedrobljen murski prod.

Poleg preiskav trajnih deformacij izvedenih s cikličnimi triosnimi preiskavami so bili na vseh štirih vrstah materialov narejeni še testi za določitev osnovnih karakteristik. Tako jim je bila določena zrnastostna sestava, optimalna vlažnost, maksimalna gostota in vsebnost drobljenih zrn nad 2 mm.

6.3 Določitev trajnih deformacij

Določitev trajnih deformacij je potekalo v skladu s standardom NF P98-235-1.¹⁹ Preizkušanci so bili pripravljene pri vlažnosti, ki je za 2 % nižja od optimalne vlažnosti in pri zgoščenosti, ki predstavlja 97 % maksimalne suhe zgoščenosti. Preizkušanci so bili izpostavili različnim nivojem napetosti z 80000 cikli obremenitev.

Program preizkušanja za posamezni vzorec je podan v preglednici 1.

Tabela 6.1: Program preizkušanja za posamezni vzorec

Vzorec	Napetostna pot	Predvideno število ciklov	σ_3		q	
			min kPa	max kPa	min kPa	max kPa
drobljen prod (D = 87,7 m.-%)	B2	80000	0	100	0	60
	C2	80000	0	100	0	150
	C4	80000	0	250	0	375
	D2	80000	0	100	0	300
	E2	80000	0	60	0	360
	E3	80000	0	83,3	0	500
	E4	80000	0	100	0	600

¹⁹ NF P98-235-1; "Essais relatifs aux chaussées - Matériaux non traités - Partie 1: essai triaxial à chargements répétés", AFNOR, 1995

mešanica drob. + nedrob. = 1 + 1	B2	80000	0	100	0	60
	C2	80000	0	100	0	150
	D2	80000	0	100	0	300
	E2	80000	0	60	0	360
	E3	80000	0	83,3	0	500
mešanica drob. + nedrob. = 1 + 2	B2	80000	0	100	0	60
	C2	80000	0	100	0	150
	D2	80000	0	100	0	300
	E2	80000	0	60	0	360
nedrobljen prod (D = 10,0 m.-%)	B2	80000	0	100	0	60
	C2	80000	0	100	0	150
	D2	80000	0	100	0	300
	E2	80000	0	60	0	360

6.4 Trajne deformacije in število ciklov obremenitve

Odnos med razvojem trajnih deformacij in številom ciklov obremenitev nam omogoča vpogled v dolgoročno obnašanje materiala in dobro napoved trajnih deformacij voziščne konstrukcije. V ta namen se uporablja zveza

$$\varepsilon_1^{p*} = A \left(1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right), \quad (6.1)$$

v kateri je ε_1^{p*} normalizirana aksialna trajna deformacija pri številu ciklov večjem od 100 in jo izračunamo iz enačbe (6.1), kjer N pomeni število ciklov ter A in B regresijska parametra.

$$\varepsilon_1^{p*}(N) = \varepsilon_1^p(N) - \varepsilon_1^p(100), \quad (6.2)$$

kjer je $\varepsilon_1^p(N)$ aksialna trajna deformacija pri N ciklih.

Skladno z enačbo (6.2) gre torej $\varepsilon_1^{p^*}$ proti limitni vrednosti, ki je enaka A, ko število ciklov N narašča proti neskončnosti. Parameter A torej predstavlja limito trajnih aksialnih deformacij. Izraz je ustrezen le, če velja pogoj

$$0 < A \leq 2\varepsilon_1^{p^*} (20000) \quad (6.3)$$

Če je $A > 2\varepsilon_1^{p^*} (20000)$ ali $A < 0$, potem ostane parameter B nedoločen in za A se uporabi vrednost $2\varepsilon_1^{p^*} (20000)$.

6.5 Trajne deformacije in napetost

Raziskave so pokazale, da je eden najpomembnejših faktorjev, ki vplivajo na nastanek trajnih deformacij nivo napetosti oziroma neke vrste napetostno razmerje. Maksimalna aksialna deformacija oziroma parameter A se spreminja z razmerjem maksimalnih strižnih napetosti $q_{\max} / (p_{\max} - p^*)$ v hiperbolični odvisnosti, ki jo podaja enačba (6.4). Iz enačbe vidimo, da se s povečanjem razmerja maksimalnih strižnih napetosti poveča tudi parameter A.

$$A = \frac{\frac{q_{\max}}{(p_{\max} + p^*)}}{a - b \frac{q_{\max}}{(p_{\max} + p^*)}} \quad (6.4)$$

kjer je:

A limita trajnih aksialnih deformacij,

q_{\max} maksimalni deviator napetosti,

p_{\max} maksimalna srednja normalna napetost,

p^* napetostni parameter,

a, b regresijska parametra.

Parametri a, b in p^* se določijo iz eksperimentalnih podatkov po metodi najboljšega ujemanja.

Dobljene vrednosti a, b in p^* nam omogočajo določitev parametrov porušne ovojnice M in S , če privzamemo, da za porušno ovojnico v $p - q$ prostoru velja

$$q = Mp + S$$

Parametra M in S izračunamo iz enačb:

$$M = a / b \text{ in}$$

$$S = p^* M$$

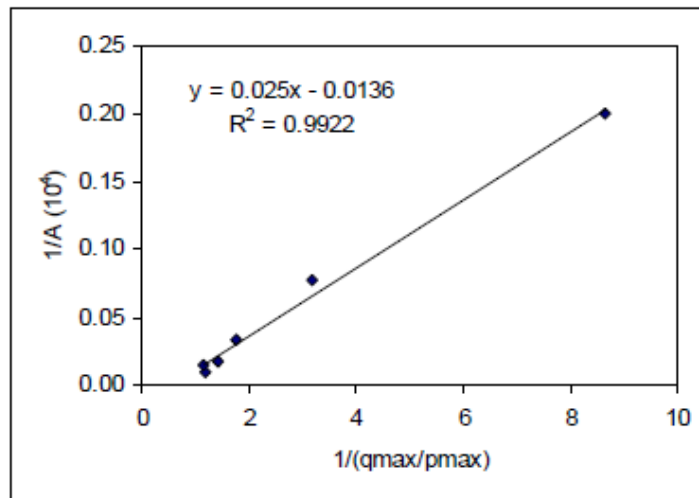
Takšne zveze nam omogočajo oceno trajnih deformacij nevezane plasti voziščne konstrukcije.

Izbira začetnih parametrov a in b sloni na matematični metodologiji preverbe ustreznosti empiričnih obrazcev, pri čemer za vrednosti $q_{\max} / (p_{\max} - p^*)$, kjer je p^* postavljena na nič, vrednosti parametra A izračunamo iz obratne vrednosti ter preverimo, ali je odvisnost linearna. Kot začetni parameter a izberemo smerni koeficient k premice v odvisnosti

$$\frac{1}{A} = k \frac{1}{q_{\max} / (p_{\max} + p^*)} + n$$

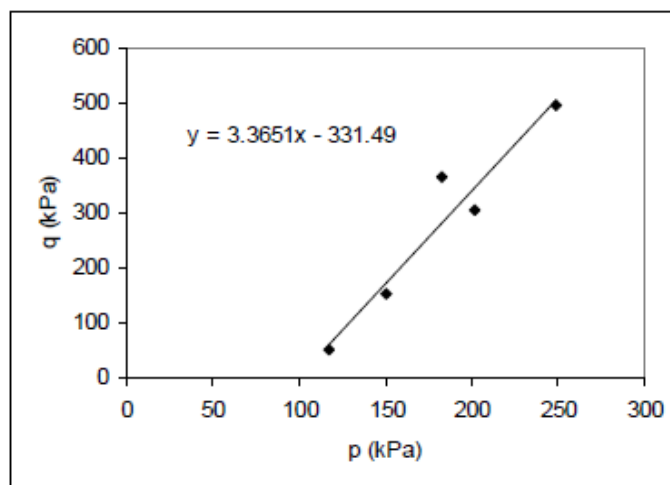
pri čemer je $p^* = 0$.

Kot parameter b izberemo odsek premice na osi $1/A$. Grafično si to lahko ogledamo na sliki 6.1.

Slika 6.1: Izbira parametrov a in b

V tem primeru je bil začetni parameter $a = 1,061$ in $b = -0,0369$.

Za izbiro začetnega parametra p^* poiščemo linearno odvisnost med izmerjenimi vrednostmi q_{max} in p_{max} in izberemo absolutno vrednost odseka na q osi. Primer določitve začetnega parametra p^* je prikazan na diagramu 6.2.

Slika 6.2: Izbira začetnega parametra p^*

Tako bi bil v tem primeru začetni parameter p^* enak vrednosti 331,49.

V sam model je bilo potrebno dodati tudi pogoja, da so vsi izračunani parametri pozitivna števila in da parameter p^* ne sme preseči začetne vrednosti.

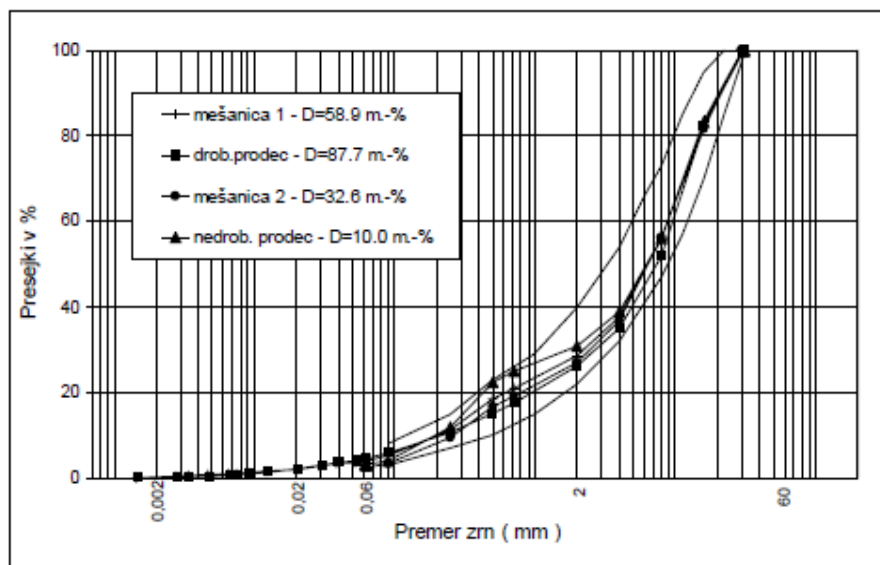
Na podlagi takšne izbire začetnih parametrov in podanih omejitev je računski sistem stabilen in ponovljiv.

6.6 Rezultati preiskav

Osnovne karakteristike uporabljenih agregatov so podane v tabeli 6.2, njihova zrnavostna sestava pa je prikazana na sliki 6.3.

Tabela 6.2: Osnovne karakteristike uporabljenih agregatov

Vzorec	Zrnavost				Delež drobljenih zrn nad 2 mm	Proctorjev preizkus	
	C_u	C_c	< 0,02 mm (m.- %)	< 0,063 mm (m.- %)	D (m.- %)	W_{opt} (m.-%)	$\rho_{d\ max}$ (kg/m ³)
drobljen murski prod	45,0	3,5	2,1	4,6	87,7	5,51	2240
mešanica 1 drob. + nedrob. = 1 + 1	44,4	2,8	2,1	4,1	58,9	4,80	2266
mešanica 2 drob. + nedrob. = 1 + 2	34,0	2,6	–	2,4	32,6	3,80	2253
nedrobljen murski prod	45,0	1,8	–	3,2	10,0	4,98	2248



Slika 6.3: Zrnavostna sestava vzorcev

Rezultati posameznih preiskav določitve trajnih deformacij so zbrani v tabelah 6.4, 6.6, 6.8, 6.10. Dobljene vrednosti so za vsak vzorec obdelane po hiperboličnem modelu (enačba 6.4), ki povezuje trajne deformacije in napetost.

Tabela 6.3: Rezultati določitve trajnih deformacij za drobljen prod

Vzorec	Oznaka	ρ_d/ρ_{dmax} (%)	W-W _{opt} (m.-%)	P _{min} (kPa)	P _{max} (kPa)	Q _{min} (kPa)	Q _{max} (kPa)
Drobljen prod	P1273B21	95.1	-1.91	3.1	119.8	7.6	64.9
	P1273C21	97.3	-1.91	2.6	148.2	6.8	150.8
	P1273C41	96.1	-1.91	4.2	366.2	10.3	370.8
	P1273C42	96.9	-1.91	2.7	368.7	5.6	375.5
	P1273D21	96.7	-1.91	3.3	202.4	8.8	305.6
	P1273E21	97.5	-1.91	4.2	176.3	12.1	351.5
	P1273E31	96.3	-1.91	4.8	243.6	13.9	485.9
	P1273E41	97.5	-1.97	4.3	296.9	13.8	589.2

Tabela 6.4: Rezultati določitve trajnih deformacij za drobljen prod

Vzorec	Oznaka	$\varepsilon_1^{p*}(20000)$ (10^{-4})	$\varepsilon_1^{p*}(80000)$ (10^{-4})	A (10^{-4})	B
Drobljen prod	P1273B21	7	8	13	
	P1273C21	6	7	11	
	P1273C41	42	!!	84	
	P1273C42	32	!!	64	
	P1273D21	20	28	41	
	P1273E21	44	56	88	
	P1273E31	118	141	236	
	P1273E41	88	106	177	

Opomba: !! preiskava prekinjena po 20000 ciklih zaradi poškodbe membrane.

Tabela 6.5: Rezultati določitve trajnih deformacij za mešanico drobljenega in nedrobljenega proda v masnem razmerju 1:1

Vzorec	Oznaka	ρ_d / ρ_{dmax} (%)	$w - w_{opt}$ (m.-%)	p_{min} (kPa)	p_{max} (kPa)	q_{min} (kPa)	q_{max} (kPa)
drobljen + nedrob. prod 1 + 1	PM11B21	97.5	-1.95	2.2	116.9	3.6	51.8
	PM11C21A	95.6	-1.95	2.9	150.9	8.0	152.7
	PM11D21	96.6	-1.94	2.8	201.2	8.5	305.1
	PM11E21	96.2	-1.95	4.1	182.4	11.3	366.1
	PM11E31	96.6	-2.05	4.3	248.9	13.6	496.4
	PM11E31A	96.7	-2.02	5.2	252.2	14.7	508.5

Tabela 6.6: Rezultati določitve trajnih deformacij za mešanico drobljenega in nedrobljenega proda v masnem razmerju 1:1

Vzorec	Oznaka	$\varepsilon_1^{P^*}(20000)$ (10^{-4})	$\varepsilon_1^{P^*}(80000)$ (10^{-4})	A (10^{-4})	B
drobljen + nedrob. prod 1 + 1	PM11B21	2	4	5	
	PM11C21A	6	10	13	
	PM11D21	15	20	30	
	PM11E21	28	34	56	
	PM11E31	56	66	112	
	PM11E31A	41	48	70	0.17

Tabela 6.7: Rezultati določitve trajnih deformacij za mešanico drobljenega in nedrobljenega proda v masnem razmerju 1:2

Vzorec	Oznaka	ρ_d / ρ_{dmax} (%)	$w - w_{opt}$ (m.-%)	p_{min} (kPa)	p_{max} (kPa)	q_{min} (kPa)	q_{max} (kPa)
drobljen + nedrob. prod 1 + 2	PM21B2	96.4	-1.97	2.8	118.2	7.5	58.1
	PM21C2	97.3	-2.00	1.9	149.6	8.1	153.0
	PM21D2	95.5	-2.00	3.7	201.0	8.5	305.7
	PM21E2	96.7	-2.00	4.3	176.1	10.1	347.8

Tabela 6.8: Rezultati določitve trajnih deformacij za mešanico drobljenega in nedrobljenega proda v masnem razmerju 1:2

Vzorec	Oznaka	$\varepsilon_1^{P^*}(20000)$ (10^{-4})	$\varepsilon_1^{P^*}(80000)$ (10^{-4})	A (10^{-4})	B
drobljen + nedrob. prod 1 + 2	PM21B2	4	5	7	
	PM21C2	8	11	16	
	PM21D2	76	85	102	0.12
	PM21E2	136	146	213	0.18

Tabela 6.9: Rezultati določitve trajnih deformacij za nedrobljen prod

Vzorec	Oznaka	ρ_d / ρ_{dmax} (%)	$w - w_{opt}$ (m.-%)	p_{min} (kPa)	p_{max} (kPa)	q_{min} (kPa)	q_{max} (kPa)
nedrobljen prod	PN1273B2	97.1	-2.00	3.5	121.2	8.0	59.8
	PN1273C2	97.0	-2.00	3.0	150.8	9.5	154.5
	PN1273D2	97.8	-2.00	3.3	201.6	7.9	301.7
	PN1273E2	97.8	-2.00	2.4	166.6	8.8	324.4

Tabela 6.10: Rezultati določitve trajnih deformacij za nedrobljen prod

Vzorec	Oznaka	$\varepsilon_1^{p*}(20000)$ (10^{-4})	$\varepsilon_1^{p*}(80000)$ (10^{-4})	A (10^{-4})	B
nedrobljen prod	PN1273B2	6	8	12	
	PN1273C2	6	9	13	
	PN1273D2	28	34	59	0.12
	PN1273E2	#	#	676 (#1505)	#

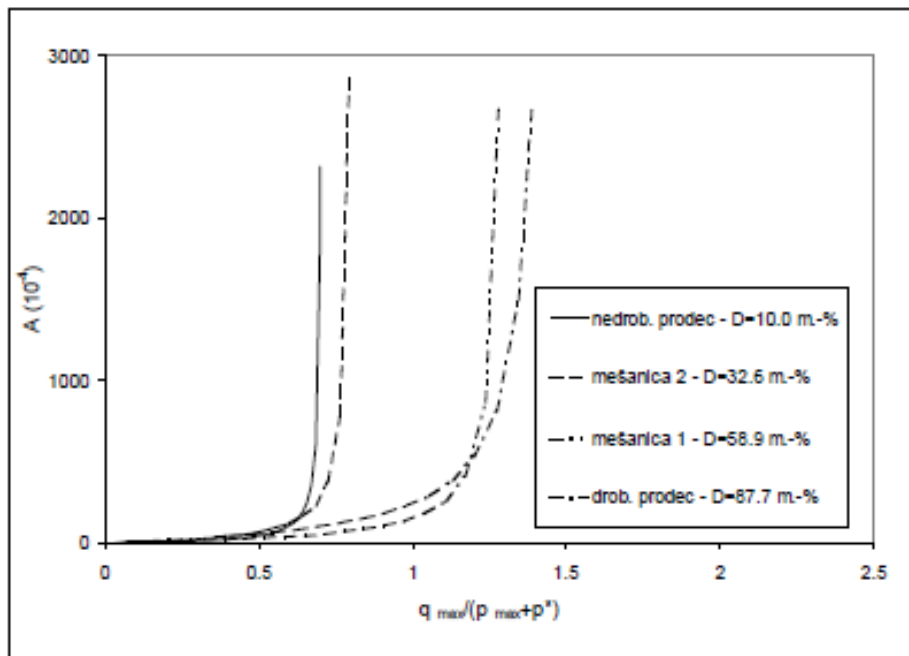
Opomba: # preiskava prekinjena zaradi porušitve.

Za določitev parametrov modela za vsako vrsto materiala posebej je uporabljena kombinacija metode najmanjših kvadratov in Newtonove tangentne metode.

Rešitev hiperboličnega modela nam da parametre a , b in p^* . Na osnovi pridobljenih parametrov modela je mogoče izračunati parametre porušne ovojnice preiskovanega materiala. Parameter M predstavlja naklon porušne ovojnice, parameter S pa odsek od izhodišča koordinatnega sistema v $p - q$ prostoru do presečišča porušne ovojnice s q osjo.

Tabela 6.11: Rezultati rešitve modela

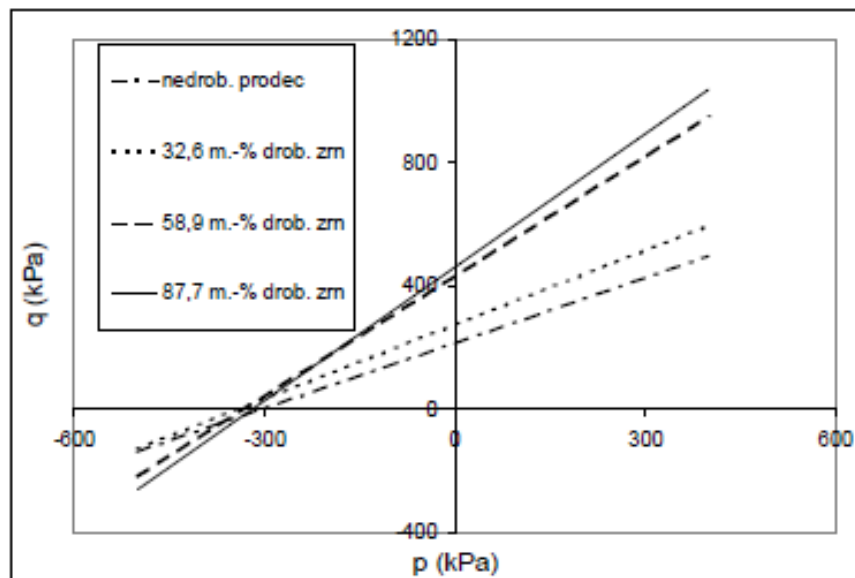
Vzorec	drobljen prod	mešanica drob. + nedrob. = 1 + 1	mešanica drob. + nedrob. = 1 + 2	nedrobljen prod
delež drob.zrn D (m.- %)	87.7	58.9	32.6	10.0
vлага w (m.- %)	w _{opt} - 2	w _{opt} - 2	w _{opt} - 2	w _{opt} - 2
parametri modela	a	0.00135	0.02868	0.03778
	b	0.00936	0.02204	0.05353
	p* (kPa)	317.80	331,50	339.20
M	1.442	1.301	0.805	0.706
S (kPa)	458.1	431.4	273.1	212.5



Slika 6.4: Grafični prikaz rešitve modela za preiskane vzorce

6.7 Analiza rezultatov

Parametra M in S določena v okviru preiskanih trajnih deformacij predstavljata parametra porušne ovojnice v p – q prostoru posameznega vzorca, kar je grafično prikazano na sliki 6.5.



Slika 6.5: Porušne ovojnice preiskovanih materialov v p – q prostoru

Dobljene porušne ovojnice predstavljajo družino premic v p – q prostoru. Smerni koeficient M, kot tudi odsek na q osi S, se povečujeta s povečanjem deleža drobljenih zrn pri enaki vlažnosti glede na optimalno vlažnost preiskovanega materiala.

Med odvisnosti parametra M in S od deleža drobljenih zrn v frakciji nad 2 mm (diagram 6.6) je opaziti veliko podobnost zato ju je mogoče matematično ovrednotiti. Enačba je oblike

$$y = \frac{1}{P_{y1}} * Arsh(x - P_{y2}) + P_{y3}$$

kjer so P_{y1} , P_{y2} in P_{y3} parametri.

Tako so enačbe sledeče oblike:

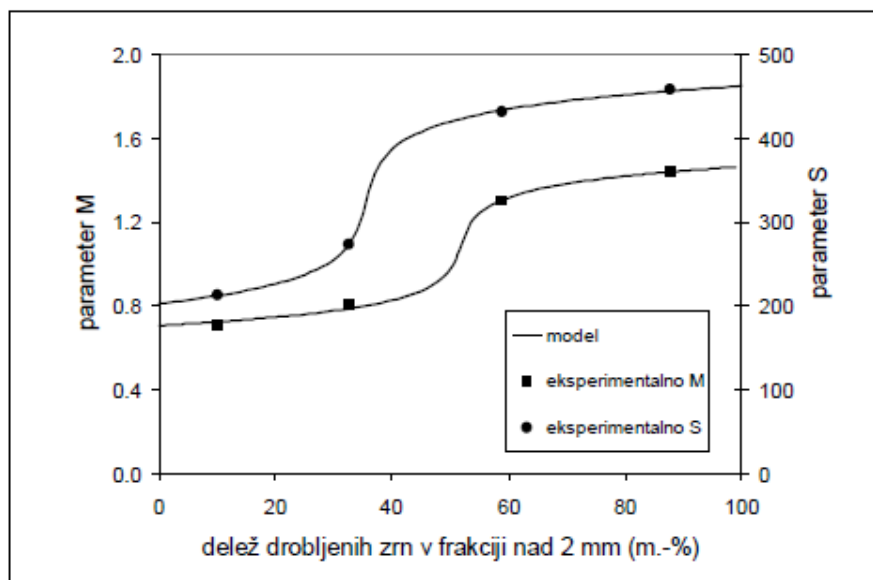
$$M = \frac{1}{P_{M1}} * Arsh(D - P_{M2}) + P_{M3}$$

$$S = \frac{1}{P_{S1}} * Arsh(D - P_{S2}) + P_{S3}$$

kjer so:

M in S	parametra porušne ovojnice
D	delež drobljenih zrn v %
P_{M1}, P_{M2} in P_{M3}	parametri funkcije za določitev M
P_{S1}, P_{S2} in P_{S3}	parametri funkcije za določitev S

S pomočjo metode najmanjših kvadratov in Newtonove tangentne metode so tako določeni parametre P v vsaki funkciji. Ujemanje izračunane funkcije in eksperimentalnih podatkov je razvidno na sliki 6.6.



Slika 6.6: Odvisnost parametra M in S od deleža drobljenih zrn

Na podlagi zgoraj izpeljanih enačb lahko za vsak delež drobljenih zrn določimo porušno premico v p - q prostoru in obratno za izbrane parametre porušne ovojnice določimo delež drobljenih zrn. Tako lahko na podlagi predvidenih napetosti p in q v nevezani nosilni plasti izberemo parametra porušitvene ovojnice in s tem kritično vrednost deleža drobljenih zrn za te pogoje.

7 SKLEP

V prvem delu diplomske naloge smo prikazali postopek dimenzioniranja voziščne konstrukcije z uporabo tehničnih specifikacij. Izbrali smo odsek avtoceste, ki je obremenjen z izredno težko prometno obremenitvijo. Dimenzioniranje je dokaj enostavno, saj moramo biti pozorni le na dva pogoja. Zadoščeno mora biti debelinskemu in zmrzinskemu pogoju. Materiale, ki bodo sestavljali voziščno konstrukcijo, pa smo izbrali glede na predhodne izkušnje in njihove lastnosti. Voziščna konstrukcija bo sestavljena iz 20 cm debele asfaltne plasti in 50 cm debele tamponske plasti. Zaradi izredno težke prometne obremenitve smo na vrhu tamponske plasti izvedli cementno stabilizacijo.

Za prikaz napetostno deformacijskega stanja v nevezani nosilni plasti voziščne konstrukcije smo dimenzije voziščne konstrukcije, ki smo jih dobili z uporabo tehničnih specifikacij, uporabili v geotehničnem programu Plaxis. Najprej smo oblikovali geometrijo modela voziščne konstrukcije, nato definirali obtežbo in karakteristike različnih plasti. Zaradi premikajoče se obtežbe, ki jo predstavljajo vozeča vozila, uporabimo dinamično obtežbo in kasneje dinamično analizo. Uporabimo vertikalno harmonično obtežbo s frekvenco 2 Hz in amplitudo 1000 kPa. Dobljeni rezultati veljajo za en cikel obremenjevanja. Da pa so rezultati realni tistim na terenu, smo naredili primerjavo. Vertikalne napetosti v nevezani nosilni plasti na terenu so bile približno enake tistim napetostim, ki smo jih izračunali s pomočjo programa Plaxis. Tako smo prišli do zaključka, da smo korektno definirali tako geometrijo modela voziščne konstrukcije kot tudi karakteristike različnih materialov.

Kljub temu, da smo pravilno dimenzionirali voziščno konstrukcijo z uporabo tehničnih specifikacij in nato dobili realne rezultate napetostno deformacijskega stanja v nevezani nosilni plasti po metodi končnih elementov, ne vemo, kaj se bo dolgoročno dogajalo z voziščno konstrukcijo. Ker tehnične specifikacije (TSC) ne obravnavajo trajnih deformacij, je pri načrtovanju voziščne konstrukcije pomembno, da se analizira odpornost vgrajenih materialov na ponavljajočo se prometno obtežbo pri določenih pogojih debeline

konstrukcije, obtežbe, vlažnosti, zgoščenosti, itd. Zato so za analizo potrebne natančne raziskave materialov in kasneje različne tehnike izračuna trajnih deformacij. Potrebno je poznavanje dejavnikov, ki vplivajo na trajne deformacije v voziščni konstrukciji. S podrobnim poznavanjem in prilagajanjem teh lastnosti lahko zmanjšamo vpliv na nastanek trajnih deformacij v nevezani nosilni plasti oziroma posledično na nastanek kolesnic v vezanih plasteh. Na primeru uporabe murskih prodov v nevezani nosilni plasti smo prikazali vpliv predrobljenosti zrn proda na nastanek trajnih deformacij. Namen analize cikličnih triosnih preizkusov je bil podati napoved razvoja normaliziranih osnih trajnih deformacij ε_1^p glede na število obtežnih ciklov N in prikazati pripadajoče napetostno stanje med cikličnim obremenjevanjem. Rezultati so pokazali, da se s pravilnim deležem drobljenih zrn bistveno izboljša odpornost proti nastanku trajnih deformacij.

Da bo voziščna konstrukcija v času uporabnosti v čim večji meri zagotavljala varno, udobno in gospodarno vožnjo, je bistveno poznavanje dejavnikov, ki vplivajo na nastanek trajnih deformacij. Na primeru murskih prodov se z relativno lahkim postopkom predrobljenja lastnosti materialov bistveno izboljšajo. Ni dovolj dejstvo, da se pri dimenzioniranju voziščne konstrukcije upošteva samo določene pogoje in standarde ter da se večinoma dimenzionira glede na predhodne izkušnje, potrebno je iskati izboljšave tako pri materialih kot pri sami vgradnji.

8 VIRI, LITERATURA

- [1] Žmavc J., Voziščne konstrukcije, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2007.
- [2] Trauner R., Tehnologija izvedbe voziščne konstrukcije na AC Slivnica – Draženci, sklop > C <, Diplomsko delo, Celje, Fakulteta za gradbeništvo, 2009.
- [3] Majhen B., Cementna stabilizacija na primeru AC Lendava – Pince, Diplomsko delo, Maribor, Višja strokovna šola Akademija, 2009.
- [4] Šalamun M., Kontrola vlečne naprave za osebna vozila, Diplomsko delo, Maribor, Fakulteta za strojništvo, 2009
- [4] Zavod za gradbeništvo in Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Uporaba murskih prodov za voziščne konstrukcije, Ljubljana, Razvojno raziskovalna naloga, 2004.
- [5] Hribar D., Vplivi trajnih deformacij v nevezani nosilni plasti voziščne konstrukcije, Ljubljana, Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o., Center za prometnice.
- [6] Correira A.G., Petkovšek A., Mehanski učinki nekaterih značilnih granuliranih materialov za ceste v Evropi, 5. SLOVENSKI KONGRES O CESTAH IN PROMETU, Bled, 25. - 27. oktobra 2000.
- [7] Lenart S., Likar B., Uničujoč vpliv rotacij glavnih napetosti na temeljna tla in tamponske plasti pod prometno obtežbo, 10. SLOVENSKI KONGRES O CESTAH IN PROMETU, Portorož, 20. - 22. oktobra 2010.
- [8] Lutar B., Duhovnik J., Metoda končnih elementov za linijske konstrukcije, Maribor, Fakulteta za gradbeništvo, 2004.
- [9] SAMARIS, Selection and evaluation of models for prediction of permanent deformations of unbound granular materials in road pavements, 2004.

- [10] Dawson A. R., Introduction to soils and granular materials, Lecture notes from Residential Course, Bituminous Pavements - materials, design and evaluation, Department of Civil Engineering, University of Nottingham, 1990.
- [11] Korkiala - Tantu L., Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials, Helsinki, 2008.
- [12] Barksdale R. D., Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. Proceeding of 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, str. 161- 174, 1972.
- [13] Martinez J., Contribution au dimensionnement des chaussées souples, Comportement des matériaux et méthodes de calcul, *Thèse de Docteur-Ingénieur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes*, str. 311, 1980.
- [14] Belt J., Rynnänen T, Ehrola E, Mechanical properties of unbound base course, Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle , Vol. 1 str. 771-781, 1997.
- [15] Zhong W., XingWei C., Finite Element Simulation of Permanent Deformation on Flexible Pavements, Louisiana Transportation Conference, 8.-11. Feb. 2009.
- [16] Gidel G., Hornych P., Chauvin J.J., Breysse D., Denis A., Nouvelle approche pour l'étude des déformations permanentes des graves non traitées à l'appareil triaxial à chargements répétés, Bulletin des LPC n°233, pp 5-21, 2001.
- [17] Lekarp F., Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials. Licentiate Thesis, Kungliga Tekniska Högskolan, ISSN 1104-683X, str. 78, 1997.
- [18] NF P98-235-1; "Essais relatifs aux chaussées - Matériaux non traités - Partie 1: essai triaxial à chargements répétés", AFNOR, 1995
- [19] PLAXIS 2D, Version 8 manual, In: Brinkgreve R.B.J, editors. AA Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2002.
- [20] PLAXIS 3D Foundation, version 2. In: Brinkgreve RBJ, Broere W, editors. AA Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2008.
- [21] SIST EN 13108, 1-8: 2003 Bitumenske zmesi - Specifikacije materialov - 1. do 8. del
- [22] SIST 1038, 1-8: 2006 Bituminizirane zmesi – Specifikacije materialov - 1. do 8. del

[23] SIST EN 13043: 2002 Agregati za bituminizirane zmesi in površinske prevleke za ceste, letališča in druge prometne površine

[24] SIST 1035: Bitumen in bitumenska veziva

[25] Tehnične specifikacije:

http://www.dc.gov.si/si/delovna_podrocja/ceste/tehnice_specifikacije_za_ceste/izdane_ts/

[26] Prometne obremenitve:

http://www.dc.gov.si/fileadmin/dc.gov.si/pageuploads/Promet/Prometne_obremenitve_2009v1.pdf

[27] <http://www.fg.uni-mb.si/journal-ags/2005-2/clanek-3.asp>

9 PRILOGE

9.1 Seznam slik

Slika 2.1: Primerjava elementov visoke in cestne zgradbe	4
Slika 2.2: Značilna utrditev sodobnega vozišča	5
Slika 4.1: Potek numerične analize	21
Slika 4.2: Deformacije linearno elastičnega in granuliranega materiala	22
Slika 4.3: Spreminjanje napetosti zaradi premikajoče obtežbe	23
Slika 4.4: Razmerje napetost – deformacija za različne materialne modele	24
Slika 4.5: Primer osnosimetričnega problema	26
Slika 4.6: Položaj vozlišč trikotnega elementa	26
Slika 4.7: Sestava triplastne voziščne konstrukcije	27
Slika 4.8: Prikaz standardnega vpetja in absorpcijskih mej voziščne konstrukcije	28
Slika 4.9: Generiranje mreže	30
Slika 4.10: Izbira parametrov za dinamično analizo	31
Slika 4.11: Dinamična obtežba	32
Slika 4.12: Grafični prikaz množitelja v odvisnosti od časa	32
Slika 4.13: Deformacija voziščne konstrukcije pod vplivom dinamične obtežbe	33
Slika 4.14: Spreminjanje vertikalnih pomikov v odvisnosti od časa	34
Slika 4.15: Grafični prikaz spreminjanja pomikov, napetosti in deformacij ($X=0$)	35
Slika 4.16: Grafični prikaz spreminjanja pomikov, napetosti in deformacij ($X=0.20$)	37
Slika 4.17: Grafični prikaz spreminjanja pomikov, napetosti in deformacij ($X=0.80$)	39
Slika 4.18: Spreminjanje vertikalnih napetosti v tamponskem sloju s programom Plaxis ..	41
Slika 4.19: Spreminjanje vertikalnih napetosti v tamponskem sloju na terenu	42
Slika 5.1: Občutljivost trajnih deformacij na vsebnost vode (DAW, 1990)	44
Slika 5.2: Vpliv zgoščenosti materiala na trajne deformacije	45
Slika 5.3: Vpliv nivoja napetosti na trajne deformacije (BAR, 72)	46

Slika 5.4: Razvoj trajnih deformacij s številom cikličnih obremenitev za različne nivoje deviatoričnih napetosti (Martinez, 1980).....	47
Slika 5.5: Vpliv presejnih krivulj kamnitih materialov na trajne deformacije (BEL, 97)...	48
Slika 5.6: Klasifikacija nevezanih zrnatih materialov različnih izvorov glede na njihove mehanske lastnosti (elastični modul E_c in karakteristična trajna aksialna deformacija A_{1c})	49
Slika 5.7: Dinamični torzijski triosni aparat na Zavodu za gradbeništvo Slovenije.....	51
Slika 5.8: Votel vzorec za torzijske triosne preskave	52
Slika 5.9: Ciklični triosni aparat na Zavodu za gradbeništvo Slovenije.....	53
Slika 5.10: Preizkušane za ciklične triosne preiskave z nameščenimi lokalnimi merilci vertikalnih deformacij.....	53
Slika 6.1: Izbira parametrov a in b	59
Slika 6.2: Izbira začetnega parametra p^*	59
Slika 6.3: Zrnastostna sestava vzorcev	61
Slika 6.4: Grafični prikaz rešitve modela za preiskane vzorce.....	65
Slika 6.5: Porušne ovojnice preiskovanih materialov v p – q prostoru	66
Slika 6.6: Odvisnost parametra M in S od deleža drobljenih zrn	67

9.2 Seznam tabel

Tabela 3.1: Upoštevana prometna obremenitev	16
Tabela 3.2: Izbira materialov voziščne konstrukcije	18
Tabela 3.3: Primerjava štirih mešanic proda	19
Tabela 4.1: Debeline posameznih slojev voziščne konstrukcije	27
Tabela 4.2: Vrednosti deformabilnih in trdnostnih parametrov različnih materialov	29
Tabela 4.3: Pomiki, napetosti in deformacije na različnih globinah simetrijske osi.....	35
Tabela 4.4: Deviatorične in normalne napetosti na različnih globinah simetrijske osi.....	36
Tabela 4.5: Pomiki, napetosti in deformacije v različnih točkah voziščne konstrukcije.....	37
Tabela 4.6: Deviatorične in normalne napetosti v različnih točkah voziščne konstrukcije	38
Tabela 4.7: Pomiki, napetosti in deformacije v različnih točkah voziščne konstrukcije.....	39
Tabela 4.8: Deviatorične in normalne napetosti v različnih točkah voziščne konstrukcije	40
Tabela 6.1: Program preizkušanja za posamezen vzorec	55
Tabela 6.2: Osnovne karakteristike uporabljenih agregatov	60

Tabela 6.3: Rezultati določitve trajnih deformacij za drobljen prod.....	61
Tabela 6.4: Rezultati določitve trajnih deformacij za drobljen prod.....	62
Tabela 6.5: Rezultati določitve trajnih deformacij za mešanico drobljenega in nedrobljenega proda v masnem razmerju 1:1.....	62
Tabela 6.6: Rezultati določitve trajnih deformacij za mešanico drobljenega in nedrobljenega proda v masnem razmerju 1:1.....	63
Tabela 6.7: Rezultati določitve trajnih deformacij za mešanico drobljenega in nedrobljenega proda v masnem razmerju 1:2.....	63
Tabela 6.8: Rezultati določitve trajnih deformacij za mešanico drobljenega in nedrobljenega proda v masnem razmerju 1:2.....	63
Tabela 6.9: Rezultati določitve trajnih deformacij za nedrobljen prod.....	64
Tabela 6.10: Rezultati določitve trajnih deformacij za nedrobljen prod.....	64
Tabela 6.11: Rezultati rešitve modela.....	65

9.3 Naslov študenta

Jernej Dolinšek

Laze 4

3320 Velenje

Tel.: +386 (0) 41 378 676

9.4 Kratek življenjepis

Rojen: 13.06.1985 Slovenj Gradec

Šolanje: 1992. – 2000. Osnovna šola Gustava Šiliha Velenje

2000. – 2004. Srednja šola, Tehniška gimnazija Velenje

2004. – 2011. Fakulteta za gradbeništvo Univerze v Mariboru